DOI 10.18454/PMI.2016.6.803

Горное дело

УДК 622.324.5.004.14

ГЕОДИНАМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОЦЕНКИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МЕТАНА В КАМЕННОУГОЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЯХ И МЕРОПРИЯТИЯ ПО ИНТЕНСИФИКАЦИИ МЕТАНОПРИТОКОВ ПРИ СКВАЖИННЫХ МЕТОДАХ ДЕГАЗАЦИИ

Е.В.ГОНЧАРОВ, С.В.ЦИРЕЛЬ
Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

В статье рассматриваются формы содержания метана в угольной толще, показана существенная зависимость внутрипластовой миграции азов от форм порового пространства и петрографических особенностей углей. Указывается на преобладание абсорбированного метана в кузнецких углях. Описываются различные формы диффузии и фильтрации угля, их зависимости от геологических и термодинамических условий. Обоснован приоритет геодинамических процессов при формировании метановых коллекторов, применимость методов морфометрии и обработки данных дистанционного зондирования для их обнаружения. Обоснована актуальность исследований процессов, активизирующих экзотермические реакции, приводящие к переходу метана в свободное состояние. Представлены результаты внедрения способа сейсмоакустического воздействия как одного из практических подходов к решению этого вопроса.

Результаты успешного промышленного опробования сопоставлены с результатами численного моделирования напряженно-деформированного состояния, управление которым также возможно с применением сейсмоакустического воздействия.

***Ключевые слова*:** метан, угольные пласты, дегазация, геомеханические и геодинамические процессы, интенсификация газопритоков.

***Как цитировать эту статью*:** Гончаров Е.В. Геодинамические методы оценки распределения метана в каменноугольных месторождениях и мероприятия по интенсификации метанопритоков при скважинных методах дегазации / Е.В.Гончаров, С.В.Цирель // Записки Горного института. 2016. Т. 222. С. 803-808. DOI 10.18454/PMI.2016.6.803

Введение. В настоящее время бóльшая часть аварий с массовой гибелью людей не только в угольной, но и во всей горно-рудной промышленности приходится на взрывы метана и вызванные ими пожары и обрушения. Существующие и разработанные в последние методы дегазации (Н.В.Ножкин, С.В.Сластунов, К.С.Коликов, А.С.Серегин), применяющиеся в различных технологических комбинациях гидроразрывы и просто повышение внимания к соблюдению норм проветривания заметно снизили количество аварий, но не решили проблему. Как показала последняя катастрофа на шахте «Северная», метановые аварии и последующие длительные пожары происходят не только на пластах, частично дегазированных без разгрузки, но также и на подработанных пластах, в оптимальных условиях для эффективной дегазации. Метановые аварии, хотя на порядок реже, чем в России, происходят и на шахтах США и Китая [16, 21, 23], где ведется длительная предварительная дегазация.

Для повышения эффективности дегазации необходимо снова проанализировать основные сведения о формах размещения в угольных залежах и вмещающих породах, а также о механизмах миграции метана на различных угольных месторождениях, Как известно, угольный метан образует как самостоятельные метановые месторождения за пределами осваиваемых площадей угольных бассейнов, так и является второй после угля энергетической составляющей угольных пластов газоугольных месторождений [1]. Угольный метан также образует самостоятельные микрозалежи как в угле, так и во вмещающих породах угольных свит. При этом все же основная часть ресурсов метана приурочена к угольным пластам и пропласткам и влияет на безопасность ведения горных работ. Месторождения каменных углей с высоким содержанием метана, доступного для экономически выгодного извлечения, можно отнести к смешанным угольно-метаноугольным месторождениям.

Однако в отличие от США и Австралии [24-25], в условиях угольных бассейнов на территории России таких месторождений пока обнаружить не удалось. Геологические условия месторождений угольного метана близки к условиям собственно метановых месторождений,

DOI 10.18454/PMI.2016.6.803

но имеют принципиальные различия, из-за которых применение технологий интенсификации метанопритоков, используемых на газодобывающих скважинах России (и мира), оказывается малоэффективным.

Методы исследований. *Анализ форм содержания в угольных пластах.* По-видимому, первая и основная причина таких различий заключается в формах нахождения угольного метана в угленосной толще. Содержание и формы нахождения метана в углях в первую очередь определяются их генетическим типом, петрографическим составом и стадией метаморфизма (фазовых преобразований), а также глубиной залегания и геодинамическими условиями. Зависимость форм нахождения от стадии метаморфизма показана в табл.1 [13, 14].

Таблица 1

Формы нахождения угольного метана в угольных пластах

Стадии фазовых преобразований	Формы нахождения и долевое участие метана, %		
	Адсорбированный (в надмолекулярных агрегатах)	Абсорбированный	Свободный
2Г-3Г	30-40	15-35	15-40
4Ж-5К-60С	15-40	20-40	15-25
7-8Т-9-10А	10-15	40-60	25-35

Стадии метаморфизма не определяют в полной мере формы нахождения метана в угольных пластах, не меньшую роль играет их петрографический состав и структура. Метан однородных клареновых донецких и кузнецких углей находится в составе устойчивых надмолекулярных агрегатов; в виде подвижной фазы (флюида), сорбированной на внутренней поверхности угля; в виде свободных газов, распределенных в открытых взаимосвязанных или закрытых полостях (порах и трещинах).

Свободный метан и водометановые флюиды в угольных пластах находятся в кавернозно-поровых, трещинно-поровых, трещинных, послойно-трещинных и послойных полостях, составляя в кузнецких углях от 3-5 до 12-15 % от общих ресурсов метана. Различные формы сорбированного метана образуют тонкие молекулярные пленки на внутренних поверхностях полостей. Сорбированный метан составляет более 40 % от его общего количества. Химически не связанный метан в составе псевдоклатратов составляет от 5 до 20-30 %. В общей сложности физически связанный метан в кузнецких углях составляет в среднем от 60 до 70 %. Молекулярно (химически) – связанный (адсорбированный) метан в количестве от 5 до 10 % частично отделяется от угольной толщи при интенсивных лавинно-протекающих процессах внезапных выбросов, а также с малой скоростью от кусков раздробленного и разгруженного угля.

Анализ форм миграции метана. Внутрипластовая миграция газов, определяющая формирование пластовых микрозалежей, незначительна и обусловлена наличием каналов (проницаемых пор). Проницаемость каналов определяется их эффективным сечением: кнудсеновские – фольмеровские – броуновские поры по возможным формам движения молекул метана малоэффективны; лишь начиная с поперечника 100 мкм возможно пуазейлевское свободное течение газа (табл.2) [14, 15].

Анализ давления газа в угольных пластах и вмещающих породах и его влияние на формы миграции. Давление газа в угольных пластах в значительной мере определяет соотношение свободной и связанных форм. Доля свободного газа увеличивается до максимума 10-15 % при давлениях метана в угольных пластах, составляющих на глубинах: 500-600 м – 4-6 МПа; 600-700 м – 6-8 МПа; 700-800 м – 7-9 МПа; 800-1000 м – 8-11 МПа и более 1000 м – 9-14 МПа. Остаточное давление в толще в среднем составляет около 1,0-1,2 МПа [1, 15].

Давление газов, находящихся в углевмещающих породах, также определяется глубиной их залегания, исключая зоны аномально высокого пластового давления (АВПД). Большое значение в оценке ресурсов имеют проявления аномально-высоких пластовых давлений на глубинах более 600-700 м. Величина АВПД может многократно (в десятки и сотни раз) превышать средние давления на соответствующих глубинах. АВПД определяет резкое повышение удельных запасов газов в локальных залежах (микрозалежах) метана и их эффективное использование [1, 7, 15, 17, 18, 20]. В горных выработках зоны АПДВ являются основным источником мощных суфляров.

DOI 10.18454/PMI.2016.6.803

Роль градиента давления вне очагов АВПД в пределах ненарушенного трещинами угольного пласта в внутрипластовом движении газов сказывается лишь на небольших расстояниях (доли и единицы метров). Только системы трещин и разрывы расширяют дальность миграции газов и способствуют возникновению выбросов различной интенсивности.

Таблица 2

Характеристика порового пространства ископаемых углей в связи с их газогенерацией

Полости	Размер, мкм	Место, форма, особенности проявления	Связь с газоносностью. Формы движения	Методы исследования
Полостное (поровое) внутриагрегатное и межагрегатное пространство				
Молекулярные поры	0,0005-0,00007 и менее	В молекулярной, макромолекулярной и межмолекулярной структурах	Молекулярно связанный, клатратный и сорбированный. Диффузная и молекулярная миграция	Физико-химические; дифрактометрические; просвечивающей электронной микроскопии
Ультромикропоры фольмеровские	0,001-0,01	Удлиненные поры в структуре с преобладанием поверхностных процессов	Преобладающая часть сорбированного газа, не выделившегося при разрушении угля	Физико-химические и растровой электронной микроскопии РЭМ, ПЭМ и ОЭМ
Мезомикропоры кнудсеновские	0,001-0,1	В бесструктурном витрините с равновесным отношением поверхностных процессов и процессов вязкостного течения	Большая часть сорбированного газа, выделяется в лавинно-протекающих процессах с интенсивным диспергированием	
Броуновские	0,1-1,0	Поры коллоидной и кристаллической структуры витринита с преобладанием молекулярного движения	Меньшая доля газа свободно мигрирующего в газоносной системе замкнутого пласта	Физико-химические, РЭМ и оптической микроскопии
Пуазейлевские	1,0-10,0	В структуре фрагментов витринита и в бесструктурной массе. Преобладает вязкостное течение	Свободно выделившийся газ	Физико-химические, физические, растровая электронная и оптическая микроскопия
Микропоры	Более 10	В структуре фюзинита, семифюзинита, семи- и структурного витринита	Газ, не всегда свободно выделявшийся	Физические и физико-химические, РЭМ и ОМ
Полостное межслоевое, трещинное и сложное межагрегатное пространство				
Трещинное и межслоевое пространство	Зияние 0,01-10,0	Секущие послойные, межслойные и внутрислойные. Поверхностные процессы уменьшаются, вязкостное течение преобладает	От сорбированного до свободного газа	Физические, физико-химические, ОЭМ и ПЭМ, РЭМ и ОМ

Возможность извлечения сорбированного (но химически не связанного) газа определяется формами движения его молекул: кнудсеновское – скольжение по поверхностям соединяющих каналов с отрывом молекул и образованием или замещением вакансий; фольмеровское – в процессе соударений молекул, скольжения по поверхностям каналов, послойного перемещения и др.; броуновское движение, проходящее как обмен радикалами. Поэтому при разработке методов дегазации и добычи метана не стоит ограничиваться только пуазейлевскими процессами и упускать из виду другие формы миграции через более тонкие поры, вплоть до неоднородностей кристаллической решетки.

Тем не менее, малая интенсивность диффузии и различных форм течения через тонкие поры делает весьма малоэффективным извлечение из угольного пласта молекулярно-связанного и сорбированного газа без активного воздействия на структуру угля. Данные лабораторных и натурных исследований показывают, что в естественном ненарушенном состоянии угли имеют низкую проницаемость. Основной механизм движения газа внутри угля происходит за счет механизма диффузии, а процесс фильтрации – в системе естественных трещин «кливажа» по закону Дарси:

$$Q = S\frac{K_{пр}}{\mu}\frac{\Delta(P + gh\rho)}{l},$$

где S – площадь поперечного сечения образца; P – давление на свободную поверхность жидкости, т.е. пропорционально давлению $\Delta P = (P + gh\rho)$, вызывающему фильтрацию жидкости сквозь пористую среду на пути длиной l; μ – вязкость жидкости. При этом коэффициент диффузии уг-

DOI 10.18454/PMI.2016.6.803

лей чрезвычайно мал – в обычных условиях он составляет 10^{-11} с/см^2, но при этом весьма существенно зависит от локальных изменений температуры и характера динамического воздействия. На это также указывает А.Н.Десяткин [8] , приводя данные лабораторных и натурных исследований, в которых показано, что в естественном ненарушенном состоянии угли имеют низкую проницаемость.

Результаты исследований. Проведенные исследования подтвердили мнение В.В.Кирюкова и его коллег [13-15] о важности петрографических исследований угля. В частности, исследования [13] еще раз экспериментально подтвердили вывод о том, что метаноносность угля зависит от содержания витринита в угле, который характеризуется большим количеством микропор, являющихся накопителями сорбированного метана. Таким образом, чем больше витринита в угле, тем выше его метаноемкость. Содержание фюзинита (инертинита) в угле коррелирует с количеством макропор и, как следствие, уголь, содержащий больше инертинита, быстрее десорбирует метан. Содержание липтинита в угле характеризуется малым содержанием сорбированного метана.

Проведенный анализ показал важность детального исследования форм нахождения и форм миграции метана на конкретном угольном месторождении для выбора способов и параметров дегазации.

Для определения метаноносности применяют прямые и косвенные методы. Прямые методы основаны на исследовании кернов из геолого-разведочных скважин и извлечения из них метана. При всех недостатках (от редкой сети скважин до методов отбора и исследований кернов) метод является нормативным, и основные данные по газоносности угольных месторождений России базируются на значениях, полученных на его основе [2, 3].

К сожалению, существует немного косвенных признаков, указывающих на вероятные физико-технологические решения. Кроме того, все методы, кроме лабораторных, применяемые для оценки натурных (шахтных, пластовых) показателей метаноносности, газопроницаемости, газоотдачи, диффузии метана, имеют множество недостатков. Тем не менее, в общем плане, при систематически организованном комплексном наблюдении возможно получить данные о газообильности выработок (с учетом токов, перетоков, выработанных пространств и пластов-спутников), достаточные для решения большинства технологических задач. В области косвенных методов оценки газоносности, в частности, остаточной газоносности и прогноза миграции метана, наиболее конструктивными представляются работы под руководством О.В.Тайлакова [21, 22].

Определение газоносности угля косвенным методом основывается на анализе фактической газообильности выработок и установлении баланса по источникам газовыделения, включая выработанные пространства, пласты, пропластки-спутники и собственно эксплуатируемые пласты. В таких условиях термины проницаемости и миграции метана приобретают неопределенность. В работах О.В.Тайлакова [4, 21, 22] решается задача наиболее корректного определения газоносности с учетом десорбции метана при применении шахтного керноотборника, обеспечивающего квазипостоянные термодинамические условия при выбуривании пластовых проб и методов обработки, учитывающие процессы фильтрации (закон Дарси), и диффузии (закон Фика-2). Применение подобных методов позволяет эффективно сопоставлять данные по изменению напряженно-деформированного состояния, моделируемого на пласте [6, 11, 17, 22, 23] с динамикой изменения газоносности пласта.

Чрезвычайно важно отметить, что преобладание абсорбированного метана и запертого в фактически закрытых порах в угле Кузнецкого и других месторождений России, делает зависимости сорбции от давления, температуры и др. важнейшими факторами, определяющими содержание газа в выработках. Исходное повышение газосодержания, приводящее к аварийным ситуациям, чаще всего объясняется либо дефектами и нарушениями системы проветривания, суфлярами из невыявленных АВПД, а также выбросами из зон скоплений свободного метана. Однако дальнейшее выделение значительных объемов метана, способных развивать катастрофические явления, прежде всего пожары и взрывы, объясняется мощными процессами десорбции при повышении температуры, происходящими как из неразгруженных, так и разгруженных угольных толщ и скоплений кусков угля в забоях и выработанном пространстве. Источниками метана могут служить нагретые пропластки угля и высокозольные углесодержащие породы в кровле и почве ава-

DOI *10.18454/PMI.2016.6.803*

рийного пласта, а также как неотработанные, так и отработанные участки сближенных с ним угольных пластов. Кроме того, некоторую роль может играть метан, запертый в трещинах, образованных при подработке и обрушении основной кровли.

Заключение. Таким образом, самым эффективным способом дегазации углей Кузнецкого бассейна, в первую очередь извлечения сорбированного метана, является нагрев. Однако высокая энергоемкость процессов нагрева, низкая температуропроводность угля и опасность вызвать интенсивные окислительные процессы в угле сдерживают применение тепловых методов дегазации.

Другим менее энергоемким и более безопасным способом [6, 19] является сейсмоакустическое воздействие. Однако его применение должно базироваться на учете достоверных сведений о формах содержания, петрографическом составе и структуре угля, горном и газовом давлении и геодинамической обстановке в целом. До настоящего времени при проведении дегазации с помощью сейсмоакустических и родственных им методов учет петрографических и геодинамических факторов вовсе не проводился, либо выполнялся достаточно формально, что резко снижало эффективность дегазационных мероприятий. Авторы предлагают встраиваемый в существующие методы дегазации способ, но с учетом петрогафических и геодинамических условий залегания места добычи угля.

Изложенный в работах [4, 6, 7, 12, 18, 19] способ сейсмоакустического воздействия включает комплекс геодинамического районирования, выделение областей пластов, перспективных для первоочередной дегазации с применением излучателей сейсмоакустических колебаний АКСИ, и развитие мероприятий по дегазации с учетом изменения напряженно-деформированного состояния пласта. Сейсмоакустическое воздействие приводит не только к разрушению межпоровых перегородок, но и к частичному преобразованию колебательной энергии в тепловую, и улучшению условий десорбции метана. При этом увеличивается ценность комплекса работ по геодинамическому районированию, который позволяет заранее определять участки блочных массивов горных пород со склонностью к газодинамическим проявлениям, отличающиеся большей проницаемостью, газонасыщенностью и более благоприятными условиями дегазации. На основе этих представлений был разработан и запатентован способ, позволяющий заранее выделить области, наиболее перспективные по выделению метана из областей с меньшим горным давлением (т.е. с большей проницаемостью) и с максимальной трещиноватостью, где с большей вероятностью возможно встретить газовые аномалии [17].

Благодарность. *В статье были учтены результаты совместных исследований с профессором В.В.Кирюковым, о котором авторы сохранили светлую память.*

ЛИТЕРАТУРА

1. *Айруни А.Т.* Прогнозирование и предотвращение газодинамических явлений в угольных шахтах. М.:Наука,1987. 310 с.

2. Газообильность каменноугольных шахт СССР: Эффективные способы искусственной дегазации угольных пластов на больших глубинах / Р.А.Галазов, А.Т.Айруни, И.В.Сергеев и др. М.: Наука, 1987. 200 с.

3. Газообильность угольных шахт СССР. Комплексное освоение газоносных угольных месторождений / А.Т.Айруни, Р.А.Галазов, И.В.Сергеев и др. М.: Наука, 1990. 213 с.

4. *Гончаров Е.В.* Оборудование и технологии термогазохимического воздействия при интенсификации нефтегазопритоков в наклонно-пробуренных и выполаживающихся скважинах / Е.В.Гончаров, И.Ф.Попов // Время колтюбинга. 2014. № 4(050). С. 68-69.

5. *Гончаров Е.В.* Методы и способы извлечения углеводородного сырья в условиях России из углей и лигнитов / Е.В.Гончаров, И.Ф.Попов, Л.А.Шангараева // Нефть, газ. Промышленность. 2014. № 3(53). С. 24-33.

6. *Гончаров Е.В.* Эффективность сейсмоакустического воздействия АКСИ на интенсификацию дегазации угольных пластов / Е.В.Гончаров, С.В.Цирель, В.В.Зубков // Вестник КУЗГТУ. 2016. № 1. С. 28-36.

7. Дегазация выбросоопасных пластов термосейсмоаккустическим воздействием / Е.В.Гончаров, Э.Н.Работа, А.А.Вьюнников, Е.В.Лодус // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2009. Отдельный выпуск. № 11. С. 49-65.

8. *Десяткин А.Н.* Выявление угольных пластов и оценка их промысловых характеристик по данным геолого- геофизических исследований скважин при добыче метана: Автореф. дис…канд. геол.-мин. наук. М.: РГУ нефти и газа им. И.М.Губкина, 2011. 22 с.

9. *Зубков В.В.* Формирование зон эффективной дегазации при отработке свиты угольных пластов / В.В.Зубков, А.А.Вьюников // Маркшейдерия и недропользование. 2015. № 2. С. 29-32.

10. *Зубков В.В.* Расчет зон эффективной дегазации при отработке свит пластов / В.В.Зубков, И.А.Зубкова // Маркшейдерия и недропользование. 2013. № 3. С. 54-57.

11. *Зубков В.В.* Расчет зон эффективной дегазации при отработке свит пластов в зоне влияния разрывных нарушений / В.В.Зубков, И.А.Зубкова // Маркшейдерия и недропользование. 2013. № 5. С. 60-62.

DOI *10.18454/PMI.2016.6.803*

12. *Карманский А.Т.* Повышение продуктивности нефтяных скважин воздействием на призабойную зону пласта жидкими термогазохимическими составами / А.Т.Карманский, Е.В.Гончаров, И.Ф.Попов // Нефть, газ. Промышленность. 2013. № 5(50). С. 22-25.

13. *Кирюков В.В.* Геосинергетические проблемы нанонространства и фазовых состояний ископаемых углей и угольного метана / В.В.Кирюков, В.Н.Новикова // Записки Горного института. 2005. Т. 163. С. 179-182.

14. *Кирюков В.В.* Промышленно-геологические факторы освоения угольно-газовых залежей Донецкого бассейна / В.В.Кирюков, О.А.Кущ; Межвуз. сб. Екатеринбург: Ур. горно-геол. академия, 1998. Вып. 8. С. 243-253.

15. *Кирюков В.В.* Топливно-энергетический комплекс России. Перспективы развития угольной промышленности / СПбГГИ, СПб. 1997. 68 с.

16. *Кузнецов С.В.* Природа и механизм формирования газопроницаемых зон в угольных пластах / С.В.Кузнецов, В.А.Трофимов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 1999. № 1. С. 21-27.

17. Патент № 2136850 РФ. Способ извлечения метана из угольных пластов / Д.В.Яковлев, А.Н.Шабаров, Е.В.Гончаров и др. Опубл.10.09.99. Бюл. № 25.

18. Патент № 2322586 РФ. Способ извлечения метана из пластов угольных месторождений / А.Н.Шабаров, Е.В.Гончаров, Д.Ю.Таланов, В.А.Карих. Опубл.20.04.2008. Бюл. № 11.

19. Патент № 2328594 РФ. Способ газоимпульсной обработки газонефтедобывающих скважин и устройство для его осуществления / А.Н.Шабаров, Е.В.Гончаров, А.Т.Карманский и др. Опубл. 10.07.2008. Бюл. № 19.

20. Патент № 2450105 РФ. Способ охраны наземных объектов от последствий деформационных процессов, инициированных разработками месторождений нефти и газа / Е.В.Гончаров, В.Н.Киселев, Н.В.Гусева и др. Опубл.10.05.2012. Бюл. № 13.

21. *Тайлаков О.В.* Определение остаточной газоносности угольных пластов на основе макрокинетических десорбционных процессов фильтрации и диффузии метана для оценки эффективности дегазации / О.В.Тайлаков, А.Н.Кормин, В.О.Тайлаков // Наука и техника в газовой промышленности. 2014. № 1. С. 10-13.

22. *Шабаров А.Н.* Геомеханические аспекты внезапных выбросов угля и газа и дегазации угольных пластов / А.Н.Шабаров, Е.В.Гончаров, Н.В.Гусева // Маркшейдерский вестник. 2015. № 1. С. 43-47.

23. Coalbed Methane Extraction: Detailed Study Report, United States Environmental Protection Agency, December 2010. P. 91.

24. Handbook on Coal Bed Methane Produced Water: Management and Beneficial Use Alternatives. U.S. Department of Energy National Petroleum Technology Office Bureau of Land Management, July 2003. P. 322.

25. *Rice D.* Coal bed Methane an untapped energy resource an environment concern. U.S. Geological Survey, Energy Resource Surveys Program, USGS Fact Sheet FS-019-97, 1992. P. 19-97.

***Авторы*: Е.В.Гончаров,** *старший научный сотрудник*, *goncharovbox@mail.ru* (*Санкт-Петербургский горный университет*, *Санкт-Петербург*, *Россия*), **С.В.Цирель,** *д-р техн. наук*, *главный научный сотрудник*, *tsirel58@mail.ru* (*Санкт-Петербургский горный университет*, *Санкт-Петербург*, *Россия*).

Статья принята к публикации 30.09.2016.