

УДК 539.4:622.02

ФРАГМЕНТАЦИЯ ОБРАЗЦОВ УГЛЕЙ ПРИ ИНТЕНСИВНОМ ДИНАМИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

© 2019 г. С. Д. Викторов¹, А. Н. Кочанов¹, В. Н. Одинцев¹, *

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем комплексного освоения недр имени академика Н.В. Мельникова Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: Odin-VN@yandex.ru

Поступила в редакцию 20.11.2018 г.

После доработки 16.12.2018 г.

Принята к публикации 25.02.2019 г.

Проведены экспериментальные исследования динамического воздействия взрывного типа на образцы угля, помещенные в стальные ампулы сохранения. Исследованы структурные особенности углей и характер их фрагментации с применением методов электронной микроскопии и лазерной спектроскопии размеров частиц. Выявлена качественно различная реакция углей на воздействие в зависимости от содержания в них газа (метана) и их предрасположенности к газодинамическому разрушению. В дезинтегрированных образцах угля, содержащего метан и склонного к газодинамическому разрушению, определяется высокая доля частиц размером порядка 0.1 мкм, в то время как для других образцов углей значительную долю составляли частицы порядка нескольких микрон. Главное феноменологическое отличие состояло в том, что ампулы сохранения с газосодержащим углем частично разрушались во время испытаний. Обсуждена возможность использования результатов испытаний углей для прогнозирования опасных газодинамических явлений на шахтах.

DOI: 10.1134/S0367676519060383

ВВЕДЕНИЕ

Изучение закономерностей разрушения угля является необходимым условием повышения безопасности разработки угольных пластов и совершенствования методологии прогнозирования катастрофических событий в шахтах в виде опасных газодинамических явлений — внезапных выбросов угля и газа. Каменный уголь — природный геоматериал, который может содержать в себе большое количество метана. Метан может находиться в угле в свободном состоянии (в макропорах), до 90% от общего количества в связанном состоянии — в виде твердого раствора [1] и в сорбированном состоянии в микропорах, размером несколько нанометров [2]. При атмосферном давлении из кубометра угля газонасыщенного пласта за минуты может выделиться несколько десятков кубометров метана. Именно быстрое выделение метана из угольного пласта часто приводит к катастрофическим последствиям.

Для изучения условий быстрого выхода метана из угля проведено множество исследований различной направленности, по совокупности которых сделан вывод о том, что быстрый выход метана происходит, когда природная система “метан—уголь” находится в метастабильном состоянии [3, 4]. Одна из целей теоретических и экспериментальных исследований по этому вопросу состоит в определении характеристик угля, которые могли бы быть

положены в основу прогноза катастрофических состояний угольного пласта и разделения углей на условно называемые выбросоопасные и невыбросоопасные в зависимости от их извлечения из опасных или не опасных по выбросам угольных пластов. Новизна нашего подхода состоит в использовании динамического воздействия на выбросоопасный и невыбросоопасный уголь.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

В проведенных экспериментах динамическое воздействие отвечало условиям взрыва с образованием ударной волны, характеризуемой высокими давлением и температурой. При проведении испытаний образцы углей, которые представляли собой кубики размером 14–15 мм, размещали в специальных стальных ампулах сохранения, используемых для испытания материалов при разрушающих материал мощных динамических воздействиях. Методика испытания углей была аналогична испытаниям, выполненным для прочных горных пород в работе [5]. Ампула с образцом помещалась в массивное стальное кольцо, и на ее крышку устанавливался заряд, состоящий из трех-четырех тротиловых шашек. При детонации тротиловых шашек образуется плоская ударная волна, под воздействием которой за счет высокого им-

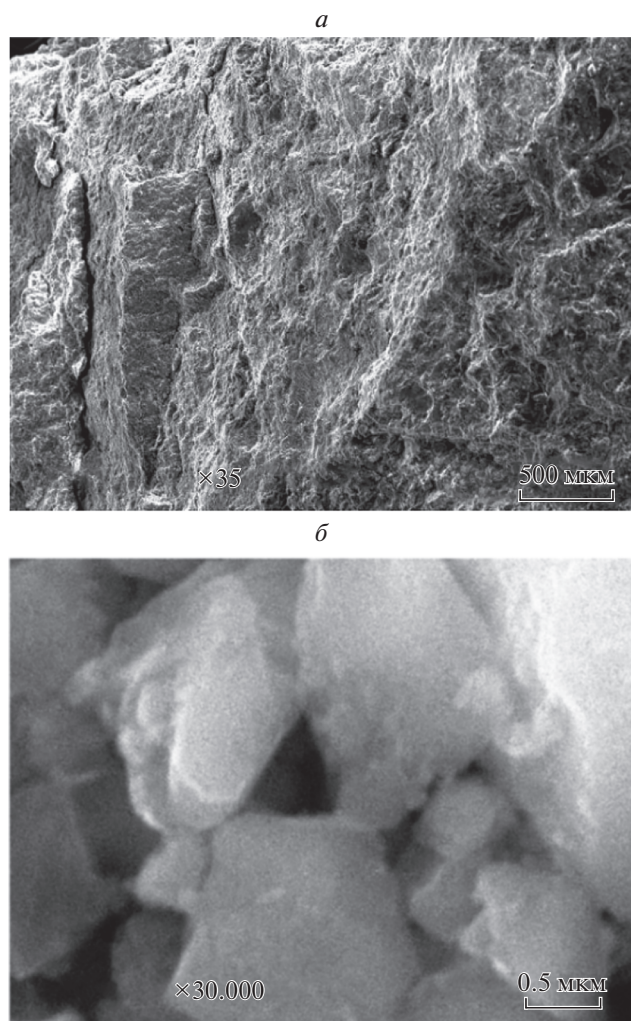


Рис. 1. Структура газосодержащего угля по данным электронной микроскопии в масштабах рассмотрения: *a* – 500; *б* – 0.5 мкм.

пульсного давления и температуры происходит фрагментация образцов с образованием отдельных частиц. Максимальное давление в ударной волне может достигать для условий эксперимента примерно 1.0 ГПа. Средние температуры после прохождения волн разгрузки могли составлять примерно 1000°C [6].

Первая группа образцов угля была представлена антрацитом, который не является выбросоопасным. Вторая группа была представлена образцами угля из выбросоопасного пласта, газоносностью 25 м³ на тонну угля. Образцы выбросоопасного угля более месяца дегазировались естественным образом при комнатной температуре. Плотность образцов невыбросоопасного антрацита составляла 1.9 т · м⁻³, выбросоопасного угля – 1.3 т · м⁻³, скорость распространения продольных волн соответственно 5240 и 1000 м · с⁻¹.

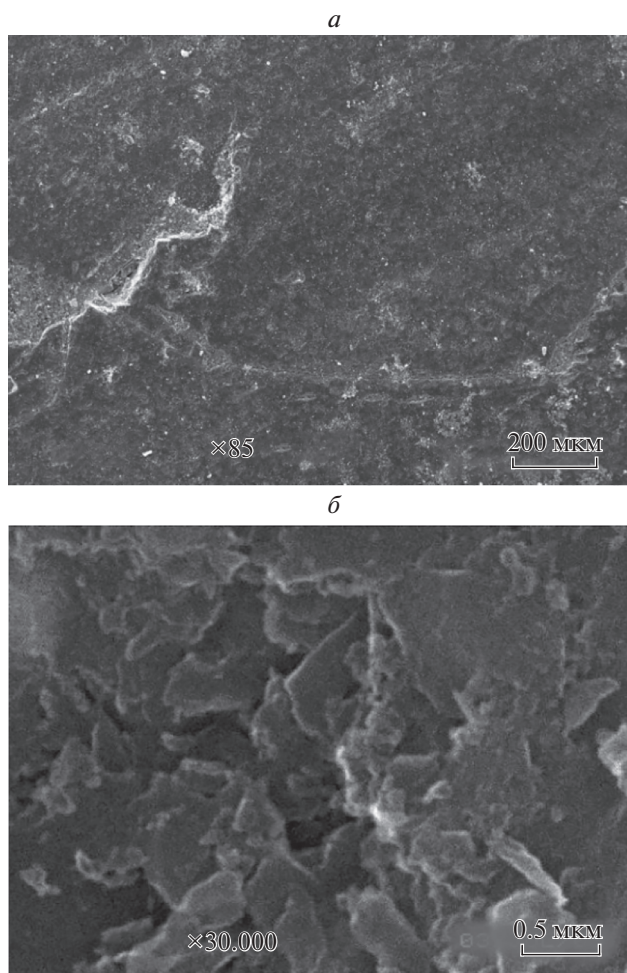


Рис. 2. Структура антрацита по данным электронной микроскопии в масштабах рассмотрения: *a* – 200; *б* – 0.5 мкм.

Микроструктуру углей исследовали методом электронной микроскопии, результаты которой отражены в работе [7]. С помощью сканирующих электронных микроскопов JEOL-JSM-5910LV и LEO 1450VP получены изображения структуры поверхности углей на разных масштабных уровнях (рис. 1, 2). Главное отличие структуры наиболее выбросоопасного угля от антрацита состоит в том, что в масштабе миллиметра наиболее выбросоопасный уголь представляется достаточно однородной аморфной сплошной средой, а в микромасштабе этот уголь представлен фрагментами порядка микрометра.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

После динамического нагружения ампул анализировали дисперсный состав угольных частиц с помощью лазерной спектрометрии размеров частиц. Выборочно отбирались порошкообразные пробы, и с использованием ручного лазерного

счетчика частиц Lighthouse Handheld 3016 анализировали их дисперсный состав по методике работ [5, 8]. В результате измерений получено распределение частиц в диапазоне 0.3–10 мкм по их числу, которое представлено в табл. 1. Минимальный регистрируемый размер угольных частиц 0.3 мкм определяется техническими возможностями лазерного счетчика данного типа. Анализируя экспериментальные данные, можно отметить, что образцы выбросоопасного угля отличаются повышенным содержанием субмикронных частиц размером порядка 0.1–0.3 мкм, составляющих почти 80% от общего количества, в то время как для антрацита их количество не более 50%.

Однако главное отличие в результатах испытаний ампул с образцами выбросоопасного и невыбросоопасного угля состоит в том, что ампулы с невыбросоопасным антрацитом после динамического воздействия деформируются, но остаются неразрушенными, в то время как при испытании образцов выбросоопасных углей крышка ампулы оказывалась пробитой с образованием круглого отверстия и следами температурного воздействия (рис. 3).

Таким образом, выбросоопасный и невыбросоопасный уголь проявляют общую закономерность в дезинтеграции, которая выражается в том, что природные микроструктурные фрагменты материала при динамическом нагружении разделяются на более мелкие (примерно на порядок) частицы. Дезинтегрированные частицы угля имеют на порядок большую площадь поверхности, что способствует выходу молекул метана из микропор.

Определяющим фактором при нагружении ампул сохранения является температурный фактор, который, согласно [4], сильно влияет на фазовое состояние системы уголь–метан и на переход связанного метана в свободное состояние. В проведенных экспериментах установлено, что, несмотря на уменьшение концентрации молекул метана в выбросоопасном угле при его длительной естественной дегазации, значительное повышение температуры и его фрагментация до частиц размером 0.1 мкм при динамическом воздействии стимулирует часть оставшихся после дегазации молекул связанного метана в частицах угля перейти в свободное состояние. Свободный метан активно участвует в разрушении ампулы в

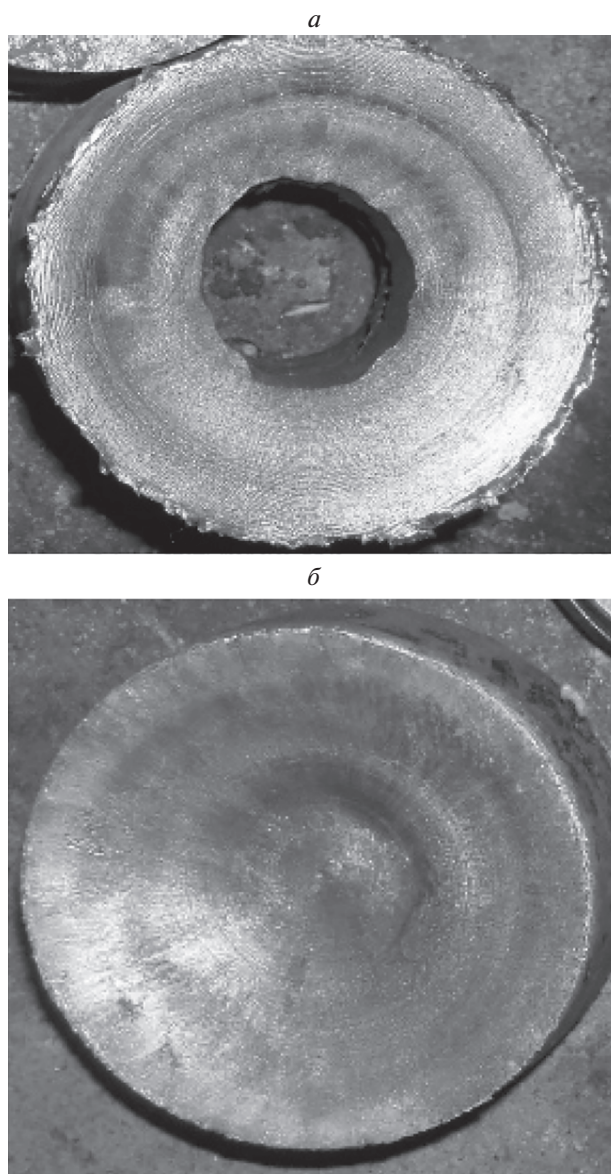


Рис. 3. Вид ампул сохранения после динамического испытания образцов антрацита (а) и газосодержащего угля (б).

режиме детонационного сгорания и обуславливает критическое повышение давления газообразных продуктов в ампуле.

Температурный фактор для углей имеет большое значение, однако, как показано в [9, 10], под

Таблица 1. Распределение числа субмикронных частиц по размерам

Материал	Размер субмикронных частиц, мкм					
	0.3–0.5	0.5–1.0	1.0–3.0	3.0–5.0	5.0–10.0	>10.0
Антрацит	3646	2334	1663	58	29	9
Газосодержащий уголь	9913	1131	1478	261	522	87

влиянием только термического нагружения уголь может разрушаться лишь до частиц размером 1–3 мкм. Для дезинтеграции угля на фрагменты порядка 0.1 мкм, при которых возможен эффект перехода связанного метана в свободное состояние, необходимо высокое механическое давление, которое формируется в ампулах сохранения при прохождении ударной волны.

Отметим также, что термические и механические напряжения формируются также при электроимпульсном воздействии на уголь [11, 12], однако в силу малости этих напряжений в сравнении с ударным нагружением взрывного типа уголь не фрагментируется до частиц размером микрона, и возможный выход молекул связанного метана из угля практически не проявляется в экспериментах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экспериментально установлено, что уголь, склонный к выбросам угля и газа, активно реагирует на динамическое воздействие в ампуле сохранения. Под действием ударной волны, порожденной взрывом, он фрагментируется преимущественно до частиц размером порядка 0.1 мкм. Под влиянием температурного фактора происходит фазовый переход связанного метана в свободное состояние. В результате детонационного сгорания метана и повышения давления продуктов горения ампула разрушается. Динамическое нагружение угля провоцирует быстрый выход абсорбированного метана из угольного вещества, и активное участие свободного метана в процессах динамического разрушения.

Невыбросоопасный уголь (антрацит) ведет себя в ампулах сохранения как инертный материал, не отличаясь от прочных горных пород, но с меньшим содержанием малых частиц размером порядка 0.1 мкм в общем распределении частиц, образующихся при фрагментации под действием ударной волны. Установленное различие в пове-

дении выбросоопасных и невыбросоопасных углей может быть использовано в лабораторном прогнозе склонности угля к катастрофическим проявлениям при разработке угольных пластов. Результаты настоящих экспериментов представляют интерес для выяснения механизма внезапных выбросов угля и газа.

Работа выполняется при финансовой поддержке РФФИ (проект № 18-05-00912).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Эттингер И.Л.* // Хим. тв. топлива. 1984. № 4. С. 28.
2. *Бобин В.А.* Сорбционные процессы в природном угле и его структура. М.: ИПКОН АН СССР, 1987. 135 с.
3. *Эттингер И.Л.* Необъятные запасы и непредсказуемые катастрофы. М.: Наука. 1988. 171 с.
4. *Моценко И.Н., Лосев Н.Ф., Гуфан Ю.М.* Теоретический анализ метастабильных состояний системы уголь-газ. Ростов-на-Дону: Изд. Северо-Кавказского научного центра высшей школы, 1996. 61 с.
5. *Викторов С.Д., Кочанов А.Н.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2013. Т. 77. № 3. С. 332; *Viktorov S.D., Kochanov A.N.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2013. V. 77. № 3. P. 298.
6. *Ананьин А.Б., Бреусов О.Н., Дремин А.Н. и др.* // Физ. горения и взрыва. 1974. Т. 10. С. 426.
7. *Трубецкой К.Н., Рубан А.Д., Викторов С.Д. и др.* // ДАН. 2010. Т. 431. № 6. С. 818.
8. *Александров П.А., Викторов С.Д., Калечиц В.И., Кочанов А.Н.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2016. Т. 80. № 11. С. 1496; *Aleksandrov P.A., Victorov S.D., Kalechits V.I., Kochanov A.N.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2016. V. 80. № 11. P. 1329.
9. *Джасанкар С., Патадийа Д.М., Шешадри Т.* // Физ. горения и взрыва. 2017. Т. 53. № 3. С. 93.
10. *Cui T., Zhou Z., Dai Z.* // Energy Fuels. 2015. V. 29. № 10. P. 6231.
11. *Zhu Chuanjie, Lu Ximiao, Gao Zishan* // Int. J. Mining Sci. Techn. 2017. V. 27. № 6. P. 1051.
12. *Косенков В.М., Ризун А.Р.* // Электрон. обр. мат. 2011. Т. 47. № 2. С. 100.