Записки Санкт-Петербургского горного института.
Т. 136. СПб, 1993

УДК 622.233.5.001

И.Г.ШЕЛКОВНИКОВ
(Санкт-Петербургский горный ин-т)

К ВОПРОСУ О ПРОЕКТИРОВАНИИ ОПТИМАЛЬНЫХ СИСТЕМ ДЛЯ УДАРНОГО БУРЕНИЯ

Энергия удара широко используется при различных способах бурения твердых горных пород. К таким способам относятся ударно-канатный, ударно-вращательный, вращательно-ударный, ударно-поворотный и вращательный с наложением ударов. С помощью удара производится также отбор проб из мягких пород и грунтов, погружение обсадных труб, забивка свай и т.д. Все перечисленные способы, а значит и процессы бурения, характеризуются трансформацией количества движения ударника mV (m – масса ударника; V – предударная скорость) в импульс силы $\int F(t)dt$ (F – действующая сила; T – период действия силы). Очевидно, что при одном и том же количестве движения сила F тем больше, чем меньше T. Этой классической закономерностью можно пользоваться во всех случаях ударного разрушения (бурения) пород, управляя функцией $F(t)$. Какие же управляющие параметры используются в каждом принципиальном случае и как ими можно влиять на эффективность бурения? Рассмотрим эти вопросы применительно к видам ударного бурения.

При ударно-вращательном, вращательно-ударном, ударно-поворотном и вращательном с наложением ударов способах бурения передача энергии удара происходит по схеме ударник – промежуточное звено (колонковая труба,

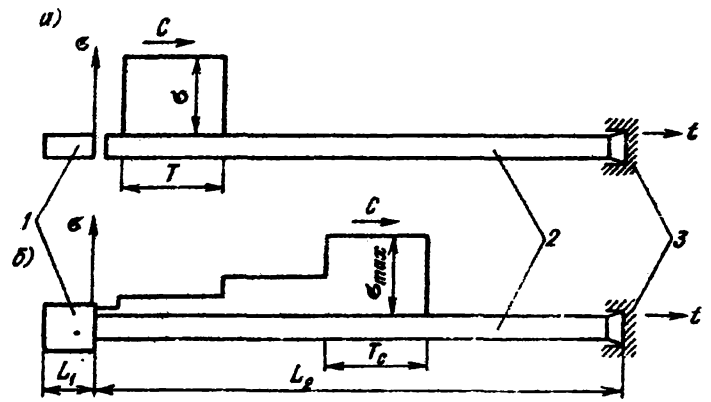


Рис.1. *Схема возникновения в промежуточном звене падающего импульса напряжения сжатия прямоугольной (а) и треугольной (б) формы*
1 – ударник; 2 – промежуточное звено; 3 – горная порода

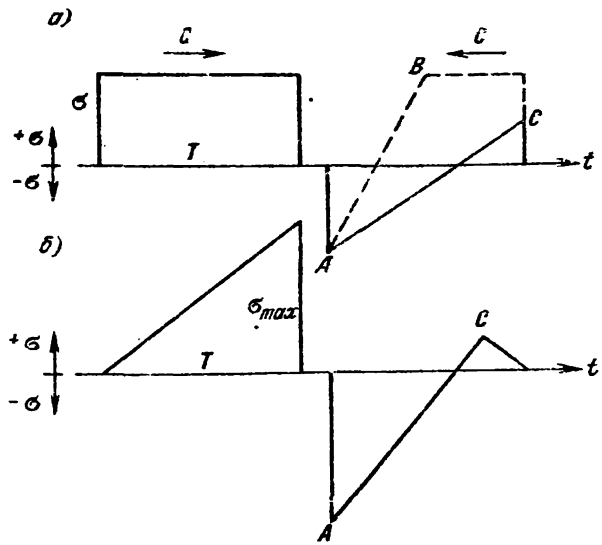


Рис.2. Схема возникновения отраженного импульса напряжения при внедрении в породу инструмента под действием падающего импульса прямоугольного (а) и треугольного (б)

бурильная штанга) – порода; при ударно-канатном – ударный снаряд – порода. По первой схеме передача энергии удара происходит в результате возникновения в промежуточном звене импульса напряжения сжатия (рис.I), который затем вызывает внедрение в породу резцов буровой коронки. Глубина и сила внедрения зависит от формы импульса, его амплитуды и длительности, которые определяются условиями соударения – ударными жесткостями ударника $s_1\rho_1 C_1$ и промежуточного звена $s_2\rho_2 C_2$ (s – сечение соударяющегося элемента; ρ – плотность стали; C – скорость звука в стали) и предударной скоростью V. Так как ударник и промежуточное звено изготавливаются из стали с незначительно отличающимися значениями ρ и C, в дальнейшем будем обозначать их без индексов. Таким образом, форма импульса определяется соотношением $s_1/s_2 = r$.

Установлено, что при $r = 1 \div 3$ и длине промежуточного звена $L_2 \geq L_1$ практически вся или большая часть энергии удара переходит в энергию импульса напряжения. Если $r = 1$, импульс имеет прямоугольную форму с амплитудой $\sigma = \rho CV/2$ и периодом $T = 2L/C$ (рис.I,а); если $r > 1$ – треугольную и $\sigma_{max} = \rho CV/(1+r)$ $T = 2Lr/C$ (рис.I,б). Прямоугольной формы импульса принимается условно в результате интерпретации ступенчатой линии, каждая ступень которой имеет период $T_c = 2L_1/C$. Для инженерных целей такой подход вполне удовлетворителен.

Энергия импульсов прямоугольной и треугольной форм определяется соответственно по формулам

$$W_п = s_2 C\sigma^2 T/E \quad \text{и} \quad W_т = s_2 C\sigma_{max}^2 T/3E,$$

где E – модуль Юнга.

Импульс напряжения сжатия со скоростью звука в стали C достигает противоположного ударяемому конца промежуточного звена и вызывает внедрение в породу разрушающего инструмента с силой соответственно

$$F_п = s_2\rho CV/2 \quad \text{и} \quad F_т = s_2\rho CVr/(1+r).$$

При этом внедрение может достигать величин, определяемых соответственно по формулам

$$h = 2\sigma T/\rho C = 2L_1 V/C; \quad h_T = \sigma_{max} T/\rho C = 2L_1 V r^2/C(1+r)$$

в случаях, если разрушаемая среда не оказывает сопротивления.

Величина внедрения в общем случае зависит от сопротивления породы, связанного с интенсивностью изменения (увеличения) контактной площади резцов коронки, т.е. угла их заточки. Может случиться так, что внедрение прекращается раньше, чем завершается действие импульса (рис.2,АВ) или могло бы еще продолжаться (рис.2,АС), что характеризуется формой отраженного импульса. Для каждой породы можно подобрать такой угол заточки резцов учетом количества в торце коронки, при котором внедрение и эффект разрушения породы наибольший. В равных условиях этот эффект может быть оценен коэффициентом передачи энергии удара η $(W - W_0)/W$, где W и W_0 - соответственно энергия падающего и отраженного импульсов (рис.2). Теоретически наибольшее значение η для прямоугольного импульса равно 0,75, а для треугольного составит 0,50[x]. При этом величина внедрения резцов составляет $h_0' = 0{,}625 h_П$ и $h_0'' = 0{,}5 h_T$ или, подставляя значения $h_П$ и h_T, $h_0' = 1{,}25 L_1 V/C$ и $h_0'' = L_1 V r^2/C(1+r)$.

Для того, чтобы внедрение происходило с оптимальным эффектом, необходимо знать и поддерживать определенный угол заточки резцов в зависимости от размеров и типа коронки и свойств породы. Исследования показывают, что в случае прямоугольного импульса угол заточки

$$\alpha' = 2arctg(0{,}3 s_2 E/[\sigma_g] L_1 l),$$

а в случае треугольного импульса

$$\alpha'' = 2arctg(0{,}5 s_2 E/[\sigma_g] L_1 l r),$$

где $[\sigma_g]$ - динамическая твердость породы; l - длина лезвия коронки.

При ударно-вращательном и ударно-поворотном видах бурения скорость проходки скважины прямо пропорциональна энергии импульса напряжения сжатия, передаваемого через промежуточное звено W, числу ударов в минуту f, коэффициенту использования энергии удара (КПД) η и обратно пропорциональна площади поперечного сечения скважины и энергоемкости разрушения горной породы q,

$$V_{мех} = 240 W f \eta/\pi D^2 q,$$

где D диаметр скважины, мм.

В зависимости от формы импульса, определяемого соотношением площадей сечений ударника и передающего звена, его энергия может быть вычислена по приведенным формулам для $W_П$ и W_T. Оптимальные величины энергии могут

---

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

быть достигнуты при определенном сочетании скорости вращения инструмента и частоты ударов в минуту для данных условий бурения.

Скорость вращения может быть вычислена по формуле

$$n = f\delta/\pi D,$$

где δ – расстояние между осями насечек от смежных ударов, мм, $\delta = 5 \div 10$.

Таким образом, оптимизация и управление процессом ударного бурения путем передачи энергии удара через промежуточное звено может осуществляться по схеме: определение угла заточки породоразрушающего инструмента в зависимости от свойств породы, формы импульса напряжения, сечения промежуточного звена и числа резцов; определение оптимальной скорости бурения $V_{мех}$; поддержание оптимальной скорости бурения путем своевременной замены затупившегося инструмента на новый с соответствующими геометрическими параметрами.

Ударно-канатное бурение характеризуется нанесением удара по забою скважины непосредственно ударным снарядом, включающим долото, ударную штангу и часть ножниц. По существу, процесс соударения следует рассматривать как удар жесткого упругого стержня длиной L с клинообразным лезвием (рис.3) по породе (забою скважины). С точки зрения волновой теории предударная скорость $V = v + u$, где v – массовая скорость частиц в волне напряжения сжатия, распространяющейся от лезвия долота вверх в результате сопротивления породы внедрению; u – скорость внедрения лезвия.

В первый момент при допущении острого лезвия сопротивление внедрению p равно нулю. Затем оно прямолинейно возрастает по мере погружения лезвия в породу. Наибольшая сила, с которой контактная площадка лезвия может воздействовать на породу, выражается формулой $P_{max} = s\rho CV$ где s площадь поперечного сечения стержня – ударной штанги.

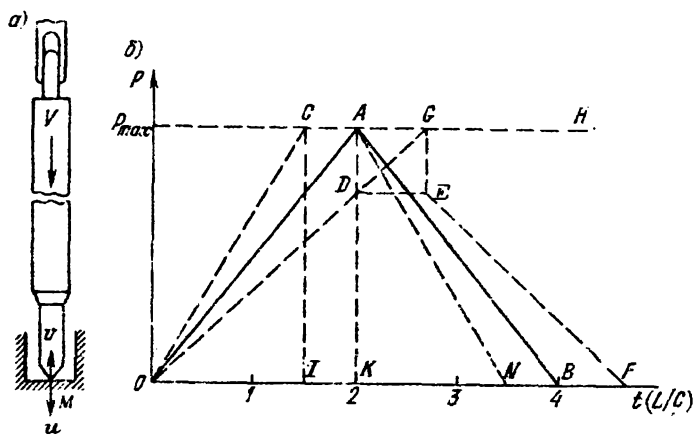


Рис.3. Схема ударного снаряда (а) и график $P(t)$-импульса силы на контактной площадке лезвия долота (б)

При ударном взаимодействии долота с породой возможны три принципиально различных случая:

1. Сопротивление P нарастает с такой интенсивностью, что достигает величины P_{max} по прошествии времени меньше $2L/C$ (OC на рис.3). За этот период отраженная волна растяжения еще не успевает дойти до контактной площадки лезвия и сила воздействия на нее сохраняется некоторое время равной P_{max} (CA на рис.3). Внедрения при этом не происходит. С момента прихода к контакту отраженной волны растяжения (точка A) начинается уменьшение силы P_{max} и заканчивается в момент прихода волны с амплитудой скорости, равной V (точка N). Так как волна растяжения является зеркальным отражением волны сжатия, то $\angle ANK = \angle COI$

2. Сопротивление P достигает максимальной величины P_{max} в момент времени, равный $2L/C$ (точка A). В тот же момент контактной площадки лезвия достигает отраженная волна растяжения. В последующий момент времени происходит уменьшение действующей на контакте силы P по линии AB, являющейся зеркальным отражением линии OA. Очевидно, что с момента уменьшения P (точка A) внедрение лезвия прекращается, а точка B соответствует окончанию удара.

3. Сопротивление P не достигло величины P_{max} за период времени $2L/C$ Углубка лезвия могла бы продолжаться (DG на рис.3), но появившаяся отраженная волна растяжения с амплитудой, нарастающей с такой же интенсивностью, что и у волны сжатия, в каждый новый момент времени уменьшает действующую на контакте силу ровно на столько, на сколько она увеличивается. Таким образом с момента времени $2L/C$ (точка D) внедрение лезвия прекращается. Сопротивление P остается некоторое время постоянным до момента возможного достижения P_{max} (точка E), а затем уменьшается по прямой EF, являющейся зеркальным отражением OD.

Полезная работа производится долотом в период его внедрения. Поэтому во втором случае совершается наибольшая работа, так как энергия образующейся в стержне волны напряжения сжатия, пропорциональная $\int_0^{2L/C} P(t)dt$, определяется треугольником OAK, наибольшим по высоте и основанию по сравнению с треугольниками OCI и ODK, характеризующими величину энергии, переданной в первом и третьем случае.

Наибольшую величину работы долота – переданной энергии – можно найти следующим образом. Так как сила сопротивления на участке внедрения изменяется от 0 до P_{max} прямо пропорционально глубине погружения лезвия h, полезная работа $A = P_{max} h/2$. Учитывая, что скорость внедрения изменяется также прямо пропорционально от 0 до V в течение времени $2L/C$, $h = VL/C$ и, следовательно, $A = mV^2/2$ (m – масса стержня, $m = s\rho L$), т.е. вся кинетическая энергия падающего инструмента в оптимальном втором случае может быть передана горной породе[x].

---

[x] Ранее автором была допущена ошибка в оценке коэффициента передачи энергии падающего долота горной породе.

Для оптимизации процесса ударно-канатного бурения необходимо подбирать долото с оптимальным углом заправки α. Последний определяется из равенства $P_{max}h/2 = mV^2/2$, где $h = P_{max}/2[\sigma_g]\, l\, tg(\alpha/2)$; $P_{max} = s\rho CV$; $m = s\rho L$. В результате

$$\alpha = 2arctg\, sE/[\sigma_g]Ll$$

Оптимальную скорость бурения падающим инструментом можно вычислить по формуле

$$V_{мех} = 2400QHn/\pi D^2Kq,$$

где Q – вес ударной части снаряда, даН; H – высота сбрасывания, м; n – количество ударов в минуту; D – диаметр скважины, мм; K – коэффициент, учитывающий влияние сил трения и гидравлические сопротивления при падении снаряда в буровой жидкости; q – энергоемкость разрушения горной породы, Дж/см^3.

Аналогично ударно-вращательному и ударно-поворотному способам оптимизацию ударно-канатного бурения следует проводить по схеме: определение угла заправки лезвия долота в соответствии с условиями бурения и выбор его необходимого типоразмера; определение оптимальной скорости бурения $V_{мех}$; поддержание оптимальной скорости бурения путем своевременной замены затупленного долота на другое с соответствующими геометрическими параметрами.

Для иллюстрации приведем примеры.

I. Бурение ведется пневмоударником РП-III с энергией единичного удара I50 Дж и частотой ударов в минуту I500 в породе типа гранит с энергоемкостью разрушения I9I Дж/см^3. Энергия удара передается через колонковую трубу наружного и внутреннего диаметра соответственно I02 и 9I мм длиной 2500 мм. Коронка имеет пять клиновидных вставок с лезвиями длиной I5 мм. Необходимо определить: оптимальный угол заточки лезвий вставок коронки; глубину погружения лезвий за один удар; оптимальную скорость бурения; частоту вращения в минуту породоразрушающего инструмента.

Поршень-ударник РП-III в основной своей части представляет толстостенный цилиндр длиной 250 мм с наружным и внутренним диаметрами 80 и 20 мм и площадью поперечного сечения $s_1 = 3,I4(80^2 - 20^2)/4 = 47I0$ мм^2. Площадь сечения колонковой трубы $s_2 = 3,I4(I02^2 - 9I^2)/4$ I667 мм^2; r $s_1/s_2 = 47I0/I667 = 2,8$. Следовательно, при ударе в колонковой трубе возникает треугольный импульс напряжения сжатия.

Оптимальный угол заточки лезвий

$$\alpha'' = 2arctg(0,5s_2E/[\sigma_g]L_1lr) = 2\,arctg\,(0,5\cdot I667\cdot I0^{-2}\cdot 2,I\cdot I0^6/I3050\ x$$

$$x\ 250\cdot I0^{-I}\cdot 5\cdot I5\cdot I0^{-I}\cdot 2,8) = I37^o.$$

Динамическая твердость гранита $[\sigma_g] \approx I305$ МПа*.

---

* По экспериментальным данным автора.

Оптимальная глубина погружения лезвий за один удар

$$h_0'' = L_1 V r^2 / C(1+r) = 250 \cdot 5{,}5 \cdot 2{,}8^2 / 5200(1 + 2{,}8) = 0{,}55 \text{ мм},$$

где V – предударная скорость бойка, определяется на основании энергии единичного удара и массы ударника, равной 9,9 кг.

Оптимальная скорость бурения

$$V_{мех} = 240 W f \eta / \pi D^2 q = 240 \cdot 150 \cdot 1500 \cdot 0{,}50 / 3{,}14 \cdot 113^2 \cdot 191 = 3{,}52 \text{ м/ч}.$$

Частота вращения инструмента

$$n = f \delta / \pi D = 1500 \cdot 10 / 3{,}14 \cdot 113 \approx 42 \text{ об/мин}.$$

2. Ударно-канатное бурение скважины диаметром 248 мм ведется в слабом песчанике с энергоемкостью разрушения q = 118 Дж/см^3 и динамической твердостью $[\sigma_g]$ = 1260 МПа ударным снарядом весом 7500 Н. Высота сбрасывания снаряда H = 1 м при числе сбрасываний в минуту n = 50 и K = 1,7. Необходимо определить: оптимальный угол заправки лезвия долота; глубину погружения лезвия за один удар; оптимальную скорость бурения.

При длине ударной штанги 4 м и диаметре 165 мм площадь ее поперечного сечения s = 204 см^2. В этом случае оптимальный угол заправки лезвия долота

$$\alpha = 2 \operatorname{arctg}(sE / 2[\sigma_g] L l) = 2 \operatorname{arctg}(204 \cdot 2{,}1 \cdot 10^6 / 2 \cdot 12600 \cdot 4 \cdot 10^2 \times$$

$$\times 248 \cdot 10^{-1}) \quad 120^\circ.$$

Глубина погружения лезвия за один удар

$$h = LV/C = 4 \cdot 5{,}8 / 5200 = 4{,}46 \cdot 10^{-3} \text{ м}; \quad h \approx 4{,}5 \text{ мм}.$$

Оптимальная скорость бурения

$$V_{мех} = 2400 QHn / \pi D^2 K q = 2400 \cdot 750 \cdot 1 \cdot 50 / 3{,}14 \cdot 248^2 \cdot 1{,}7 \cdot 118 = 2{,}32 \text{ м/ч}.$$

Выводы

1. Приведенные зависимости позволяют теоретически вычислить основные технологические и технические показатели при ударных видах бурения по параметрам систем ударник – промежуточное звено – порода и падающий инструмент – порода.

2. С помощью полученных формул возможна оптимизация процесса ударного бурения, его управление и последующая автоматизация по оптимальным критериям.