

Маліч М.Г., Кресс Д.В., Авраменко С.О.

## Оцінка енергетичної ефективності щоківих дробарок з простим і складним рухом щоки

Malich M.G., Kress D.V., Avramenko S.O.

## Evaluation of energy efficiency of jaw crushers with simple and compound jaw movement

**Мета.** Оцінка енергетичної ефективності щоківих дробарок з простим і складним рухом щоки на основі математичного моделювання та використання встановлених закономірностей напружень та деформацій у гірській породі при взаємодії з робочим інструментом.

**Методика.** Використано комплексний метод узагальнення закономірностей теорії пружності та пластичності, закономірності розподілу контактних нормальних та дотичних напружень, рівняння граничного стану матеріалів, заснованих на критерії міцності Кулону; теорії ліній ковзання; зіставлення теоретичних результатів з експериментальними діаграмами «нормальне напруження-подовжня деформація» зразків; факти та явища руйнування гірських порід; узагальнення теоретичних закономірностей, що виникають при силовому контакті інструменту з породою в дробарках.

**Наукова новизна.** При асиметричних контактних дотичних напруженнях в твердому тілі, що деформується, формуються горизонтальні напруження розтягу, при цьому чисельні значення цих напружень зі збільшенням коефіцієнта контактної тертя зростають, а межа міцності на стискання і питома енергія руйнування гірської породи суттєво знижується.

**Результати.** Асиметричне навантаження породи створюється в щоківих дробарках зі складним рухом щоки, в дробарках з простим рухом щоки реалізується більш енергоємне симетричне навантаження, що вимагає збільшувати потужність приводу.

**Практична значущість.** Створення асиметричних умов навантаження з використанням сил контактної тертя з врахуванням фрикційних та міцнісних характеристик матеріалу, що руйнується, дозволять суттєво знизити енергоспоживання при дезінтеграції у щоківих дробарках зі складним рухом щоки.

**Ключові слова:** гірські породи, теорії руйнування, щоківий дробарок, контактне тертя, дотичні напруження, асиметрія, енергія руйнування.

**Goal.** Assessment of the energy efficiency of jaw crushers with simple and complex jaw movement based on mathematical modeling and the use of established patterns of stresses and deformations in the rock during interaction with the working tool.

**Method.** A complex method of generalization of the laws of the theory of elasticity and plasticity, the laws of the distribution of contact normal and tangential stresses, the equation of the limit state of materials based on the Coulomb strength criterion was used; theories of slip lines; comparison of theoretical results with experimental diagrams of "normal stress-longitudinal strain" of samples; facts and phenomena of rock destruction; generalization of theoretical regularities that arise during the force contact of the tool with the rock in crushers.

**Scientific novelty.** With asymmetric contact tangential stresses in a deforming solid body, horizontal tensile stresses are formed, while the numerical values of these stresses increase with an increase in the contact friction coefficient, and the compressive strength limit and the specific energy of destruction of the rock significantly decrease.

**The results.** An asymmetric rock load is created in jaw crushers with a complex movement of the cheek, in crushers with a simple movement of the cheek, a more energy-intensive symmetrical load is implemented, which requires increasing the power of the drive.

**Practical significance.** Creation of asymmetric load conditions using contact friction forces, taking into account the frictional and strength characteristics of the material being destroyed, will allow to significantly reduce energy consumption during disintegration in jaw crushers with complex jaw movement.

**Key words:** rocks, theories of destruction, jaw crusher, contact friction, tangential stresses, asymmetry, energy of destruction.

**Вступ.** Існуючі масові технології дезінтеграції мають низьку ефективність (насамперед енергетичну). І це при тому, що витрати енергії на дроблення та подрібнення гірських порід, вже сьогодні становлять десятку частину всієї виробленої в країні електроенергії, та продовжують зростати [1].

Якщо врахувати, що крім переробки мінеральної сировини процеси руйнування твердих матеріалів широко застосовуються в будівельному, целюлозно-паперовому виробництві, для підготовки деревини, у харчовій промисловості, виробництві медичних препаратів, при переробці побутових та промислових відходів та в інших галузях, то можна зробити висновок, що вони є одними з наймасовіших і водночас енерго-, метало-, капітало-ємних

та трудомістких технологічних процесів. Поряд з цим існуючі технології дезінтеграції не задовольняють низькі вимоги промислового виробництва [2,3], зокрема при збагаченні корисних копалин та при підготовці гірничо-металургійної та хімічної сировини, обладнання для дезінтеграції, яке серійно випускається, вже не забезпечує отримання необхідної енергетичної ефективності дезінтеграції [4].

У зв'язку з цим виникає потреба в управлінні процесами дезінтеграції і ключем до цього є оцінка несучої здатності гірської породи за різних видів впливу робочих органів дробарок різних типів.

У розумінні закономірностей розподілу витрат на дроблення гірської породи важливо знати, що

вони залежать в першу чергу від природи речовини і способу руйнування: розчавлювання, вигин, стирання, удар і так далі. Консервативність галузі не дозволяє в потрібній мірі зробити об'єктивний висновок про енергетичну ефективність різних дезінтеграційних машин.

Все це свідчить про необхідність нових моделей, що описують закономірності дроблення та руйнування гірської породи.

**Основна частина.** Авторами [5,6] під керівництвом професора Васильєва Л.М. розроблено нову

теорію локального руйнування гірської породи при симетричному і асиметричному розподілу контактних дотичних напружень, яка дозволяє керувати процесом руйнування при найменших витратах енергії.

В дослідженні [7] розглянуто розвиток тріщин, які формуються за траєкторіями максимальних ефективних дотичних напружень (ТМЕДН) при симетричному та асиметричному навантаженні (рис. 1).

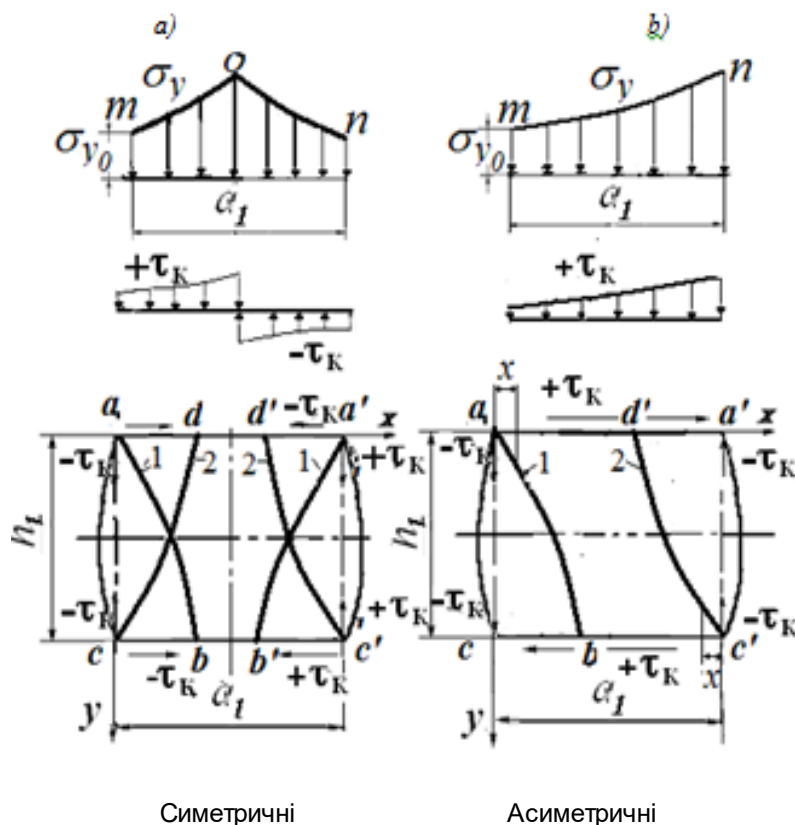


Рисунок 1 – Схеми ТМЕДН при двох видах розподілу дотичних напружень (1-ТМЕДН $\xi$ , 2-ТМЕДН $\eta$ )

Згідно запропонованої теорії [8] при асиметрично спрямованих контактних дотичних напруженнях маємо позитивні знаки на контактних поверхнях при розвитку тріщин зверху вниз за траєкторіями максимальних ефективних дотичних напружень (ТМЕДН)  $\xi$  (рис.1,a) і негативні знаки - знизу вгору за ТМЕДН  $\eta$  (рис.1,b). Для побудови діаграми «питоме зусилля – ордината» для зразків гірської породи при асиметричних напрямках контактних дотичних напружень необхідно визначити питоме зусилля  $p$  на майданчику зразка, що не вийшов з-під навантаження.

Формула розподілу контактних нормальних напружень у цьому випадку має такий вигляд [9]

$$\sigma_{y_i} = \sigma_{y_\xi} \cdot e^{\frac{f_k \cdot x}{g \cdot h_1}} \quad (1)$$

де  $\sigma_{y_\xi}$  – нормальне напруження в кутовій точці тіла, що деформується;  $f_k$  – коефіцієнт контактного тертя;  $x$ – абсциса точки на контактній поверхні;  $h_1$  – висота тіла, яке деформується;  $g$  – параметр уточнення розподілу контактних дотичних напружень.

На рис. 1 можна побачити, що частина зразка, що виходить з-під навантаження в процесі розвитку тріщин при асиметричному навантаженні дорівнює  $2x$ , а частина, що несе, - дорівнює  $(a_1 - 2x)$ . Тоді питоме зусилля згідно зі схемою (рис. 1, b) з урахуванням виходу частини зразка з-під навантаження на величину  $2x$  на підставі формули визначається як

$$p = \frac{\sigma_{y\xi}}{a_1 - 2x_\xi} \int_0^t \left( 1 + \frac{f_k \cdot t}{h_1} \right) dt = \frac{gh\sigma_{y\xi}}{f_k(a_1 - 2x_\xi)} \left( \exp\left( \frac{f_k(a_1 - 2x_\xi)}{gh_1} \right) - 1 \right), \quad (2)$$

де  $t = a_1 - 2x$ .

На підставі отриманого виразу при асиметричному контактному навантаженні розроблено метод розрахунку параметрів діаграм «питоме зусилля – ордината», «напруження – деформація» та енергетичної оцінки процесу руйнування.

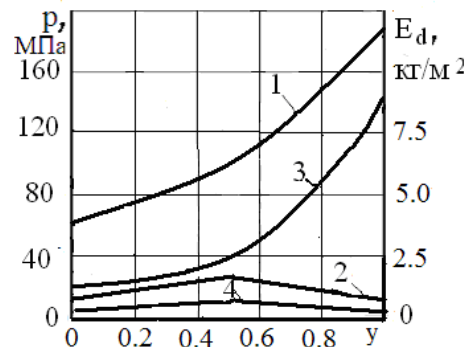
Питоме зусилля при симетричних контактних дотичних напруженнях постійно зростає з розвитком тріщин (рис. 2, крива 1), а при асиметричних спрямованих контактних дотичних напруженнях зростає від ординати вершини тріщини до горизонтальної осі симетрії, потім знижується (рис. 2, крива 2) при цьому максимальне значення питомого зусилля в першому випадку в залежності від показників фізико-механічних властивостей матеріалу в 9-10 разів вище, ніж у другому випадку, при асиметричному розподілі [9].

Для розрахунку питомої енергії руйнування при симетричному та асиметричному розподілі контактних дотичних напружень запропонована формула, що враховує витрати енергії при косому зсуві [9]

$$E_d = \frac{1}{2E} \left( p^2 + \sigma_x^2 - 2\nu p \sigma_x + 2(1 + \nu) \cdot \left( f_k p \left( 1 - \frac{2y}{h} \right) \right)^2 \right). \quad (3)$$

Зазначимо, що четвертий член у дужках формули відноситься до асиметричного навантаження. Принагідно слід підкреслити, що розрахунок за цією формулою свідчить про виникнення стискаючих горизонтальних напружень при симетричному навантаженні, а при асиметричному навантаженні - розтягуючих горизонтальних напружень. Умови асиметрично спрямованих контактних дотичних напружень при дробленні крихких тіл є вигіднішими з точки зору витрат енергії на руйнування в порівнянні з симетричними контактними дотичними напруженнями. Питома енергія руйнування при симетричному навантаженні постійно зростає (рис. 2, крива 3), а при асиметричному навантаженні при розвитку тріщини до горизонтальної лінії симетрії зростає, та потім знижується (рис. 2, крива 4). Загалом асиметричне навантаження зразка теоретично забезпечує зниження питомої енергії руйнування в 40 - 45 разів. Це шокує, але розроблений метод для симетричних дотичних напружень перевірений на всіх відомих шести формах руйнування за досить високої збіжності розрахункових та експериментальних даних. При використанні методу змінено єдиний знак контактного тертя.

Для перевірки теоретичних висновків розглянемо взаємодію елементів плит призматичної фо-



$K_n = 10 \text{ МПа}; \rho = 45^\circ$

Рисунок 2 – Залежність питомого зусилля для зразка при симетричному (1), при асиметричному (2) розподілі і відповідно питомої енергії руйнування (3,4) від ординати вершини тріщини

рми з руйнівним середовищем при прикладенні нормальних та тангенційних навантажень

Конструктивно шокова дробарка [10] (Рис. 3,а) є подібністю преса з вертикальними плитами (щокками) – рухомою та нерухомою. Відмінність від звичайного преса полягає в тому, що рухлива плита здійснює не зворотно-поступальний рух, а коливальний.

Колівальний рух щоки може бути простим чи складним.

Простий рух (рис. 3, б) здійснює шока, підвішена на нерухомій осі. Усі її точки характеризуються однаковим зворотно-поступальним кутовим переміщенням. При зближенні нижнього кінця рухомої щоки з нерухомою шокою відбувається процес дроблення. При розходженні щік відбувається процес розвантаження подрібненого матеріалу.

Складний рух (рис. 3, в) робить шока, підвішена на ексцентрику, який обертається. Траєкторії руху точок рухомої щоки являють собою овалоподібні криві зі значним вертикальним переміщенням у 3 рази більшим за горизонтальний. У решті стадії процесу дроблення при складному русі щоки не відрізняються від простого.

Головна відмінність процесів дроблення матеріалу при складному та простому русі щоки полягає у різній орієнтації сил тертя.

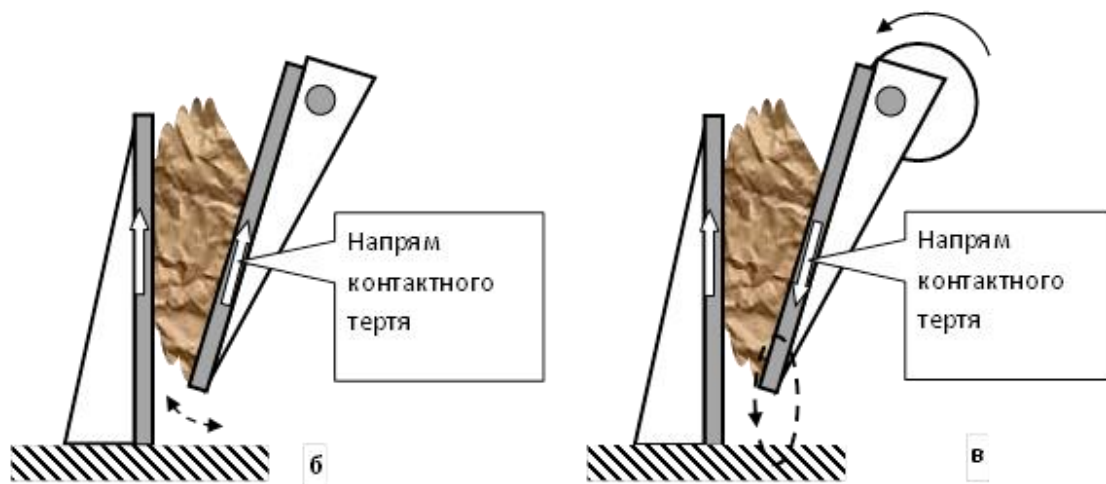


Рисунок 3- Схема щоквої дробарки  
а) загальний вид; б) простий рух щоки; в) складний рух щоки.

Сили тертя на контактї породи зі щоками спрямовані в один бік при простому русі, а при складному русі – у різні боки. Тобто. при простому русі щоки дроблена маса перебуває у умовах одновісного стиску, а за складним рухом щоки – за умов ковзного стиснення.

У ході виконання попереднього етапу роботи було зроблено висновок у тому, що з організації технологічних процесів руйнації у стиснутому середовищі слід прагнути створення умов для ковзного стиску, тобто асиметричного навантаження.

Аналіз накопичених показників роботи щоквих дробарок підтверджує цей висновок. Так, у методиці розрахунку споживаної потужності [11] питома робота дроблення приймається рівною  $18 \text{ МДж/м}^3$  для дробарок з простим рухом щоки та  $16,2$

$\text{МДж/м}^3$  для дробарок зі складним рухом щоки. Тобто. нормативна мінімальна розрахункова ефективність початку режиму ковзного стиску становить 10%. Можна порівняти також каталожні дані щодо продуктивності та встановленої потужності приводу дробарок Вексунського заводу дробильно-подрібнювального обладнання [12] зі складним (ЩДС) та простим (ЩДП) рухом щоки, що наведені на рис. 4.

По горизонтальній осі розташовані значення встановленої потужності приводу, а по вертикальній – номінальна продуктивність при дробленні руди середньої міцності, що вимірюється в кубометрах на годину, та маса дробарки, що вимірюється у тонах.

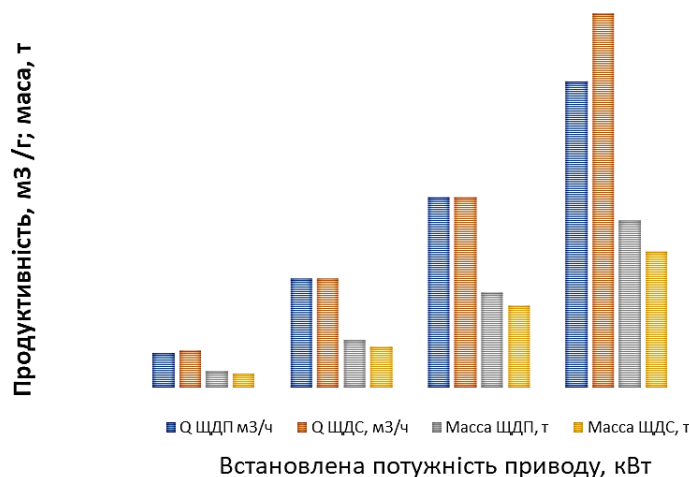


Рисунок 4 - Залежність продуктивності дроблення та маси щекових дробарок від встановленої потужності

Зі збільшенням потужності приводу різниця у продуктивності та масі дробарок зростає. При потужності приводу 75 кВт продуктивність дроблення з ковзним стисканням вище на 10%, а при потужності приводу 250 кВт – вже на 22%. Однакова продуктивність дробарок ЩДС і ЩДП пояснюється, завищеною встановленою потужністю двигуна дробарок зі складним рухом щоки.

Маса дробарок ковзного стискання нижче приблизно на 20%, ніж у дробарок простого стискання.

Хоча ці дані добре підтверджують теоретичні висновки якісно, кількісно експлуатаційні значення (10 – 20%) виявляються помітно меншими за теоретичні, за якими зниження міцності породи при ковзному стисненні може досягати 50% і більше. Ця розбіжність пояснюється кількома причинами. Зокрема, математична модель була побудована для паралельного розташування плит преса, а в дробарці щоки розташовані під деяким кутом, впливом наріфлінь на футеровці щік і т.д. Але го-

ловна причина – втрати енергії на тертя між породою і щоками. При складному русі щока переміщується у радіальному, та у тангенціальному напрямках – вздовж дії сили тертя. Саме шкідлива робота сили тертя на тангенціальному переміщенні «з’їдає» значну частину ефекту від ковзного стиснення і призводить до підвищеного зносу футерування в порівнянні з простим рухом щоки в радіальному напрямку.

**Висновки.** Умови асиметрично спрямованих контактних дотичних напружень при дробленні крихких тіл є більш вигідними з точки зору витрат енергії на руйнування порівняно з симетричними контактними дотичними напруженнями.

Доведена практикою експлуатації перевага у продуктивності дробарок зі складним рухом щоки підтверджує корисність та правильність розроблених математичних моделей асиметричного навантаження та впливу сил тертя на суттєве зменшення енерговитрат у процесі руйнування твердої гірської породи.

#### Список літератури

1. Большаков В.І., Маліч М.Г., Блохін В.С. Дробильно – сортувальні установки // Фундаментальні і прикладні проблеми гірничої металургії. Сб. наук. праць. Вип.15.-Дніпропетровськ: Ін-т чорної металургії, 2007. (Російською).
2. Назаренко, І. І. Міщук, Є. О. (2019). Дослідження динаміки вібраційної щокової дробарки двосторонньої дії. Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини, 94, 5-15. <https://doi.org/10.32347/gbdmm2019.94.0101>
3. В.С. Блохін, В.І. Большаков, М.Г. Маліч Основні параметри технологічних машин. Машини для дезінтеграції твердих матеріалів: Навчальний посібник ч.1 – Дніпропетровськ; ІМА - прес.- 2006. - 404с. (Російською).
4. Штепа В.П. Теорія. Експеримент. Практика. Енергозбереження при машинному виробництві. Монографія. – Дніпропетровськ: ІМА-прес. – 2009. – 268с. (Російською)
5. Васильєв Л.М., Васильєв Д.Л., Маліч М.Г. Самоорганізація форм руйнування зразків гірських порід при їх стисканні: Монографія.- LAP LAMBERT Academic Publishing.-2021- 243с. (Російською).
6. Васильєв Л.М., Васильєв Д.Л., Маліч Н.Г., Ангеловский А.А. Механіка створення форм руйнування зразків гірських порід: Монографія.- Дніпро, ІМА-прес.-2018-172с. (Російською).
7. М. Маліч, Л. Васильєв, Д. Васильєв Оцінка енергії руйнування зразків гірських порід при асиметричному навантаженні // Український гірничий ф-2021. Матеріали міжнародної конференції – Дніпро.- Д.: Національний технічний університет «Дн. політ», 2021. –С. 132-139 .

8. М.Г. Маліч, Д.В. Кресс, З.М. Різо До питання визначення кількості енергії, необхідної для дезінтеграції гірських порід до певного розміру // Системні технології / Регіональний міжвузівський збірник наукових праць – Дніпро, НМетАУ №4 (141).- 2022. – С 115-130, МНБ: Index Copernicus ISSN –print 1562-9945, ISSN – online 2707-7977, DOI 10.34185/1562-9945-4-141-2022.
9. Маліч М.Г. Енергетичний аналіз дроблення рудних матеріалів асиметричним навантаженням // Теорія і практика металургії - Дніпро, НМетАУ №3. 2022. - С.38-44.
10. М.Г. Маліч, Л.М. Васильєв, О.О. Усов Дослідження впливу параметрів навантаження на розподіл напружень, що діють при руйнуванні шихтових матеріалів в дробарках // Металург. та гірничорудн. пром-сть.-2015.-№7.-С.99-106. (Російською).
11. Бедрань Н.Г. Машины для обогащения полезных ископаемых / Н.Г. Бедрань. - К.: Вища школа, 1980.-416с.
12. Справочник по обогащению руд: Специальные и вспомогательные процессы / О.С. Богданов и др. – М.: Недра, 1983.-С.447с.

#### Reference

1. Bol'shakov V.I., Malich M.G., Bloxin V.S. Drobly`no – sortuval`ni ustanovky` // Fundamental`ni i pry`kladni problemy` girny`choyi metalurgiyi. Sb. nauk. pracz`. Vy`p.15.-Dnipropetrovs`k: In-t chornoyi metalurgiyi, 2007. (Rosijs`koyu).
2. Nazarenko, I. I. Mishhuk, Ye. O. (2019). Doslidzhennya dy`namiky` vibracijnoyi shhokovoyi drobarky` dvostoronn`oyi diyi. Girny`chi, budivel`ni, dorozhni ta melioraty`vni mashyn`y`, 94, 5-15. <https://doi.org/10.32347/gbdmm2019.94.0101>
3. V.S. Bloxin, V.I. Bol'shakov, M.G. Malich Osnovni parametry` texnologichny`x mashyn. Mashyn`y` dlya dezintegraciyi tverd`x matery`aliv. Navchal`ny`j posibny`k ch.1 – Dnipropetrovs`k; IMA - pres.- 2006. - 404s. (Rosijs`koyu).
4. Shtepa V.P. Teoriya. Ekspery`ment. Prakty`ka. Energozberezhennya pry` mashynnomu vy`robnycztvi. Monografiya. – Dnipropetrovs`k: IMA-pres. – 2009. – 268s. (Rosijs`koyu)
5. Vasy`lyev L.M., Vasy`lyev D.L., Malich M.G. Samoorganizaciya form rujnuvannya zrazkiv girs`ky`x porid pry` yix sty`skanni: Monografiya.- LAP LAMBERT Academic Publishing.-2021- 243s. (Rosijs`koyu).
6. Vasy`lev L.M., Vasy`lev D.L., Maly`ch N.G., Angelovsky`j A.A. Mexanika stvorennya form rujnuvannya zrazkiv girs`ky`x porid: Monografiya.- Dnipro, IMA-pres.-2018-172s. (Rosijs`koyu).
7. M. Malich, L. Vasy`lyev, D. Vasy`lyev Ocinka energiyi rujnuvannya zrazkiv girs`ky`x porid pry` asy`mery`chnomu navantazhenni // Ukayins`ky`j girny`chy`j f-2021. Materialy` mizhnarodnoyi konferenciyi – Dnipro.- D.: Nacional`ny`j texnichny`j universy`tet «Dn. polit», 2021. –S. 132-139 .
8. M.G. Malich, D.V. Kress, Z.M. Rizo Do py`tannya vy`znachennya kil`kosti energiyi, neobxidnoyi dlya dezintegraciyi girs`ky`x porid do pevnogo rozmiru // Sy`stemni texnologiyi / Regional`ny`j mizhvuzivs`ky`j zbirny`k naukow`x pracz` – Dnipro, NMetAU #4 (141).- 2022. – S 115-130, MNB: Index Copernicus ISSN –print 1562-9945, ISSN – online 2707-7977, DOI 10.34185/1562-9945-4-141-2022.
9. Malich M.G. Energety`chny`j analiz droblennya rudny`x materialiv asy`metry`chny`m navantazhennyam // Teoriya i prakty`ka metalurgiyi - Dnipro, NMetAU #3. 2022. - С.38-44.
10. M.G. Malich, L.M. Vasy`lyev, O.O. Usov Doslidzhennya vplyvu parametriv navantazhennya na rozpodil napruzhen`, shho diyut` pry` rujnuvanni shy`xtovy`x materialiv v drobarkax // Metalurg. ta girny`chorudn. prom-st`. -2015.-#7.-S.99-106. (Rosijs`koyu).
11. Bedran` N.G. Mashynы dlya obogashheny`ya polezny`x y`skoraemy`x / N.G. Bedran`. - K.: Vy`shha shkola, 1980.-416s.
12. Spravochny`k po obogashheny`yu rud: Specy`al`nye y` vspomogatel`nye processy / O.S. Bogdanov y` dr. – М.: Nedra, 1983.-S.447s.