

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ИМПУЛЬСНОГО РАЗРУШЕНИЯ КАМЕННОГО УГЛЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА КОЛЬСКОГО

В.М. Косенков, А.Р. Ризун

*Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины,
пр. Октябрьский, 43-А, г. Николаев, 54018, Украина, dpcd@iip.com.ua, iip@iip.com.ua*

Введение

Процессы разрушения и измельчения хрупких материалов широко распространены в современных технологиях создания материалов с заданными свойствами [1]. Существующие способы разрушения (статический, динамический и ударноволновой (импульсный)) характеризуются различными методами приложения сил к разрушаемому телу. Импульсные методы нагружения имеют ряд преимуществ перед остальными, главным образом благодаря малым габаритам и мобильности оборудования, а также отсутствию ограничений по прочности разрушаемых материалов. У импульсного электрогидравлического способа есть дополнительные преимущества, связанные с возможностью управления количеством и частотой выделяемой энергии в автоматическом режиме и большей безопасностью. Этим способом можно разрушить хрупкие неметаллические материалы практически любой прочности [2–4], для чего необходимо выбрать параметры процесса нагружения, обеспечивающие его эффективность.

Выбор параметров процесса определяется прочностью и динамическими свойствами материалов, а также характеристиками процесса разделения хрупкого материала на отдельные части. Определение связи между параметрами действующей нагрузки и характеристиками процесса разрушения является актуальной научной задачей.

В условиях импульсного электрогидравлического нагружения хрупких материалов получить достоверные данные о параметрах волны давления и характеристиках процесса разрушения материалов очень сложно. Их определение возможно в специальных экспериментах по методу Кольского с помощью разрезного стержня Гопкинсона [5, 6]. В этом случае можно обеспечить практически однородные условия нагружения образцов и измерить силовые и деформационные характеристики процесса. Используя эти данные и экспериментальные зависимости давления на фронте волны от расстояния до оси электродной системы, можно определить характеристики процесса разрушения материалов в условиях неоднородного нагружения.

В качестве объекта исследования был выбран каменный уголь, блоки которого с характерным размером от 100 до 20 мм необходимо разрушать и измельчать до 0,2 мм и менее для подготовки водно-угольного топлива.

Цель настоящего исследования – изучение процесса разрушения каменного угля в результате импульсного электрогидравлического воздействия с учётом динамических характеристик материала, определяемых по методу Кольского.

1. Постановка задачи и предварительные результаты исследования

Эффективность измельчения единицы массы или объёма каменного угля до заданных размеров можно характеризовать затратами энергии, пропорциональной суммарной работе внешних сил, действующих на частицы каменного угля. Поэтому определение удельной работы разрушения блоков каменного угля волнами давления, генерируемыми электрическим разрядом в воде, является ключевым этапом для определения затрат энергии и производительности процесса измельчения каменного угля.

Работу разрушения можно вычислить, если известна диаграмма деформирования образцов каменного угля, которую можно определить с помощью экспериментального метода Кольского с использованием разрезного стержня Гопкинсона [5–7].

Установка для динамических испытаний по методу Кольского, изготовленная в ИИПТ НАН Украины [7], содержит следующие функциональные узлы (рис. 1). Пружинный ускоритель 1 разгоняет ударник 2 до заданной скорости, регистрируемой с помощью измерителя скорости 3. При ударе ударника о торец нагружающего стержня 5 в последнем возбуждается волна напряжений, движущаяся со скоростью звука в направлении опорного стержня 8. Достигая запускающего датчика 4, чувствительным элементом которого служит пьезоэлемент, волна генерирует в нём электрический им-

пульс амплитудой от 0,2 до 1,5 В, поступающий на вход синхронизации цифрового осциллографа и запускающий развертку сигнала. Далее волна доходит до датчика 6, и он начинает регистрировать деформации нагружающего стержня. Деформации чувствительного элемента датчика (тензорезистора) пропорциональны деформациям стержня, вызванным волной напряжений.

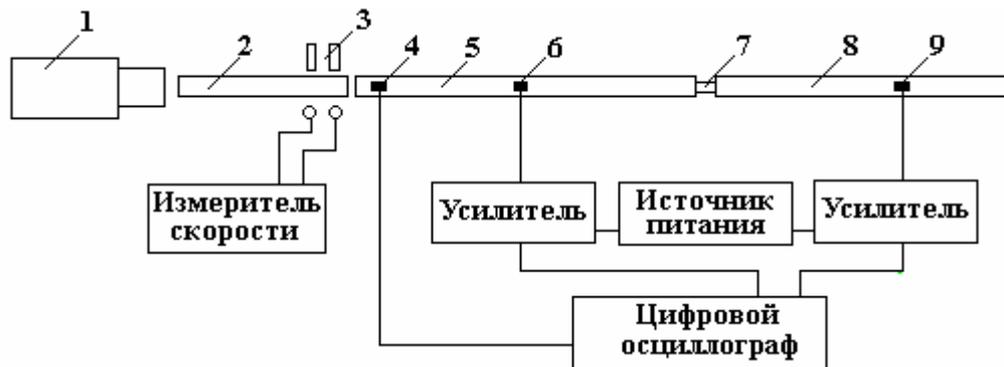


Рис. 1. Схема расположения элементов измерительной системы. 1 – ускоритель; 2 – ударник; 3 – датчик скорости; 4 – запускающий датчик; 5 – нагружающий стержень; 6 – датчик деформации; 7 – исследуемый образец; 8 – опорный стержень; 9 – датчик деформации

После того как волна напряжений пройдет по всей длине нагружающего стержня, часть ее проходит через образец 7 в опорный стержень 8, а часть отражается вследствие разницы в площадях сечений и механических свойств стержня и образца. Отраженная часть опять регистрируется датчиком 6 и несет в себе информацию о скорости деформации, а часть, прошедшая через образец, фиксируется аналогичным датчиком 9 и содержит информацию о напряжениях в образце. Сигналы от датчиков 6 и 9 поступают через усилители в цифровой осциллограф, в котором осуществляется их цифровая запись. Цифровые аналоги сигналов обрабатываются по специальному алгоритму в программе MS Excel. В результате обработки определяются две диаграммы деформирования материала. Каждая из них определяет зависимость от деформации материала напряжений и скорости деформации.

Удельную работу силы давления на образец A можно определить по диаграмме деформирования материала:

$$A = \int_0^{\varepsilon} \sigma \cdot d\varepsilon, \quad (1)$$

где σ – напряжения в образце, Па; ε – деформация образца.

С помощью метода Кольского выполнено исследование влияния скорости деформации материала на величину предела прочности каменного угля и на удельную работу его разрушения. Также исследовано влияние скорости деформации каменного угля на его прочность.

Диаграммы деформирования каменного угля приведены на рис. 2. Сравнение диаграмм позволяет отметить, что предел прочности образцов угля на сжатие подвержен существенным статистическим колебаниям, даже при малом отличии скорости деформации предел прочности отличается в два и более раз. Это свидетельствует о наличии в образцах угля различного количества микро- и макротрещин, уменьшающих их прочность, которую можно определить как среднюю статистическую величину. Среднее статистическое значение предела прочности угля существенно возрастает при увеличении скорости деформации (рис. 3). Используя метод Кольского, можно определить зависимость предела прочности угля от амплитуды волны давления, действующей на образец (рис. 4). Сравнение рис. 3 и 4 обнаруживает корреляцию зависимости предела прочности от скорости деформации и амплитуды волны давления. Из этих данных также следует, что при скорости деформации, меньшей 100 с^{-1} , среднестатистический предел прочности угля на сжатие составляет 35 МПа.

Удельная работа разрушения угля при однократном действии волны давления также существенно зависит от скорости деформации (рис. 5), увеличиваясь приблизительно в два раза, если скорость деформации возрастает от 200 до 600 с^{-1} . Угольные блоки можно разрушить, если удельная работа разрушения больше 270 кДж/м^3 при однократном действии волны давления с амплитудой не менее 25 МПа (рис. 6). По этому критерию можно определить минимальные затраты энергии для разрушения блока угля.

От удельной работы разрушения угля при однократном воздействии волны давления зависит средний размер частиц разрушенного блока угля (рис. 7). При однократном воздействии на блок угля увеличение удельной работы разрушения от 250 до 700 кДж/м³ приводит к уменьшению средних размеров образовавшихся частиц от 5 до 1 мм. Эту информацию можно использовать для определения количества нагружений блока угля с целью его разрушения до частиц заданных размеров.

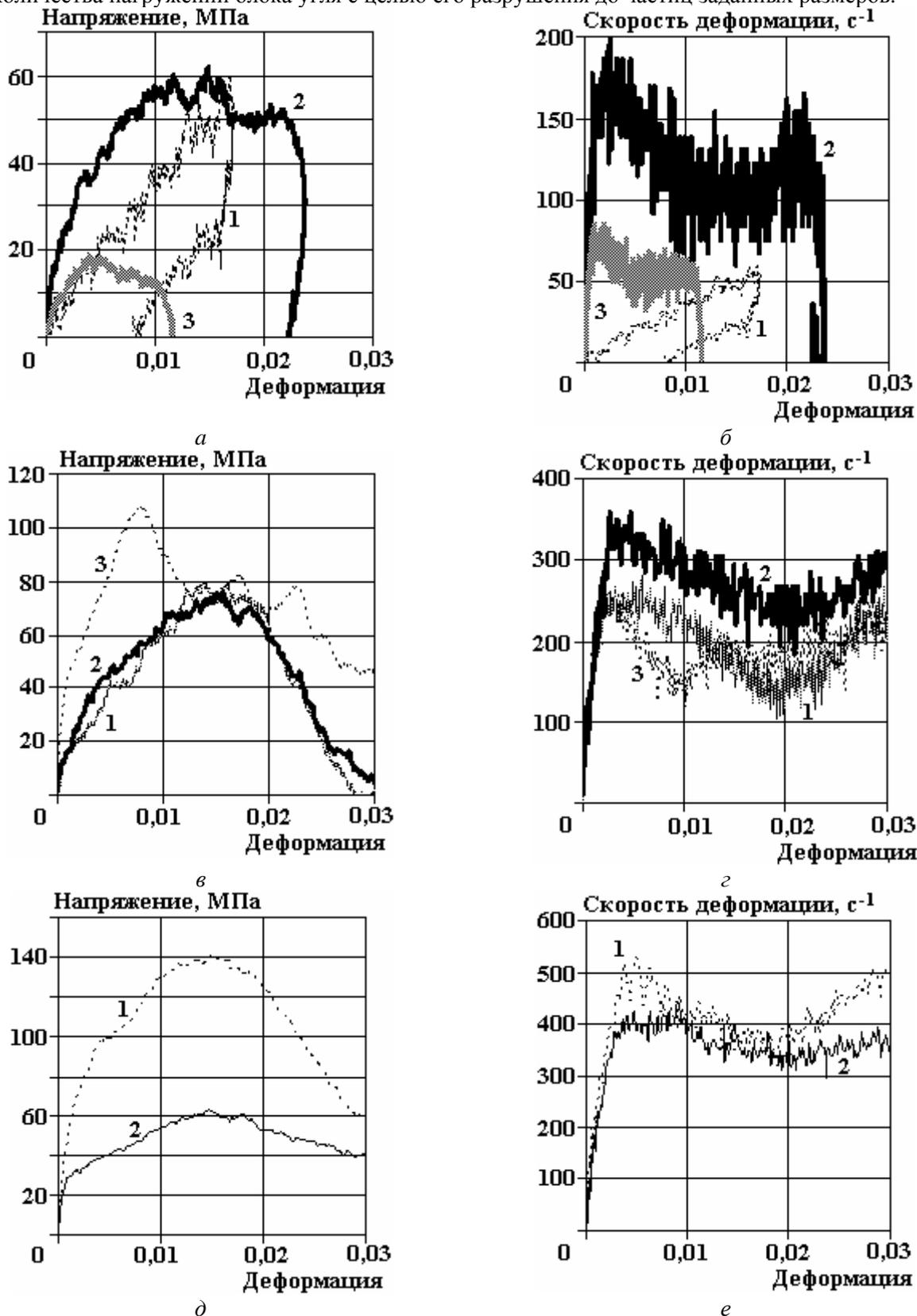


Рис. 2. Диаграммы динамического деформирования образцов каменного угля. 1 – 24,4; 2 – 55; 3 – 55 МПа (а, б). 1 – 74,7; 2 – 74,7; 3 – 95 МПа (в, г). 1 – 116; 2 – 116 МПа (д, е)

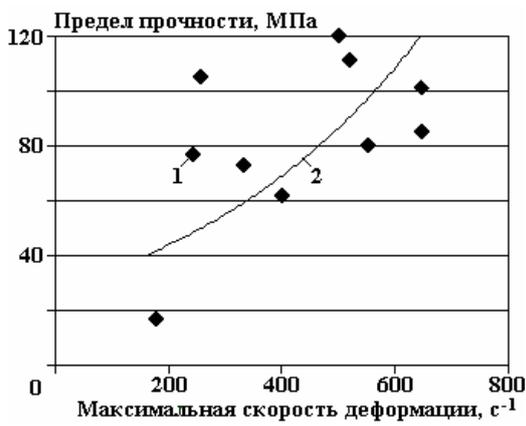


Рис. 3. Зависимость предела прочности угля от максимальной скорости деформации. 1 – эксперимент; 2 – аппроксимация

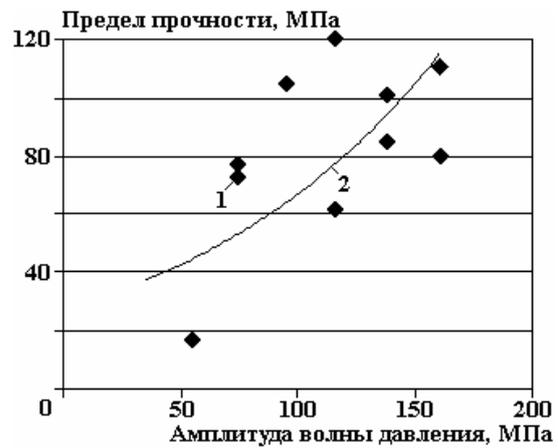


Рис. 4. Зависимость предела прочности угля от амплитуды волны давления. 1 – эксперимент; 2 – аппроксимация

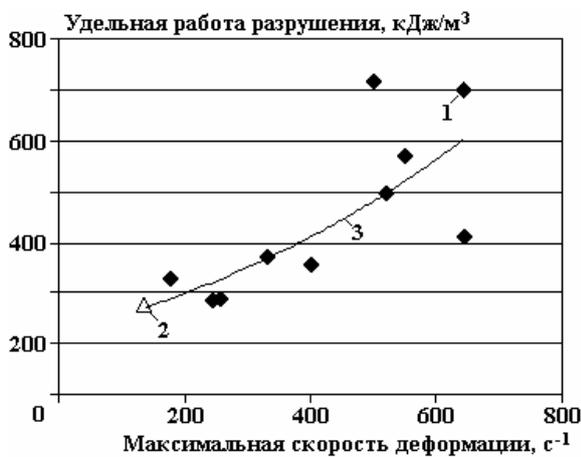


Рис. 5. Зависимость удельной работы разрушения угля от максимальной скорости деформации. 1 – разрушение; 2 – без разрушения; 3 – аппроксимация



Рис. 6. Зависимость удельной работы разрушения угля от амплитуды волны давления. 1 – разрушение; 2 – без разрушения; 3 – аппроксимация

Удельная работа разрушения в малой степени зависит от начального объема разрушаемого образца (рис. 8), поэтому зависимость, приведённая на рис. 7, может быть использована для блоков угля существенно разных размеров.

Средний размер частиц после разрушения, мм

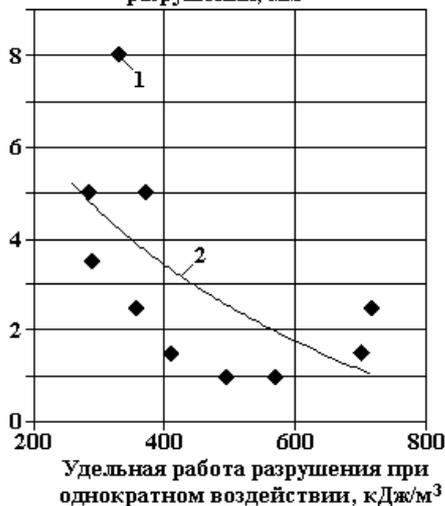


Рис. 7. Зависимость среднего размера частиц угля после разрушения от удельной работы разрушения. 1 – эксперимент; 2 – аппроксимация

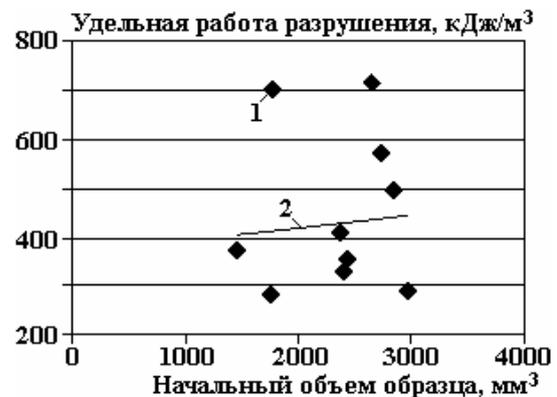


Рис. 8. Зависимость удельной работы разрушения угля от начального объема образца. 1 – эксперимент; 2 – аппроксимация

2. Методика и результаты исследования

Используя полученные экспериментальные данные, определим объём угольных блоков, разрушенных до заданных размеров за единицу времени, в зависимости от амплитуды волны давления и энергии конденсаторной батареи с помощью следующей методики.

Давление в воде, окружающей канал разряда, определим с помощью зависимости, приведённой в [8]:

$$p = \frac{U_0}{r} \sqrt{\frac{l_k}{L}}, \quad (2)$$

где U_0 – напряжение заряда батареи, В; r – расстояние от оси канала разряда до заданной точки пространства, м; l_k – расстояние между электродами, м; L – индуктивность разрядного контура, Гн.

Из экспериментальных данных (рис. 4 и 6) следует, что минимальное давление волны p_{\min} , при котором угольные блоки начинают разрушаться, изменяется в пределах от 25 до 75 МПа. Большой интервал значений p_{\min} объясняется существенной анизотропией физико-механических свойств и большим количеством микро- и макротрещин, образовавшихся в процессе формирования угольных пластов и в процессе добычи угля.

Из формулы (2) определим радиус цилиндрической области разрушения угля, когда давление равно p_{\min} :

$$r_p = \frac{U_0}{p_{\min}} \sqrt{\frac{l_k}{L}}. \quad (3)$$

По r_p можно определить объём области разрушения угля от одного разряда:

$$V_0^* = \pi \cdot r_p^2 \cdot l_k = \pi \cdot \frac{U_0^2 \cdot l_k^2}{p_{\min}^2 \cdot L}. \quad (4)$$

Из формулы для вычисления энергии конденсаторной батареи

$$E_0 = \frac{C \cdot U_0^2}{2}, \quad (5)$$

где C – ёмкость конденсаторной батареи, можно определить напряжение заряда батареи, соответствующее энергии заряда, и, подставив его в формулу (4), получить зависимость объёма разрушения угля от энергии заряда батареи:

$$V_0^* = 2 \cdot \pi \cdot \frac{E_0 \cdot l_k^2 \cdot k_E}{C \cdot p_{\min}^2 \cdot L}, \quad (6)$$

где k_E – акустический коэффициент прохождения энергии в угольный массив, вычисляемый по формуле [9]:

$$k_E = \frac{4 \cdot \rho_f \cdot c_f \cdot \rho_u \cdot c_u}{(\rho_f \cdot c_f + \rho_u \cdot c_u)^2}, \quad (7)$$

где ρ_f и ρ_u – плотность воды и угля; c_f и c_u – скорость звука в воде и угле.

Скорость измельчения объёма угля (производительность измельчения) V_0^* зависит от частоты выполнения разрядов f и количества разрядов n , необходимых для уменьшения размеров блока угля от начального объёма V_0^* до заданного объёма образовавшихся из него фрагментов V_{\min} :

$$V_t^* = V_0^* \frac{f}{n} \cdot m_u, \quad (8)$$

где m_u – пористость объёма V_0^* , заполненного осколками разрушения блоков угля.

Для определения n рассмотрим процесс изменения объёма угольных блоков после каждого разряда:

$$\frac{V_0^*}{V_1} \cdot \frac{V_1}{V_2} \cdot \frac{V_2}{V_3} \cdot \dots \cdot \frac{V_i}{V_{i+1}} \cdot \dots \cdot \frac{V_{n-1}}{V_n} \cdot \frac{V_n}{V_{\min}} = \frac{V_0^*}{V_{\min}}, \quad (9)$$

где i – порядковый номер разряда.

С учётом малого влияния начального объёма блока угля на изменение удельной работы его разрушения (рис. 8) можно предположить, что относительное уменьшение объёмов образовавшихся

частиц практически не зависит от порядкового номера разряда:

$$\frac{V_i}{V_{i+1}} = \text{const.} \quad (10)$$

С учётом допущения (10) можно записать:

$$\frac{V_0^*}{V_{\min}} = \left(\frac{V_0^*}{V_1} \right)^n. \quad (11)$$

Из уравнения (11) определим количество разрядов, необходимых для измельчения объёма угля V_0^* до частиц заданного объёма V_{\min} :

$$n = \frac{\ln \left(\frac{V_0^*}{V_{\min}} \right)}{\ln \left(\frac{V_0^*}{V_1} \right)}. \quad (12)$$

Относительное изменение объёма блока угля (количество фрагментов разрушенного блока) зависит от амплитуды волны давления на этот блок (рис. 9) и может быть аппроксимировано экспоненциальной зависимостью

$$\left(\frac{V_0^*}{V_1} \right) = a_v \cdot e^{b_v \cdot p_{cp}} + c_v, \quad (13)$$

где $a_v = 0,1588$; $b_v = 6,03 \cdot 10^{-8} \text{ Па}^{-1}$; $c_v = 0,8412$ – коэффициенты аппроксимации экспериментальных данных (рис. 9) по методу наименьших квадратов; p_{cp} – среднее давление жидкости в области разрушения угля объёмом V_0^* .



Рис. 9. Зависимость количества фрагментов, на которые делится образец после одного нагружения, от амплитуды волны давления. 1 – эксперимент; 2 – аппроксимация

Дробление и измельчение блоков угля происходят в области с переменным давлением, изменяющимся от максимального в канале разряда $p_{k\max}$ до p_{\min} на границе области разрушения угля по гиперболической зависимости (2). Среднее давление жидкости определим как среднее интегральное на интервале от радиуса канала разряда a_m , при котором давление в канале разряда достигает максимального значения $p_{k\max}$, до границы области разрушения угля радиусом r_p :

$$p_{cp} = \frac{1}{r_p - a_m} \int_{a_m}^{r_p} p dr. \quad (14)$$

Величину a_m определили по формуле [10]:

$$a_m = \left(\frac{U_0^2 \cdot C^2 \cdot L}{\rho_f \cdot l_k} \right)^{\frac{1}{4}} = \left(\frac{2 \cdot E_0 \cdot C \cdot L}{\rho_f \cdot l_k} \right)^{\frac{1}{4}}. \quad (15)$$

Максимальное давление в канале разряда [9]:

$$P_{kmax} = 0,17 \sqrt{\frac{\rho_f \cdot U_0^2}{L \cdot l_k}} = 0,17 \sqrt{\frac{2 \cdot \rho_f \cdot E_0}{L \cdot C \cdot l_k}}. \quad (16)$$

В результате интегрирования по формуле (14) определили p_{cp} :

$$p_{cp} = \frac{P_{kmax} - P_{min}}{r_p - r_k} \left(\frac{r_k}{r_p - r_k} - 1 \right) \cdot r_p + P_{kmax}. \quad (17)$$

Проверку разработанной методики выполнили на основании сравнения результатов расчёта с экспериментальными данными процесса измельчения каменного угля. Энергию конденсаторной батареи экспериментальной электрогидравлической установки изменяли в пределах от 50 до 2500 Дж. Параметры воды $\rho_f = 1000 \text{ кг/м}^3$, $c_f = 1500 \text{ м/с}$, а каменного угля – $\rho_u = 1300 \text{ кг/м}^3$, $c_u = 3000 \text{ м/с}$. Минимальный размер измельчённых частиц каменного угля – 0,2 мм, а пористость неуплотнённого слоя угля в области разрушения – $m_u = 0,4$. На основании экспериментальных данных (рис. 4 и 6) p_{min} изменяется в пределах от 25 до 75 МПа. Производительность процесса измельчения каменного угля для данных параметров приведена на рис. 10. Как видно, экспериментальные точки располагаются вблизи кривых, рассчитанных по данной методике, для давлений p_{min} , изменяющихся в пределах от 25 до 75 МПа. Следовательно, разработанную расчётно-экспериментальную методику можно использовать для определения производительности процесса измельчения каменного угля электроразрядным способом. Данную методику можно применить для определения производительности процесса измельчения электроразрядным способом и других хрупких материалов, если для каждого из них определить методом Кольского характеристики, подобные приведённым на рис. 4, 6 и 9.

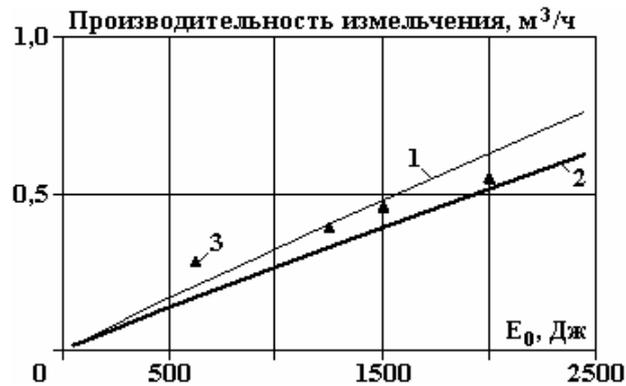


Рис. 10. Зависимость скорости измельчения угля от энергии конденсаторной батареи. 1 – 25; 2 – 75 МПа; 3 – эксперимент

Выводы

Полученные результаты позволяют сделать следующие основные выводы.

Минимальное давление волны p_{min} , при котором угольные блоки начинают разрушаться, изменяется в пределах от 25 до 75 МПа. Большой интервал значений p_{min} объясняется существенной анизотропией физико-механических свойств и большим количеством микро- и макротрещин, образовавшихся в процессе формирования угольных пластов и в процессе добычи угля.

При однократном воздействии на блок каменного угля увеличение удельной работы разрушения от 250 до 700 кДж/м³ приводит к уменьшению средних размеров образовавшихся частиц от 5 до 1 мм. Эту информацию можно использовать для определения количества нагружений блока угля для его разрушения до частиц заданных размеров.

Динамический предел прочности каменного угля существенно зависит от скорости деформации частиц. Изменение скорости деформации от 200 до 600 с⁻¹, соответствующей изменению амплитуды действующей волны давления от 50 до 150 МПа, приводит к увеличению предела прочности в среднем от 40 до 100 МПа. Увеличение скорости деформации угля уменьшает предел прочности от его среднего значения от 60 до 25 %.

Производительность измельчения блоков каменного угля увеличивается от 50 до 700 м³/час (от 65 до 910 кг/час) при увеличении энергии конденсаторной батареи от 50 до 2500 Дж.

Разработанная методика определения производительности процесса измельчения каменного угля хорошо согласуется с экспериментальными данными и может быть использована для других материалов, если для них определить характеристики динамического разрушения по методу Кольского.

ЛИТЕРАТУРА

1. Селиванов В.В. *Механика разрушения деформируемого тела*. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999. 2. 420 с.
2. Ризун А.Р. Технология разрушения неметаллических материалов электровзрывом. *Тез. докл. V научно-технической конференции "Электрический разряд в жидкости и его применение в промышленности"*, Николаев, 8–10 сентября 1992, с.166.
3. Ризун А.Р., Косенков В.М. К вопросу об определении производительности электроразрядного разрушения хрупких неметаллических материалов. *Электронная обработка материалов*. 2001, **37**(2), 45–50.
4. Ризун А.Р., Цуркин В.Н. Электроразрядное разрушение неметаллических материалов. *Электронная обработка материалов*. 2002, **38**(1), 83–85.
5. Кольский Г. *Волны напряжения в твёрдых телах*. М.: ИЛ, 1955. 197 с.
6. Брагов А.М. Использование метода Кольского для динамических испытаний конструкционных материалов. *Прикладные проблемы прочности и пластичности*. Всерос. межвуз. сб. Н. Новгород: Нижегородский ун-т, 1995 (51), 127–137.
7. Косенков В.М., Аврамец Д.Р., Старков Н.В., Васильев А.А. Методика определения удельной внутренней энергии и времени релаксации касательных напряжений алюминиевых сплавов. *Збірник доповідей V Міжвузівської науково-практичної конференції "Науковий потенціал вищої школи"*. Николаев, 2009. С. 25–32.
8. Наугольных К.А., Рой Н.А. *Электрические разряды в воде*. М.: Наука, 1971. 155 с.
9. Пейн Г. *Физика колебаний и волн*. М.: Мир, 1979. 389 с.
10. Кривицкий Е.В., Шамко В.В. *Переходные процессы при высоковольтном разряде в воде*. Киев: Наук. думка, 1979. 208 с.

Поступила 07.10.10

Summary

By example of black coal the authors explored the processes of fragile materials crushing under pulse loading. The research was conducted using Kol'skiy's method with use of split Hopkinson pressure bar. Basing on the experimental data, the methodics is developed for the determination of crushing rate efficiency and blocks of black coal fining under the influence of electric discharge in water.
