

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАВИСИМОСТЕЙ ПАРАМЕТРОВ ВИБРОАКУСТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ОТ УПРУГИХ И ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ ГОРНЫХ ПОРОД И ГЕОКОМПОЗИТНЫХ ОХРАННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

*С.И. Скипочка, Т.А.Паламарчук, В.Н.Сергиенко, Л.В.Прохорец
Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины*

В работе выполнено определение зависимостей параметров виброакустического контроля от упругих и прочностных свойств горных пород и геокомпозитных конструкций на основании результатов теоретических и экспериментальных исследований.

Современная практика подземной разработки полезных ископаемых свидетельствует, что усложнение горно-геологических условий, переход горных работ на большие глубины существенно повышают трудовые и материальные затраты для обеспечения надежной эксплуатации горных выработок. Одной из основных задач повышения эффективности работы горнодобывающей промышленности является концентрация и интенсификация добычи полезных ископаемых. А это, в свою очередь, несет за собой такие отрицательные явления, как повышение горного давления и сдвигание массива, что служит причиной увеличения деформаций породных массивов и крепи выработок, а также возникновения горных ударов и внезапных выбросов угля, породы и газа, самовозгорания полезных ископаемых. Исходя из этого, разработка и внедрение новых методик и технологий оценки и контроля геомеханического состояния, физико-механических свойств массива, а также охранных конструкций горных выработок являются неперенным условием повышения эффективности горнодобывающей промышленности.

При выполнении исследований и диагностике состояния породного массива и системы «охранная конструкция - породный массив» рекомендуются следующие методы: акустические, ультразвуковые, сейсмические, виброакустические, электрометрические и регистрации естественного импульсного электромагнитного излучения массива.

Целью настоящей работы является определение зависимостей параметров виброакустического контроля от упругих и прочностных свойств горных пород и геокомпозитных охранных конструкций. Для достижения поставленной цели сформулированы следующие задачи: теоретическое обоснование виброакустического контроля состояния горных пород и геокомпозитных охранных конструкций; экспериментальные исследования возможности виброакустического метода для оценки прочности геоматериалов.

Развитие деформационных процессов в породном массиве или охранных системах сопровождается формированием балочных конструкций, консолей и плит различных размеров и с различными условиями их защемления [1].

Известно, что наиболее информативными параметрами, характеризующими соударение ударника и кровли, является, с одной стороны, амплитуда и частота колебания кровли, а с другой – ускорение ударника и время соударения.

С целью выявления связи вышеуказанных параметров с прочностными свойствами строительных смесей рассмотрим упругий удар тела шарообразной формы о плиту. Сила, действующая во время контакта шара с поверхностью плиты, согласно уравнению Герца [2,3]

$$F(t) = K\alpha(t)^{\frac{3}{2}}, \quad (1)$$

где t - время; α – расстояние сближения центров двух тел при контакте.

$$K = \frac{4}{3\pi} \sqrt{R} \frac{1}{\delta_1 + \delta_2}, \quad (2)$$

где R – радиус шара;

$$\delta_i = \frac{1 - \nu_i^2}{\pi E_i}, \quad (3)$$

где $i = 1$ для шара, $i = 2$ для исследуемого объекта;

E_i – модуль Юнга материала шара или объекта;

ν_i – коэффициент Пуассона материала шара или объекта.

Зависимость сближения центров двух тел при контакте согласно [3] описывается уравнением

$$\alpha(t) = \alpha_0 \sin\left(\frac{\pi V_0 t}{2,94 \alpha_0}\right), \quad (4)$$

где α_0 – максимальное сближение центров тел; V_0 – относительная скорость тел перед соударением.

$$\alpha_0 = \left(\frac{15\pi (\delta_1 + \delta_2) m V_0^2}{16 \sqrt{R}}\right)^{\frac{2}{5}}, \quad (5)$$

где m – масса шара.

На основании (2) – (5) получим выражение, которое в явном виде отражает форму импульса контактной силы при ударном взаимодействии

$$\begin{cases} F(t) = F_0 \sin^{\frac{3}{2}}\left(\frac{\pi}{\tau} t\right) & 0 \leq t \leq \tau \\ F(t) = 0 & t > \tau \end{cases} \quad (6)$$

где F_0 – максимальное значение контактной силы; τ – длительность соударения.

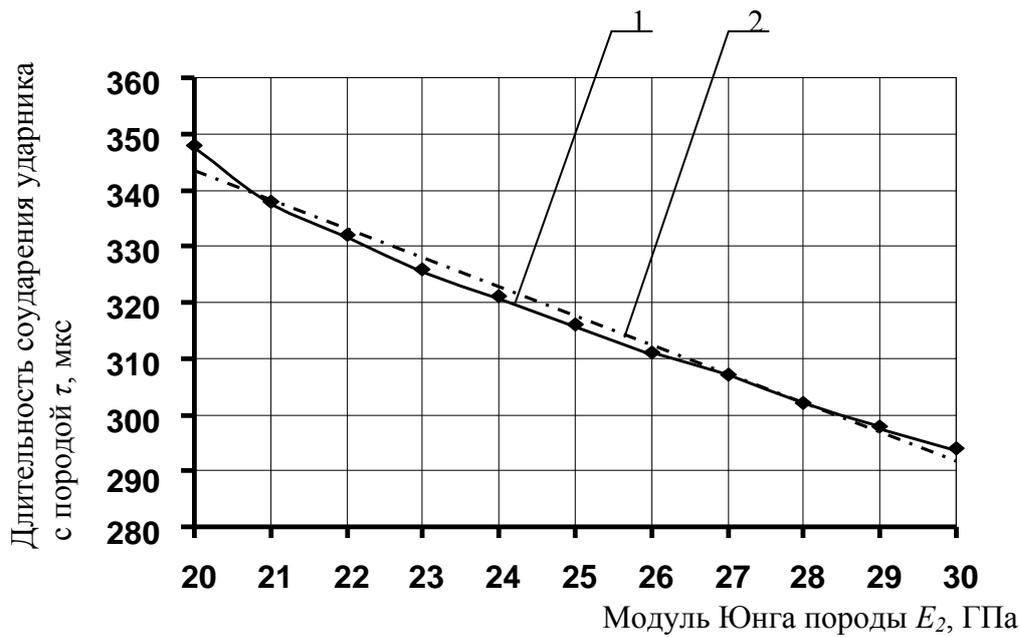
$$F_0 = \left(\frac{125}{36} \frac{R}{(\delta_1 + \delta_2)^2} m^3 V_0^6\right)^{\frac{1}{5}} \quad (7)$$

$$\tau = 4,53 \left(\frac{m(\delta_1 + \delta_2)}{\sqrt{R V_0}}\right)^{\frac{2}{5}} \quad (8)$$

С целью выявления явной зависимости времени соударения от других параметров исследуемой системы подставим в (8) значение δ_2 (3). В результате получим:

$$\tau = 4,53 \left(\frac{m \delta_1}{\sqrt{R V_0}} + \frac{1 - \nu_2^2}{\pi E_2 \sqrt{R V_0}}\right)^{\frac{2}{5}} \quad (9)$$

Графически данная зависимость представлена на рис. 1.



1 - расчетная зависимость, 2 – аппроксимирующая сплайн-функция;
 уравнение аппроксимирующей кривой: $\tau = -5,1636E_2 + 446,64$;
 достоверность аппроксимации 0,9866

Рис.1. Зависимость длительности соударения ударника с породой от модуля Юнга породы

Максимальное давление в зоне контакта шара с плитой описывается формулой: [4]

$$\sigma_0 = \sqrt[3]{\frac{6F_0}{\pi^5(\delta_1 + \delta_2)^2 R^2}}, \quad (10)$$

откуда с учетом (3) получим (рис. 2):

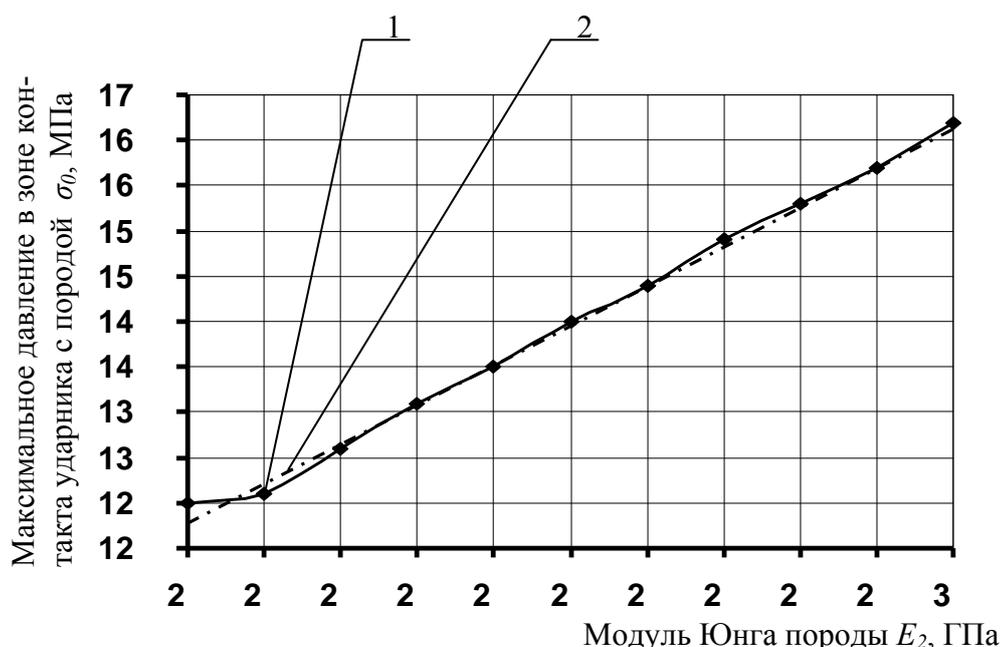
$$\sigma_0 = \left(\frac{30mV_0^2 E_2^4}{R^3(\pi\delta_1 E_2 - v_2^2 + 1)^4 \pi^{\frac{13}{3}}} \right)^{\frac{1}{5}} \quad (11)$$

Максимальное ускорение шара при соударении может быть вычислено на основании второго закона Ньютона

$$a_{\max} = \frac{F_0}{m}, \quad (12)$$

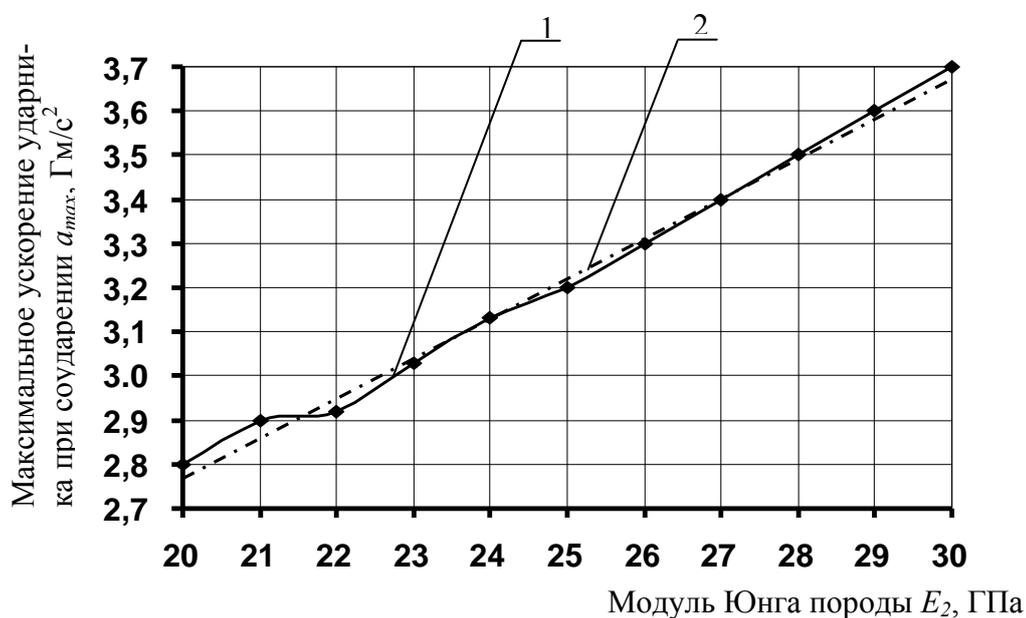
откуда с учетом (3), (7) получим (рис. 3):

$$a_{\max} = \left(\frac{125\pi^2 R E_2^2 \cdot V_0^6}{36(\pi\delta_1 E_2 - v_2^2 + 1)^2 \cdot m^2} \right)^{\frac{1}{5}} \quad (13)$$



1 - расчетная зависимость, 2 – аппроксимирующая сплайн-функция;
уравнение аппроксимирующей кривой: $\sigma_0 = 4,3636E_2 + 35,727$;
достоверность аппроксимации 0,9966

Рис.2. Зависимость максимального давления в зоне контакта ударника с породой от модуля Юнга породы



1 - расчетная зависимость, 2 – аппроксимирующая сплайн-функция;
уравнение аппроксимирующей кривой: $a_{max} = 0,0905E_2 + 0,9641$;
достоверность аппроксимации 0,9944

Рис.3. Зависимость максимального ускорения ударника при соударении с породой от модуля Юнга породы

Чтобы выявить зависимость длительности соударения от прочности материала, воспользуемся соотношением между модулем Юнга и скоростью продольных волн:

$$E = \frac{\rho V_p^2 (1 + \nu)(1 - 2\nu)}{1 - \nu} \quad (14)$$

А для предела прочности на сжатие $\sigma_{сж}$ и скорости продольных волн V_p существует корреляционная зависимость вида [5]:

$$\sigma_{\tilde{n}\tilde{a}\tilde{e}} = AV_p - B, \quad (15)$$

где A, B – экспериментально определяемые коэффициенты корреляции. В частном случае для песчаника [6] $A = 186; B = 245$.

Решая уравнение (15) относительно V_p получим:

$$V_p = p\sigma_{\tilde{n}\tilde{a}\tilde{e}} + q \quad (16)$$

Подставив в (14) выражение для V_p из соотношения (16), получим:

$$E_2 = \rho(p\sigma_{\tilde{n}\tilde{a}\tilde{e}} + q)^2 \frac{(1 + \nu_2)(1 - 2\nu_2)}{(1 - \nu_2)} \quad (17)$$

А теперь, подставляя в уравнения (9), (11) и (13) выражение для E_2 (17), получим соотношения между длительностью соударения, максимальным давлением в зоне контакта ударника с исследуемым объектом, максимальным ускорением ударника при соударении и прочностью обследуемого объекта.

Выражение для зависимости длительности удара от прочности объекта примет вид:

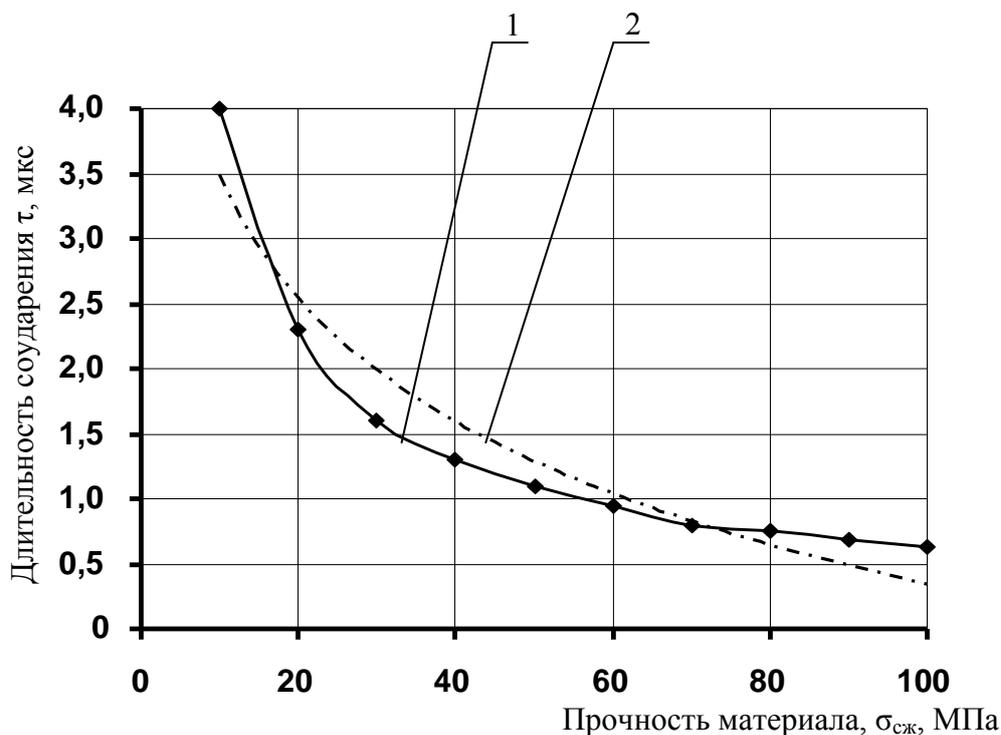
$$\tau = \left(P + \frac{Q}{(p\sigma_{\tilde{n}\tilde{a}\tilde{e}} + q)^2} \right)^{\frac{2}{5}}, \quad (18)$$

где
$$P = \frac{4.53m\delta_1}{\sqrt{RV_0}}; \quad Q = \frac{4.53(1 - \nu_2)^2}{\rho\pi\sqrt{RV_0}(1 - 2\nu_2)}$$

Зависимость длительности соударения от прочности исследуемого материала представлена на рис. 4.

Выражение для зависимости максимального давления в зоне контакта ударника с исследуемым объектом от прочности исследуемого объекта запишется следующим образом:

$$\sigma_0 = \left(\frac{30mV_0^2 (\rho\pi\delta_1 (p\sigma_{\tilde{n}\tilde{a}\tilde{e}} + q)^2 (1 + \nu_2)(1 - 2\nu_2))^4}{R^3 \pi^{\frac{13}{3}} (\rho\pi\delta_1 (p\sigma_{\tilde{n}\tilde{a}\tilde{e}} + q)^2 (1 + \nu_2)(1 - 2\nu_2) + \nu_2^3 - \nu_2^2 - \nu_2 + 1)^4} \right)^{\frac{1}{5}} \quad (19)$$



1 – расчетная зависимость, 2 – аппроксимирующая сплайн-функция;
уравнение аппроксимирующей кривой: $\tau = -1,3684 \ln(\sigma_{сж}) + 6,6299$;
достоверность аппроксимации 0,925

Рис.4. Зависимость длительности соударения ударника с исследуемым материалом от прочности на сжатие материала

Анализ полученного выражения позволяет сделать вывод о слабой зависимости давления ударника в зоне его контакта с исследуемым объектом от прочностных свойств последнего.

Исследование уравнения для оценки зависимости максимального ускорения ударника при соударении от прочности исследуемого объекта также позволило сделать заключение о слабой зависимости этих величин.

С целью проверки достоверности полученных теоретических результатов и дальнейшего развития метода выполнены экспериментальные исследования для экспресс-определения прочностных свойств геоматериалов в условиях неблагоприятной внешней среды с применением датчика, не содержащего подвижных элементов.

На первом этапе экспериментальных исследований определялась зависимость длительности ударного импульса от его амплитуды, пропорциональной силе удара. В качестве эталонной среды было выбрано органическое стекло, характеризующееся высокой однородностью и стабильностью свойств. Остальные исследуемые материалы представлены горными породами.

Результаты исследований показали, что для каждого из исследованных материалов экспериментально полученную зависимость между амплитудой импульса и его длительностью можно разделить на два участка. На первом происходит нелинейное уменьшение длительности импульса с возрастанием силы удара, а на втором длительность стабилизируется. Значение силы удара (амплитуды импульса), при которой начинается стабилизация его длительности, является индивидуальным для каждого из материалов.

Вид упомянутой зависимости для угля представлен на рис. 5. Начало участка стабилизации отмечено треугольником.

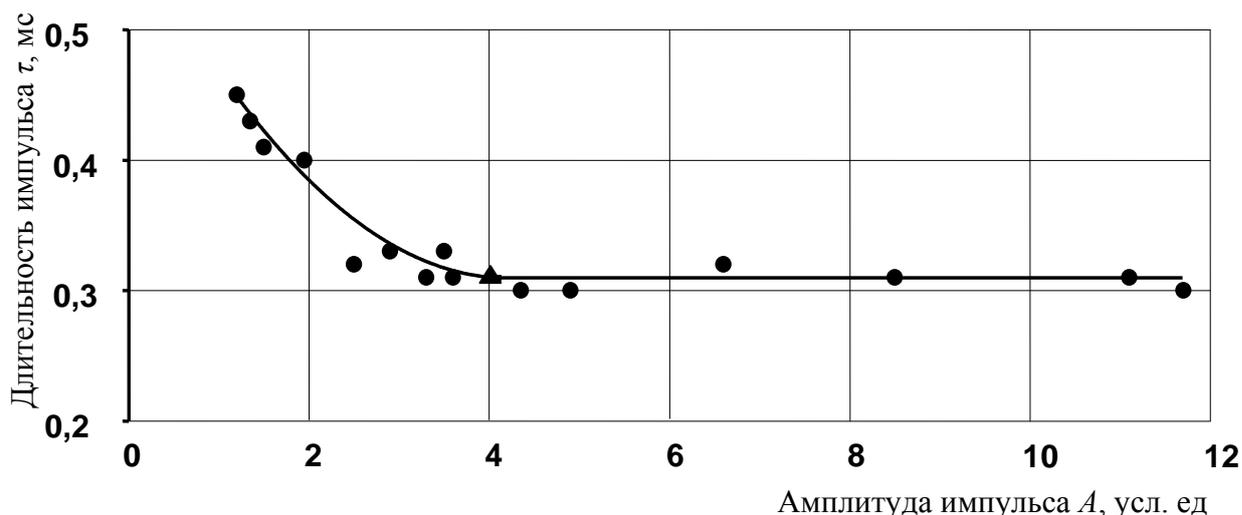


Рис.5. Зависимость длительности ударного импульса от его амплитуды для угля

Обработка результатов измерений позволила установить, что ниспадающий участок зависимости с хорошим приближением описывается квадратичной функцией (табл.1).

Таблица 1

Аппроксимация ниспадающего участка экспериментальных зависимостей длительности импульса от его амплитуды для различных материалов

Исследуемый материал	Уравнение аппроксимирующей кривой ниспадающего участка	Достоверность аппроксимации	Начало стабилизации, усл. ед.
Органическое стекло	$\tau = 0,0016A^2 - 0,0338A + 0,4309$	0,8160	10
Ракушечник	$\tau = 0,0021A^2 - 0,0406A + 0,448$	0,8227	9
Уголь	$\tau = 0,0343A^2 - 0,221A + 0,6688$	0,9208	4
Боксит	$\tau = 0,0008A^2 - 0,0246A + 0,3078$	0,9382	12

На втором этапе экспериментальных исследований была исследована зависимость между пределом прочности материала на одноосное сжатие и длительностью ударного импульса. При этом силу удара выбирали такой, чтобы амплитуда импульса превышала значение, при котором начинается стабилизация длительности удара. В качестве нижнего порогового значения силы удара выбрано такое, которое обеспечивает амплитуду ударного импульса 14 условных единиц.

В соответствии с требованиями ДСТУ БВ.2.7-220:2009 [7] при использовании метода ударного импульса необходима предварительная подготовка контролируемой поверхности. С помощью механического инструмента на площадке с минимальными размерами 50 x 50 мм снимали выветрелый поверхностный слой геоматериала и заглаживали поверхность мелкозернистым абразивом с удалением продуктов шлифования. При лабораторных испытаниях образец зажимали в тисках. Количество испытаний брали таким, чтобы минимальный объем выборки для статистического анализа с учетом предварительно отсеянных данных составлял 10 значений.

Испытания образцов на одноосное сжатие выполняли с использованием пресса ПСУ-50 в соответствии с ГОСТ 21153.2-84 [8]. После обработки результатов по каждой из категорий

геоматериалов получено поле значений, отображающее зависимость «длительность ударного импульса – прочность на одноосное сжатие», и вычислены уравнения регрессии.

Пример зависимости «прочность – длительность ударного импульса» для песчаника представлен на рис. 6.

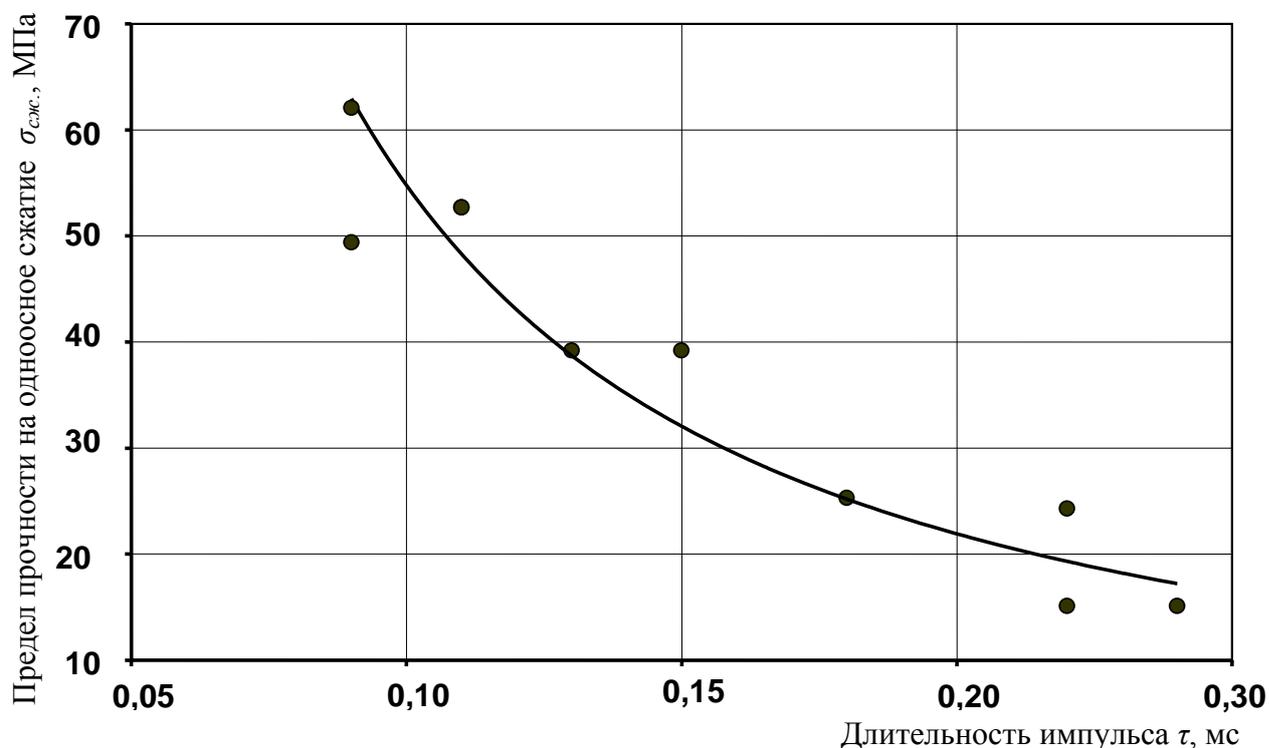


Рис.6. Зависимость между прочностью и длительностью ударного импульса для песчаника

Анализ экспериментальных данных показал, что корреляционная зависимость между длительностью ударного импульса и пределом прочности горной породы на одноосное сжатие удовлетворительно описывается степенной функцией. Соответствующие уравнения регрессии для некоторых горных пород представлены в табл. 2.

Таблица 2

Уравнения регрессии для описания зависимости прочности пород от длительности ударного импульса

Исследуемый геоматериал	Уравнение регрессии	Достоверность аналитической зависимости
гипс	$\sigma_{сж.} = 3,4404\tau^{-1,3402}$	0,8218
уголь	$\sigma_{сж.} = 7,7731\tau^{-1,0605}$	0,8157
песчаник	$\sigma_{сж.} = 2,614\tau^{-1,3213}$	0,8788
алевролит	$\sigma_{сж.} = 0,0375\tau^{-3,8711}$	0,8396

По результатам выполненной работы можно заключить о достаточно хорошей сходимости теоретических и экспериментальных исследований.

Установлено, что длительность ударного импульса нелинейно, по степенному закону уменьшается при возрастании предела прочности на одноосное сжатие геоматериалов, причем параметры указанной зависимости и диапазон ее корректного использования определя-

ются литотипом геоматериала. Таким образом, исследования показали возможность расширения сферы использования метода ударного импульса на геоматериалы. Предложена новая методика оценки прочностных свойств геоматериалов, базирующаяся на использовании ударника, не содержащего взаимно подвижных элементов и предполагающая в качестве информативного параметра длительность ударного импульса. Результаты исследований являются исходными данными для разработки новых средств оперативной оценки прочностных свойств геоматериалов непосредственно на месте залегания.

Список литературы

1. Паламарчук Т. А., Кириченко В. Я., Усаченко Б. М. Элементы механосинергетики породного массива / Т. А. Паламарчук, В. Я. Кириченко, Б. М. Усаченко. – Днепропетровск: ЧП «Лири ЛТД», 2006. – 308 с.
2. Бойко А. В. Разработка средств и методики оперативного контроля кровли горных выработок виброакустическим методом на рудных и нерудных шахтах: дис... канд. техн. наук: 05.15.11 / А. В. Бойко. – Днепропетровск: ИГТМ НАНУ, 1991. - 192 с.
3. Гольдсмит В. Удар / В. Гольдсмит. – М.: Стройиздат, 1965. – 448с.
4. Колоушек В. Динамика строительных конструкций / В. Колоушек [и др.]. – М.: Стройиздат, 1965. – 632с.
5. Методические рекомендации по экспрес-определению упругих и прочностных свойств необработанных образцов горных пород и элементов геокомпозитных конструкций методами неразрушающего контроля: Науч.-практ. пособие / [кол. авт.] – Днепропетровск: Монолит, 2011. – 48 с.
6. Глушко В. Г., Ямщиков В. С., Яланский А. А. Геофизический контроль в шахтах и тоннелях / В. Г. Глушко, В. С. Ямщиков, А. А. Яланский. – М.: Недра, 1987. – 278с.
7. ДСТУ БВ.2.7-220:2009. Будівельні матеріали. Бетони. Визначення міцності механічними методами неруйнівного контролю: Чинний від 2010-09-01. – К.: Мінрегіонбуд України, 2010. – 20 с.
8. ГОСТ 21153.2-84. Породы горные. Методы определения предела прочности при одноосном сжатии: Введен с 1986-07-01. – М.: Изд.-во стандартов, 2001. – 10 с.

АКТУАЛЬНОСТЬ, ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ, МЕТОДИКА И ЭФФЕКТИВНОСТЬ АКУСТИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ В УСЛОВИЯХ УГОЛЬНЫХ ШАХТ УКРАИНЫ

М.С. Дубицкая, Государственное ВУЗ «Национальный горный университет», Украина

Приведены основные методики акустического зондирования для условий подземной разработки полезных ископаемых. Выделены основные особенности применения звуковой геолокации для условий угольных шахт.

Подземная разработка месторождений полезных ископаемых провоцирует техногенное воздействие на весь породный массив, непосредственно от продуктивного интервала и до земной поверхности, и, зачастую, сопровождается осложнениями, в виду того, что уголь на больших глубинах находится в напряженно-деформированном состоянии. Напряжения, главным образом, формируются толщей вышележащих пород и не являются однозначными в пределах угольного пласта. Техногенное воздействие проявляется в перераспределении