УДК 621.926.5:539.215

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

ВСТАНОВЛЕННЯ ЯВИЩА ПОДВІЙНОГО ЕКСТРЕМУМУ ДИНАМІЧНИХ СТАНІВ ВНУТРІШНЬОКАМЕРНОГО ЗАВАНТАЖЕННЯ БАРАБАННОГО МЛИНА МЕТОДОМ ВІЗУАЛІЗАЦІЇ КАРТИН РУХУ

Зареєстровано ефект виникнення подвійного максимуму безрозмірних комплексних критеріїв зсувного шару внутрішньокамерного завантаження барабанного млина. Показано, що виникнення тихохідного локального максимуму критеріїв зумовлено лавиноподібним руйнуванням контактів між частинками та зрідженням зернистого середовища. Запропоновано використовувати такий режим роботи для підвищення енергетичної ефективності тонкого здрібнення.
Ключові слова: барабанний млин, завантаження, картини руху, візуалізація.

Зарегистрирован эффект возникновения двойного экстремума комплексных критериев сдвигового слоя внутрикамерной загрузки барабанной мельницы. Показано, что возникновение тихоходного локального экстремума критериев обусловлено лавинообразным разрушением контактов между частицами и ожижением зернистой среды. Предложено использовать такой режим работы для повышения энергетической эффективности тонкого измельчения.
Ключевые слова: барабанная мельница, загрузка, картины движения, визуализация.

The effect of tumbling mills intrachamber filling shifting layer integral dimensionless criterions double maximum was established. The initiation of slow local criterions maximum was demonstrated to determine by avalanche elements contacts collapse and granular medium fluidization. The use of these operating conditions was put forward for raising the fine milling energy efficiency.
Keywords: tumbling mill, filling, flow patterns, visualization.

Згідно гіпотези двофазного режиму руху внутрішньомлинного завантаження оптимальною щодо продуктивності барабанних млинів вважається відносна швидкість обертання ψ_ω=0,75.

Реальним режимом руху завантаження є трифазний [1, 2] при виникненні зсувного шару, де переважно здійснюється тонке подрібнення.

Селективність помелу полягає у здійсненні грубого подрібнення при

підвищеній швидкості обертання та тонкого – при зниженій [3, 4]. У [5] описано явище отримання максимальної питомої ефективності подрібнення при зниженій швидкості обертання ψ_ω=0,5, а у [6, 7] – при зменшенні її до ψ_ω=0,58. Однак рекомендації щодо вибору швидкості є неоднозначними.

Метою роботи є визначення раціональних режимів руху завантаження.

Описати процес подрібнення в барабанних млинах можна за допомогою узагальнених параметрів. Форсування зсувної швидкості $K_{фз}$ – відношення середньої швидкості у вибраному перерізі шару до швидкості циліндричної поверхні камери при критичній швидкості обертання. Градієнт зсувної швидкості $K_г$ – відношення швидкості зсування до критичної швидкості. Питома енергія поступального руху шару $E_з$ – відношення квадрата середньої швидкості до квадрата лінійної швидкості камери при критичній швидкості. Температура середовища шару T – відношення квадрату швидкості зсування до квадрата критичної швидкості. Динамічність активації $K_д$ – відношення уявного сумарного вертикального прискорення до гравітаційного прискорення.

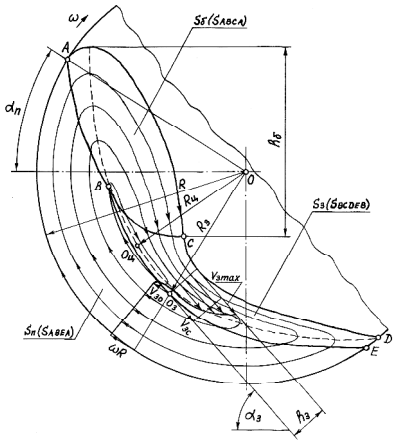

Рис. 1. Розрахункова схема визначення критеріїв ефективності подрібнення за допомогою візуалізації картини руху завантаження

Розрахунок параметрів полягав у візуальному аналізі зареєстрованих картин руху завантаження (рис. 1). Задавались: радіус камери R, кутова швидкість ω та кут внутрішнього тертя завантаження φ. Вибиралось положення перерізу шару з основою в точці O_3. Вимірювались радіальна координата основи R_3, висота h_3 та кут нахилу α_3 перерізу. Обчислювались значення середньої зсувної швидкості перерізу $V_{зс}$, швидкість опорної поверхні в перерізі $V_{з0}$ та максимальна зсувна швидкість на його вільній поверхні $V_{зmax}$ за виразами

$$V_{зс} = \omega\left(R^2 - R_з^2\right)/\left(2h_з\right),\ V_{з0} = \omega R_з,$$

$$V_{зmax} = \sqrt{2Wh_з\, sin\alpha_з\, cos\varphi/\left(1 - sin\varphi\right) - V_{з0}^2},$$

де $W = \sqrt[3]{-L/2+\sqrt{f}} + \sqrt[3]{-L/2-\sqrt{f}} - q/3$,

$$f = \left(-q^2/9 + m/3\right)^3 + \left(L/2\right)^2, \quad L = 2\left(q/3\right)^3 - qm/3 - 2V_{з0}^6/d^3,$$

$$q = -\left(V_{зс}^2/c^2 + 3d^2V_{з0}^2\right)/d^3, \; m = \left(2V_{зс}\left|V_{з0}^3\right|/c + 3dV_{з0}^4\right)/d^3,$$

$$c = \left(1-\sin\varphi\right)/\left(3h_з \sin\alpha_з \cos\varphi\right), \; d = 2h_з \sin\alpha_з \cos\varphi/\left(1-\sin\varphi\right).$$

Обчислювались параметри за виразами $K_{фз} = V_{зс}/\sqrt{Rg}$, $E_з = K_{фз}^2$,

$$K_г = \left(V_{зmax} + \left|V_{з0}\right|\right)\sqrt{R/g}/h_з, \; T = K_г^2, \; K_д = W/g.$$

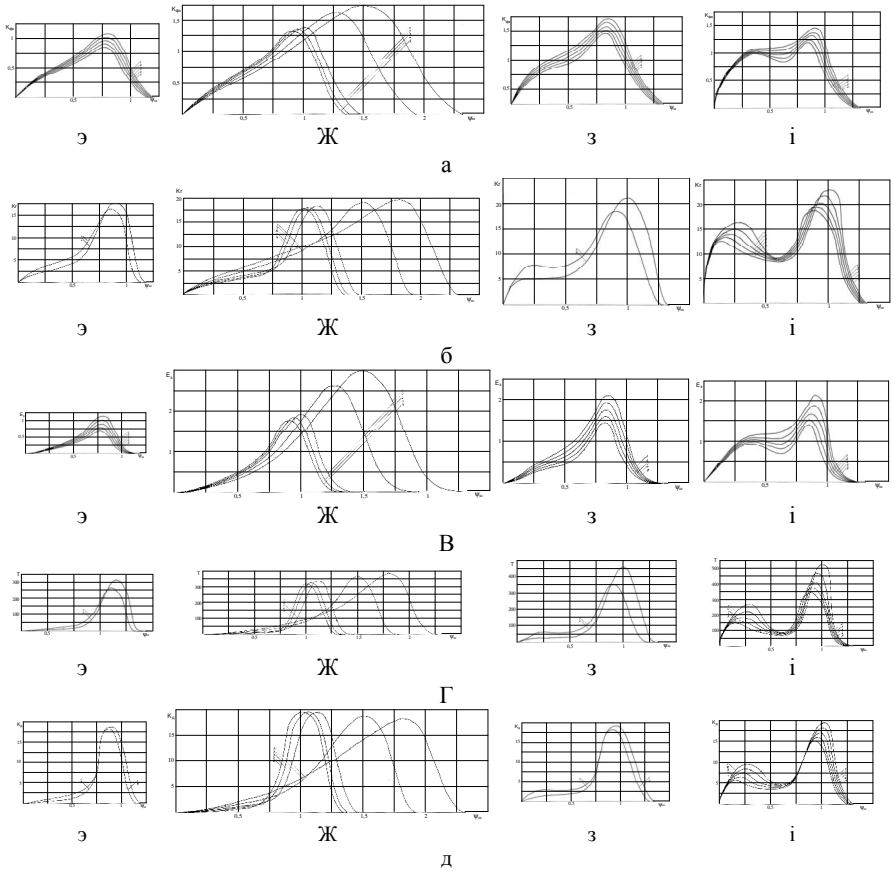

Рис. 2. Залежності $K_{фз}$ (а), $E_з$ (б), $K_г$ (в), T (г), та $K_д$ (д) від ψ_ω при:
є – *d/D*=0,022 та хвильові камері, ж – *d/D*=0,026 та гладкій камері,
з – *d/D*=0,01 та гладкій камері, і – *d/D*=0,0024 та гладкій камері:
1 – *к*=0,25; 2 – *к*=0,3; 3 – *к*=0,35; 4 – *к*=0,4; 5 – *к*=0,45

Отримано результати для чотирьох випадків роботи барабанних млинів. Перший характеризується відносним розміром елементів завантаження *d* у камері діаметром *D* – *d/D*=0,022 та хвильовою камерою, що відповідає умовам роботи кульових або першої камери трубних млинів із новою футерівкою. Другий – *d/D*=0,026 та гладкою камерою, що відповідає роботі кульових або першої камери трубних млинів зі зношеною футерівкою. Третій – *d/D*=0,01 та гладкою камерою, що відповідає роботі другої камери трубних млинів. Четвертий – *d/D*=0,0024 та гладкою камерою, що відповідає роботі третьої камери трубних млинів із мініпебсним завантаженням.

Було розраховано залежності параметрів від швидкості обертання для окремих ступенів заповнення камери *к*. На рис. 2 зображено отримані залежності динамічних параметрів від відносної швидкості ψ_ω при *к*=0,25-045 для чотирьох випадків роботи млинів. Порівняльний аналіз залежностей засвідчує посилення реалізації зареєстрованого ефекту зі зниженням відносного розміру елементів завантаження та висоти виступів на поверхні камери.

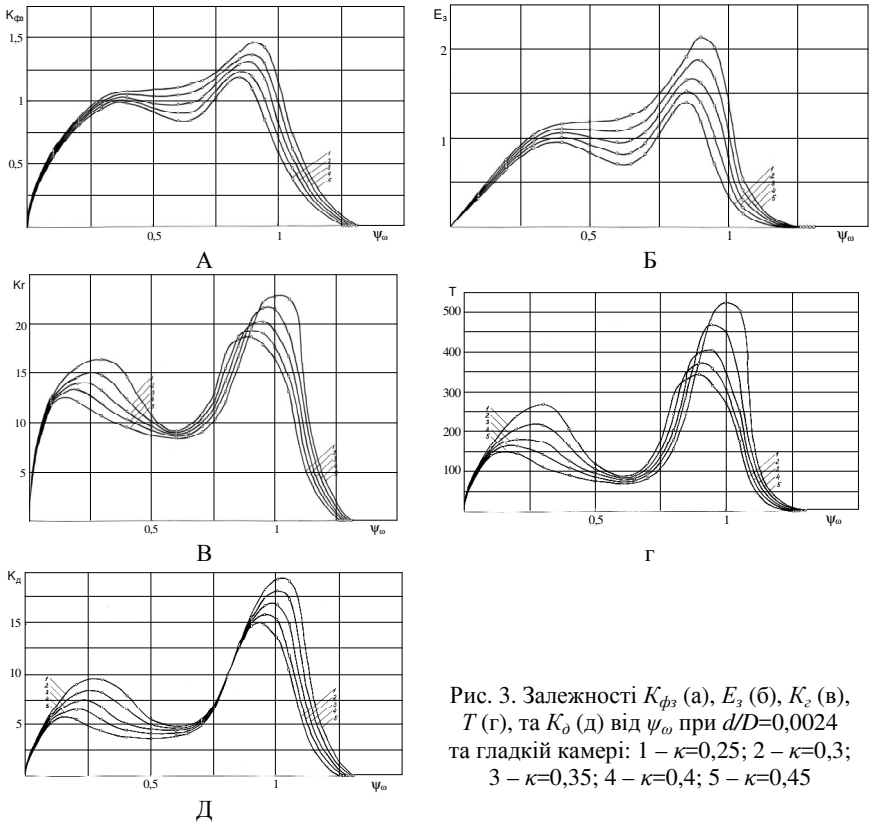

Рис. 3. Залежності $K_{фз}$ (а), $E_з$ (б), $K_г$ (в), *T* (г), та $K_д$ (д) від ψ_ω при *d/D*=0,0024 та гладкій камері: 1 – *к*=0,25; 2 – *к*=0,3; 3 – *к*=0,35; 4 – *к*=0,4; 5 – *к*=0,45

На рис. 3 наведено одержані залежності за умови дрібного мололього завантаження d/D<0,005-0,01 та гладкої поверхні камери. Графіки ілюструють зареєстрований ефект виникнення подвійного максимуму значень параметрів $K_{фз}$, $E_з$, $K_с$, T та $K_д$ при різних швидкостях. Тихохідний локальний максимум реалізується при ψ_ω=0,15-0,45, швидкохідний абсолютний максимум – при ψ_ω=0,85-1,03, а середньоходовий мінімум – при ψ_ω=0,51-0,63.

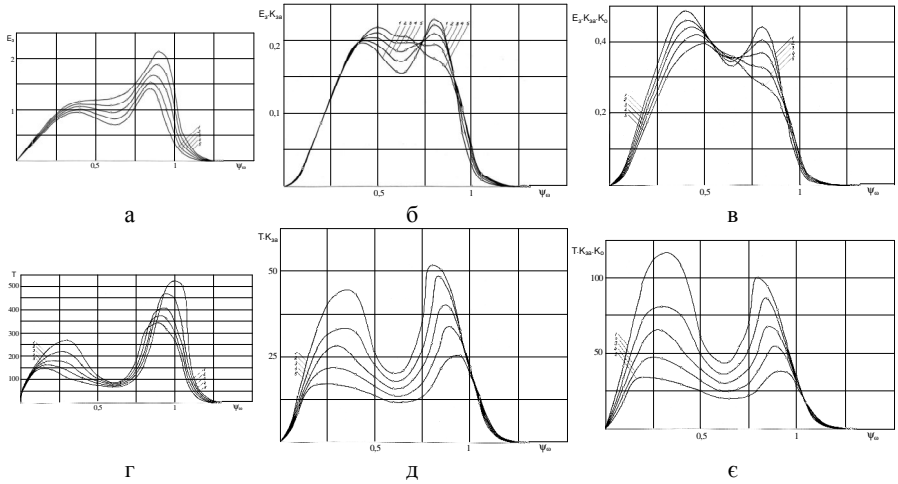

Рис. 4. Залежності $E_з$ (а), $E_з{\cdot}K_{за}$ (б), $E_з{\cdot}K_{за}{\cdot}K_о$ (в), T (г), $T{\cdot}K_{за}$ (д) та $T{\cdot}K_{за}{\cdot}K_о$ (є) від ψ_ω при d/D=0,0024 та гладкій камері:
1 – $к$=0,25; 2 – $к$=0,3; 3 – $к$=0,35; 4 – $к$=0,4; 5 – $к$=0,45

Оцінювати загальну продуктивність робочого процесу барабанних млинів зручно за допомогою комплексних характеристик. Складовими таких параметрів є питома енергія відповідної зони завантаження, масова частка цієї зони та оборотність завантаження.

Масовий розподіл між трьома зонами та оборотність є визначальними параметрами, що характеризують трифазний режим руху зернистого завантаження камери обертового барабана. До них належать ступені балістичної $K_{ба} = m_б / m$ і зсувної $K_{за} = m_з / m$ активації та приєднання $K_п = (m - m_б - m_з)/m$, де $m_б$ та $m_з$ – маса балістичної другої та зсувної третьої зони завантаження, m – маса всього завантаження, характеризують питомі частки відповідно другої, третьої та першої зон у масі всього завантаження. Оборотність $K_о = 2\pi/(t_ц \omega)$, де $t_ц$ – тривалість циклу руху завантаження, характеризує кількість періодів циркуляції завантаження впродовж одного оберту барабана.

Добуток питомої енергії на масову частку характеризує повну енергію пе-

вної зони завантаження. Добуток питомої енергії на масову частку та на оборотність характеризує продуктивність подрібнення від дії цієї зони мололь-ного завантаження на матеріал.

Характеристики роздавлюючої та стираючої дії задаються параметрами зсувної зони. Для загальної оцінки продуктивності від роздавлюючої та стираючої дії завантаження було введено окремі комплексні характеристики.

Повна енергія поступального руху зсувного шару, що визначає роздавлюючу дію завантаження під час зміни величини та напрямку швидкості при переході частинок завантаження з зсувної у твердотільну зону, характеризується добутком питомої енергії шару на його масову частку – $E_з \cdot K_{за}$, а продуктивність роздавлюючої дії шару характеризується добутком цих множників на оборотність завантаження – $E_з \cdot K_{за} \cdot K_о$.

Повна енергія хаотичного руху в поперечному напрямку зсувного шару, що визначає стираючу дію завантаження, характеризується добутком температури середовища шару як питомої енергії на масову частку шару – $T \cdot K_{за}$, а продуктивність стираючої дії шару характеризується добутком цих множників на оборотність завантаження – $T \cdot K_{за} \cdot K_о$.

Наведені графічні залежності комплексних параметрів $E_з \cdot K_{за}$ (рис. 4, б), $E_з \cdot K_{за} \cdot K_о$ (рис. 4, в), $T \cdot K_{за}$ (рис. 4, д) та $T \cdot K_{за} \cdot K_о$ (рис. 4, є), від ψ_ω для четвертого випадку роботи барабанних млинів характеризуються, порівняно з $E_з(\psi_\omega)$ (рис. 4, а) та $T(\psi_\omega)$ (рис. 4, г), поступовим переходом тихохідних максимумів значень параметрів з локальних у абсолютні.

Зокрема, якщо співвідношення між тихохідним та швидкохідним максимумами значень для $E_з(\psi_\omega)$, при четвертому випадку роботи млинів, становить 0,49-0,55, то для комплексних параметрів $E_з \cdot K_{за}(\psi_\omega)$ – 1,07-1,24, а для $E_з \cdot K_{за} \cdot K_о(\psi_\omega)$ – 1,1-1,39. Крім того, якщо таке співвідношення для $T(\psi_\omega)$ становить 0,28-0,79, то для $T \cdot K_{за}(\psi_\omega)$ – 0,66-0,85, а для $T \cdot K_{за} \cdot K_о(\psi_\omega)$ – 0,9-1,16. Тихохідний максимум $E_з \cdot K_{за} \cdot K_о$ відповідає ψ_ω=0,4-0,5, а тихохідний максимум $T \cdot K_{за} \cdot K_о$ – ψ_ω=0,2-0,3. Значення цих максимумів знижуються зі зростанням к.

Виникнення тихохідного максимуму спричинено ефектом аномального зниження псевдов'язкості завантаження [8, 9]. Таке явище кваліфікується як надтекучість зернистого матеріалу. При цьому невелика висота зсувного шару зумовлює підвищене значення динамічних параметрів. Крім того, незначна за масою зона невільного падіння не здатна суттєво завадити розвитку та прискоренню зсувного потоку. Натомість виникнення середньоходового мінімуму параметрів спричинено значним збільшенням висоти зсувного шару та зростанням маси зони невільного падіння, що здійснює гальмівний вплив на потік. Зі зростанням швидкості обертання зменшується товщина шару, підвищується висота падіння в зоні невільного падіння та кінетична енергія потоку, що компенсує гальмівний вплив цієї зони і сприяє прискоренню зсувного потоку та виникненню швидкохідного абсолютного максимуму парамет-

рів, який спадає до нуля із утворенням пристінкового шару завантаження.

На рис. 3 зображено графіки залежностей опору середовища завантаження $\sigma_{оп}$ та його компонентів $\sigma_{оп1}$ та $\sigma_{оп2}$ від основної складової швидкості руху шару V_x. Перша складова характеризує сили тертя спокою, що виникають у момент початку руху середовища. Внаслідок реалізації ефекту дискретності зернистого матеріалу, такі сили опору різко зростають до максимального значення в 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.

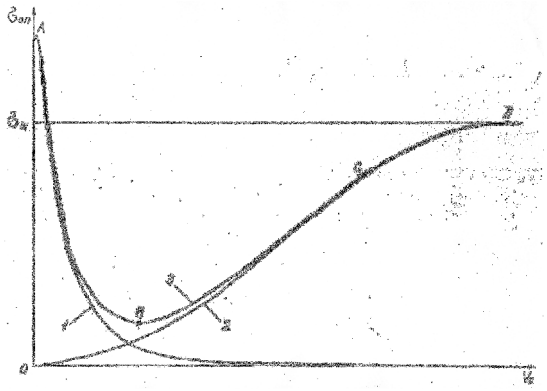

Рис. 3. Графік залежності опору середовища від швидкості шару вздовж осі *x*:
1 – $\sigma_{оп1}(V_x)$,
2 – $\sigma_{оп2}(V_x)$,
3 – $\sigma_{оп}(V_x)$.

На графіку $\sigma_{оп}(V_x)$ точками *O*, *A*, *B*, *C* і *D* показані характерні щодо прояву реологічних властивостей середовища ділянки. Точка *O* позначає стан спокою шару і відповідає стану граничної рівноваги середовища у пластичній постановці задачі. Ділянка *OA* 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 *AB* 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 *B* значення напруження опору набуває мінімуму і формується течія, що розплескується [10, 11]. Якщо реологічна поведінка середовища на ділянці *OB* визначається переважно першою складовою $\sigma_{оп1}$ та силами тертя спокою, то на ділянці *BD* – переважно другою $\sigma_{оп2}$ та силами тертя ковзання при русі. На ділянці *BC*, при збільшенні швидкості, опір зростає практично за лінійною залежністю. Тут зернистий матеріал веде себе як лінійно в'язке середовище. Ділянка *CD* відповідає області кулонова тертя, оскільки напруження опору майже не залежить від швидкості та пропорційно стискаючій силі. Ефект виникнення аномальної

в'язкості та мінімального опору поблизу точки *B* залежності $\sigma_{оп}(V_x)$ було експериментально підтверджено при реєструванні явища лавиноподібного гравітаційного руху зернистого матеріалу по похилій поверхні [12-14].

Таким чином, методом візуалізації зареєстровано ефект виникнення подвійного максимуму значень питомих динамічних параметрів зсувного шару для різних швидкостей обертання при малому відносному розмірі елементів мололього завантаження барабанних млинів. Тихохідні максимуми значень залежностей продуктивностей подрібнення стираючою та роздавлюючою дією від відносної швидкості обертання трансформуються з локальних, для питомих енергій, у абсолютні для комплексних параметрів. Виникнення тихохідного локального максимуму параметрів, що підвищує ефективність останньої стадії тонкого подрібнення стиранням та роздавлюванням, зумовлено явищем аномально низької в'язкості зернистого середовища зсувного шару завантаження, коли рух потоку набуває лавиноподібного характеру.

1. Науменко Ю. В. Основи теорії режимів роботи барабанних млинів : монографія / Ю. В. Науменко. – Рівне : Видавництво СПД Зелент О.І., 2009. – 282 с. **2.** Науменко Ю. В. Рекомендації до розрахунку, проектування та експлуатації барабанних млинів багатостадійного подрібнення / Ю. В. Науменко. – Рівне : Видавництво СПД Зелент О.І., 2009. – 88 с. **3.** Півняк Г. Г. Ресурсозбереження та інтенсифікація процесів подрібнення / Г. Г. Півняк, В. І. Кириченко. – Д. : НГАУ, 2001. – 163 с. **4.** Подрібнювання. Енергетика і технологія / Г. Г. Півняк, Л. А. Вайсберг, В. І. Кириченко, В. В. Кириченко. – Д. : НГУ, 2006. – 314 с. **5.** Крюков Д. К. Футеровки шаровых мельниц / Д. К. Крюков. – М. : Машиностроение, 1965. – 184 с. **6.** Ковалюх В. Р. Зависимость производительности цементной мельницы от коэффициента заполнения и частоты вращения / В. Р. Ковалюх, М. Б. Гуз // Цемент. – 1978. – № 7. – С. 8-9. **7.** Ковалюх В. Р. Оптимизация процесса измельчения в шаровых мельницах с регулируемым электроприводом / В. Р. Ковалюх // Цемент. – 1985. – № 8. – С. 19-22. **8.** Ден-Гартог Дж. П. Механические колебания / Дж. П. Ден-Гартог; пер. с англ. – М. : Физматгиз, 1960. – 580 с. **9**. Ротенберг А. В. О возможном виде тензора вязких напряжений в механике сыпучих тел [Электронный ресурс] / А. В. Ротенберг // Исследовано в России. – 2001. – Вып. 42. – С. 465-475: – Режим доступа: http: // zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2001/042.pdf/. **10.** Долгунин В. Н. Быстрые гравитационные течения зернистых материалов: техника измерения, закономерности, технологическое применение / В. Н. Долгунин, В. Я. Борщев. – М. : Изд-во Машиностроение-1, 2005. – 112 с. **11.** Долгунин В. Н. Сегрегация в зернистых средах: явление и его технологическое применение / В. Н. Долгунин, А. А. Уколов. – Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2005. – 180 с. **12.** Borzsonyi T. Two scenarios for avalanche dynamics in inclined granular layers / T. Borzsonyi, T. C. Hasley, R. E. Ecke // Phys. Rev. Lett. – 2005. – Vol. 94, № 208001. – P. 208001 (4 pages). **13.** Borzsonyi T. Avalanche dynamics on a rough inclined plane / T. Borzsonyi, T. C. Hasley, R. E. Ecke // Physical Review E. – 2008. – Vol. 78. – P. 011306 (15 pages). **14**. Armanini A. Liquid-granular channel flow dynamics / A. Armanini, L. Fraccarollo, M. Larcher // Powder Technology. – 2008. – Vol. 182. – P. 218-227.

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