**УДК 621.926.5:539.215:531.36**

**Дейнека К.Ю., інженер, Науменко Ю.В., д.т.н., доцент, Романенко О.М., Ткачук В.П., магістранти МЕФ** (Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне)

# СТВОРЕННЯ ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧИХ УСТАЛЕНИХ ТА ПЕРЕХІДНИХ РЕЖИМІВ РОБОТИ БАРАБАННИХ МЛИНІВ

**Розглянуто усталені трифазні режими руху внутрішньокамерного завантаження при реалізації зовнішньокамерної багатостадійності подрібнення. Розглянуто, також, перехідні режими руху зернистого завантаження під час самозбудження коливань у камері стаціонарно обертового барабана. Встановлено вплив вмісту подрібнюваного матеріалу в завантаженні на продуктивність та енергетичну ефективність процесу подрібнення в барабанних млинах.**

**The steady state intramill filling three-phase flow in multistage extrachamber milling is considered. The transient granular filling flow in the process of self-excitation of its oscillations in a stationary rotating drum chamber is also considered. The effect of the milling material content of filling on a tambling milling grinding capacity and energy efficiency is established.**

**Традиційні барабанні млини** залишаються основним обладнанням багатотоннажного 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. Однак існуючі методи розрахунку усталених режимів 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.

Крім того, відносно низька ефективність робочого процесу барабанних млинів спричинена обмеженістю циркуляції молольного завантаження в обертовому барабані через утворення значної квазітвердотільної маси поблизу стінки камери, що практично не приймає участі у подрібненні. Запропоновані різноманітні внутрішньокамерні енергообмінні пристрої для генерування пульсаційного режиму руху завантаження внаслідок низької надійності на набули широкого виробничого застосування. Існуючі методи розрахунку перехідних режимів базуються на гіпотезах фрикційних крутильних коливань всього завантаження, його центральної частини або внутрішніх шарів внаслідок проковзування. Зазначене спричиняє істотну розбіжність одержуваних розрахункових результатів із експериментальними даними.

**Натомість подальші дослідження** показали, що реальним усталеним ре-

жимом руху завантаження є трифазний «змішаний», із третьою зоною зсувного шару [1]. Прикладне використання рекомендацій щодо селективності дезінтеграції стосовно подрібнення в барабанних млинах полягає у здійсненні грубого подрібнення при підвищеній швидкості обертання, а тонкого подрібнення – при зниженій [2].

На основі аналітичної механіки систем зі змінними інерційними параметрами, застосовуючи принципи твердіння та встановлення ієрархії змінних, на підставі прямого методу Ляпунова було одержано умову асимптотичної стійкості усталеного обертання барабанного млина [3]. На основі механіки зернистих середовищ, розглядаючи інерційний режим руху завантаження, було визначено умову стійкості зсувного потоку завантаження камери обертового барабана [4]. Згідно цих умов основними чинниками нестійкості, що викликають автоколивання, при великому ступені заповнення камери барабана завантаженням є варіація осьового моменту інерції завантаження та моменту опору обертанню барабана, а при малому ступені заповнення – підвищення дилатансії завантаження при деформуванні або розпорошення його в камері та демпфуючий вплив частинок подрібнюваного матеріалу на взаємодію мольних тіл.

**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.

**За мету дослідження** було поставлено розв'язання задачі визначення впливу вмісту частинок подрібнюваного матеріалу у внутрішньокамерному завантаженні на зростання продуктивності та зниження енергоємності робочого процесу при застосуванні зовнішньокамерної багатостадійності подрібнення в барабанних млинах та при збудженні пульсаційного руху завантаження, а також впливу на інтенсивність прояву автоколивань завантаження.

**Для визначення впливу** вмісту матеріалу на автоколивання завантаження моделювалось зернистим матеріалом із середнім розміром елементів d=2,2 мм. Як подрібнюваний матеріал застосовувався цемент. Було використано барабан із камерою без виступів радіусом R=106 мм та довжиною 100 мм.

Ступінь заповнення камери завантаженням змінювався у межах $\kappa$=0,25-0,5 із кроком 0,05. Ступінь заповнення завантаження частинками подрібнюваного матеріалу становила $\kappa_{мз}$=0,4, що відповідало повному заповненню цими частинками проміжків між мольними тілами $\kappa_{мп}$=1.

Для візуалізації руху завантаження використовувалась цифрова відеозйомка. Фіксувались картини перехідного режиму періодичного руху завантаження під час автоколивань. Було оброблено біля 100 картини руху.

На рис. 1-6 зображено отримані послідовні картини руху завантаження для одного періоду коливань при $\kappa$=0,25-0,5.

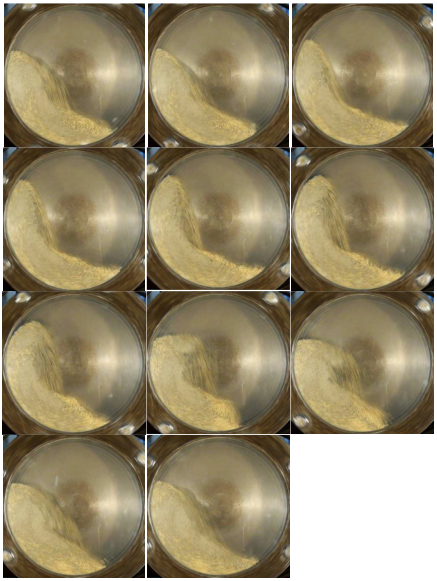

Рис. 1. Послідовні картини коливань завантаження для к=0,25 при $\psi_\omega$=0,4

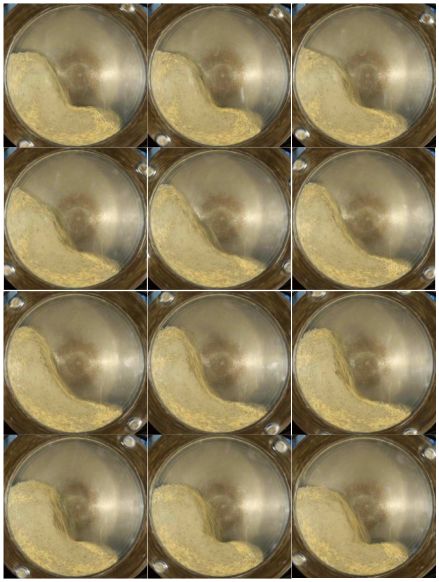

Рис. 2. Послідовні картини коливань завантаження для к=0,3 при $\psi_\omega$=0,3

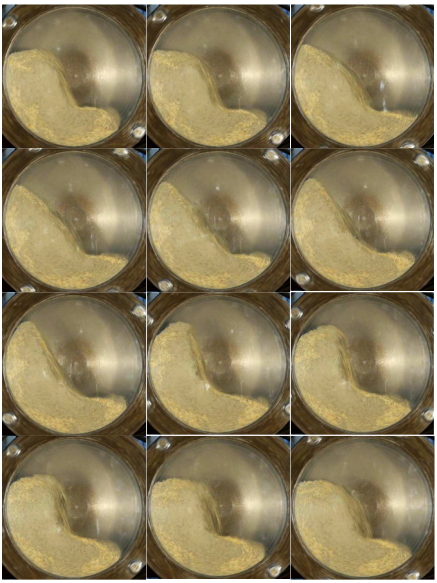

Рис. 3. Послідовні картини коливань завантаження для к=0,35 при $\psi_\omega$=0,3

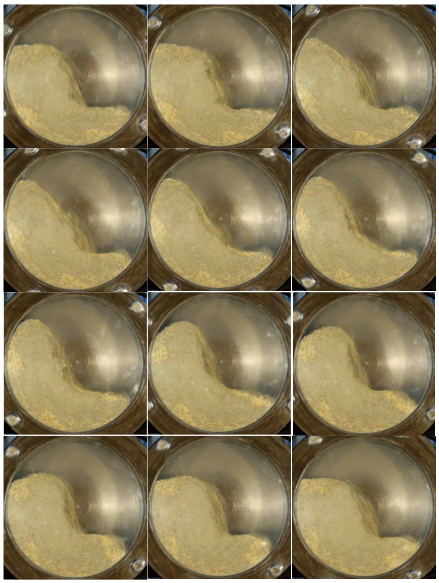

Рис. 4. Послідовні картини коливань завантаження для к=0,4 при $\psi_\omega$=0,3

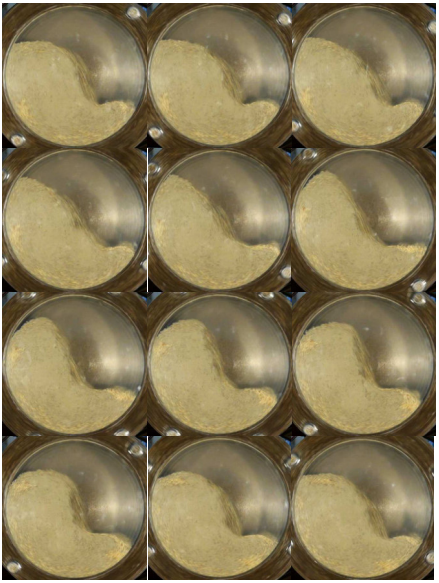

Рис. 5. Послідовні картини коливань завантаження для к=0,45 при $\psi_\omega$=0,3

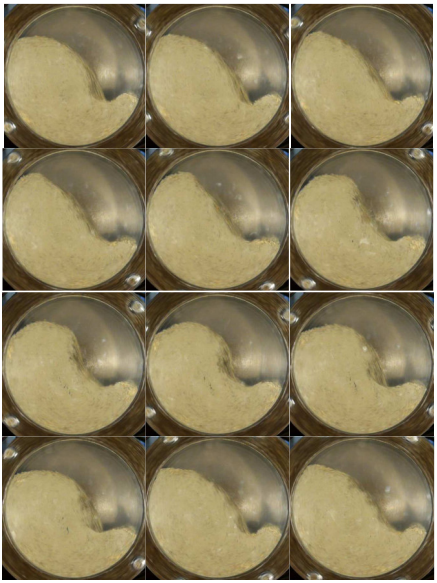

Рис. 6. Послідовні картини коливань завантаження для к=0,5 при $\psi_\omega$=0,4

Виявилось, що нижнє біфуркаційне значення швидкості обертання завантаженого барабана зменшувалось до значення $\psi_\omega$=0,3-0,4, яке було істотно меншим за величину такого значення при малому впливі матеріалу – $\psi_\omega$=0,8-1,15 [5, 6]. Тривалість періоду коливань становила біля 1 с. Натомість перевищення частоти коливань над частотою обертання барабана становила 3,5-4 рази і було суттєво більшим за таке перевищення частоти при незначному впливі матеріалу – лише 1,05-1,3 рази [5, 6].

Для проведення досліджень помелу використовувався цементний клінкер ВАТ «Волинь-цемент», який був підготовлений шляхом попереднього дроблення і мав гранулометричний склад: до 0,08 мм – 15%, від 0,08 до 0,315 мм – 25%, від 0,315 до 1,25 мм – 32%, від 1,25 до 2,5 мм – 28%.

Як молольні тіла в лабораторному млині використовувались стальні кульки діаметром d=5,5 мм. Шорсткість поверхні кульок відповідала технічним вимога до молольних куль. Об’ємна частка куль у завантаженні становила приблизно 60%, решта 40% припадало на порожнини.

Визначення гранулометричного складу вихідного матеріалу та готового продукту помелу проводилось шляхом просівання їх крізь сита та розрахунку вмісту фракцій.

Продуктивність помелу оцінювалась за значеннями просіву через контрольне сито № 008, за винятком вмісту фракції до 0,08 мм у вихідній сировині. Енергетична ефективність процесу оцінювалась за питомою витратою енергії

при отриманні цього просіву $E=N/П$, де N – потужність приводу обертання завантаженого барабана. Вважалось, що при $0<\psi_\omega<0,75$ потужність приводу змінювалась пропорційно значенню швидкості обертання, а при $0,75<\psi_\omega<1,1$ практично не змінювалась [2].

Чисельне значення зміни продуктивності різних режимів роботи млина оцінювалось співвідношенням $П_м/П_т$, де $П_м$ та $П_т$ – продуктивності помелу для модернізованого та традиційного режимів. Зміна питомої витрати енергії оцінювалася співвідношенням $E_м/E_т=(N_м/П_м)/(N_т/П_т)$, де $E_м$ та $E_т$ – питомі витрати енергії для модернізованого та традиційного режимів, $N_м$ та $N_т$ – потужність приводу для модернізованого та традиційного режимів.

Досліджувалась ефективність запропонованого робочого процесу подрібнення в барабанних млинах із перехідним автоколивним рухом завантаження камери [7, 8] порівняно із традиційним робочим процесом без коливань. Досліди виконувались попарно для традиційного та запропонованого модернізованого режимів роботи млинів. Для зручності порівняння результатів зміна значення швидкості обертання барабана оцінювалась за величиною відносної швидкості $\psi_\omega = \omega/\omega_{кр}$, де $\omega$ – кутова швидкість барабана, $\omega_{кр} = \sqrt{g/R}$ – критична кутова швидкість, R – радіус камери, g – гравітаційне прискорення. Для традиційного режиму роботи приймалось $\psi_\omega=0,75$. Для запропонованих режимів приймалось $\psi_\omega=0,95$-$1,05$, що відповідало самозбудженню автоколивань завантаження із максимальною амплітудою [5, 6].

Ступінь заповнення камери завантаженням становив $\kappa=0,3$. Ступінь заповнення завантаження частинками подрібнюваного матеріалу $\kappa_{мз}$ складав 0,1, 0,2, 0,3 та 0,4, що відповідало ступеню заповнення цими частинками проміжків між молольними тілами $\kappa_{мп}$ – 0,25, 0,5, 0,75 та 1.

Тривалість процесу подрібнення становила 30 хв.

Отримані результати досліджень традиційних та запропонованих модернізованих робочих процесів помелу при перехідних режимах руху завантаження зведено у табл. 1 та зображено на рис. 7.

Таблиця 1

Результати досліджень традиційних та запропонованих перехідних режимів роботи барабанних млинів

| № з/п | Тип режиму | $\psi_\omega$ | $\kappa_{мз}$ | $\kappa_{мп}$ | Залишок на ситі № 008 (%) | $\frac{П_М}{П_Т}$ | $\frac{E_М}{E_Т}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | традиційний | 0,75 | 0,1 | 0,25 | 76 | 4,78 | 0,21 |
| 2 | модернізований | 0,95-1,05 | 0,1 | 0,25 | 42 | | |
| 3 | традиційний | 0,75 | 0,2 | 0,5 | 72 | 1,92 | 0,52 |
| 4 | модернізований | 0,95-1,05 | 0,2 | 0,5 | 60 | | |
| 5 | традиційний | 0,75 | 0,3 | 0,75 | 71 | 1,64 | 0,61 |
| 6 | модернізований | 0,95-1,05 | 0,3 | 0,75 | 62 | | |
| 7 | традиційний | 0,75 | 0,4 | 1 | 68 | 1,06 | 0,94 |
| 8 | модернізований | 0,95-1,05 | 0,4 | 1 | 67 | | |

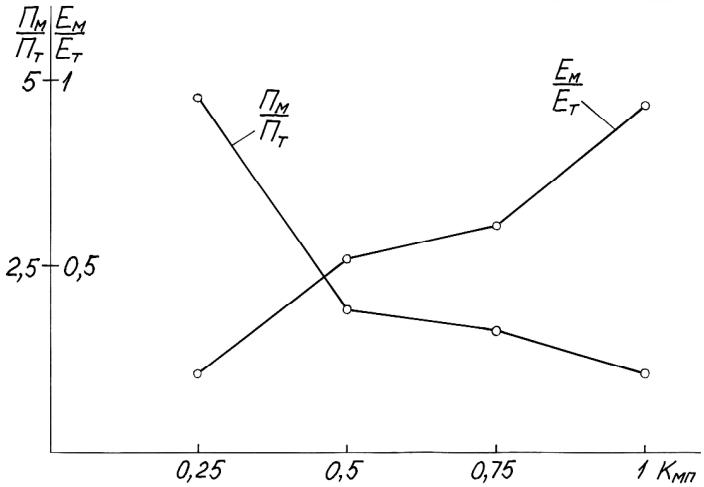


Рис. 7. Залежності $П_м/П_т$ та $Е_м/Е_т$ від $к_{мп}$ для перехідних режимів роботи барабанних млинів

Досліджувалась, також, ефективність робочого процесу запропонованої першої стадії грубого помелу та останньої стадії тонкого помелу [2] порівняно із традиційним одностадійним робочим процесом в барабанних млинах при усталених режимах руху завантаження.

Для моделювання запропонованої першої стадії грубого помелу використовувався барабан із хвильовою поверхнею камери радіусом R=126,5 мм та довжиною 100 мм. Ступінь заповнення камери завантаженням становив к=0,45.

Ступінь заповнення завантаження частинками подрібнюваного матеріалу $к_{мз}$ становив 0,3 та 0,4, що відповідало ступеню заповнення цими частинками проміжків між молольними тілами $к_{мп}$ на 0,75 та 1.

Швидкість обертання для модернізованого режиму складала $\psi_\omega$=0,95.

Для моделювання запропонованої останньої стадії тонкого помелу використовувався барабан із гладкою поверхнею камери радіусом R=106 мм та довжиною 100 мм.

Ступінь заповнення камери завантаженням становив к=0,25. Ступінь заповнення завантаження частинками подрібнюваного матеріалу $к_{мз}$ складав 0,1 та 0,2, що відповідало ступеню заповнення цими частинками проміжків між молольними тілами $к_{мп}$ на 0,25 та 0,5.

Швидкість обертання для модернізованого режиму складала $\psi_\omega$=0,35.

Отримані результати досліджень традиційних та запропонованих модернізованих робочих процесів помелу при усталених режимах руху завантаження зведено у табл. 2 та зображено на рис. 8.

Таблиця 2

Результати досліджень традиційних та запропонованих усталених режимів роботи барабанних млинів

| № з/п | Тип режиму | $\psi_\omega$ | к | $к_{мз}$ | $к_{мп}$ | Форма поверхні камери | R (мм) | Залишок на ситі № 008 (%) | $\frac{П_М}{П_Т}$ | $\frac{Е_М}{Е_Т}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | традиційний | 0,75 | 0,45 | 0,3 | 0,75 | хвильова | 126,5 | 57 | 1,07 | 0,93 |
| 2 | модернізований | 0,95 | 0,45 | 0,3 | 0,75 | хвильова | 126,5 | 55 | | |
| 3 | традиційний | 0,75 | 0,45 | 0,4 | 1 | хвильова | 126,5 | 62 | 1,17 | 0,85 |
| 4 | модернізований | 0,95 | 0,45 | 0,4 | 1 | хвильова | 126,5 | 58 | | |
| 5 | традиційний | 0,75 | 0,25 | 0,1 | 0,25 | гладка | 106 | 75 | 0,7 | 0,67 |
| 6 | модернізований | 0,35 | 0,25 | 0,1 | 0,25 | гладка | 106 | 78 | | |
| 7 | традиційний | 0,75 | 0,25 | 0,2 | 0,5 | гладка | 106 | 73 | 0,58 | 0,8 |
| 8 | модернізований | 0,35 | 0,25 | 0,2 | 0,5 | гладка | 106 | 78 | | |

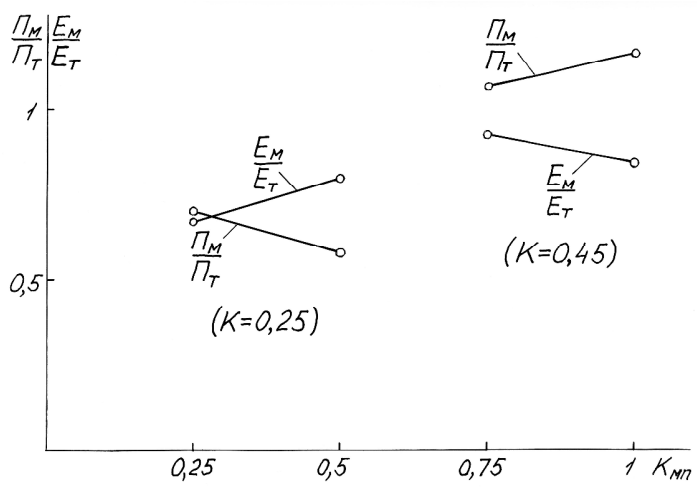


Рис. 8. Залежності $П_м/П_т$ та $Е_м/Е_т$ для різних к від $к_{мп}$ для усталених режимів роботи барабанних млинів

**Таким чином,** зі збільшенням вмісту матеріалу у завантаженні зростає інтенсивність його автоколивань шляхом зменшення нижньої біфуркаційної

швидкості, аж до $\psi_\omega$=0,3. При цьому діапазон співвідношення частот при максимальній амплітуді автоколивань залишається незмінним за будь-якого впливу матеріалу – 1,05-1,3.

Застосування запропонованого режиму роботи барабанних млинів із перехідним автоколивним рухом завантаження, порівняно із традиційним процесом помелу, підвищує продуктивність на 6-378% та знижує питомі витати енергії на 6-79%. При цьому зі зменшенням вмісту частинок подрібнюваного матеріалу у внутрішньокамерному завантаженні ефективність нового процесу за продуктивністю та енергоємністю зростає.

Крім того, застосування запропонованої першої стадії грубого подрібнення в барабанних млинах із усталеним рухом завантаження, порівняно із традиційним одностадійним процесом помелу, підвищує продуктивність на 7-17% та знижує питомі витати енергії на 7-15%. При цьому зі збільшенням вмісту частинок подрібнюваного матеріалу у внутрішньокамерному завантаженні ефективність нового процесу за продуктивністю та енергоємністю зростає. Натомість, застосування запропонованої останньої стадії тонкого подрібнення в барабанних млинах із усталеним рухом завантаження, порівняно із традиційним одностадійним процесом, дещо зменшує продуктивність на 30-42% і знижує питомі витати енергії на 20-33%. Зі зменшенням вмісту матеріалу у завантаженні ефективність нового процесу за енергоємністю зростає.

**1.** Науменко Ю.В. Основи теорії режимів роботи барабанних млинів: монографія / Ю.В.Науменко. – Рівне: Видавництво СПД Зелент О.І., 2009. – 282 с. **2.** Рекомендації до розрахунку, проектування та експлуатації барабанних млинів багатостадійного подрібнення / Ю.В.Науменко. – Рівне: Видавництво СПД Зелент О.І., 2009. – 88 с. **3.** Науменко К.Ю. Нестійкі режими обертання барабанних млинів / К.Ю.Науменко // Вісн. НУВГП. – Рівне: НУВГП, 2006. – Вип. 2(34). – Ч. 2. – С. 111-119. **4.** Дейнека К.Ю. Стійкість руху внутрішньокамерного завантаження барабанного млина / К.Ю.Дейнека // Вісн. НУВГП. – Рівне: НУВГП, 2008. – Вип. 3(43). – С. 250-257. **5.** Дейнека К.Ю. Експериментальне визначення динамічних параметрів внутрішньокамерного завантаження барабанного млина методом візуалізації / К.Ю.Дейнека // Зб. наук. праць (галуз. машинобудування, буд-во). – Полтава: ПолтНТУ, 2009. – Вип. 23., т. 1. – С. 123-133. **6.** Дейнека К.Ю. Експериментальне визначення характеристик автоколивань внутрішньокамерного завантаження барабанного млина методом візуалізації / К.Ю.Дейнека // Вісн. НУВГП: зб. наук. пр. – Рівне: НУВГП, 2009. – Вип. 3(47). – Ч. 2. – С. 351-358. **7.** Пат. 7180U України, МПК B 02 C 17/00. Спосіб подрібнення сипкого матеріалу в барабанному млині / Науменко Ю.В., Науменко К.Ю. – № u20041008352; заяв. 14.10.04; опубл. 15.06.05, Бюл. № 6. – 12 с. **8.** Пат. 42493U України, МПК B 02 C 17/00. Спосіб подрібнення в барабанному млині із автоколивним внутрішньокамерним завантаженням / Дейнека К.Ю. – № u200900549; заяв. 26.01.09; опубл. 10.07.09, Бюл. № 13. – 12 с.

Рецензент: к.т.н., професор Сухарєв Е.О. (НУВГП)