

Гринев В., директор,
Волошина Н., старший научный сотрудник
(Институт физики горных процессов НАН Украины),
Кузнецова Л., главный геолог
(ООО «Недра Луганщины»)

К ВОПРОСУ ПОДСЧЕТА РЕСУРСОВ МЕТАНА В ПОДРАБОТАННОМ УГЛЕПОРОДНОМ МАССИВЕ

ДО ПИТАННЯ ПІДРАХУНКУ РЕСУРСІВ МЕТАНУ У ПІДРОБЛЕНОМУ ВУГЛЕПОРОДНОМУ МАСИВІ

У роботі розглядається проблема підрахунку залишкових ресурсів метану в підробленому гірничому масиві. Зокрема – структура розподілу ресурсів метану в розвантаженому від гірничого тиску гірничому масиві. Наведено результати спостережень за формуванням статичної мульди зрушення як додаткового шляху міграції метану на денну поверхню для умов первинної і вторинної підробки земної поверхні.

TO THE QUESTION OF CALCULATION OF METHANE RESOURCES IN THE MASSIF EARNED ADDITIONALLY BY ROCK MASSIF

Work is devoted to a problem of residual methane resources calculation in the earned additionally massif. The structure of methane resources distribution in the rock massif unloaded from rock pressure is considered. Results of supervision over formation static subsidence through as additional way of methane migration on a day surface for conditions of primary and secondary underworking of an earth's surface are given.

Ключевые слова: метан, газоносность, выработанное пространство, песчаники, угольный пласт.

Ключові слова: метан, газоносність, вироблений простір, пісковики, вугільний пласт.

Keywords: methane, gas bearing capacity, produced space, slide, coal layer.

Проблемы широкомасштабного использования техногенных скоплений метана в угольных месторождениях требуют в первую очередь определения объема его потенциальных ресурсов. Сложности при подсчете состоят в том, что на сегодняшний день проверить подлинность тех или иных предположений зачастую возможно лишь в реальных условиях, выполнив бурение газодобывающей скважины, что не под силу многим научно-исследовательским организациям. Между тем процессы истечения метана из угля различных марок, с учетом разных фазовых состояний, достаточно хорошо изучены в лабораторных условиях, и эти данные должны стать основой для описания процесса десорбции метана из подработанных угольных пластов. При этом на сегодняшний день также достаточно хорошо изучены вопросы, связанные с процессами сдвижения горного массива, подвергшегося подработке, что позволяет достаточно уверенно говорить об объемах газоносных пород, участвующих в интенсивном метановыделении, а также о путях миграции метана в горные выработки и на земную поверхность.

Рассмотрим кратко процесс формирования техногенного скопления метана.

Применяемая технология угледобычи приводит к изменению напряженно-деформационного состояния пород, образующих горный массив. В результате этого влияния происходит перерас-

пределение и газовых ресурсов между фазовыми составляющими. Разгрузка подработанных горных пород создает условия для перехода части содержащегося в пластах метана в свободное состояние с формированием градиента его давления в направлении к обнажаемой поверхности. При отсутствии выхода свода обрушения (мульды сдвижения пород) на земную поверхность, выделяющийся из пластов-спутников и газоносных породных слоев метан на I этапе поступает в горные выработки, оставшийся газ аккумулируется в техногенном коллекторе, образовавшемся в зоне сдвижения пород над выработанным пространством (ее мощность зависит от мощности отработанного угольного пласта и степени катагенеза пород углевмещающей толщи), а также поступает на выемочный участок. Вероятность выхода метана на земную поверхность ничтожна, поскольку газопроницаемость неразгруженных от горного давления пород вокруг свода весьма незначительна.

Метан, попавший в горные выработки, разбавляется вентиляционной струей до безопасных концентраций и выносится на земную поверхность. Также часть метана выводится изолированно системой дегазации, а незначительное количество (в зависимости от остаточной газоносности угля) удаляется из шахты в составе добываемого угля. Эти притоки метана в горные выработки и систе-

му дегазации составляют часть эмиссионных запасов, теряемых массивом в процессе угледобычи (рис. 1). Данный объем метана является составной частью мигрировавших из горного массива ресурсов и вместе с эмиссией на дневную поверхность по известным путям миграции изымается из подсчета оставшихся запасов. Стоит отметить, что эмиссия метана на земную поверхность по природным и техногенным трещинам представляет значительную опасность для жилых и производственных помещений, расположенных в пределах досягаемости этих потоков. Это особенно ярко проявляется в геодинамических зонах и зонах влияния геологических нарушений.

Как показали многолетние исследования, количество метана, находящегося в свободном состоянии в песчаниках, примерно в 10 раз больше, чем количество сорбированного метана в угольных пластах. При сдвигении толщ под влиянием горных работ свободный метан из песчаников высвобождается быстрее, чем сорбированный углем, да и трещинообразование в жестко консолидированной толще песчаников более интенсивное, чем в пластичных маломощных слоях аргиллитов и углей, что способствует образованию техногенного коллектора трещинного типа в своде отработанного пласта.

Основной объем остаточных ресурсов метана в разгруженном от горного давления угольном пласте, пригодный для промышленной добычи после окончания процесса добычи угля, – это метан, содержащийся на поверхности пор и трещин, а также в угольном веществе и закрытых порах и трещинах (рис. 1). При

сопутствующей очистным работам добыче метана имеется возможность изъять из разгружаемых угольных пластов и песчаников часть свободного метана.

Сорбированный углем метан распределяется между твердым раствором (абсорбция) и поверхностью трещин и пор (адсорбция). Уголь обладает весьма разветвленной внутренней поверхностью, порядка 20 м² на кубический сантиметр, поэтому количество адсорбированного метана может быть сопоставимо с количеством абсорбированного. Что касается твердого раствора метана в объеме блоков, то в этом случае необходимо уточнить, что внутри каждого блока имеется система закрытых пор (не сообщающихся каналами с фильтрационным объемом), в этих порах метан находится как в газообразном состоянии, так и в адсорбированном – на поверхности пор. К запасам газа, которые могут быть извлечены, следует также относить и часть метана из фильтрационного объема подработанных угольных пластов и газоносных пород, не имевшего возможности мигрировать в систему вентиляции и на земную поверхность (показано пунктиром). Самые крупные скопления этой составляющей запасов формируются в нераскрывшихся куполах, образующихся при подработке горного массива при условии наличия выше отрабатываемого угольного пласта пород, являющихся флюидоупорными.

В угольном пласте метан находится в равновесии, распределяясь между фильтрационным объемом, блоками и их поверхностью таким образом, чтобы химический потенциал был однородным вдоль незатронутого влиянием очистных работ пласта. В случае



Рис. 1. Структура ресурсов метана в разгруженном от горного давления массиве

однородной макро- и мезоструктуры угля и однородного горного давления это приводит к выравниванию давления метана во всем фильтрационном объеме. Плотность газообразного метана будет также одинаковой. В угольных пластах средней глубины залегания давление метана составляет порядка нескольких десятков атмосфер.

При заданном пластовом давлении метана его перераспределение между отдельными фазовыми состояниями определяется конкретным видом изотерм сорбции. Так, если считать газ идеальным, а твердый раствор – разбавленным, то связь между концентрацией газа в твердом растворе C (число молекул в единице объема твердого раствора) и его плотностью ρ в газообразном виде устанавливается законом Генри:

$$C = \nu \rho,$$

где ν – растворимость – определяется температурой, энергией связи и метаноемкостью угольного вещества.

При нарушении равновесия пласта, например в результате подработки, начинается массоперенос метана, его десорбция и истечение в область пониженных давлений, т.е. в сторону выработанного пространства. Интересно развитие этого процесса во времени. Скорость эмиссии метана из пористой среды зависит от содержания всех возможных состояний молекул и происходит на нескольких временных шкалах:

- в течение нескольких секунд удаляется газ из крупных пор и трещин;
- газ, адсорбированный на стенках пор, выходит из объема пор в течение нескольких часов;
- сорбированный метан может сохраняться в угле более длительное время (истечение метана из угля при термовакуумной дегазации в лабораторных условиях длится, в зависимости от марочного состава, от 3 до 10 суток).

Отношение содержания указанных состояний зависит прежде всего от развитости системы пор, распределения пор по размерам и полной удельной поверхности порового пространства.

Особенность явления истечения метана из угольного пласта состоит в наложении двух процессов массопереноса: фильтрации газа через систему открытых каналов, трещин и пор; диффузии метана из твердого раствора (блоков) в фильтрационный объем. Ведущим процессом при этом является фильтрация. По мере фильтрации давление газа в фильтрационном объеме снижается, что создает предпосылку возникновения термодинамической силы для десорбции метана из блоков в фильтрационный объем посредством диффузии. На первом этапе (выход метана из угля), который длится очень недолго, плотность потока метана убывает по закону обратного корня. На этом этапе из массива выходит в основном метан, содержащийся в фильтрационном объеме. На втором этапе плотность потока хотя и убывает со временем, но гораздо слабее, по закону

($t^{-1/4}$). Это объясняется тем, что одновременно происходят фильтрация и диффузия. Этот этап длится до времени ($t \sim t_d$). На третьем этапе, который длится чрезвычайно долго ($t \gg t_d$), плотность потока опять убывает по корневому закону, но медленнее, чем на первом этапе, поскольку теперь газ выходит из блоков через фильтрационный объем [1].

Теоретически процесс выхода метана из массива может продолжаться бесконечно. На практике массив ограничен, поэтому метан выходит за конечное, хотя и очень большое время.

Ниже приведены некоторые численные оценки такого процесса.

Размер микроблоков угля $R \sim 10^{-6}$ м, $D_{\text{eff}} \sim 10^{-15}$ м²/с, диффузионное время $t_d = R^2/D_{\text{eff}} \sim 103$ с ~ 20 мин. Коэффициент фильтрации составляет $2,5 \cdot 10^{-6}$ м²/с, т.е. на девять порядков больше коэффициента диффузии; при давлении газа 30 атм. можно считать $\rho_0 = 30$ м³/м³. Целесообразно рассчитать, сколько кубометров метана выйдет с 1 м² поверхности пласта к моменту t_d . Получается $N(t_d) \sim 1$ м³ с 1 м² поверхности. В два раза большее количество метана выйдет к моменту $t = 4t_d$. В данном примере это означает, что за 80 минут выйдет 2 м³ метана с каждого квадратного метра обнаженной поверхности.

Если скорость выхода метана из открытого пласта и из отбитого угля известна, то можно решать задачи, связанные с накоплением метана в разного типа выработках угольных шахт, в том числе в техногенных резервуарах для шахтного метана в виде образовавшихся сводов обрушения в подработанном горном массиве закрытых шахт в течение длительного периода времени (более 10 лет). Это позволяет адекватно интерпретировать геологические данные при оценке оставшихся ресурсов метана закрытых шахт, которые составляют 15–22% от геологических показателей объемов метана на действующих шахтах. Порядок запасов газа на приоритетных объектах для изучения возможности извлечения метана из закрытых шахт составляет от 60 до 1000 млн м³ газа.

Интенсивная дегазация выработанных пространств действующих и отработанных выемочных участков способна не только снизить поступление газа в выработки шахт и на дневную поверхность, но и стать, при достаточной газоносности горного массива, поставщиком метана для промышленных нужд. Однако осуществление этого возможно лишь при наличии способов и схем дегазации, хорошо согласующихся с технологическими аспектами ведения работ по добыче угля. Под влиянием движущегося очистного забоя породы, залегающие в кровле, последовательно испытывают различные виды механического воздействия (сжатие, растяжение, разгрузка от горного давления, его восстановление) [3]. Поэтому разработка соответствующих схем невозможна без учета особенностей формирования НДС подрабатываемого углепородного массива.

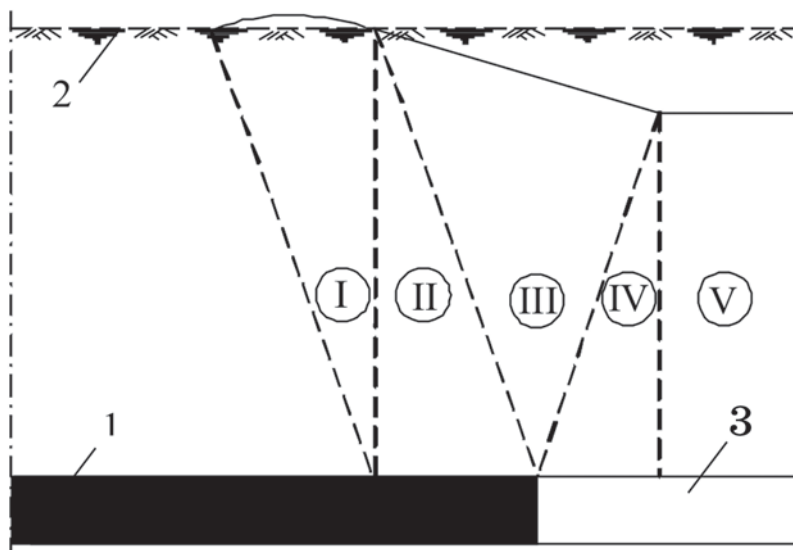


Рис. 2. Схема распределения зон с различным НДС в подрабатываемом впервые горном массиве: 1 – угольный пласт; 2 – земная поверхность; 3 – выработанное пространство

Рассмотрим кратко схему расположения зон с разным НДС впервые подрабатываемого горного массива (свод обрушения достиг земной поверхности). В подрабатываемом массиве выделяют следующие зоны (рис. 2). Зона I характеризуется разгрузкой разрабатываемого угольного пласта при залегании в его кровле мощных и прочных слоев песчаника и эмиссией метана в горные выработки [4]. При неглубоком залегании таких же слоев прослеживается поднятие земной поверхности [2]. В зоне поднятия земной поверхности возможна десорбция метана в полости расслоения. При этом выделение метана на земную поверхность в зоне поднятия возможно в пределах отработанного смежного выемочного участка. Однако данное явление требует более детального исследования на полях шахт с различной степенью катагенеза угленосной толщи и разной степенью подработанности горного массива. Зона II характеризуется повышенным горным давлением на углепородный массив. Истечение газа из этой области маловероятно вследствие закрытия основных транспортных каналов. В зоне III отмечается прогиб подработанных породных слоев. Область растяжения при этом характеризуется образованием секущих трещин. Высота распространения данных трещин, являющихся, по сути, транспортными каналами для метана, зависит от соотношения прочностных свойств пород и величины напряжений, возникающих в них. Протяженность этой зоны зависит от наличия мощных и прочных песчаников в подрабатываемом массиве. В зоне IV происходит полная разгрузка от горного давления. Основное количество газа при подработке выделяется именно из этой зоны. Восстановление горного давления происходит в зоне

V вследствие уплотнения пород. Закрытие трещин в этой зоне приводит к прекращению газовыделения. Выделения метана на дневную поверхность через породную толщу в области плоского дна мульды сдвижения по образующимся в процессе оседания земной поверхности трещинам и разломам отсутствуют. Данный факт косвенно подтверждают и замеры содержания метана в почвенном слое, выполненные на подработанных территориях ряда закрытых шахт Донецко-Макеевского района Донбасса. Метан был обнаружен лишь в местах выхода зон миграции, отмеченных в нашей модели, в замерах вне данных зон он отсутствовал [5].

Немаловажным при установлении путей миграции метана на дневную поверхность является вопрос о метане, выделяющемся в области формирующейся статической мульды сдвижения после остановки очистного забоя. Фактически образующаяся линия, соединяющая остановленную лаву с краевой частью мульды сдвижения, является еще одним путем миграции метана на дневную поверхность. При этом вовлекаемый в обрушение, разгрузку и, следовательно, интенсивно дегазирующийся объем горного массива в случае первичной и неоднократной подработки будет различным.

Сотрудниками ИФГП НАН Украины были выполнены замеры сдвижения земной поверхности после остановки лав 5-й северной блока №2 (ш/у «Покровское») и 26-й западной (шахта «Трудовская»). Ш/у «Покровское» отрабатывает пласт d_4 (первичная подработка земной поверхности), а ш. «Трудовская» – пласт m_3 (земная поверхность ранее была дважды подработана при выемке пластов l_4 и k_8).

Установлено, что расстояние от проекции ствола лавы на земную поверхность до границы мульды

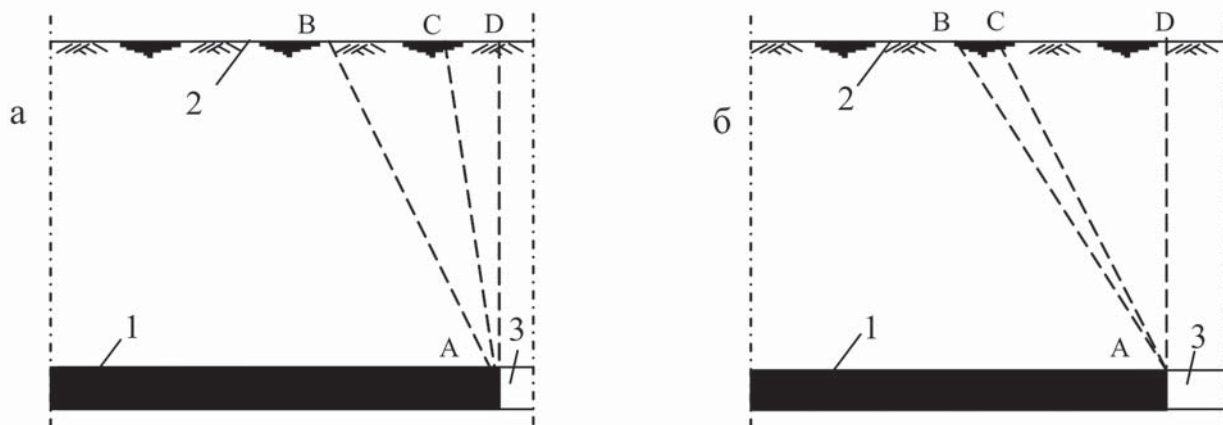


Рис. 3. Схема перемещения мульды сдвижения после остановки лавы:

а) первичная подработка; б) при неоднократной подработке.

1 – угольный пласт; 2 – земная поверхность; 3 – выработанное пространство

сдвижения для условий шахты «Трудовская» составляет 180–230 м, в то время как для условий ш/у «Покровское» – 20–220 м. Первые значения получены на момент остановки лав, а вторые – после окончания всех процессов сдвижения земной поверхности. При этом схему перемещения мульды сдвижения после остановки очистного забоя можно представить следующим образом (рис. 3).

На момент работы очистного забоя необратимые вертикальные деформации земной поверхности впереди проекции створа лавы на земную поверхность приходятся на участок АСD. После остановки очистного забоя в сдвижение вовлекается зона АВС. Именно в пределах отрезка ВС на дневную поверхность будет поступать метан из области горного массива, подвергшегося обрушению после остановки очистного забоя.

Таким образом, адекватно оценить источники выделения, места скоплений и пути миграции метана, выделяющегося из подрабатываемого горного массива можно лишь базирываясь на достоверных сведениях о кинетике десорбции метана из угольного вещества и об объеме и характере перераспре-

деления НДС в углепородном массиве при воздействии на него очистных работ. При этом наиболее полное извлечение метана возможно при ведении одновременной добычи угля и газа, что требует разработки соответствующих технологических схем.

1. Алексеев А. Д. Физика угля и горных процессов. – К.: Наукова думка, 2010.
2. Влияние подземной разработки угольных пластов на смещение земной поверхности / Кольчик Е. И., Ревва В. Н., Кольчик И. Е. и др. // Геотехнічна механіка. – 2008. – Вып. 74. – С. 118–130.
3. Иофис М. А. Инженерная геомеханика при подземных разработках. – М.: Недра, 1985. – 248 с.
4. Кольчик Е. И. Влияние труднообрушаемой основной кровли угольных пластов на метановыделение в выемочные выработки // Вісті Донецького гірничого інституту. – 2013. – № 1(32). – С. 178–182.
5. Сергиенко А. И. Графоаналитический способ определения границ распространения геодинамических зон на земной поверхности в пределах горных отводов закрытых шахт / Сергиенко А. И., Подрухин А. А.; Под ред. А. Д. Алексеева // Фізико-технічні проблеми горного виробництва. – Донецьк: ИФГП НАНУ, 2010. – Вып. № 13. – С. 128–135.