

ВИБІР ПАРАМЕТРІВ ГУМОВОЇ ФУТЕРІВКИ БАРАБАННИХ МЛИНІВ

Є.В. Калганков, Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова Національної академії наук України

Встановлено вихідні данні для проектування та функції, які повинна виконувати футерівка. Проведена порівняльна оцінка роботи металеві та гумові футерівки вказує на суттєві переваги останньої та дала можливість визначити чинники, що суттєво впливають на вибір параметрів футерівки, а саме ударні навантаження. Розглянуто модель передачі ударних навантажень в системі "Кульове завантаження-порода". Також в роботі обґрунтовано тип футерівки, геометричні параметри та її профіль. Наведено рекомендації щодо її проектування.

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними задачами. З другої половини 19 сторіччя в збагачуванні корисних копалин почали використовуватись барабанні млини, які були досить коштовні та для їх захисту від дії матеріалу, що подрібнювався, використовувались захисні футерівки. В якості захисних футерівок перших млинів використовувались різні матеріали (дерево, каміння, кераміка), далі з розвитком промисловості почали використовувати метал, який є найбільш розповсюдженим та дослідженим. Лише з кінця 20 го сторіччя в млинах почали використовувати гумові футерівки, які на сьогодні майже витіснили метал з другої та третьої стадії подрібнення, а також є вдалі спроби використання гуми на першій стадії подрібнення [1]. Дослідженнями встановлено, що гумова футерівка виконує не тільки захисну функцію, а ще й поліпшує умови роботи млина, зменшує шкідливий вплив шуму та вібрації на людину. Але наявних досліджень в області проектування футерівки явно недостатньо, так до сьогодні не існує чіткої методики розрахунку висоти плити, багато вчених розходяться у думках щодо профілю футерівки та параметрів її монтажу. Тому вибір параметрів гумових футерівок є актуальним питанням, що потребує подальшого розгляду.

Аналіз досліджень та публікацій. Використанню гуми в якості матеріалу для виготовлення футерівок присвячено багато робіт, як вітчизняних вчених так і закордонних. Перші згадування про гуму в якості футеруючого матеріалу наведені в патенті США № 582236, де гумові пластини притискалися металевими ліфтерами. Але широкого застосування така футерівка не знайшла і вчені все одно шукали шляхи подовження строку служби металеві футерівки, міняючи або комбінуючи сталі різних марок та профілів, встановленням сталевих і чавунних плит, останні від ударної дії шарів тріскались та руйнувались.

Так в роботі [2] наведено приклад збільшення терміну служби футерівки млина діаметром 4,5 м, де було збільшено товщину футерівочної плити до 200 мм, що в свою чергу призвело до збільшення маси плити, яка становила 0,5 т, а вага комплексу футерівки склала 30 % всієї ваги млина. Збільшення ваги млина впливає на довговічність підшипників, зменшуючи їх ресурс, призводить до збільшення витрати електроенергії та перевитрати шарів. В процесі досліджень виникло протиріччя між збільшенням строку служби футерівки та зменшенням її ваги. Рішення цього протиріччя було знайдене шведськими фірмами "Skega" та "Trelleborg", які встановили в млин гумову футерівку, вага якої в 2-3 рази менше від металеві, а термін служби більше в 1,5 рази. Так починаючи з 60-х років минулого сторіччя почалось використання та дослідження гумові футерівки.

Основними роботами в області дослідження та конструювання гумових футерівок можна виділити роботи Лавендела, Девіса, Шалламаха, Мура, Є.Ф. Чижика, В.Н. Потураєва, В.І. Дирди, В.П. Надутого, П.В. Малярова та інших. Але більшість робіт присвячена розробці зносостійкої конструкції футерівки і такі параметри як товщина плити, її форма в більшості випадків визначаються шляхом проведення експериментальних випробувань, а не розрахунків. Існуючі методики вибору профілю та форми досить суперечливі. Так в роботі [2] запропоновано визначати висоту плити як:

$$S = S_{\min} + S_u + S_k, \quad (1)$$

де S_{\min} - мінімально необхідна товщина футерівки, мм;

S_u - товщина футерівки на знос, мм.

S_k - запас товщини гуми для розміщення кріпильних елементів, 20...30 мм.

Після розрахунку товщини необхідно перевірити футерівку на допустимі напруження. Автор роботи пропонує висоту плити вибирати з умови прогину гуми внаслідок ударної дії кульок та породи, а ширину розраховувати користуючись формулою:

$$b = \frac{\pi \cdot D_m}{N_n}, \quad (2)$$

де D_m - діаметр барабана млина, м;

N_n - рекомендована кількість плит в одному ряді барабана.

Дані розрахунки справедливі для футерівок типу "Плита-ліфтер", яка останнім часом витісняється конструкцією "Плита-плита". В більшості випадків фірми-виробники використовують готові вже випробувані форми плит, які мають певні розміри змінюючи тільки кут нахилу профілю, виготовляючи плиту з симетричним скошеним профілем або з одностороннім скосом та інші. Але матеріал, що підлягає подрібненню, має різні фізико-механічні властивості і тому наробіток футерівки різних виробників суттєво відрізняється, і сьогодні коли на ринку йде жорстка конкурентна боротьба, виграють ті компанії, які мають чіткі методики вибору параметрів футерівки, методики прогнозування їх довговічності з урахуванням специфіки порід, що підлягають подрібненню.

Метою роботи є - розробка методики вибору параметрів гумової футерівки з урахуванням технології подрібнення, властивостей руди та стадії її подрібнення.

Основний матеріал досліджень. Методику проектування гумової футерівки можна розділити на шість етапів (рис. 1), а саме: постановка завдання на проектування; вибір форми футерівки; визначення параметрів футерівки; вибір матеріалу футерівки; технологія виготовлення футерівки; конструювання вузла встановлення футерівки в барабан.

В даній роботі більше уваги приділимо саме вибору параметрів та форми футерівки, так як на сьогодні вони розглянуті недостатньо повно. Проведений аналіз існуючих конструкцій футерівок вказує на їх різноманіття, але можна виділити два типи, які лежать в основі всіх типів футерівок, це конструкція "плита-ліфтер" та "плита-плита".

З такими параметрами як довжина плити та її ширина більш менш все зрозуміло і ці параметри повинні відповідати технологічним можливостям барабана млина, тобто, більшість млинів були виготовлені під металеву футерівку і мають стандартизовані отвори для кріплення плит, тому ширина гумової плити повинна відповідати ширині металевої футерівки. Наближено ширину футерівки можна розрахувати користуючись формулою 2 і скорегувати до розміру, який відповідатиме цілому числу плит, що будуть змонтовані по колу барабана. Для конструкції "Плита-ліфтер" треба враховувати ширину ліфтерів і встановлювати плити згідно кроку ліфтерів.

При використанні футерівки "Плита-плита" ширина плит зазвичай збігається із кроком укладання. Саме крок укладання являється показником якісного монтажу, так як при неправильному виборі кроку укладання футерівка швидко вийде з ладу. Згідно твердження [1, 3] гумова футерівка при зношуванні приймає форму хвилі, при чому незалежно від її типу через певний час роботи утворюється хвиля, і якщо при проектуванні встановити крок укладання плити, що співпадатиме з кроком хвилі, знос футерівки буде мінімальний і футерівка пропрацює заданий термін. Наприклад, для укладання плит у млин діаметром 3,6 м, оптимальний крок установки складає 465 мм, а їх кількість становить 22 штуки.

Геометрична форма плити повинна співпрацювати з завантаженням млина, а в період припрацювання (інтенсивного зношування) утворювати хвилясту поверхню, але навіть збіг розрахункової хвилі укладання елементів футерівки із природньою хвилею їх зношування не дає гарантії того, що згодом ці хвилі будуть збігатися.

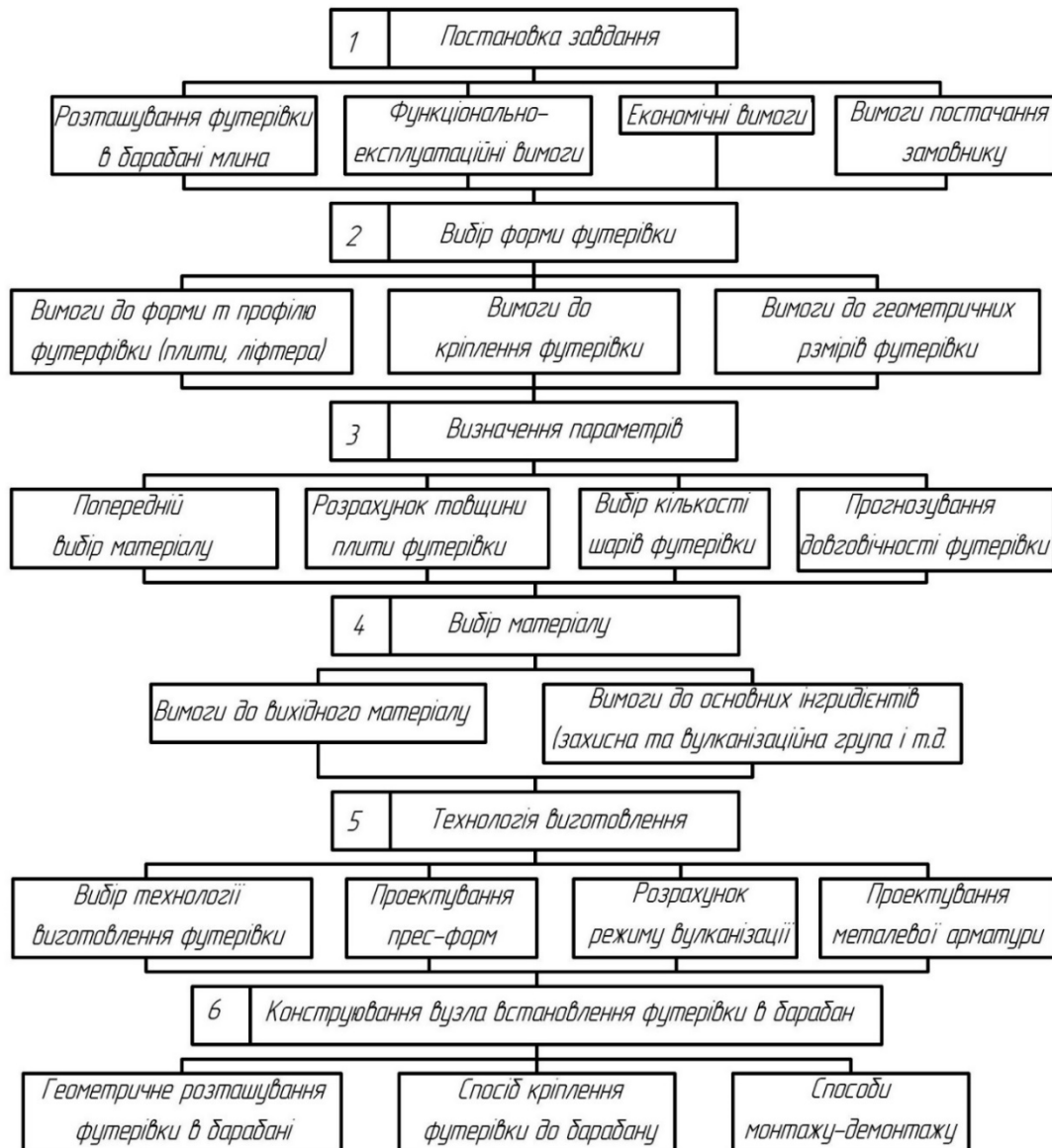


Рис. 1-Етапи проектування гумових футерівок

На практиці спостерігається саме той профіль зношування футерівки, який відповідає характеру, що встановився та взаємодії футерівки й завантаження саме для даного моменту спостереження. Поведінка хвилястого характеру зносу футерівки через певні проміжки часу детально розглянуто в роботі [3]. На погляд авторів для млинів самоподрібнення рекомендовано футерівку "Плита-ліфтер" при чому ліфтер повинен бути прямокутної форми, а для інших футерівка трапецевидної форми типу "Плита-плита".

Довжина плит також приймається з міркувань можливості виготовлення та легкості монтажу, оптимальна довжина гумових плит становить 0,5 та 1 м.

Товщину футерівочних плит слід вибирати по трьом критеріям [1].

- по допустимим напруженням, що виникають внаслідок ударної дії завантаження млина на футерівку;
- за енергетичним критерієм;
- по зносостійкості.

Можна використовувати також інтегральну оцінку пошкодження масиву футерівки, що

враховує зношування й напруги від вдавлення й удару. Обрана в такий спосіб товщина плит футерівки може бути скорегована по чисто конструктивних міркуваннях або з урахуванням тривалої практики експлуатації аналогічних конструкцій. Товщину плит рекомендовано розраховувати згідно рівняння (1) та конструктивних міркувань і накопиченого досвіду експлуатації схожих млинів. Але дані розрахунки справедливі для млинів діаметр яких не перевищує 4 м, на сьогодні в експлуатацію вводять млини з діаметром барабана до 14 м, в яких привальноючим є знос футерівки від ударів шарів і саме ударні навантаження треба враховувати при проектуванні футеровочних плит.

Модель послідовної передачі удару. Розглянемо систему, що складається із трьох твердих тіл із двома пружними проміжними елементами (рис. 2) в якості твердих тіл виступають металеві кулі, а пружні елементи це руда або суміш руди і води у вигляді пульпи.

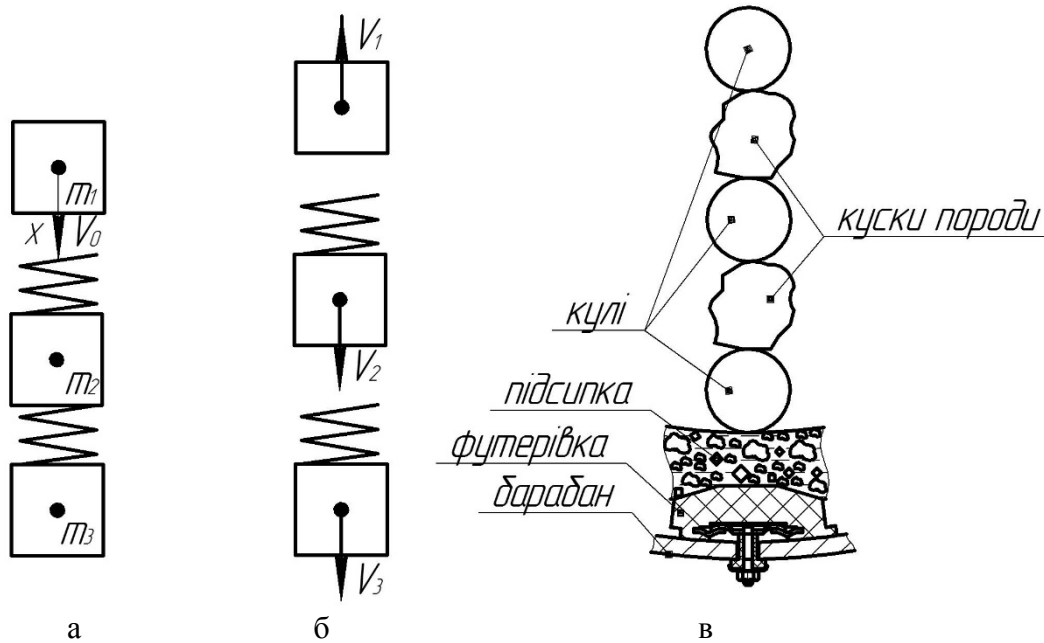


Рис. 2-Модель послідовної передачі удару:
а-до удару, б-після удару, в-схема взаємодії завантаження з футерівкою

Нехай тіла з масами m_2 і m_3 перед ударами нерухомі, а тіло масою m_1 рухається з початковою швидкістю V_0 . При розрахунках таких складних систем звичайно визначають швидкості тіл після удару, частину енергії, що отримується кожним елементом системи, сили удару, часу зіткнення і т. д. Якщо прийняти, що пружні елементи деформуються за лінійним законом:

$$\begin{aligned} P_1 &= f_1(\alpha_1), \\ P_2 &= f_2(\alpha_2), \end{aligned} \quad (3)$$

де α_1 і α_2 – величина стиску першого й другого пружних елементів, тобто

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= x_1 - x_2, \\ \alpha_2 &= x_2 - x_3. \end{aligned} \quad (4)$$

Тоді:

$$\begin{aligned} P_1 &= f_1 \cdot (x_1 - x_2), \\ P_2 &= f_2 \cdot (x_2 - x_3), \end{aligned} \quad (5)$$

а рівняння розглянутої системи можна спрощено записати у вигляді:

$$\begin{cases} m_1 \frac{d^2 x_1}{dt^2} = -f_1(x_1 - x_2), \\ m_2 \frac{d^2 x_2}{dt^2} = f_1(x_1 - x_2) - f_2(x_2 - x_3), \\ m_3 \frac{d^2 x_3}{dt^2} = f_2(x_2 - x_3). \end{cases} \quad (6)$$

Для визначення часу зіткнення першого й другого тіла t_1 , другого й третього тіла t_2 можна записати наступні рівняння:

$$\frac{\mu_2}{\omega_1} \cdot \sin \omega_1' \cdot t_1 = \frac{\mu_1}{\omega_2} \cdot \sin \omega_2' \cdot t_1, \quad (7)$$

$$\omega_2' \cdot \sin \alpha_1' \cdot t_2 = \alpha_1' \cdot \sin \omega_2' \cdot t_2, \quad (8)$$

де μ_1 і μ_2 – відносини амплітуд коливань елементів системи;

ω' – кутова швидкість;

t_1, t_2 – тривалість зіткнень елементів системи.

Коефіцієнт передачі енергії через проміжний пружний елемент буде

$$\eta = \frac{m_3 \cdot (x'_{3m})^2}{m_1 \cdot V_0^2}, \quad (9)$$

де x' – післяударна швидкість третього елемента.

В результаті експериментального дослідження основних параметрів ударної дії елементів в системі "Металевий стрижень-пружина" яка складалась із трьох сталевих стрижнів і двох пружин, вдалося отримати значення величин які наведені в таблиці 1.

Таблиця 1-Результати дослідження ударних параметрів

Параметр	Значення параметру
Маса сталевих стрижнів	$m_1 = 93,5 \cdot 10^{-6}$ кг·с ² /см, $m_2 = 156 \cdot 10^{-6}$ кг·с ² /см, $m_3 = 78 \cdot 10^{-6}$ кг·с ² /см
Твердість на стиск	4,85 кг/см.
Тривалість зіткнення елементів системи	$t_1 = 0,0118$ с; $t_2 = 0,016$ с.
Коефіцієнт передачі енергії удару до останнього елемента: - для системи з двох тіл, - для системи з трьох тіл, - для системи з п'яти тіл.	$\eta = 0,298$, $\eta = 0,52$, $\eta = 0,72$.
Найбільший стиск першого пружного елемента при швидкості $V_0 = 100$ см/с :	$\alpha_{1m} = 3,5$ мм.

За експериментальним даними можна зробити наступний висновок: при недосконалій системі передачі енергії удару проміжні елементи самі стають її споживачами, перехоплюючи частину енергії, призначеної для кінцевого елемента системи. Цей висновок досить важливий для млинів оснащених футерівкою: при обертанні барабана одиничні удари куль і шматків руди по футерівці досить рідкі, так як більшу частину ударів сприймає так звана "Рудна постіль" або підсипка, яка складається з суміші кульок різних розмірів, кусків породи різної зернистості та води. Тому можна стверджувати, що в процесі передачі удару бере участь ціла система, розподіл енергій у такій системі може бути таким, що кінцевий

елемент, який контактує з футерівкою, не одержить енергії, достатньої для його руйнування; в цьому випадку проміжні елементи перехоплять частину енергії й з деякою ймовірністю частина їх може бути зруйнована або вони отримують сколи та тріщини і в наступний момент часу вже будуть зруйновані з меншими витратами енергії.

Послідовна передача енергії удару в системі. При ударному русі нижній елемент при зіткненні з металевою футерівкою руйнується неминуче, захоплюючи частину загальної енергії; при зіткненні з гумовою футерівкою його руйнування проблематичне, однак у цьому випадку завдяки високому коефіцієнту передачі енергії в багатоелементній системі (рис. 2 в) руйнування зазнають два інших шматка руди.

Розглянемо порівняльні дослідження ударних систем для барабанних млинів з різними футерівками. Порівняння будемо проводити в рамках викладених моделей, дані експерименту запозичені з роботи [1].

Таблиця 1-Порівняльні випробування металевої та гумової футерівок за даними А.Н. Дінника

Параметр	Металева	Гумова
Тип удару	в металевій футерівці переважає пружно-пластичний короткий удар, у пружній зоні він розглядається як лінійний.	у гумовій футерівці удар довгий, пружно-грузлий, у зоні контакту суттєво нелінійний.
Тривалість удару (куля Ø 7,62 мм, швидкість V=100 см/с)	t = 0,00022 с.	t = 0,1...0,3 с.
Глибина вдавлювання	$\alpha = (0,07...0,67) \cdot 10^{-3}$ см (при зближенні двох куль діаметром від 0,95 см до 2,86 см при навантаженні 300...800 кгс).	$\alpha = 0,4...1,9$ см (при зближенні кулі діаметром 6,0 см і гумової футерівки товщиною 60...80 мм при навантаженні 470 кгс).
Коефіцієнт відновлення	0,55	≈ 0,26
Напружено-деформований стан	$\sigma z = 7500...50480$ кгс/см ² (кулі діаметром 7,62 мм, швидкість руху 1...100 см/с).	$\sigma z = 180...250$ кгс/см ² (куля діаметром 60 мм з гумовими плитами товщиною 40...80 мм, швидкість V = 12 м/с).

Граничне навантаження визначається в основному величиною дотичних напружень у зоні контакту й ефектом об'ємного стиску. Гума, як нестискаємий матеріал має модуль об'ємного стиску $K = (15...30) \cdot 10^3$ кгс/см² і може витримувати напруги, що набагато перевищують допустимі, монофазного стиску без явних слідів руйнування. У сталі при короткому ударі дотичні напруження за межами пружності матеріалу й руйнування починається з появи віяла тріщин на контурі поверхні тиску. Слід також зазначити, що в зоні удару розвивається досить висока температура; у гумі, в устях тріщин, вона може досягати температури сублімації матеріалу [1, 3]. Питання сублімації тріщини вивчене недостатньо, але експлуатаційні та теоретичні дослідження ударного впливу завантаження млина на футерівку показують, що температура в зоні контакту підвищується до +10...15 °С, а враховуючи те, що за деяких умов температура футерівки в млині сягає 75...80 °С, такий рівень температур є граничним для гуми [4], її подальше локальне, хоча і незначне підвищення, може призвести до різкого зносу та руйнування футерівки.

Проведений аналіз досліджень в області конструювання футерівок та власні промислові дослідження роботи гумових футерівок вказують на те, що найбільш вдалою є конструкція футерівки типу "Плита-плита", а саме трапецевидна плита, яка при взаємодії з завантаженням млина вже на перших тижнях роботи отримує оптимальні морфометричні параметри і сприяє зниженню таких показників як: витрата електроенергії, витрата куль.

Плиту треба конструювати таким чином, щоб її ширина та довжина відповідали конструктивним вимогам барабана млина. Висота плити повинна відповідати певному відношенню висоти плити H до її довжини L [5]:

$$\frac{L}{H} = 0,4 \dots 0,6, \quad (10)$$

Висновки. Завдяки високій технологічності й простоті монтажно-демонтажних робіт гумовій футерівці можна надати найбільш оптимальні морфометричні параметри; при використанні металевої футерівки одержати такі параметри досить важко. Морфометричні параметри сприяють появі найбільш раціональної форми руху завантаження: хвильовій формі руху кусків породи та кульок, більш високому ступеню турбулентності руху пульпи, ефекту самофутерівки, ефекту ковзання завантаження й фрикційних коливань у зоні контакту і т. д., усе це разом сприяє більш активній дезінтеграції руд.

Використання гумової футерівки значно знижує витрати енергії на встановлення певної геометрії поверхні футерівки, яка гармонійно працює з завантаженням млина та подовжує термін її служби.

Вибір оптимальних параметрів гумової футерівки дає можливість більш інтенсивно проводити дезінтеграцію руди та значно підвищити основні параметри процесу подрібнення, а саме: продуктивність по живленню підвищилася на 10...15 %; питома витрата куль скоротилася на 15...20 %; вихід готового продукту збільшився на 3...7 %; питома витрата електроенергії знизилася на 5...10 %.

Список літератури

1. Дырда В. И. Резиновые футеровки технологических машин / В. И. Дырда, Р. П. Зозуля. – Москва – Днепропетровск, 2013. – 237 с.
2. Джирма С. А. Обоснование параметров буферных резиновых футеровок рабочих поверхностей барабанов шаровых мельниц: дис. ... канд. тех. наук: 05.05.02 / Джирма Станислав Александрович; Кировоград. гос. техн. ун-т. – К., 2002. – 177 с.
3. Калганков Є. В. Теоретичне та експериментальне дослідження довговічності гумової футерівки / Калганков Є. В., Цаніді І. М. // Геотехнічна механіка: Міжвід. зб. наук. Праць, Ін-т геотехнічної механіки ім. М. С. Полякова НАН України. – Дніпропетровськ, 2014. – № 116. С. 180–184.
4. Калганков Е. В. Расчет долговечности резиновых футеровок шаровых рудоразмольных мельниц с учетом старения резины / Калганков Е.В. // Геотехнічна механіка: Міжвід. зб. наук. Праць, Ін-т геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України. – Дніпропетровськ, 2013. – № 113. С. 181–202.
5. Пат. 91800 Україна, МПК В02С 17/22. Футерівка барабанного млина / Дирда В. І., Калашніков В. О., Калганков Є. В. та інші.; заявник та власник Дирда В. І., Калашніков В. О., Калганков Є. В. та інші. - у 2014 02657; заявлено 17.03.2014; надруковано 10.07.2014, Бюл.№ 13 – 4 с.: іл.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА КОМПАКТНОГО РОТОРНОГО ЭКСКАВАТОРА К-400 ДЛЯ ОТКРЫТЫХ ГОРНЫХ РАБОТ

Р. Тихи, В. Картишек, Инжиниринговая компания «NOEN», Республика Чехия

Приведены результаты проектирования и создания компактного роторного экскаватора К-400 с невысоким допустимым удельным давлением на поверхность рабочей площадки.

В последние годы сложилась тенденция вторичной разработки техногенных месторождений. Для этих целей проектируются компактные высокопроизводительные комплексы оборудования непрерывного действия.

Компания NOEN в 2014 г. подписала контракт с компанией Mini Marica Iztok. на поставку компактного роторного экскаватора К 400. Компания является одной из крупнейших по