

УДК 622.3:504.61

А.В. Борисенко, Ю.М. Иванов, М.А. Волков

**АНАЛИТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ПРИТОКА МЕТАНА
В ТЕХНОГЕННЫЙ КОЛЛЕКТОР
С ПЕРИФЕРИЙНЫХ УЧАСТКОВ НЕРАЗГРУЖЕННОГО
УГЛЕПОРОДНОГО МАССИВА**

При оценке техногенных коллекторов угольных шахт с точки зрения метанодобываемости важным вопросом является долгосрочный прогноз притока в них метана с периферийных участков ненарушенного горными работами углепородного массива. Предложен метод оценки притока метана в техногенный коллектор на основе математического моделирования массопереноса метана в углепородном массиве.

Ключевые слова: извлечение шахтного метана, массоперенос метана, углепородный массив, техногенный коллектор, математическое моделирование.

Говоря о технологии извлечения метана из ликвидированных угольных шахт необходимо понимать, что речь идет об извлечении свободного газа, который скапливается в техногенных пустотах деформированного горными работами породного массива. Источниками газа в данном случае служат, в первую очередь, угольные пласты, попавшие в зону деформаций массива, в результате чего активизируется процесс десорбции метана, и этот свободный газ начинает заполнять все доступные пустоты. Кроме того, техногенный коллектор заполняется метаном, находящимся в поровом пространстве вмещающих пород, удельная газоносность которых сравнительно невелика, но с учетом суммарной мощности таких пластов, объемы поступления газа могут быть существенными.

В целом, объем свободного метана, содержащийся в техногенных пустотах отработанных шахтных полей – коллекторах, ограничен рядом факторов, к которым можно отнести природную газоносность пластов, наличие экранов, обеспечивающих аккумуляцию газа, суммарный объем самих техногенных пустот, качество изоляции подземных горных выработок и др. Поэтому при извлечении метана из техногенных пустот угольных шахт ресурсы свободного газа могут быть достаточно быстро исчерпаны, что связано с его объемом, содержащемся в коллекторе, количеством и параметрами метано добычных скважин и режимом их эксплуатации и пр.

Данное обстоятельство говорит о необходимости учета фактора подпитки коллектора метаном из окружающего углепородного массива, который имеет важное значение с точки зрения перспективности проектов извлечения метана из техногенных пустот отработанных горных блоков. Реальные примеры из зарубежной практики извлечения метана на закрытых угольных шахтах, а именно, такие показатели как длительность продуктивной работы дегазационных скважин и суммарные объемы извлекаемого газа, также указывают на длительность процесса подпитки техногенного коллектора метаном с периферийных участков.

Поэтому задача расчета притока метана в техногенный коллектор представляет большой практический интерес.

Фундаментальные исследования в области массопереноса метана в природных коллекторах и угольных пластах ведутся с 40-х годов прошлого столетия. Большой вклад в решение задачи внесли Лейбензон Л.С., Полубаринова-Кочина П.Я., Баренблатт Г.И., Христианович С.А., Лидин Г.Д., Ходот В.В., Пирвердян А.М., Желтов Ю.П., Наказная Л.Г., Георгиев Г.Д., Золотарев П.П., Жирнова Т.С., Черных В.А. и др.

В одной из научных работ Полубариновой-Кочиной П.Я. представлено фундаментальное дифференциальное уравнение неустановившейся фильтрации газа в угольном пласте (1), с учетом эффекта сорбции метана по зависимости Ленгмюра, выполнения линейного закона Дарси, уравнения состояния газа Бойля-Мариотта и уравнения неразрывности движения газа

$$\lambda \left(\frac{\partial^2 p^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p^2}{\partial z^2} \right) = 2 \left[m + \frac{abRT}{(1+ap)^2} \right] \frac{\partial p}{\partial t}, \quad (1)$$

где $\lambda = \frac{k}{\mu}$, k – проницаемость пласта; μ – вязкость газа; p – давление газа; x, y, z – координаты; m – пористость пласта; a, b – постоянные Ленгмюра; R – газовая постоянная; T – температура; t – время, с.

Полученное уравнение является основой для моделирования процесса массопереноса метана из неразгруженного массива, т.е. с периферийных участков, в техногенный коллектор, образованный выработанным пространством, а также зоной разломов и нарушений над ним, связанных единой системой газопроводящих каналов и трещин.

Авторами предложен метод оценки притока метана в техногенный коллектор из окружающего углепородного массива, путем математического моделирования физического процесса массопереноса, с использованием современных средств ЭВМ.

Процесс моделируется на примере ограниченного фрагмента горного блока, размером в разрезе 600×450 м ($x \times y$, соответственно). Модель массива включает четыре угольных пласта, один из которых, мощностью 3 м, является рабочим, два пласта, мощностью 0,8 м и 2 м, залегают в подрабатываемой области массива, и один пласт, мощностью 1 м, лежит в надрабатываемой части массива. Вмещающие породы в модели приняты одного тапа, с одинаковыми свойствами.

Современные технологии добычи угля предполагают отработку пластов длинными столбами, при длине лавы, порядка 150–250 м. В модели принимаем ширину выработанного пространства 200 м. При отработке пласта под действием горного давления над выработанным пространством формируется зона обрушения, разломов и трещинообразования пород, представленная магистральными трещинами, а также микротрещинами. Исходя из результатов последних исследований ИПКОН РАН, высоту зоны активных трещин над выработанным пространством принимаем 25 м, где m – вынимаемая мощность отрабатываемого пласта. Таким образом, высоту техногенного коллектора в верхней точке свода принимаем в модели 75 м.

На рис. 1 представлена модель фрагмента горного блока, на котором показано принятое геологическое строение массива и геометрия свода техногенно-

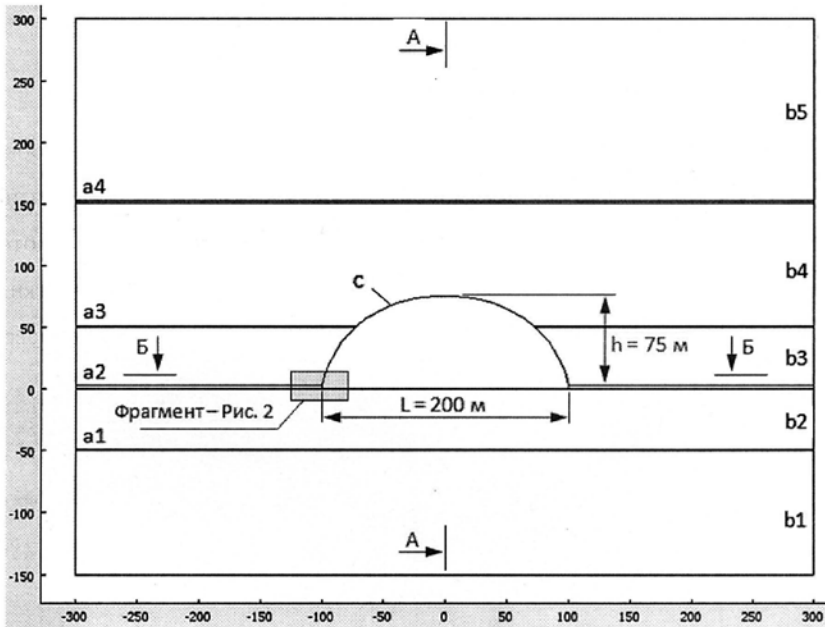


Рис. 1. Модель горного блока: a1, a2, a3, a4 – угольные пласты, мощностью 1,0 м, 3,0 м, 0,8 м, 2,0 м, соответственно; b1, b2, b3, b4, b5 – породные пласты, мощностью 100 м, 49 м, 47 м, 99,2 м, 148 м; L – ширина выработанного пространства / выемочного столба (длина лавы); c – контур зоны обрушения пород и техногенного трещинообразования в массиве, высотой $h = 25$ м (75 м), вызванного отработкой пласта a2, мощностью m (3 м)

го коллектора. По краям выработанного пространства в модели имитируются подготовительные горные выработки – откаточный и вентиляционный штрек. Поскольку задачей является моделирование притока метана в техногенный коллектор в течение длительного времени после отработки пласта, необходимо учесть процесс сдвливания этих выработок горным давлением, в результате чего существенно уменьшается их сечение. Поэтому, принимая во внимание данное условие, размеры штреков в модели приняты $4 \times 0,5$ м (хху, соответственно). Геометрия сечения этих выработок и их расположение в массиве показано на рис. 2.

Решение поставленной задачи выполнено в плоской постановке. Основанием такого подхода является геометрия выработанного пространства, при кото-

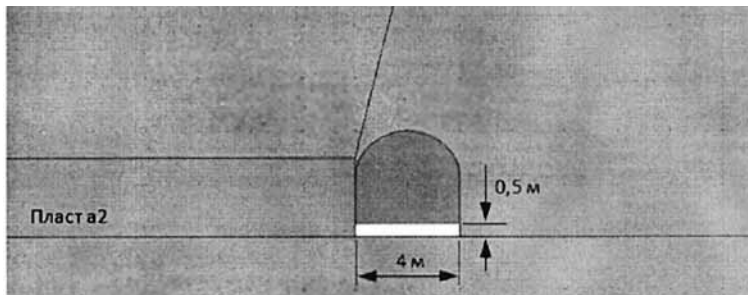


Рис. 2. Штрек, задавленный горным давлением (фрагмент модели)

рой длина выемочного столба, как правило, составляет более 1000 м, т.е. в 5 и более раз превосходит его ширину в 200 м.

В соответствии с физическими представлениями метан поступает в коллектор из угольных пластов и пропластков, а также из вмещающих пород кровли и почвы. Важнейшим фактором, влияющим на процесс функционирования техногенного коллектора, является пластовое давление газа, проницаемость и пористость пород, а также параметры сорбции угля.

Что касается месторождений природного газа, то там доминирующими факторами являются пластовое давление и проницаемость пород. Таким образом, процессы, происходящие в традиционных газовых месторождениях и в углеметановых месторождениях, имеют различия и общие свойства.

Главной отличительной особенностью угольных месторождений является сорбция метана в структуре угля. В газовых месторождениях фактор сорбции метана не учитывается, а основным фактором является давление газа, которое достигает порядка 200–500 атм. Понятие пластового давления в угольных пластах по физическому смыслу аналогично давлению газа в поровом пространстве газоносных песчаников.

Сформулируем начальные и граничные условия, применительно к поставленной задаче, в соответствии с моделью, представленной на рис. 1.

Нижняя граница модели отделяет горный блок от массива, из которого возможна постоянная подпитка метаном, поэтому давление газа на этой линии принимаем неизменным в течение всего процесса и в виду того, что с глубиной пластовое давление возрастает, давление газа на этой линии в модели примем равным 3 МПа.

Верхняя граница блока – изолирована, т.е. представляет собой экран, препятствующий дренированию метана на поверхность. Эта особенность объясняется тем, что технология извлечения метана из техногенных пустот ликвидированных шахт должна предусматривать выбор участков шахтного поля, в зоне которых обеспечены условия для аккумуляции газа в техногенных пустотах массива, т.е. наличие экранов, препятствующих дренированию метана на поверхность по техногенным трещинам. Именно такие участки будут являться наиболее перспективными с точки зрения извлечения метана. Такими экранами могут служить обводненные юрские отложения, ненарушенные горными работами, сохраняющие свою сплошность пласты глинистых пород и пр. Соответственно, моделируя такие условия, проницаемость верхней границы выделенного блока принимаем равной нулю. При этом данный экран залегает на определенной глубине, ниже зоны выветривания.

На боковых поверхностях блока в точной постановке задачи следует учитывать изменение газового давления с глубиной. Так как с увеличением глубины пластовое давление возрастает, то при моделировании процесса массопереноса величину давления газа в вертикальном направлении необходимо задавать дифференцировано, с увеличением от верхней границы выделенного блока к нижней. В модели газовое давление на боковых стенках выделенного блока задано с градиентом, и возрастает с 2 МПа в верхней части до 3 МПа в нижней.

Внутри техногенного коллектора проницаемость вмещающих пород, деформированных очистными работами, в сотни раз превышает аналогичную величину в их природном состоянии, т.е. в ненарушенном горными работами массиве. По разным источникам, проницаемость возрастает на 3–4 порядка.

Это объясняется тем, что современные технологии добычи угля, предполагают, как правило, управление кровлей полным ее обрушением, в результате чего породы слагающие кровлю разрабатываемого пласта дробятся на блоки различных размеров и фракций и в подработанной толще формируется развитая система техногенных разломов и трещин, имеющих аэродинамическую связь – техногенный коллектор. Данный процесс техногенного трещинообразования затухает по мере удаления от выработанного пространства и распространяется на величину, которая по разным источникам, в зависимости от ряда факторов, составляет 20–40 га по нормали к напластованию, где m – вынимаемая мощность. В модели принята величина 25 м. Аналогичные деформации происходят и в надрабываемой толще, но в меньшей степени нарушая целостность горного массива и при меньшей величине распространения техногенных трещин, поэтому в модели этим пренебрегаем. Газовое давление в выработанных пространствах может составлять порядка 3–4 атм., но, как правило, не на много превышает атмосферное.

Подготовительные выработки, оконтуривающие выработанное пространство (выемочный столб), после отработки участка изолируют специальными перемычками, предотвращающими поступление метана из выработанного пространства в шахтную атмосферу. Однако под воздействием горного давления эти перемычки разрушаются и утрачивают изолирующую функцию, поэтому на практике, как правило, через них возможна фильтрация газа. Применяемые в настоящее время технологии ликвидации угольных шахт также не обеспечивают надежной изоляции подземных выработок, имеющих выход на дневную поверхность. Как следствие, давление газа в разветвленной сети подземных горных выработок шахты может быть немногим выше атмосферного, при этом имеется аэродинамическая связь с выработанными пространствами и зонами обрушения пород через разрушенные изоляционные перемычки, а также через трещины в целиках. Аэродинамическое сопротивление трещиноватого массива внутри техногенного коллектора существенно ниже, чем в массиве, неразгруженном от горного давления, вследствие чего поступающий в коллектор газ за счет разницы давлений отводится через разрушенные изоляционные перемычки. Таким путем происходит постоянная утечка метана из техногенного коллектора. Данное обстоятельство также учтено в модели, и на линиях границ задавленных штреков, примыкающих к коллектору, принято постоянное на протяжении всего процесса давление газа, равное 1 атм.

Таким образом, в модели приняты следующие параметры.

Пластовое давление в массиве в начальный момент времени задано с градиентом и возрастает от верхней границы выделенного блока к нижней с 2 МПа до 3 МПа, давление газа в коллекторе – 0,3 МПа, газовое давление на границах подготовительных выработок – 0,1 МПа, т.е. принимается условие наличия аэродинамической связи задавленных штреков с поверхностью шахты через разветвленную сеть подземных горных выработок, давление газа на нижней границе блока – 3 МПа, давление газа на боковых границах блока задано с градиентом и возрастает от верхней границы выделенного блока к нижней с 2 МПа до 3 МПа, верхняя граница выделенного блока -изолирована.

Проницаемость неразгруженных угольных пластов принимаем $5 \cdot 10^{-3}$ мД ($5 \cdot 10^{-18}$ м²), проницаемость вмещающих пород – $5 \cdot 10^{-3}$ мД ($5 \cdot 10^{-19}$ м²), проницаемость деформированных пород внутри коллектора принимаем на три порядка выше чем у вмещающих пород в нетронutom массиве – 5 мД ($5 \cdot 10^{-15}$ м²).

Пористость вмещающих пород принимаем 4% (в долях единицы 0,04), пористость деформированных пород внутри коллектора увеличим на 10%, что составит 0,044, пористость угля – 2% (0,02).

Температура в массиве – 300 К.

Динамическая вязкость газа – $1,08 \cdot 10^{-5}$ Па·с.

Предельная метаноемкость в уравнении Ленгмюра (a) – 60 кг/м³.

Коэффициент в уравнении Ленгмюра (b) – $0,207 \cdot 10^{-6}$ Па⁻¹.

Процесс фильтрации метана в рассматриваемой модели происходит во всем пространстве массива, включая уголь и вмещающие породы.

В символах программного обеспечения COMSOL Multiphysics уравнение фильтрации метана в угле описывается:

$$\operatorname{div} \left(\frac{k}{\mu} \rho \cdot \operatorname{grad} p \right) = m \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{ab}{(1+ap)^2} \cdot \frac{\partial p}{\partial t}, \quad (2)$$

где k – проницаемость, м²; μ – динамическая вязкость, Па·с; ρ – плотность газа, кг/м³; m – пористость; a , b – константы адсорбции; p – давление газа, Па; t – время, с;

$$\operatorname{div} A = \frac{\partial A_x}{\partial x} + \frac{\partial A_y}{\partial y} + \frac{\partial A_z}{\partial z}; \quad \operatorname{div} A = \frac{\partial A_x}{\partial x} i + \frac{\partial A_y}{\partial y} j + \frac{\partial A_z}{\partial z} k.$$

Плотность газа рассчитывается для случая изотермического процесса исходя из уравнения Клапейрона-Менделеева:

$$\rho = \frac{p}{RT} \mu_{\text{CH}_4}, \quad (3)$$

где R – универсальная газовая постоянная, $R = 8,31$ Дж/(моль·К); T – температура, К; μ_{CH_4} – молекулярный вес метана, $\mu_{\text{CH}_4} = 16 \cdot 10^{-3}$ кг/моль.

Процесс фильтрации в породах описывается аналогичным уравнением, с той особенностью, что отсутствует сорбция ($a = 0$, $b = 0$), в результате чего уравнение (2) приобретает вид

$$\operatorname{div} \left(\frac{k}{\mu} \rho \cdot \operatorname{grad} p \right) = \frac{\partial p}{\partial t} m p. \quad (4)$$

Представленные уравнения и граничные условия составляют основу компьютерного моделирования процесса массопереноса метана из углепородного массива в техногенный коллектор.

Все расчеты по моделируемому процессу проведены с использованием программного пакета COMSOL Multiphysics (Лицензия № 1062774).

При заданных начальных условиях проведенное моделирование показало, что через три месяца в выделенном блоке массива устанавливается градиент давления, который с течением времени существенно не меняется.

На рис. 3 показано распределение давления газа в массиве через десять лет с момента начала моделируемого процесса.

На рис. 4 представлен график распределения газового давления в массиве по линии разреза А-А (см. рис. 1) через 2, 5 и 10 лет, из которого видно, что при заданных начальных и граничных условиях давление метана в окружающих породах через 10 лет функционирования такого коллектора понижается не более чем на 25%.

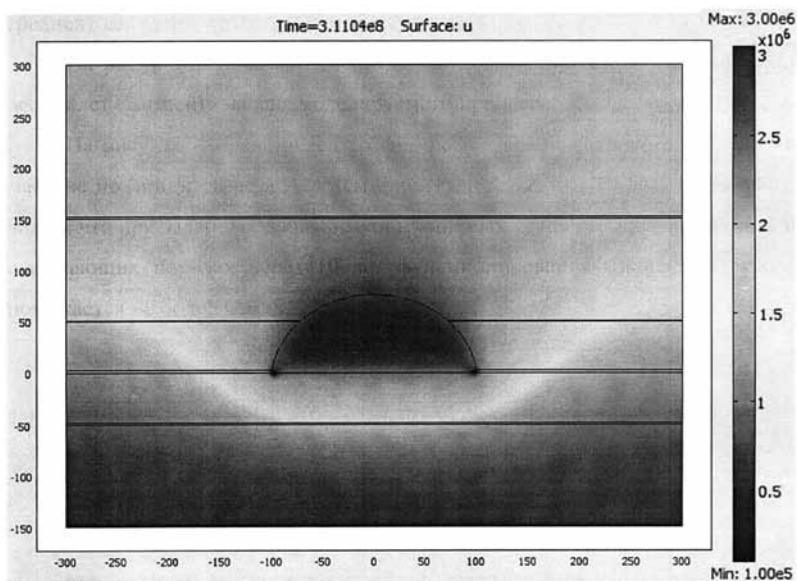


Рис. 3. Распределение газового давления в массиве через 10 лет с момента начала процесса при заданных условиях моделирования (шкала в Па)

Исходя из соображений, что каждая метанодобычная скважина будет дегазировать определенный участок техногенного коллектора, исходя из ориентировочных параметров сетки заложения скважин, представляется целесообразным при решении плоской задачи фильтрации перейти к объему коллектора, задав в COMSOL Multiphysics размер коллектора по третьей оси, без изменения конфигурации свода обрушения и трещинообразования пород над выработанным пространством по этой оси. Такое решение справедливо для фрагмента горного массива в средней части выемочного столба.

Таким образом, с помощью разработанной модели произведен расчет суммарного притока метана в коллектор для участка протяженностью 500 погон-

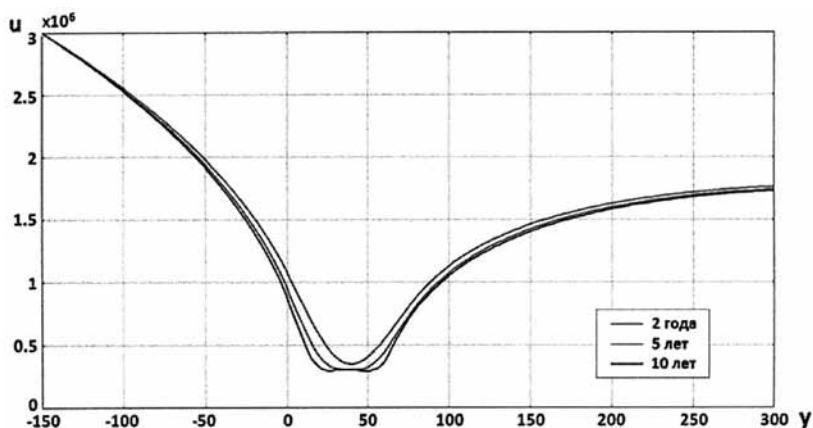


Рис. 4. Распределение газового давления в массиве по линии разреза А-А (см. рис. 1) через 2, 5, 10 лет: u – давление газа в массиве, Па; y – высотные отметки, м

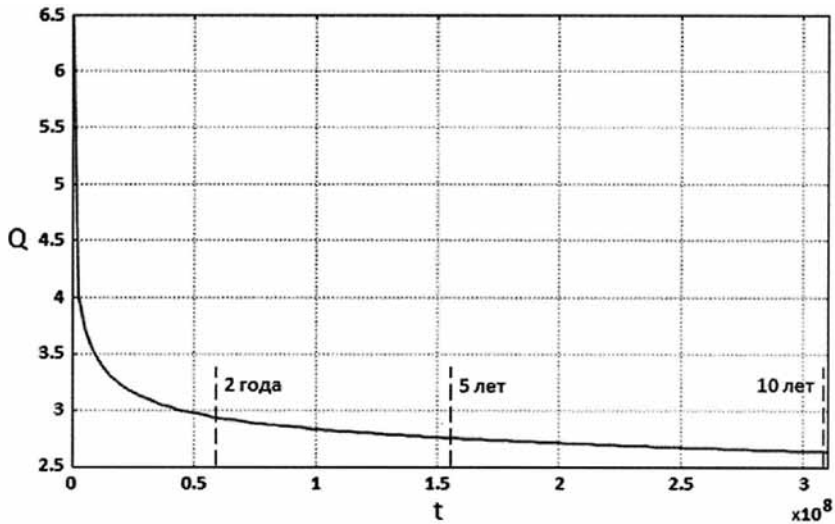


Рис. 5. Динамика притока метана в техногенный коллектор в первые 10 лет с момента начала процесса: Q – дебит метана, м³/мин.; t – время, с

ных метров по длине выемочного столба, при заданных постоянных геометрических параметрах модели по осям x и y (см. рис. 1).

На рис. 5 представлен график интенсивности притока метана в техногенный коллектор, протяженностью 500 м, с течением времени – за первые 10 лет с момента начала моделируемого процесса массопереноса в заданных условиях.

Представленный на рис. 5 график демонстрирует резкое снижение дебита метана в первый год функционирования коллектора, при заданных условиях. Через 2–3 года естественной дегазации массива динамика притока метана стабилизируется, и его величина в последующий период времени снижается по экспоненциальной зависимости незначительно – с 2,95 м³/мин. через 2 года до 2,65 м³/мин. через 10 лет естественной дегазации массива при заданных начальных и граничных условиях, т.е. сокращается на 10,2%. Абсолютная величина притока метана из неразгруженного окружающего углепородного массива в коллектор относительно невелика, но стабильность, с которой происходит подпитка коллектора метаном, при эффективной схеме утилизации каптируемого газа, рассчитанной на невысокий расход газа и соответствующую концентрацию метана в смеси, может свидетельствовать о высоком потенциале коллектора с точки зрения метанодобываемости.

Исходя из полученной экспоненциальной зависимости, можно прогнозировать, что через 30 лет функционирования такого коллектора в заданных условиях приток метана в него с перефирийных участков углепородного массива может составить порядка 2 м³/мин., т.е. порядка 70% от дебита на начальной стадии естественной дегазации массива (через 5 лет от начала моделируемого процесса).

Таким образом, на участке длиной в плане 500 погонных метров, при заданных условиях моделирования, в техногенный коллектор за 10 лет поступит порядка 14 млн. м³ метана (при среднем дебите 2,7 м³/мин.). Дебит скважины, работающей на дегазацию такого участка через 10 лет функционирования коллектора, при 50%-ном съеме метана составит порядка 1,35 м³/мин.

Справедливо отметить, что извлечение скважинами всего объема метана, поступающего в коллектор, не представляется возможным, что объясняется рядом факторов, в т.ч. локальной нарушенностью экранирующих пород, в результате чего часть газа дренирует к поверхности шахты, обеспечивая утечку метана. Поскольку достоверно оценить степень нарушенности экранов не представляется возможным, участь данное условие при моделировании процесса массопереноса достаточно сложно, поэтому в модели оно не принималось во внимание. В результате чего полученные значения дебита метана справедливо считать несколько завышенными. Но при этом необходимо учесть, что одна скважина может вскрывать несколько выработанных пространств, работая на дегазацию более мощной толщи углепородного массива, что может существенно повлиять на величину капируемого газа.

Таким методом можно выполнить укрупненный расчет потенциально извлекаемых ресурсов шахтного метана для выработанных пространств, с учетом конкретных горно-геологических и горнотехнических условий, а также периода времени, истекшего с момента отработки участка. Ценность данной методики состоит в том, что, прогнозируя объемы поступления метана в коллектор, становится возможным определение оптимальных параметров извлечения метана, сводящих к минимуму подсосы свежего воздуха в скважину, обеспечивая там самым необходимую концентрацию метана в капируемой смеси, при заданном расходе.

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Борисенко Александр Викторович – ведущий инженер,
e-mail: a.borisenko_msmu@mail.ru,
МГИ НИТУ «МИСиС»;

Иванов Юрий Михайлович – первый заместитель технического директора,
e-mail: neverovanm@suek.ru,

Волков Михаил Александрович – начальник отдела, e-mail: volkovma@suek.ru,
ОАО «СУЭК-Кузбасс».

UDC 622.3:504.61

ANALYTICAL ESTIMATION OF METHANE INFLOW TO TECHNOGENIC RESERVOIR FROM PERIPHERAL AREAS OF UNLOADED COAL ROCK MASS

Borisenko A.V., Leading Engineer, e-mail: a.borisenko_msmu@mail.ru,
Moscow Mining Institute, National University of Science and Technology «MISiS».
Ivanov Yu.M., First Deputy Technical Director, e-mail: neverovanm@suek.ru,
Volkov M.A., Head of Department, e-mail: volkovma@suek.ru,
SUEK-Kuzbass JSC.

The important question while estimating technogenic reservoirs in coal mines in relation to methane extractability is the long term forecast of methane inflow from peripheral areas haven't been developed previously. In the article the method of estimation of methane inflow to technogenic reservoir based on mathematical modeling of methane mass transfer is described.

Key words: coal methane extraction, methane mass transfer, coal rock mass, technogenic reservoir, mathematical modeling.

