

УДК 622.235

И.В. Клишин

ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССА РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД МЕХАНИЧЕСКИМ СПОСОБОМ

Разрушение горных пород занимает ведущее место в технологии и организации добычи нерудных строительных материалов, в том числе камня и щебня. Некоторые операции процессов разрушения горных пород при добыче строительных нерудных материалов в каменных карьерах идентичны с технологией механизации безвзрывных горных работ. Производственный опыт доказал, что механическое рыхление позволяет получить сравнительно однородную крупность раздробленного скального грунта, чем при рыхлении взрывами, к тому же повышается безопасность работ.

Считая безвзрывную разработку скалы под водой экологически перспективной и при небольшой прочности грунта альтернативной буровзрывному методу, рассмотрим технологию механического дробления скалы более подробно.

Чтобы определить технологические параметры механического дробления грунта скалодробителем, планируемое количество ударов молота и для получения требуемой глубины рыхления z при известной прочности скального грунта f , плановые перемещения рабочего органа на карте разрушения l и производительность скалодробителя $П$, воспользовались информацией о разрушении скалы при погружении рабочего органа (долота) на требуемую глубину и затем руководствовались статической теорией удара, которая исходит из предположения, что при ударе тел возникают такие же условия, как и при статическом сжатии этих тел, при этом энергия возникающих колебаний не учитывается, а учитываются только деформации, развивающиеся в месте удара.

В последние годы на скалоуборочных работах в строительстве широко распространение получил механический способ разрушения прочных грунтов с помощью скалодробителей с погружаемым рабочим органом. В состав таких скалодробителей входит базовая машина в виде экскаватора с прямой или обратной лопатой, оборудованная молотами пневматического, гидравлического либо электрического действия. В строительной практике уже накоплен достаточный опыт применения машин ударного действия при разработке прочных, в том числе мерзлых, грунтов, но все еще отсутствует надежный метод расчета технологических параметров таких скалодробителей. Ниже рассматривается технология работы скалодробителя на базе экскаватора Cat.325C (Caterpillar), оборудованного гидравлическим молотом Н140с массой 1700 кг с частотой ударов 320 – 560 ударов в минуту и энергией единичного удара около 4745 Дж.

Чтобы определить технологические параметры скалодробителя: планируемое количество ударов молота n для получения требуемой глубины рыхления z при известной прочности скального грунта f , плановые перемещения рабочего органа на карте разрушения l и производительность скалодробителя $П$, необходимо знать параметры разрушения ореола при погружении рабочего органа (долота) на требуемую глубину.

Для определения параметров разрушения воспользовались статической теорией удара, которая исходит из предположения, что при ударе тел возникают такие же условия, как и при статическом сжатии этих тел, при этом энергия возникающих колебаний не учитывается, а учитываются только деформации, развивающиеся в месте удара.

Для использования математического аппарата статической теории удара автор рассматривал горную породу как сплошную упругую среду. Правомочность такой гипотезы подтверждена многими специалистами.

Анализируя свойства горных пород, К.В. Руппнейт указывал, что «...при решении горные породы возможно рассматривать как сплошные среды». Тогда процесс ударного разрушения описывается системой уравнений: уравнениями равновесия, уравнениями совместности деформаций и законом, связывающим напряжения и деформации. При такой постановке задачи достаточно найти характер распределения напряжений при вдавливании жесткого конуса в упругое полупространство, а затем и сам объем разрушения (рис. 1, 2). Решение лучше выполнять в цилиндрических координатах, выбрав их таким образом, чтобы вертикальная ось совпадала с осью жесткого конуса (наконечника долота).

При таких условиях в силу симметрии компоненты смещения и напряжения не зависят от угла θ , поэтому напряжение в любой точке будет определяться четырьмя компонентами σ_r , σ_z , σ_θ и τ_{rz} . Компонентов вектора смещения будет два: в радиальном напряжении u_r и в направлении оси симметрии u_z .

Из теории упругости известно, что характер распределения напряжений при симметричном вдавливании штампа в упругое полупространство определяется уравнением:

$$\Delta^2(\Delta^2 \varphi) = 0, \quad (1)$$

где φ – функция напряжения, через которую выражены все четыре компонента напряжения;

$$\Delta^2 = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} - \text{оператор Лапласа в ци-}$$

линейных координатах.

Вспользуемся решением (1), полученным Снеддоном для случая симметричного вдавливания жесткого конуса в упругое полупространство. На рис. 1 и 2 видно, что поверхность конуса и деформированная поверхность упругого полупространства взаимодействуют между собой в нижней точке конуса и окружность радиусом a_k .

При решении уравнения (1) приняты следующие граничные условия:

в области $r < a_k$ задана компонента смещения z точек первоначального положения поверхности упругой среды ($z = 0$); вне этой области нормаль-

ная компонента напряжения равна 0.

Касательные напряжения отсутствуют во всех областях границы:

$$\begin{aligned} u_z &= [u_z(r)]_{z=0} \quad 0 \leq r \leq a_k; \\ \sigma_z &= 0 \quad r > a_k; \\ \tau_n &= 0 \quad 0 \leq r \leq \infty. \end{aligned} \quad (2)$$

Кроме того, чтобы решения бигармонического уравнения были такими, необходимо чтобы компоненты напряжения и смещения стремились к нулю при стремлении $r \rightarrow \infty$.

Решение уравнения (1) выполнено с введением трансформанты Ханкеля и превращением би-

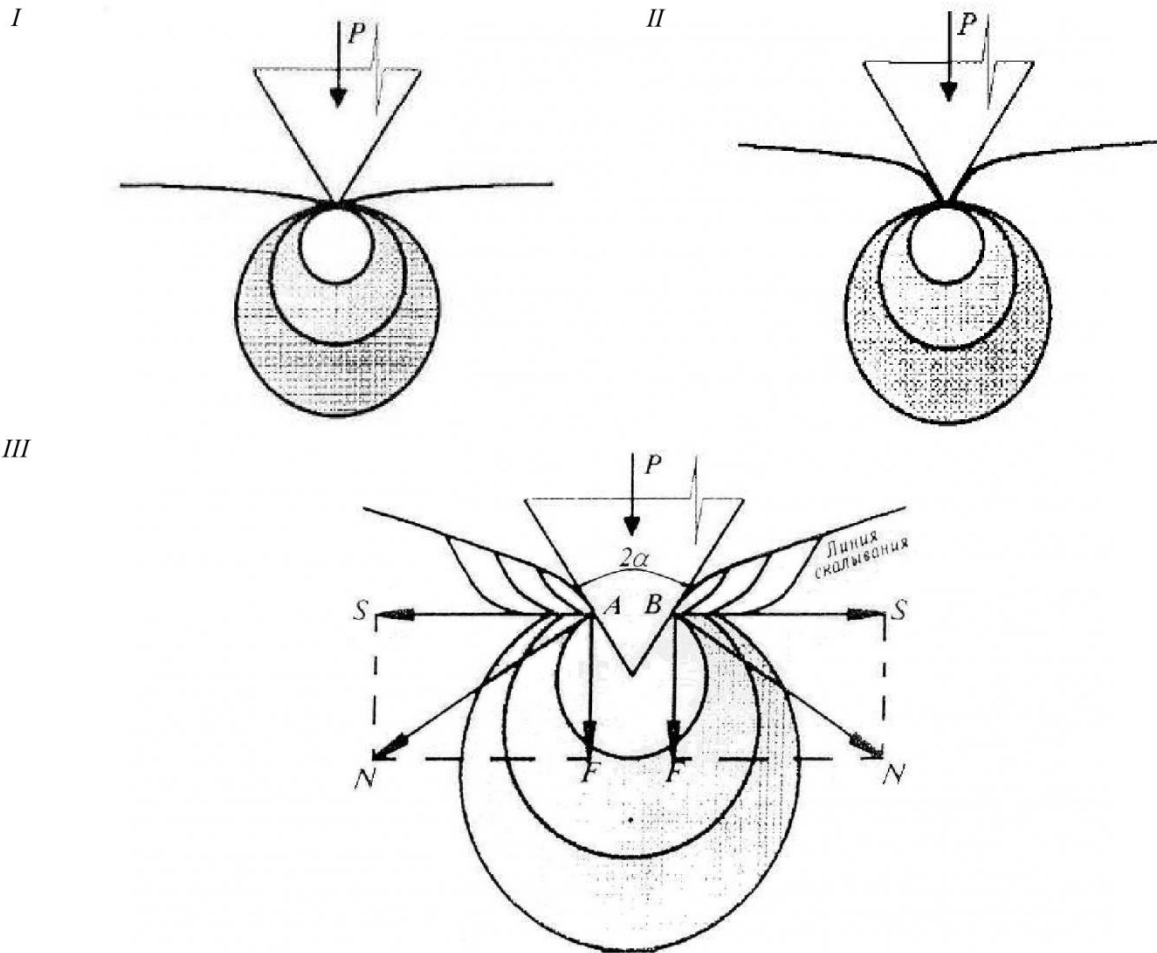


Рис. 1. Этапы развития деформации в горной породе при динамическом внедрении конуса

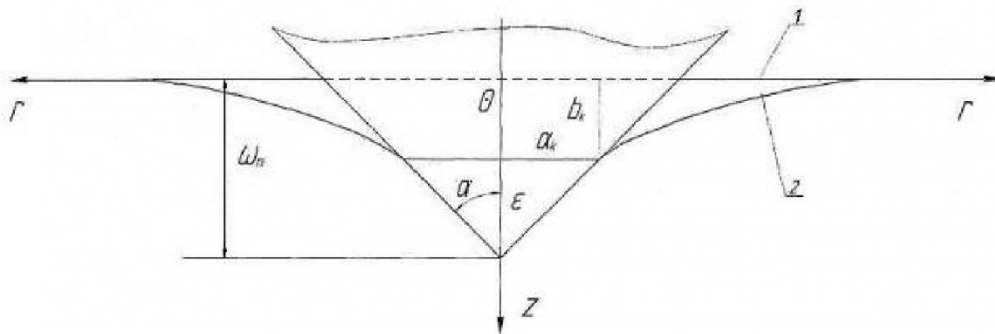


Рис. 2. Схема вдавливания жесткого конуса в сплошное упругое пространство

гармонического уравнения в обыкновенное дифференциальное уравнение второго порядка. Для удобства решения введены относительные координаты:

$$\xi = \frac{z}{a_k}; p = \frac{r}{a_k}, \quad (3)$$

и следующие обозначения:

$$b = \varepsilon \left(\frac{\pi}{2} - 1 \right); a_k = \varepsilon \cdot \operatorname{tg} \alpha; r^2 = 1 + \xi^2;$$

$$\xi \cdot \operatorname{tg} \theta = 1; R^4 (p^2 + \xi^2 - 1)^2 = 4 \xi^2; \quad (4)$$

$$(p^2 + \xi^2 - 1) \cdot \operatorname{tg} 2\varphi = 2 \xi^2.$$

В результате получены зависимости для всех четырёх компонентов напряжения:

$$\frac{a_k \sigma_\theta}{\varepsilon E} = \frac{1}{2(1-\mu^2)} (k_1^0 + \xi \cdot k_2^0);$$

$$\frac{a_k \sigma_\theta}{\varepsilon E} = \frac{1}{2(1-\mu^2)} \left(2\mu \cdot k_1^0 + \frac{1-2\mu}{p} k_2^0 - \frac{\xi}{p} k_1^0 \right); \quad (5)$$

$$\frac{a_k \cdot (\sigma_r + \sigma_\theta + \sigma_z)}{\varepsilon E} = -\frac{1}{1-\mu} k_1^0;$$

$$\frac{a_k \tau_n}{\varepsilon E} = -\frac{\xi}{2(1+\mu)^2} k_2^0,$$

где

$$k_1^0(p, \xi) = \frac{1}{2} \ln \left[\frac{R^2 + 2Rr \cos(\theta - \varphi) + r^2}{(\xi + \sqrt{p^2 + \xi^2})^2} \right];$$

$$k_2^0(p, \xi) = \frac{1}{\sqrt{p^2 + \xi^2}} - \frac{\cos \varphi}{R};$$

$$k_1^1(p, \xi) = \frac{1}{p} \left(\sqrt{p^2 + \xi^2} - R \cos \varphi \right);$$

$$k_2^1(p, \xi) = \frac{1}{p} \left[\frac{r}{R} \cos(\theta - \varphi) - \frac{\xi}{\sqrt{p^2 + \xi^2}} \right];$$

$$k_0^1(p, \xi) = \frac{1}{2} \left[p \cdot k_1^0(p, \xi) + \frac{1}{p} (1 - R \sin \varphi) - \xi \cdot k_1^1(p, \xi) \right]$$

.Задавая координатами p и ξ и вычисляя значения всех других величин, входящих в формулы, можно вычислить их значения в любой точке.

Согласно объединённой теории прочности Давиденкова-Фридмана в случае сложного напряжённого состояния выбор теории прочности можно сделать по значению коэффициента, который определяется по формуле:

□ Автор статьи:

Клишин
Игорь Валентинович
– канд. техн. наук, соискатель ИГД СО
РАН),
e-mail: veryom@misd.nsc.ru

$$m' = \frac{\tau_{\max}}{\sigma_p^n} = \frac{0,5(\sigma_1 - \sigma_3)}{[1 + \mu(\sigma_1 - \sigma_3)]}. \quad (6)$$

При $m' \geq 0,5$ используется теория максимальных касательных напряжений и при $m' < 0,5$ – теория наибольших удлинений.

В нашем случае $m' > 0,5$ всегда, следовательно, разрушающими будут максимальные касательные напряжения.

Из экспериментальных данных известно, что разрушения при подобных нагружениях происходят вдоль поверхностей максимальных касательных напряжений. При этом значения максимального касательного напряжения определяется половиной алгебраической разности максимальной и минимальной компонент главных напряжений. Главные напряжения определяются как корни характеристического кубического уравнения:

$$\begin{vmatrix} \sigma - \sigma_k & 0 & \tau_n \\ 0 & \sigma - \sigma_\theta & 0 \\ \tau_n & 0 & \sigma - \sigma_r \end{vmatrix} = 0$$

и равны:

$$\sigma_\theta = \frac{1}{2}(\sigma_r - \sigma_z) \pm \left[\left(\frac{1}{2}\sigma_r - \frac{1}{2}\sigma_z \right)^2 + \tau_n^2 \right]^{\frac{1}{2}}.$$

Зависимость максимальных касательных напряжений от относительных:

$$a_k = 0,64 \omega_n \operatorname{tg} \alpha. \quad (7)$$

Используя зависимость (7), кривые $\tau_{\max} = \varphi(p, \xi)$ можно перестроить в кривые с абсолютными координатами r и z :

$$r = a_k p; z = a_k \xi. \quad (8)$$

Для определения объема разрушенной породы с заданным пределом прочности, необходимо из семейства кривых выбрать кривую τ_{\max} , соответствующую этому пределу, и перестроив её по формуле (8) в кривую $\tau_{\max} = \varphi(\omega)$, возникшей под влиянием внедрения конуса, получить очертания разрушаемого объема. В этом случае r и z будут координатами точек кривой, которая ограничит область разрушенной породы.

Таким образом, чтобы определить параметры разрушения горных пород при механическом способе, следует учитывать деформации, развивающиеся в месте удара.