Записки Ленинградского ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции
и ордена Трудового Красного Знамени горного института им. Г.В.Плеханова,
т. XXI, вып. 2, 1976 г.

К ТЕОРИИ РАЗРУШЕНИЯ ТВЕРДЫХ ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ УДАРНОМ БУРЕНИИ

И.Г.ШЕЛКОВНИКОВ

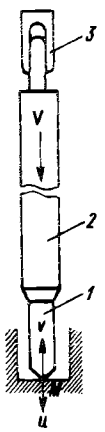


Рис.1. Схема ударного снаряда
1 - долото;
2 - ударная штанга; 3 - ножницы

При ударно-канатном бурении горная порода на забое скважины разрушается падающим долотом (рис.1) с навинченной на него ударной штангой. Потенциальная энергия, запасенная при подъеме снаряда на определенную высоту, расходуется на совершение полезной работы - разрушение горной породы. При этом лезвие падающего долота внедряется в породу, преодолевая ее все возрастающее сопротивление. Очевидно, скорость роста сопротивления внедрению тем больше, чем выше твердость породы и больше контактная площадь лезвия долота. В пластичных породах (глины, суглинки и др.) вся энергия падающего инструмента расходуется на пластическую деформацию; порода сминается за счет пористости и при многократных ударах отделяется, смешивается с водой, образуя шлам.

Процесс разрушения горной породы исследовался такими учеными, как В.А.Гуськов, Долежалек, Н.С.Успенский, В.Ф.Безпяткин, И.С.Покровский и др. Все они взаимодействие долота с породой рассматривали с позиций статики, т.е. не учитывали характер изменения силы удара во времени и волновые явления, сопровождающие удар бурового снаряда по массиву горной породы. Основной теоретической предпосылкой являлось условие равенства кинетической энергии падающего снаряда работе разрушения породы и деформации ударной части инструмента.

Из уравнения, выражающего это условие, были получены формулы, связывающие зависимость глубины внедрения лезвия долота с величиной наибольшей силы удара снаряда о забой. Эти формулы послужили теоретическим обоснованием расчета производительности ударно-канатного бурения скважин в различных горных породах. Значение наибольшей силы с помощью этих формул определяется приблизительно, исходя из значения импульса, равного количеству движения снаряда в момент касания им поверхности забоя. Истинную силу

удара о забой определить невозможно, так как по формулам классической механики, без привлечения волновой теории, нельзя вычислить время, в течение которого длится удар. Время удара можно установить экспериментальным путем, но это весьма затруднительно в реальных условиях бурения скважин. Такие объективные неточности вносят известные допущения, которые снижают ценность упомянутых формул. В частности, они недостаточно раскрывают механизм взаимодействия лезвия долота с породой в период внедрения и поэтому не могут служить для теоретического обоснования оптимизации процесса бурения.

Рассмотрим процесс взаимодействия лезвия падающего долота с породой с позиций элементарной волновой теории. В начальный момент внедрения лезвие долота не испытывает большого сопротивления горной породы и скорость его мало отличается от предударной. По мере углубления сопротивление породы внедрению начинает возрастать, а скорость перемещения лезвия убывает. Это изменение скорости нижней части ударного снаряда не может распространяться мгновенно на всю его длину, а перемещается по нему в виде упругой волны напряжения сжатия. Достигнув верхнего конца снаряда, она отражается и начинает распространяться обратно к долоту как волна растяжения, уменьшая при этом скорость падения снаряда на величину, равную удвоенному значению массовой скорости частиц в ней.

Волна напряжения сжатия возникает непрерывно при внедрении лезвия долота, поэтому непрерывно происходит и ее отражение от противоположного конца снаряда, все больше уменьшая скорость его падения. Лезвие падающего долота также внедряется в массив со все уменьшающейся скоростью вследствие возрастания сопротивления породы, которая разрушается путем смятия и выкола. Если порода обладает достаточной упругостью, в ней возникают волны напряжения сжатия, энергия которых затрачивается на ее разрушение.

Внедрение долота происходит до тех пор, пока волна сжатия, отражающаяся от верхнего конца снаряда, не погасит скорость падения. Первым останавливается верхний конец снаряда, когда массовая скорость частиц в волне напряжения сжатия v достигнет половины величины предударной скорости V Но удар еще продолжается некоторое время, необходимое для снятия полностью отраженной волной растяжения давления на контакте лезвия долота с породой.

Найдем на основании элементарной волновой теории количественные соотношения между начальными условиями соударения (предударной скоростью, размерами ударной части снаряда, характеристикой горной породы) и результатами удара (глубиной внедрения лезвия долота, временем удара, наибольшей силой удара). При этом ставится задача использовать энергию падающего снаряда оптимальным образом.

Пусть падающее долото ударяет по забою со скоростью V . Наибольшая сила, с которой контактная площадка лезвия может воздействовать на горную породу,

$$P_{max} = A\rho cV, \qquad (I)$$

где A – площадь поперечного сечения снаряда (ударной штанги); ρ и c – плотность и скорость звука, характеризующие материал снаряда.

Очевидно, что такой же величины может достигнуть и сопротивление породы внедрению лезвия. Будем считать прямолинейными зависимости сопротивления внедрению от времени и глубины погружения лезвия.

В момент касания лезвием забоя от точки M (см. рис.I) начинает распространяться вверх по снаряду волна напряжения сжатия с линейно возрастающей массовой скоростью частиц v. При этом долото внедряется с линейно уменьшающейся скоростью u. Эти скорости связаны с предударной скоростью V соотношением

$$V = v + u. \qquad (2)$$

При ударном взаимодействии долота с горной породой возможны три принципиально различных случая (рис.2).

I. Сопротивление внедрению P нарастает с такой интенсивностью, что достигает величины P_{max} по прошествии времени $t < \frac{2L}{c}$, где L – длина снаряда (прямая OC). 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} (отрезок CA). Внедрения при этом не происходит.

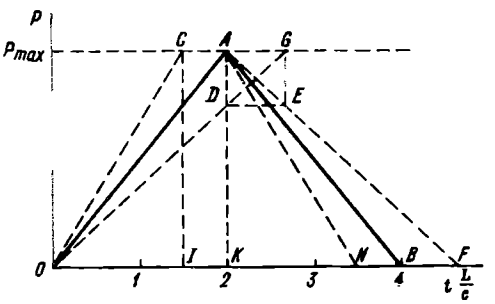


Рис.2. График P-t импульса силы на контактной площадке лезвия долота

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 внедрению P достигло максимальной величины P_{max} в момент времени, равный $\frac{2L}{c}$ (точка A). В тот же момент контактной площадки лезвия достигла отраженная волна растяжения. В последующий период 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 внедрению P не достигло своей максимальной величины P_{max} за период времени $\frac{2L}{c}$. Лезвие могло бы углубляться дальше (отрезок DG), но появившаяся отраженная волна растяжения с нарастающей амплитудой такой же интенсивности, 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 $\frac{2L}{c}$ (точка D) внедрение лезвия прекращается. Величина P остается некоторое время постоянной до момента возможного достижения P_{max} (точка E),

а затем уменьшается по прямой EF, являющейся зеркальным отражением OD

Анализируя описанные случаи взаимодействия падающего долота с горной породой, видим, что оптимальным из них является второй. Действительно, из трех треугольников OCI, OAK и ODK, определяющих величину полезной работы, совершаемой долотом при внедрении лезвия, наибольшим является треугольник OAK соответствующий второму случаю. При этом его высота $AK = CI > DK$

Интенсивность увеличения сопротивления внедрению P в одной и той же горной породе зависит от изменения приведенной контактной площади s с глубиной внедрения. В данном случае приведенной контактной площадью считается площадь поперечного сечения лезвия, совпадающая с поверхностью забоя:

$$s = 2lh\,tg\frac{\alpha}{2}, \tag{3}$$

где l – длина лезвия; h – глубина внедрения; α – угол приострения лезвия.

Из рис.2 видно, что в оптимальном случае 50% всей энергии может быть затрачено на полезную работу. Другая половина, соответствующая треугольнику ABK расходуется на упругую деформацию снаряда и отскок.

Глубина внедрения лезвия долота

$$h = \frac{P_{max}}{2[\sigma_д]\,l\,tg\frac{\alpha}{2}}, \tag{4}$$

где $[\sigma_д]$ – динамическая твердость горной породы, определяемая опытным путем.

Подставив в формулу (4) выражение P_{max} (I), получим

$$h = \frac{A\rho cV}{2[\sigma_д]\,l\,tg\frac{\alpha}{2}}. \tag{5}$$

Запишем работу, затрачиваемую на разрушение породы, в виде

$$W_0 = \frac{1}{2}P_{max}h. \tag{6}$$

Подставив в формулу (6) выражения (I) и (5), получим

$$W_0 = \frac{A^2\rho^2c^2V^2}{4[\sigma_д]\,l\,tg\frac{\alpha}{2}} \tag{7}$$

Энергия падающего долота

$$W = \frac{mV^2}{2}, \tag{8}$$

где m – масса долота и ударной штанги, равная примерно $AL\rho$.

Учитывая, что в оптимальном случае 50% энергии может быть использовано на полезную работу, приравняем

$$\frac{mV^2}{4} = W_0 . \qquad (9)$$

Подставив в формулу (9) вместо W_0 его выражение (7) и заменив произведением $AL\rho$ получим

$$tg\frac{\alpha}{2} = \frac{A\rho c^2}{[\sigma_д]lL} .$$

Заменив ρc^2 на E окончательно запишем

$$\alpha = 2arctg\frac{AE}{[\sigma_д]lL} , \qquad (10)$$

где α – угол приострения лезвия долота, определяющий оптимальный процесс ударно-канатного бурения.

Подставив равенство (10) в формулу (4), получим выражение для оптимальной глубины внедрения лезвия в породу

$$h_0 = \frac{VL}{2c} \qquad (11)$$

Определим полное время удара долота по забою скважины $T_п$ для всех случаев соударения. Очевидно (см. рис.2), что в оптимальном случае

$$T_п = \frac{4L}{c} \qquad (12)$$

На основании принятой прямолинейной зависимости $P(t)$ и $P(h)$ составим пропорцию

$$h_0 — \frac{2L}{c}$$

$$h — t ,$$

откуда

$$t = \frac{h}{h_0}\frac{2L}{c} . \qquad (13)$$

В данном изложении время удобнее измерять интервалами, равными $\frac{L}{c}$ поэтому выражение (13) запишем в виде

$$\tau = \frac{2h}{h_0} , \qquad (14)$$

где τ – время прохождения звуковой волной расстояния L

Подставив в формулу (14) выражения (5) и (11), получим

$$\tau = \frac{2AE}{[\sigma_д]Llt\frac{\alpha}{2}} \qquad (15)$$

В первом случае соударения $\tau < 2$. Отрезок OI соответствует времени τ ; отрезок IK – времени $(2 - \tau)$. Тогда из геометрической формы импульса $OCAN$ следует:

$$T_{п} = 2\left(\frac{2-\tau}{2}+\tau\right)\frac{L}{c} = \left(2-\frac{2AE}{[\sigma_{д}]Ll\,tg\frac{\alpha}{2}}\right)\frac{L}{c}. \qquad (16)$$

В третьем случае $\tau > 2$. Рассуждая аналогично предыдущему, находим

$$T_{п} = 2\left(\frac{\tau-2}{2}+\tau\right)\frac{L}{c} = \left(\frac{6AE}{Ll\,tg\frac{\alpha}{2}[\sigma_{д}]}-2\right)\frac{L}{c}. \qquad (17)$$

Очевидно, что время, вычисляемое по формулам (12), (16) и (17), выражается в одних и тех же единицах физических величин.

Таким образом, анализ процесса взаимодействия падающего долота с горной породой на основе элементарной волновой теории дает возможность определить аналитически наибольшую силу на контактной площадке лезвия P_{max}, глубину внедрения лезвия h, время продолжительности удара $T_{п}$ и найти их значения, соответствующие оптимальным условиям бурения.