



---

© А.Д. Алексеев, Е.В. Ульянова,  
В.В. Васильковский, С.Е. Дегтярь,  
2008

*А.Д. Алексеев, Е.В. Ульянова, В.В. Васильковский,  
С.Е. Дегтярь*

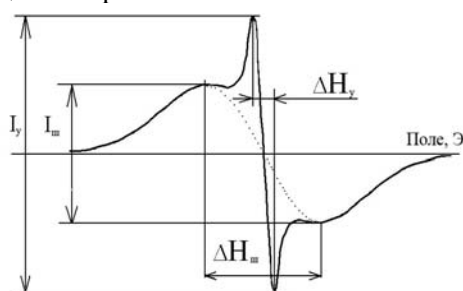
***ВЛИЯНИЕ НАРУШЕННОСТИ УГОЛЬНОГО  
ПЛАСТА НА КИНЕТИКУ ВЫХОДА МЕТАНА***

---

**И**звестно, что угольные пласты подвержены действию сложного напряженного состояния – объемного неравнокомпонентного сжатия. Поэтому исследования влияния неравнокомпонентности объемного напряженного состояния на физико-механические свойства горных пород и углей является актуальной научной проблемой.

Влияние вида напряженного состояния на физико-механические свойства углей, подверженных воздействию объемного неравнокомпонентного сжатия, было исследовано в [1]. В этой работе для углей марки К моделировалось два вида напряженного состояния – обобщенные сжатие и сдвиг. Анализ спектров ядерного магнитного резонанса (ЯМР) на протонах в разрушенных и насыщенных метаном углях позволил авторам этой публикации высказать предположение, что сорбционная способность угля после обобщенного сдвига уменьшается, а скорость выхода газа возрастает. Однако этот вывод может оказаться ошибочным, если учесть особенности выхода метана из угля. Последние исследования указывают на существование фазы быстрой десорбции, регистрация которой не всегда технически осуществима. Это обстоятельство заставило возвратиться к подобным исследованиям и проанализировать их результаты, учитывая новые представления о механизмах десорбции метана из угольного вещества [2, 3].

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; программа 2 – обобщенное растяжение; программа 3 – обобщенный сдвиг; программа 4 – между обобщенным сжатием и обобщенным сдвигом; программа 5 – между обобщенным сдвигом и обобщенным растяжением.



*Рис. 1. Стилизованное изображение спектра ЯМР  $^1\text{H}$  в системе «уголь – метан»:  $I_y$  – это интенсивность узкой линии ЯМР спектра от протонов водорода сорбированного метана.  $I_w$  – интенсивность широкой линии от протонов водорода угольной структуры. Значение  $I_w$  в пределах одной марки угля неизменно. Значение  $I_y$ , во время десорбции, уменьшается. Величина отношения  $I_y/I_w$  пропорцио-*

нальна количеству метана в образце. Выход метана из угля практически прекращается, когда значение  $I_y/I_w$  меньше 1,0

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  $T = 25$  °С.

По окончании насыщения давление в контейнере сбрасывали до атмосферного и метанонасыщенный образец угля помещали в контур ЯМР спектрометра (на это уходило от 3-х 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.

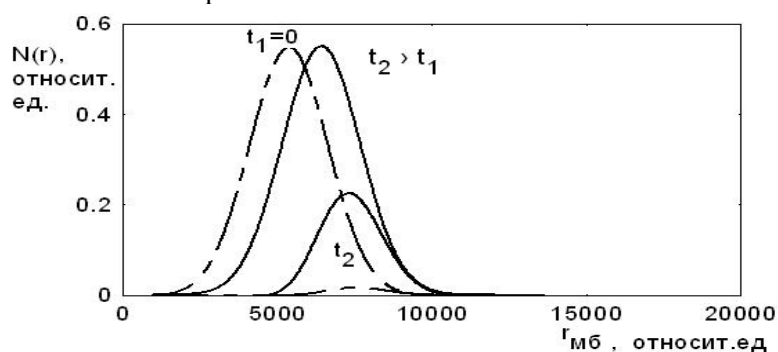
Характер зависимости параметров спектров ЯМР от времени, в целом, соответствует установившимся представлениям о ходе десорбции метана из угольного вещества [5]. Обработка экспериментальных данных производилась в компьютерной программе EasyPlot. В этой программе выполнялась оптимизация величин параметров интерполяционной функции, описывающей ход десорбции. Для интерполяции использовалась двухкомпонентная функция вида  $y = a \cdot \exp(-t/b) + c \cdot \exp(-t/d)$ .

Обсуждение опытных данных производилось в рамках диффузионно-фильтрационной модели выхода метана из угля [2]. Указанная модель является следствием развития представлений о блоковом строении угля [6-8]. Экспериментальной основой для неё послужил сравнительный анализ кинетики выхода метана из угольных образцов различного размера [9]. Как показано в работе [2], опытные данные удается объяснить в предположении, что в структурном отношении каменный уголь представляет собой совокупность мельчайших образований – микроблоков, свободный объём между которыми составляет объём открытых пор и трещин. Указанные поры сообщаются с внешней поверхностью угля и служат путями эвакуации газа после его диффузии из микроблоков. В рассматриваемой модели десорбции микроблоки представляют собой области угольного образца не имеющие открытых пор и трещин. Размер этих областей предполагается малым по сравнению с размером гранулы угля. Логично считать также, что в столь неоднородном по плотности и составу материале, как уголь, имеет место дисперсия размера микроблоков. Это обстоятельство, как показано в работе [10], приводит к необходимости использования многокомпонентной функции для интерполяции хода десорбции метана. Каждая компонента функции интерполяции описывает диффузию метана из определенной группы микроблоков, имеющей меньшую дисперсию размера. Например, в случае двухкомпонентной функции интерполяции, такой как  $y = a \cdot \exp(-t/b) + c \cdot \exp(-t/d)$ , мы искусственно разделяем микроблоки на две группы по размеру – мелкие и более крупные. Каждая группа характеризуется своим средним значением размера блоков. Поскольку из мелких блоков выход газа происходит быстрее, они

определяют кинетику «быстрого» метана. Соответственно «медленный» метан связан с выходом газа из крупных блоков угля.

Таким образом, анализ опытных данных может быть сведён к выявлению характера изменения параметров  $a$ ,  $b$ ,  $c$  и  $d$  интерполяционной функции хода десорбции из угля разрушенного при пяти различных видах напряжений.

На рис. 3 представлены десорбционные кривые для угля марки Т шахты «Кирова».



*Рис. 2. Характер изменения функций распределения  $N(r)$  размера мелких и крупных блоков с метаном в ходе десорбции (сплошной линией обозначены – крупные блоки, пунктиром – мелкие блоки)*

Разрушение угольных образцов по программам 1-5 ускоряет выход метана из этих образцов. Программы 1 и 2 вносят небольшое изменение в десорбционный процесс, поэтому эти кривые не приведены на рисунке. Максимальные изменения характера десорбции происходят при разрушении углей по программам 4 и 5.

Рассмотрим вид кривых выхода метана из исходного угля и угля разрушенного по программе 4 более подробно (рис. 3 и 4, марка Т). Кривые десорбции на рисунке 3 интерполированы суперпозицией двух экспонент. Это обосновано, как отмечалось выше, разделением процесса десорбции метана на «медленный» и «быстрый» метан. На рисунке 4,а показано разложение кривой десорбции метана исходного угля на две составляющие, где  $a$  и  $c$  это амплитуды, а  $b$  и  $d$  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. Сумма  $a$  и  $c$  – отражает количество ядер

водорода метана («быстрого» и «медленного»), которое находится в угле в начале регистрации ЯМР спектров. Время десорбции «быстрого» метана составляет 28.5 мин., а «медленного» - 223 мин. Если использовать тот же вид интерполяции для углей, обработанных по программе 4, то получаем, что время выхода «медленного» метана 528 мин, а «быстрого» - 50.5 мин. Иными словами, использование

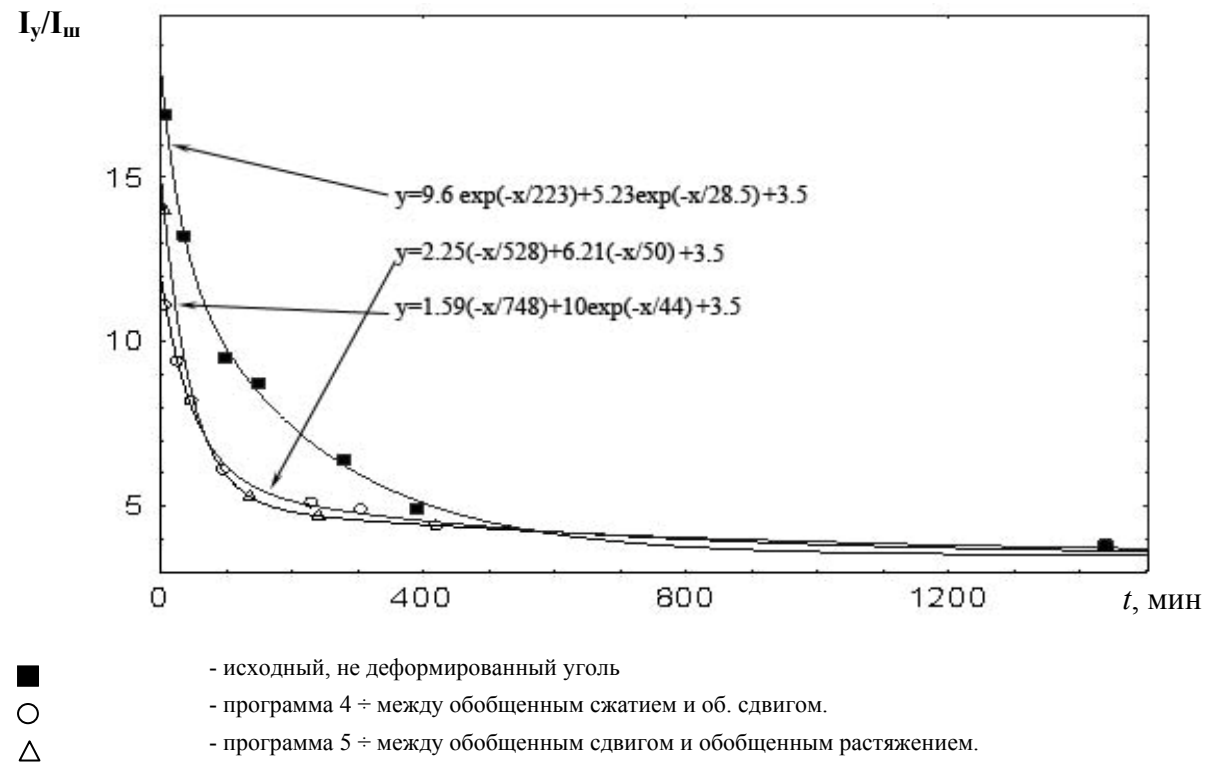


Рис. 3. Шахта «Кирова», марка Т пласт  $h_{10}^6$ . Зависимость отношений интенсивностей узких и широких линий спектров ЯМР<sup>1</sup>H от времени

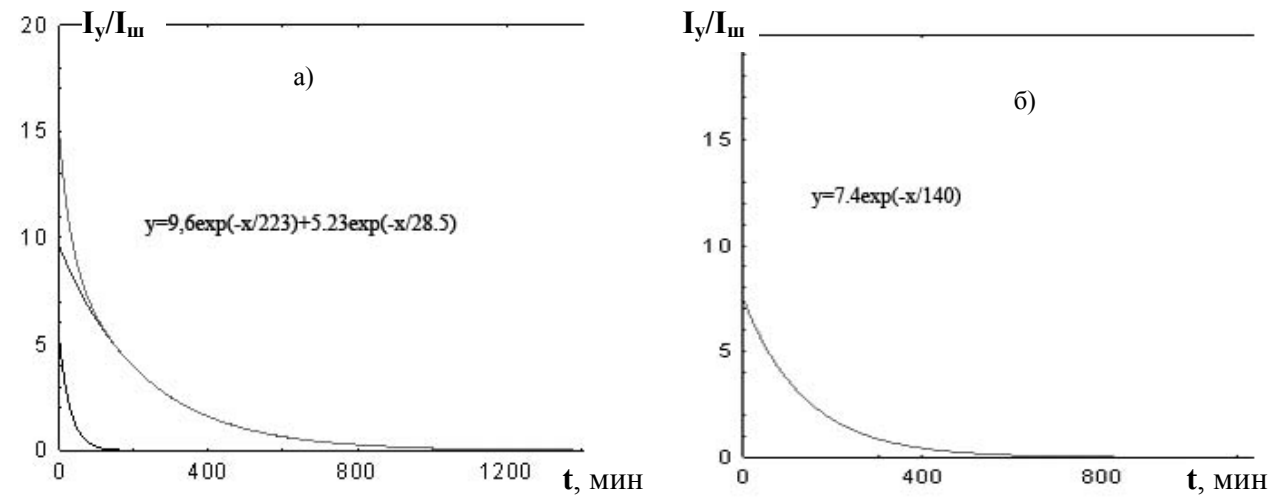


Рис. 4. Разложение кривых десорбции метана для углей марки Т: а) исходный уголь, б) уголь, разрушенный по программе 4

интерполяционной функции одного вида для обработки кривых выхода метана из исходного 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. 3) видно, что для разрушенного угля выход метана проходит, в действительности, быстрее и заканчивается раньше.

Это несоответствие легко объяснить, если предположить, что под воздействием напряжений происходит измельчение микроблоков и, как следствие, увеличение пористости угля. В этом случае выход метана усиливается, и время десорбции сокращается. За 5 минут, которые проходят с момента сброса давления в контейнере насыщения и переноса насыщенного метаном образца в ЯМР установку, основная часть метана первой - более мелкой группы - микроблоков покидает угольный образец. В результате остается лишь часть метана, содержащаяся в более крупных блоках. Исходя из этого, интерполяцию процесса выхода метана из угольного образца «программа 4» (рис. 4, б) необходимо осуществлять только одной экспонентой:  $y = a \cdot \exp(-x/b)$ . Время выхода медленного метана в этом случае составляет 140 мин. Т.е. время десорбции метана из разрушенных по программам 4 и 5 углей марки «Т» в действительности уменьшается в два раза. Предположение о существенных потерях метана в первые минуты после расконсервации насыщенного метаном угля подтверждается независимыми опытами по его десорбции в замкнутый сосуд известного объема [9]. Более того, эти измерения не подтверждают изменения метаноносности угля при его разрушении.

Рассмотрим процесс выхода метана для углей марки Ж (рис. 5, б). Видно, что исходный уголь сорбирует большее количество метана и процесс его выхода занимает значительно больше времени - 906 мин. (рис. 6, а), чем выход из разрушенных образцов - 208 минут (рис. 6, 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 [3] для характерного времени выхода метана:



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

где  $\gamma$  – пористость,  $\nu$  – растворимость газа в угле,  $\tau^f$  – время фильтрации,  $\tau^d$  – время диффузии, мы можем оценить, во сколько увеличилась пористость исследуемых углей.

Если для мелких фракций углей первым (фильтрационным) слагаемым в (1) пренебречь, то диффузионный вклад в  $\tau^{\text{дес}}$  обратно пропорционален квадрату величины открытой пористости  $-1/\gamma^2$ . Поэтому изменение времени выхода газа в два раза соответствует увеличению 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 и уменьшение размера микроблоков. Десорбционные кривые для антрацита представлены на рис. 7.

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. Эти сочетания видов напряженного состояния приводят к росту, как пористости угля, так и объема областей с малыми размерами микроблоков. Этот эффект сопровождается увеличением газового потока и сокращением времени выхода газа без изменения метаноносности угля

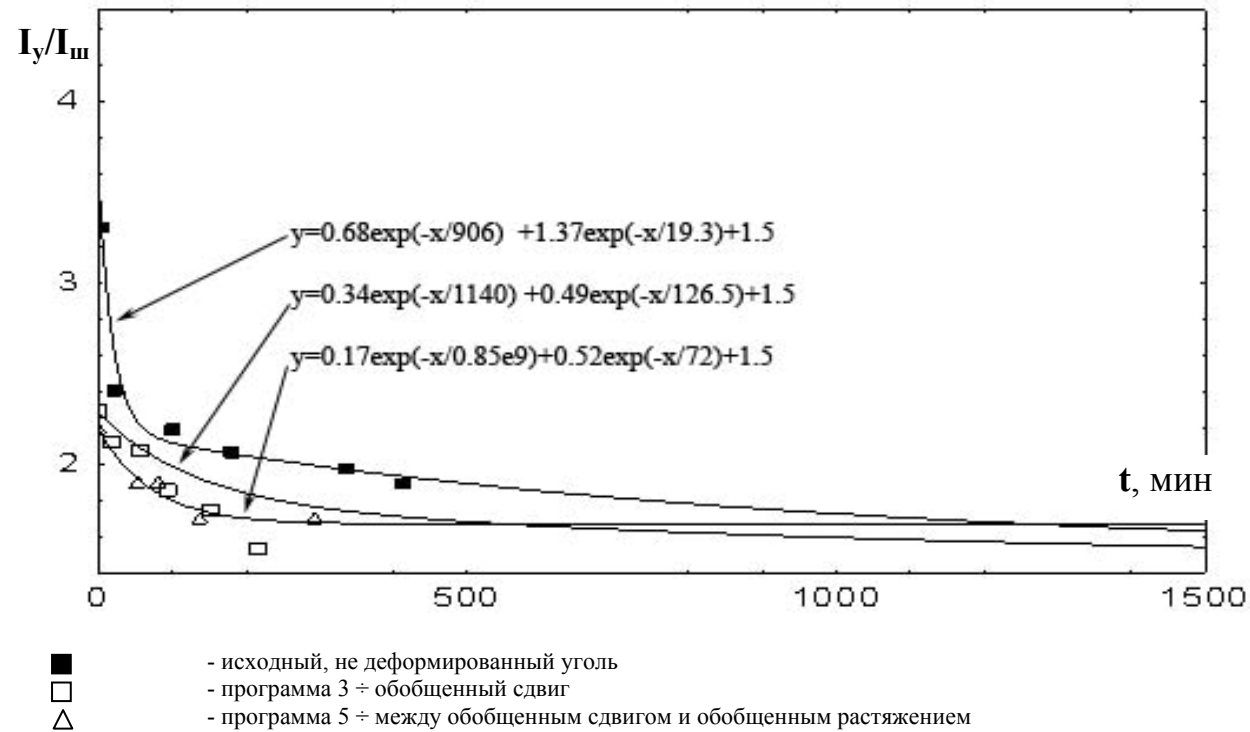


Рис. 5. Шахта «Торецкая», марка Ж, пласт К<sub>8</sub>. Зависимость отношений интенсивностей узких и широких линий спектров ЯМР<sup>1</sup>H от времени

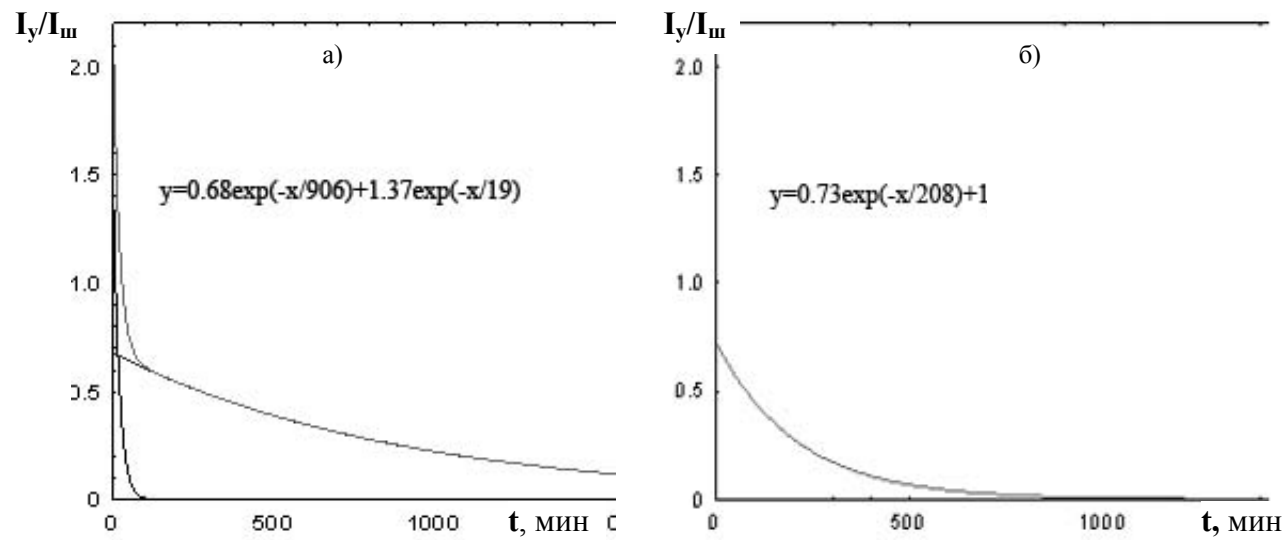


Рис. 6. Разложение кривых десорбции метана для углей марки Ж: а) исходный уголь, б) уголь разрушенный по программе 5

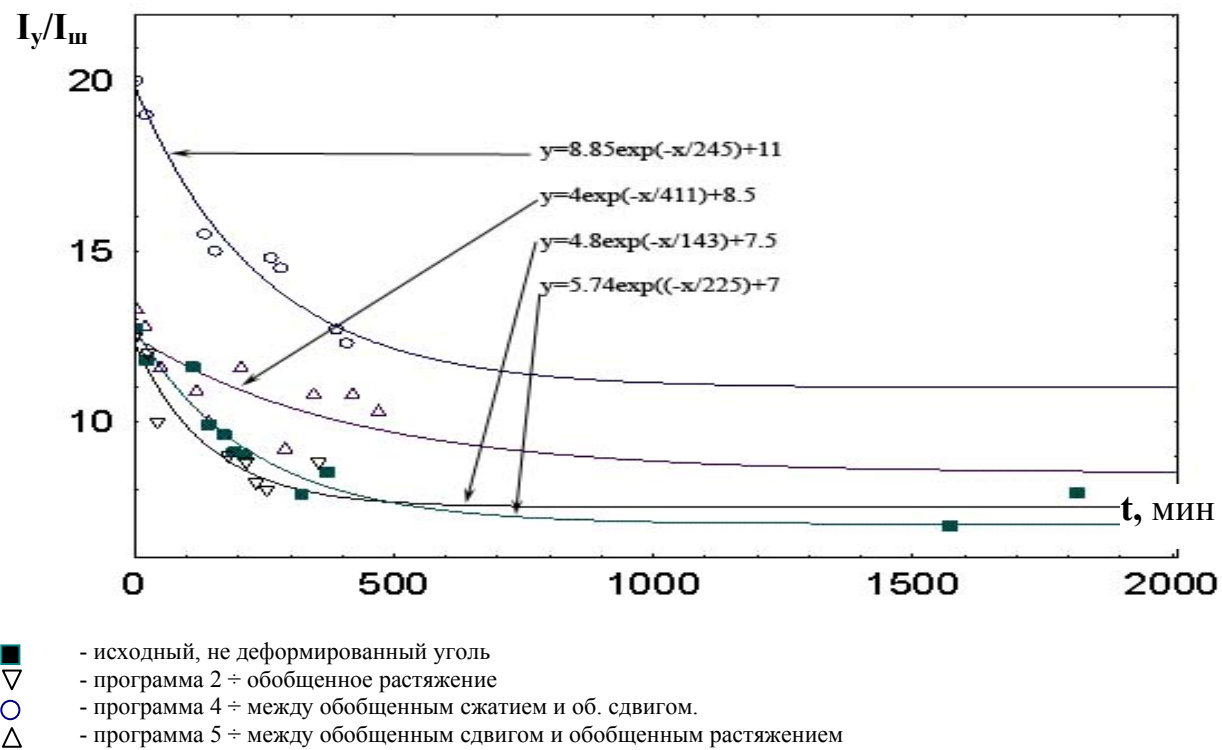


Рис. 7. Шахта «2-2 бис», марка А, пласт  $h_8$ . Зависимость отношений интенсивностей узких и широких линий спектров ЯМР<sup>1</sup>Н от времени

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

*Благодарность*

*Авторы выражают благодарность ведущему научному сотруднику ИФГП НАНУ Ревве В.Н. за предоставленные угольные образцы.*

---

**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. *Васильковский В.А., Молчанов А.Н., Калугина Н.А.* Фазовые состояния и механизмы десорбции метана из угля // Физико-технические проблемы горного производства. - Донецк. 2006. – вып.9. - С. 62-70.
3. *Васильковский В.А.* Оценка коэффициента диффузии и характерного времени диффузионного процесса при десорбции метана из каменного угля // Матеріали міжнародної конференції „Форум гірників – 2007”. – Дніпропетровськ.: Національний гірничий університет, т.1, 2007, стор.100-106.
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., Зайденварг В.Е., Синолицкий В.В., Ульянова Е.В.* Радиофизика в угольной промышленности. – М.: Недра, 1992. – С. 185.
6. *Баренблатт Г.И., Желтов Ю.П., Кочина И.Н.* Об основных представлениях теории фильтрации однородных жидкостей в трещиноватых породах. –ПММ, 1960, т. XXIV, №5.
7. *Василенко Т.А., Алексеев А.Д., Фельдман Э.П., Калугина Н.А., Молчанов А.Н.* Массоперенос метана в угле, обусловленный совместной фильтрацией и диффузией. Физика и техника высоких давлений. - 2004. – том 14. - №3, с. 107-118.
8. *Alexeev A., Feldman F., Vasilenko T.* Methane desorption from a coal-bed, Fuel, v.88, (2007).
9. *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.
10. *Васильковский В.А., Ульянова Е.В.* Некоторые аспекты интерпретации кинетики десорбции метана из каменного угля // Физико-технические проблемы горного производства- Донецк: 2006, ООО “Алекс”, вып.9, с. 56-61. **ГИАБ**

---

**Коротко об авторах**

*Алексеев А.Д., Ульянова Е.В., Васильковский В.В., Дегтярь С.Е.* – ИФГП НАН, Донецк, Украина.

© А.Д. Алексеев, Е.В. Ульянова,  
В.В. Грачевский, С.В. Зимина,  
2008