



УДК 621.647.4

*I.I. Назаренко, д.т.н., проф. (КНУБА, Київ);  
Є.О. Міщук, асистент (КНУБА, Київ).*

## ОЦІНКА ЕНЕРГОЄМНОСТІ ПРОЦЕСУ ПОДРІБНЕННЯ БУДІВЕЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ

*АННОТАЦІЯ. Робота присвячена розгляду питомих витрат енергії на одиницю отриманої продукції в дробильних машинах. З метою рішення проблеми зменшення енерговитрат при подрібненні, здійснено аналіз енергетичних законів та визначення передумов для подальшого дослідження.*

*Ключеві слова: Дробарка, енерговитрати, напруження на площадці*

*АННОТАЦИЯ. Работа посвящена осмотру удельных затрат энергии на единицу получаемой продукции в дробильных машинах. С целью решения проблемы уменьшения энергетических затрат при дроблении, предлагается анализ энергетических законов и предпосылки для дальнейшего исследования.*

*Ключевые слова: Дробилка, энергетические затраты, напряжение на площадке*

*SUMMARY. Is devoted to examination of the specific energy consumption per unit of production in the grinder. In order to address the reduction of energy costs for crushing, offers an analysis of the energy laws and prerequisites for further study.*

*Key words: Crusher, energy costs, the voltage at the site.*

**Актуальність проблеми.** Питомі витрати енергії на одиницю отримуваної продукції є основним техніко-економічним показником дробильних машин.

Вирішення проблеми, пов'язаної з визначенням затрат енергії на подрібнення, представляє доволі складну задачу, так як затрати енергії залежать від цілого ряду факторів (неоднорідності кусків матеріалу, міцності порід, різності форм, точки прикладення руйнуючого зусилля, положення породи в момент удару, сил, що діють між частинками, фізики руйнування, поведінка матеріалу, який взаємодіє з робочими поверхнями дробильних машин і т. д.), які змінюються в процесі роботи і важко піддаються точному описанню.

Не менший вплив при визначенні енергозатрат відіграють умови масовості цього процесу, які відрізняються від умов одиничного руйнування. Так наприклад одна частина зерен може отримати недостатні навантаження для руйнування, інша – лишні навантаження, а деяка частина зерен може взагалі не отримати навантажень. Тому в таких випадках потрібно враховувати статистичні закономірності.

До числа найбільш важливих характеристик гірських порід, які підлягають подрібненню, належать:

- вид навантаження;
- опір подрібненню;
- співвідношення між довжиною, шириною і товщиною подрібнюваного матеріалу;
- ступінь завантаження камери подрібнення.

До вище зазначених показників варто додати показники механічних властивостей гірських порід, які мають великий вплив на процес подрібнення. Ці показники коливаються в широких межах. На їхні значення мають вплив пористість, вологість, шаруватість, крупність матеріалів, спосіб досліджень і т.д.

За цими причинами пояснюється широкий діапазон показників при дослідженнях однієї і тієї ж породи. Так при дослідженні однакових зразків на одновісний стиск було встановлено, що тимчасовий опір стику змінився в 3,45 рази ( від 530 до 1830 кПа) [1].

**Мета роботи.** Оцінити та проаналізувати енерговитрати процесу подрібнення матеріалу.

Оцінка та аналіз енергетичних гіпотез

*1. Гіпотеза поверхонь.*

Полягає в тому, що витрата енергії на подрібнення пропорційна величині новоутвореної поверхні, враховує енергію  $A_s$ , необхідну для розділення подрібненого матеріалу по одній площині, і виражається наступною залежністю:

$$A_s = K_{\text{пр}} S, \quad (1)$$

де  $K_{\text{пр}}$  – коефіцієнт пропорційності, встановлений дослідним шляхом, дж/м<sup>2</sup>;

$S$  – величина новоутвореної поверхні, м<sup>2</sup>.

При подрібненні кубічного куска розміром  $D$  з визначеним ступенем подрібнення, величина новоутвореної поверхні буде рівна:

$$S = 6(D/i)^2 \cdot (D^3/(D/i)^3) - 6D^2 = 6D^2(i-1), \quad (2)$$

де  $D/i$  – розмір кубічного куска подрібненого продукту;

$D^3/(D/i)^3$  – кількість кубічних кусків, утворених при подрібненні із вихідного куска.

Тоді робота подрібнення одного куска буде дорівнювати:

$$A_s = K_{\text{пр}} \cdot S = 6K_{\text{пр}}(i-1)D^2 = K'_{\text{пр}} D^2. \quad (3)$$

Повна витрата енергії  $A_{\Sigma}$  на подрібнення матеріалу визначеної крупності ( $D_0$ ) в залежності від потрібного розміру вихідного куска ( $d$ ) згідно гіпотези Ріттінгера буде складати:

$$A_{\Sigma} = 3A_s \left( \frac{D_0}{d} - 1 \right) = 3A_s(i-1), \quad (4)$$

де  $d$  – середній розмір куска після подрібнення;

$i = D/d$  – ступінь подрібнення матеріалу.

коли ступінь подрібнення матеріалів досягає вельми великих значень, а об'єм подрібнюваного тіла відносно невеликий, тобто при тонкому помолу.

## 2. Гіпотеза об'ємів.

На противагу гіпотезі поверхонь, гіпотеза об'ємів припускає, що енергія  $A_v$ , необхідна для однакової зміни форми геометрично подібних і однорідних тіл, змінюється пропорційно об'ємам або вагам цих тіл:

$$A_v = K_v V = K_v D_0^3, \quad (5)$$

де  $K_v$  – емпіричний коефіцієнт пропорційності, дж/м<sup>3</sup>;

$V$  – об'єм кубічного куска з ребром  $D$ .

Враховуючи далі, що роботи внутрішніх сил пропорційні об'ємам дроблених тіл, вираз (5) може бути приведений до виду:

$$A_v = K_v D_0^3, \quad (6)$$

де  $\sigma_{\text{ст}}$  – напруження, виникаюче при деформації подрібнюваного тіла (межа міцності матеріалу на стиск), Н/м<sup>2</sup>;

$E$  – модуль пружності при стиску, Н/м<sup>2</sup>.

Як відомо,  $A_{\text{пит}} = \frac{1}{2} \sigma \varepsilon$ , де  $\sigma$  – напруження, Н/м<sup>2</sup>,  $\varepsilon$  – деформація куска матеріалу. Приймаючи, що  $\varepsilon = \frac{\sigma}{E}$ , вираз для роботи матиме вигляд:

$$A_{\text{пит}} = \frac{1}{2} \frac{\sigma^2}{E},$$



де  $E$  – модуль пружності.

Тоді формулу (6) можна представити у вигляді:

$$A = \frac{1}{2} \frac{\sigma^2}{E} V \quad (7)$$

Із формули (7) слідує, що витрата енергії при подрібненні за гіпотезою об'ємів, прямопропорційна напруженням, виникаючим при деформації подрібнюваного тіла, його об'єму і обернено пропорційна модулю Юнга.

Аналізуючи вище приведені гіпотези, необхідно виділити наступне: гіпотеза об'ємів (закон Кірпічева-Кіка) враховує затрати енергії на пружну, а потім пластичну деформацію тіла і зовсім не враховує витрат енергії на утворення нових поверхонь, на подолання сил зовнішнього і внутрішнього тертя, на втрати енергії, пов'язані з акустичним, електричним і тепловим явищем. Гіпотеза поверхонь (закон Ріттінгера), навпаки, не враховує затрати енергії на пружну і пластичну деформації тіла і враховує тільки витрати енергії для утворення нових поверхонь.

Таким чином можна сказати, що при процесах дроблення, коли утворення нових поверхонь практично незначне, слід застосовувати гіпотезу об'ємів. У випадку помелу матеріалу при інтенсивному утворенні нових поверхонь, коли ступінь подрібнення матеріалів досягає вельми великих значень, а об'єм подрібнюваного тіла відносно невеликий можна застосовувати гіпотезу поверхонь.

### 3. Закон Ф. Бонда.

Стверджує, що повна робота повинна включати роботу деформації і утворення нових поверхонь. Закон Бонда засвідчує те, що енергія, яка передається тілу при стиску, розподіляється спочатку по його масі і відповідно пропорційна  $D^3$ , але з моменту початку утворення на поверхні тріщин ця енергія концентрується на поверхні у країв тріщин, і тоді вона пропорційна  $D^2$ .

На цій основі приймається, що робота руйнування пропорційна середньому геометричному із об'єму і поверхні куска:

$$A_B = K_B \sqrt{VS} = K_B D^{2.5}, \quad (8)$$

де  $A_B$  – робота, затрачувана на подрібнення;

$D$  – лінійний розмір куска;

$K_B$  – коефіцієнт пропорційності, який визначається експериментально.

Закон Бонда застосовується в основному для зони, яка лежить між зонами мілкового дроблення і грубого помелу.

Паралельно з енергетичною гіпотезою руйнування Ф.Бонд запропонував кінетичну модель руйнування матеріалу. В ній зазначається, що при прикладенні стискальних зусиль до частинки матеріалу, вона починає стискатись, деформуватись і в ній виникають напруження. Частинка починає поглинати енергію, відповідно до її форми і структури. При перевищенні стискальним напруженням межі міцності частинки, в ній починають утворюватись тріщини. Енергія напруженого стану тріщини перетворюється в роботу її розширення, внаслідок чого частинка розколюється.

Виходячи з цього можна припустити, що роботою на руйнування куска матеріалу є робота затрачувана на формування першої тріщини.

Проте сила стискування може бути прикладена так швидко, що тріщина виникає до того, як в частинці встановиться рівноважне розподілення енергії, наслідком чого є зменшення енергії на руйнування.

Основними недоліками кінетичної моделі Ф.Бонда стало неврахування пластичних ефектів, властивостей мікро- та макропружності матеріалів та їхнього зв'язку з напруженим

станом.

Тож, як бачимо енергія, яка підводиться до тіла при навантаженні, перетворюється в енергію деформації, що накопичується в матеріалі і в поверхневу енергію тріщини.

Розглядаючи роботу на утворення першої тріщини можна зазначити, що після досягненні деякої критичної довжини, при визначеному напруженні, тріщина далі буде розповсюджуватись самовільно, при цьому критичні напруження  $\sigma_{кр}$  будуть обернено пропорційними квадратному кореню із довжини тріщини  $l$ :

$$\sigma_{кр} \sqrt{l} = const, \quad (9)$$

де:  $const = \sqrt{2E\gamma/\pi}$ ;

$E$  – модуль пружності матеріалу;

$\gamma$  – питома поверхнева енергія тріщини.

Цю залежність вивів Алан Гріффітс в 20 роках минулого сторіччя [4]. Вона відображає критичні напруження при яких відбувається самовільний (без додаткової роботи зовнішніх сил), ріст тріщини в тілі. В графічному вигляді ця залежність зображена на рис. 1.

Теорія Гріффітса має велике практичне значення так як вона:

- пояснює зменшення реальної міцності матеріалів в порівнянні з теоретичною;
- зображує, що крихка міцність може бути виражена через фізичні і механічні властивості матеріалу;
- зображує, що максимальне руйнуюче навантаження досягається не при будь-якій початковій тріщині, а тільки після того, як тріщина досягне деяких критичних розмірів.

До недоліків теорії можна віднести те, що в ній розглядаються напруження, при яких тріщина починає рухатись, а не напруження при якому відбувається повне руйнування матеріалу.

#### 4. Закон П.А.Ребіндера.

Об'єднує гіпотези поверхонь і об'ємів, вважаючи, що руйнування настає після деформації куска і повна робота дроблення дорівнює сумі роботи деформації ( $A_S$ ) і роботи утворення нових поверхонь ( $A_V$ ).

Основні положення теорії Ребіндера наступні: при деформації твердих тіл в період, безпосередньо передуючий його руйнуванню, тобто в період пружних і пластичних деформацій, накопичується об'ємна енергія, яка при досягненні критичного значення приводить до руйнування твердих тіл. Фізично цей процес виражається в утворенні тріщин в місцях дефектів структури матеріалу, по яким і відбувається руйнування.

Закон П.А.Ребіндера математично можна виразити в наступному вигляді [6]:

$$A = K_{пр.1} \Delta S + K_{пр.2} \Delta V, \quad (10)$$

де:  $A$  - робота, затрачувана на руйнування твердого тіла, Дж;

$K_{пр.1}$  – коефіцієнт пропорційності, дж/м<sup>2</sup>

$\Delta S$  - новоутворена, при руйнуванні, поверхня, м<sup>2</sup>;

$K_{пр.2}$  – коефіцієнт пропорційності, дж/м<sup>3</sup>;

$\Delta V$  - деформована частина об'єму тіла, м<sup>3</sup>.

*А.К.Рундквіст*, аналізуючи процес подрібнення гірських порід, вважає, що елементарна робота подрібнення одного куска пропорційна елементарній зміні деякої степені його розміру  $D$ . Згідно його даним, повна робота, затрачувана на подрібнення деякого об'єму, може бути розрахована за формулою [1]:



$$A_{\Sigma} = \frac{CV}{(K_p - 1)D^{K-1}} (i^{K_p - 1} - 1), \quad (11)$$

де:  $C$  – деяка постійна подрібнення;

$i = D/d$  – степінь подрібнення;

$D$  і  $d$  – початковий і кінцевий діаметри подрібнюваного куска;

$K_p$  – узагальнений коефіцієнт,

враховуючий величину енергії і властивості подрібнюваного тіла.

В спрощеному вигляді узагальнююча формула (11) записується наступним чином:

$$dA_{\Sigma} = Kd(D^{4-n}), \quad (12)$$

де  $K$  – коефіцієнт пропорційності;

$4-n$  – показник степені, що визначається експериментально.

Приймаючи в даній формулі показник степені  $n$ , рівним 2;1,5;1, можна отримати відповідно вирази гіпотези поверхонь, закону Бонда, і гіпотези об'ємів.

Вченими Дж.Свенсенем і Дж.Мюркесом був запропонований свій варіант формули Бонда, для визначення роботи, який на їх думку краще узгоджується з експериментальними даними [1]:

$$A_{с.н.} = A_0[(100/k_{90})^m - (100/k_m)^m], \quad (13)$$

де  $A_0$  – фактор пропорційності;

$k_{90}$  – розмір ланки сита, крізь які проходить 80% продукту подрібнення;

$m$  – коефіцієнт, який визначається експериментальним шляхом ( $m=0,8-1,3$ ).

Коефіцієнт  $k_m$  визначається за формулою:

$$\lg k_m = 1/5[\lg k_{90} + \lg k_{70} + \lg k_{50} + \lg k_{30} + \lg k_{10}],$$

де  $k_{90}$  і  $k_{10}$  – розміри, менше яких міститься відповідно 90, 70, 50, 30 і 10% частинки.

В роботі [10] запропоноване модифіковане емпіричне рівняння, яке пов'язує енергію на подрібнення з розмірами частинок матеріалу :

$$A_x = K[1 - (1/R)^r(100/a)^r], \quad (14)$$

де  $K$  – показник подрібненості;

$R$  – степінь подрібнення;

$a$  – розмір частин матеріалу;

$r$  – показник степені відхилення.

Величина  $r$  виражає ступінь зміни опору матеріалу при його подрібненні і зміну ефективності машини із зміною розмірів частинок. Його значення залежить від матеріалу і умов прикладення зусиль. Рівняння (14) можна застосовувати при подрібненні крихких неоднорідних матеріалів.

В роботі [7] енергію, затрачувану на механічне подрібнення матеріалу від діаметра  $D$  до діаметра  $d$ , розглядають як суму робіт за послідовними прийомами: після кожного подрібнення частина куска знову дробиться навпіл і так послідовно до кінцевого діаметра [7].

В результаті для визначення повної роботи виведена наступна залежність [7]:

$$A_{\Sigma} = K_p \frac{v(\sqrt{i}-1)}{\sqrt{D}(\sqrt{i'}-1)}, \quad (15)$$

де  $K_p$  – коефіцієнт пропорційності за формулою;

$i' = d/d_n$  – показник, що характеризує степінь подрібнення матеріалу в кожному проміжному прийомі при дробленні матеріалу від розміру  $d$  до  $d_n$ .

В роботі [8] вважають, що незалежно від характеру прикладення зовнішніх сил, причиною механічного руйнування матеріалу слід вважати, розрив внутрішніх зв'язків, а мірою міцності цих зв'язків – міцність матеріалу на розрив. В результаті для визначення повної роботи, затрачуваної на дроблення, була отримана наступна залежність:

$$A_{\Gamma} = \frac{3K_r^2 \sigma_p V}{2E_H} (i - 1), \quad (16)$$

де  $K_r$  – коефіцієнт пропорційності, що визначається експериментально;

$\sigma_p$  – напруження розриву.

Для випадків руйнування тіла стискаючими зусиллями  $K_r$  змінюється від 1,2 до 3,14.

В роботі [9] у формулу (16) введено коефіцієнт, враховуючий вплив типу основи і співвідношення мас, що взаємодіють між собою в дробильній машині:

$$A = \frac{3K_r \sigma_p^2}{2E_H} (i - 1) K_0. \quad (17)$$

В роботах [7,11] відмічено, що при аналізі енергоємності процесів дроблення гірських порід доцільно користуватись гіпотезою об'ємів. Проте при визначенні повної величини затрачуваної енергії вони рекомендують враховувати показник міцності гірської породи на стиск  $\sigma_{ст}$ , а не на розтяг  $\sigma_p$ , що має місце в формулі (17), тобто:

$$A_{\Sigma} = KV \sigma_{ст} \lg i / 2E, \quad (18)$$

де  $A_{\Sigma}$  – загальна робота, затрачувана на дроблення.

Енергоємність дроблення куска гірської породи, в роботі [9] визначається за такою залежністю:

$$E = \alpha \left( \frac{Q}{Q_n} \lg Q - \lg Q_n \right), \quad (19)$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт пропорційності, що характеризує властивості матеріалу;

$Q$  і  $Q_n$  – відповідно початкова і кінцева маса матеріалу.

Підставивши в формулу (19) замість величин  $Q$  і  $Q_n$  значення  $\gamma V$  і  $\gamma V_n$  або  $\gamma D^3$  і  $\gamma d^3$ , після відповідних перетворень маємо:

$$A = \alpha \left( \frac{V}{V_n} \lg V - \lg V_n \right) = \alpha V \lg V - \alpha V_n \lg V_n = \alpha D^3 \lg D^3 - \alpha d^3 \lg d^3. \quad (20)$$

Формула (19) і відповідна формула (20) фактично представляють собою інтерпретацію закону Кірпічева-Кіка, тобто повна енергоємність процесу дроблення пропорційна об'ємам ( $V$ ) дроблених тіл від деякого розміру  $D$  до розміру  $d$ .

Цікаву енергетичну гіпотезу запропонував Р.А. Родін, встановивши, що акт руйнування гірської породи сферичної форми з ізотропними властивостями носить стадійний характер рис.2. [2].



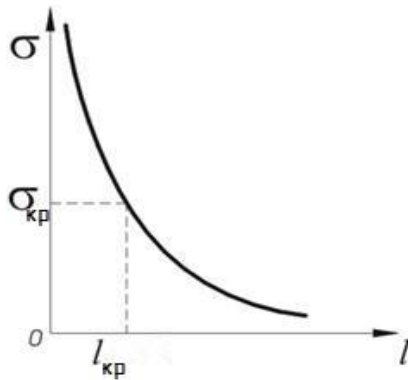


Рисунок 1. Діаграма руйнування в задачі Гріффітса.

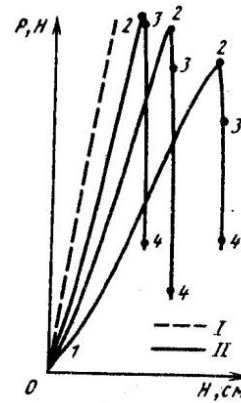


Рисунок 2. Руйнування пружно-крихкого тіла по Р.А.Родіну:

I – деформація преса; II – руйнування зразків різної міцності.

Аналізуючи графік можна записати наступні стадії руйнування:

ділянка 0-1, рис. 1 – поява контактів і виникнення пружних деформацій в куску;

ділянка 1-2 – утворення зони всебічного стиску її збільшення і формування до моменту утворення ефективної тріщини;

ділянка 2-3 – виникнення ефективної тріщини і її розвиток до критичних розмірів;

ділянка 3-4 – швидкісний розвиток ефективної тріщини до повного руйнування дробленого куску матеріалу і повної витрати запасу пружної енергії.

Таким чином якщо прийняти всю корисну роботу подрібнення за 100%, то на ділянки 0-1, 1-2 припадає 73,4% енергії, 2-3 – 22,5% і на ділянку 3-4 – 4,4%.

Р.А. Родіним був встановлений математичний вираз витрати роботи на подрібнення одиничного куска правильної форми з ізотропними властивостями:

$$A_{RR} = \frac{3}{8} \frac{\sigma_p^2}{K_\Phi^2 K_E^2 \sigma_{ст.к}^2 tg^2 \alpha R^{0,25-0,01R}}, \quad (21)$$

де  $\sigma_p$  – границя міцності куска, що руйнується при розколі;

$K_\Phi$  – коефіцієнт форми в зоні контакту, границі змін  $0,318 \pm 0,5$ ;

$K_E$  – коефіцієнт пропорційності;

$\sigma_{ст.к}$  – граничне (контактне) напруження при стиску;

$tg \alpha$  – коефіцієнт тертя;

$R$  – радіус куска, що руйнується.

Запропонована гіпотеза може бути сформульована наступним чином: робота, затрачувана на одиничне руйнування куска гірської породи, пропорційна роботі, затрачуваної на утворення нових поверхонь, і тертю між утвореними поверхнями в зоні всебічного стиску.

В роботі [1] зазначено, при проведенні ряду дослідів по ударному і квазістатичному руйнуванні кварцу було встановлено, що при динамічному режимі руйнування перші удари шару руйнують велику кількість частинок матеріалу, але при подальших ударах кількість зруйнованих частинок зменшується. Як наслідок велика кількість енергії втрачається без утворення нової поверхні. Одночасно з цим при повільному стисканні ізольованих кристалів кварцу, площа новоутвореної поверхні за одиницю витраченої роботи, більша для ізольованого кристала ніж для багатьох частинок. Основною причиною таких результатів вважають критичні напруження, які при малих концентраціях енергії досягаються тільки в декількох точках, за рахунок цього відбуваються протяжні розриви з утворенням малої кількості частинок з великою площею поверхні.

При ударних навантаженнях критичні напруження зростають досить швидко. Розриви розповсюджуються на малі відстані, новоутворена поверхня мала, але отримана за рахунок

багатьох частинок.

Коли в крихкому тілі розповсюджується імпульс напружень достатньо великої амплітуди, він може приводити до руйнування, яке суттєво відрізняється від руйнування при квазістатичному і відносно повільному динамічному навантаженні.

Руйнування, викликане хвилею напружень, описується наступним чином. Коли імпульс стиску, що розповсюджується в середовищі, падає нормально на вільну від напружень межу цього середовища, він породжує імпульс розтягу, який має ту ж саму форму, що і імпульс стиску, проте він має переміщення, направлене в інший бік від межі. Якщо напруження розтягу, створене відбитим імпульсом, перевищить міцність матеріалу на розтяг, то буде відбуватись руйнування. Це явище відоме як «відкол» або «руйнування Гопкінса».

Відомим фактом є те, що опір розтягу твердих матеріалів (гірських порід) в декілька разів менше в порівнянні з тимчасовим опором стиску. Відношення  $\sigma_{ст}/\sigma_{роз}$ , за дослідними даними коливається в широких межах доходячи на деяких гірничодобувних кар'єрах до 21,7 разів.

На основі дослідних даних гірських порід табл. 1 [1], встановлено залежність між основними видами руйнування, яка наведена нижче:

$$\sigma_{ст} \gg \tau_{зд} \gg \sigma_{зг} \gg \sigma_{р}, \quad (22)$$

де  $\sigma_{ст}, \tau_{зд}, \sigma_{зг}, \sigma_{р}$  – тимчасовий опір відповідно на стиск, здвиг, згин, і розтяг.

Таблиця 1.

Відносна міцність (%) гірських порід.

Гірські породи	Стиск	Зсув	Згин	Розтяг
Граніти	100	9	8	2÷4
Пісковики	100	10÷12	6÷20	2÷5
Вапняки	100	15	8÷10	4÷10

Тож як бачимо з приведених вище даних найсприятливішими напруженнями руйнування з точки зору енергоємності процесу є напруження розтягу.

Вченими Д.Уолкером і Р.Шоу була запропонована своя гіпотеза [1], яка стверджує, що механізм руйнування мінералів наближується до механізму руйнування металів, тобто в крихких мінералах під час руйнування проявляються пластичні деформації. Вони вважали, що питома енергія подрібнення по аналогії з різанням металів, постійна, оскільки товщина сколеного шару менше товщини шару неоднорідності в матеріалі. Починаючи з відомої критичної товщини шару, вірогідність зустріти неоднорідність збільшується, а з тим самим зменшується питома енергія подрібнення. Вченими було зазначено, що найбільш важливою змінною процесу руйнування є діаметр подрібнюваних частинок, а не площа новоутвореної поверхні, так як зусилля на руйнування частинки збільшується при зменшенні її діаметру, внаслідок зменшення вірогідності зустрічі неоднорідності в частинці.

На відміну від розглянутих підходів до процесу енергоємності дроблення гірських порід в роботі [9] використовують метод фізичних аналогій, на базі якого для визначення загальної роботи дроблення рекомендують наступні рівняння:

$$A = \frac{K\sigma_p^{1.5} P_k^{0.5} (1-\mu)^{2.5} (1+\mu) S^b n^c}{\mu^{1.5} E_H}, \quad (23)$$

де  $K$  – коефіцієнт, враховуючий перетворення ударного навантаження в зусилля, що розриває негабарит;

$P_k$  – контактна міцність породи;





$\mu$  – коефіцієнт Пуассона;

$S$  – площа, по якій проходить розкол негабариту,  $\text{м}^2$ ;

$n$  – число ударів до руйнування;

$b$  і  $c$  – показники, що характеризують відповідно масштабний ефект і ефект втомленості, які залежать від структури і міцнісних характеристик порід.

Всі показники цього рівняння справедливі тільки при прикладенні навантаження із швидкістю  $v \ll 7 \div 13 \text{ м/с}$ . Загальний вигляд формули без врахування степені подрібнення (і) виражається наступним чином:

$$A = aF^b n^c, \quad (24)$$

де  $a$  – коефіцієнт енергоємності, який являється узагальненим показником передачі ударного навантаження і міцнісних властивостей породи;

$$b=1 \div 23.$$

Прийнявши показник  $b=1$ , а добуток  $an^c = K$ , формулу (24) можна привести до вигляду  $A = KD^2$ .

#### Висновки:

1) В сучасний час найбільш розповсюдженими гіпотезами є емпіричні закони Ріттінгера і Кірпічева-Кіка.

2) Отримувані різними авторами залежності враховують, як правило, часткові задачі, являються вельми наближеними і не враховують цілий ряд факторів. Крім того, в розглянутих нами формулах не враховується метод вибору показника міцнісних властивостей породи, внутрішнє і зовнішнє тертя в камері подрібнення і т.д.

3) Розглянуті закони базуються на процесі подрібнення тіл правильної геометричної форми під дією рівномірно розподілених стискаючих навантажень, фактично ж руйнування матеріалу відбувається під дією зосереджених навантажень. Таким чином застосування законів для розрахунку дробильно-помольних машин потребує подальших досліджень.

#### Література

1. В.С.Блохин, В.И.Большаков, Н.Г.Малич. Основные параметры технологических машин. Машины для дезинтеграции твердых материалов: Учебное пособие. ч.1. – Днепропетровск: ИМА-пресс. – 2006. – 404 с.
2. Б.В. Клушанский, А.И. Косарев, Ю.А. Муйземнек. Дробилки. Конструкция, расчет, особенности эксплуатации. – М.: Маш-ние, 1990. -320 с
3. Брок Д. Основы механики разрушения. – М.: Высш. шк., 1980. – 368 с.
4. Левин В.А., Морозов Е.М., Матвиенко Ю.Г. Избранные нелинейные задачи механики разрушения. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. – 408 с. – ISBN 5-9221-0514-0.
5. Назаренко І.І. Машины для виробництва будівельних матеріалів: Підручник. – К.:КНУБА, 1999. – 488 с.
6. Сапожников М.Я. Механическое оборудование предприятий строительных материалов, изделий и конструкций. Учеб. для строительных вузов и факультетов. М., «Высш. школа». 1971. - 382 с. с илл.
7. Андреев С.Е. О законах дробления. – Горный журнал, 1962, №4
8. Либовиц Г. Разрушение. Т. 1,2,3,7. М., Мир, 1973-1976.
9. Ярошев Д.М. Проблемы комплексной механизации и энергетический метод. М., Стройиздат, 1964.
10. Пейн Р.С., Холмс Д.К., Кларк Х.Е. Предотвращение перебора породы посредством предварительного щелеобразования по контуру выработки // В кн.: Разрушение и механика горных пород. Пер. с англ.). М.: Госгортех-издат. - 1962.
11. Шкуренко Н. С., Рахлин А.В., Спектор М.Д. та ін. Виброметод разработки мерзлых грунтов. М., Стройиздат, 1969.