

**ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ЕФЕКТ ЗРОСТАННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ  
ПОДРІБНЕННЯ ЗІ ЗНИЖЕННЯМ ШВИДКОСТІ ОБЕРТАННЯ  
БАРАБАННОГО МЛИНА**

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ ВОЗРАСТАНИЯ  
ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ СО СНИЖЕНИЕМ  
СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ БАРАБАННОЙ МЕЛЬНИЦЫ**

**TECHNOLOGICAL EFFECT OF INCREASING PERFORMANCE  
GRINDING REDUCED SPEED ROTATION OF THE TUMBLING MILLS**

**Науменко Ю.В., д.т.н., доцент (Національний університет водного  
господарства та природокористування, м. Рівне)**

**Науменко Ю.В., д.т.н., доцент (Национальный университет водного  
хозяйства и природопользования, г. Ривне)**

**Naumenko Yu. V., Doctor of Engineering, Associate Professor (National  
University of Water Management and Natural Resources Use, Rivne)**

Запропоновано процес останньої стадії подрібнення в барабанному  
мліні. Розглянуто тихохідний режим обертання млина із малим вмістом  
подрібнюваного матеріалу у внутрішньокамерному завантаженні.  
З'ясовано вплив зміни швидкості обертання та структури завантаження  
на продуктивність та енергетичну ефективність процесу.

Предложен процесс последней стадии измельчения в барабанной  
мельнице. Рассмотрен тихоходный режим вращения мельницы с малым  
содержанием измельчаемого материала во внутрекамерной загрузке.  
Выяснено влияние изменения скорости вращения и структуры загрузки  
на производительность и энергетическую эффективность процесса.

A process of a tumbling mill grinding last stage is proposed. The low-speed  
rotation mode with a small mill containing the grinding material into  
intrachamber filling is considered. The influence of varying the speed and  
structure of filling performance and energy efficiency of the process is  
discovered.

**Ключові слова:**

Млин, барабан, камера, завантаження, подрібнення, процес, стадія, енергія,  
ефективність.

Мельница, барабан, камера, загрузка, измельчение, процесс, стадия, энергия, эффективность.

Mill, drum, chamber, filling, grinding, process, stage, energy, efficiency

**Традиційні барабанні млини** залишаються основним обладнанням багатотонажного тонкого подрібнення дисперсних матеріалів в промисловості будівельних матеріалів та в інших галузях виробництва. Головним недоліком такого обладнання є висока питома енергоємність робочого процесу. Радикально підвищити надзвичайно низьку ефективність тонкого подрібнення в барабанних млинах можна лише на основі принципу енергетичної селективності подрібнення [1]. Однак існуючі методи розрахунку робочих процесів таких млинів базуються на концепції ізольованого від оточуючого середовища окремого елемента завантаження камери, який рухається під дією лише масових сил тяжіння і відцентрової інерції та реакції обмежуючої поверхні.

**Натомість подальші дослідження** показали, що реальним усталеним режимом руху завантаження є трифазний, із третьою зону зсувного шару. Прикладне використання рекомендацій щодо селективності дезінтеграції стосовно подрібнення в барабанних млинах полягає у здійсненні грубого подрібнення при підвищенні швидкості обертання, а тонкого подрібнення – при зниженні.

Однак явище підвищення ефективності подрібнення за рахунок зміни режимів руху внутрішньокамерного завантаження є ще недостатньо вивченим, а рекомендації щодо вибору раціональних технологічних та конструктивних параметрів барабанних млинів – неоднозначними.

**Метою досліджень було** експериментальне визначення кількісних характеристик ефективності застосування енергетичної селективності подрібнення в барабанних млинах [2]. Зокрема передбачалось встановити вплив значення швидкості обертання барабана та вмісту частинок подрібнюваного матеріалу у завантаженні на зростання продуктивності та зниження питомої енергоємності робочого процесу при застосуванні зовнішньокамерної багатостадійності подрібнення в таких млинах.

**Дослідження проводились** на дослідному зразку лабораторного барабанного млина. Визначення гранулометричного складу вихідного матеріалу та готового продукту помелу проводилось шляхом просівання їх крізь сита та розрахунку вмісту фракцій.

Для проведення експериментів по помелу використовувався цементний клінкер ПАТ «Волинь-цемент», який був підготовлений шляхом попереднього дроблення і мав гранулометричний склад: від 0,08 до 0,16 мм – 17%, від 0,16 до 0,315 мм – 25%, від 0,315 до 0,63 мм – 30%, від 0,63 до 1,25 мм – 28%.

Було використано барабан із камерою без виступів радіусом  $R=106$  мм та довжиною 100 мм.

Як молольні тіла в лабораторному млині використовувались сталеві кульки діаметром  $d=5,5$  мм. Шорсткість поверхні кульок відповідала технічним вимогам до молильних куль. Об'ємна частка куль у завантаженні становила приблизно 60 %, решта 40 % припадала на порожнини.

Продуктивність помелу оцінювалась за значеннями просіву через контрольне сіто № 008. Продуктивність у відносних одиницях, відсотках, визначалась за виразом  $\Pi=100\cdot Z$  (%), де  $Z$  – залишок на ситі № 008 (%). Енергетична ефективність процесу оцінювалась за питомою витратою енергії при отриманні цього просіву  $E=N/\Pi$ , де  $N$  – потужність приводу обертання завантаженого барабана.

Чисельне значення зміни продуктивності різних режимів роботи млина оцінювалось співвідношенням  $\Pi_M/\Pi_T$ , де  $\Pi_M$  та  $\Pi_T$  – продуктивності помелу для модернізованого та традиційного режимів. Зміна питомої витрати енергії оцінювалася співвідношенням  $E_M/E_T=(N_M/\Pi_M)/(N_T/\Pi_T)$ , де  $E_M$  та  $E_T$  – питомі витрати енергії для модернізованого та традиційного режимів,  $N_M$  та  $N_T$  – потужність приводу для модернізованого та традиційного режимів.

Досліджувалась ефективність запропонованої останньої стадії тонкого помелу. Ступінь заповнення камери завантаженням становила  $\kappa=0,25$ . Ступінь заповнення завантаження частинками подрібнюваного матеріалу  $\kappa_{M3}$  складала 0,05, 0,075 та 0,1. Швидкість обертання для модернізованого режиму становила  $\psi_\omega=0,25, 0,3$  та  $0,35$ , а для традиційного –  $\psi_\omega=0,75$ .

Тривалість процесу подрібнення становила 30 хв.

Результати досліджень наведено у табл., де  $\psi_\omega$  – відносна кутова швидкість барабана;  $\kappa$  – ступінь заповнення камери завантаженням;  $\kappa_{M3}$  – ступінь заповнення завантаження частинками подрібнюваного матеріалу;  $Z$  – залишок на ситі 0,08 мм;  $\Pi$  – відносна продуктивність помелу;  $\Pi_M/\Pi_T$  – відношення продуктивності модернізованого та традиційного режимів роботи;  $E_M/E_T$  – відношення енергоємностей режимів роботи.

Таблиця

Результати експериментальних досліджень

№ з/п	Тип режиму	$\psi_\omega$	$\kappa_{M3}$	$Z$	$\Pi$	$\Pi_M/\Pi_T$	$E_M/E_T$
1	традиційний	0,75	0,05	0,876	0,124	-	-
2	модернізований	0,25	0,05	0,808	0,192	1,548	0,215
3	модернізований	0,3	0,05	0,849	0,151	1,217	0,328
4	модернізований	0,35	0,05	0,885	0,115	0,927	0,503
5	традиційний	0,75	0,075	0,721	0,279	-	-
6	модернізований	0,25	0,075	0,805	0,195	0,698	0,476
7	модернізований	0,3	0,075	0,794	0,206	0,738	0,542
8	модернізований	0,35	0,075	0,846	0,154	0,551	0,845
9	традиційний	0,75	0,1	0,654	0,346	-	-
10	модернізований	0,25	0,1	0,833	0,167	0,482	0,690
11	модернізований	0,3	0,1	0,808	0,192	0,554	0,721
12	модернізований	0,35	0,1	0,831	0,169	0,488	0,955

Графіки отриманих результатів зображені на рис. 1-4.

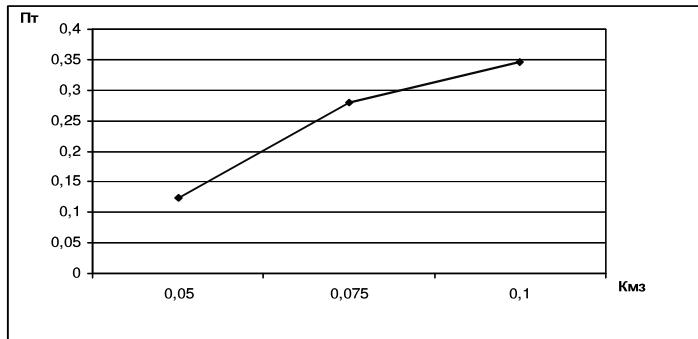


Рис. 1. Залежність  $\Pi_m$  від  $\kappa_{Mz}$

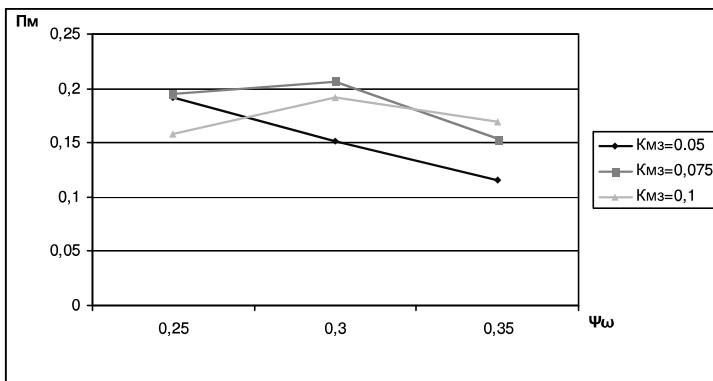


Рис. 2. Залежність  $\Pi_m$  від  $\psi_\omega$  для різних  $\kappa_{Mz}$

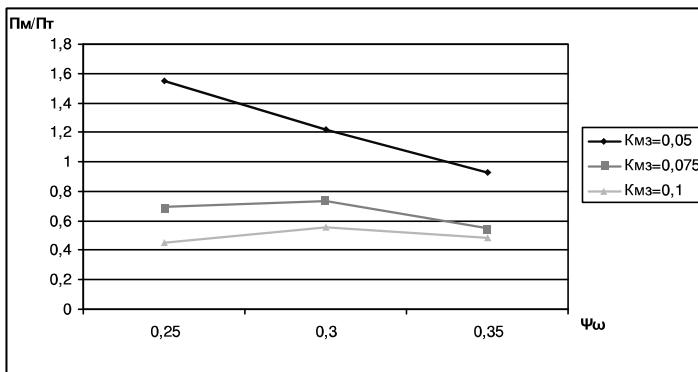


Рис. 3. Залежність  $\Pi_m/\Pi_t$  від  $\psi_\omega$  для різних  $\kappa_{Mz}$

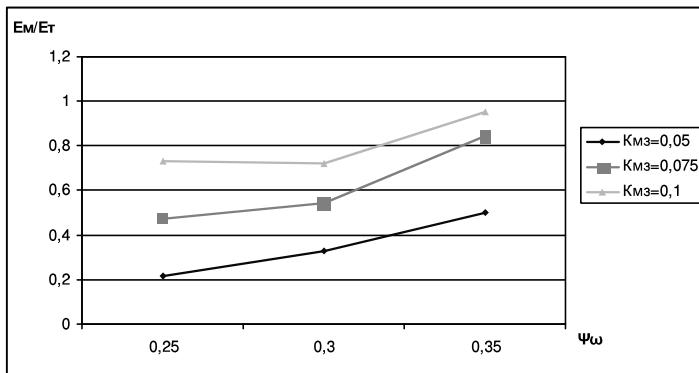


Рис. 4. Залежність  $E_m/E_t$  від  $\psi_\omega$  для різних  $\kappa_{m3}$

Із рис. 1 випливає, що продуктивність традиційного способу роботи млина, при традиційному значенні швидкості обертання, зі зниженням ступеня заповнення внутрішньокамерного завантаження подрібнюваним матеріалом спадає.

Рис. 2 показує, що продуктивність модернізованого способу роботи млина зі зниженням швидкості обертання переважно зростає.

Рис. 3 засвідчує, що, при вмісті подрібнюваного матеріалу у завантаженні 0,075-0,1, продуктивність модернізованого способу є нижчою за продуктивність традиційного, а їх співвідношення слабо залежить від швидкості обертання. Разом з тим, при вмісті подрібнюваного матеріалу у завантаженні 0,05 та відносній швидкості обертання 0,25-0,3, продуктивність модернізованого способу перевищує продуктивність традиційного у 1,22-1,55 раз, а їх співвідношення зростає зі зниженням швидкості обертання.

Рис. 4 показує, що питома енергоємність модернізованого способу є нижчою за енергоємність традиційного і складає 0,22-0,9 від останньої, а їх співвідношення знижується зі зменшенням швидкості обертання та ступеня заповнення завантаження подрібнюваним матеріалом.

Виявилось, що застосування запропонованої останньої стадії тонкого подрібнення, порівняно із традиційним одностадійним процесом, при  $\kappa_{m3}>0,05$  спричинює зниження продуктивності на 7-52 %. Разом з тим встановлено, що при  $\kappa_{m3}=0,05$  та  $\psi_\omega=0,25-0,3$  продуктивність запропонованого способу зростає на 22-55 %. Крім того, при цьому істотно знижуються питомі витрати енергії на 5-78 %. Зі зменшенням швидкості обертання ефективність нового процесу за енергоємністю, а, при  $\kappa_{m3}=0,05$  та  $\psi_\omega=0,25-0,3$ , і за продуктивністю, зростає.

Зареєстрований ефект має парадоксальний характер, оскільки зниження швидкості руху зменшує кінетичну енергію дії молотильних тіл на подрібнюваний матеріал. Фізичним поясненням такого технологічного результату може бути встановлений раніше механічний ефект прояву

тихохідного локального швидкісного максимуму динамічної активності зсувного шару зернистого завантаження обертової камери. На рис. 5 наведено характерні залежності псевдотемператури завантаження  $T$  від відносної швидкості обертання. Квазітемпература  $T$  є питомою кінетичною енергією, що відповідає випадковому хаотичному руху елементів. Така температура має комплексний характер, визначає ступінь активності взаємних переміщень елементів та інтенсивність протікання в зернистому середовищі технологічних процесів і є основним критерієм ефективності тонкого подрібнення в барабанних млинах.

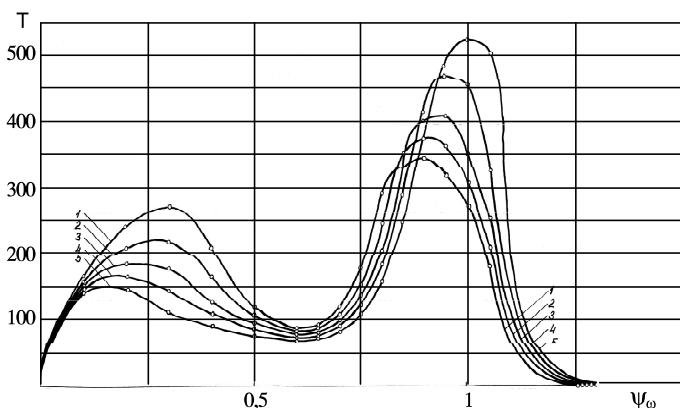


Рис. 5. Залежності  $T$  від  $\psi_\omega$  при  $d/D=0,0024$  та гладкій камері:  
1 –  $\kappa=0,25$ ; 2 –  $\kappa=0,3$ ; 3 –  $\kappa=0,35$ ; 4 –  $\kappa=0,4$ ; 5 –  $\kappa=0,45$

Графіки на рис. 5 ілюструють зареєстрований ефект виникнення подвійного максимуму значень параметрів. Тихохідний локальний максимум реалізується при  $\psi_\omega=0,15-0,45$ .

Виникнення такого локального максимуму спричинено ефектом аномального зниження псевдов'язкості завантаження. Це супроводжується інтенсивним руйнуванням міжелементних контактів, значним зниженням напруження опору при перетворенні сухого тертя та переходом середовища у текучий стан. Зсувний гравітаційний потік трансформується у прискорену лавиноподібну течію, що розплескується. Таке явище кваліфікується як надтекучість зернистого матеріалу.

При цьому невелика висота зсувного шару зумовлює підвищене значення динамічних параметрів, а незначна за масою балістична зона не здатна суттєво завадити розвитку та прискоренню зсувного потоку.

Оцінювати загальну продуктивність помелу зручно за допомогою комплексної характеристики. Продуктивність стираючої дії шару внутрішньокамерного завантаження характеризується добутком температури середовища шару  $T$ , як питомої енергії, на масову частку зсувного шару у масі всього завантаження  $K_{3a}$  та на оборотність завантаження  $K_o - T \cdot K_{3a} \cdot K_o$ .

Графічна залежність комплексного параметру  $T \cdot K_{sa} \cdot K_o$  (рис. 6), від  $\psi_\omega$  характеризується, порівняно з  $T(\psi_\omega)$  (рис. 5), переходом тихохідних максимумів значень параметрів із локальних у абсолютні.

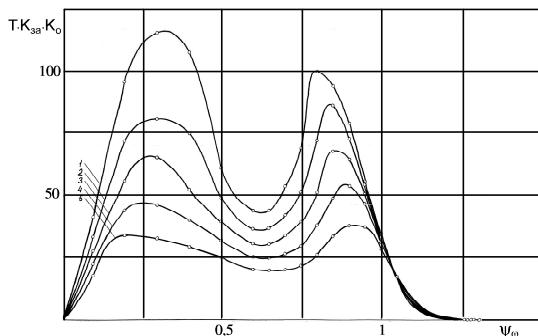


Рис. 6. Залежності комплексного параметру  $T \cdot K_{sa} \cdot K_o$  від  $\psi_\omega$  (позначення за рис. 5)

На рис. 7 зображені графіки залежностей опору середовища завантаження  $\sigma_{on}$  та його компонентів  $\sigma_{on1}$  та  $\sigma_{on2}$  від основної складової швидкості руху зсувного шару  $V_x$ . Перша складова характеризує сили тертя спокою у момент початку руху середовища. Внаслідок реалізації ефекту дискретності зернистого матеріалу, такі сили різко зростають до максимального значення у момент початку руху і різко спадають, прямуючи до нуля, зі зростанням швидкості. Друга складова характеризує сили тертя ковзання при русі середовища, що описуються кулонівським законом сухого тертя.

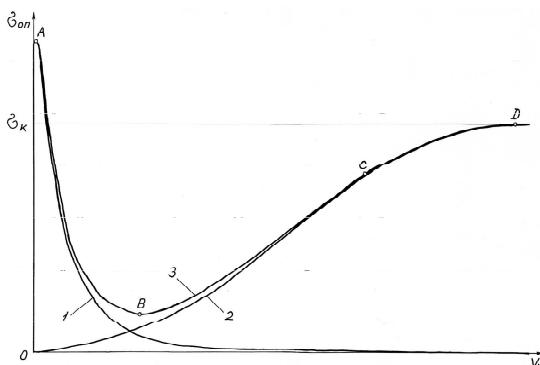


Рис. 7. Графік залежності опору середовища від швидкості шару  $V_x$  уздовж осі  $x$ :  
1 –  $\sigma_{on1}(V_x)$ , 2 –  $\sigma_{on2}(V_x)$ , 3 –  $\sigma_{on}(V_x)$

На графіку  $\sigma_{on}(V_x)$  точками 0, A, B, C і D показані характерні щодо прояву реологічних властивостей середовища ділянки. Точка 0 позначає стан спокою шару і відповідає стану граничної рівноваги середовища у пластичній постановці задачі. Ділянка 0A відповідає раптовому імпульсному зростанню

опору при зрушуванні потоку. На цій ділянці реалізується ефект повзучості, коли під дією сталого навантаження виникає дуже в'язка течія середовища з дуже низькими швидкостями. Ділянка АВ відповідає області аномальної в'язкості середовища. В цій області внаслідок інтенсивних структурних змін у зернистому матеріалі відбувається лавиноподібне руйнування міжчастинкових контактів та зрідження середовища. В точці В значення напруження опору набуває мінімуму і формується течія, що розплескується. Якщо реологічна поведінка середовища на ділянці ОВ визначається переважно першою складовою  $\sigma_{on1}$  та силами тертя спокою, то на ділянці ВД – переважно другою  $\sigma_{on2}$  та силами тертя ковзання при русі. На ділянці ВС, при збільшенні швидкості, опір зростає практично за лінійною залежністю. Тут зернистий матеріал веде себе як лінійно в'язке середовище. Ділянка СД відповідає області кулонова тертя, оскільки напруження опору майже не залежить від швидкості та є пропорційним стискаючій силі. Ефект виникнення аномальної в'язкості та мінімального опору поблизу точки В залежності  $\sigma_{on}(V_x)$  було експериментально підтверджено при реєструванні явища лавиноподібного гравітаційного руху зернистого матеріалу по похилій поверхні.

**Висновки:** 1. Встановлено технорлогічний ефект підвищення продуктивності процесу останньої стадії тонкого подрібнення в барабанному млині зі зниженням швидкості обертання та ступеня заповненні завантаження подрібнюванням матеріалом, що має парадоксальний характер. Застосування такого ефекту може мати широке виробниче застосування [3].

2. Виявилось, що при використанні запропонованої останньої стадії тонкого подрібнення, порівняно із традиційним одностадійним процесом, при вмісті частинок подрібнюваного матеріалу в завантаженні  $\kappa_{M3}>0,05$  продуктивність зменшується на 7-52 %. Разом з тим, при вмісті подрібнюваного матеріалу у завантаженні  $\kappa_{M3}=0,05$  та відносній швидкості обертання  $\psi_\omega=0,25-0,3$  продуктивність збільшується на 22-55 %. Натомість, питомі витрати енергії знижуються на 5-78 %. Зі зменшенням швидкості обертання ефективність нового процесу за енергоємністю, а при  $\kappa_{M3}=0,05$  та  $\psi_\omega=0,25-0,3$  і за продуктивністю, зростає.

3. Для підвищення енергетичної та технологічної ефективності процесу останньої стадії тонкого подрібнення в барабанному млині доцільно знижувати швидкість обертання та вміст частинок подрібнювального матеріалу в завантаженні.

1. Селективное разрушение минералов / В.И. Ревнивцев, Г.В. Гапонюк, Л.П. Завгородний и др.; Под ред. В.И. Ревнивцева. – М.: Недра, 1988. – 286 с.
2. Науменко Ю. В. Основи теорії робочих процесів барабанних млинів: Монографія / Ю.В. Науменко. – Рівне: НУВГП, 2014. – 336 с.
3. Jager H. The duo ball mill system – renaissance of the ball mill in two-stage grinding / H. Jager, W. Arnold, R. Vatterodt // ZKG International. – 1998. – Vol. 51, № 8. – P. 428-536.