УДК 621.926.5:539.215:531.36

Дейнека К. Ю., магістр (Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне)

МОДЕЛЮВАННЯ ІНЕРЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК РУХУ ВНУТРІШНЬОКАМЕРНОГО ЗАВАНТАЖЕННЯ БАРАБАННОГО МЛИНА МЕТОДОМ ВІЗУАЛІЗАЦІЇ

Виконано розрахунок характеристик осьового моменту інерції, координати центра мас та дилатансії завантаження. Для візуалізації картин руху в перерізі камери використано сітки. На основі аналізу отриманих результатів встановлено умови виникнення та інтенсифікації прояву нестійкості.
Ключові слова: барабанний млин, картини руху, візуалізація.

Выполнен расчет характеристик осевого момента инерции, координат центра масс и дилатансии загрузки. Для визуализации картин движения в сечении камеры использованы сетки. На основе анализа полученных результатов установлены условия возникновения и интенсификации проявления неустойчивости.
Ключевые слова: барабанная мельница, картины движения, визуализация.

The calculations of filling moment of inertia, centre of mass coordinate and dilatation characteristics were performed. The graticules were used for cross-section flow patterns visualization. The rise of instability and the rise of the rate of its conditions are established on the basis of examination of the data were determined.
Keywords: ball-tube mill, flow patterns, visualization.

Проблемність процесу тонкого диспергування спричинено надзвичайно низькою енергетичною ефективністю процесу.

Новим технологічним напрямком радикального підвищення ефективності барабанних млинів є активізація циркуляції завантаження шляхом створення коливних рухів у камері.

Існуючі способи створення пульсацій завантаження не були застосування внаслідок низької надійності та через невизначеність умов роботи.

У той же час досить перспективним для практичного використання видається напрямок удосконалення процесів помелу на основі ефекту самозбудження пульсацій завантаження при нестійких режимах руху механічної системи млина, який базується на традиційних конструктивних рішеннях обладнання із барабаном без додаткових виступаючих елементів, що зазнають

пришвидшеного зношування. Залучення такого підходу передбачає необхідність прогнозування нестаціонарних режимів руху завантаження.

Застосування традиційних спрощених моделей фрикційних крутильних коливань завантаження внаслідок проковзування, на яких базуються існуючі тлумачення виникнення нестійких режимів роботи млинів, призводить до неврахування низки параметрів. Це спричинює розбіжність одержуваних розрахункових результатів із експериментальними даними. Натомість для підвищення прогностичних можливостей моделювання пульсацій завантаження видається за доцільне застосування уявлень нелінійної динаміки систем зі змінними інерційними параметрами та механіки зернистого середовища.

На основі прямого методу Ляпунова було отримано умову асимптотичної стійкості усталеного руху машинного агрегату млина [1]:

$$\frac{\dfrac{dM_з(\omega)}{d\omega}\cdot\dfrac{1}{i\cdot\eta}-\dfrac{dM_д(\omega)}{d\omega}}{\left[\dfrac{\omega^2}{2}\cdot\dfrac{d^2I_з(\omega)}{d\omega^2}+2\cdot\omega\cdot\dfrac{dI_з(\omega)}{d\omega}+I_з(\omega)+I_б\right]\dfrac{1}{i^2}+I_д}>0,$$

де $I_з$, $I_б$ та $I_д$ – осьові моменти інерції завантаження, барабана та обертових частин двигуна; $M_з$ – момент опору завантаження обертанню двигуна; $M_д$ – момент приводного двигуна; ω – кутова швидкість барабана; i – передаточне відношення приводу; η – коефіцієнт корисної дії приводу. Чинниками такої нестійкості є варіації осьового моменту інерції та моменту опору завантаження обертанню барабана.

На основі теорії швидких рухів зернистих середовищ як математичну модель завантаження було вибрано рівняння неньютонівської рідини, що не стискається. Це дозволило отримати частотне та дисперсійне рівняння розглядуваної системи [2]:

$$\omega^3+i\left(a_1k^2-b_1\right)\omega^2+k^2\left(c_1k^2-d_1\right)\omega-k^2\left(e_1k^2+f_1\right)=0,$$
$$\beta^3+\left(a_1k^2-b_1\right)\beta^2+k^2\left(c_1k^2-d_1\right)\beta-k^2\left(e_1k^2+f_1\right)=0,$$

де $\beta=-i\omega$; ω – збурення швидкості поперек площини зсуву; k – хвильове число; a_1, b_1, c_1, d_1, e_1, f_1 – коефіцієнти, що визначаються характеристиками середовища. Чинниками цієї нестійкості є зростання дилатансії (розпорошення) завантаження понад критичне значення та демпфуючий вплив частинок подрібнюваного матеріалу на взаємодію молольних тіл.

Однак характеристики зазначених інерційних параметрів завантаження є недостатньо вивченими через складність їх визначення.

За мету роботи було поставлено моделювання інерційних характеристик руху завантаження – осьового моменту інерції, моменту опору та дилатансії за допомогою візуалізації його усталеного руху в камері стаціонарно обертового барабана для оцінювання їх впливу на стійкість руху млина.

Як основний метод досліджень було прийнято візуальний аналіз картин

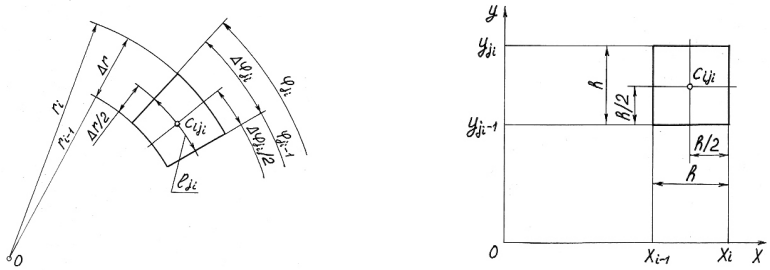
руху завантаження в поперечному перерізі камери, оскільки граничний крайовий ефект середовища на твердих стінках був незначним.

Для оцінювання ступеня нестійкості руху завантаженого барабана було встановлено безрозмірні характеристики осьового моменту інерції *I*, моменту опору *M* та дилатансії *υ* завантаження [3]:

$$\psi_{I1} = \frac{I}{I_1},\ \psi_{Iш} = \frac{I}{I_ш},\ \psi_{M\,0,5} = \frac{M}{M_{0,5\,max}},\ \psi_{Mc} = \frac{M}{M_{c\,max}},\ \upsilon = \frac{w}{\pi R^2 \kappa},$$

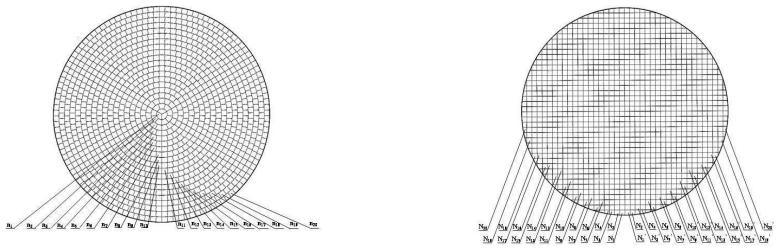
де I_1 – момент інерції при ступені заповнення камери завантаженням κ=1; $I_ш$ – момент інерції пристінкового шару завантаження; $M_{0,5max}$ – умовний максимальний момент опору, при обертанні уявного твердотільного завантаження сегментного перерізу на 90°, для κ=0,5; M_{cmax} – умовний максимальний момент опору при поточному *к*. Кількісна оцінка зміни *I* здійснювалась за ψ_{I1}, якісна – за $\psi_{Iш}$. Кількісна оцінка зміни *M* – за $\psi_{M0,5}$, якісна – за ψ_{Mc}.

Для визначення *I* використовувалась розрахункова сітка із концентричним (рис. 1, а, 2, а), а для *M* – із рядним розташуванням комірок (рис. 1, б, 2, б). Число кільцевих шарів комірок першої сітки та половина числа вертикальних шарів комірок другої сітки прийнято рівним 20. Загальне число комірок у кожній сітці – біля 1200.



а б

Рис. 1. Схеми комірок розрахункових сіток:
а – із концентричним, б – із рядним розташуванням шарів комірок



а б

Рис. 2. Схеми використаних розрахункових сіток:
а – із концентричним, б – із рядним розташуванням шарів комірок

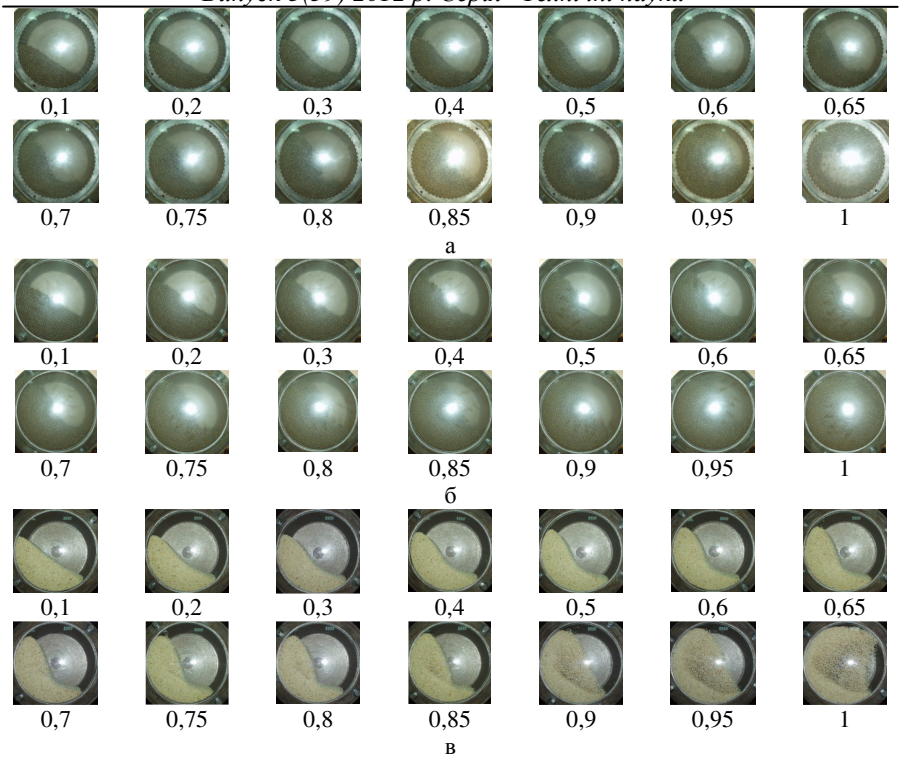


Рис. 3. Картини руху завантаження за зростанням відносної швидкості обертання ψ_ω (позначено): а – *d/D*=0,022, хвильова поверхня камери, *к*=0,25; б – *d/D*=0,026, гладка поверхня, *к*=0,45; в – *d/D*=0,01, гладка поверхня, *к*=0,35

Моделювалось три характерні випадки роботи млинів (рис. 3). Перший характеризується відносним розміром *d* елемента завантаження порівняно із діаметром камери *D* – *d/D*=0,022 та хвильовою поверхнею камери, що відповідає умовам роботи кульових або першої камери трубних млинів із новою футерівкою. Другий випадок характеризується *d/D*=0,026 та гладкою поверхнею камери, що відповідає умовам роботи таких млинів із повністю зношеною поверхнею футерівки. Третій випадок характеризується *d/D*=0,01 та гладкою камерою, що відповідає умовам роботи другої камери трубних млинів із кульовим або цильпебсним завантаженням.

Для візуалізації руху використовувалась цифрова фотозйомка (рис. 4). Фіксувались картини усталеного руху завантаження при стаціонарному обертанні барабана. Зображення картин покривались розрахунковими сітками і лічилась кількість заповнених комірок у кожному ряду. За розробленим алгоритмом обчислювались значення шуканих характеристик інерційних параметрів завантаження.

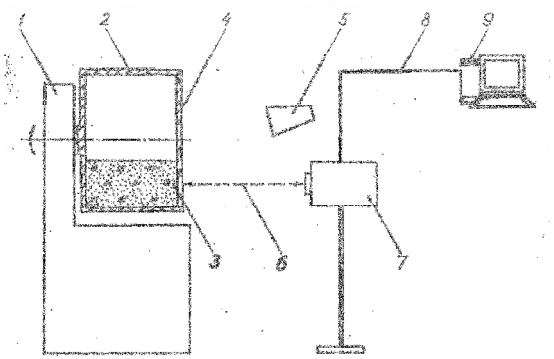


Рис. 4. Схема експериментальної системи візуалізації картин руху завантаження: 1 – блок приводу, опорного і фіксуючого пристроїв та контрольно-вимірювальних приладів; 2 – змінний барабан; 3 – завантаження; 4 – прозора торцева стінка; 5 – освітлювач; 6 – проеціювання картин руху; 7 – цифрова фото- або відеокамера; 8 – канал передавання інформації; 9 – комп'ютер для візуалізації картин

На рис. 5-7 зображено графіки розрахованих залежностей ψ_{I1}, $\psi_{Iш}$, $\psi_{M0,5}$, ψ_{Mc} та υ при κ=0,25-0,45 для трьох випадків роботи млинів. При обчисленні моментів враховувалась похибка, зумовлена дилатансією.

Порівняльний аналіз засвідчує хорошу збіжність значень моменту опору, що одержано методом візуалізації та за допомогою датчиків крутячого моменту (рис. 8). Розбіжність не перевищує 7-14%.

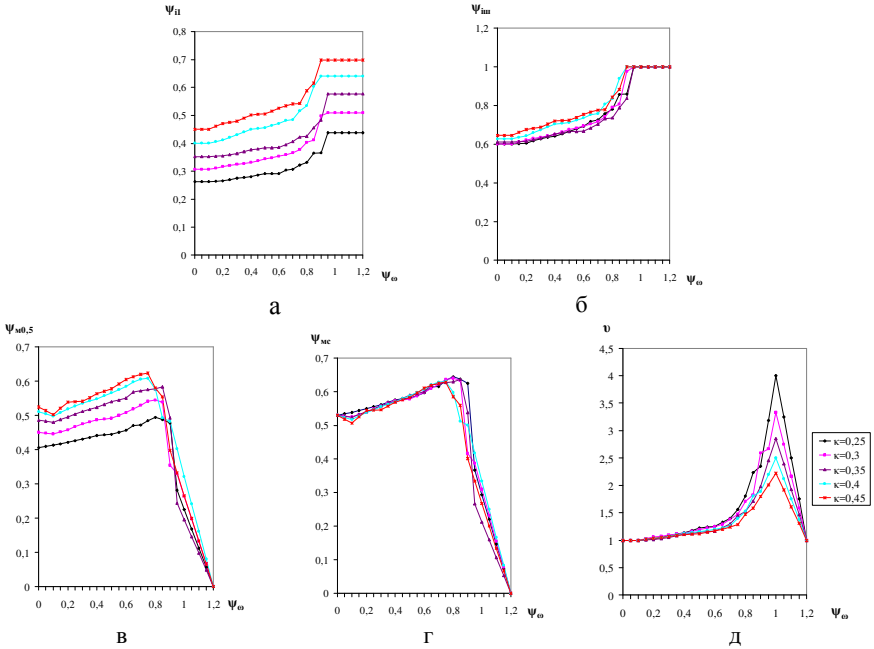
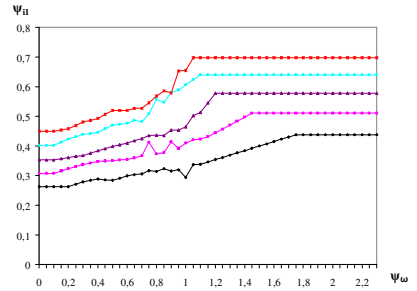
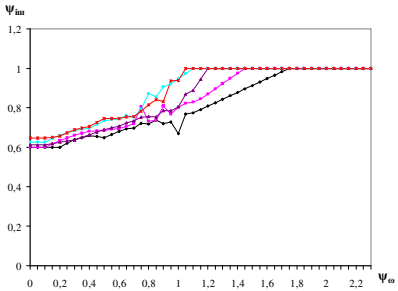


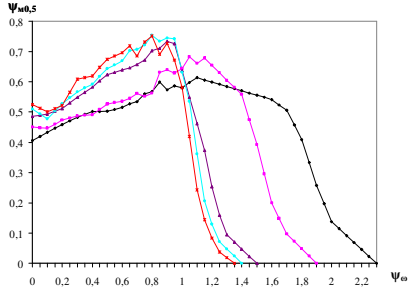
Рис. 5. Залежності ψ_{I1} (а), $\psi_{Iш}$ (б), $\psi_{M0,5}$ (в), ψ_{Mc} (г) та υ (д) від ψ_{ω} при κ=0,25-0,45 для d/D=0,022 та хвильової поверхні камери



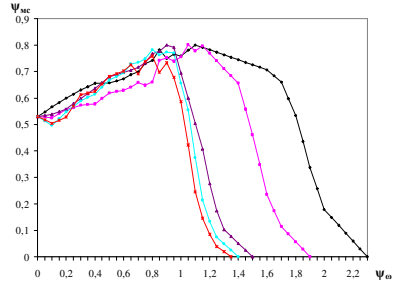
а



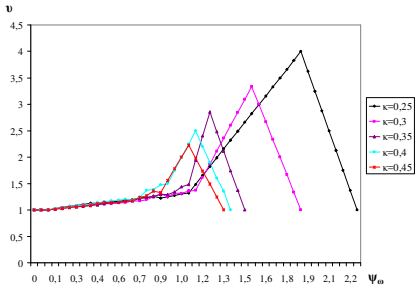
б



в



г



д

Рис. 6. Залежності ψ_{I1} (а), $\psi_{Iш}$ (б), $\psi_{M0,5}$ (в), ψ_{Mc} (г) та υ (д) від ψ_{ω} при κ=0,25-0,45 для d/D=0,026 та гладкої поверхні камери

Проаналізовано якісні залежності динамічних параметрів завантаження від ω, а також похідних цих параметрів по ω (рис. 9). Момент інерції $I_з$ при збільшенні ω змінюється від мінімального значення в спокої I_c до максимального в режимі пристінкового шару $I_{ш}$. При цьому друга похідна $d^2I_з(\omega)/d\omega^2$ набуває екстремального від'ємного значення поблизу режиму руху завантаження із повним підкиданням, що може спричинити невиконання умови нестійкості. Залежність моменту опору $M_з$ від ω поблизу режиму руху із повним підкиданням має найбільшу жорсткість, а похідна $dM_з(\omega)/d\omega$ набуває екстремального від'ємного значення, що також може викликати невиконання умови. Значення дилатансії υ поблизу режиму із повним підкиданням набуває максимального значення, що підвищує нестійкість зсувного потоку.

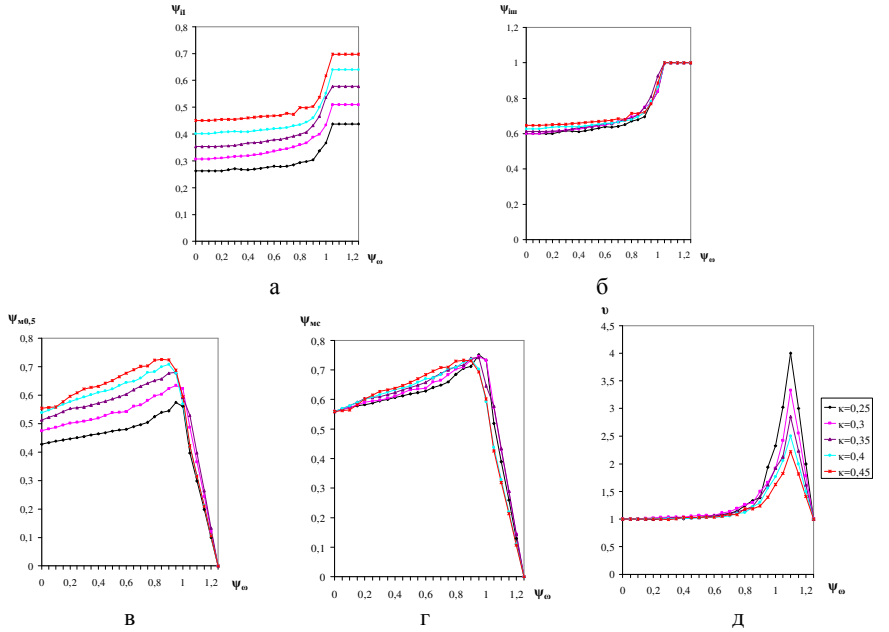


Рис. 7. Залежності ψ_{I1} (а), $\psi_{Iш}$ (б), $\psi_{M0,5}$ (в), ψ_{Mc} (г) та υ (д) від ψ_{ω} при κ=0,25-0,45 для d/D=0,01 та гладкої поверхні κ

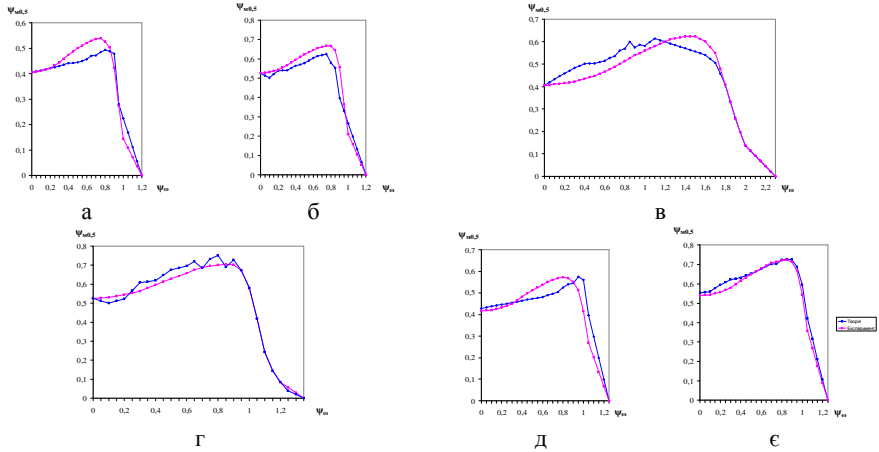


Рис. 8. Теоретичні розрахункові, визначені методом візуалізації, та експериментальні, визначені за допомогою датчиків крутячого моменту, залежності $\psi_{M0,5}$ від ψ_{ω}:
а – d/D=0,022, хвильова поверхня камери, κ=0,25; б – те саме, κ=0,45;
в – d/D=0,026, гладка поверхня камери, κ=0,25; г – те саме, κ=0,45;
д – d/D=0,01, гладка поверхня камери

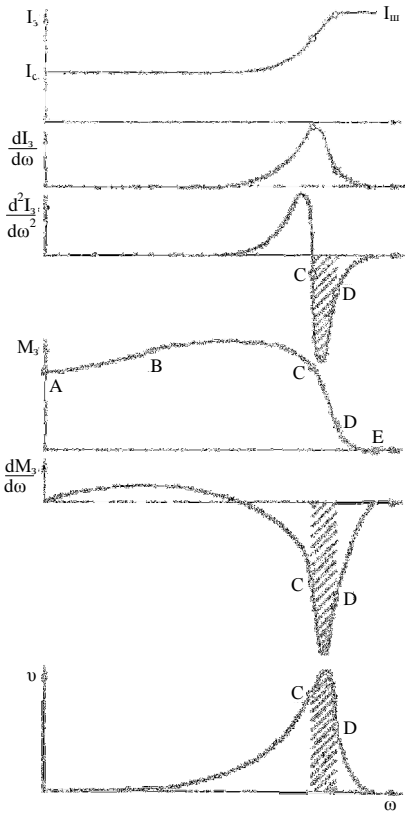


Рис. 9. Залежності $I_з$, $dI_з/d\omega$, $d^2I_з/d\omega^2$, $M_з$, $dM_з/d\omega$, υ від ω: АВ – режим руху без підкидання, ВС – з частковим підкиданням, CD – з повним підкиданням, DE – неповного центрифугування

Таким чином, дослідження на основі методу візуалізації картин руху підтвердили, що пульсації виникають переважно під час режиму руху завантаження із повним підкиданням, а також із частковим підкиданням елементів. Встановлено, що інтенсивність прояву пульсацій зростає зі зменшенням ступеня заповнення камери, відносного розміру елементів завантаження та висоти виступів на поверхні камери. Пульсації із максимальною амплітудою виникають у діапазоні відносної швидкості обертання ψ_ω=0,85-1,15.

1. Науменко К. Ю. Нестійкі режими обертання барабанних млинів / К. Ю.Науменко // Вісн. НУВГП. – Рівне: НУВГП, 2006. – Вип. 2(34). – Ч. 2. – С. 111-119. **2.** Дейнека К. Ю. Стійкість руху внутрішньокамерного завантаження барабанного млина / К. Ю. Дейнека // Вісн. НУВГП. – Рівне: НУВГП, 2008. – Вип. 3(43). – С. 250-257. **3.** Науменко К. Ю. Застосування методу візуалізації для визначення змінних інерційних параметрів внутрішньокамерного завантаження барабанного млина / К. Ю. Науменко // Вісн. НУВГП. – Рівне: НУВГП, 2007. – Вип. 4(40). – Ч. 3. – С. 9-16.

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