

Согласно прогнозам к 2020 году глобальная эмиссия угольного метана в эквиваленте CO_2 достигнет 560 млн т (в 2000 году 440 млн т) [1]. Доля в ней украинских шахт составит около 7 %, что сопоставимо с уровнем потребления природного газа в стране. В настоящее время в Украине утилизируется лишь несколько процентов выделяющегося метана, третьего-четвертого по ресурсу после угля, природного газа и нефти, невозполнимого энергетического носителя. Такое положение дел следует рассматривать как растраниживание национальных природных богатств, сопряженное с нанесением экологического ущерба биосфере. В связи с этим представляется актуальной разработка новых или модернизация существующих способов и средств снижения негативных экологических или аварийных последствий выделения метана при угледобыче, его каптажа и использования в качестве топлива или химического сырья.

В мировой практике различают следующие виды дегазации угольных месторождений: *заблаговременная*, производимая на перспективных участках до проектирования и строительства шахт, она позволяет извлечь до 15–25 % газа, выделяющегося при отработке шахтного поля; *предварительная*, - в период строительства шахты, - 10–20 %; *сопутствующая*, - при эксплуатации шахты, - 5–25 % (кроме того, в этот период вентиляцией удаляют 20–50 % содержащегося в угленосной толще метанашахтном поле метана); *последующая*, - из закрытых шахт, - 15–45 % . Как следует из приведенных данных, основную долю газа извлекают из месторождений при их разработке и после закрытия шахт.

Согласно современным представлениям [2, 3], метан содержится в угольных пластах в четырех основных состояниях, (%): свободный – 2–15; сорбированный – 8–60; газокристаллический – 1–30; газоугольный твердый раствор – 10–40 (по некоторым литературным источникам до 85).

Установлено [3], что в угольном веществе можно условно выделить фильтрационно-сорбирующие частицы (ФСЧ) первого и второго порядка. Более крупные ФСЧ-1 оконтурены трещинами

или фильтрующими макропорами, характерный размер которых превышает длину свободного пробега молекул газа ($d > \lambda > 10^{-4} \text{ м}$). Внутри ФСЧ-1, окруженные порами и каналами переходного размера ($d = 10^{-5} \dots 10^{-6} \text{ м}$), расположены ФСЧ-2. Они, в свою очередь, разделены на сорбционные частицы порами и каналами еще меньшего размера.

В многочисленных публикациях приведены результаты наблюдений эмиссии метана из зон влияния выработок, однако в недостаточной мере, по нашему мнению, раскрыт механизм нарушения равновесного состояния системы «твердое вещество-флюиды» и истечения газа из конгломератов фильтрационно-сорбирующих частиц (ФСЧ), которыми являются угольные пласты и газоносные породы. Подавляющее число исследователей связывают интенсификацию метаноотдачи массивов с их разгрузкой от горного давления и увеличением размеров транспортирующих газ каналов и пор. Такое мнение является бесспорным, но результаты натуральных наблюдений свидетельствуют об увеличении дебита дегазационной скважины впереди фронта очистных работ задолго до попадания ее в зону разгрузки [4]. В связи с этим представляет интерес изучение параллельных процессов деформирования горного массива под влиянием выемки угля и метаноотдачи при этом.

В нетронутом горными работами массиве система «твердое вещество-флюиды» (понятие «флюиды» включает рассеянные среди твердой фазы газовые и жидкостные компоненты) находится в квазиравновесном состоянии, установившемся в течение горообразовательных эпох. Энергетический потенциал такой системы минимален и для извлечения метана из нее необходимо привнесение извне дополнительной энергии. На примере простейшей системы из двух молекул газа (рис. 1) наглядно можно продемонстрировать, что в равновесном состоянии молекулы находятся в «потенциальной яме». Для нарушения равновесия следует за счет внешнего воздействия изменить расстояние между молекулами R , например, за счет механических деформаций системы, либо изменить кинетический диаметр молекул R_m , например, за счет теплового воздействия. Эти рассуждения вполне можно, по нашему мнению, экстраполировать на любые более сложные молекулярные системы.

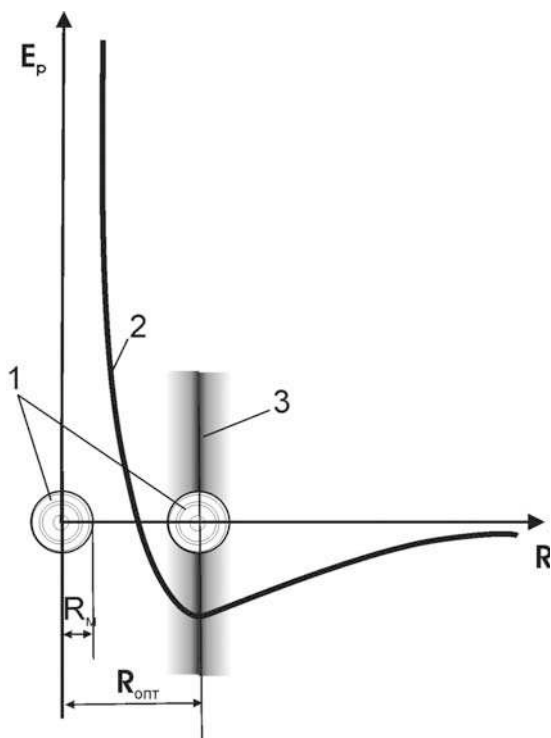


Рис. 1. Изменение потенциальной энергии E_p системы из двух молекул свободного газа (1) в зависимости от расстояния R между ними: 2 – график изменения энергии; 3 – «потенциальная яма»; R_m – радиус молекулы; $R_{опт}$ – межмолекулярное расстояние, соответствующее минимальному уровню энергии

Из-за труднодоступности газоносных породных толщ, их влажности, высокой теплоемкости и низкой температуропроводности осадочных горных пород, процесс внешнего воздействия на угольные пласты и породные

слои, для извлечения метана, представляется весьма технологически сложным и трудоемким. Этим объясняется относительно малая продуктивность способов заблаговременной и предварительной дегазации метаноносных толщ. Для интенсификации этих видов дегазации необходимо энергоемкое и дорогостоящее физико-химическое воздействие на горный массив.

Как показывает практика, наибольшее воздействие на все элементы системы «твердое вещество - флюиды» оказывает привносимая механическая энергия, обусловленная перераспределением напряженно-деформированного состояния (НДС) горного массива под влиянием проводимых подготовительных и особенно очистных выработок. Под влиянием механических воздействий метан стремится перейти из более сложных состояний, таких как твердый раствор, сгущения сорбатов и т.п. в свободный газ. При этом его энергетический потенциал возрастает независимо от характера

внешнего воздействия: сжатия, растяжения, сдвига, кручения и других.

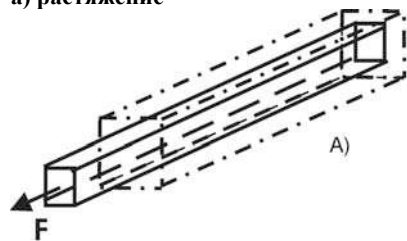
Таким образом, перспективным направлением каптажа шахтного метана представляется использование происходящих при отработке месторождения изменений НДС горного массива для увеличения уровня энергии породно-флюидной системы (ПФС) и перехода метана в подвижную, относительно легко фильтрующуюся по каналам свободную форму. Позитивный опыт такого подхода к извлечению шахтного метана накоплен в США при разработке в сравнительно благоприятных горно-геологических и горнотехнических условиях месторождения Сан Хосе [5]. Современные низкие показатели сопутствующей дегазации в Украине можно объяснить не только сложными природными условиями, но преимущественно недостаточной изученностью процессов, происходящих в окружающем горную выработку массиве, а также организационными и технологическими причинами и традиционно конкурирующей ролью вентиляции в извлечении метана из шахт.

Рассмотрим элементарный фрагмент массива в виде параллелепипеда с произвольным соотношением сторон, который находится под действием внешних нагрузок (рис. 2). При этом доминирующую роль играют деформации пористой твердой составляющей ПФС, а ее жидкие и газообразные компоненты находятся в зависимости от нее состоянии.

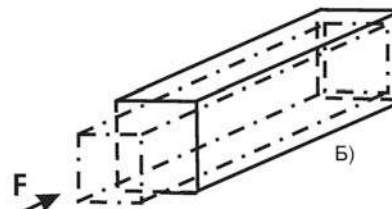
Из рис. 2 видно, что при действии в пределах прочности массива простых видов деформаций, таких как: одноосное растяжение или сжатие, сдвиг, кручение, изгиб – происходит увеличение линейных размеров отдельных граней или ребер параллелепипеда. Это приводит к увеличению расстояния между молекулами содержащихся в них флюидов ($R > R_{омт}$, см. рис. 1) и, соответственно, к труднообратимому выталкиванию молекул из «потенциальной ямы». Значительная часть метана в этот период стремится перейти в свободное состояние из более сложных форм состояния. Увеличение линейных размеров фрагмента приводит к раскрытию транспортных каналов и повышению фильтрационных характеристик среды.

В противоположной части выделенного нами фрагмента наблюдается уменьшение линейных размеров ($R < R_{омт}$), что также определяет увеличение потенциальной энергии в ПФС за счет уменьшения расстояния между молекулами.

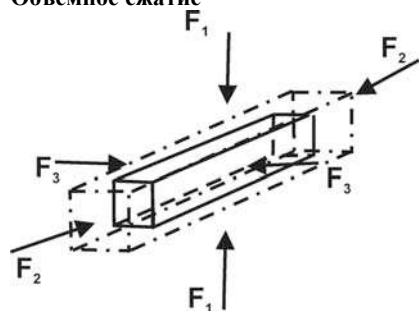
Одноосные деформации
а) растяжение



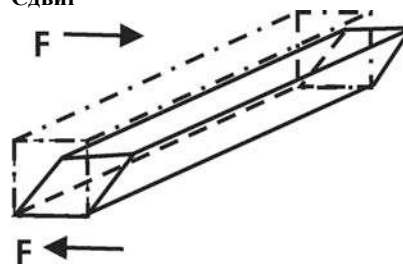
б) сжатие



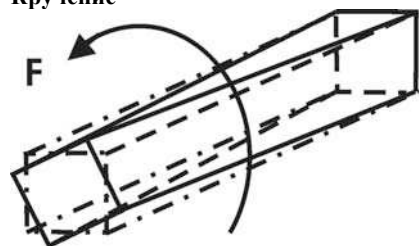
Объемное сжатие



Сдвиг



Кручение



Изгиб

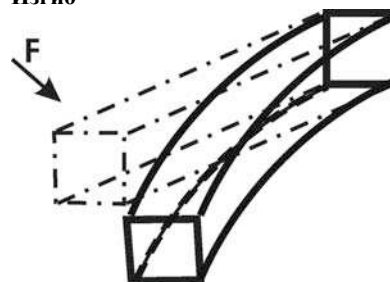


Рис. 2. Изменение формы и размеров (сплошная) фрагмента горного массива относительно первоначальных (штрих-пунктир) при различных видах нагрузки: F , F_1 , F_2 , F_3 – векторы деформирующих усилий

Это же относится к условию объемного сжатия. Вместе с твердой фазой молекулы флюидов приобретают дополнительную энергию, перемещаясь на противоположный склон «потенциальной ямы», и газы имеют возможность перейти в свободное состояние.

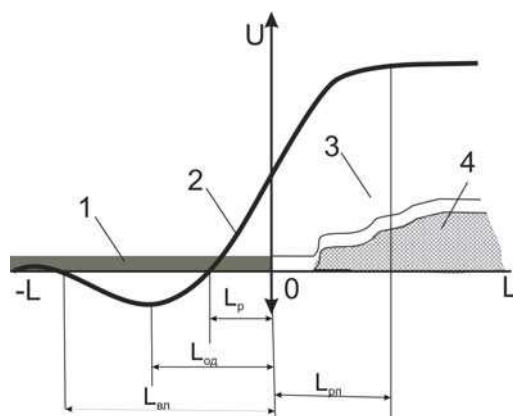


Рис. 3. Деформации горного массива в окрестностях одиночной очистной выработки: 1 - угольный пласт; 2 – линия, описывающая вертикальные сдвигения U породного массива на уровне почвы пласта; 3, 4 – разгруженные подработанные породы кровли, соответственно, зависшие и обрушенные; $L_{вл}$, $L_{од}$, L_p , $L_{рп}$ – параметры кривой сдвижений массива

Однако при уменьшении линейных размеров фрагмента происходит сокращение размеров порового пространства, и значительная часть молекул остается в фиксированном положении, имея повышенный уровень потенциальной энергии. Можно предположить, что это является одним из ключевых моментов возникновения условий для развития газодинамических явлений в горных выработках.

Следует отметить, что деформации горного массива под влиянием горных работ имеют сложный характер. Анализ характерной кривой (рис. 3) вертикальных сдвижений (перемещений) породного массива, показывает, что на уровне почвы разрабатываемого пологого пласта происходят все типы вышеприведенных деформаций.

Например, в зоне опорного давления одновременно могут происходить сжатие, кручение, сдвиг и изгиб. При этом, как правило, происходит нарушение целостности твердой составляющей ПФС, образование новых трещин, развитие существовавших, что создает предпосылки для фильтрации свободного газа, эффузивного перемещения молекул в микропорах или тепловых подвижек их в слоях сорбированных газов.

Обусловленное изменением НДС массива увеличение энергетики флюидов начинается уже при начальном изменении напряженно-деформированного состояния массива горных пород под влиянием очистных работ на расстоянии $L_{вл}$ впереди забоя (см. рис. 3). Экспериментально, в шахтных условиях,

Коэффициенты уравнения линии сдвижения массива

Параметр	Обозначение	Значение коэффициентов уравнения	
		<i>a</i>	<i>b</i>
Начало влияния очистных работ	$L_{вл}$	0,1	20
Максимальное опускание в зоне временного опорного давления	$L_{од}$	0,05	10
Начало разгрузки массива	L_p	0,01	30
Максимальная разгрузка	L_{pn}	0,14	30

установленные параметры L_i кривой вертикальных сдвижений, превалирующего вида деформаций массива, определяются преимущественно, глубиной ведения горных работ H , м, и с достаточной для практического использования точностью могут быть определены из уравнения вида [5]:

$$L_i = a \cdot H - b, \text{ м}$$

где a и b эмпирические коэффициенты.

В средней части лавы параметры процесса вертикальных сдвижений U пород почвы пласта имеют следующие значения (таблица). Следует учитывать, что для краевых частей лавы значения коэффициентов a и b следует скорректировать. Если рассматривается примыкающая к нетронутому массиву часть лавы, то их значения следует уменьшить в полтора - два с половиной раза, а если лава примыкает к выработанному пространству, то - увеличить в два - три раза. Значения коэффициентов a и b могут быть использованы для прогнозирования режимов газовыделения при сопутствующей дегазации углепородной толщи, как с применением ее гидроразрыва или других способов увеличения проницаемости неразгруженного от горного давления массива, так и без них.

В условиях Донбасса, где фильтрационные характеристики углепородного массива сравнительно с другими месторождениями мира невелики, выделение метана в скважины заблаговременной и предварительной дегазации незначительно, и эффективный радиус влияния скважины, даже при использовании технологий повышающих проницаемость среды, не превышает одного - двух десятков метров. Под влиянием очистной выработки, на расстоянии менее $L_{вл}$, изменяется энергетическое состояние ПФС и начинается интенсивное газовыделение в скважины. После приближения лавы на расстояние L_p , расход газа в сква-

жине еще больше возрастает из-за разгрузки массива и увеличения размеров транспортных каналов ФСЧ.

Снижение выхода метана из скважин, как правило, происходит после удаления лавы на расстояние, превышающее L_{pn} по двум основным причинам.

Во-первых, из-за исчерпания ресурсов флюидов в расположенной вблизи выработанного пространства очистной выработки газоносной толще. Вследствие малой пропускной способности трещин поступление газа из удаленных газовых коллекторов продолжается сравнительно долго и, как правило, задерживается относительно подвигания фронта очистных работ. Бурение дегазационных скважин в кровлю и почву обрабатываемого пласта, проведение газосборных выработок, в значительной степени способствуют интенсификации процесса газоотдачи из удаленных от выработанного пространства пластов-спутников и слоев песчаников. Однако следует отметить, что выравнивание давления в трещиноватых коллекторах продолжается десятилетиями, чем можно объяснить сравнительно высокую долю извлекаемого газа при дегазации закрытых шахт.

Другой причиной снижения газоотдачи является уплотнение пород в первоначально разгруженных зонах в почве и кровле выработанного пласта в результате влияния так называемого развития горных работ. В зависимости от формы и размеров в плане выработанного пространства формируется свод полных сдвижений, это часть пород кровли пласта, потерявшая связь с окружающим горным массивом в результате подработки. В первоначальный после отделения от массива период породы кровли находятся в наиболее разгруженном состоянии, метаноотдача при этом максимальна. При удалении очистного забоя и соответственно развитии высоты свода полных сдвижений степень разгрузки уменьшается за счет сдавливания нижележащих слоев обрушающимися вышерасположенными, что приводит к снижению фильтрационных свойств подработанной толщи.

Таким образом, базирующийся на теоретических и экспериментальных исследованиях анализ, позволяет сделать вывод, что при любом характере изменения НДС углепородного массива происходит увеличение энергетического потенциала ПФС, что способствует переходу метана из растворенного, сорбированного, кристаллического в свободное состояние. Кроме того, установлены

практические параметры процесса интенсификации газоотдачи при попутной дегазации углегазового массива.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пучков Л.А., Каледина Н.О. Обоснование стадийности извлечения шахтного метана на различных стадиях освоения месторождения угля/ Горный информационно-аналитический бюллетень. Тематическое приложение «Метан». - М.: Изд-во МГГУ. 2006. - С. 7-21.
2. Васючков Ю.Ф. К методике определения параметров процесса гидрорасчленения пласта для его дегазации/ Метан. Сб. науч. тр. симпоз. «Неделя горняка – 2006». - М.: Изд-во МГГУ. 2007. - С. 257-267.
3. Мальшев Ю.Н., Трубецкой К.Н., Айруни А.Т. Фундаментально прикладные методы решения проблемы метана угольных пластов. - М.: Изд-во Академии горных наук, 2000.-519 с.
4. Шувалов Ю.В., Павлов И.А., Веселов А.П. Использование ресурсов и регулирование газовых режимов шахт Воркутского месторождения. - С.-Пб.: МА-НЭБ. 2006. – 392 с.
5. Добыча горючих газов из угольных месторождений/Л.Л. Кауфман, Н.И. Кулдыркаев, Б.А. Лысиков - Донецк: «Вебер», 2007.- 232 с.
6. Костенко В.К. Исследование и обоснование параметров расположения полевых подготовительных выработок в зонах разгрузки при разработке пологих пластов на глубоких горизонтах/Автореферат дисс... канд. техн. наук, ДПИ, Донецк, 1982, - 20 с. **ГИАБ**

Коротко об авторах

Костенко В.К., Бокий А.Б., Шевченко Е.В. – Донецкий национальный технический университет, Украина, Донецк.



© С.А. Радченко, Е.А. Соловьева,
2008

С.А. Радченко, Е.А. Соловьева