

Соотношения подобия при ударном внедрении упругого ударника в хрупкую преграду

В. Д. Андреев

Институт сверхтвёрдых материалов НАН Украины, Киев, Украина

На основе анализа уравнения внедрения и результатов экспериментальных исследований определены коэффициенты преобразования подобия для кинетических параметров ударника (скорость или энергия удара) при геометрическом и энергетическом подобии картины разрушения преграды. Показано, что геометрическое и энергетическое подобие разрушения преграды при внедрении ударника в исследованном диапазоне скоростей удара (до 10 м/с) и глубины внедрения ($h \ll d$) достигается при линейном изменении продольных и поперечных размеров ударника и сохранении при этом неизменной скорости соударения.

Ключевые слова: соотношения подобия, упругий ударник, хрупкая преграда, внедрение, проникание, пробивание.

Постановка задачи. Вопрос о подобии схемы ударник–преграда–разрушение (глубина или объем) возникает при необходимости переноса результатов экспериментов (внедрение, проникание, пробивание и т.п.) для конкретных (эталонных) схем и параметров соударения на аналогичные, но отличающиеся по масштабу системы с целью получения геометрически и энергетически (по энергоёмкости разрушения) подобной картины внедрения (рис. 1).

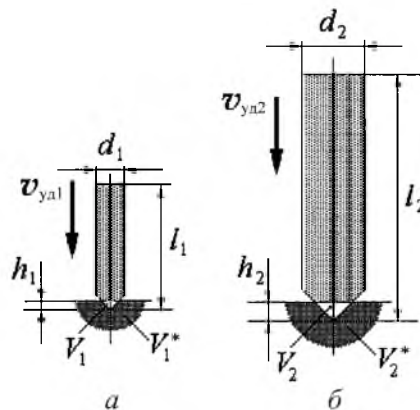


Рис. 1. Схема к постановке задачи о подобии системы внедрения ударника в преграду.

Задача формулируется следующим образом: установить коэффициенты преобразования подобия для кинетических параметров ударника (скорость или энергия удара) при геометрическом и энергетическом подобии картины разрушения преграды в системе ударник–преграда–разрушение.

Основными параметрами эталонной системы являются: 1) параметры линейного ударника (l_0 – длина, d_0 – диаметр, S_0 – площадь поперечного сечения стержня, ρ_0 – плотность, a_0 – скорость звука, $m_0 = (1/4)\pi d_0^2 l_0 \rho_0$ –

масса, $S_{\text{нак}}(h)$ – геометрия наконечника полусферической, конической, клинообразной и т.п. формы); 2) параметры соударения ($v_{\text{уд}}$ – скорость удара, $E_{\text{уд}} = 1/2 m_0 v_{\text{уд}}^2$ – энергия удара, h – глубина внедрения ударника); 3) параметры разрушения (V – объем внедрения ударника в преграду (полупространство), V^* – объем разрушения преграды, $k_{\text{разр}} = V^*/V > 1$ – коэффициент разрушения; E^* – энергия разрушения преграды, определяемая как разность энергии удара $E_{\text{уд}}$ и энергии $E_{\text{отр}} = (S_0/\rho_0 a_0^2) \int \sigma_{\text{отр}}^2(t) dt$ отраженного от преграды импульса напряжения $\sigma_{\text{отр}}(t)$ при внедрении ударника, $k_{\text{к.п.д}} = E^*/E < 1$ – коэффициент использования энергии при разрушении, $q = E^*/V^*$ – энергоемкость разрушения); 4) параметры преграды ($Z(h)$ – эффективный волновой импеданс преграды, обычно выражаемый в единицах волнового импеданса ударника $Z_0 = \rho_0 a_0 S_0$, как относительная функция от глубины внедрения ударника, определяемая в эталонном эксперименте методом регистрации падающего и отраженного от преграды импульса упругих напряжений [1]).

В такой постановке при преобразовании подобия постоянными остаются упругие характеристики ударника и некоторые приведенные (эффективные) свойства преграды при разрушении. Переменными будут все остальные параметры, для которых необходимо найти коэффициенты преобразования подобия.

Экспериментальные исследования свидетельствуют, что геометрически подобные объемы разрушения, т.е. постоянство коэффициента разрушения $k_{\text{разр}} = \text{const}$, достигаются при геометрическом подобии объемов внедрения наконечников. Если в качестве определяющего коэффициента подобия принять соотношение линейных размеров, например соотношение глубин внедрения $h_2/h_1 = K$, то легко показать, что подобные объемы внедрения и соответственно объемы разрушения будут соотноситься как $V_2/V_1 = V_2^*/V_1^* = K^3$. При этом с очевидностью должно соблюдаться соотношение диаметров ударников $d_2/d_1 = K$, а необходимость сохранения энергоемкости $q = \text{const}$ и $k_{\text{к.п.д}} = \text{const}$ приводит к требованию $E_{\text{уд}2}/E_{\text{уд}1} = K^3$.

Учитывая, что энергия удара $E_{\text{уд}}$ является функцией геометрических размеров и, следовательно, массы ударника, а также функцией скорости соударения, получение однозначного решения для сохранения подобия разрушения в двух системах оказывается далеко не очевидным, поскольку необходимая энергия удара может быть получена как за счет массы или скорости ударника, так и за счет различных комбинаций этих двух параметров.

Поставленная задача была исследована и решена для малых скоростей соударения (до 10 м/с) при внедрении цилиндрического стального ударника с твердосплавными наконечниками полусферической, конической и клинообразной формы в хрупкую твердую преграду (различные типы крепких горных пород) на глубину $h \ll d$.

Уравнение внедрения ударника в преграду и подобие системы. Внедрение ударника в преграду в общем случае описывается физически понятным уравнением, согласно которому скорость внедрения определяется двумя слагаемыми – импульсом нагружения $\sigma_0(t)$ и силой сопротивления $F_{\text{пр}}(h)$ преграды внедрению:

$$\frac{dh}{dt} = \frac{1}{\rho_0 a_0} \left[2\sigma_0(t) - \frac{F_{\text{разр}}(h)}{S_0} \right], \quad (1)$$

где h – перемещение (глубина внедрения) наконечника ударника на контакте с преградой; $\sigma_0(t) = F_0(t)/S_0 = \rho_0 a_0 v_{\text{уд}}$ – амплитуда ударного импульса нагружения бойка; $t = l/a_0$ – продолжительность импульса нагружения; $F_{\text{разр}}(h)$ – усилие сопротивления разрушению преграды на контакте с наконечником как функция глубины внедрения.

Однако если функцию нагружения $\sigma_0(t)$ можно всегда определить аналитическими или численными (для ударников сложной геометрической формы) методами, то функцию $F_{\text{разр}}(h)$ сопротивления внедрению, зависящую от свойств разрушаемого материала преграды (всеобъемлющих и взаимосвязанных характеристик для различных механизмов разрушения практически не существует), от скорости внедрения, а также от геометрических и упругих характеристик ударника, определить расчетным путем, не прибегая к упрощающим моделям, практически не представляется возможным.

Для решения поставленной в настоящей работе задачи (внедрение в твердую хрупкую преграду (горную породу) на глубину $h \ll d$) были проведены многочисленные исследования функции $F_{\text{разр}}(h)$ на различных по прочностным свойствам горных породах в зависимости от скорости удара, параметров ударника и геометрии наконечников [1–4]. Эти функции оказались достаточно сложными для представления их в аналитическом виде и применения в расчетах. Однако было обнаружено, что отношение $F_{\text{разр}}(h)/v(h)$ ($v(h) = \frac{dh}{dt}$ – скорость перемещения наконечника ударника на контакте с преградой), которое легко определяется при использовании метода прямых и отраженных импульсов, представляет собой функцию, состоящую из кривых вида $F/v = \text{const}$, $F/v = ah$ и $F/v = b/(c-h)$ (a, b, c – коэффициенты пропорциональности) или их сочетания (рис. 2).

Легко видеть, что отношение $F_{\text{разр}}(h)/v(h)$ является эффективным волновым сопротивлением (импедансом) $Z(h)$ преграды в виде функции глубины внедрения ударника в преграду. Проведенные исследования позволили установить зависимость $Z(h)$ от характера импульса нагружения $\sigma_0(t)$, геометрии наконечника $S_{\text{нак}}(h)$, а также свойств разрушаемой породы, вида $Z(h) = A_1 S_{\text{нак}}(h)/\sigma_0(t)$ или $Z(h) = B_1 S_{\text{нак}}(h)/[\sigma_0(t)S_0 - C_1 S_{\text{нак}}(h)]$. В этих функциях A_1, B_1 и C_1 – числовые характеристики эффективных прочностных свойств преграды, сведенные в табличные данные для различных горных пород [5], а функции геометрии наконечника $S_{\text{нак}}(h)$, например, для клина, конуса и полусферы соответственно равны: $S_{\text{кл}}(h) = 2Lh \operatorname{tg}(\gamma/2)$ (L –

длина лезвия, γ – угол заострения клина); $S_{\text{кон}}(h) = \pi n h^2 \text{tg}(\gamma/2)$ (γ – угол заострения конуса, n – число конических инденторов); $S_{\text{сф}}(h) = \pi n(2R - h)h$ (R – радиус сферы, n – число полусферических инденторов).

Обобщенное для исследованных типов горных пород поведение этой функции в зависимости от скорости удара линейного ударника и продолжительности ударного нагружения (прямоугольный импульс) показано на рис. 3,а,б. Для наглядности на рис. 3,в приведены экспериментальные кривые, полученные на граните.



Рис. 2. Различные типы функции эффективного волнового импеданса $Z(h)$ преграды при внедрении в нее упругого ударника с твердым наконечником (индентором).

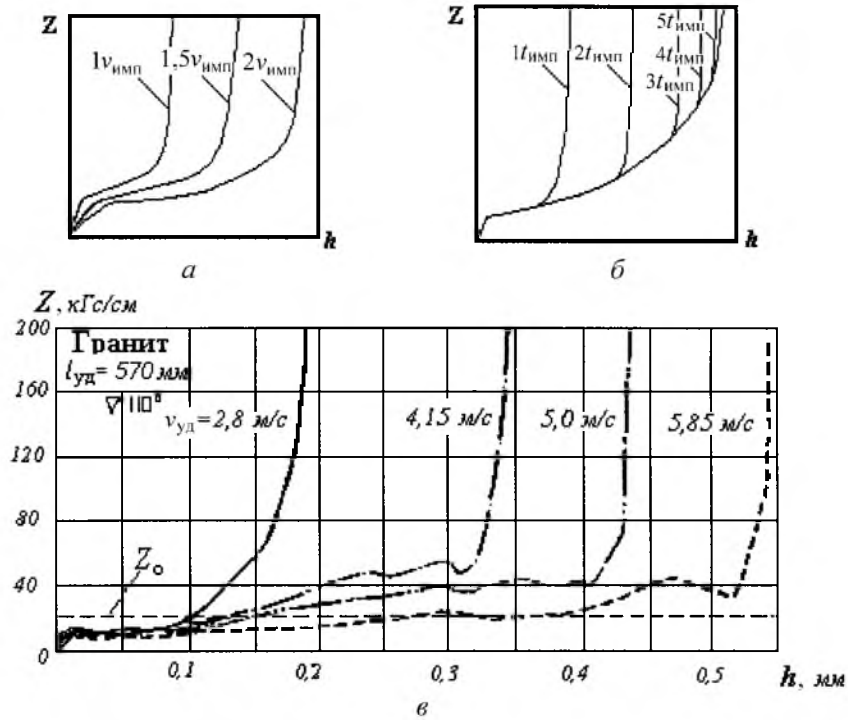


Рис. 3. Зависимость функции эффективного волнового импеданса $Z(h)$ преграды от скорости удара (а) и продолжительности импульса нагружения (б), а также экспериментальные кривые, полученные на граните (в).

Относительно функции $Z(h)$ уравнение (1) преобразуется к простому виду

$$\frac{dh}{dt} = \frac{2\sigma_0(t)S_0}{Z_0 + Z(h)} \quad (2)$$

После интегрирования (2) с учетом равенств $\sigma_0(t) = \rho_0 a_0 v_{\text{уд}}$, $dt = dl/a_0$, $Z_0 = \rho_0 a_0 S_0$ будем иметь

$$h = \int \frac{2v_{\text{уд}}}{[1 + Z(h)/Z_0]a_0} dl. \quad (3)$$

Из полученного решения видно, что для сохранения подобия $h_2 = Kh_1$ при соблюдении установленных выше соотношений необходимо и достаточно: 1) обеспечить постоянство отношения $Z(h)/Z_0 = \text{const}$, что сохраняет вид функции $Z(Kh)$, 2) увеличить время $t_{\text{имп}} = l/a_0$ прохождения продольного импульса в K раз, т.е. увеличить геометрически подобно в K раз продольные размеры ударника, и наконец, 3) сохранить постоянной скорость удара $v_{\text{уд}} = \text{const}$. Условие сохранения вида функции $Z(Kh)$, как следует из экспериментов, выполняется при увеличении продолжительности нагружения в K раз, что совпадает с требованием увеличения продольного размера ударника, т.е. $l_2 = Kl_1$.

Выводы. Таким образом, решение задачи сохранения масштабного и энергетического подобия двух систем при динамическом внедрении ударника в преграду может быть получено при введении дополнительного условия сохранения в виде функции эффективного волнового сопротивления преграды $Z(h)$ как $Z(h')$, где текущая координата глубины внедрения в подобной системе соответствует $h' = Kh$. Данное условие выполняется при сохранении равенства контактных напряжений между наконечником ударника и преградой в процессе внедрения в течение времени $t' = Kt$. Это равенство напряжений сохраняется при соотношении площадей поперечных сечений ударников $S_1/S_0 = (d_1/d_0)^2 = K^2$ и длин ударников $l_1/l_0 = K$, а также при равенстве скоростей соударения $v_{\text{уд1}} = v_{\text{уд2}}$. В этом случае имеем $m_1 = 1/4\pi(Kd_0)^2 Kl_0 \rho_0 = K^3 m_0$ и $E_1 = 1/2(K^3 m_0)v_0^2 = K^3 E_0$.

Следовательно, геометрическое и энергетическое подобие разрушения преграды при внедрении ударника (в исследованном диапазоне скоростей удара и глубин внедрения) достигается при линейном (в K раз) изменении продольных и поперечных размеров ударника и сохранении при этом неизменной скорости соударения.

Полученный результат проверен при многочисленных экспериментах на различных типах горных пород при малых скоростях удара (до 10 м/с) и малых глубинах внедрения ($h \ll d$) наконечника в породу, т.е. при сохранении одного и того же механизма разрушения. Это естественным образом ограничивает область применимости полученных соотношений подобия, а именно: не позволяет при изменении масштаба выходить за рамки эталонных условий проведения эксперимента, т.е. нельзя, например, эксперимент по внедрению масштабировать на эксперимент по прониканию или по пробиванию.

Однако представляется вполне оправданным предположить, что найденные соотношения подобия окажутся справедливыми и для других механизмов взаимодействия ударника с преградой. Действительно, уравнение (1) описывает процесс взаимодействия ударника с преградой в общем виде. Для

различных механизмов разрушения и при разных типах ударников в этом уравнении будут изменяться только функции нагружения и сопротивления (и соответствующая им функция эффективного волнового сопротивления преграды), но не будет изменяться сам вид уравнения. Поэтому эталонный эксперимент, проведенный в рамках заданного механизма разрушения, должен удовлетворять установленным выше соотношениям подобия. Отклонение же от этих соотношений возможно при проявлении динамических процессов, скорость протекания которых нелинейна, например при возникновении тепловых явлений (тепловыделение, теплопередача, плавление, испарение), при распространении неупругих (ударных, пластических) волн в ударнике и преграде и т.п., т.е. при изменении исходной функции нагружения $\sigma_0(t)$ в процессе внедрения и функции сопротивления $F_{\text{разр}}(h)$ в зависимости от проявления дополнительных факторов при разрушении.

Вышеизложенное должно в определенной степени стимулировать проведение специальных исследований, так как перечисленные отклонения могут быть учтены в уравнении (1), что представляет несомненный научный и прикладной интерес.

Резюме

На основі аналізу рівняння проникання і результатів експериментальних досліджень визначено коефіцієнти перетворення подібності для кінетичних параметрів ударника (швидкість або енергія удару) при енергетичній і геометричній подібності картини руйнування перешкоди. Показано, що така подібність руйнування перешкоди при прониканні ударника в досліджуваному інтервалі швидкостей удару (до 10 м/с) і глибин проникання ($h \ll d$) може бути досягнута за лінійної зміни поздовжніх і поперечних розмірів ударника та збереженні при цьому незмінною швидкості співудару.

1. Андреев В. Д. Методика комплексных исследований ударного взаимодействия инструмента с породой // Горный породоразрушающий инструмент. – Киев: Техніка, 1970. – С. 146 – 156.
2. Андреев В. Д., Иванов К. И. Исследование сопротивления породы внедрению // Горный породоразрушающий инструмент. – Киев: Техніка, 1969. – С. 67 – 71.
3. Андреев В. Д. Расчет передачи энергии ударного импульса через инструмент в породу // Горный породоразрушающий инструмент. – Киев: Техніка, 1969. – С. 71 – 79.
4. Андреев В. Д., Бочковский А. М., Скляр С. И. Исследование влияния угла заострения инструмента на процесс взаимодействия с породой // Горный породоразрушающий инструмент. – Киев: Техніка, 1970. – С. 169 – 178.
5. Иванов К. И., Варич М. С., Дусев В. И., Андреев В. Д. Техника бурения при разработке месторождений полезных ископаемых. – М.: Недра, 1974. – 408 с.

Поступила 14. 11. 2001