

**ОСОБЕННОСТИ ВЛИЯНИЯ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ  
НА ХАРАКТЕР РАЗРУШЕНИЯ УГЛЯ**

Обобщены и проанализированы результаты исследований по оценке влияния ультразвукового воздействия на изменение свойств и характер разрушения угольных образцов. Рассмотрены результаты исследований по оценке влияния ультразвукового воздействия на физико-механические и газодинамические свойства угольного образца различной степени выбросоопасности, газонасыщения и с учетом изменения напряженного состояния. Установлена закономерность эффективных частот воздействия на уголь в зависимости от размеров дефектных структур в нем.

**FEATURES OF INFLUENCE HIGH-FREQUENCY AFFECTING  
CHARACTER OF DESTRUCTION OF COAL**

The results of researches are generalized and analyzed as evaluated by influence of the ultrasonic affecting change of properties and character of destruction of coal standards. The results of researches are considered as evaluated by influence of the ultrasonic affecting physical, mechanical and gas-dynamic properties of coal standard of different degree of danger of rock outbid rust, gasings and taking into account the change of the tense state. Conformity to law of effective frequencies of affecting is set coal depending on the sizes of imperfect structures in it.

В последнее время считается, что одним из достаточно эффективных способов управления газодинамической активностью угольного массива является волновое воздействие на пласт. Существуют методики воздействия волновыми полями разной природы как на макроуровне [1 -6], так и микро, например на микроструктуру угольного вещества [7 -10]. Вместе с этим, нет однозначного мнения по оценке эффективности применения виброволнового воздействия с учетом изменения частотного режима, в частности, использования высокочастотного, например, каким является ультразвуковое воздействие (УЗВ). Поэтому в данной статье автор попытался обобщить имеющиеся в литературе [1 -16] данные и проанализировать результаты проведенных экспериментов. В частности, предполагается рассмотреть результаты исследований по оценке влияния УЗВ на физико-механические и газодинамические свойства угольного образца различной степени выбросоопасности, газонасыщения и с учетом изменения напряженного состояния, которые рассмотрим ниже.

Влияние УЗВ на разрушение не газонасыщенного угольного образца в воздушной среде. В ИГТМ НАН Украины совместно с МакНИИ для оценки характера разрушения образцов угля при УЗВ во времени провели эксперимент по следующей методике. Подготавливались 3 образца размером 50×50×50 мм, которые предварительно взвешивались, а каждый испытываемый образец помещался под ультразвуковой генератор диспергатора с резонансной частотой 15 кГц, при мощности – 400 Вт. Рабочая поверхность диспергатора прижималась к образцу с усилием в 10 кг. Взвешивание при УЗВ осуществлялось через каждую минуту [7, 11]. По формулам вычислялось относительное изменение массы угольного образца и скорости его разрушения вычислялось по форму-

лам:  $\varphi = \frac{\Delta m}{m}, \%$ ,  $v = \frac{\varphi}{\tau}$ , где  $\Delta m$  - масса разрушенной части образца;  $m$  - первоначальная масса образца;  $\tau$  - время воздействия ультразвука на угольный образец. Результаты эксперимента представлены на рис. 1.

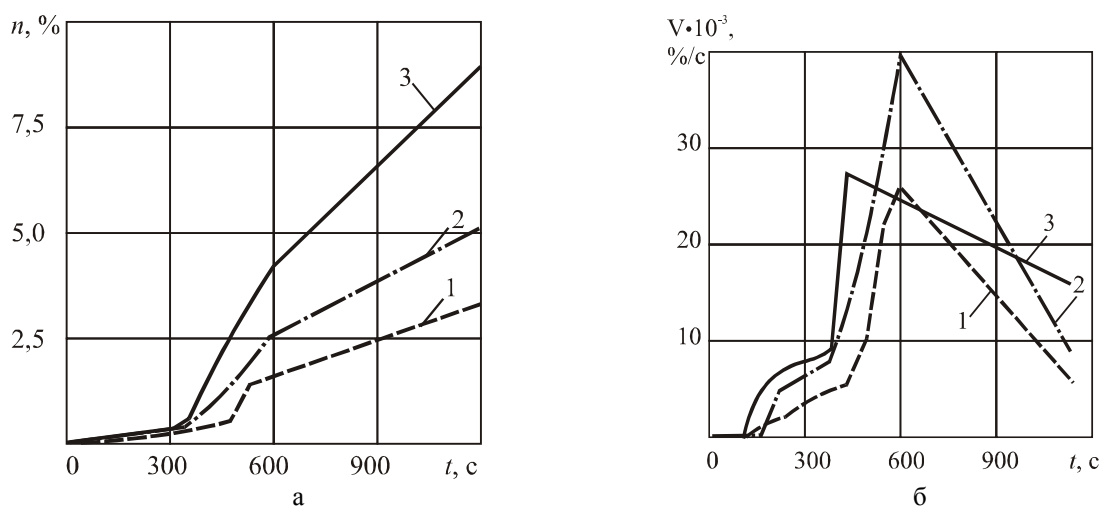


Рис. 1 - Разрушение в воздушной среде ненапряженных угольных образцов во времени: а - степень разрушения; б - скорость разрушения; 1, 2, 3 - соответственно, разрушение образцов 1, 2 и 3

Анализ полученных результатов показывает, что разрушение угольных образцов при УЗВ в течение 5-8 мин практически не наблюдается. При дальнейшем УЗВ на образец степень разрушения угля возрастает, в то же время скорость разрушения при УЗВ возрастает в начальный период (первые 6-10 минут), а затем начинает уменьшаться.

Оценка влияния газонасыщения угольного образца на параметры его разрушения при УЗВ. Методика проведения исследований заключалась в следующем. Образцы угля в виде призм с размерами  $40 \times 35 \times 35$  мм помещались камеру стенда, представляющую собой толстостенный, герметически закрывающийся цилиндр (шахтная стойка) с внутренним объемом  $238,8 \text{ см}^3$ , таким образом, чтобы направление излучения было параллельно напластованию, а постоянный контакт излучателя с образцом осуществлялся с постоянной силой. Камера имела отверстия для подачи газа и излучателя диспергатора.

В первой серии эксперименты предусматривалось, что камеру с угольным образцом, предварительно взвешенным и измеренным, герметически закрывали и в нее закачивали газ (углекислый или азот). Давление в камере поддерживалось равным  $1,6 \text{ МПа}$  в течение 1 часа. Затем в камере сбрасывалось давление газа и осуществлялось УЗВ на уголь в течение 3 минут с частотой  $15 \text{ кГц}$ . После УЗВ камера разгерметизировалась и образец выдерживался в воздушной среде и повторно взвешивался. Эксперименты второй серии проводились аналогичным образом, но в камеру перед ее герметизацией заполняли водой. Результаты проведенных экспериментов представлены на рис. 2.

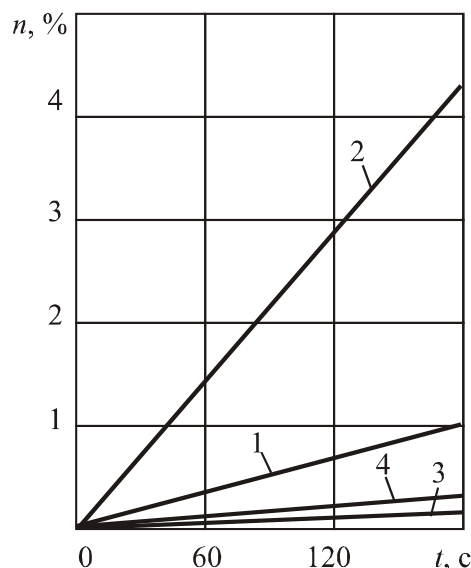


Рис. 2 - Воздействие активного газа на степень разрушения угля при УЗВ в различных средах: 1 – азот; 2 – углекислый газ; 3 – азот + вода; 4 – углекислый газ + вода

Анализ показал, что в первой серии экспериментов степень и скорость разрушения образцов, насыщенных углекислым газом, в 4 раза выше, чем образцов, насыщенных азотом - причем образцы, насыщенные углекислым газом в ходе эксперимента раскалывались на крупные куски. Во второй серии - наличие воды привело к понижению степени и скорости разрушения, но, тем не менее, эти показатели для образцов, насыщенных углекислым газом - в 1,5 раза выше, чем для угольных образцов, насыщенных азотом.

Влияние УЗВ на угольный образец, размещенный в жидкости. Наблюдения за разрушением угля осуществлялись в эксперименте с изменением расстояние между излучателем ультразвука и образцом, размещенным в воде. Разрушение угольного образца осуществлялось с помощью ультразвукового диспергатора типа УЗДН-1, настроенного на резонанс - 15 кГц, Угольный образец, предварительно взвешенный, помещался в сосуд с водой и подвергался УЗВ в течение 300 с через промежуточный слой воды, толщиной от 0 до 10 мм. Затем образец опять взвешивался и определялось изменение его массы. В результате УЗВ на уголь наблюдались незначительные изменения образца, но при этом вода оставалась прозрачной.

Далее УЗВ источник ультразвука (концентратор с волноводом) под действием силы тяжести прижимался, к обрабатываемому образцу, и в течение 300 с происходило УЗВ на уголь. При этом наблюдалось помутнение жидкости, в образце образовалось углубление в виде лунки глубиной 6-8 мм в месте контакта угля с излучателем; при этом величина и форма углубления соответствовала размерам концентратора, а степень разрушения угольного образца равнялась 1,26% (см. табл. 1).

Таблица 1 - Разрушение угольных образцов при различных способах УЗВ

| Расстояние между образцом и излучателем | Время УЗВ, с | Изменение веса после опыта, г | Степень разрушения, % | Скорость разрушения, %/сек. | Напряжения в образце, МПа |
|-----------------------------------------|--------------|-------------------------------|-----------------------|-----------------------------|---------------------------|
| контакт                                 | 30 0         | 1,55                          | 1,26                  | 0,00420                     | -                         |
| 2,0                                     | 30 0         | 1,26                          | 0,56                  | 0,00186                     | -                         |
| 5,0                                     | 30 0         | 0,08                          | 0,03                  | 0,00012                     | -                         |
| 10,0                                    | 30 0         | 0                             | 0                     | 0                           | -                         |
| контакт                                 | 30 0         | 1,20                          | 1,74                  | 0,0058                      | 4                         |
| 2,0                                     | 30 0         | 0,90                          | 1,30                  | 0,0043                      | 4                         |
| 5,0                                     | 30 0         | 0                             | 0                     | 0                           | 4                         |
| 10,0                                    | 30 0         | 0                             | 0                     | 0                           | 4                         |
| Контакт                                 | 30 0         | 1,51                          | 1,818                 | 0,0061                      | 8                         |
| 2,0                                     | 30 0         | 1,00                          | 1,204                 | 0,0040                      | 8                         |
| 5,0                                     | 30 0         | 0                             | 0                     | 0                           | 8                         |
| 10,0                                    | 30 0         | 0                             | 0                     | 0                           | 8                         |

Следующим этапом было УЗВ на напряженный образец. Как и ранее, расстояние между излучателем и угольным образцом изменялось в пределах 0-10 мм. Время ультразвукового воздействия на образец 300 с, а напряжения в образцах создавались равными 4 и 8 МПа.

При уменьшении расстояния между угольным образцом и излучателем (менее 0,5 мм) наблюдается помутнение воды; при непосредственном контакте угля с концентратором появляется лунка глубиной 8-10 мм. Результаты полученных данных приведены в виде графика на рис. 3.

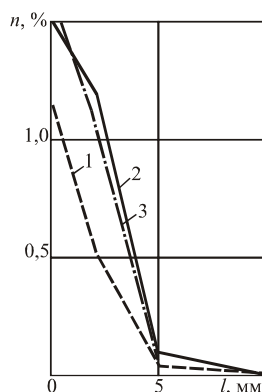


Рис. 3 - Степень разрушения угольных образцов УЗВ при различном расстоянии между излучателем и образцом и разных величинах напряжений в образце: 1 – ненагруженные образцы; 2 – напряжения в образце 4 МПа; 3 – напряжения в образце 8 МПа

Экспериментальные данные показывают, что при обеспечении надежного контакта независимо от состояния образца (напряженный или не нагруженный), интенсивность УЗВ ослабевает с увеличением расстояния от излучателя, при контактном способе достигается более полная передача ультразвуковой энергии угольному образцу.

Влияние УЗВ на напряженные угольные образцы при двухосном сжатии. Изучение УЗВ на угольные образцы при изменении, напряженного состояния в них во времени осуществлялось с помощью установки УЗДН-1 на частоте

15 кГц. Угольные образцы в виде кубиков со стороной 42 мм помещались в специальное обжимное устройство, позволяющее создавать двухосное напряженное состояние с помощью прессы ПСУ-50. Площадь контакта образца с каждой из половин обжимного устройства равнялась 30,9 см<sup>2</sup>. УЗВ осуществлялось параллельно напластованию угля, а излучатель прижимался к образцу с усилием 10 кг. Образец при УЗВ размещался в различных средах (воздух, вода и антраценовое масло). В процессе эксперимента определялась масса разрушенной части образца и скорость разрушения, а также относительная величина, характеризующая степень разрушения в процентах. Всего было проведено четыре серии экспериментов с различными средами, в которые помещался испытываемый образец.

В первой серии экспериментов угольные образцы нагруженные усилиями 3 – 6 т подвергались УЗВ различной продолжительностью. Результаты оценки степени разрушения и вычисленные значения скорости разрушения сведены в табл. 2 и приведены на рис. 4.

Таблица 2 - Разрушение угольных образцов УЗВ при двухосном сжатии

| Шифр пробы | Нагрузка, кгс | Напряжение, кг/см <sup>2</sup> | Время, с. | Степень Ния, % | Скорость разрушения, %/с |
|------------|---------------|--------------------------------|-----------|----------------|--------------------------|
| 1          | 3000          | 85,7                           | 60        | -              | -                        |
| 2          | 3400          | 97,0                           | 330       | 1,9            | 0,0057                   |
| 3          | 3600          | 102,0                          | 60        | 6,9            | 0,115                    |
| 4          | 3800          | 108,6                          | 30        | 12,736         | 0,4245                   |
| 5          | 4000          | 114,0                          | 30        | 14,568         | 0,4856                   |
| 6          | 5000          | 144,5                          | 17        | разрушение     | 5,882                    |
| 7          | 6000          | 170,0                          | 60        | 37,293         | 0,025                    |
| 8          | 6000          | 170,0                          | 60        | 37,38          | 0,623                    |

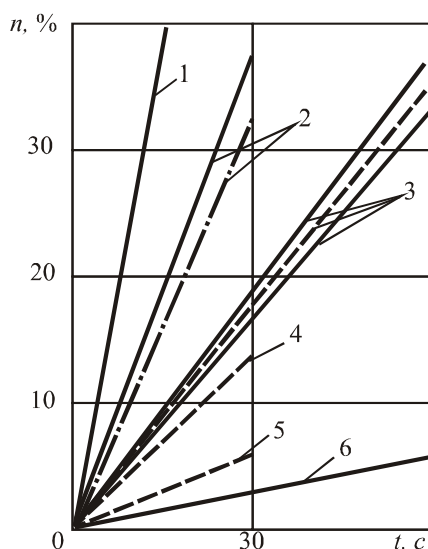


Рис. 4 - Разрушение угольных образцов УЗВ при двухосном сжатии: 1 – 14 МПа; 2 – 11 МПа; 3 – 9,7 МПа; 4 – 10 МПа; 5 – 9 МПа; 6 – 10 МПа

Во второй серии экспериментов при УЗВ в каждом опыте последовательно создавались напряжения, соответствующие нагрузке 0; 1; 2; 3; 4 и 4,6 т. Полу-

ченные результаты приведены на рис. 5.

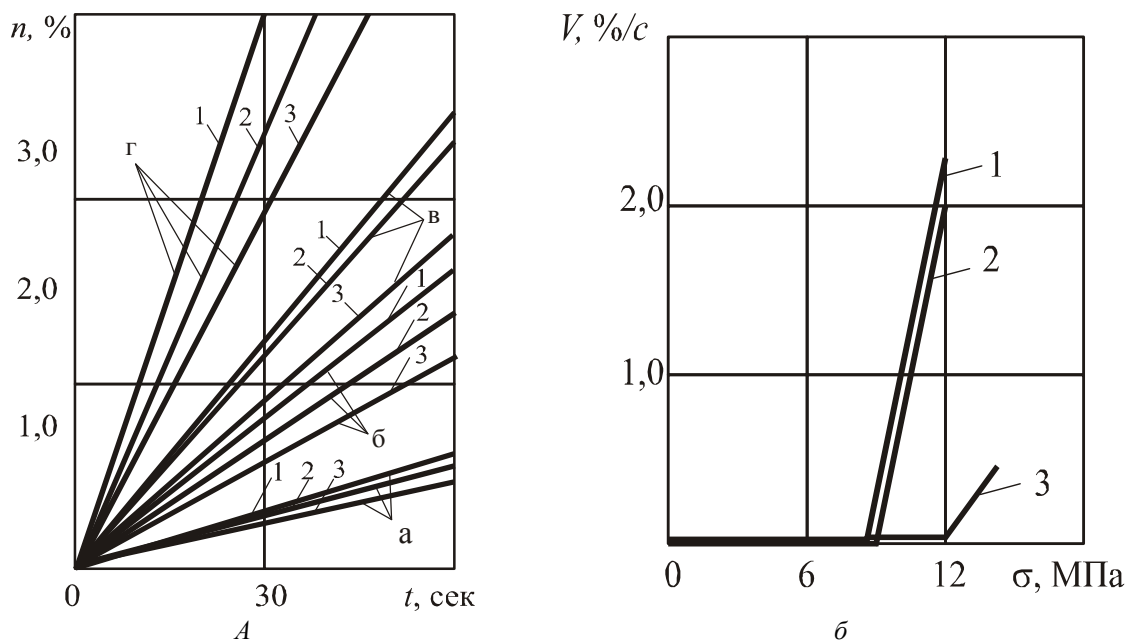


Рис. 5 - Степень (а) и скорость разрушения угольных образцов (б) УЗВ при двухосном сжатии и последовательным увеличением напряжений: а – без нагрузки; б – 2,9 МПа; в – 5,9 МПа; г – 8,8 МПа; 1,2,3 – соответственно, образцы 1,2,3

Графики полученных усредненных значений степени разрушения и скорости разрушения при этих опытах изображены на рис. 6.

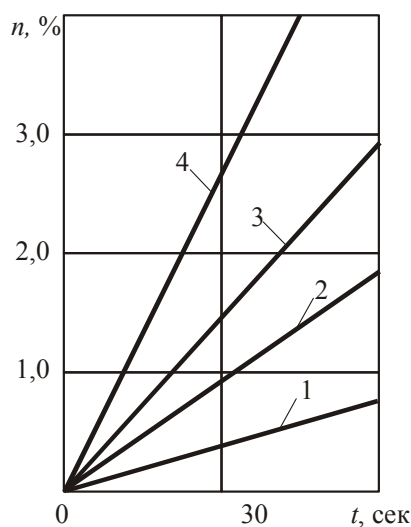


Рис. 6 - Средние значения степени разрушения угольных образцов УЗВ при двухосном сжатии и последовательным увеличением напряжений: 1 – без нагрузки; 2– 2,9 МПа; 3 – 5,9 МПа; 4 – 8,8 МПа

Усредненные значения степени разрушения угольного образца, изображенные на рис. 6 показывают, что с ростом напряжений в образце степень разрушения угля под действием ультразвука возрастает. Так, скорость разрушения при напряжениях (0,8-0,9)  $\sigma_{сж}$  на четыре порядка выше скорости разрушения не нагруженных образцов. Также по результатам опытов можно сделать вывод об энергозатратах на разрушение напряженных и ненапряженных угольных об-

разцов. Аналогичные серии экспериментов были проведены в водной среде и антраценовом масле. Результаты этих экспериментов приведены в табл. 3.

Таблица 3 - Ультразвуковое разрушение угольных образцов при двухосном сжатии в водной среде и в антраценовом масле

| Нагрузка, кгс        | Напряже-<br>ние, МПа | Время, с | Величина<br>разрушен-<br>ной части | Степень<br>разрушения,<br>% | Скорость раз-<br>рушения, %/с |
|----------------------|----------------------|----------|------------------------------------|-----------------------------|-------------------------------|
| в водной среде       |                      |          |                                    |                             |                               |
| 2000                 | 5,9                  | 35       | Полное разрушение                  |                             | 2,857                         |
| 2400                 | 9,63                 | 15       | Полное разрушение                  |                             | 6,666                         |
| 4000                 | 11,81                | 35       | Полное разрушение                  |                             | 2,857                         |
| 4000                 | 11,81                | 25       | 35,99                              | 34,667                      | 1,386                         |
| 5600                 | 16,54                | 20,5     | 27,63                              | 27,011                      | 1,317                         |
| 5600                 | 16,54                | 16,2     | 42,47                              | 41,00                       | 2,530                         |
| 5600                 | 16,90                | 17,3     | 41,83                              | 38,468                      | 2,236                         |
| 4000                 | 11,34                | 150      | -                                  | -                           | -                             |
| 6000                 | 17,0                 | 15       | Полное разрушение                  |                             | -                             |
| 4000                 | 11,81                | 150      | 9,9489                             | 9,631                       | 0,128                         |
| 5600                 | 16,54                | 75       | Полное разрушение                  |                             | 1,200                         |
| в антраценовом масле |                      |          |                                    |                             |                               |
| 4000                 | 12,07                | 100      |                                    | 6,1                         | 0,061                         |
| 5600                 | 16,91                | 97       | Полное разрушение                  |                             | 0,979                         |
| 4000                 | 11,81                | 120      |                                    | 12,0                        | 0,100                         |
| 5600                 | 16,54                | 90       | Полное разрушение                  |                             | 0,978                         |
| 5600                 | 16,54                | 54       | Полное разрушение                  |                             | 1,852                         |

Как видно из таблицы 3, скорость разрушения угольного образца в воде при критических нагрузках на порядок меньше, чем соответствующее значение скорости разрушения в воздухе, а в антраценовом же масле скорость разрушения меньше, чем в воде.

Влияние УЗВ на напряженные угольные образцы, находящиеся в сложнапряженном состоянии. Изучение влияния УЗВ на уголь, находящийся в сложнапряженном состоянии, осуществлялось в ИГТМ НАН Украины, а также в НГУ и МакНИИ на специальных стендах [7, 12, 13]. В них угольный образец в виде призмы с размерами 50×50×80 мм помещался в камеру стенда, а незаполненное пространство камеры заливалось бетоном. После высушивания образца открывалась съемная грань камеры и определялась скорость разрушения угольного образца (мм<sup>3</sup>/с). УЗВ в образце осуществлялось установкой УЗДН-1, а нагрузку на образец создавали на прессе ПСУ-250. В процессе проведения эксперимента при напряжении 6,2 МПа, частоте 22 кГц и прижимном усилии диспергатора к поверхности угля, равным 5 кг, происходило незначительное отшелушивание «чешуек» угля от поверхности образца.

При частоте 15 кГц (резонансная) для данного диспергатора (УЗДН-1), наблюдалось более интенсивное разрушение угольного образца под рабочей поверхностью излучателя. Так, в угольном образце по всей его длине образовывался канал, диаметром, соответствующим диаметру «пятак» излучателя. После этого, диспергатор вынимался из образовавшейся полости, выдерживалось напряжение 6,2 МПа в течение одной минуты - разрушение в этом случае не наблюдалось. Затем рабочая поверхность диспергатора приводилась в соприкосновение с угольным образцом, при этом наблюдался процесс интенсивного разрушения угля по всему его объему.

По аналогичной методике были проведены эксперименты с шестью образцами при напряжении до 12,5 МПа. Результаты по оценке скорости разрушения угольных образцов при УЗВ приведены в таблице 4 и сведены в виде графиков на рис. 7.

Таблица 4 - Разрушение угольных образцов УЗВ в сложнапряженном состоянии

| Частота кГц | Сила Тока, | Нагрузка, т | Напряжение, МПа | Время разрушения, с | Глубина проникновения излуч. в образец, мм | Скорость разрушения, мм <sup>3</sup> /с | Образец разрушился на фракции, мм |
|-------------|------------|-------------|-----------------|---------------------|--------------------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------|
| 22          | 0,54       | 10          | 4,4             | 180                 | 3                                          | 0,016                                   | мелкодисперсная пыль              |
| 15          | 0,54       | 10          | 4,4             | 180                 | 5                                          | 0,027                                   | —,—                               |
| 15          | 0,56       | 12          | 5,3             | 60                  | 15                                         | 0,44                                    | 0,2-0,5                           |
| 15          | 0,56       | 12          | 5,3             | 60                  | 18                                         | 0,53                                    | —,—                               |
| 15          | 0,56       | 12          | 5,3             | 60                  | 21                                         | 0,61                                    | —,—                               |
| 15          | 0,54       | 14          | 6,2             | 60                  | 50                                         | 0,83                                    | 0,5-0,8                           |
| 15          | 0,54       | 22          | 9,7             | 30                  | 50                                         | 1,66                                    | 0,8-1,2                           |
| 5           | 0,54       | 28          | 12,5            | 15                  | 50                                         | 3,33                                    | 1,0-1,5                           |

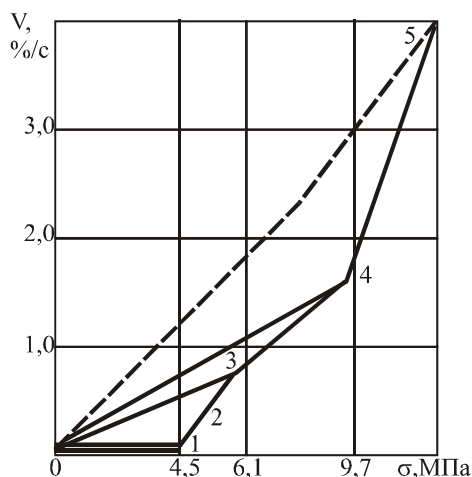


Рис. 7 - Разрушение угольных образцов УЗВ, находящихся в сложнапряженном состоянии: 1 – 4,5 МПа и 22 кГц; 2 – 4,5 МПа и 15 кГц; 3 – 6,2 МПа и 15 кГц; 4 – 9,8 МПа и 15 кГц; 5 – 12,5 МПа и 15 кГц

Анализ полученных данных показывает, что при увеличении нагрузки скорость разрушения возрастает, достигая максимального значения при нагрузке



12,5 МПа. Результаты показывают, что при изменении напряжения от 0 до 4,5 МПа практически не наблюдается продвижение диспергатора вглубь угольного вещества, хотя визуально можно заметить незначительное отделение пылеобразных частиц, а начиная с величины напряжения 4,5 МПа скорость разрушения угля резко возрастает.

Таким образом, результаты проведенных экспериментов позволяют сделать предварительное заключение о том, что при напряжениях в образце, возникающих при нагрузке до 10 т (менее 4,5 МПа), использование УЗВ для разрушения угольного образца сопряжено с большими энергозатратами. Скорость разрушения угольного образца резко возрастает при напряжениях, превышающих 4,5 МПа, и увеличивается на 3-4 порядка при напряжении в угле 12,5 МПа.

Оценка влияния мощного УЗВ на разрушаемость угля. Стендовые эксперименты по оценке влияния мощного УЗВ на уголь были проведены в ИПП НАН Украины на установке УРС-10 С, блок-схема и методика исследований которой описана в работе [14]. При экспериментах УЗВ осуществлялось на частоте близкой к резонансной для установки УРС-10 С (7,8 кГц). УЗВ передавалось на угольный образец наконечником излучателя диаметром 21 мм. При эксперименте излучатель УЗВ устанавливался на резонансный режим, амплитуда воздействия постепенно увеличивалась, доводя образец до разрушения и развала на частицы. Образцы в виде «балочек» длиной 100 мм и поперечным сечением  $930 \text{ мм}^2$ , изготавливались из угля отобранного на пласте  $h_7$  "Смоляниновский" шахты им. А.А. Скочинского.

Наблюдения за поведением напряженного угля при УЗВ показали, что разрушение зависит от статической нагрузки и амплитуды колебаний. Так, интенсивное разрушение угольных образцов происходит, в основном, в резонансном режиме. Амплитуда колебаний УЗВ, приводящая к разрушению угля, равнялась  $(3-35) \times 10^{-6} \text{ м}$ .

Локальное разрушение угля, происходящее при статическом сжатии нагрузками, составляющими порядка 50% от предельных. При повышении статических нагрузок до 80-90% от предельных, интенсивность и объем разрушения увеличиваются вплоть до полного разрушения. Установленные при экспериментах численные значения параметров разрушения угля УЗВ приведены в работах [7, 12].

Анализ результатов экспериментов [7] показывает, что с увеличением статической нагрузки, удельная энергия УЗВ, затраченная на разрушение угля, уменьшается примерно на порядок. Причем, при одной и той же частоте, резонансной для излучателя и образца, при одинаковой статической нагрузке удельная энергия колебаний значительно изменяется с изменением амплитуды колебаний. Чем меньше амплитуда, тем меньше удельная энергия разрушения. Так, при наименьшей зарегистрированной при эксперименте амплитуде, равной 3,12 мкм, затраты удельной энергии составляют  $(0,02-0,06) \times 10^7 \text{ Дж/м}^3$ , а при наибольшей приложенной к угольному образцу амплитуде (21,84 мкм) удельная энергия разрушения уже составляет  $3,85 \times 10^7 \text{ Дж/м}^3$ .

Таким образом, условия и характер разрушения угля УЗВ зависят от условий контакта излучателя с углем, напряженного состояния и возможности отраже-

ния волн. Интенсивность разрушения увеличивается на один-два порядка при статическом сжатии до 80-90% от предельных нагрузок.

О возможных параметрах процессов, происходящих при УЗВ. Одним из основных параметров, определяющих целесообразность применения УЗВ для разрушения угля является удельная энергия разрушения. Для сравнительной характеристики энергозатрат на разрушение произведен расчет удельной энергии при разрушении угля различными способами. Так, по методике, изложенной в работе [15], сравнивалась энергия, выделяемая при сгорании единицы объема ( $1\text{ м}^3$ ) угля с удельными энергиями, необходимыми для разрушения  $1\text{ м}^3$  при комбайновой добыче и ультразвуковом разрушении. Теплота сгорания угля равнялась  $\sim 6000 \text{ ккал/кг} = 3,1 \times 10^8 \text{ Дж/м}^3$  при плотности угля  $1,3 \times 10^3 \text{ кг/см}^3$ . Удельные энергозатраты на разрушение угля при комбайновой добыче составляют  $\sim (1,08-3,6) \times 10^6 \text{ Дж/м}^3$ . Средние удельные энергозатраты при ультразвуковом способе разрушения ненапряженного угля составляют  $\sim 1,62 \times 10^{11} \text{ Дж/м}^3$ . Сравнение указанных величин показывает, что энергозатраты при разрушении ненапряженного угля на три порядка выше, чем энергия, полученная при его сжигании, что свидетельствует о том, что использование ультразвука для целей разрушения ненапряженного угля нецелесообразно. Для угля, находящегося в сложнапряженном состоянии (при  $\sigma = 0,8-0,9 \sigma_{разр}$ ) удельные энергозатраты на разрушение на 3-4 порядка меньше и сравнимы с удельной теплотой сгорания. Т.е., в принципе, возможно понижение удельных энергозатрат до величин, сравнимых с удельными энергозатратами при механическом способе разрушения.

В ходе экспериментов было установлено, что наиболее эффективная частота для разрушения угля - резонансная для излучателя, при которой плотность энергии максимальна и равна  $50 \text{ Вт/см}^2$ . Изучение действия предварительного газонасыщения инертным и активным газом под давлением  $1,6 \text{ МПа}$  показало, что удельная энергия разрушения угля насыщенного  $\text{CO}_2$  в среднем в 2,7 раза меньше, чем для угля, насыщенного  $\text{N}_2$ .

Оценка влияния УЗВ на десорбционные процессы в угольном веществе. Проведенные исследования [5- 8] показывают, что УЗВ приводит к ускорению диффузионных процессов и десорбции газов в угольном веществе. В ИГД им. А.А. Скочинского были проведены исследования влияния УЗВ на газонасыщенные и неgasонасыщенные образцы угля [6]. В сосуд высокого давления помещали угольный образец. Ультразвуковые колебания создавались магнитострикционным преобразователем ПМС-6-22 с резонансной частотой  $22 \text{ кГц}$

Насыщение образцов велось под давлением от  $0,1$  до  $1 \text{ МПа}$  углекислым газом в течение 2-3 суток до установления адсорбционного равновесия. После насыщения образцов включали генератор ультразвуковых колебаний, газ из сосуда выпускали в большую емкость. Давление в системе измеряли при помощи ртутного или водяного манометра. Результаты экспериментов приведены на рис. 8. На рис. 8 представлены кривые, показывающие изменение давления в сосуде при УЗВ и без него на образцы угля в течение одного и того же промежутка времени.

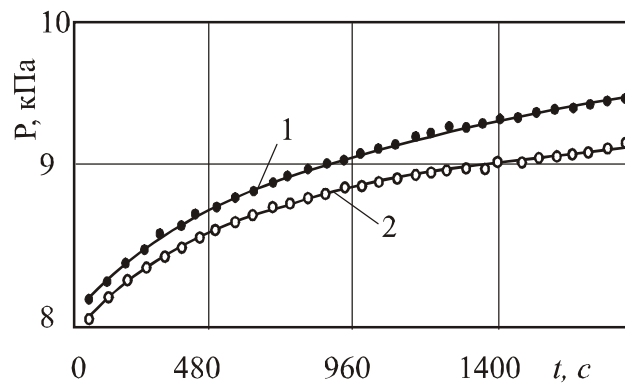


Рис. 8 - Газовыделение из угля при УЗВ: 1- с УЗВ; 2 – без УЗВ

Исследования влияния УЗВ на изменение состояния и свойств, образцов угля оценивали по величине скорости звука, измеряемой прибором ДУК-20, до и после УЗВ. Результаты изменений скорости приведены в табл. 5.

Таблица 5 - Скорость звука в выбросоопасных и невыбросоопасных углях

| Скорость до УЗВ, м/с  | Скорость после УЗВ, м/с | Скорость до УЗВ, м/с    | Скорость после УЗВ, м/с |
|-----------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| выбросоопасные пласты |                         | невыбросоопасные пласты |                         |
| 1000                  | 1091                    | 2060                    | 2260                    |
| 1085                  | 1287                    | 1410                    | 1560                    |

Скорость звука в угольных образцах, не подвергнутых УЗВ во время выпуска газа, через некоторый промежуток времени восстанавливается до 70 % от первоначальной величины. В тех же образцах при УЗВ скорость звуковых волн не меняется

В ИГТМ НАН Украины было показано [8, 10], что при энергетической подпитке угольного вещества посредством волнового воздействия, например, вибрационного, в нем (веществе) происходят конформационные перестройки, сопровождающимися периодическим изменением межслоевого расстояния между графитоподобными слоями и, соответственно, существенно интенсифицирующими процесс десорбции и последующей диффузии газа в угле. Причем диапазон частот воздействия на уголь, приводящий к описанному эффекту, чрезвычайно широк, и составляет десяти порядков. Поэтому авторами работы [8] были выделены частоты, удовлетворяющие условию эффективности, с точки зрения достижения максимума энергии активации конформационных переходов в структуре угольного вещества при минимальном поглощении виброэнергии и, конечно, доступности средств воздействия. Эти установленные диапазоны частот с соответствующим уровнем поглощения приведены на графике (рис. 9).

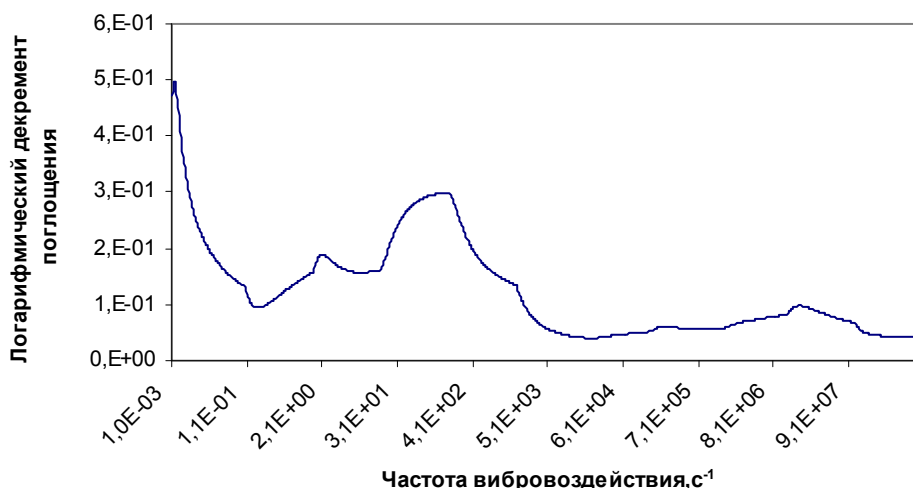
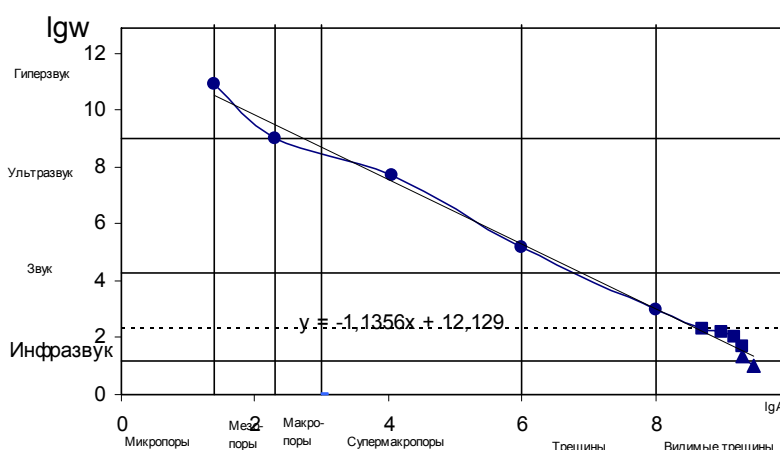


Рис. 9 - Зависимость логарифмического декремента поглощения от частоты вибровоздействия для модели угля с содержанием углерода 87,70%.

Как видно, на кривой (рис. 9) имеются несколько пиков, свидетельствующих о наличии диапазонов частот, на которых происходит поглощение упругих волн. Значения величин частот для угольного вещества приведены в работе [10].

Анализируя исследования, проведенные в рассматриваемой области, следует отметить, что в последнее время существуют, в основном, четыре теоретических подхода к расчету параметров вибровоздействия для интенсификации газотдачи угленосного массива. Нами был построен соответствующий график зависимостей эффективной частоты волнового воздействия ( $W$ ) в зависимости от размеров дефектных структур ( $A$ ) угленосного массива, где совмещены в основном результаты по В.А. Бобину [16]; данные по модели ИГТМ НАН Украины [1, 2], и результаты расчетов, приведенные в работе М.В. Курлени [17]. Такой график приведен на рис. 10.



● — результаты по Бобину; ■ — результаты по модели ИГТМ НАН Украины;  
▲ — результаты по Курлене

Рис. 10 - График зависимости эффективной частоты волнового воздействия ( $W$ ) в зависимости от размеров дефектных структур ( $A$ ) угленосного массива

Подход ИГТМ НАН Украины и Курлени М.В. – основываются на феноме-

нологическом моделировании процесса вибровоздействия в углепородном массиве, два других, так или иначе, предполагают учет микроскопических эффектов. При этом, если подход Бобина В.А. напрямую учитывает микроструктурные параметры угля и газа, то в подходе Белоненко В.Н. [5], сделана попытка лишь объяснить экспериментальные данные квантово-механическими эффектами. Изложенные подходы дополняют друг друга при оценке эффектов вибропоследствия в сложной иерархической структуре многофазной угольной среды и являются одинаково значимыми. При этом феноменологическая модель ИГТМ НАН Украины наиболее разработана в теоретическом плане, в то время как другие теоретические модели, позволяющие осуществлять расчет эффективных параметров для интенсификации газоотдачи микропористого пространства угля, имеют ряд существенных упрощений указанных выше, и, кроме того, они разработаны в недостаточной степени для применения их на практике.

Выполненное обобщение результатов исследований позволило сделать следующие выводы:

1. УЗВ на образцы угля при определенных условиях приводит к интенсификации десорбционных процессов в угле. Последнее, обусловлено тем, что вибрационное воздействие на угольный пласт, посредством индукционирования релаксационных процессов в молекулярной структуре угольного вещества, позволяет достигать энергетических барьеров активации конформационных переходов в структуре угля, за счет чего увеличивается расстояние между графитоподобными слоями в 1,5-4 раза и повышается коэффициент твердотельной диффузии молекул метана в межпоровом пространстве угольного вещества, что позволяет осуществлять эффективную десорбцию газа.

2. Установлена закономерность эффективных частот воздействия на уголь в зависимости от размеров дефектных структур в нем.

УЗВ приводит существенному увеличению скорости звука в угольных образцах. Показано, что скорость разрушения образцов, насыщенных углекислым газом, превосходит те же показатели для образцов, насыщенных азотом.

3. Разрушение угольных образцов в водной среде снижает интенсивность УЗВ с увеличением расстояния от излучателя до угольного образца. Так, при расстояниях 5 мм разрушение не наблюдается в течение 300 секунд.

4. При УЗВ на угольные образцы, находящиеся в двухосно- и сложноподвижном состоянии, скорость разрушения является гиперболической функцией приложенного напряжения.

5. Удельная энергия разрушения ненапряженного угля при УЗВ составляет  $\sim 10^{11}$  Дж/м<sup>3</sup>, что на три порядка выше удельной теплоты, выделяемой при сжигании угля  $\sim 10^8$  Дж/м<sup>3</sup>. Энергозатраты на разрушение угля при напряжениях  $\sigma = (0,8 - 0,9)\sigma_{разр.}$  на три-четыре порядка меньше, чем соответствующие энергозатраты на разрушение ненагруженного угля. Т.е. они сравнимы с удельными энергозатратами при механическом разрушении.

6. При выполнении оценки выбросоопасности десорбметрическим способом УЗВ позволяет ускорить процесс измерений и повысить надежность.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Потураев В.Н., Минеев С.П. Использование вибрационных и волновых эффектов при обработке выбросоопасных пластов.- Киев: Наукова думка, 1993.- 143 с.
2. Потураев В.Н., Минеев С.П. Пульсационные и волновые эффекты в горном массиве. – К.: Наук. думка, 1993.- 143 с.
3. СОУ 10.1.00174088.011-2005 Правила ведения горных работ на пластах, склонных к газодинамическим явлениям. – Киев: Минуглепром Украины, 2005. – 225 с.
4. Докукин А.В. Основные проблемы горной науки.- М.: Недра, 1979.- 383 с.
5. Белоненко В.Н. Пути повышения рентабельности разработки малых месторождений нефти / Н. Белоненко, М.В.Павлов // Нефтепромысловое дело, 2002, №11.- С. 45-48.
6. Снижение выбросоопасности при динамическом воздействии на угольный массив/ Н.Ф.Кусов и др.- М.: Наука, 1985. – 184 с.
7. Минеев С.П. Свойства газонасыщенного угля. – Д.: НГУ, 2009- 220 с.
8. Минеев С.П., Прусова А.А., Корнилов М.Г. Активация десорбции метана в угольных пластах.- Днепропетровск, Вебер, 2007.- 252 с.
9. Алексеев А.Д. Физика угля и горных процессов / А.Д. Алексеев. – К.: Наук. Думка, 2010. -424 с.
10. Корнилов М.Г. Обоснование параметров вибрационного воздействия на микросорбционное пространство угля для эффективной десорбции газа.- Д.: ИГТМ НАН Украины, 2008. – 22 с.
11. Большинский М.И. Теория внезапных выбросов угля, породы и газа. Донецк: ДонТУ, 1993.- 139 с.
12. Роечко И.А., Шарипова С.П. Анализ энергоемкости разрушения угольного пласта физико-механическим способом // Геомеханика управления состоянием напряженного газонасыщенного массива.- К.: Наукова думка, 1985.- С. 26-29.
13. Зорин А.Н., Халимендик Ю.М., Колесников В.Г. Механика разрушения горного массива и использование его энергии при добыче полезных ископаемых.- М.: Недра, 2001.- 413 с.
14. Усталостные испытания на высоких частотах нагружения / Под редакцией В.А. Кузьменко.- Киев: Наукова думка, 1979.- 336 с.
15. Нетрадиционные технологические процессы добычи угля / В.Н. Потураев, С.А. Полуянский, А.Н. Зорин и др. – Киев: Техника, 1986. -117 с.
16. Бобин В.А. Сорбционные процессы в природном угле и его структура, 1987.- 136 с.
17. Курленя М.В. Геомеханика и техносфера / М.В. Курленя. –Новосибирск: Наука, 2004.- 131 с.

**УДК 539.4**

Канд. физ. мат. наук Ю.А. Костандов,  
инж. В.С. Медведев,  
(ТНУ им. В.И. Вернадского)

### **ВЛИЯНИЕ ОРИЕНТАЦИИ НАЧАЛЬНОЙ ТРЕЩИНЫ И КОНТАКТНОГО ТРЕНИЯ НА РАЗРУШЕНИЕ ХРУПКИХ ТЕЛ**

Проведено експериментальне дослідження особливостей руйнування зразків з початковою тріщиною при їх одноосному стискуванні. Встановлена залежність міцності таких зразків, утворення і розвитку магістральних тріщин від орієнтації початкової тріщини відносно навантажуваних граней зразка і величини контактної тертя на них. Запропоновано пояснення цієї залежності.

### **INFLUENCE OF ORIENTATION OF INITIAL CRACK AND CONTACT FRICTION ON FRACTURE OF BRITTLE SOLIDS**

The experimental research of fracture features of specimens with an initial crack at their axial compression is carried out. Dependences of strength such specimens, formation and development of main cracks from orientation of an initial crack relatively specimen bounds, which loaded by the uniaxial compression, and value of contact friction on them is set. The explanation of these dependences is offered.

Из многих научных работ следует, что после образования большого числа малых трещин происходит преимущественное развитие лишь некоторых наиболее опасных трещин, которые легко инициируемы при данных условиях. Та-