

Г.Г. Каркашадзе, Н.Г. Высотин

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ТРЕНИЯ МЕЖДУ ТВЕРДЫМ СПЛАВОМ И ГОРНОЙ ПОРОДОЙ НА ГЛУБИНУ ВНЕДРЕНИЯ ИНДЕНТОРА ЭЛЛИПТИЧЕСКОЙ ФОРМЫ ПРИ ЕДИНИЧНОМ УДАРЕ

Описана аналитическая модель внедрения твердого зуба в горную породу, учитывающая влияние силы трения при внедрении зуба в породу и его геометрическую форму. Показано существенное влияние коэффициента трения на глубину внедрения. Как свидетельствуют результаты расчетов применение эллиптического зуба с низким коэффициентом трения позволяет увеличить глубину внедрения при единичном ударе почти в два раза, по сравнению со сферическим.

Ключевые слова: горная порода, твердый сплав, коэффициент трения, энергия удара, форма индентора, глубина внедрения.

Аналитическая модель внедрения твердого зуба в горную породу, описанная в работах проф. Г.М. Крюкова [1], отражает силу сопротивления, пропорциональную сечению Миделя в плоскости зоны контакта породы и зуба

$$F_1 = \sigma_{\text{md}} S_{\text{md}}(h), \quad (1)$$

где F_1 – сила сопротивления; σ_{md} – прочность мелкодисперсного разрушения по Г.М. Крюкову

$$\sigma_{\text{md}} = 13 \cdot [1 + 0,079 \cdot (f - 15) + 0,0019 \cdot (f - 15)^2] \cdot 10^8$$

f – коэффициент крепости по Протодьяконову; $S_{\text{md}}(h)$ – сечение Миделя; h – глубина внедрения.

В работе [1] описаны расчетные зависимости для частного случая внедрения сферического зуба, которые удовлетворительно согласуются с практикой. Однако в модели Г.М. Крюкова не описано влияние силы трения при внедрении зуба в породу, величина которой может быть существенной и ее учет позволяет получить более достоверную информацию о механизме разрушения. Одновременно рассмотрим также более общую задачу о внедрении зуба эллиптической формы.

Сила трения скольжения в соответствии с законом Кулона, направлена перпендикулярно силе нормального давления породы на поверхность зуба

$$dF_p = \mu dF \quad (2)$$

Проекция этой силы трения на направление движения при внедрении зубка в породу составляет

$$dF_2 = dF_p \cdot \cos \alpha \quad (3)$$

где α – угол наклона нормальной силы к направлению внедрения.

Следовательно,

$$dF_2 = \mu \sigma_{\text{md}} ds \cdot \cos \alpha, \quad (4)$$

где ds – площадь элементарного контакта.

Площадь контакта по кольцу радиусом r и высотой dh под углом α равна

$$ds = 2\pi r \frac{dh}{\cos \alpha} \quad (5)$$

Подставив (5) в (4), получим

$$dF_2 = 2\pi\mu\sigma_{md} r dh \quad (6)$$

Уравнение эллипсоида вращения полуосами a и c имеет вид

$$\frac{r^2}{a^2} + \frac{z^2}{c^2} = 1 \quad (7)$$

Следовательно, сечение Миделя, соответствующее горизонтальному сечению эллипсоида, внедренного на глубину h , составляет

$$S_{md}(h) = \pi a^2 \left(1 - \frac{(c-h)^2}{c^2} \right) = \pi \frac{a^2}{c^2} (2ch - h^2) \quad (8)$$

Подставив (8) в (6), после интегрирования по глубине внедрения получим

$$F_2 = \mu\sigma_{md} S_{md}^0(h) \quad (9)$$

где

$$S_{md}^0(h) = 2\pi a \int_0^h \sqrt{1 - \frac{(c-z)^2}{c^2}} dz \quad (10)$$

После интегрирования (10) получим

$$S_{md}^0(h) = \pi ac \left[\frac{h-c}{c} \sqrt{1 - \left(\frac{h-c}{c} \right)^2} + \arcsin \frac{h-c}{c} + \frac{\pi}{2} \right] \quad (11)$$

В соответствии со вторым законом Ньютона уравнение движения эллипсоидального зuba массой m в течение времени t с учетом силы трения имеет вид

$$m \frac{d^2h}{dt^2} = -\sigma_{md} S_{md}(h) - \mu\sigma_{md} S_{md}^0(h) \quad (12)$$

Преобразуем уравнение относительно глубины внедрения

$$m \frac{dV}{dh} V = -\sigma_{md} S_{md}(h) - \mu\sigma_{md} S_{md}^0(h) \quad (13)$$

Выполним интегрирование методом разделения переменных

$$\int_{V_0}^0 m V dV = - \int_0^{h_m} \sigma_{md} S_{md}(h) dh - \int_0^{h_m} \mu\sigma_{md} S_{md}^0(h) dh \quad (14)$$

h_m – максимальная глубина внедрения; V_0 – скорость зуба в начальный момент удара.

В результате интегрирования (14) получим

$$\frac{mV_0^2}{2} = E_1 + E_2 + E_3 + E_4 \quad (15)$$

где E_1 , E_2 , E_3 , E_4 – параметры отражающие влияние прочностных свойств породы, силы трения и геометрию эллипсоида вращения на глубину внедрения:

$$E_1 = \pi \sigma_{md} \frac{a^2}{c^2} \left[ch_m^2 - \frac{h_m^3}{3} \right] \quad (16)$$

$$E_2 = -\frac{\mu \sigma_{md} \pi a c^2}{3} \left[1 - \left(\frac{h_m - c}{c} \right)^2 \right]^{3/2} \quad (17)$$

$$E_3 = \pi a \mu \sigma_{md} c \left[\sqrt{h_m (2c - h_m)} + (c - h_m) \arcsin \left(1 - \frac{h_m}{c} \right) - \frac{\pi c}{2} \right] \quad (18)$$

$$E_4 = \pi a \mu \sigma_{md} c \frac{\pi h_m}{2} \quad (19)$$

По разработанной модели выполнены расчеты и получены новые интересные результаты относительно влияния коэффициента трения и формы эллипсоида вращения на глубину внедрения.

На рис. 1 представлена графическая зависимость необходимой энергии единичного удара, требуемой для внедрения сферического зuba определенную глубину. Типичный коэффициент трения твердого сплава о породу оценивается величиной $\mu = 0,5$ [3]. Предположим, что при целенаправленном проектировании бурового инструмента величину коэффициента трения понизили до величины 0,1. Аналогичная зависимость представлена на рис. 2 для зuba в виде эллипсоида вращения с отношение полусей равным $\varepsilon = 2$. Видно, что в рассмотренных случаях прогнозируется увеличение глубины внедрения.

В таблице систематизированы результаты расчетов при энергиях единичного удара в пределах 20–40 Дж.

Как свидетельствуют расчеты, при энергиях удара 20–40 Дж увеличение глубины внедрения в результате понижения коэффициента трения с величины

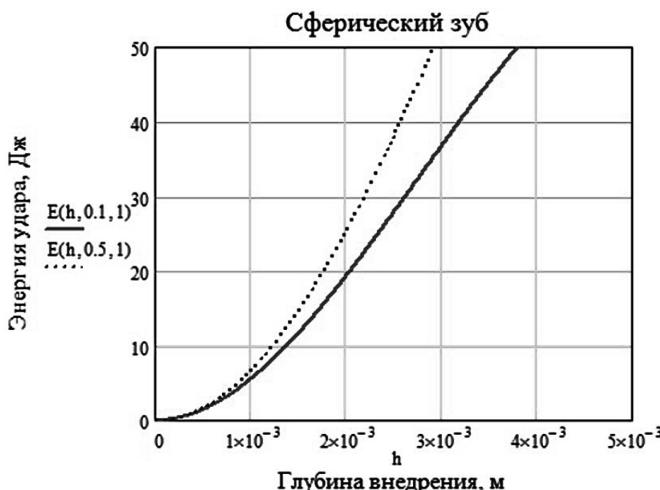


Рис. 1. Энергия удара и глубина внедрения сферического зуба при разных коэффициентах трения: $f = 10$; $a = 2,5$ мм; 1) $\mu = 0,5$; 2) $\mu = 0,1$

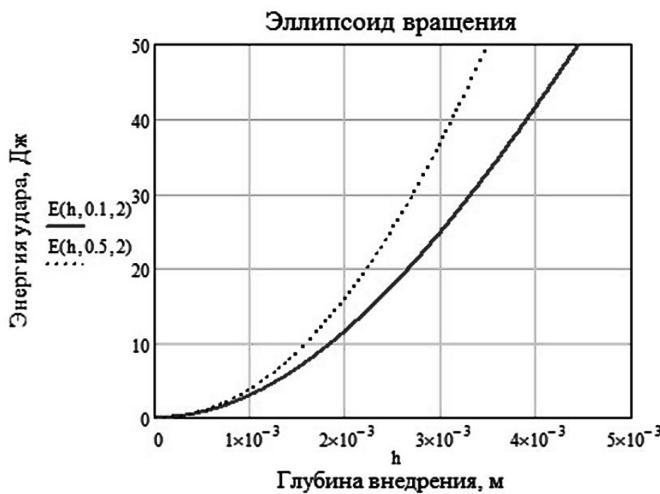


Рис. 2. Энергия удара и глубина внедрения эллиптического зуба $\varepsilon = 2$ ($a = 2, 5$ мм) $f = 10$; $a = 2,5$ мм; $\varepsilon = 2$; 1) $\mu = 0,5$; 2) $\mu = 0,1$

Результаты расчета глубины внедрения зуба

Исходные данные: крепость породы $f = 10$;					
№ п/п	Энергия единичного удара, Дж	Поперечный радиус зуба, мм	Эллиптичность зуба, ε	Коэффициент трения между зубом и породой	Относительная глубина внедрения зуба
1	20	2,5	1 (сфера)	0,5	1
2				0,1	1,17
3			2	0,5	1,28
4				0,1	1,53
5	40	2,5	1 (сфера)	0,5	1
6				0,1	1,2
7			2	0,5	1,24
8				0,1	1,52

0,5 до величины 0,1 составляет 53%. Причем, изменение только формы зуба при переходе от сферы к эллипсоиду приводит к увеличению глубины внедрения на 26%. Что касается суммарного действия обеих факторов приводит к увеличению глубины внедрения в 1,91 раза.

На основании выполненного анализа можно утверждать, что с учетом всех допущений относительно наихудшего (сферический зуб с высоким коэффициентом трения) и наилучшего вариантов (эллиптический зуб с низким коэффициентом трения) прогнозируется существенное увеличение глубины внедрения при единичном ударе почти в два раза, что представляет большой практический интерес.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Крюков Г.М. Физика разрушения горных пород при бурении и взрывании: Учебник для вузов. Т. 1. – М.: Изд. «Горная книга», 2006. – 320 с.
2. Каркашадзе Г.Г. Учебное пособие для самостоятельной работы при решении задач по разрушению горных пород. – М.: МГТУ, 2009. – 63 с.
3. Барон Л.И. Характеристики трения горных пород. – М.: Наука, 1987. **ГИАБ**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Каркашадзе Гиоргий Григорьевич – доктор технических наук, профессор, e-mail: g-karkashadze@mail.ru,

Высотин Николай Геннадьевич – студент, e-mail: kalgani@yandex.ru,
МГИ НИТУ «МИСиС».

UDC 622.235

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF THE FRICTION COEFFICIENT BETWEEN THE SOLID ALLOY AND ROCK TO A DEPTH OF PENETRATION OF THE INDENTER ELLIPTICAL SHAPE WITH A SINGLE BLOW

Karkashadze G.G., Doctor of Technical Sciences, Professor, e-mail: g-karkashadze@mail.ru,
Vysotin N.G., Student, e-mail: kalgani@yandex.ru,
Moscow Mining Institute, National University of Science and Technology «MISiS», 119049, Moscow, Russia.

Described analytical model solid penetration of the indenter into the rock, which takes into account the effect of the friction force and its geometry. A significant effect of friction coefficient on depth of penetration. As the results of the calculations use elliptic indenter with a low coefficient of friction increases the depth of penetration at a single stroke nearly doubled, compared with spherical.

Key words: rock, indenter, friction, impact energy, the geometry of the indenter penetration depth

REFERENCES

1. Kryukov G.M. *Fizika razrusheniya gornykh porod pri burenii i vzryvaniyu*: Uchebnik dlya vuzov. T. 1 (Физика разрушения горных пород при бурении и взрывании: Textbook for high schools, vol. 1), Moscow, Izd. «Gornaya kniga», 2006, 320 p.
2. Karkashadze G.G. *Uchebnoe posobie dlya samostoyatel'noi raboty pri reshenii zadach po razrusheniyu gornykh porod* (Учебное пособие для самостоятельной работы при решении задач по разрушению горных пород), Moscow, MGGU, 2009, 63 p.
3. Baron L.I. *Kharakteristiki treniya gornykh porod* (Характеристики трения горных пород), Moscow, Nauka, 1987.



**Масштабно мыслящий инженер обязан помнить,
что полное уничтожение жизни на Земле – не шутка.**