

УДК 622.411.33.043.3

д.т.н. Стариков Г. П.,
к.т.н. Шажко Я. В.,
к.ф.-м.н. Мельник Т. Н.,
Подрухин А. А.

(ГУ «ИФГП», г. Донецк, ДНР, ifgpdnr@mail.ru)

КИНЕТИКА ВЫДЕЛЕНИЯ МЕТАНА В ГЕОДИНАМИЧЕСКИ АКТИВНЫХ ЗОНАХ

В работе проведен теоретический анализ кинетики выделения метана на поверхности в геодинамически активных зонах (к примеру, в местах геологических нарушений). Получены зависимости давления газа в приповерхностных слоях от времени и близости к центру геодинамической зоны с учетом реальных горно-геологических параметров массива. Проведенный анализ составляет теоретическую основу метода прогнозирования темпа и интенсивности выделения метана на поверхности почвы над местами проведения горных работ и геологических нарушений.

Ключевые слова: геодинамическая зона, нарушение пласта, метан, газовыделение.

Проблема и ее практическая значимость. В современном структурном плане большая часть Донецкого угольного бассейна представляет собой эродированное Донецкое складчатое сооружение, где на уровень эрозионного среза выходят смятые в складки и нарушенные сбросами и надвигами (со сдвиговой компонентой смещения) позднепалеозойские, преимущественно каменноугольные отложения. Осадочная толща представлена разнообразным комплексом терригенных пород, среди которых в виде относительно маломощных слоев заключены пласты угля и известняка [1].

Распределение метана в горных породах не имеет четких закономерностей. Практика геологоразведочных работ показывает, что в ряде случаев происходит значительное газовыделение из скважин, иногда с катастрофическими последствиями. Горными выработками часто вскрывались отдельные ловушки, газ из которых выделялся на протяжении длительного периода времени. Ловушками в условиях Донбасса в основном служат флексуроподобные перегибы, купольные или тектонически экранированные зоны, которые часто прижимают к надвигам. Коллекторами выступают поровое или трещинно-поровое пространство.

Тектонической нарушенностью в той или иной мере затронуты все шахтные поля и обрабатываемые угольные пласты. Большинство случаев остановки, перенарезки лав или уменьшения их подвигания и, соответственно, добычи вызвано встреченными тектоническими нарушениями. При этом ни крупные или средние разрывы, ни первичная трещиноватость существенных осложнений не вызывают. Первые в своем большинстве выявляются еще на стадии геологоразведочных работ, негативное влияние первичной трещиноватости незначительно и нейтрализуется комплексом технологических мероприятий. Основную сложность и опасность представляют практически не выявляемые геологоразведочными работами мелкоамплитудные разрывы (с амплитудами до 10 м). Эта группа нарушений является наиболее многочисленной (от 80 до 95 % от общего количества разрывов). Именно их прогноз и своевременное выявление наиболее сложны и проблематичны.

Газодинамические явления (выбросы угля, породы и газа) являются важным фактором, осложняющим ведение горных работ. В работе [2] отмечена непосредственная связь этих явлений с мелкоамплитудной нарушенностью, независимо от того, что считают их основной причиной — газ или напряженное состояние горного массива.

Несомненно, существует пространственная и причинно-следственная связь сдвиговой тектоники и выбросов, которая может быть использована при составлении горно-геологических прогнозов [1]. Одним из методов, позволяющим локализовать возможные зоны проявления геодинамической активности в толще пород, проводя мониторинг на поверхности, является контроль газовыделения.

В связи с вышеизложенным *целью* настоящей работы является разработка теоретических основ прогнозирования темпа и интенсивности выделения метана на поверхности почвы в геодинамически активных зонах.

Объект исследования — интенсифицированный процесс выделения метана на поверхность почвы в геодинамически активных зонах.

Предмет исследования — закономерности кинетики выделения метана на поверхности над зонами геологических нарушений и пространственного распределения газа в горных породах в данных зонах.

Задачи исследования:

– получение теоретических оценок времени появления метана в приповерхностном слое почвы в геодинамически активных зонах и времени достижения его взрывоопасной концентрации;

– определение параметров, влияющих на скорость и интенсивность газовыделения, и степени их воздействия на протекание процесса.

Методика исследования. Выполнен теоретический анализ кинетики выделения метана на поверхности в геодинамически активных зонах (местах геологических нарушений). Массоперенос метана в геодинамической зоне представлен как диффузия по макроскопическому каналу (границе геологического нарушения), заключенному внутри породы с меньшей газопроницаемостью. Коэффициент диффузии заменен его эффективным аналогом, без уточнения конкретного механизма диффузионного и фильтрационного массопере-

носа. Получены зависимости давления газа в приповерхностных слоях от времени и близости к центру геодинамической зоны.

1. Накопление метана и его связь с прочностными свойствами углепородного массива. Объяснение факта повышенного газовыделения на поверхности над геодинамическими зонами можно получить на основании теоретического описания причин накопления газа в зонах геологических нарушений, представленного в [2]. О том, что такое накопление имеет место, известно и неоднократно отмечалось многими авторами [3, 4]. Зачастую геодинамические зоны представляют собой области интенсивных геологических нарушений (надвиги и т. д.) с хаотически перемешанной структурой (бывшей относительно упорядоченной, пластовой, до возникновения нарушения). При этом размер смещенных участков, сохранивших первоначальную структуру, может быть весьма большим и, несмотря на значительную глубину, на которой может находиться данный участок нарушения, его границы могут быть обнаружены и локализованы на поверхности. Естественно, физико-механические характеристики отдельных участков подобной зоны могут сильно различаться между собой. Как показано в [2], это влечет за собой и сильную дифференциацию термо- и газодинамических характеристик отдельных участков.

В [5] выведена удобная оценка, на сколько давление газа P на участке пласта, характеризующемся в силу различных причин пониженным модулем сдвига G , превышает давление на ненарушенном участке пласта P_∞

$$P - P_\infty \approx \frac{3P_\infty}{4G}(P_m - P_\infty), \quad (1)$$

где P_m — внешнее (горное) давление на пласт.

Причиной подобного локального уменьшения модуля сдвига может быть литология иного типа горной породы, слои которой сдвигаются и перемешиваются в

зонах геологических нарушений. Однако подобные локальные отклонения модуля сдвига от среднего по угольному пласту, геометрический размер которых сравним с мощностью пласта и намного меньше его простираения, не способны оказать существенное влияние на уровень газовыделения на поверхности, особенно если пласт располагается на большой глубине.

Газ скапливается в участках пласта с низким сопротивлением сдвигу и повышенной пористостью. В этих местах, по различным оценкам, давление метана может превышать среднее давление по пласту на 10–20 %. В условиях подземных разработок подобное превышение создает предпосылки для возникновения выбросоопасной ситуации, поскольку при ведении добычных работ целостность более прочной породы, ограничивающей естественно сформировавшийся газовый резервуар, нарушается. С другой стороны, в геодинамических зонах облегчен выход газа на поверхность, пусть даже этот процесс относительно малоинтенсивен в сравнении с выделением газа в выработанное пространство [6]. Таким образом, представляется возможной локализация трещин, геологических нарушений и иных геодинамических зон на поверхности по повышенному выделению метана. Причиной подобного явления следует с большой вероятностью считать более развитую систему пор и трещин, причем не локальную, а по всей глубине геодинамической зоны. С одной стороны, заметно повышенная пористость является удобным резервуаром для накопления метана под повышенным давлением [5]

$$P - P_{\infty} \approx \frac{3P_{\infty}}{4G} \frac{(\gamma - \gamma_{\infty})(P_m - P_{\infty})}{(1 - \gamma_{\infty})(1 - \gamma)}. \quad (2)$$

С другой стороны, степень развития системы пор и трещин, увеличение среднего диаметра пор и каналов приводит к перераспределению удельного веса различных механизмов массопереноса в пользу фильтрации, т. е. более быстрого перемещения молекул метана по направлению к поверхности. В

данном контексте «более быстрое» означает, что выделение метана на поверхности может быть замечено спустя месяцы после начала процесса, а не годы или десятилетия.

Точно описать зависимость поверхностного газовыделения от локализации подземных газовых резервуаров представляется затруднительным. К сожалению, модели, которые бы описывали взаимосвязь между упругими постоянными (с изменением которых связано накопление газа в определенной зоне) и такими характеристиками реальных материалов, как пористость и газопроницаемость, также отсутствуют.

Тем не менее можно применить существующий на данный момент теоретический аппарат для анализа экспериментальных данных, свидетельствующих о повышенном содержании и выделении метана в приповерхностных слоях пород, находящихся в геодинамических зонах [7].

2. Кинетика газовыделения на поверхности геодинамически активных зон. С точки зрения теории массопереноса выделение метана в геодинамической зоне можно представить как диффузию по макроскопическому каналу (границе геологического нарушения), заключенному внутри породы с меньшей газопроницаемостью. Сечение канала определяется конкретными горно-геологическими условиями на данном участке. В реальных условиях оно непостоянно, так же, как и структурные (пористость), механические (упругие модули) и, соответственно, газодинамические (проницаемость, динамическая вязкость и коэффициент диффузии метана) характеристики породы (рис. 1).

Для удобства теоретического описания данную ситуацию необходимо существенно упростить, приняв, что сечение и характеристики газопроводящего канала постоянны по всей его длине. Так же будет естественным считать, что сечение канала намного меньше, чем его длина: согласно данным [3, 7], ширина зоны существенно повышенного газовыделения составляет около 20–30 м (приблизительная ширина максимума на кривой на-

копления газа в датчике, см. [7]), а длина канала h может достигать нескольких сотен метров. Коэффициент диффузии удобно заменить его эффективным аналогом, не уточняя конкретный механизм диффузионного и фильтрационного массопереноса

$$D_f = \frac{1}{h} \int_0^h D_f(x) dx, \quad D_f = \frac{\kappa}{\mu} P. \quad (3)$$

где κ — коэффициент проницаемости породы (м^2), μ — динамическая вязкость метана ($\text{Па}\cdot\text{с}$), P — давление метана в газосодержащем пласте, которое будем считать постоянным (ввиду относительно малого сечения газопроводящего канала). Как показывают расчеты и шахтные эксперименты, величина P может достигать 30 атм и увеличиваться на 10–20 % в потенциально выбороопасных зонах [5].

Имеет смысл разграничить также два варианта перемещения метана по геодинамической зоне в приповерхностные слои породы. Первый из них подобен ситуации, рассмотренной в [6]. В этом случае значительный резервуар метана под избыточным давлением сформирован достаточно давно, чтобы постепенное перемещение метана происходило практически в стационарном режиме. Давление газа, выходящего на поверхность почвы, описывается формулой

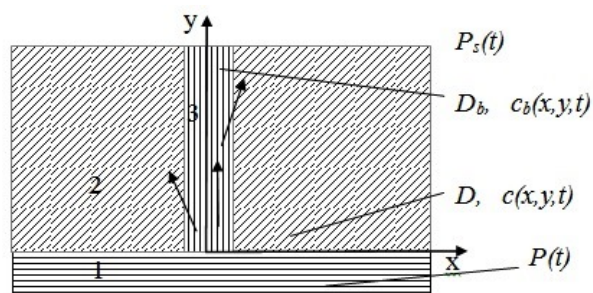
$$P_s = P \frac{l}{\gamma h} \left(1 - \operatorname{erf} \left(\frac{h}{2} \sqrt{\frac{\mu}{\kappa P t}} \right) \right), \quad (4)$$

где l — длина шпура, в котором производится замер концентрации газа.

Стационарное значение давления можно приближенно считать равным

$$P_s \approx P \frac{l}{\gamma h}. \quad (5)$$

Оценка показывает, что при реальных значениях глубины залегания газосодержащего пласта, давления газа в нем и пористости давление метана в поверхностном слое почвы составляет 1–2 % атмосферного, что согласуется с данными измерений [3, 7].



- 1 — газосодержащий слой;
2 — зона геологического нарушения;
3 — канал, соединяющий подземный газосодержащий слой с поверхностью

Рисунок 1 Схема газовыделения в геодинамической зоне

В силу известных свойств интеграла вероятности при больших значениях аргумента его величина меняется слабо. Соответственно, изменение концентрации метана по толщине приповерхностного слоя, где проводятся измерения, по причине ее малости в сравнении с глубиной газосодержащего слоя будет незаметным, а вот вдоль него — достаточным для регистрации измерительной аппаратурой, поскольку газопроницаемость значительно уменьшается, как только измерения выйдут за пределы устоявшегося газопроводящего канала.

Второй случай касается ситуации, когда в силу естественных или техногенных подвижек породы формируется новый канал массопереноса. Он соединяет зону, не подвергавшуюся ранее дегазации и в силу структурных (повышенная пористость) или прочностных факторов (пониженные модули упругости, иной тип породы и т. п.) накопившую избыточное количество метана.

Сформулировав задачу подобным образом, можно использовать для ее решения развитый математический аппарат, описывающий диффузию атомов по границам зерен [8].

Известно, что диффузия атомов по границам зерен происходит значительно быстрее, чем по свободному от дислокаций объему кристалла [9]. В используемой далее модели зернограничной диффузии

(модель Фишера, одна из наиболее простых и удобных) предполагается, что изолированная граница зерна (в нашем случае — газопроводящий канал) представляет собой полубесконечный изотропный слой одинаковой толщины с высоким коэффициентом диффузии. Граница зерна перпендикулярна к поверхности, на которой в нашем случае поддерживается постоянная концентрация диффузанта.

При диффузионном отжиге материал диффундирует вдоль оси y в объем зерна, а также вдоль его границы. Поскольку предполагается, что коэффициент зернограничной диффузии D_b много больше, чем в объеме кристалла D , диффузانت проникает по границе выше, чем в других местах (коэффициенты диффузии полагаем изотропными и постоянными). Именно поэтому начинается объемная диффузия вещества с двух стенок границы зерен в окружающие кристаллы. В рассматриваемой нами ситуации метан быстрее поднимается по газопроводящему каналу в геодинамической зоне и при этом через стенки канала проникает в окружающую породу, характеризующуюся меньшей газопроницаемостью. Поскольку $D \ll D_b$, прямой вклад диффузии с поверхности $y = 0$ убывает быстрее, чем вклад массопереноса по каналу. Ширину и длину канала обозначим соответственно δ и h , причем $\delta \ll h$.

Основой для решения данной задачи является система диффузионных уравнений [9]

$$\frac{\partial c_b(x, y, t)}{\partial t} = D_b \left(\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} \right) \text{ при } x \leq \frac{\delta}{2}, \quad (6)$$

$$\frac{\partial c(x, y, t)}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} \right) \text{ при } x \geq \frac{\delta}{2} \quad (7)$$

с граничным условием

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D_b \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + \frac{D}{2\delta} \frac{\partial c}{\partial x} \Big|_{x \leq \frac{\delta}{2}}. \quad (8)$$

Начальные и граничные условия на бесконечности имеют вид

$$c(x, 0, t) = c_0 H(t), \quad c(x, y, 0) = 0 \quad (9)$$

при $y > 0$, $c(x, \infty, t) = 0$,

где $c(x, y, t)$ — концентрация в произвольной точке углепородного массива;
 c_0 — константа, имеющая размерность объемной плотности;

$H(t)$ — единичная функция Хевисайда

$$H(t) = \begin{cases} 1, & t \geq 0, \\ 0, & t < 0. \end{cases} \quad (10)$$

Ключевым моментом модели Фишера является предположение, что

$$\frac{\partial c_b(y, t)}{\partial t} \approx 0, \quad (11)$$

т. е. скорость увеличения концентрации диффузанта в границе быстро падает со временем. Данное предположение можно считать справедливым и в рассматриваемой нами ситуации, когда процесс переноса метана по геодинамической зоне существенно ускоряется вследствие массопереноса по более разветвленной системе пор и каналов, многие из которых в результате подвижек породы увеличили свой диаметр и длину. Тогда в граничных условиях $c_b \rightarrow 0$ при $y \rightarrow \infty$ концентрация диффузанта в канале равна

$$c_b(y, t) = c_0 \exp \left(- \frac{\sqrt{2} D^{1/4} y}{(\pi t)^{1/4} (\delta D_b)^{1/2}} \right), \quad (12)$$

а за его пределами

$$c(x, y, t) = c_0 \exp \left(- \frac{\sqrt{2} D^{1/4} y}{(\pi t)^{1/4} (\delta D_b)^{1/2}} \right) \times \operatorname{erf} \left(\frac{x - \delta/2}{2\sqrt{Dt}} \right). \quad (13)$$

Поскольку для соотношения результатов расчета с экспериментальными данными нам необходимо знать в основном концентрацию метана вблизи поверхности, на глубине порядка метра, то данные формулы переписутся в виде

$$c_b(h, t) = c_0 \exp\left(-\frac{\sqrt{2}D^{1/4}h}{(\pi t)^{1/4}(\delta D_b)^{1/2}}\right), \quad (14)$$

$$c(x, h, t) = c_0 \exp\left(-\frac{\sqrt{2}D^{1/4}h}{(\pi t)^{1/4}(\delta D_b)^{1/2}}\right) \times \operatorname{erf}\left(\frac{x - \delta/2}{2\sqrt{Dt}}\right). \quad (15)$$

Соответственно, давление газа, выходящего на поверхность (или поступающего в датчик), составляет

$$P_s(t) = P \frac{l}{\gamma h} \exp\left(-\frac{\sqrt{2}D^{1/4}h}{(\pi t)^{1/4}(\delta D_b)^{1/2}}\right). \quad (16)$$

3. Результаты и обсуждение. При рассмотрении кинетики газовыделения в геодинамически активной зоне особое значение приобретает момент, с которого содержание метана в приповерхностном слое почвы станет отличным от нулевого. Для определения этого момента следует исходить из временной зависимости давления метана на поверхности (16). Тогда, с учетом (3), время, по истечении которого присутствие метана на поверхности станет заметным (время достижения потоком газа земной поверхности в пределах геодинамически активной зоны), оценивается как

$$t_1 = \frac{\kappa}{\kappa_b^2} \frac{\mu}{P} \frac{h^4}{\delta^2}. \quad (17)$$

При значениях параметров, близких к реально наблюдаемым ($\kappa = 10^{-15} \text{ м}^2$, $\kappa_b = 10^{-13} \text{ м}^2$, $\mu \sim 10^{-5} \text{ Па} \cdot \text{с}$, $P = 3 \cdot 10^5 \text{ Па}$, $h = 700 \text{ м}$, $\delta = 20 \text{ м}$), получаем оценку $t_1 = 8 \text{ мес}$.

Именно по истечении данного времени с момента формирования геодинамически активной зоны или резкого изменения ее свойств в силу каких-либо геологических или технологических процессов будет наблюдаться присутствие метана на поверхности на выходе из газопроводящего канала данной зоны.

Представляется важным определить, в какой момент концентрация метана в приповерхностной части геодинамически активной зоны может достичь взрывоопасного значения $C_* \approx 4,4 \%$. Из (16) следует оценка времени

$$t_* = \frac{\kappa}{\kappa_b^2} \frac{h^4}{\delta^2} \left(\frac{C_* \gamma h}{l} \frac{P_{atm}}{P}\right)^4. \quad (18)$$

При параметрах, указанных выше, $t_* \approx 0,86t_1$. Но время накопления опасной концентрации метана в приповерхностном слое геодинамически активной зоны может и превышать t_1 .

Еще одним важным параметром времени является промежуток с момента начала газовыделения до достижения стационарного значения давления выделяющегося метана (5). Он вычисляется на основании формулы (4) и составляет

$$t_2 = \frac{h^2 \mu}{\kappa_b P}. \quad (19)$$

Оценка данного промежутка времени при указанных выше параметрах составляет 5 лет, что вполне соответствует реально наблюдаемой картине газовыделения.

Расчитанные в соответствии с (14), (15) профили распределения метана в газопроводящем канале и вне его соответствуют экспериментальным данным [3]: максимальное значение давления метана в центре геодинамической зоны (канале с большей газопроницаемостью) и уменьшение давления с увеличением расстояния от него.

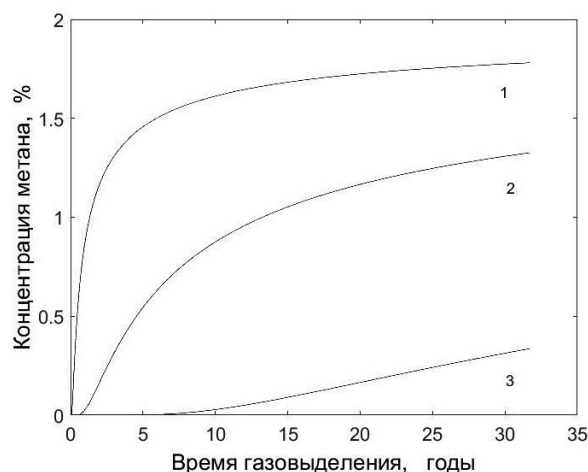
Результаты вычислений по формулам (4), (16), иллюстрирующие кинетику газовыделения в геодинамических зонах и их окрестностях, представлены на рисунке 2.

Из рисунка 2 видно, что зоны геологических нарушений, для которых характерна повышенная газопроницаемость углеродного массива, могут быть обнаружены при помощи непрерывного мониторинга газовыделения на поверхности как по уровню газовыделения (видна разница в

уровне насыщения в несколько раз), так и по его кинетике (возможна регистрация повышения концентрации метана на поверхности над вновь сформировавшимися геодинамически активными участками техногенного происхождения).

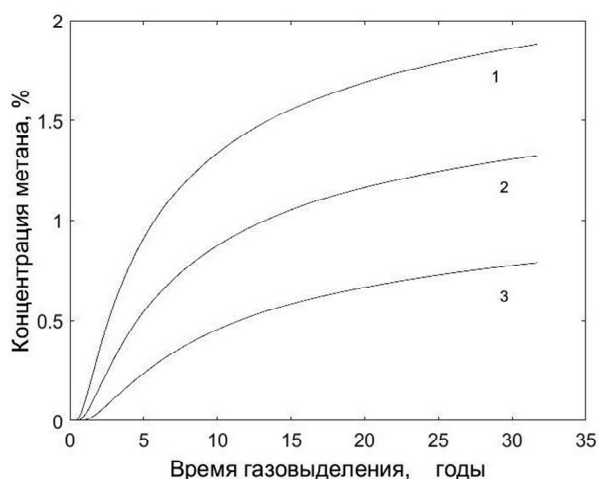
На рисунке 3 представлены результаты расчета кинетики выделения метана при различном пластовом давлении газа. При локальном увеличении пластового давления в геодинамической зоне в силу каких-либо причин (к примеру, изменение прочностных характеристик массива или конфигурации пласта в ходе его разработки, см. [2]) соответственно изменяется и уровень газовыделения над данной областью. Изменения отразятся на газовыделении не мгновенно, а спустя период от нескольких месяцев до 1–5 лет, как видно из рисунка 3.

Рисунок 4 иллюстрирует зависимость кинетики газовыделения на поверхности геодинамической зоны от глубины залегания газоносного пласта. Видно, что наибольшее влияние глубина залегания оказывает на стационарный уровень концентрации метана, достигаемый по прошествии нескольких лет с момента активации газовыделения.



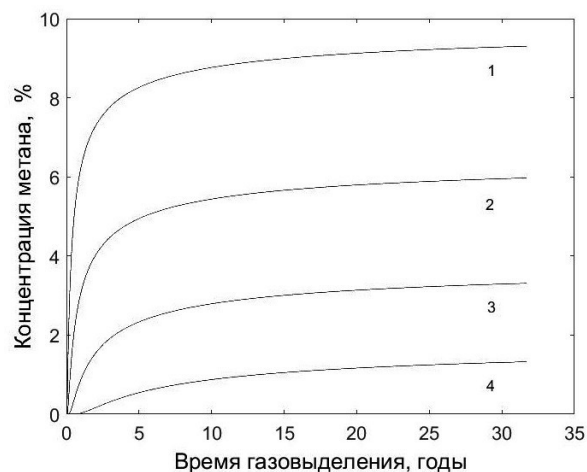
1 — $\kappa = 10^{-12} \text{ м}^2$; 2 — $\kappa = 10^{-13} \text{ м}^2$; 3 — $\kappa = 10^{-14} \text{ м}^2$

Рисунок 2 Газовыделение в геодинамической зоне при различной проницаемости породы, рассчитанное по формуле (8) ($h = 700 \text{ м}$, $\gamma = 0,15$, $\mu = 1,14 \cdot 10^{-5} \text{ Па} \cdot \text{с}$, $P = 3 \cdot 10^5 \text{ Па}$)



1 — $P = 4 \cdot 10^5 \text{ Па}$; 2 — $P = 3 \cdot 10^5 \text{ Па}$; 3 — $P = 2 \cdot 10^5 \text{ Па}$

Рисунок 3 Газовыделение в геодинамической зоне при различном пластовом давлении ($h = 700 \text{ м}$, $\gamma = 0,15$, $\mu = 1,14 \cdot 10^{-5} \text{ Па} \cdot \text{с}$, $\kappa = 10^{-13} \text{ м}^2$)



1 — $h = 200 \text{ м}$; 2 — $h = 300 \text{ м}$; 3 — $h = 500 \text{ м}$;
4 — $h = 1000 \text{ м}$

Рисунок 4 Газовыделение в геодинамической зоне при различной глубине залегания пласта ($P = 3 \cdot 10^5 \text{ Па}$, $\gamma = 0,15$, $\mu = 1,14 \cdot 10^{-5} \text{ Па} \cdot \text{с}$, $\kappa = 10^{-13} \text{ м}^2$)

На рисунке 5 представлены результаты расчета кинетики газовыделения в геодинамической зоне при различном соотношении эффективных коэффициентов массопереноса в самой зоне (D_b) и в окружающих породах (D). Видно, что чем больше различие эффективных коэффициентов диффузии, тем более активным ста-

новится выделение метана именно в зоне геологического нарушения, а не выход его на поверхность путем проникновения через прилегающий углепородный массив. При этом следует учитывать, что речь идет о различии на порядки, в силу различных механизмов диффузии и фильтрации, вовлеченных в процесс массопереноса. Роль и, соответственно, вклад данных механизмов в общий процесс газовыделения сильно зависят от структуры породы на данном участке пласта.

На рисунке 6 представлен результат расчета кинетики накопления метана в приемной камере измерительного устройства, установленного на поверхности геодинамически активной зоны.

Предполагалось, что газоносный пласт расположен на глубине $h = 700$ м. Основные параметры те же, что были использованы для расчетов на рисунке 5. В ходе предыдущих измерений приповерхностное содержание метана понизилось, и основной поток метана идет с глубины порядка 10 м.

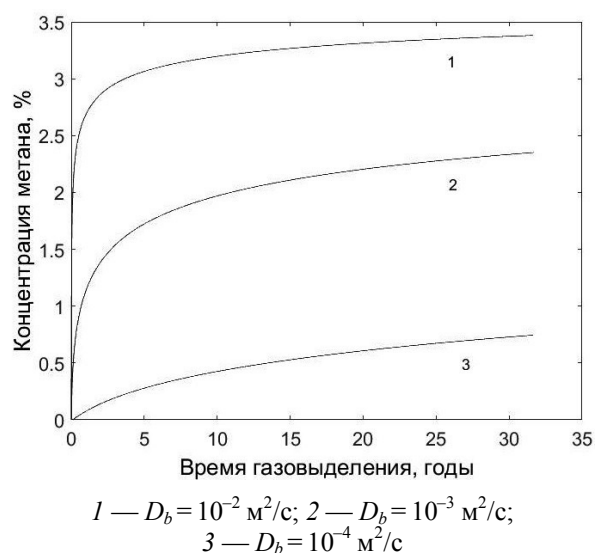


Рисунок 5 Газовыделение в геодинамической зоне при различном соотношении эффективных коэффициентов массопереноса, рассчитанное по формуле (20) ($h = 500$ м, $\delta = 10$ м, $P = 3 \cdot 10^5$ Па, $\gamma = 0,15$, $D = 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$)

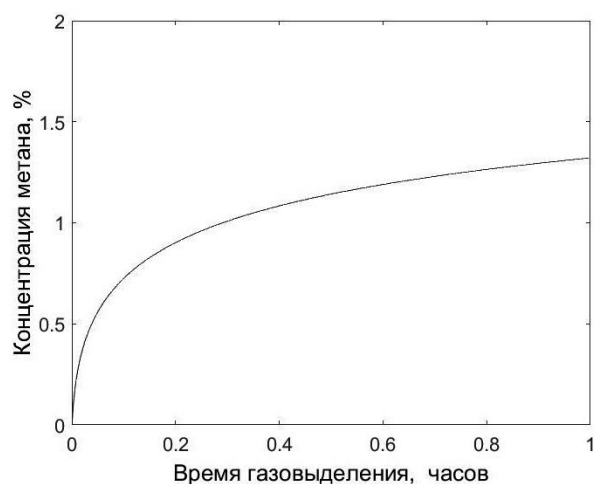


Рисунок 6 Кинетика накопления метана в приемной камере измерительного устройства, установленного на поверхности геодинамически активной зоны (глубина залегания газоносного пласта $h = 700$ м, коэффициенты массопереноса $D = 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$, $D_b = 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$)

Видно, что основное накопление газа (более 50 %) происходит за небольшой промежуток времени, порядка 10–15 минут, что позволяет полагать результаты измерений, проводимых по методике, описанной выше, достаточно надежными и адекватно отражающими картину переноса метана к поверхности геодинамической зоны.

На рисунке 7 представлен результат расчета концентрационного профиля распределения метана в приповерхностном слое геодинамической зоны и в ее окрестности. Здесь проиллюстрирован случай выхода метана на поверхность по каналу вновь сформировавшейся геодинамической зоны. Как следует из расчетов, результаты которых представлены на рисунках 3–5, метан, содержащийся в газоносном пласте, подвергшемся техногенным или естественным воздействиям, вследствие которых и образовалась зона геологического нарушения, достигнет поверхности по прошествии достаточно существенного времени (несколько дней, а наиболее вероятно, месяцев или лет). С этого момента и начинается эволюция концентрационного профиля метана в

окрестностях геодинамической зоны, начальный период которой и представлен на рисунке 7. Очевидно, что реальный концентрационный профиль будет иметь более размытую форму, поскольку сам канал, по которому распространяется метан, может иметь более сложную (не идеально вертикальную) конфигурацию, в том числе и разветвляющуюся.

Кроме того, что более существенно, реальные измерения проводятся в условиях, когда нельзя точно определить момент начала установившегося режима газовыделения вдоль канала геодинамической зоны. На форму профиля влияет также глубина залегания газоносного слоя и соотношение коэффициентов переноса метана в самой геодинамической зоне и вне ее (в реальности профиль расширяется еще и за счет прямого перемещения метана к поверхности через толщу пород, которое не учитывался в рамках данной модели). Результат подобного воздействия продемонстрирован на рисунке 8.

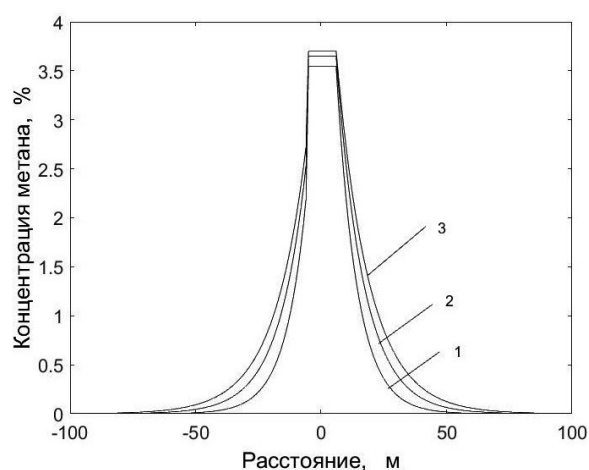


Рисунок 7 Профиль распределения метана в приповерхностном слое геодинамической зоны и в ее окрестности (глубина залегания газоносного пласта $h=500$ м, коэффициенты массопереноса $D=10^{-7}$ м²/с, $D_b=10^{-4}$ м²/с). Отсчет времени ведется от момента, когда поток метана на поверхности геодинамической зоны становится стационарным: 1 — через 10 минут от начала отсчета, 2 — 30 минут, 3 — 60 минут

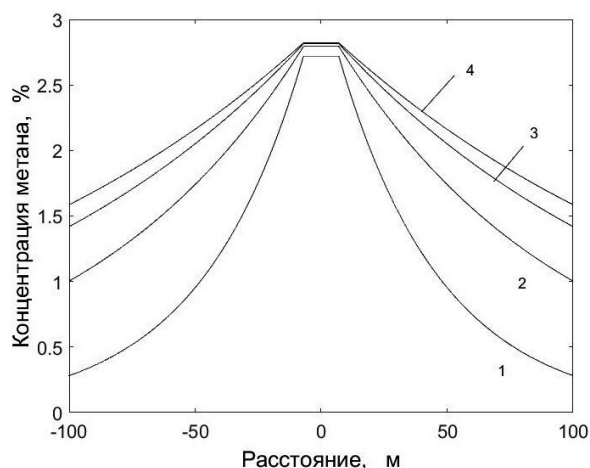


Рисунок 8 Профиль распределения метана в приповерхностном слое геодинамической зоны и в ее окрестности (глубина залегания газоносного пласта $h=700$ м, коэффициенты массопереноса $D=10^{-7}$ м²/с, $D_b=10^{-3}$ м²/с). Отсчет времени ведется от момента, когда поток метана на поверхности геодинамической зоны становится стационарным: 1 — через 1 час от начала отсчета, 2 — 1 сутки, 3 — 5 суток, 4 — 10 суток

Видно, что при большой разнице в коэффициентах массопереноса и вариациях глубины залегания источника метана его концентрационный профиль становится подобным тем, что регистрируются экспериментально [3, 7]. Поэтому представляется возможным судить на базе данной модели и по экспериментальным данным о глубине залегания газоносного слоя в геодинамической зоне (она может отличаться от глубины этого же слоя вдали от геологического нарушения), о ширине газопроводящего канала (т. е. в некоторой степени и о размерах нарушения), степени нарушения горных пород в данной зоне (по разнице коэффициентов массопереноса). Совокупность теоретического описания и полевых измерений уровня выделения метана на поверхность в геодинамически активных зонах представляется удобным и эффективным средством мониторинга и прогноза газовой обстановки в зонах геологических нарушений.

Выводы. Контроль выделения метана на поверхности геодинамических зон может являться эффективным средством для определения участков, где метан может, во-первых, локально накапливаться в количествах, превышающих средние значения в углепородных пластах в данной местности, и, во-вторых, проникать в здания и сооружения на поверхности, создавая угрозу накопления газа до уровня взрывоопасных концентраций. Кроме того, постоянный мониторинг данных зон позволит отслеживать необычные изменения концентрации метана и, соответственно, делать выводы о влиянии природных и техногенных факторов на эволюцию геодинамически активных зон. Расчеты пока-

зывают возможность оценки уровня содержания метана на глубине по уровню и эволюции поверхностного газовыделения.

Совокупность теоретического описания и полевых измерений уровня выделения метана на поверхность в геодинамически активных зонах представляется удобным и эффективным средством мониторинга и прогноза газовой обстановки в зонах геологических нарушений. Результаты работы позволяют на базе данной модели и по экспериментальным данным делать выводы о глубине залегания газоносного слоя в конкретной геодинамической зоне, ширине газопроводящего канала, степени нарушения горных пород в данной зоне.

Библиографический список

1. Евдоцук, Н. И. О роли горно-геологических условий и физико-химических факторов при формировании газонасыщенности углепородных массивов Донецко-Макеевского углепромышленного района [Текст] / Н. И. Евдоцук, Н. В. Вергельская, А. Н. Кришталь // *Тектоника и стратиграфия*. — 2013. — Вып. 40. — С. 12–26.
2. Алексеев, А. Д. Физика угля и горных процессов [Текст] / А. Д. Алексеев. — К. : Наукова думка, 2010. — 423 с.
3. Василенко, Т. А. Исследование содержания метана в почвенном воздухе в области выхода под наносы геологических нарушений [Текст] / Т. А. Василенко, Н. И. Волошина, И. Е. Кольчик, А. В. Молодецкий, А. А. Подрухин // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. — 2016. — № 7. — С. 159–166.
4. Стариков, Г. П. Методические основы определения времени формирования опасных концентраций метана в замкнутых объемах, расположенных на территории закрытых шахт [Текст] / Г. П. Стариков, А. А. Подрухин, Э. В. Борисенко // *Труды РАНМИ : сб. научн. трудов*. — Донецк, 2018. — № 5 (20). — С. 128–144.
5. Алексеев, А. Д. Равновесное распределение газов в угольных пластах [Текст] / А. Д. Алексеев, Э. П. Фельдман // *Письма в ЖТФ*. — 2008. — Т. 34. — Вып. 14. — С. 48–53.
6. Стариков, Г. П. Кинетика фильтрации и выделения метана на поверхность при прекращении ведения работ в угольных шахтах [Текст] / Г. П. Стариков, В. М. Юрченко, Т. Н. Мельник, А. А. Подрухин // *ФТВД*. — 2019. — Т. 29. — № 1. — С. 95–103.
7. Сергиенко, А. И. Графоаналитический способ определения границ распространения геодинамических зон на земной поверхности в пределах горных отводов закрытых шахт [Текст] / А. И. Сергиенко, А. А. Подрухин // *Физико-технические проблемы горного производства*. — Донецк : ИФГП НАНУ, 2010. — Вып. № 13. — С. 128–135.
8. Бекман, И. Н. Математика диффузии [Текст] / И. Н. Бекман. — М. : ОнтоПринт, 2016. — 400 с.
9. Каур, И. Диффузия по границам зерен и фаз [Текст] / И. Каур, В. Густ. — М. : Машиностроение, 1991. — 448 с.

© Стариков Г. П.
 © Шажко Я. В.
 © Мельник Т. Н.
 © Подрухин А. А.

*Рекомендована к печати д.т.н., проф., зав. каф. СГ ДонГТИ Литвинским Г. Г.,
к.т.н., с.н.с. ГУ «ИФГП» Борисенко Э. В.*

Статья поступила в редакцию 14.10.2020.

Doctor of Technical Sciences Starikov G. P., PhD in Engineering Shazhko Ya. V., PhD in Physics and Mathematics Melnik T. N., Podrukhin A. A. (SI “Institute of Physics of Mining Processes”, Donetsk, DPR, ifgpdnr@mail.ru)

KINETICS OF METHANE RELEASE IN GEODYNAMICALLY ACTIVE ZONES

The work carried out a theoretical analysis of kinetics of methane release on the surface in geodynamically active zones (for example, areas of geological breaches). Dependencies of gas pressure in near-surface layers on time and proximity to centre of geodynamic zone are obtained considering real mining-geological parameters of massif. The analysis is the theoretical basis of method for predicting the rate and intensity of methane release on the soil surface above mining sites and geological breaches.

Key words: *geodynamic zone, seam breach, methane, gas release.*