Записки Ленинградского ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени горного института им. Г.В.Плеханова, т. LXXXVI, 1981 г.

УДК 622.233.5.001

О ЗАКОНОМЕРНОСТЯХ ПЕРЕДАЧИ ЭНЕРГИИ ГОРНОЙ ПОРОДЕ ПРИ УДАРНОМ БУРЕНИИ

И.Г.ШЕЛКОВНИКОВ

При ударном бурении энергия передается горной породе в результате внедрения в нее породоразрушающего инструмента клиновидной формы при свободном падении или под действием импульса напряжения. Физическая сущность процесса передачи энергии при этом одна и та же[x]. По мере погружения инструмента энергия расходуется на разрушение породы. При этом согласно гипотезе В.А.Кирпичева, подтверждаемой в отношении ударного бурения многими исследователями[xx], объем разрушенной породы пропорционален затраченной энергии. Таким образом, очевидно, что чем больше ударной энергии передано породе, тем выше эффект разрушения при одной и той же энергоемкости. В связи с этим представляет интерес изучение закономерностей передачи энергий в период удара и внедрения инструмента с целью оптимизации самого процесса ударного бурения.

Обычно в технической литературе под термином энергоемкость подразумевается условная энергоемкость, определяемая как полная энергия удара, относимая к объему разрушенной породы. Очевидно, нет необходимости доказывать, как важно знать истинную энергоемкость, т.е. отношение действительно переданной породе энергии к объему разрушения. Закономерности передачи энергии удара позволяют установить истинную энергоемкость ударного разрушения породы, являющуюся объективным критерием технологического процесса ударного бурения.

При ударном внедрении клиновидного инструмента под действием импульса напряжения переданная энергия определяется как разность энергий начального и первого отраженного от лезвия импульсов. При существующей технологии бурения твердых пород энергия, переданная при втором и последую-

[x] Шелковников И.Г. Использование энергии удара в процессах бурения. Л., Недра, 1977, с.160.

[xx] Барон Л.И., Веселов Г.М., Коняшин Ю.Г. Экспериментальные исследования процессов разрушения горных пород ударом. М., Недра, 1962.

щем отражениях импульса, как правило, полезно не используется. Количество энергии, переданной при первом отражении начального импульса, зависит от его формы, динамической твердости породы и изменения приведенной контактной площади лезвия инструмента с глубиной его внедрения - угла приострения. Практически полностью энергия удара молотка бурильной машины передается промежуточному звену (буровой штанге, колонковой трубе и т.д.) только треугольным или прямоугольным импульсами. Получить прямоугольный импульс в промежуточном звене трудно вследствие всегда имеющейся разницы в величине поперечных сечений молотка и звена.

При внедрении клиновидного лезвия инструмента в породу под действием указанных импульсов может возникнуть отраженная волна напряжения, несущая в зависимости от условий на границе лезвие-порода различное количество энергии. На рис.I изображены теоретические формы отраженных прямоугольного и треугольного импульсов в зависимости от увеличивающегося сопротивления породы внедрению. Сопротивление может увеличиваться как за счет повышения динамической твердости породы, так и в результате более интенсивного роста приведенной контактной площади. Максимум энергии, переданной прямоугольным импульсом, соответствует на рис.I третьей форме отраженной волны - 75 %. При этом глубина внедрения лезвия составляет 0,625 от максимально возможного значения - величины перемещения при отражении импульса от свободной поверхности. Для треугольного импульса максимум переданной энергии соответствует второй форме отраженной волны - 50 % и глубине внедрения, равной 0,5 максимально возможного значения.

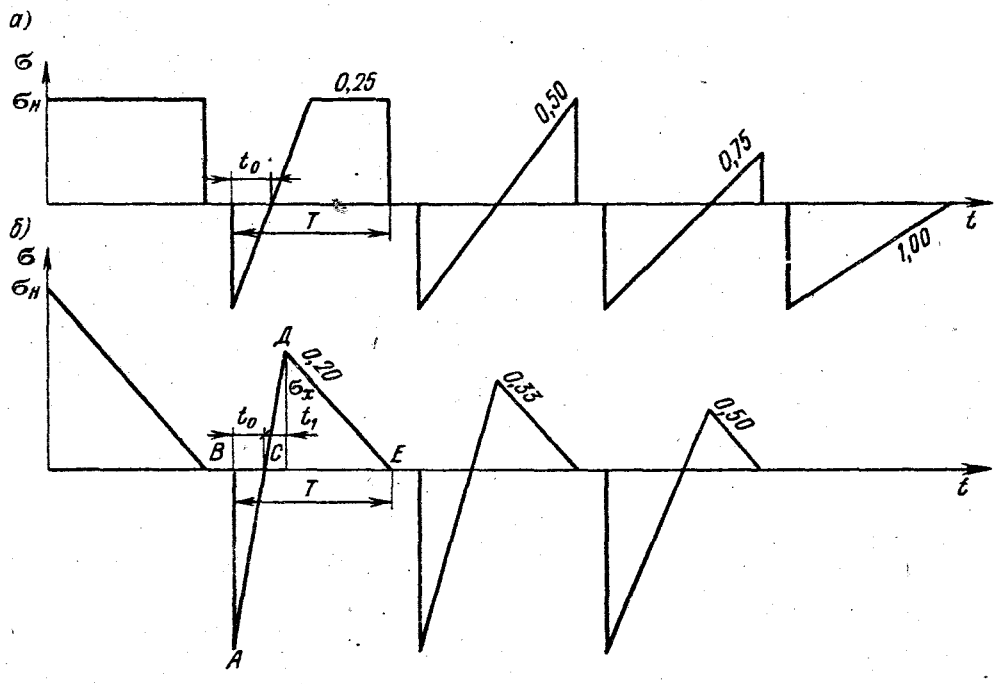


Рис.1. Схема отражения прямоугольных (а) и треугольных (б) импульсов при различных значениях $\lambda = \frac{t_0}{T}$

Для получения аналитической зависимости передаваемой в единицу времени энергии от времени (мощности внедрения от времени) представим взаимодействие породоразрушающего инструмента с породой как процесс передачи энергии от стержня с постоянной площадью поперечного сечения стержню, площадь поперечного сечения которого меняется в общем случае от 0 до ∞. Энергия, переданная породе при разрушении под действием импульса напряжения, может быть вычислена по формуле

$$W_{\text{П}} = W_{\text{Н}} - W_0 , \qquad (1)$$

где $W_{\text{П}}$, $W_{\text{Н}}$, W_0 - энергия соответственно переданная, начальная и отраженная.

В случае прямоугольного импульса равенство (1) можно записать в виде

$$W_{\text{П}} = \frac{Sc}{E}\int_0^T \sigma_{\text{Н}}^2 dt - \frac{Sc}{E}\int_0^T \sigma_0^2 dt ,$$

где S - площадь поперечного сечения промежуточного звена; c - скорость звука в материале звена; E - модуль Юнга; $\sigma_{\text{Н}}$ - напряжение в начальном импульсе.

Заменив величину отраженного импульса σ_0 его значением $\sigma_{\text{Н}}\frac{1-r}{1+r}$, получим

$$W_{\text{П}} = \frac{Sc\sigma_{\text{Н}}^2}{E}\left[\int_0^T dt - \int_0^T \left(\frac{1-r}{1+r}\right) dt\right], \qquad (2)$$

r - отношение площадей поперечных сечений передающего и принимающего энергию стержней.

Так как условное поперечное сечение принимающего „стержня" (породы) постоянно изменяется в период действия импульса T, то $r = f(t)$.

Теоретически и экспериментально установлено, что при изменении $\sigma_{\text{Н}}$ по линейному закону сопротивление породы пропорционально глубине внедрения. Следовательно, можно записать (см. рис.1):

$$\sigma_0 = -\sigma_{\text{Н}} + k t , \qquad (3)$$

где $k = \sigma_{\text{Н}} / t_0$; t_0 - время от начала внедрения до момента, когда площади передающего и принимающего стержней становятся равными.

Учитывая σ_0, после преобразования равенства (3) получим $r = \frac{2t_0}{t} - 1$. Подставив вместо t_0 произведение λT, где λ - коэффициент, определяющий долю t_0 от T, окончательно запишем

$$r = \frac{2\lambda T}{t} - 1 . \qquad (4)$$

Формула (4) справедлива для периода внедрения лезвия, т.е. для момента, когда происходит передача энергии. Не требует доказательства также и справедливость формулы (4) для случая треугольного импульса (рис.1,б). Таким образом, энергия передается породе аналогично переходу импульса напряжения от стержня с постоянной площадью поперечного сечения стержню, площадь поперечного сечения которого изменяется по параболическому закону, записанному в виде формулы (4).

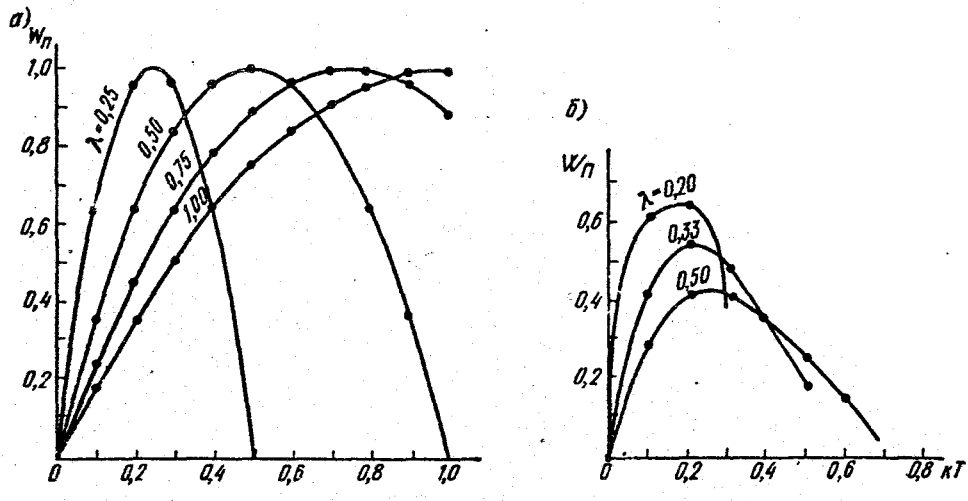


Рис.2. Распределение энергии, передаваемой горной породе прямоугольным (а) и треугольным (б) импульсами, во времени при различных значениях λ

Подставив выражение (4) в равенство (2), получим

$$W_п = \frac{S c \sigma_н^2}{E}\left(\frac{2}{\lambda T}\int_0^T t\,dt - \frac{1}{\lambda^2 T^2}\int_0^T t^2 dt\right). \qquad (5)$$

С помощью уравнения (5) можно построить график распределения энергии, передаваемой породе прямоугольным импульсом, во времени для любых значений λ и T. Такие графики, соответствующие рис.I,а, представлены на рис.2. На нем по оси абсцисс отложены отрезки времени в k долях от T; по оси ординат - передаваемая энергия в долях от полной, приходящаяся на принятый интервал времени, в данном случае 0,I T. Графики наглядно характеризуют

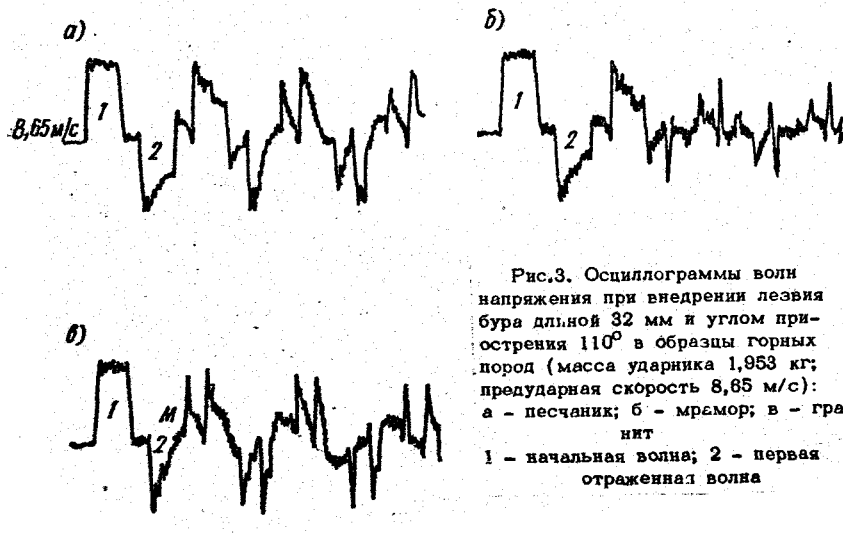


Рис.3. Осциллограммы волн напряжения при внедрении лезвия бура длиной 32 мм и углом приострения 110° в образцы горных пород (масса ударника 1,953 кг; предударная скорость 8,65 м/с): а - песчаник; б - мрамор; в - гранит
1 - начальная волна; 2 - первая отраженная волна

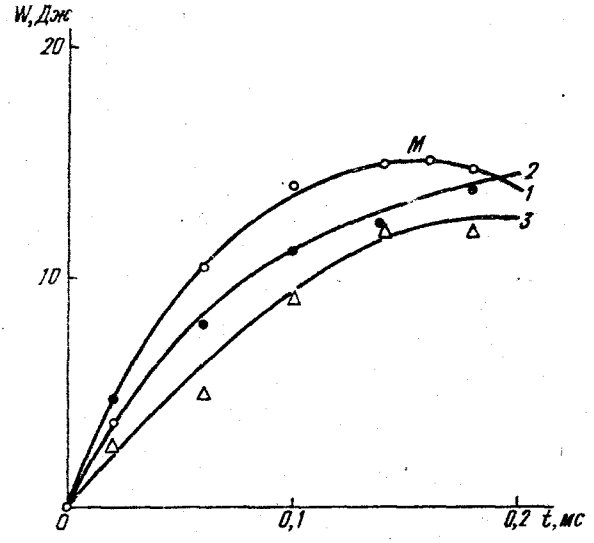


Рис.4. Распределение энергии, передаваемой горной породе, во времени при внедрении лезвия бура в образцы различных горных пород:
1 – гранит; 2 – мрамор; 3 – песчаник

процесс передачи энергии во времени. Площадь под графиками является количественным выражением переданной энергии. Ее численное значение может быть найдено с помощью преобразованного уравнения (5):

$$W_{\text{п}} = \frac{Sc\sigma_{\text{н}}^2 T}{E}\left(\frac{3\lambda - 1}{3\lambda^2}\right). \quad (6)$$

На рис.3 приведены полученные автором осциллограммы волн напряжения, записанные при внедрении лезвия головки бура под действием прямоугольного начального импульса в образцы песчаника, мрамора и гранита. На основании результатов обработки этих осциллограмм построены графики распределения энергии, передаваемой породе, во времени (рис.4). Точка M на рис.3,в и на рис.4 соответствует максимальной амплитуде передаваемой энергии и моменту, в который отсутствует отражение импульса. Сам график (рис.4) аналогичен теоретическому графику ($\lambda = 0{,}75$) на рис.2, соответствующему теоретическому максимуму переданной энергии. Действительно, при подсчете переданной энергии по осциллограмме (рис.3,в) была получена величина, близкая к теоретическому максимуму, т.е. 75 %.

Другие два экспериментальных графика (рис.4, кривые 2 и 3) соответствуют теоретическому графику $\lambda = 1{,}00$ (рис.2). Таким образом, эксперименты подтверждают вышеизложенные теоретические предпосылки.

В случае треугольного импульса

$$W_{\text{п}} = \frac{Sc\sigma_{\text{н}}^2}{E}\left[\int_0^{T_1}\left(1-\frac{t}{T}\right)^2 dt - \int_0^{T_1}\left(1-\frac{t}{T}\right)^2\left(\frac{1-r}{1+r}\right)^2 dt\right]. \quad (7)$$

Очевидно, что в общем случае при передаче энергии треугольным импульсом она передается за время $t_0 + t_1$ (см. рис.I). Величина t_1 зависит от t_0 и T и определяется из подобия начального импульса и треугольника CDE и треугольников ABC и CDE, т.е. из равенств $\sigma_{\text{н}} / \sigma_X = T/[T-(t_0+t_1)]$ и $\sigma_{\text{н}} / \sigma_X = t_0/t_1$. Решая их совместно, определяем

$$t_1 = t_0 \frac{T-t_0}{T+t_0}. \quad (8)$$

Время, в течение которого передается энергия, $T_1 = t_0 + t_0\frac{T-t_0}{T+t_0}$ или

$$T_1 = \frac{2\lambda T}{1-\lambda}. \quad (9)$$

Подставив в формулу (7) вместо r его выражение (4), получим

$$W_{\text{П}} = \frac{S c \sigma_{\text{Н}}^2}{E}\left[\frac{2}{\lambda T}\int_0^{T_1} t\,dt - \frac{1+4\lambda}{\lambda^2 T^2}\int_0^{T_1} t^2 dt + \frac{2(1+\lambda)}{\lambda^2 T^3}\int_0^{T_1} t^3 dt - \frac{1}{\lambda^2 T^4}\int_0^{T_1} t^4 dt\right]. \qquad (10)$$

На рис.2,б по уравнению (10) построены графики распределения энергии, передаваемой породе прямоугольным импульсом, во времени для различных значений λ. Очевидно, площадь под графиком соответствует переданной энергии

$$W_{\text{П}} = \frac{S c \sigma_{\text{Н}}^2 T}{E}\left[\frac{4\lambda}{(1-\lambda)^2} - \frac{8\lambda(1+4\lambda)}{3(1-\lambda)^3} + \frac{8\lambda^2(1+\lambda)}{(1-\lambda)^4} - \frac{32\lambda^3}{5(1-\lambda)^5}\right]. \qquad (11)$$

Полученные закономерности позволяют по осциллограммам начального и отраженного импульсов с помощью экспериментальных значений λ и T вычислять переданную горной породе энергию удара непосредственно по формулам (6) и (11), определять характер процесса передачи наиболее простым и быстрым способом по λ, обеспечивая тем самым возможность его оптимизации.

Изложенный метод анализа процесса передачи энергии по осциллограммам позволяет успешно и быстро вычислять истинную энергоемкость породы при ударном бурении.