***В.Н.ОДИНЦЕВ***
Институт проблем комплексного освоения недр РАН,
Москва, Россия

# ОЦЕНКА МИКРОТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЯ В УГЛЕ ПРИ ДЕСОРБЦИИ МЕТАНА

**Введение.** В настоящее время, когда ряд промышленных регионов, добывающих уголь, испытывает дефицит газового топлива, актуальной является проблема промышленной добычи метана на угольных месторождениях. Для ее решения необходимо исследовать ряд фундаментальных научных задач. Одной из главных задач является установление закономерностей распада природной системы «уголь – метан» и миграции метана к добычным скважинам. Согласно представлениям, преобладающим среди многих специалистов, почти весь метан находится в угле в абсорбированном (растворенном) состоянии, а угольных пласт изначально является газонепроницаемым. Поэтому далеко не во всех случаях пробуренная скважина может давать метан в нужном объеме. Об этом свидетельствуют натурные эксперименты. Одни газодобывающие скважины дают мало метана. Другие скважины, как, например, скважины на угольных месторождениях бассейна Сан-Хуан, имеют весьма большую газоотдачу.

Одной из гипотез, которая может объяснить наблюдаемую в ряде случаев большую газоотдачу скважин, является утверждение о том, что в угольном пласте в процессе десорбции метана образуется наведенное трещинно-пористое пространство, образующее зону газопроницаемости. Благодаря процессу выхода метана из угольных частиц и последующей усадке угля зона газопроницаемости постепенно увеличивается в размерах [3]. Граница этой зоны распространяется вглубь угольного пласта, расширяя область активной десорбции метана. Таким образом, высокая газоотдача скважин поддерживается за счет непрерывного расширения области активной десорбции метана.

Развивая эту идею, необходимо, однако, установить: может ли расширение наведенного фильтрационного пространства происходить только за счет внутренних процессов в пласте - истечения метана из угольных частиц и усадки, без использования энергии горного давления на пласт (режим деформирования при отсутствии смещений на границе пласта)? Или внутренней энергии пласта недостаточно для развития микротрещин и необходимо каким-то образом учитывать фактор горного давления. Если верно первое предположение, то граница зоны газопроницаемости действительно может далеко продвигаться вглубь массива, поскольку при этом возмущения во вмещающем массиве горных пород минимальны, т.е. реализуется режим самоподдерживающегося разрушения пласта.

В настоящей работе мы оценим условия реализации на практике первого предположения. При этом процессом, определяющим выход метана из ненарушенных угольных частиц, считаем диффузию метана. Мы будем рассматривать условия жесткого защемления некоторой области угля с одной свободной границей, на которой в начальный момент скачком меняется концентрация метана. В результате в этой области возникает процесс диффузии метана к свободной границе. При выходе метана происходит усадка угольного вещества, что при жестком защемлении границ области ведет к появлению в области растягивающих напряжений. Эти напряжения, в свою очередь, вызывают развитие микротрещин отрыва, которые являются хорошими транспортными каналами для молекул метана.

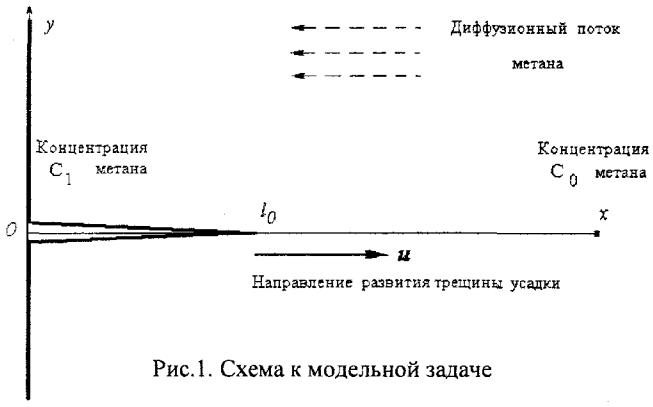



Рис.1. Схема к модельной задаче

**Модель.** С целью получения количественной оценки условий развития микротрещин рассмотрим модель развития трещины отрыва от границы упругого полупространства за счет усадки материала при диффузии метана (рис.1). При этом используем подход и некоторые результаты исследований, описанные в [4]. Полагаем, что в момент времени $t = 0$ на границе полупространства концентрация метана определяется значением $C_1$, а вдали от границы значением $C_0$. Вследствие разности концентраций метана возникает диффузионный поток метана в сторону границы полупространства. При росте в материале напряжений усадки трещина начальной длины $l_0$ развивается в направлении, противоположном направлению диффузионного потока. Поверхность трещины свободна от напряжений. Считается сначала, что трещина не вносит возмущения в диффузионный поток, т.е. диффузия в трещину отсутствует.

При отсутствии трещины растягивающие напряжения в полуплоскости вследствие усадки определяются соотношениями

$$\sigma_{xx} = 0, \tag{1}$$

$$\sigma_{yy} = \frac{E\gamma(C_0 - C_1)}{3(1-\nu)}\left[1 - \Phi\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right)\right];$$

$$\Phi(\xi) = \frac{2}{\pi}\int_0^{\xi} e^{-z^2}\,dz,$$

где $E$ – модуль упругости; $\nu$ – коэффициент Пуассона; $\gamma$ – коэффициент объемной усадки; $D$ – коэффициент диффузии.

Трещина вблизи себя изменяет напряженное состояние. При выполнении определенного соотношения для напряжений трещина может начать расти. Существуют различные критерии развития трещины. Мы использовали наиболее простой критерий Гриффитса – Ирвина, согласно которому трещина находится в предельно равновесном состоянии и может начать расти, если коэффициент интенсивности напряжений в кончике трещины $K_1$ достигает своей критической величины: $K_1 = K_{1C}$, где $K_{1C}$ – трещиностойкость материала (параметр прочности). Используя это соотношение и метод определения напряжений усадки, описанный в [2], можно получить уравнение, связывающее длину трещины $l$, время $t$ и другие параметры задачи:

$$K_{1C} = \frac{E\gamma(C_0 - C_1)}{3(1-\nu)}\sqrt{\frac{\pi l}{2}}\int_0^{l}\frac{\left[1 - \Phi\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right)\right]dt}{\sqrt{l^2 - x^2}}. \tag{2}$$

Из уравнения (2) можно найти зависимость длины трещины от времени (рис.2). Она состоит из двух ветвей. Верхняя ветвь асимптотически приближается к прямой линии, тангенс угла наклона которой $DE^2\gamma^2(C_0 - C_1)^2/K_{1C}^2$ . Нижняя ветвь асимптотически приближается к горизонтальной прямой, определяемой условием

$$l_1 = \frac{9K_{1C}^2(1-\nu)^2}{E^2\gamma^2(C_1 - C_0)^2}. \qquad (3)$$

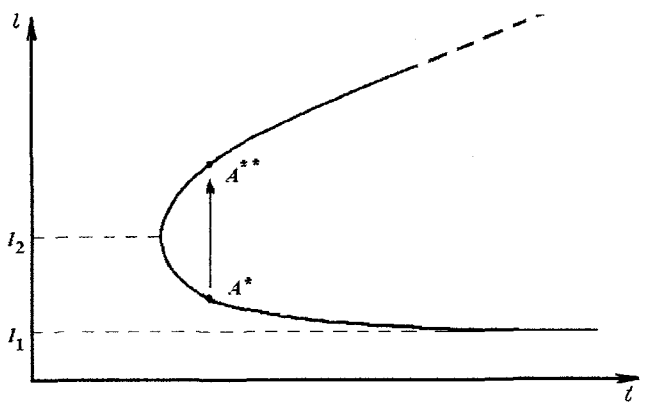



Рис.2. Зависимость длины трещины от времени

Анализ показывает: возможны три различных случая в состоянии трещины. Если начальная длина трещины $l_0$ меньше значения $l_1$ , то трещина развиваться не будет, несмотря на развитие процессов диффузии и усадки материала. Если начальная длина трещины находится в интервале $l_1 < l_0 < l_2$, то после определенного времени задержки, зависящего от длины начальной трещины, будет достигнуто предельно равновесное состояние трещины (точка $A^*$), которое, однако, не устойчиво. В результате трещина скачком перейдет в новое подвижно-равновесное состояние (точка $A^{**}$) и далее будет расти непрерывно. Если начальная длина трещины больше значения $l_2$, то трещина без периода задержки будет расти со временем, несколько замедляя скорость. В пределе скорость развития трещины определяется соотношением

$$u = \frac{DE^2\gamma^2(C_0 - C_1)^2}{K_{1C}^2}. \qquad (4)$$

На основании результатов, полученных в работе [4], можно утверждать, что подобное соотношение для скорости трещины справедливо и в случае протяженной трещины, когда ее размеры становятся столь велики, что направление диффузионного потока меняется: вблизи трещины поток направлен не к границе полупространства, а в трещину, т.е. направление диффузионного потока изменяется на 90° . Скорость протяженной трещины будет выше примерно в 1,1 раза значения, определяемого формулой (4). Таким образом, формулу (4) можно использовать для приближенной количественной оценки скорости роста трещины усадки.

**Структура трещиноватости.** Структуру трещин усадки можно представить, анализируя результаты работ [4,7,8]. В [7,8] рассматривались трещины, образующие в материале при перепадах температуры, однако, как отмечалось в указанных работах, закономерности развития термических трещин и трещин усадки идентичны. Установлено теоретически и подтверждено экспериментами [6] , что трещины, растущие от границы вглубь тела, изменяют скорости развития, когда они вырастают на длину, соизмеримую с расстоянием между трещинами. Одни трещины затормаживаются и останавливаются, в то время как другие, расположенные на большем расстоянии друг от друга, ускоряются и растут до тех пор, пока не начинается их взаимное влияние. В результате из совокупности трещин, продолживших процесс развития, одни трещины тормозятся, а скорость других немного возрастает. До конца процесс не исследован, но предполагается, что эта тенденция может сохраниться пока не останется доминировать одна трещина.

Отметим, однако, что эта закономерность развития трещин справедлива для того случая, когда сказывается влияние границы тела. Протяженные трещины усадки, далеко прорастающие вглубь тела, ориентируют на себя диффузионный поток (рис.3). Нормально к поверхности этих протяженных трещин (на некотором удалении $L$ от их концов) могут развиваться новые трещины (другого ранга) в направлении диффузионного потока, т.е. должно происходить ветвление трещин усадки. Учет этого обстоятельства ведет к заключению, что развивающиеся с поверхности вглубь материала трещины усадки в конечном счете сформируют структуру, в которой расстояние между наиболее крупными трещинами (первого ранга) будет определяться характерным размером $L$ области изменения направления диффузионного потока (рис.3). Вблизи продвигающихся концов этих трещин развитие более мелких трещин невозможно. Мелкие трещины могут расти лишь на достаточном удалении от концов протяженных крупных трещин. Таким образом, фронт области трещинообразования ($S^*S^{**}$) в теле с жестко защемленными границами должен соответствовать положению концов трещин усадки первого ранга, т.е. протяженных трещин, начинающихся со свободной границы тела.

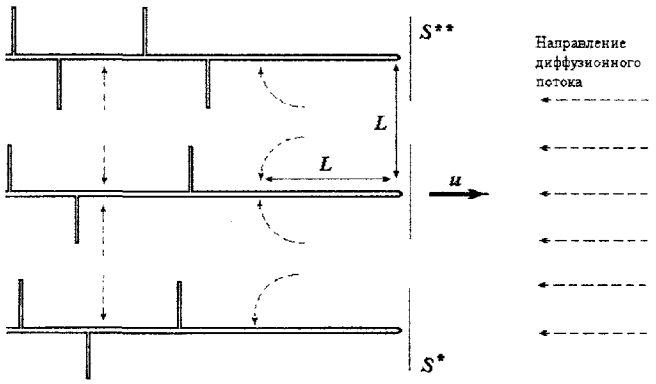



Рис.3. Структура трещин усадки вблизи границы газопроницаемой зоны

**Оценка скорости развития трещин усадки в метанонасыщенном угле.** Скорость продвижения фронта микротрещинообразования в угле, очевидно, должна соответствовать скорости развития трещин, начинающихся от свободной границы. Эту скорость можно оценить с помощью формулы (4). В оценке, конечно, можно говорить лишь о порядке величины. Поэтому значения входящих параметров также необходимо оценивать по порядку величины.

Коэффициенты диффузии метана в ненарушенных частицах угля определены в работе [2]. В нашей оценке используем усредненное значение этого коэффициента, которое по порядку величины равно $10^{-11}$ см$^2$/с . Содержание метана в природном газонасыщенном угле составляет около 40 м$^3$/т. При плотности угля 1,3 т/м$^3$ концентрация метана по весу в природном угле $C_0$ может составлять порядка $10^{-2}$. Изменение концентрации метана ($C_0$ - $C_1$) , вызывающее диффузионный процесс, разумно оценить как $10^{-3}$. Усадка при десорбции угля составляет несколько процентов, поэтому коэффициент усадки по порядку величины можно оценить как $10^{-2}$. Модуль упругости ненарушенных частиц угля по порядку величины можно принять равным $10^4$ МПа. Коэффициент Пуассона в этой грубой оценке не имеет значения.

Трещиностойкость угля, определенная на образцах дегазированного угля, составляет по порядку величины 0,1 МПа·м$^{1/2}$. Однако надо заметить, что трещиностойкость угля может очень сильно зависеть от его насыщенности метаном. К сожалению, опыты, в которых определялась трещиностойкость предельно насыщенных углей, нам не известны. Теоретическая оценка [1] и логические рассуждения [5] дают основание считать, что за счет метастабильного состояния растворенного метана в пласте трещиностойкость угольного пласта (прочность на отрыв) может быть фактически нулевой. Поэтому в нашей оценке используются различные значения трещиностойкости в диапазоне $10^{-5}$-$10^{-1}$ МПа·м$^{1/2}$.

Расчет по формуле (4) показывает, что при трещиностойкости, равной $10^{-1}$ МПа·м$^{1/2}$, скорость продвижения конца трещины $u$ составляет $10^{-13}$ см/с, что примерно $0{,}3\cdot10^{-4}$ см/год. При трещиностойкости, равной $10^{-2}$ МПа·м$^{1/2}$, скорость $u$ составляет $10^{-11}$ см/с (0,003 см/год). При трещиностойкости $10^{-3}$ МПа·м$^{1/2}$ скорость $u \sim 10^{-9}$ см/с, т.е. примерно 0,3 см/год. Если трещиностойкость угля составляет $10^{-4}$ МПа·м$^{1/2}$, то $u \sim 10^{-7}$ см/с, что примерно 33 см/год. Наконец, если трещиностойкость равна $10^{-5}$ МПа·м$^{1/2}$, то скорость роста трещины составляет $10^{-5}$ см/с, что примерно 33 м/год.

**Обсуждение результатов.** На основании проведенной оценки можно заключить, что при значениях трещиностойкости, характерной для дегазированных образцов угля, скорость продвижения фронта наведенной фильтрации в изначально газонепроницаемых пластах крайне низка. Это означает, что при геологических условиях жесткого стеснения пласта движение фронта наведенной фильтрации только за счет внутренних изменений в пласте (десорбции и усадки) невозможно. Для движения фронта фильтрации необходимо активное участие горного давления вмещающих пород.

Вместе с тем в сильно насыщенных метаном угольных пластах природная система «уголь - метан» изначально находится в состоянии, близком к метастабильному, и сопротивление угля развитию трещин может отсутствовать. В этом случае в изначально газонепроницаемом угольном пласте возможно развитие фильтрационных каналов и фильтрации на значительном расстоянии от добычной скважины даже в условиях жесткого стеснения пласта. При этом скорость движения границы газопроницаемости может составлять десятки метров в год. Это значение вполне отвечает технологическим условиям промышленной добычи метана из угольных пластов.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Бобин В.А.* Оценка энергии межмолекулярного отталкивания молекул сорбата в микропорах угля / В.А.Бобин, В.М.Зимаков, В.Н.Одинцев // ФТПРПИ. 1989. № 5. С.48-56.

2. *Ковалева И.Б.* О возможности использования диффузионно-кинетических параметров угля для тестирования различных по газовому темпераменту угольных пластов / И.Б.Ковалева, Е.А.Соловьева // Горный информационно-аналитический бюллетень. 1997. № 6. С.60-64.

3. *Кузнецов С.В.* Природа и механизм формирования газопроницаемых зон в угольных пластах / С.В.Кузнецов, В.А.Трофимов // ФТПРПИ.1999. № 1. С.21-27.

4. *Салганик Р.Л.* О понижении прочности под действием усадочных напряжений / Р.Л.Салганик, В.Я.Чертков // Изв. АН СССР. Механика твердого тела. 1969. № 3. С.126-133.

5. *Эттингер И.Л.* Растворимость и диффузия метана в угольных пластах // ФТПРПИ. 1987. № 2. С. 79-90.

6. *Bahr H.-A.* Thermal-shock crack patterns explained by single and multiple crack propagation / H.-A.Bahr, G.Fisher, H.-J.Weiss // J. Material Sci. 1986. Vol.21. P.2716-2720.

7. *Keer L.M.* Unstable growth of thermally induced interacting cracks in brittle solids: Further results / L.M.Keer, S.Nemat-Nasser, A.Oranratnachai // Int.J.Solids Strutures. 1978. Vol.15. P.111-126.

8. *Nemat-Nasser S.* Unstable growth of thermally induced interacting cracks in brittle solids / S.Nemat-Nasser, L.M .Keer, K.S.Parihar // Int.J.Solids Strutures. 1978. Vol.14. P.409-430.