

Д-р техн.наук В.Н. Ревва,
канд.физ.-мат.наук Е.В. Ульянова,
канд.физ.-мат. наук В.А. Васильковский,
инж. С.Е Дегтярь (ИФГП НАН Украины)

ВЛИЯНИЕ ВИДА НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ НА СОРБЦИОННЫЕ СВОЙСТВА УГЛЕЙ ПРИ ИХ РАЗРУШЕНИИ В УСЛОВИЯХ ОБЪЕМНОГО НЕРАВНОКОМПОНЕНТНОГО СЖАТИЯ

Встановлені закономірності впливу напруженого стану на сорбційні властивості вугілля різних марок при руйнуванні його в умовах об'ємного нерівнокомпонентного стиснення.

STRESS STATE EFFECT ON SORPTIONAL PROPERTIES OF COALS DURING FRACTURE UNDER TRIAXIAL COMPRESSION.

Stress system effects on the sorptional properties of various coals are studied at their destruction under conditions of true triaxial compression.

В горном массиве, особенно в окрестности горных выработок, угольные пласты подвержены действию сложного напряженного состояния – объемного неравнокомпонентного сжатия. Поэтому исследования влияния неравнокомпонентности объемного напряженного состояния, характеризуемой видом напряженного состояния, на физико-механические свойства горных пород и углей является актуальной научной проблемой.

Впервые влияние вида напряженного состояния на физико-механические свойства углей, подверженных воздействию объемного неравнокомпонентного сжатия, было исследовано в [1, 2]. В работе [1] для углей марки К моделировалось два вида напряженного состояния – обобщенные сжатие и сдвиг. Было установлено, что сорбционная способность угля после обобщенного сдвига наименьшая, а скорость выхода газа наибольшая. В работе [2] оценено влияние вида напряженного состояния на механические свойства углей разных марок. Определено несоответствие напряженного состояния деформационному для всех марок углей и существенное влияние вида напряженного состояния на их механические свойства.

В настоящей работе на установке неравнокомпонентного трехосного сжатия [3] проведены экспериментальные исследования деформирования и разрушения образцов углей марок Ж, Т и А в условиях объемного неравнокомпонентного сжатия для разных видов напряженного состояния, характеризующихся параметром Надаи-Люде:

$$\mu_{\sigma} = 2 \left(\frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} \right) - 1, \quad (1)$$

где $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ – главные напряжения, с целью оценки влияния вида напряженного состояния на сорбционные свойства углей.

Призматические образцы, изготовленные из углей перечисленных выше марок, по методике [4], подвергались воздействию объемного неравнокомпонентного сжатия до разрушения. Реализовывались пять программ нагружений, соответствующих пяти видам напряженного состояния: - программа 1 – обобщенное сжатие, $\mu_\sigma = -1$; программа 2 – обобщенное растяжение, $\mu_\sigma = +1$; программа 3 – обобщенный сдвиг, $\mu_\sigma = 0$; программа 4 – между обобщенным сжатием и обобщенным сдвигом, $\mu_\sigma = -\frac{1}{2}$; программа 5 – между обобщенным сдвигом и обобщенным растяжением $\mu_\sigma = +\frac{1}{2}$.

Кинетику выхода метана из угольного вещества изучали методом ядерного магнитного резонанса. Эксперименты проводились на разрушенных при разных напряженных состояниях углях марок А, Т, Ж, а так же на исходных углях этих марок. Для исследований использовались угли в гранулах 0,25 мм. Во всех образцах, кроме антрацита, была сохранена их естественная влажность (0,8-1,2%). Образцы из антрацита высушивались, так как высокая исходная влажность (3,8%) мешала проведению исследований. Подготовленные угольные образцы помещались в сорбционные контейнеры, после чего в контейнеры подавался метан под давлением $P=4,0$ МПа. Время насыщения от 2 -до 4 суток при $T=25^\circ\text{C}$.

По окончании насыщения давление в контейнере сбрасывали до атмосферного и метанонасыщенный образец угля помещали в контур ЯМР спектрометра (на это уходило от 3х до 5 минут). Запись ЯМР спектров производилась каждые 20 – 30 минут при амплитуде модулирующего поля 0,44 Э. По спектрам ЯМР (рис. 1) контролировался процесс выхода газа.

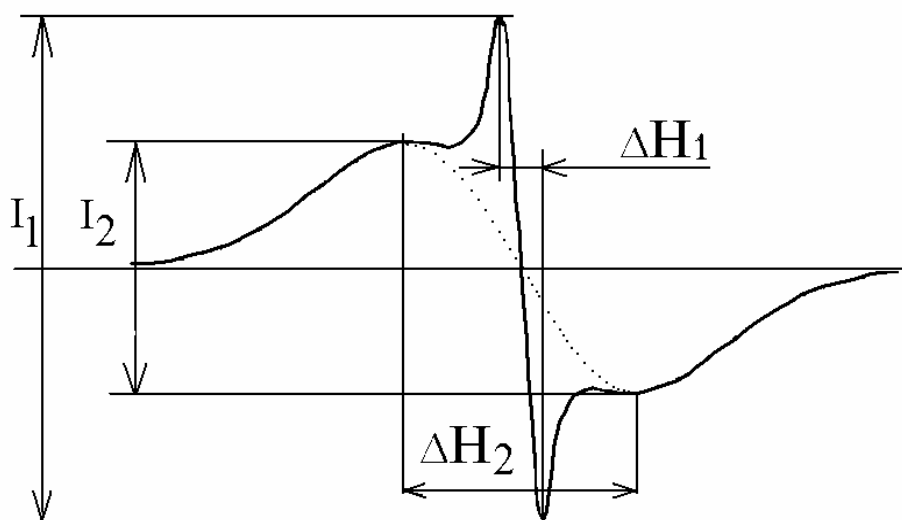


Рис. 1 - Стилизованное изображение спектра ЯМР ^1H в системе «уголь – метан».

I_1 – это интенсивность узкой линии ЯМР спектра от протонов водорода сорбированного метана. I_2 - интенсивность широкой линии от протонов водорода

угольной структуры. Значение I_2 в пределах одной марки угля неизменно. Значение I_1 , во время процесса десорбции, уменьшается. Величина отношения I_1/I_2 соответствует количеству метана в образце. Выход метана из угля практически прекращается, когда значение I_1/I_2 меньше 1,0.

Характер зависимости параметров спектров ЯМР от времени, в целом, соответствует установившимся представлениям о ходе выхода метана из угольного вещества. Так как выход метана происходит путем диффузии и фильтрации, одновременно [5], то и узкие линии ЯМР спектров представляют собой суперпозицию двух линий. Т.е., водород, дающий вклад в узкую линию общего спектра принадлежит метану выходящему как фильтрационным, так и диффузионным путем. Однако их соотношения в разные моменты времени будут различными [6,7].

Условно назовем метан в фильтрационных каналах - «быстрым», а метан в твердотельной составляющей угля (возможно в закрытых порах) - «медленным». Поэтому десорбционные кривые зависимости отношения I_1/I_2 от времени для углей марок Т и Ж можно интерполировать функцией - $y = a \exp(-2x/b) + c \exp(-2x/d) + 3.5$.

На рисунке 2 представлены десорбционные кривые для угля марки Т шахты «Кирова».

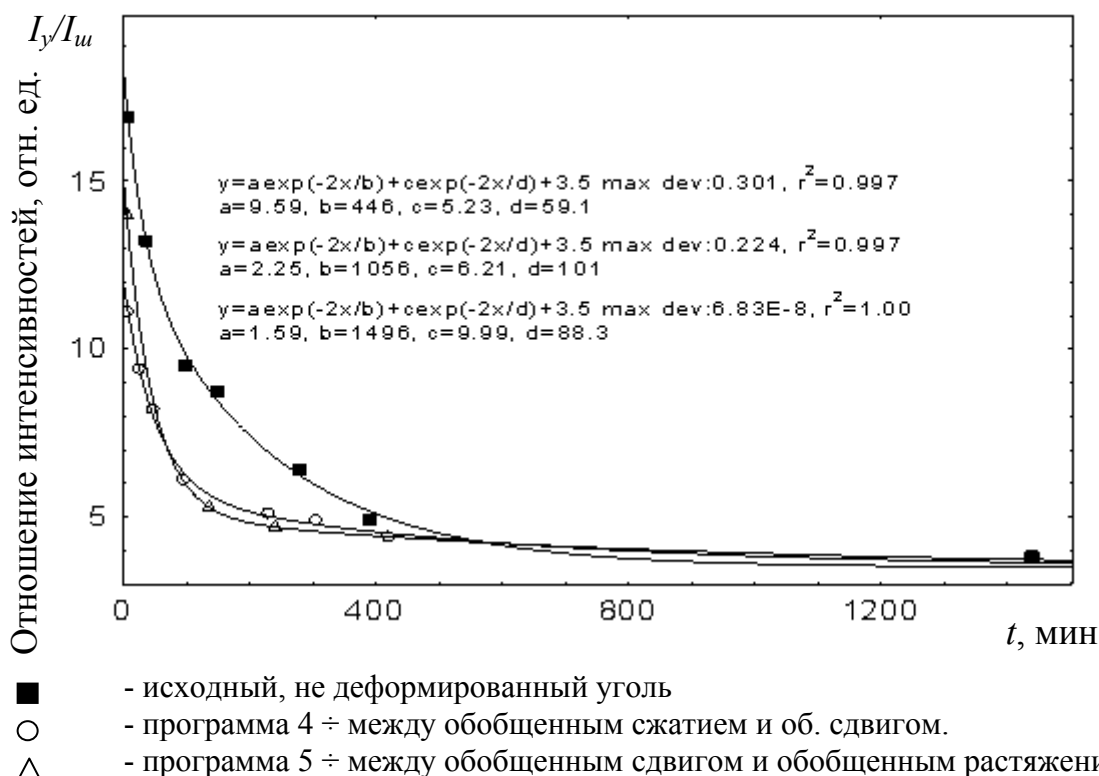


Рис.2. Шахта «Кирова», марка Т пласт h^B_{10} . Зависимость отношений интенсивностей узких и широких линий спектров ЯМР¹H от времени

Разрушение угольных образцов по программам 1-5 ускоряет процесс выхода метана из этих образцов. Программы 1 и 2 вносят небольшое изменение в де-

сорбционный процесс, поэтому эти кривые не приведены на рисунке. Максимальные изменения в процесс десорбции вносит разрушение углей по программам 4 и 5.

Рассмотрим вид кривых выхода метана из исходного угля и угля разрушенного по программе 4 (рис. 2 и 3, марки Т) более подробно. Кривые десорбции на рисунке 2 интерполированы суперпозицией двух экспонент. Это обосновано, как отмечалось выше, разделением процесса десорбции метана на «медленный» и «быстрый» метан. На рисунке 3,а показано разложение кривой десорбции метана исходного угля на две составляющие, где a и c это амплитуды, а $b/2$ и $d/2$ характерные времена десорбции соответственно для «медленного» и «быстрого» метана. Для исходного угля мы получаем вполне объяснимые значения b и d как для «медленного», так и для «быстрого» метана.

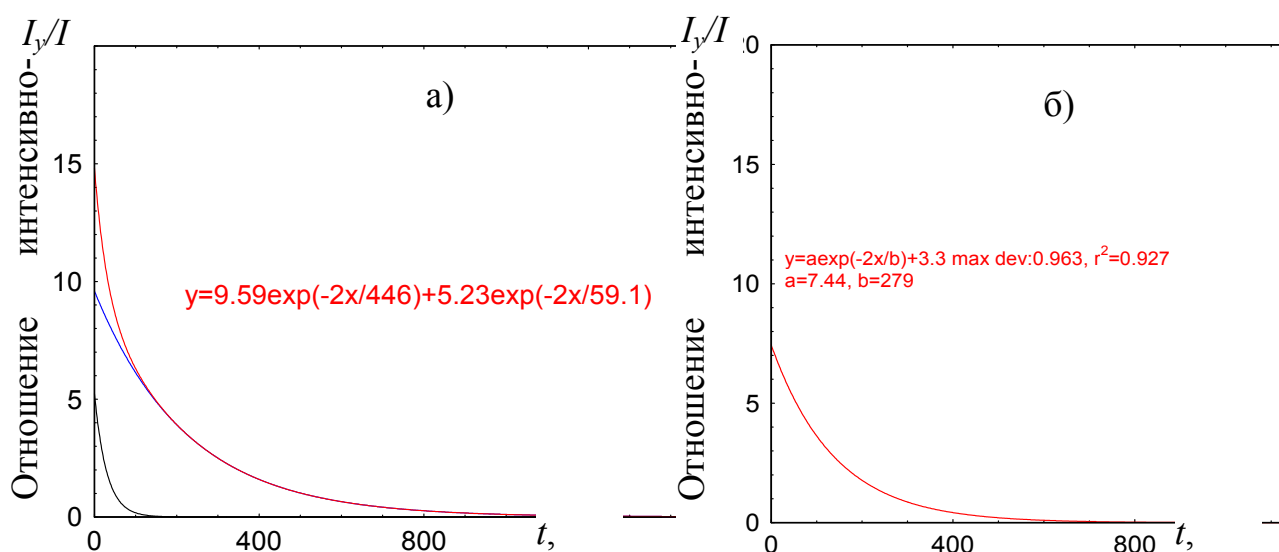


Рис.3. Разложение кривых десорбции метана для углей марки Т: а) исходный уголь, б) уголь разрушенный по программе 4.

Сумма a и c – это количество ядер водорода метана («быстрого» и «медленного»), которое находится в угле в начале регистрации ЯМР спектров. Время десорбции для «быстрого» метана составляет 59 мин., для «медленного» - 446 мин. Если использовать тот же вид интерполяции для углей, обработанных по программе 4, то получим время выхода «медленного» метана 1056 мин, а «быстрого» - 101 мин. Иными словами, использование интерполяционной функции одного вида для обработки кривых процесса выхода метана из исходных и разрушенных углей приводит к, казалось бы, необъяснимому результату: после разрушения углей и появления наведенной дополнительной трещиноватости выход метана замедляется. Однако из десорбционных кривых (рис. 2) видно, что для разрушенного угля процесс выхода метана проходит, в действительности, быстрее и заканчивается раньше. Попробуем разобраться в особенностях механизмов десорбции в этом случае. Как уже отмечалось, выход метана из уг-

ля - это суперпозиция двух механизмов: газ путем диффузии из закрытых пор поступает в, частично уже свободные, открытые поры и трещины, в которых он, двигаясь далее к поверхности угля, испытывает эффект фильтрации. Наступает момент времени, когда устанавливается баланс диффузионного и фильтрационного потоков. Таким образом, весь процесс выхода метана можно условно разделить на две фазы: первую фазу, предшествующую установлению баланса потоков, и вторую фазу, когда выделение газа из угля происходит за счет диффузии из закрытых пор в открытые поры. Во второй фазе весь вклад в процесс выхода дает только метан, выделяющийся диффузионным путем. Учитывая изложенное выше, мы имеем основание связать «быструю» составляющую интерполяционной функции, описывающей процесс выделения метана, с первой фазой процесса выделения, а «медленную» со второй, протекающей в условиях баланса диффузионного и фильтрационного потоков.

За 5 минут, которые проходят с момента сброса давления в контейнере и переноса метанонасыщенного образца в ЯМР установку, часть метана первой фазы (возможно большая его часть) покидает угольный образец. Остается только лишь некоторая часть метана первой фазы («быстрый» метан), которая фиксируется ЯМР спектрометром. Этот метан и уходит за первые 59 (*d*) минут. В результате разрушения углей возникает наведенная пористость (новые трещины, увеличение размеров старых трещин и пор). Поэтому первая фаза выхода метана для разрушенного образца заканчивается еще до того момента, когда угольный образец попадает в ЯМР спектрометр. В результате на ЯМР спектрах регистрируется только вторая фаза, когда основным процессом выделения газа из угля есть его диффузия из закрытых пор и «твердого раствора» в открытые поры. Исходя из этого, интерполяцию процесса выхода метана из угольного образца «программа 4» (рис.3,б) необходимо осуществлять одной экспонентой: $y = a \exp(-2x/b)$. Время выхода медленного метана в этом случае составляет 279 мин. Т.е. время выхода метана из разрушенных по программам 4,5 углей марки Т в действительности уменьшается в два раза.

Рассмотрим процесс выхода метана для углей марки Ж (рис. 4, 5). Видно, что исходный уголь сорбирует большее количество метана и процесс его выхода занимает значительно больше времени -1812 мин. (рис.5,а), чем выход из разрушенных образцов -416 минут (рис. 5,б). Общее время выхода метана уменьшается в четыре раза. Значения амплитуды *a* для «медленного» метана исходных образцов (рис. 5,а) совпадает со значением *a* разрушенных образцов (рис. 5,б): $a_1 = 0.678$, $a_2 = 0.723$. Таким образом, в разрушенных образцах угля марки Ж мы также регистрируем только вторую фазу - фазу «медленного» метана.

Используя формулу из публикации [4] для расчета времени выхода метана :

$$\tau^{\text{дес}}(t) = \tau^f(t) \cdot \left(1 + \frac{\nu(1-\gamma)}{\gamma}\right) + 0.12\tau^d, \quad (2)$$

где γ – пористость, ν –растворимость газа в угле, τ^f - время фильтрации, τ^d – время диффузии, мы можем оценить, во сколько увеличилась пористость исследуемых углей.

Учтем, что для мелких фракций углей первым (фильтрационным) слагаемым в (2) можно пренебречь, диффузионный вклад в τ^{dec} обратно пропорционален квадрату величины открытой пористости $-1/\gamma^2$. Таким образом, изменение времени выхода газа в два раза вызвано увеличением открытой пористости, примерно, 1,5 раза. Для углей марки Ж время выхода метана из разрушенных образцов уменьшилось в 4 раза, что может быть при 2х кратном увеличении открытой пористости. Следовательно, можно сделать вывод, что комбинация сжатия, сдвига и растяжения при разрушение углей, создает новую, наведенную пористость. Для углей марки Т значение γ увеличивается в полтора раза, для углей марки Ж в два раза.

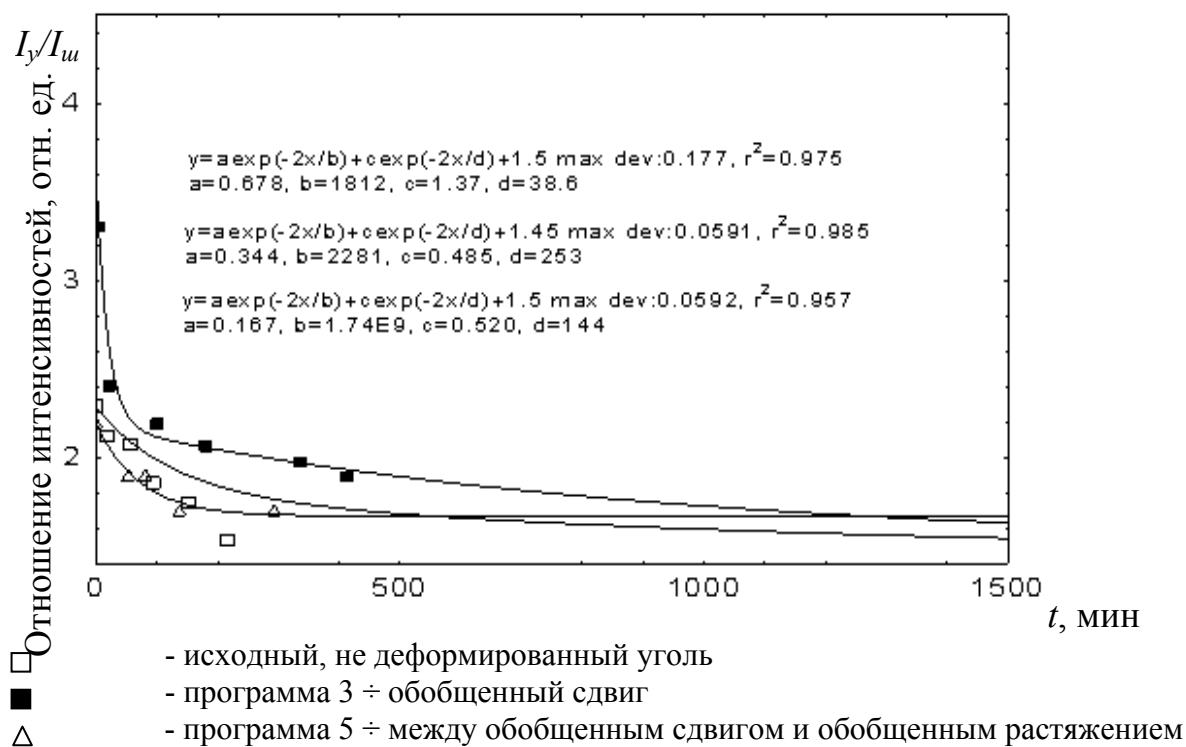


Рис. 4. Шахта «Торецкая», марка Ж, пласт К₈. Зависимость отношений интенсивностей узких и широких линий спектров ЯМР¹H от времени.

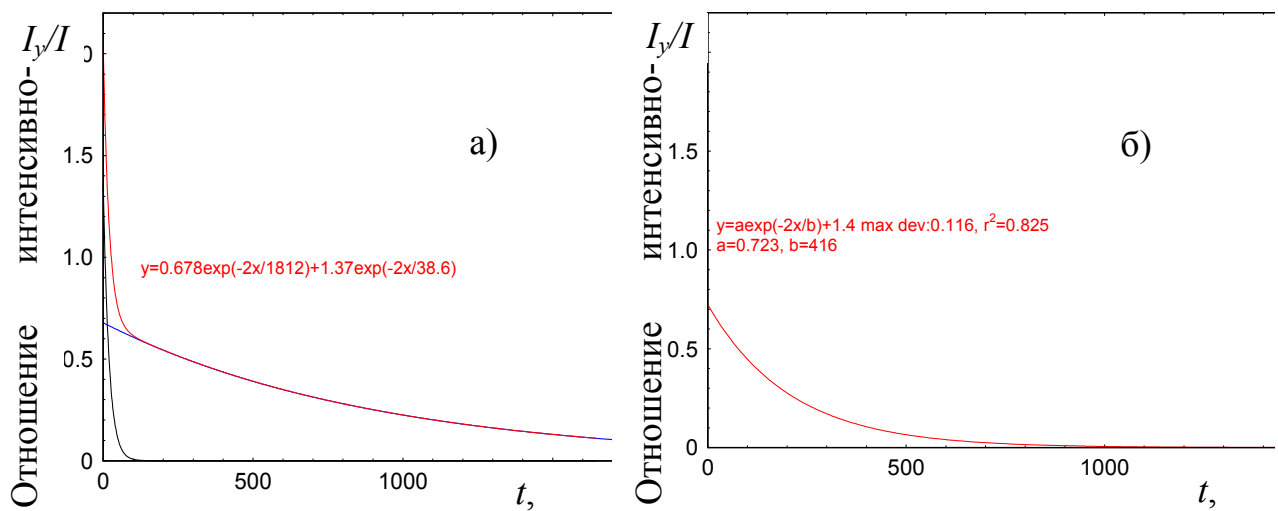


Рис. 5. Разложение кривых десорбции метана для углей марки Ж: а) исходный уголь, б) уголь разрушенный по программе 5.

Десорбционные кривые для антрацита представлены на рис. 6.

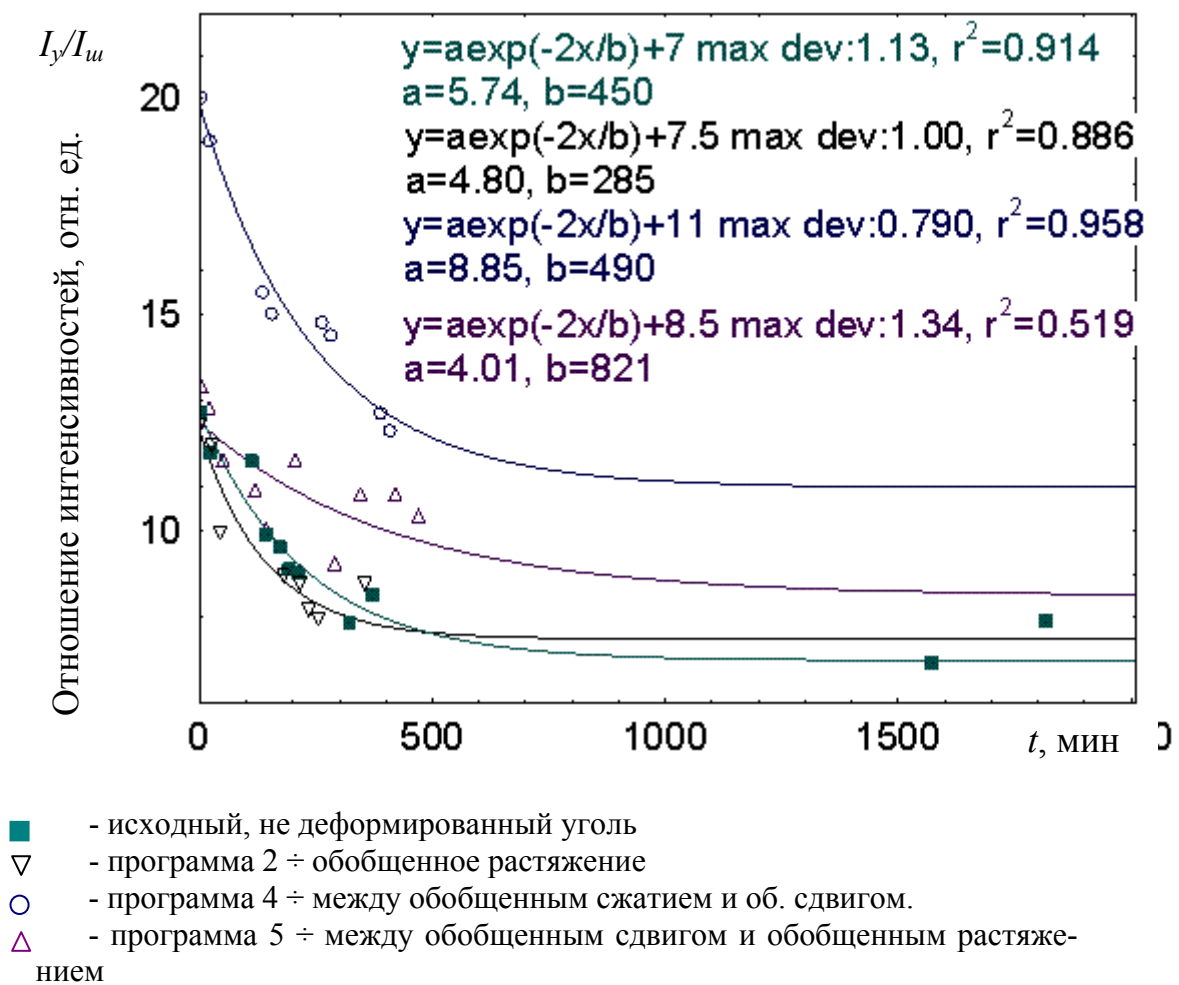


Рис. 6. Шахта «2-2 бис», марка А, пласт h₈. Зависимость отношений интенсивностей узких и широких линий спектров ЯМР¹H от времени

Вид десорбционных кривых хорошо описывается одной интерполяционной функцией. Это связано с тем, что в антрацитах преобладает процесс фильтрации. Разрушение образцов из антрацита по программам 1, 2, 3 не вызвало изменений их сорбционных свойств. Воздействие же программ 4 и 5 привело к увеличению количества сорбированного метана. Очевидно новые поры-трещины, созданные при разрушении, способствуют увеличению количества сорбированного метана угольным веществом антрацита.

ВЫВОДЫ. На основании проведенных экспериментальных исследований установлено, что характерное время выхода газа из угольных образцов при их разрушении в условиях объемного нагружения определяется видом напряженного состояния.

Максимальная скорость газовыделения из разрушенных образцов характерна в случае перехода от обобщенного сдвига к обобщенному растяжению и от обобщенного сжатия к обобщенному сдвигу.

Из-за наличия дисперсии пористости в угольном образце (грануле) эти сочетания видов напряженного состояния приводят к тому, что возрастает объем областей с малыми размерами микроблоков за счет количества и объема фильтрационных каналов (эффективной пористости).

Для углей марки Т значение пористости γ увеличивается, примерно, в 1,5 раза, для углей марки Ж - в 2 раза. Этот эффект приводит к возрастанию газового потока и значительному сокращению времени выхода газа.

При разрушении антрацитов трещины, созданные при разрушении, способствуют увеличению количества сорбированного метана угольным веществом антрацита.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.

1. Алексеев А.Д., Ревва В.Н., Ульянова Е.В. Влияние давления на сорбционные свойства углей // Физика и техника высоких давлений. -2001.-т.11-№1.-С. 9-11.
2. Ревва В.Н., Бачурин Л.Л., Кравченко А.В., Василенко Н.И. Влияние вида напряженного состояния на механические свойства углей при разрушении их в условиях объемного сжатия // Физические процессы горного производства. – 2006. – Вып. 9 –С. 17-22.
3. Алексеев А.Д., Ревва В.Н., Рязанцев Н.А. Разрушение горных пород в объемном поле сжимающих напряжений – К: Наукова думка, 1989. -168с.
4. Ревва В.Н. Экспериментальные исследования горных пород в условиях объемного неравнокомпонентного нагружения // Горнометаллургические проблемы Донбасса: Сб. научн. тр. ДНТУ. – Донецк: ИНФО, - 1995. - №1.- С.46-58.
5. Алексеев А.Д., Васильковский В.А., Калугина Н.А. Кинетика и механизмы десорбции метана из угля // Физико-технические проблемы горного производства. -Донецк. -2005. –Вып.8.- С.9-21.
6. Alexeev A.D., Ulyanova E.V., Starikov G.P., Kovriga N.N. Latent methane in fossil coals// Fuel, -2004. -V 83, - P. 1404-1411.
7. Алексеев А.Д.Ю., Шаталова Г.Г., Ульянова Е.В. и др. ЯМР и рентгеноструктурные исследования системы уголь-метан // Физико-технические проблемы горного производства. Донецк: -2003. –Вып.6.- .13-23.
8. Васильковский В.А.Ю Ульянова Е.В. Некоторые аспекты интерпретации кинетики десорбции метана из каменного угля // Физико-технические проблемы горного производства. -Донецк, -2006. –вып. 9. -С. 43-47.