

УДК 621.923

**М.І. СОКУР**, д-р техн. наук

(Україна, Кременчук, Кременчуцький національний університет ім. Михайла Остроградського),

**В.С. БІЛЕЦЬКИЙ**, д-р техн. наук

(Україна, Харків, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут"),

**Д.П. БОЖИК**

(Україна, Кременчук, Кременчуцький національний університет ім. Михайла Остроградського)

## **ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ І ВПРОВАДЖЕННЯ НОВОЇ КОНСТРУКЦІЇ РОЗВАНТАЖУВАЛЬНОГО ВУЗЛА БАРАБАННОГО МЛИНА**

### *Постановка проблеми і стан її вивчення*

Пониження рівня пульпи в барабанах млинів можливо шляхом удосконалення розвантажувальних пристроїв. Розвантажувальний пристрій складається з ґрат і лопатей-ліфтерів, за допомогою яких, пульпа яка пройшла через ґрати, піднімається до рівня розвантажувальної цапфи млина. Розвантажувальні ґрати характеризуються "живим перетином", тобто сумарною площею всіх отворів.

Практика показує, що чим більше живий перетин ґрат, тим краще працює розвантажувальний пристрій. Роль ґрат зводиться лише до утримання в робочому просторі середовища, що дробить, і недоподрібненого матеріалу. При достатньому "живому перетині" ґрат збільшення продуктивності досягається за рахунок підвищення циркулюючого навантаження. Якщо циркулююче навантаження досягає 200%, то розвантажувальний пристрій повинен забезпечувати пропуск матеріалу в кількості 300% продуктивності млина за зливом класификатора. Досвід роботи розвантажувальних пристроїв показує, що елементом, стримуючим її продуктивність, є конструкція підйомних лопатей-ліфтерів.

Підйомні лопаті-ліфтери на промислових млинах в даний час виконуються роздільними, перпендикулярно розташованими до площини розвантажувальних ґрат. Спостереження за їх роботою дозволили виявити наступні недоліки: 1. при підйомі пульпи радіальною лопаттю частина пульпи зливається назад в порожнину млина, створюючи шкідливу внутрішньоподрібнюючу циркуляцію. Це значно знижує продуктивність розвантажувального пристрою. 2. при зливі пульпи з конуса в горловину цапфи частина пульпи зливається в зарешітковий простір, що знижує продуктивність.

Причина незадовільного розвантаження пульпи розвантажувальним пристроєм з радіальними прямими лопатями полягає в тому, що ковзання продукту по підйомній лопаті відбувається надто пізно. Пульпа піднімається лопаттю високо, а потім рухається по траєкторії на периферії розвантажувального пристрою з окружною швидкістю, близькою до критичної. Тому дана частина пульпи має далеку траєкторію і не встигає потрапляти до середини розвантаження для викиду в горловину цапфи.

Досвід показує, що розвантажувальні пристрої, що застосовуються, з прямими радіальними ліфтерами не забезпечують заданої продуктивності при низьких рівнях пульпи. Для того, щоб змусити пульпу ковзати від лопаті до

центру розвантаження, необхідно, щоб площа лопаті складала певний кут з площиною, нормальною до радіусу, проведеного через точку перетину кривої лопаті і радіусу.

Конструкція, експлуатація, ремонт барабанного млина є предметом розгляду у ряді праць як вітчизняних, так і зарубіжних дослідників [1-14].

*Мета статті* – ознайомлення фахового середовища науковців і практиків з результатами експериментальних досліджень і впровадження нової конструкції розвантажувального вузла барабанного млина.

### *Виклад основного матеріалу*

*1. Дослідження і рекомендації.* Національним гірничим університетом та Механобрчермет виконані теоретичні і експериментальні дослідження руху пульпи по розвантажувальній лопаті, які дозволили розробити розвантажувальний пристрій із спіральними та похилими ліфтерами (рис. 1).

Для порівняльної оцінки працездатності розвантажувальних пристроїв, що застосовуються і розроблених, в лабораторних умовах були виготовлені їх моделі з урахуванням геометричної подібності. Випробування розвантажувальних пристроїв проводилися на моделі кульового млина.

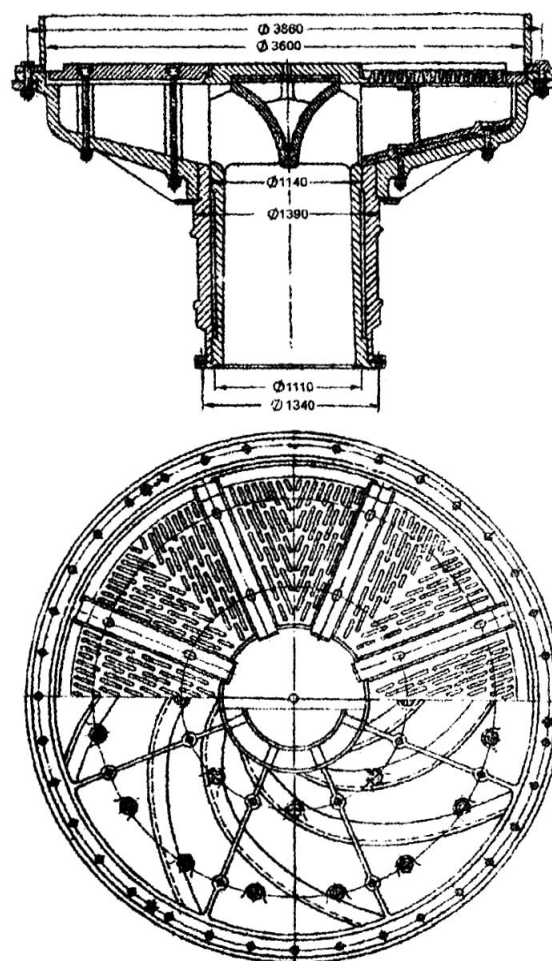


Рис. 1. Розвантажувальний пристрій із спіральними ліфтерами  
(розміри вказані в мм)

Метою експериментальних досліджень було отримання залежностей продуктивності розвантажувального пристрою від форми лопатей-ліфтерів і коефіцієнта рівня розвантаження матеріалу, що виражається:

$$k_y = \frac{h}{D_0},$$

де:  $h$  – висота рівня пульпи біля ґрат;  $D_0$  – внутрішній діаметр барабана розвантажувального пристрою.

Випробування розвантажувального пристрою з прямими радіальними лопатями проводилися для трьох значень коефіцієнта рівня розвантаження  $k_y = 0,1; 0,2; 0,28$  при швидкостях обертання барабана від нуля до критичної. Аналіз отриманих даних (рис. 2) показує, що максимальна продуктивність розвантажувального пристрою відповідає швидкостям обертання барабана, що приймаються в промислових умовах, і прямо пропорційна рівню пульпи біля розвантажувальних ґрат.

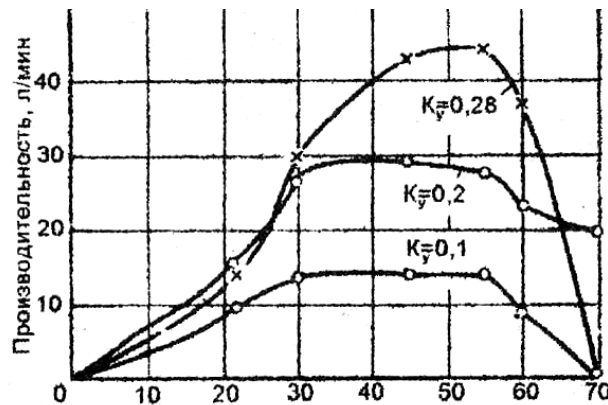


Рис. 2. Залежність продуктивності моделі розвантажувального пристрою з прямими радіальними ліфтерами від рівня пульпи в млині

На рис. 3 представлені графіки продуктивності розвантажувального пристрою із спіральними ліфтерами при коефіцієнтах рівня пульпи  $k_y = 0,1$  і  $0,2$ .

Із зіставлення графіків (рис. 2 і 3) видно, що продуктивність розвантажувального пристрою із спіральними ліфтерами в 3 рази вище, ніж з прямими радіальними.

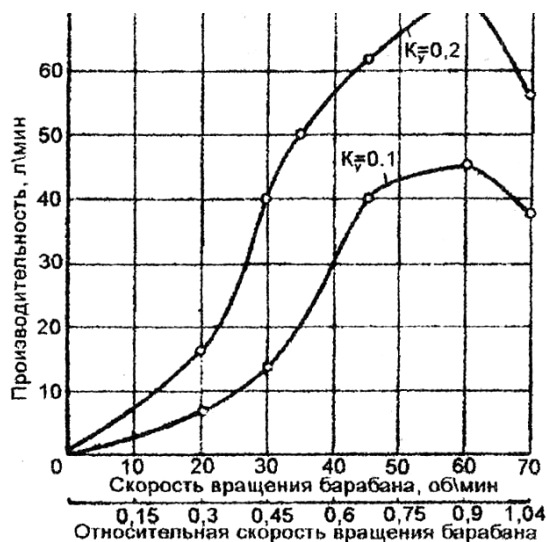


Рис. 3. Залежність продуктивності моделі розвантажувального пристрою із спіральними ліфтерами від рівня пульпи в млині

Як впливає з аналітичних викладок і досвіду експлуатації млинів [2, 4-7], для інтенсифікації розвантаження подрібненого матеріалу з барабана млина і підвищення ефективності його роботи розвантажувальні елеватори і грати млина повинні мати конструкцію, що забезпечує проходження в розвантажувальну камеру максимального об'єму пульпи, в той же час перешкоджає її виливанню назад в подрібнюючу камеру.

Цим вимогам відповідає конструкція розвантажувальних елеваторів з бічними стінками, що мають нахил до ґрат млина у бік обертання її барабана, розроблена на підставі результатів проведених експериментальних досліджень (рис. 4).

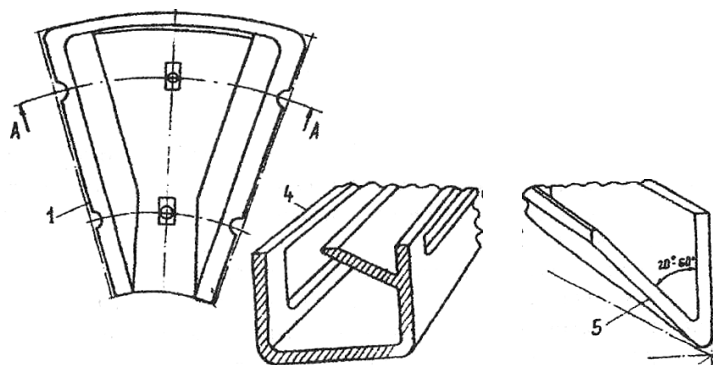


Рис. 4. Розроблена конструкція розвантажувальних елеваторів барабанного млина:  
 1 – загальний вигляд; 2,3 – поперечний перетин старої і нової конструкції відповідно;  
 4,5 – конструктивне виконання для млинів МШР

Для перевірки ефективності роботи запропонованої конструкції розвантажувального пристрою млина були виготовлені і пройшли напівпромислові випробування на дослідній фабриці інституту Механобрчермет розвантажувальні елеватори цієї конструкції. В результаті порівняльних випробувань встановлено, що за ідентичних умов роботи млин з новою конструкцією розвантажувальних елеваторів в порівнянні з існуючою конструкцією може розвивати в серед-

ньому на 30-40% більшу продуктивність по класах -0,040 та -0,074 мм при роботі у відкритому циклі. Для замкнутого циклу подрібнення приріст продуктивності складе 15-20%.

Із застосуванням методик багатофакторного планування експериментів досліджувалися залежності продуктивності проточної частки млина від технологічних і конструктивних параметрів: ступені заповнення барабана  $\varphi$  (%), вмісту твердого в пульпі  $P$  (%), гранулометричного складу продуктів подрібнення  $g$  (%) і кута нахилу розвантажувального конуса  $\alpha^\circ$  (рис. 2).

Для проведення досліджень були спеціально спроектовані і виготовлені напівпромислова і лабораторна подрібнювальні установки. Для методу крутого сходження була прийнята модель вигляду:

$$y = B_0 + B_1x_1 + B_2x_2 + B_3x_3 + B_4x_4, \quad (1)$$

де  $y = Q$  – продуктивність – параметр оптимізації (функція відгуку).

Встановлені закономірності руху подрібненого матеріалу, отримані рівняння регресії (за двома методиками Фішера і Бокса-Вілсона), що відображають залежність продуктивності проточної частини від технологічних і конструктивних параметрів:

$$Q = -52,97 + 0,98g + 0,534\psi + 0,32p + 0,1\alpha, \quad (2)$$

$$Q = -54,3 + 1g + 0,62\psi + 0,29p \quad (3)$$

(при  $30\% \leq g \leq 60\%$ ,  $20\% \leq \psi \leq 50\%$ ,  $40\% \leq p \leq 70\%$ ).

Вільні члени і величини коефіцієнтів при змінних чинниках в рівняннях, отриманих двома методами, трохи відрізняються один від одного. Експериментальна перевірка отриманих рівнянь показала, що значення питомої продуктивності задовільно співпадають з її величинами, отриманими розрахунковим шляхом з використанням виведених рівнянь, і вони можуть бути рекомендовані для практичного застосування.

Зокрема, при розробці конструкції розвантажувальної частини млина необхідно враховувати що, як впливає з виведеної залежності (2), кут нахилу розвантажувального конуса істотно не впливає на продуктивність млина і його можна приймати мінімальним. З урахуванням цього запропонована нова конструкція розвантажувального конуса циліндро-конічної форми і розвантажувальних елеваторів коробчатої форми і з похилими стінками з мінімальним кутом конусності (10-15°).

З використанням запропонованого технічного рішення розроблені робочі креслення розвантажувальної частини для всіх млинів самоподрібнення і кульових МШР 4500×5000 і МШР 4000×7500, що експлуатуються на ГЗК країни. Розроблена конструкція розвантажувальних елеваторів прийнята до впровадження також на млині ММС-105×54, що входить до комплексу збагачувального устаткування продуктивністю 5 млн т/год.

## Підготовчі процеси збагачення

Проведені також експериментальні дослідження зносу футерувань і грат млинів самоподрібнення ММС-70-23 і ММС-90-30 в промислових умовах. Встановлені характер і закономірності зносу футерувань і грат, виявлені причини, що знижують ефективність їх роботи. Встановлено, що максимальний знос мають футерування циліндричної частини барабана біля грат, а грати мають максимальний знос в периферичній частині (біля обичайки барабана).

$\alpha^\circ$		10				20				30				40			
		$\varphi$ %	$g$ %	$P$ %	$P$ %	$\varphi$ %	$g$ %	$P$ %	$P$ %	$\varphi$ %	$g$ %	$P$ %	$P$ %	$\varphi$ %	$g$ %	$P$ %	$P$ %
20	40	■															
	50					■											
	60																■
	70												■				
30	40			■													
	50				■												
	60									■							
	70														■		
40	40				■												
	50																■
	60									■							
	70										■						
50	40		■														
	50																
	60																
	70																■

Рис. 2. Схема багатофакторного планування експериментів для проведення досліджень проточної частини млина самоподрібнення:

$\alpha$  – кут нахилу розвантажувального конуса, град;

$\varphi$  – ступені заповнення барабана %;

$P$  – вміст твердого в пульпі %;

$g$  – гранулометричний склад руди

Розроблені теоретичні передумови, а також результати експериментальних досліджень послужили науково-технічною основою для вдосконалення конструкції і підвищення ефективності роботи проточної частини барабанних млинів. З їх використанням розроблені наступні науково-обґрунтовані рекомендації по конструкції основних вузлів проточної частини млина:

1. розвантажувальні грати виконувати перфорованими квадратними отворами тільки в периферичному поясі, при цьому розмір отворів рекомендується в межах 65×65-90×90 мм, а висота перфорованого поясу 0,05-0,1 діаметру ;

2. можливий варіант виконання розвантажувальних грат комбінованого типу з чергуванням секторів з квадратними і щільовидними отворами у співвідношенні 1:3;

3. розвантажувальні грати млина повинні мати конструкцію, що забезпечує самоочищення і що виключає забивання її отворів шматками матеріалу

критичної величини; для млинів, призначених для подрібнення і диспергації глинистих руд (наприклад, марганцевих), розвантажувальні грати рекомендується виконувати у вигляді сектора, обмеженого хордами з кутом між ними 120-240°;

4. футерування і ліфтери циліндрової частини барабана виконувати змінною, що криволінійно зменшується від центральної частини до торцевих стінок висоти по еліпсоїдному закону; відповідно до характеру зносу кожен елемент може мати жолобчасту Ш-подібну форму з певним співвідношенням розмірів ребер (ліфтерів), яка забезпечує зносостійкість і термін служби при мінімальній металоємності і оптимальних технологічних параметрах роботи млинів;

5. кріплення ліфтерів здійснювати глибоким посадочним містом і приляганням по всій довжині, а безліфтерне футерування відливати спільно з ліфтерами різної висоти;

6. розвантажувальні елеватори виконувати з бічними стінками, що мають нахил до розвантажувальних грат убік, протилежну обертанню млина;

7. для забезпечення максимально раннього початку ковзання матеріалу на розвантаження бічні стінки елеватора рекомендується розташовувати по дотичній до кола розвантажувальної, втулки, при цьому їх периферійну частину виконувати криволінійною;

8. розвантажувальний конус виконати циліндро-конічної форми з незначним кутом конусності і відкритою більшою і меншою підставою (для можливості радіоізотопного контролю ступеня заповнення барабана);

9. розвантажувальну втулку виконувати із спеціальним пристроєм для запобігання викиду пульпи при запуску млина;

10. для млинів одностадіального подрібнення (ММС 70-60 і ін.) обладнати розвантажувальну частину поворотною бутарою спеціальної конструкції.

*2. Впровадження розробок в промисловість.* Результати досліджень проточної частини барабанних млинів послужили науковою базою для створення нових конструкцій вузлів проточної частини і їх широкої реалізації в промисловість. Так, на Північному ГЗК на млинах ММС 90-30А упроваджена нова конструкція футерувань жолобчастої форми з криволінійною формою робочої поверхні, що дозволяє істотно підвищити зносостійкість і інтенсифікувати рух усередині-млинового завантаження. Промисловими випробуваннями встановлено, що термін служби нового футерування склав 6000 маш. год. (на 60% вище, ніж старого), питома витрата 41,25 г/т, питомий знос 18,56 г/т, що на 40% нижче, ніж в старій конструкції.

На Інгулецькому ГЗК упроваджена розроблена конструкція футерувань жолобчастої форми млинів ММС 70-23 з різновисокими ліфтерами, що інтенсифікують рух внутрішньомлинового завантаження при мінімальній металоємності. Впровадження такої конструкції футерування на всіх 24 млинах РОФ-2 і РОФ-3 ІнГЗК дозволило підвищити термін служби, збільшити міжремонтний період, скоротити витрату футерувальної сталі і отримати реальний економічний ефект в сумі 18,2 тис. грн за рік.

Для найбільшого в нашій країні Північного ГЗКа так само розроблені нові

конструкції розвантажувальних ґрат, реалізовані на млинах ММС 90-30А і МРГ 55×75, експлуатованих на РЗФ-2. Ґрати млина ММС 90-30А виконано комбінованими з секторів з вузькими щілинами шириною 12 мм і секторів з квадратними отворами розміром 65×65 мм (співвідношення 14:14), при цьому отвори розташовані в периферичному поясі ґрат заввишки 650-850 мм. Ширина щілин ґрат МРГ 55×75 – 12 мм. Впровадження даної розробки на Північному ГЗК дозволило інтенсифікувати вивід з млина кондиційного по крупності матеріалу, підвищити ефективність роботи подрібнюючого відділення збагачувальної фабрики.

Розвантажувальні ґрати такої ж конструкції впроваджені так само на млинах ММС 70-23, експлуатованих на ЗФ-2 і ЗФ-3 Інгuleцького ГЗК. В результаті підвищилася ефективність роботи млинів, що дозволило збільшити випуск концентрату на 21 тис. тонн на рік.

Враховуючи перспективність і високу ефективність розробленої конструкції розвантажувальних ґрат комбінованого типу, в промислових умовах Інгuleцького ГЗК були проведені широкомасштабні дослідження такої конструкції ґрат з метою оптимізації виводу з млина гальки і скрапу і мінімізації його роботи по критерію втрати заліза в хвостах.

На підставі результатів цих досліджень для умов Інгuleцького ГЗК запропонована конструкція ґрат комбінованого типу із співвідношенням площ живого перетину секторів з щілиновидними і квадратними (або круглими) отворами 3:1. Це технічне рішення успішно апробовано в промислових умовах і реалізовано на 20-ти млинах ММС 70-23 на ІнгЗК. Впровадження цієї розробки дозволило підвищити ефективність роботи млинів, підвищити масову частку заліза в концентраті на 0,05%.

Основні закономірності руху матеріалів в проточній частині млина і результати експериментальних досліджень цього процесу послужили науковою основою для створення принципово нових конструкцій елеваторів, що дозволяють підвищити ефективність розвантаження кондиційного по великій матеріалу, усунути внутрішньомлинову циркуляцію, підвищити продуктивність, зменшити питому витрату електроенергії на подрібнення і, зрештою, істотно підвищити ефективність роботи барабанних млинів.

Розроблені на цій науковій основі нові технічні рішення реалізовані в новій конструкції розвантажувальних елеваторів млинів самоподрібнення. По технічній документації розробленій в інституті Механобрчермет, на Криворізькому ЦРЗ, було організовано серійне виробництво запропонованої конструкції елеваторів для млинів ММС 90-30А, експлуатованих на РЗФ-2 Північний ГЗК. Впровадження нової конструкції елеваторів на цих млинах дозволило підвищити ефективність їх роботи, збільшити термін служби розвантажувальних пристроїв в три рази (з 4000 до 12000 год) і скоротити простій кожного млина на 56 год. на рік.

Результати аналітичних і експериментальних досліджень послужили так само науковою основою для створення конструкції розвантажувальних елеваторів барабанних млинів похилого типу що дозволяють істотно підвищити ефективність роботи млина.



Відмінною особливістю нової конструкції розвантажувальних елеваторів є те, що вони виконані V-подібної форми, при цьому бічні стінки елеваторів виконані з нахилом до розвантажувальних ґрат убік протилежно напрямку обертання барабана млина. В результаті похилого розташування стінок елеваторів вони утворюють жолоб V-подібної форми, тому матеріал, що знаходиться в елеваторі, розташований істотно нижче за рівень отворів ґрат, отже, пульпа не має можливості в процесі обертання барабана млина вилитися назад в подрібнюючу камеру барабана через отвори розвантажувальних ґрат. Завдяки цьому усувається внутрішньомлинова циркуляція і прискорюється вивід з млина готового продукту, що дозволяє підвищити ефективність подрібнення, і, отже, питому продуктивність по знов утвореному класу, а також понизити питому витрату електроенергії на подрібнення, оскільки виключаються непродуктивні витрати електроенергії на переподрібнення вже кондиційного по величині матеріалу.

Проведені випробування і впровадження нової конструкції розвантажувальних елеваторів млинів МШР-40×50 і МШР-45×50 в промислових умовах збагачувальних фабрик ПівнГЗК і НКГЗК.

Випробуваннями встановлено, що створена конструкція розвантажувальних елеваторів дозволяє підвищити питому продуктивність млинів на 5-10% і понизити питому витрату електроенергії на подрібнення на 5-11%. Крім того, нова конструкція елеваторів має значно меншу металоемність, тому маса комплектів елеваторів млинів МШР-40×50 на 3700 кг, а млинів МШР-45×50 на 500 кг менше мас комплектів елеваторів цих млинів старої конструкції, відповідно і вартість їх менше. Тривалими дослідженнями надійності, характеру і закономірностей зносу нової конструкції розвантажувальних елеваторів встановлено, що питомий знос їх склав 0,49 г/т, а термін служби 20000 год., що на 4500 год. більше, ніж термін служби старої конструкції елеваторів.

Враховуючи високу ефективність створеної конструкції розвантажувальних елеваторів вони рекомендовані до широкого впровадження на всіх типах барабанних млинів з ґратами. Тому така конструкція розвантажувальних елеваторів використана при розробці проекту млина самоподрібнення ММС-105-90 з об'ємом барабана 400 м<sup>3</sup> і потужністю приводу до 10000 кВт.

Крім того, за замовленням Інгулецького ГЗКа інститутом Механобрчермет було розроблено технічне завдання, а НКМЗ виготовлені нові універсальні млини МШЦ-40×75 і МШР-40×75, при створенні яких упроваджені нові конструкції розвантажувальних елеваторів і втулки. Ці млини є універсальними, оскільки вони можуть працювати в режимі як рудногалечного так і кульового подрібнення, а принципово нова конструкція їх розвантажувальної частини не тільки істотно підвищує ефективність їх роботи, але і дозволяє проводити радіоізотопний контроль ступеня заповнення млинів з боку розвантаження. Млини пройшли промислові випробування на ЗФ № 2 ІнГЗК. Випробуваннями встановлено, що застосування нових універсальних млинів МШР-40×75 (рис. 5, 6) в схемах повного самоподрібнення дозволяє підвищити продуктивність секції на 5,4 т/год., а якість концентрату на 0,05%. Застосування їх в схемах комбінованого подрібнення дозволяє підвищити продуктивність секції на 30 т/год.

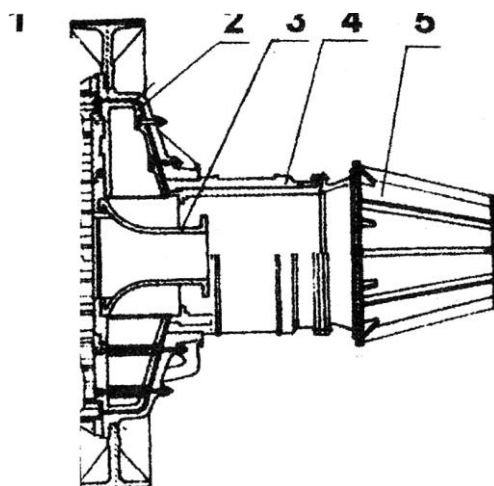


Рис. 5. Нова конструкція розвантажувальної частини універсального барабанного млина МШР-40×75:  
1 – грати, 2 – розвантажувальний елеватор похилого типу,  
3 – втулка, 4 – цапфа, 5 – бутара

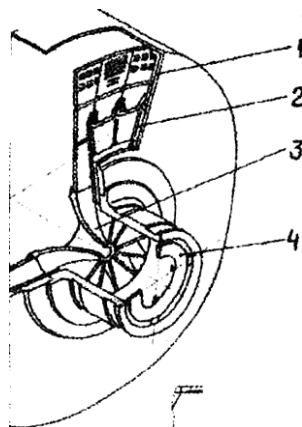


Рис. 6. Нова конструкція розвантажувальної частини барабанного млина:  
1 – розвантажувальні грати комбінованого типу;  
2 – розвантажувальні елеватори похилого типу;  
3 – розвантажувальний елеватор коробчатої форми;  
4 – розвантажувальна втулка

Таким чином, результати виконаних аналітичних і експериментальних досліджень послужили науковою базою для створення принципово нової конструкції проточної частини барабанного млина, широко реалізованого у виробництві.

### *Висновки*

1. На основі експериментальних даних розроблені математичні моделі, що описують механізм руху пульпи в проточній частині барабанного млина і відображають фізичну суть і закономірності процесів, що відбуваються в робочій камері млина.

2. Доведено, що при роботі барабанного млина через недосконалість конструкції його проточної частини значна частина подрібненого матеріалу не роз-

вантажуються з млина, а повертається назад в подрібнюючу камеру барабана, істотно знижуючи ефективність її роботи.

3. Показано що розвантажувальна частина барабанного млина (грати, елеватори, конус) повинна мати конструкцію, що забезпечує проходження з подрібнювальної камери в розвантажувальну максимального об'єму пульпи і що перешкоджає її виливанню назад при максимально ранньому початку ковзання матеріалу по розвантажувальних елеваторах на розвантаження.

4. Рациональною є конструкція розвантажувального вузла, яка унеможливіє внутрішньомлинову циркуляцію, тобто коли весь матеріал пройшов через грати в розвантажувальні елеватори і вивантажується з млина.

5. Живий перетин грат, перетин і об'єм розвантажувальних елеваторів повинні бути такими, щоб за час руху в пульпі розвантажувальна камера повністю заповнилася, в той же час різниця між часом руху сектора в пульпі і необхідним часом його заповнення повинна бути мінімальною або рівною нулю.

6. З використанням розроблених теоретичних передумов і експериментальних досліджень запропоновані науково-обґрунтовані конструкції основних вузлів проточної частини млина: розвантажувальні грати комбінованого типу з робочими поверхнями, що самоочищаються; футерування змінної висоти Ш-подібної форми, що змінюється по еліпсоїдному закону; розвантажувальні елеватори похилого типу і з криволінійною робочою поверхнею; розвантажувальний конус циліндро-конічного типу; розвантажувальна втулка з пристроєм для запобігання викиду пульпи; поворотні бутари.

7. Розроблені науково-технічні рішення широко упроваджені у виробництво і використовуються машинобудівними заводами країни при створенні комплексів рудоподрібноувальних млинів великої одиничної потужності.

8. Результати виконаних теоретичних і експериментальних досліджень є науково-технічною основою для створення нового покоління подрібнюючого устаткування.

### Список літератури

1. N. Sokur, V. Biletskyy, L. Sokur, D. Bozyk, I. Sokur. Investigation of the process of crushing solid materials in the centrifugal disintegrators // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2016. – 3/7 (81). – P. 34-40.

2. Сокур, Н. И. Дробление и измельчение руд [Текст] / Н. И. Сокур, В. Н. Потураев, Е. К. Бабец. – Кривой Рог: ВЭЖА, 2000. – 290 с.

3. Jankovic, A. Relationships between comminution energy and product size for a magnetite ore [Електронний ресурс] / A. Jankovic, H. Dundar, R. Mehta // The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy. – March 2010. – Vol. 110. – Pp. 141-146. – Режим доступу : URL: <http://www.scielo.org.za/pdf/jsaimm/v110n3/07.pdf>.

4. Підготовка корисних копалин до збагачення: монографія / М.І. Сокур, В.С. Білецький, О.І. Єгурнов та ін. – Кременчук: Кременчуцький національний ун-т ім. М.Остроградського, Академія гірничих наук України. ПП Щербатих О.В., 2017. – 392 с.

5. Серго Е.Е. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых. – М.: Недра, 1985. – 282 с.

6. Сокур Н.И., Соколовский А.К. Закономерности движения материала в разгрузочной части барабанной мельницы с принудительной разгрузкой // Гор. журн. – 1981. – №6. – С. 51-53.

7. Смирнов В.О., Білецький В.С. Підготовчі процеси збагачення корисних копалин: Навчальний посібник. – Донецьк: Східний видавничий дім, Донецьке відділення НТШ, 2012. – 284 с.

8. Wills, B.A. (2006). Mineral Processing Technology: An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery. 7th ed. Amsterdam ; Boston, MA. p. 157.

9. Gupta A. and Yan D. S. (2006), Mineral Processing Design and Operation, pp 161-253, publisher: Elsevier Science & Technology Books. <http://www.poly-corp.com/mining/>

10. Wills, B.A. (2006), Mineral Processing Technology, pp 146-182, publisher: Elsevier Science & Technology Books.

11. Kenneth N. Han and Maurice C. Fuerstenau (2003), Principles of Mineral Processing, pp 83-95, publisher: Society for mining, Metallurgy and Exploration.

12. Mular, A. (1989), Advances in Autogenous and Semi autogenous Grinding Technology, pp 565-578.

13. Mular, Andrew L. and Bhappu, Roshan B., Mineral Processing Plant Design (2nd Edition), pp 243-290, publisher: Society for mining, Metallurgy and Exploration.

14. Taggart, Arthur F. (1997), Handbook of Ore Dressing, pp 5.11-5.96, publisher: McGraw Hill, New York.

© Сокур М.І., Білецький В.С., Божик Д.П., 2017

*Надійшла до редколегії 18.11.2017 р.*

*Рекомендовано до публікації д.т.н. Л.Ж. Горобець*

УДК 622.026

**В.Ф. ГАНКЕВИЧ**, канд. техн. наук

(Україна, Днепр, Государственное ВУЗ "Национальный горный университет"),

**В.И. КРАВЕЦ**, канд. техн. наук

(Україна, Днепр, Государственное ВУЗ "Украинский государственный химико-технологический университет"),

**О.В. ЛИВАК**

(Україна, Днепр, Государственное ВУЗ "Украинский государственный химико-технологический университет")

## **РАЗУПРОЧНЕНИЕ ТВЕРДЫХ ПОРОД ТЕПЛОВЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ**

Резкое охлаждение породы, нагретой до высоких температур, приводит к развитию мощных растягивающих напряжений на охлаждающей поверхности и, как следствие, растрескиванию породы. Для реализации термоциклического разрушения необходимо поверхность породы сначала каким-то образом нагреть до высоких температур, а затем резко охладить. Способов нагрева горной породы существует достаточно много: горячей газовой струёй, струёй перегретого пара, электронагревом, плазменной струёй, трением и т.д. [1].

Все эти способы в той или иной мере прошли испытания на горных породах. В стеснённых условиях скважин и при наличии больших глубин бурения или обработки полученных полостей практическая реализация большинства способов предварительного нагрева является очень сложной технической задачей. В то же время, при бурении любой скважины имеет место вращение инст-