Записки Ленинградского орденов Ленина и Трудового Красного Знамени горного института им. Г. В. Плеханова, т. XLVII, вып. 1, 1962 г.

К РАСЧЕТУ ПЕРЕДАЧИ ЭНЕРГИИ УДАРА

И. Г. Шелковников

В механизмах ударно-вращательного бурения (пневмо- и гидроударниках и т. п.) передача энергии для разрушения горной породы осуществляется от поршня-ударника или непосредственно на породоразрушающий наконечник — долото, или через промежуточное звено — бурильную штангу, колонковую трубу — на буровую коронку. От поршня-ударника *2* (рис. 1) энергия удара через ударяемый переходник *3* и колонковую трубу передается буровой коронке *5*, которая, внедряясь, разрушает горную породу. Силой P (осевая нагрузка) через бурильные штанги и переходник *1* породоразрушающий инструмент поддерживается в постоянном контакте с поверхностью забоя. Кроме ударной нагрузки в разрушении породы участвуют усилия, возникающие на боковых поверхностях резцов при вращении пневмоударника в скважине в полости, перпендикулярной ее оси.

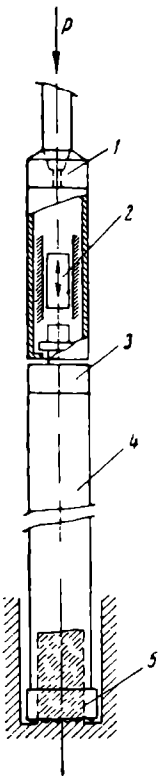


Рис. 1. Схема пневмоударника с колонковой трубой:

1 — переходник; *2* — поршень-ударник; *3* — ударяемый переходник; *4* — колонковая труба; *5* — буровая коронка

Производительность ударных механизмов рассчитывается обычно по формулам классической механики. Коэффициент полезного действия удара

$$\eta = (1 + \varepsilon)^2 \frac{mM}{(m + M)^2}, \qquad (1)$$

где ε — коэффициент восстановления скорости;
M и m — массы соударяющихся элементов.

Как указывает Ю. В. Беляев [3], термин к. п. д. удара правомерен, когда процесс удара рассматривается с учетом граничных условий инструмент — горная порода. В противном случае имеет смысл говорить о коэффициенте передачи энергии движущегося бойка неподвижному инструменту. Граничные условия последнего не влияют на процесс удара.

Формулы, аналогичные (1), приводились ранее [2, 6]. Их основной недостаток в отсутствии связи к. п. д. удара со временем соударения и формой соударяющихся элементов, что противоречит практическим данным.

В волновой механике вопрос передачи энергии удара рассматривается иначе. Основные принципы волновой механики применительно к соударению двух цилиндрических стержней в пределах упругости были предложены А. Сен-Венаном и хорошо изложены в работе А. Н. Динника [5].

Некоторые исследователи [1, 3, 4] пытаются решить вопрос о передаче энергии удара, объединив выводы классической и волновой механики. Е. В. Александров [1], например, для соударения стальных стержней с закругленными концами одинакового поперечного сечения, но разной длины приводит следующее выражение коэффициента передачи энергии удара:

$$\eta = 4\frac{m_1 m_{кр}}{(m_1 + m_{кр})^2}, \tag{2}$$

где m_1 — масса ударяющего стержня;

$m_{кр}$ — критическая масса ударяемого стержня, равная $\rho S a t_{уд}$ (ρ — плотность материала стержней, S — площадь поперечного сечения, a — скорость распространения продольной волны, $t_{уд}$ — время удара).

Если при соударяющихся стержнях $\rho_1 = \rho_2$ и $S_1 = S_2$, то

$$\eta = 4\frac{l_1 \lambda}{(l_1 + \lambda)^2}, \tag{3}$$

где λ — длина продольной волны в ударяемом стержне, равная $t_{уд} a$; l_1 длина ударяющего стержня.

Е. В. Александров на основании экспериментов утверждает, что $m_{кр}$ соответствует критической длине ударяемого стержня $l_{кр} \approx 2{,}9l$. Выражение (3), как показано далее, не может быть принято для подсчета количества энергии, перешедшей с поршня-ударника на промежуточное звено. Предположим, что цилиндрический поршень-ударник длиной l_1 (рис. 2, *а*) ударяет по цилиндрическому промежуточному звену из того же материала и равного с ним поперечного сечения длиной $\geqslant 2{,}9l_1$. В этом случае с ударником должна взаимодействовать критическая масса и, следовательно, можно воспользоваться формулой для коэффициента передачи энергии удара

$$\eta = 4\frac{m_1 m_{кр}}{(m_1 + m_{кр})^2} = 4\frac{l_1 \lambda}{(l_1 + \lambda)^2} \tag{4}$$

Часть энергии, оставшейся на поршне-ударнике, определим как работу отскока

$$A_0 = P_у h_0, \tag{5}$$

где $P_у$ — вес ударника;

h_0 — высота отскока.

Коэффициент передачи энергии удара

$$\eta = \frac{A - A_0}{A} = 4\frac{l_1 \lambda}{(l_1 + \lambda)^2} \tag{6}$$

где A — полная энергия удара;

λ — длина продольной волны в промежуточном звене.

Из уравнения (6)

$$A = P_у h_0 \frac{(q+1)^2}{(q-1)^2}, \quad q = \frac{l_1}{\lambda}. \tag{7}$$

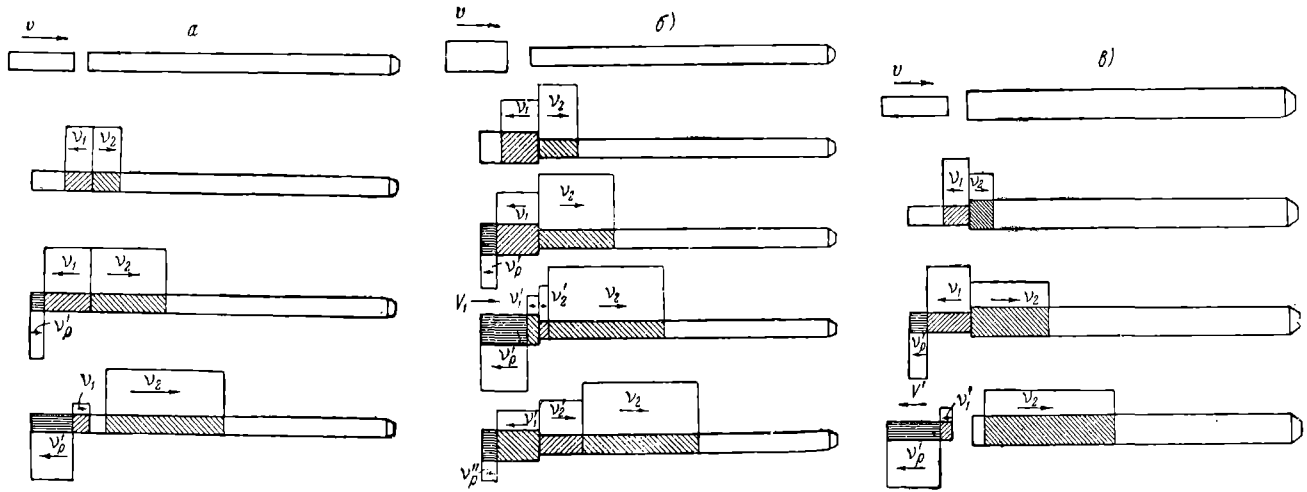


Рис. 2. Передача энергии от поршня-ударника стержню при:

$а - S_1 > S_2$; $б - S_1 = S_2$; $в - S_1 < S_2$ (S_1 — площадь сечения поршня, S_2 — площадь сечения ударяемого стержня)

Массовая скорость частиц стержня: v_2 — в первой ступени продольной волны; v_2' — во второй ступени.

Масс корость частиц ударника: v_1 — в первой волне сжатия; v_p' — в первой отраженной волне растяжения; v_1' — во второй волне сж

v_p — во второй отраженной волне растяжения

При условии неравенства поперечных сечений и плотностей материала поршня-ударника и промежуточного звена

$$A = P_y h_0 \frac{(rpq+1)^2}{(rpq-1)^2}, \tag{8}$$

где

$$r = \frac{S_1}{S_n} \text{ и } p = \frac{\rho_1}{\rho_n};$$

S_1 и ρ_1; S_n и ρ_n — площадь поперечного сечения и плотность соответственно материала поршня-ударника и промежуточного ударяемого звена.

Полную энергию A заменим ее выражением через кинетическую энергию поршня-ударника в уравнении (7)

$$\frac{mv^2}{2} = P_y h_0 \frac{(q+1)^2}{(q-1)^2}, \tag{9}$$

где m — масса поршня-ударника;

v — скорость поршня-ударника в момент соударения.

Из (9)

$$q = \frac{v\sqrt{\frac{1}{2gh_0}}+1}{v\sqrt{\frac{1}{2gh_0}}-1}$$

или, заменяя $q = \frac{l_1}{\lambda}$, получим

$$\lambda = l_1 \frac{v\sqrt{\frac{1}{2gh_0}}-1}{v\sqrt{\frac{1}{2gh_0}}+1} \tag{10}$$

Как видно из уравнения (10), длина продольной волны, соответствующая критической массе, $\lambda < l_1$ при любых условиях, что противоречит физическому смыслу и экспериментальным данным [1, 11]. Следовательно, λ не может быть длиной волны сжатия в данном случае и приобретает некоторое условное значение, не приемлемое для подсчета количества энергии, передаваемой ударным импульсом.

Таким образом, ни одна из приведенных выше формул для подсчета энергии, переданной при соударении поршня-ударника с промежуточным звеном, не может считаться достаточно правильной.

Рассмотрим три возможные случая соударения поршня-ударника с промежуточным звеном на основании волновой теории:

1. $S_1 > S_2$* при $\rho_1 a_1 \geqslant \rho_2 a_2$
   $S_1 = S_2$ при $\rho_1 a_1 > \rho_2 a_2$ } (рис. 2, *б*)
2. $S_1 = S_2$ при $\rho_1 a_1 = \rho_2 a_2$ (рис. 2, *а*)
3. $S_1 < S_2$ при $\rho_1 a_1 \leqslant \rho_2 a_2$
   $S_1 = S_2$ при $\rho_1 a_1 < \rho_2 a_2$ } (рис. 2, *в*)

Допустим следующее: 1) соударяющиеся звенья — цилиндрические стержни с плоскими ударяемыми торцами, равномерные по всей длине, причем $l_2 \geqslant l_1$ (l_1 и l_2 — длина ударяющего и ударяемого стержня); 2) соударение происходит по всей плоскости контакта в один и тот же

* Индексы 1 относятся к ударнику, индексы 2 — к ударяемому звену.

момент; 3) продольная волна проходит все точки одного и того же сечения одновременно.

Рассмотрим подробно эти случаи.

1. Процесс соударения можно представить следующим образом (рис. 2, *б*). При ударе со скоростью v по стержню в ударнике вблизи контакта возникает упругая волна сжатия, частицы вещества в которой движутся со скоростью v_1 по отношению к свободному торцу ударника. По другую сторону контакта возникает упругая волна сжатия в стержне с массовой скоростью движения частиц вещества v_2. Из равенства пространственных скоростей конца ударника и конца ударяемого стержня в течение соударения следует, что

$$v - v_1 = v_2. \tag{11}$$

Вследствие принятых условий $v_2 < v_1$ и $v_1 < 1/2 v$. При отражении волны сжатия от свободного конца ударника, как волны растяжения, массовая скорость частиц в ней удваивается. В результате получаем

$$v'_p < \frac{1}{2} v2 = v,$$

где v'_p — массовая скорость частиц в волне растяжения.

Из неравенства следует, что при движении волны растяжения обратно к контакту соударения пространственная скорость частиц в ударнике после прохождения волны равна разности $v - v'_p > 0$. Таким образом, в момент достижения волной растяжения контакта и падения напряжения до нуля мгновенно возникает новая волна сжатия и процесс повторяется с меньшими значениями амплитуды напряжения. Коэффициент эффективности передачи энергии удара [10]

$$\sigma = \rho a v, \tag{12}$$

где σ — значение амплитуды напряжения в импульсе.

Так как действие равно противодействию, можно составить равенство

$$S_1 \rho_1 a_1 v_1 = S_2 \rho_2 a_2 v_2. \tag{13}$$

Примем

$$S_1 \rho_1 a_1 = z_1 \text{ и } S_2 \rho_2 a_2 = z_2.$$

Тогда

$$z_1 v_1 = z_2 v_2. \tag{14}$$

Решая совместно (11) и (14) и вводя $r = \frac{z_1}{z_2}$, С. Фэйрхерст получил выражение для v_1 и v_2 через скорость соударения

$$v_1 = v\left(\frac{1}{r+1}\right)^* \tag{15}$$

$$v_2 = v\left(\frac{r}{r+1}\right) \tag{16}$$

В предположении, что массовая скорость частиц в волне растяжения, отраженной от свободного торца ударника, меньше скорости v, делается вывод о неизменности направления движения ненапряженной части ударника по отношению к неподвижному наблюдателю после отражения начальной волны. Вследствие этого в момент достижения

* С. Фэйрхерстом допущена алгебраическая ошибка, вследствие чего правые части уравнений (15) и (16) поменялись местами и это отразилось на последующем выводе, не влияя, однако, на результат.

отраженной волной растяжения контакта сразу же возникает новая волна сжатия. Она опять распространяется в обе стороны от контакта соударения со скоростями частиц в волне сжатия

$$v_1 - v_1' = v_2', \tag{17}$$

где v_1 — скорость ненапряженной части ударника относительно неподвижного наблюдателя, $v_1 = v - 2v_1$;

и v_2' — массовые скорости частиц в ударнике и ударяемом стержне,

$$v_2' = v_2\left(\frac{r-1}{r+1}\right) \tag{18}$$

для времени

$$\frac{2l_1}{a} < t < \frac{4l_1}{a}$$

Массовая скорость частиц для n-й волны сжатия

$$v_2^{(n)} = v_2\left(\frac{r-1}{r+1}\right)^n \tag{19}$$

$$\frac{2nl_1}{a} < t < \frac{2(n+1)l_1}{a}$$

Процесс повторяется до полного торможения ударника. Теоретическая форма волны сжатия в ударяемом стержне как функции массовой скорости приводится на рис. 3. Энергия может быть передана в этом случае полностью [5, 7, 8].

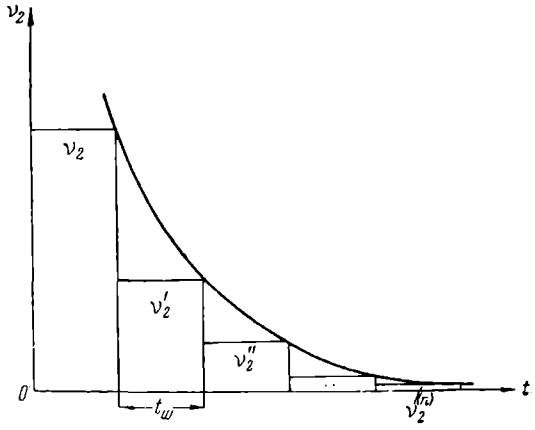


Рис. 3. Изменение массовой скорости v_2 от времени: $t_ш \dfrac{2l_1}{a_1}$ — продолжительность шага волны

На основании выражения энергии волны

$$W = \frac{Sat\sigma^2}{E}, \tag{20}$$

где E — модуль упругости,

С. Фэйрхерст и выводит

$$W = \frac{S_2 a t_1 \sum \sigma_2^2}{E} = \frac{2S_2 l_1}{E}\left\{\left[\sigma_2^2 + \sigma_{21}^2 + \quad + \sigma_{2n}^2\right] + \left(\frac{l_2}{l_1} - n\right)\sigma_{2(n+1)}^2\right\}, \tag{21}$$

где n — положительное целое число;

$t_1 = \dfrac{2l_1}{a}$ — время продолжительности шага в волне;

σ_2, σ_{21}, σ_{2n} — амплитуды напряжения в каждом шаге волны ударяемого стержня.

С учетом (12) в уравнении (21) производится замена σ его значением через v_1. В результате при определении суммы геометрической прогрессии

$$W = 2S_2 \rho l_1 v^2\left[\left(\frac{1-k^n}{4r}\right)(1+r)^2 + \left(\frac{l_2}{l_1} - n\right)k^{2(n+1)}\right], \tag{22}$$

где

$$k = \left(\frac{r-1^2}{r+1}\right).$$

Выразив значение всего количества энергии ударника в момент соударения как

$$W_s = \frac{1}{2} M v^2 = \frac{\rho S_1 l_1 v^2}{2} \qquad (23)$$

С. Фэйрхерст находит коэффициент эффективности передачи энергии удара

$$\eta = \frac{W}{W_s} = \frac{S_2}{S_1}\left[(1 - k^n) r + \left(\frac{l_2}{l_1} - n\right) \frac{4k^{2(n+1)} r^2}{(r+1)^2}\right]^* \qquad (24)$$

Как следует из формулы (24), чем длиннее ударяемый стержень (чем больше n), тем энергия полнее переходит на него [10]. Если отношение параметров ударника и ударяемого стержня $r = \frac{S_1}{S_2} = 2$, $\frac{l_2}{l_1} = 3\frac{1}{3}$, $\rho_1 = \rho_2$, $a_1 = a_2$, то $k = \frac{1}{9}$ и $\eta = 0{,}963$ или 96,3%, т. е. практически уже при соотношении длины ударника с длиной ударяемого стержня, равном примерно 3, при $r = 2$ передача энергии происходит почти полностью.

2. Во втором случае — частном из первого вида соударений — вся энергия ударника переходит на ударяемый стержень в течение прохождения упругой волной двойной длины ударника (см. рис. 2, *а*), что подтверждается Ф. Арндтом [7]. Как и в первом случае, это можно объяснить следующим образом. При соударении ударника и стержня массовая скорость частиц ударника вблизи контакта в момент удара $v = \frac{v}{2}$ относительно свободного торца. С этой массовой скоростью частиц в волне сжатия фронт последней переместится от контакта соударения к свободному концу ударника, скорость которого, до прихода волны остается равной v, т. е. ударной скорости. Начальная волна сжатия отразится от свободного конца как волна растяжения, массовая скорость частиц в которой $v_p' = \frac{v}{2} 2 = v$, но направлена в сторону, противоположную движению ударника. Следовательно, относительно неподвижного наблюдателя пространственная скорость ударника становится равной нулю. Вся энергия передается стержню, а ударник останавливается, не имея остаточной энергии, за исключением энергии вибрации, которая весьма мала [5]. Все количество энергии можно определить по формуле (23), считая $\eta \approx 1$.

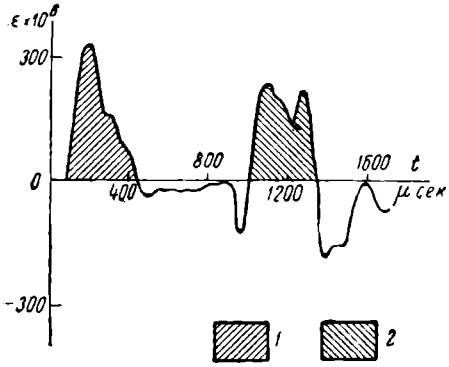


Рис. 4. Волна напряжения в бурильной штанге, опертой о блок песчаника:
1 — начальная; *2* — отраженная

Для первого и второго случаев в практике ударно-поворотного и, видимо, ударно-вращательного бурения отскок ударника можно считать только функцией от граничных условий инструмент—порода. Очевидно, отраженная волна сжатия от границы инструмент—порода, вызывающая отскок ударника, передает последнему количество энергии, про-

* Уравнение (24) приведено С. Фэйрхерстом [10] в форме

$$\eta = (1 - k^n) + \left(\frac{l}{L} - n\right) \frac{4rk^{2(n+1)}}{1+r}$$

где L и l — длина ударника и ударяемого стержня (штанги).

порциональное квадрату напряжения в ударнике. Среднее значение напряжения устанавливается на некотором расстоянии от контакта соударения.

Энергию продольной волны, перемещающейся вдоль стержня, рассчитаем по формуле (20). Тогда отраженная волна сжатия (рис. 4) после перехода определенной части начальной волны в горную породу будет иметь энергию

$$W_1 = \frac{Sat_1\sigma_1^2}{E},$$

где t_1 — время продолжительности отраженной волны сжатия;

σ_1 — среднее напряжение в отраженной волне.

Отраженная волна сжатия не может больше производить работу по разрушению забоя, так как отражается от ударяемого конца стержня как волна растяжения. Последняя может вызвать отскок инструмента от забоя. С другой стороны, энергия волны сжатия, дошедшая до контакта соударения, вызовет отскок остановившегося поршня-ударника (явление Гипкинсона) Таким образом, отскок является мерой количества энергии, возвращенной обратно поршню-ударнику при условии, что время контакта $t > \frac{2l_2}{a}$ (считаем, что ρ и a для ударника и ударяемого стержня равны). К. п. д. удара

$$\eta = 1 - \frac{W_1}{W} = 1 - \frac{t_1\sigma_1^2}{t\sigma^2} \qquad (25)$$

3. При площади поперечного сечения ударника меньшей, чем у бурильной штанги, ударник отскакивает после удара, унося с собой некоторую часть энергии [7]. При соударении массовая скорость частиц в волне сжатия ударника (см. рис. 2, *в*), расположенных вблизи контакта, вследствие меньшего сечения или меньшей жесткости ударника будет $\frac{v}{2} < v_1 < v$. Следовательно, при отражении волны сжатия от свободного конца ударника массовая скорость частиц удваивается и становится больше v у свободного торца. Направление массовой скорости обратно относительно v Вследствие разности скоростей $v_p' - v$ ударник отскакивает, унося некоторую часть энергии. Коэффициент передачи энергии удара в таком случае

$$\eta = \frac{W - W_1}{W} \qquad (26)$$

где

$$W = \frac{mv^2}{2}; \quad W = P_y h_0;$$

W_1 — энергия отскока;
P_y — вес ударника;
h_0 — высота отскока.

Окончательно

$$\eta = 1 - \frac{2h_0}{v^2 g} \qquad (27)$$

Количество энергии, переданное ударяемому стержню, в третьем варианте можно выразить иначе. Исходя из уравнения (20).

$$W_2 = W \qquad W_1 = \frac{S_2 at\sigma^2}{E}$$

Среднее значение σ определяется в зависимости от изменения напряжения во время распространения волны. Это, как правило, экспо-

ненциальная зависимость, убывающая при увеличении показателя степени. Например, [10]

$$\sigma = \sigma_0 e^{-\frac{t\rho_2 a_2}{M}} \tag{28}$$

где σ и σ_0 — напряжение и наибольшее напряжение в ударяемом стержне;

t — время соударения.

Начальное напряжение на фронте волны определяется уравнением (12). Скорость отскока $v' = \sqrt{2h_0 g}$ можно с достаточной степенью точности считать равной удвоенной массовой скорости частиц ударника во фронте начальной волны сжатия. Следовательно,

$$v_1 = \frac{v'}{2} = \frac{\sqrt{2h_0 g}}{2}$$

Из уравнения (11)

$$v_2 = v - \frac{\sqrt{2h_0 g}}{2} \tag{29}$$

Начальное напряжение во фронте волны из уравнения (12)

$$\sigma_2 = \rho_2 a_2 \left(v - \frac{\sqrt{2h_0 g}}{2} \right), \tag{30}$$

где значение v_2 подставлено из (29). Среднее значение σ определяется подстановкой σ_2 из формулы (30) на место σ_0 в выражение (28). В результате

$$\sigma = \frac{\int_0^t \sigma_2 e^{-\frac{t\rho_2 a_2}{M}} dt}{t} \tag{31}$$

Приведем пример, подтверждающий возможность полной передачи энергии от поршня-ударника бурильной машины на штангу для первого вида случаев соударения. Исходные данные — осциллограмма И. Хоукса [9, стр. 322]: относительное удлинение 331×10^6, наблюдаемое напряжение 713 *кг/см²*, теоретическая ударная скорость 4,99 *м/сек*, теоретическое напряжение 1698 *кг/см²*.

Волна напряжения записана с помощью тензодатчика, установленного на шестигранной бурильной штанге диаметром 22,2 *мм* с промывочным отверстием диаметром 3,2 *мм* и длиной 2,44 или 3,05 *м*. Штанга упиралась в блок песчаника концом, на котором было долото. По противоположному концу наносился одиночный удар поршнем-ударником машины «Хольмен СЛ-200».

По данным И. Хоукса, амплитуда напряжения в начальной волне сжатия $\sigma_0 = 713$ *кг/см²*. Среднее напряжение по (31)

$$\sigma = \frac{\int_{t_1}^{t_2} \sigma_0 e^{-\frac{t\rho_2 a_2}{M}}}{t_2 - t_1} = 640 \text{ кг/см}^2,$$

где t_1 — время начала импульса сжатия, 0,100 *м сек* (среднее между наименьшим и наибольшим значением возрастающей ветви);

t_2 — время затухания импульса, 0,450 *м/сек*;

σ_0 — наибольшее напряжение в импульсе, 713 *кг/см²*;

ρ — плотность бурильной штанги, 795 *кг сек²/м⁴*;

a_2 — скорость распространения волны, 5150 *м/сек* (по данным В. М. Мосткова);

M — масса поршня, 0,184 *кг сек²/м* (приблизительно).

Полная энергия продольной волны, перемещающейся по бурильной штанге,

$$W_2 = \frac{S_2 a_2 t_3^2}{E} = 109 \ кг/см,$$

где S_2 — площадь сечения штанги, 3,11 $см^2$;
t — время продолжительности волны, 350 10^{-6} $сек$;
E — модуль упругости, 2,1 10^6 $кг/см^2$.

Кинетическая энергия поршня-ударника

$$W_1 = \frac{Mv^2}{2} = 113 \ кг/м,$$

где M — масса поршня, 0,184 $кг \ сек^2/м$;
v — предударная скорость поршня, 3,5 $м/сек$ *

Таким образом, значение переданной на бурильную штангу энергии весьма близко кинетической энергии поршня-ударника.

Выводы

1. В двух первых видах соударения энергия практически полностью передается от поршня-ударника на ударяемое звено (бур, хвостовик, переходник колонковой трубы). При опертом о горную породу буровом наконечнике отскок ударника пропорционален энергии, отраженной от забоя в виде волны сжатия. Волна сжатия, пройдя через поверхность контакта в ударник, отразится от его свободного конца как волна растяжения и вызовет отделение ударника от ударяемого звена.

2. Зная соотношение размеров и физических параметров поршня-ударника и ударяемого звена, можно определить часть энергии, отраженной обратной от горной породы, как функцию величины отскока.

3. В третьем виде соударения отскок ударника определяет количественно ту часть энергии, которая в нем оказалась остаточной.

4. Волна сжатия, отразившаяся от границы инструмент—горная порода, вызывает незначительный отход инструмента от забоя или мгновенное уменьшение осевой нагрузки. В последнем случае отраженная от забоя волна сжатия снова отразится от места приложения осевой нагрузки как сжимающий импульс, способствуя последующему внедрению инструмента.

5. При скорости приложения осевой нагрузки, равной или большей скорости соударения, теоретически можно избежать отскока поршня-ударника в первом и втором видах удара.

6. Определение оптимальных условий передачи энергии от инструмента горной породе требует установления зависимостей для каждого вида горных пород: наибольшего значения к. п. д. удара от физико-механических свойств пород, энергии удара, степени пригрузки инструмента, формы породоразрушающего наконечника.

ЛИТЕРАТУРА

1. Александров Е. В. Разработка научных основ для создания бурильных и отбойных машин ударного, ударно-поворотного и ударно-вращательного действия с электроприводом. Ротопринт. Ин-т горного дела АН СССР, 1959.

2. Батуев Н. М. Повышение производительности электроотбойных молотков и уменьшение их веса. «Механизация трудоемких и тяжелых работ», 1948, № 5.

* Значение v подсчитывается по уравнению (12) на основании приведенных выше данных И. Хоукса [9, стр. 322] — экспериментального напряжения и известных площадей поперечных сечений ударника и бурильной штанги.

3. Беляев Ю. В. Об оценке степени использования энергии удара в ударных машинах. Тр. ВНИИСтройдормаш, 1955, т. X.
4. Винник И. Н. Явление отскока бойка в бурильных машинах и его использование. Тр. Харьковского горного ин-та (тр. аспирантов), 1961.
5. Динник А. Н. Избранные труды, т. I. Изд-во АН УССР, 1952.
6. Малахов Ю. М. Теория работы пневматического молотка. «Горный журнал», 1934, № 2.
7. Arndt F. K. Glückauf, 1960, B. 96, N 24.
8. Gloeckner M. H. Z. Erzbergbau und Metallhüttenwesen, 1953, N 3.
9. Hawkes I., Chakravariy P. K. Mine—Quarry Engng., 1961, v. 27, N 7.
10. Fairhurst C. Mine—Quarry Engng., 1961, March, April.
11. Sears I. E. Trans. Cambridge Philosophical Soc., 1909, v. XXI, N II.