УДК 622.35(075.80)

Т.В. Гребенюк, аспір.
Національний технічний університет України «КПІ»

ІНЖЕНЕРНА ФОРМУЛА ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ СТАТИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ ПРИ ВІДКОЛІ КАМ'ЯНИХ БЛОКІВ

(Представлено д.т.н. К.К. Ткачуком)

На основі аналізу фізико-механічних властивостей гірських порід, вимог до якості буріння, типів руйнуючих навантажень, діаметрів шпурів, запропонований метод розрахунків, який дозволяє вивести інженерну формулу для вибору технологічних параметрів при відколі кам'яних блоків.

Ключові слова: *статичне навантаження, шпур, кам'яний блок, лінія відколу, плоска деформація, пластична зона.*

Постановка проблеми. При видобуванні кам'яних блоків шпуровим методом для створення статичного силового впливу та отримання в потрібних зонах породи необхідного напружено-деформованого стану та тріщиноутворення використовуються невибухові руйнуючі суміші (НРС) та гідравлічні пристрої [1–5], дія яких зазвичай визначалася тільки для окремо взятого шпуру.

Теоретичні дослідження розподілу напружень близько контурів шпурів і утворення пластичних зон навколо них, а також взаємодію цих зон між собою досліджено в роботі [6] за допомогою розв'язку нелінійної періодичної задачі.

Це дало можливість за допомогою методу перебору параметрів визначити граничні області, де починає реалізовуватися умова "пластичного шарніра" і відбувається відкол блоку по лінії шпурів.

У даній роботі проведений детальний аналітичний аналіз результатів розв'язку даної задачі, що дало можливість отримати інженерні формули для визначення граничної відстані між шпурами при заданому статичному навантаженні.

Постановка проблеми. Викладення основного матеріалу. Розглянемо ізотропний кам'яний блок з рядом однакових шпурів, пробурених по передбачуваній лінії відколу, яку умовно сумістимо з віссю *x* декартової системи координат. Радіуси отворів шпурів приймемо рівними *R*, а відстань між отворами – *l* [6].

Умова пластичності представимо у вигляді:

$$\left(\sigma_x - \sigma_y\right)^2 + 4\tau_{xy}^2 = 4k^2, \quad k = s/2, \tag{1}$$

де σ_s – межа текучості породи при односторонньому розтягу.

Припустимо, що до контурів шпурових отворів прикладені рівномірні зусилля інтенсивності *p*, а грані блоку вільні від навантажень. Будемо вважати, що під дією цих зусиль близько отворів виникнуть пластичні зони, які повністю їх охоплюють. В цьому випадку при $r = R$ граничні умови будуть мати вигляд:

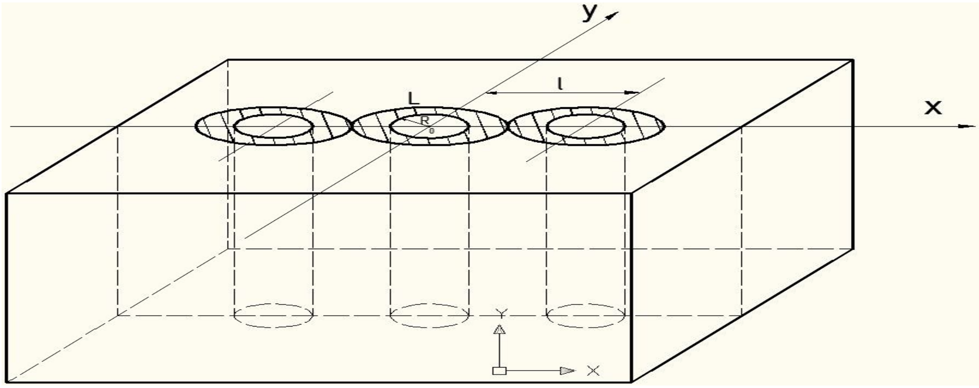
$$r = -p, \quad \tau_{r\theta} = 0 \ . \tag{2}$$

Отвір, в центрі якого вміщено початок координат, назвемо основним, а лінію розділу пластичної і пружної зон біля цього отвору позначимо через *L*.

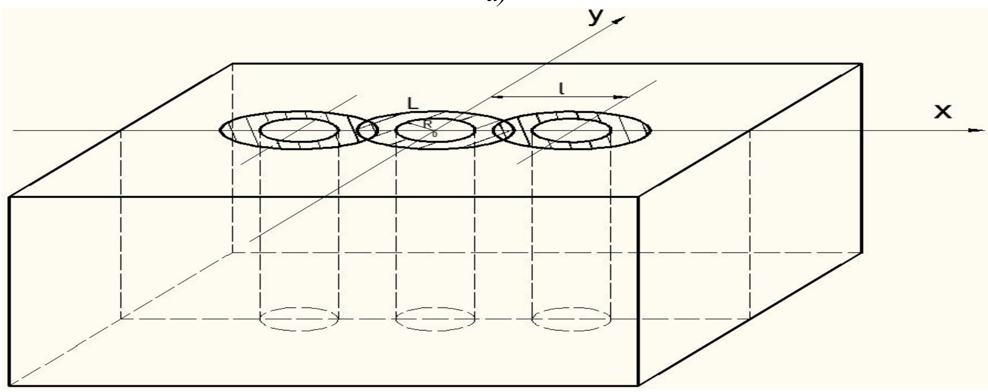
Через геометричну й силову симетрії в даній задачі форма лінії розділу біля будь-якого отвору буде такою ж, як і біля основного отвору.

Потрібно визначити лінії розділу пружної і пластичної зон, а також напружений стан кам'яного блоку в кожній із зон.

Початок процесу відколу зв'яжемо з моментом появи так званого "пластичного шарніра", тобто, коли контури пластичних зон *L* сусідніх отворів починають стикатися, або перекривати одна одну (рис. 1).



а)



б)

Рис. 1. Розподіл напружень вздовж передбачуваної лінії відколу кам'яного блоку, коли контури пластичних зон стикаються (а), або перекривають (б) одна одну

Згідно з [6], конфігурація пластичних зон L, які створюються за рахунок дії статичних навантажень на контури шпурових отворів, розташованих по лінії передбачуваного відколу описується з допомогою системи рівнянь:

$$\begin{aligned} &\bar{c}_0 = exp\left(\frac{p-k}{2k} + \frac{1}{3k}\, a_2\pi^2\bar{\varepsilon}^2\bar{c}_0^2\right); \\ &\bar{c}_1 = \frac{1}{3k}\,\bar{c}_0^3\pi^2\bar{\varepsilon}^2 b_2, \\ &a_2 = k\,\frac{\bar{c}_1}{\bar{c}_0}, \quad b_2 = \frac{k\,(\bar{c}_0 - 2\bar{c}_1)}{\bar{c}_0\left(1-\frac{1}{3}\bar{c}_0\bar{c}_1\pi^2\bar{\varepsilon}^2\right)}, \end{aligned} \tag{3}$$

де

$$\bar{c}_0 = \frac{c_0}{R}, \quad \bar{c}_1 = \frac{c_1}{R}, \quad \bar{\varepsilon} = \frac{R}{l}.$$

Система (3) складається з чотирьох рівнянь із чотирма невідомими, тобто є замкнутою. Визначимо ці невідомі методом їх виключення.

Напруження в пружній зоні знаходяться із залежностей:

$$\begin{aligned} &\sigma_x^{(2)} + \sigma_y^{(2)} = 4Re\,\Phi_2(\zeta), \\ &\sigma_y^{(2)} - \sigma_x^{(2)} + 2i\tau_{xy}^{(2)} = 2\left[\frac{\overline{\omega}(\zeta^{-1}) - \omega(\zeta)}{\omega'(\zeta)}\Phi'(\zeta) + \psi(\zeta)\right]. \end{aligned} \tag{4}$$

Розглянемо спочатку випадок, коли $\varepsilon = 1/l = 0{,}1$, а величина статичного рівномірного навантаження на контур шпуру дорівнює $p = 3k$, грані кам'яного блоку вільні від навантаження. Як відомо, для області з одним шпуром лінією розділу в цьому випадку буде коло радіуса $r = 2{,}718R$ [2]. Для області ж із великим числом круглих шпурів, як показали проведені нами дослідження, лініями розділу будуть еліпси з півосями $a = (c_0+c_1)/R$ =3,367,

b = (c_0-c_1)/R = 2,339. Звідси випливає, що, для цього випадку, облік впливу сусідніх отворів дозволяє на 48 % збільшити відстань між шпурами.

Оскільки нас цікавить конфігурація пластичних зон L, які створюються за рахунок дії статичних навантажень на стінки шпурів, розташованих по лінії відколу, то зробимо це за допомогою більш детального аналітичного аналізу системи рівнянь (3). В даній задачі лінією розділу пружних і пластичних зон L будуть еліпси, піввісі яких будуть змінюватися при зміні відстаней між шпурами l і їх радіусів R.

Система рівнянь (3) містить чотири невідомих $\bar{c}_0,\ \bar{c}_1,\ a_2,\ b_2$ і є замкнутою. Виключивши з перших двох рівнянь системи (3) $a_2,\ b_2$, отримаємо:

$$\bar{c}_0 = \exp\left(\frac{p-k}{2k} + \frac{1}{3}\pi^2\bar{\varepsilon}^2\bar{c}_0\bar{c}_1\right),$$

$$\bar{c}_0\bar{c}_1 = \frac{\pi^2\bar{\varepsilon}^2\bar{c}_0^2(1-2\bar{c}_0\bar{c}_1)}{3-\bar{c}_0\bar{c}_1\pi^2\bar{\varepsilon}^2}. \tag{5}$$

Друге рівняння системи (5) запишемо у вигляді квадратного рівняння:

$$\pi^2\varepsilon^{-2}(\bar{c}_0\bar{c}_1)^2 - (3+2\pi^2\bar{\varepsilon}^2\bar{c}_0^2)\bar{c}_0\bar{c}_1 + \pi^2\bar{\varepsilon}^2\bar{c}_0^4 = 0,$$

звідки слідує розв'язок цього рівняння відносно $\bar{c}_0\,\bar{c}_1$:

$$\pi^2\bar{\varepsilon}^2\bar{c}_0\bar{c}_1 = \frac{3}{2} + \pi^2\bar{\varepsilon}^2\bar{c}_0^2 \pm \frac{3}{2}\sqrt{1+\frac{4\pi^2\bar{\varepsilon}^2\bar{c}_0^2}{3}} \tag{6}$$

Тепер систему рівнянь (3) можна записати у вигляді:

$$\bar{c}_0 = exp\left(\frac{p}{2k} + \frac{1}{3}\pi^2\bar{\varepsilon}^2\bar{c}_0^2 \pm \frac{1}{2}\sqrt{1+\frac{4\pi^2\bar{\varepsilon}^2\bar{c}_0^2}{3}}\right),$$

$$\bar{c}_1 = \frac{1}{\pi^2\bar{\varepsilon}^2\,\bar{c}_0} = \frac{3}{2} + \pi^2\bar{\varepsilon}^2\bar{c}_0^2 \pm \frac{3}{2}\sqrt{1+\frac{4\pi^2\bar{\varepsilon}^2\bar{c}_0^2}{3}},$$

$$a_2 = k\frac{\bar{c}_1}{\bar{c}_0},\qquad b_2 = \frac{k(\bar{c}_0 - 2\bar{c}_1)}{\bar{c}_0(1-\frac{1}{3}\bar{c}_0\bar{c}_1\pi^2\bar{\varepsilon}^2)}. \tag{7}$$

Граничне значення розв'язку системи (7) отримаємо, коли $\bar{c}_0 = \frac{1}{2\bar{\varepsilon}^*}$. Позначимо це значення $\bar{\varepsilon}$ через $\bar{\varepsilon}^*$. Величина $\bar{\varepsilon}^*$ залежить від p і визначається з першого рівняння системи (7) і буде дорівнювати:

$$\bar{\varepsilon}^* = \frac{1}{2}\,exp\left(-\frac{p}{2k} - \frac{\pi^2}{12} + \frac{1}{2}\sqrt{1+\frac{\pi^2}{3}}\right), \frac{l}{R} = 2\,exp\left(\frac{p}{2k} - \frac{\pi^2}{12} - \frac{1}{2}\sqrt{1+\frac{\pi^2}{3}}\right) \tag{8}$$

З другого рівняння системи (7) визначимо значення параметра $\bar{c}_1$, яке відповідає:

$$\bar{c}_0 = \frac{1}{2\bar{\varepsilon}^*}:$$

$$\bar{c}_1 = \left[\frac{1}{2} + \frac{3}{\pi^2}\left(1-\sqrt{1+\frac{\pi^2}{3}}\right)\right]\frac{1}{\bar{\varepsilon}^*}. \tag{9}$$

Тоді півосі граничного еліпса запишуться в такому вигляді:

$$\frac{a}{R} = \bar{c}_0 + \bar{c}_1 = \left[1 + \frac{3}{\pi^2}\left(1-\sqrt{1+\frac{\pi^2}{3}}\right)\right]\frac{1}{\bar{\varepsilon}^*},$$

$$\frac{b}{R} = \bar{c}_0 - \bar{c}_1 = \frac{3}{\pi^2}\left(\sqrt{1+\frac{\pi^2}{3}}-1\right)\frac{1}{\bar{\varepsilon}^*}. \tag{10}$$

Підставляючи у виведені формули (10) вираз для $\bar{\varepsilon}^*$ з (8), отримуємо:

$$\frac{a}{R} = 2\left[1 + \frac{3}{\pi^2}\left(1-\sqrt{1+\frac{\pi^2}{3}}\right)\right] exp\left(\frac{p}{2k} + \frac{\pi^2}{12} - \frac{1}{2}\sqrt{1+\frac{\pi^2}{3}}\right),$$

$$\frac{b}{R} = \frac{6}{\pi^2}\left(\sqrt{1+\frac{\pi^2}{3}}-1\right) exp\left(\frac{p}{2k} + \frac{\pi^2}{12} - \frac{1}{2}\sqrt{1+\frac{\pi^2}{3}}\right). \tag{11}$$

Таким чином, для заданого навантаження p гранична відстань між шпурами визначається за формулою (8), а півосі граничного еліпса обраховуються за формулами (11).

Зауважимо, що сума великих півосей граничного еліпса дорівнює відстані між шпурами.

На рисунку 2 наведений графік залежності $\bar{\varepsilon}^*$ від відношення p/k, який побудовано згідно з першою формулою (8).

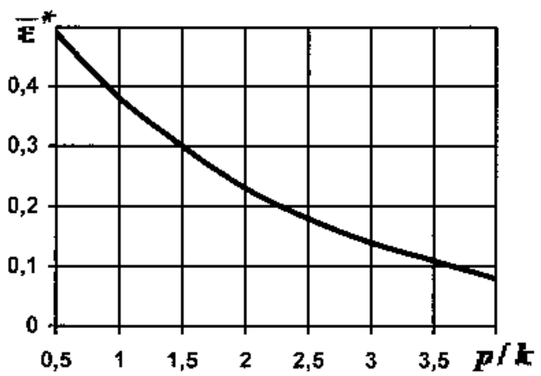


Рис. 2. Умови відколу кам'яного блоку при статичних навантаженнях

Цей графік збігається з подібним графіком, що представлено в роботі [6], який побудований за допомогою комп’ютера методом перебору змінних.

Слід зазначити, що графік залежності $\bar{\varepsilon}^*$ від відношення p/k наведений на рисунку 2 за першою формулою(8) можна побудувати з допомогою звичайного калькулятора.

Висновки. Детальний аналіз результатів аналітичних розв’язків системи рівнянь (3), для визначення пластичних зон показав, що зі збільшенням параметра ε більша піввісь еліпса a збільшується, а мала піввісь b зменшується до тих пір поки величина a не стане рівною половині відстані між шпурами. При цьому починає реалізовуватися умова "пластичного шарніра" і відбувається відкол блоку по лінії шпурів. Якщо продовжувати збільшувати параметр ε обидві півосі еліпса збільшуються, і коли їхня сума дорівнює відстані між шпурами l, отримуємо граничне значення півосей еліпса (в подальшому система рівнянь (3) не має розв’язку).

Таким чином, отримані інженерні формули (8) для визначення граничної відстані між шпурами l при заданому статичному навантаженні інтенсивності p. Розроблений теоретичний метод розрахунку дозволяє врахувати взаємодію всіх технологічних параметрів та провести оптимізацію співвідношень об’ємів бурових робіт і статичних навантажень в шпурах при збереженні якості поверхні відколу.

Список використаної літератури:

1. *Ткачук К.К.* Разрушение горных пород невзрывчатыми разрушающими веществами / *К.К. Ткачук*// Разработка рудных месторождений – К. : Республ. Межвед. науч. техн. сб., 1986. – Вып. 42. – С. 41–44.
2. *Ткачук К.К.* Распределение напряжений и радиус зоны разрушения пород пр. и статической нагрузке в скважине / *К.К. Ткачук*. – Разработка рудных месторождений. – К. : Техника, 1988. – № 46. – С. 42–45.
3. *Ткачук К.К.* Напряженно – деформированное состояние пород при разрушении статическими нагрузками / *К.К. Ткачук* // Разработка рудных месторождений : Республ. межв. науч.-техн. сб. – 1994. – Вып. 55. – С. 52–59.
4. А. с. 1659649 СССР, МКИ3 Е21С 37/02. Портативный гидропоршневой агрегат для направленного разрушения монолитных объектов / *К.Н. Ткачук, И.А. Фоменко, К.К. Ткачук* (СССР); опубл. 30.09.91, Бюл. № 24.
5. А. с. 1659649 СССР, МКИ3 Е21С 37/00 Устройство для разрушения монолитных объектов / *К.Н. Ткачук, И.А. Фоменко, К.К. Ткачук* (СССР); опубл. 16.10.89, Бюл. № 19.
6. *Ткачук К.К.* Теоретичний метод визначення статичного навантаження для відколу кам'яного блоку/ *К.К. Ткачук, Т.В. Гребенюк, П.З. Луговий* // Вісник НТУУ «КПІ» / Серія «Гірництво». – 2012. – Вип. 22. – С. 63–67.

ГРЕБЕНЮК Тетяна Володимирівна – аспірантка кафедри інженерної екології Інституту енергозбереження та енергоменеджменту Національного технічного університету України «КПІ».

Наукові інтереси:

- гірництво;
- сучасні методи видобутку каменю.

Стаття надійшла до редакції 05.06.2103

Гребенюк Т.В. Інженерна формула для визначення статичних навантажень при відколі кам'яних блоків
Гребенюк Т.В. Инженерная формула для определения статических нагрузок при отколе каменных блоков
Grebenyuk T.V. Engineering formula for determining static loading of splitting of dimension stone

УДК 622.35(075.80)

Инженерная формула для определения статических нагрузок при отколе каменных блоков / Т.В. Гребенюк

На основании анализа физико-механических свойств горных пород, требований к качеству бурения, типов разрушающих нагрузок, диаметров шпуров, предложен метод расчетов, который позволяет вывести инженерную формулу для выбора технологических параметров при отколе каменных блоков.

Ключевые слова: статическая нагрузка, шпур, каменный блок, линия откола, плоская деформация, пластическая зона.

УДК 622.35(075.80)

Engineering formula for determining static loading of splitting of dimension stone / T.V. Grebenyuk

Based on the analysis of physico-mechanical properties of rocks, quality requirements for drilling and destructive types of loads, the diameters of the blast-holes, proposed a method of calculations, which allows to made engineering formulas for the technological parameters for splitting of dimension stone.

Key words: static load, blast-hole, dimension stone, splitting line, plane strain, plastic zone.