**Дейнека К. Ю.**

К.Т.Н.

*Технічний коледж
Національного
університету водного
господарства
та природокористування*

Науменко Ю.В.

д.т.н., професор

Змієвський А. М.

провідний інженер

*Національний
університет водного
господарства та
природокористування*

Deineka K.

*The Technical College of
the National University of Water
and Environmental
Engineering*

Naumenko Yu.**Zmievskiy A. M.**

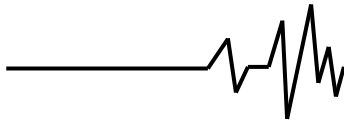
*The National University of
Water and Environmental
Engineering*

УДК 621.926.5:539.215:531.36**DOI: 10.37128/2306-8744-2020-1-7**

ЗНАЧЕННЯ ШВИДКОСТІ ОБЕРТАННЯ БАРАБАНА ПРИ САМОЗБУДЖЕННІ АВТОКОЛИВАНЬ ІЗ МАКСИМАЛЬНИМ РОЗМАХОМ ПОЛІЗЕРНИСТОГО ВНУТРІШНЬОКАМЕРНОГО ЗАВАНТАЖЕННЯ

Розглянуто вплив структури двофракційного полізернистого внутрішньокамерного завантаження на величину швидкості обертання барабана при самозбудженні автоколиваний завантаження із максимальним розмахом. Пульсаційний режим руху такого завантаження камери використовується при автоколивному процесі подрібнення в барабанному млині. Як крупну фракцію, що моделювала молотильні тіла, було застосовано сферичні частинки незв'язного зернистого матеріалу розміром 2.2 мм. Як дрібну фракцію, що моделювала частинки подрібнюваного матеріалу, було використано цемент. Як фактори експериментальних досліджень було прийнято: ступінь заповнення проміжків між частинками крупної фракції у стані спокою дисперсними частинками дрібної фракції 0, 25, 50 та 100%, відносний розмір частинок крупної фракції у камері барабана 0.519, 0.733, 1.04, 1.47, 2.08, 2.93, 4.15 та 5.87% (радіус камери барабана 212, 150, 106, 75, 53, 37.5, 26.5 та 18.75 мм), ступінь заповнення камери у стані спокою 25, 35 та 45%. Застосовано метод візуального аналізу перехідних процесів автоколивних режимів поведінки завантаження у поперечному перерізі камери обертового барабана. Виконані вимірювання швидкості обертання барабана при самозбудженні автоколиваний завантаження. Величина розмаху автоколиваний оцінювалась за приростом різниці максимального та мінімального значення дилатансії завантаження за один період пульсацій. Величина відносної швидкості обертання барабана при максимальному розмаху автоколиваний завантаження змінювалась у межах 0.777-1.4. Зарєстровано ефект спадання відносної швидкості обертання барабана при досягненні максимального розмаху автоколиваний полізернистого завантаження камери із посиленням зв'язних властивостей завантаження. Встановлено спадання відносної швидкості обертання зі зменшенням відносного розміру частинок крупної фракції заповнення та збільшенням вмісту дрібної фракції у заповненні і підвищенням ступеня заповнення камери завантаженням. Виявлено різке посилюється інтенсивності спадання відносної швидкості обертання при значенні відносного розміру крупних частинок, меншому за 0.015.

Ключові слова: швидкість обертання барабана, максимальний розмах автоколиваний, двофракційне полізернисте завантаження камери, дрібна фракція.



Постановка проблеми. За певних умов усталені режими руху приводних агрегатів доволі поширеного міжгалузевого класу машини барабанного типу стають нестійкими [1, с. 66]. Така нестійкість може супроводжуватись коливаннями потужності приводу обертання завантаженого барабана [2] та самозбудженням автоколиваний у вигляді пульсації завантаження у поперечному перерізі обертової камери [3].

Прикладне значення пульсаційної поведінки внутрішньокамерного завантаження полягає у застосуванні інноваційного автоколивного процесу подрібнення в барабанному млині [4], енергетична ефективність якого посилюється зі зменшенням ступеня заповнення камери [5].

Інтенсивність автоколивного процесу визначається розмахом автоколиваний. Величина розмаху зростає зі зменшенням заповнення камери [6], визначається проявом ефекту режимного гістерезису усталеного руху завантаження [7] та його двофракційною структурою [8].

Натомість технологічна ефективність реалізації автоколивного процесу суттєво залежить від прийнятого значення швидкості обертання, що відповідає досягненню максимального розмаху автоколиваний.

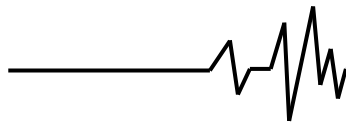
Аналіз останніх досліджень і публікацій. Підвищена прикладна актуальність проблеми спричинила в останній час різке зростання дослідницької активності у прогнозуванні нестійкої поведінки зернистого завантаження обертового барабана. Найбільший інтерес становить поведінка вільної поверхні заповнення, яка за умови самозбудження пульсації зазнає суттєвих складних деформацій при лавиноподібному обрушенні. Значна складність задачі змушує удосконалювати традиційні та застосовувати все нові теоретичні і експериментальні методи досліджень.

У роботі [9] аналітично із експериментальною перевіркою було встановлено, що нестійка поведінка зернистого завантаження обертового барабана проявляється у виникненні періодичного лавиноподібного обрушення вільної поверхні. Метод дискретних елементів було використано в [10] для чисельного визначення параметрів обрушення вологого зернистого завантаження із урахуванням когезії. Було встановлено зменшення розмаху лавин, швидкості руху активного шару та його квазітемператури зі збільшенням в'язкості середовища та розміру частинок. У [11] на основі отриманих експериментальних даних розроблено спрощену в'язко-пластичну чисельну модель перехідних процесів лавиноподібного

обрушення вільної поверхні. Показано визначальну роль дилатансії середовища на характер руху.

Підвищена складність аналітико-чисельного моделювання пульсаційної деформації вільної поверхні завантаження зумовлює застосування переважно експериментальних методів дослідження. У роботі [12] було застосовано метод візуалізації шляхом відеозйомки для вивчення умов переходу періодичних обрушень вільної поверхні завантаження у безперервну циркуляційну течію. Встановлено, що такий перехід для піщаних частинок неупорядкованої форми має режимний гістерезис. Вимірювальну апаратуру просторової фільтрації швидкості було використано в [13] для вивчення перехідних процесів обрушення вільної поверхні заповнення із частинками неупорядкованої форми. Встановлено два типи лавин, що накладаються, які мають різні напрями переміщення уздовж поверхні. Показано, що лавини виникають внаслідок осьового збурення частинок.

Обмеженість можливостей візуалізації зумовила в останній час широке залучення для розв'язку розглядуваної задачі методів томографічного аналізу, зокрема спекл-візуальної спектроскопії (СВС). У роботі [14] методом СВС досліджено перехідні процеси розподілу швидкостей лавини періодичного обрушення вільної поверхні у часі. Виявлено, що коливання швидкостей у верхній частині вільної поверхні перевищує такі коливання у нижній. Встановлено зростання розмаху коливаний зі збільшенням швидкості обертання. Метод СВС було використано в [15] для вивчення перехідних процесів обрушення вільної поверхні завантаження частинок неупорядкованої форми. Зареєстровано явище ущільнення середовища у початковий період обрушення. В [16] за допомогою СВС встановлено значний вплив початкового ущільнення зернистого середовища поблизу вільної поверхні на періодичність обрушення та розподіл швидкостей потоку. Оцінено вплив неупорядкованої форми частинок на параметри обрушення. За допомогою цього методу в [17] встановлено явище зростання тривалості обрушення вільної поверхні зі збільшенням ступеня заповнення камери. У роботі [18] методом СВС проаналізовано розподіл швидкостей на поверхні лавиноподібного потоку частинок неупорядкованої форми. Встановлено залежність профілю швидкості та опуклої форми вільної поверхні від швидкості обертання, розміру частинок та барабана. В [19] було застосовано удосконалений метод СВС для обробки експериментальних даних. Показано підвищення точності визначення



динамічних параметрів обрушення вільної поверхні зернистого завантаження. Удосконалений метод СВС було використано для аналізу обрушення вільної поверхні завантаження при ступені заповнення камери 50% [20]. Оцінено середнє коливання швидкості частинок лавинного потоку. У роботі [21] засновано удосконалений СВС для дослідження перехідного процесу від спокою до лавиноподібного осипання активного та пасивного шару завантаження. Встановлено явище пришвидшення такого переходу зі збільшенням заповнення камери. СВС дозволив зареєструвати виникнення зони накопичення частинок неупорядкованої форми поблизу вільної поверхні завантаження обертового барабана [22]. Виявлено явище збільшення та переміщення донизу такої зони зі зростанням швидкості обертання та розміру частинок. Прояв ущільнення та дилатансії при обрушенні вільної поверхні частинок неупорядкованої форми досліджувався методом СВС у [23]. Показано, що ущільнення передують обрушенню та виникненню дилатансії. Величина ущільнення зростає зі збільшенням швидкості обертання барабана. Збільшення ущільнення скорочує тривалість обрушення. В [24] за допомогою СВС вивчався перерозподіл частинок неупорядкованої форми після обрушення вільної поверхні. Такий перерозподіл відбувається у напрямку від верхньої частини поверхні до нижньої. Показано зростання дисипації енергії перерозподілу зі збільшенням ступеня заповнення камери. Форма вільної поверхні та товщина активного шару частинок неупорядкованої форми після обрушення досліджувались методом СВС в [25]. Встановлено виникнення опуклого скупчення частинок у центральній частині вільної поверхні внаслідок різкого зменшення швидкості обрушення. Зі збільшенням швидкості обертання розподіл швидкості вирівнюється і вільна поверхня згладжується. У роботі [26] методом СВС виявлено два різновиди перерозподілу у пасивному шарі частинок неупорядкованої форми в процесі обрушення вільної поверхні. Характер таких перерозподілів визначається ступенем заповнення камери. СВС було використано в [27] для вимірювання кінетичної температури зернистого завантаження при обрушенні. Встановлено підвищене коливання швидкості частинок у нижній частині вільної поверхні. Показано, що частота обрушення зростає зі збільшенням швидкості.

Проте отримані раніше результати стосуються лише періодичних течій монодисперсного зернистого завантаження переважно при доволі повільному обертанні барабана і малому розмаху автоколивань.

Натомість внутрішньокамерне завантаження барабанного млина має явно виражену двофракційну структуру, що складається із крупної фракції молотильних тіл та дрібної фракції частинок подрібнюваного матеріалу. Вплив же швидкості обертання на розмах автоколивань такого внутрішньокамерного завантаження залишається невивченим.

Формулювання мети досліджень. Передбачалось встановити закономірності впливу структури двофазного зернистого завантаження камери на величину швидкості обертання барабана при досягненні автоколивань завантаження максимального розмаху.

Викладення основного матеріалу дослідження. Як метод досліджень було застосовано візуальний аналіз перехідних процесів автоколивних режимів поведінки завантаження у поперечному перерізі камери та вимірювання швидкості обертання барабана.

Як робоче середовище використовувався двофракційний полізернистий матеріал. Крупна фракція внутрішньокамерного завантаження моделювала молотильні тіла барабанного млина, а дрібна – частинки подрібнюваного матеріалу. Крупну фракцію складали сферичні частинки незв'язного зернистого матеріалу зі середнім розміром $d=2.2 \cdot 10^{-3}$ м. Дрібну фракцію становив цемент.

Як змінні фактори експериментальних досліджень було вибрано ступінь заповнення проміжків між частинками крупної фракції у стані спокою частинками дрібної фракції k_m (1), відносний розмір частинок крупної фракції у камері барабана d_{2R} (2) та ступінь заповнення камери завантаженням у стані спокою k (3)

$$k_m = \frac{w_m}{0,4 \cdot k \cdot \pi \cdot R^2 \cdot L}, \quad (1)$$

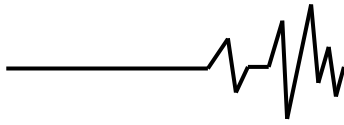
$$d_{2R} = \frac{d}{2 \cdot R}, \quad (2)$$

$$k = \frac{w}{\pi \cdot R^2 \cdot L}, \quad (3)$$

де w – об'єм порції крупної фракції у стані спокою, w_m – об'єм порції дрібної фракції, 0.4 – об'ємна частка проміжків між сферичними частинками крупної фракції у стані спокою, R – радіус камери барабана, L – довжина камери.

Дискретні значення змінних факторів становили: $k_m=0, 0.25, 0.5$ та 1 ; $d_{2R}=0.00519, 0.00733, 0.0104, 0.0147, 0.0208, 0.0293, 0.0415$ та 0.0587 , ($R=212, 150, 106, 75, 53, 37.5, 26.5$ та 18.75 мм); $k=0.25, 0.35$ та 0.45 .

Розмах автоколивань оцінювався за



величиною приросту максимального та мінімальне значення дилатансії за один період пульсації завантаження.

Для зручності значення кутової швидкості обертання барабана при досягненні автоколиваний внутрішньокамерного завантаження максимального розмаху ω_{Rumax} (4) оцінювалось за величиною відносної швидкості обертання

$$\Psi_{\omega_{Rumax}} = \frac{\omega_{Rumax}}{\omega_{cr}}, \quad (4)$$

де $\omega_{cr} = \sqrt{g/R}$ – значення критичної кутової швидкості обертання, при якій відцентрове прискорення на циліндричній поверхні камери дорівнює гравітаційному g . Тоді вираз для відносної швидкості обертання при максимальному розмаху автоколиваний (5)

набуває вигляду

$$\Psi_{\omega_{Rumax}} = \omega_{Rumax} \cdot \sqrt{\frac{R}{g}}. \quad (5)$$

Для аналізу отриманих результати експериментальних досліджень було одержано графічні залежності відносної швидкості обертання барабана при максимальному розмаху автоколиваний полізернистого внутрішньокамерного завантаження $\Psi_{\omega_{Rumax}}$ від відносного розміру частинок крупної фракції d_{2R} , вмісту у заповненні частинок дрібної фракції K_M та ступеня заповнення камери завантаженням у стані спокою k .

На рис. 1 наведено графіки залежностей $\Psi_{\omega_{Rumax}}$ від d_{2R} при $K_M=0-1$ для трьох значень k .

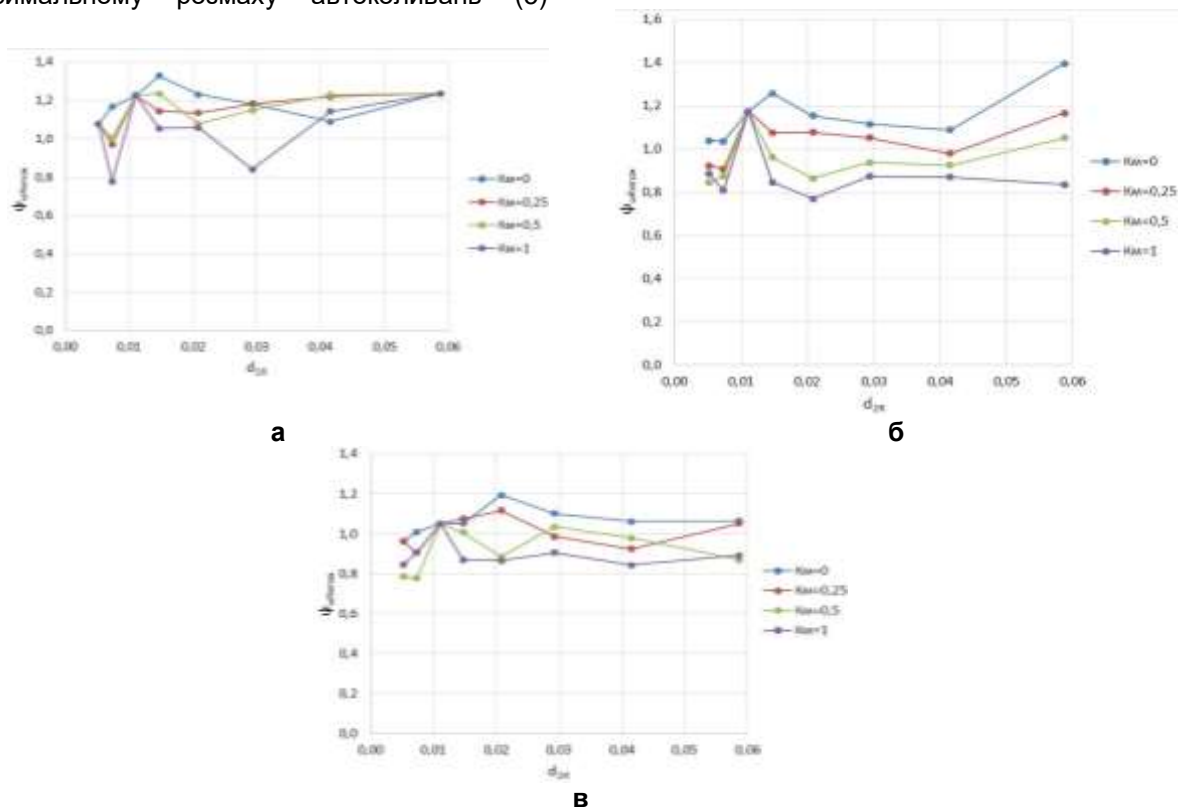
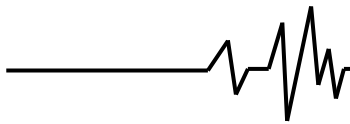


Рис. 1. Залежності відносної швидкості обертання барабана при максимальному розмаху автоколиваний завантаження $\Psi_{\omega_{Rumax}}$ від відносного розміру частинок крупної фракції d_{2R} при вмісті у заповненні частинок дрібної фракції $K_M=0, 0.25, 0.5$ та 1 для ступеня заповнення камери завантаженням $k=0.25$ (а), $k=0.35$ (б) та $k=0.45$ (в)

Відносна швидкість обертання барабана при досягненні максимального розмаху автоколиваний полізернистого завантаження камери $\Psi_{\omega_{Rumax}}$ спадає зі зменшенням відносного розміру частинок крупної фракції заповнення d_{2R} (рис. 1).

Інтенсивність спадання $\Psi_{\omega_{Rumax}}$, зі зменшенням d_{2R} , різко посилюється при малих значеннях відносних розмірів $d_{2R}<0.015$ та зменшенні ступеня заповнення камери барабана k .



На рис. 2 наведено графіки залежностей $\psi_{\omega R_{max}}$ від K_M при $d_{2R}=0.00519-0.0587$ для трьох значень κ .

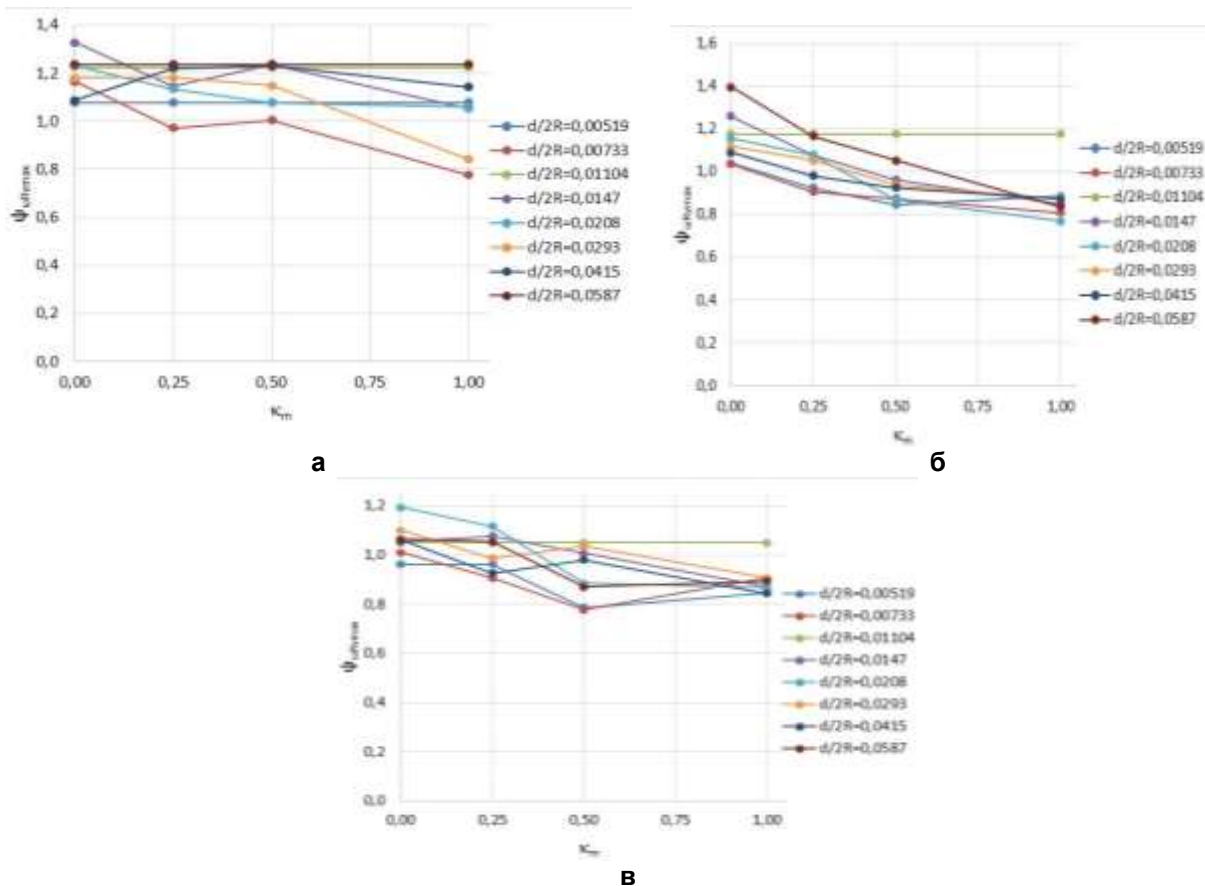
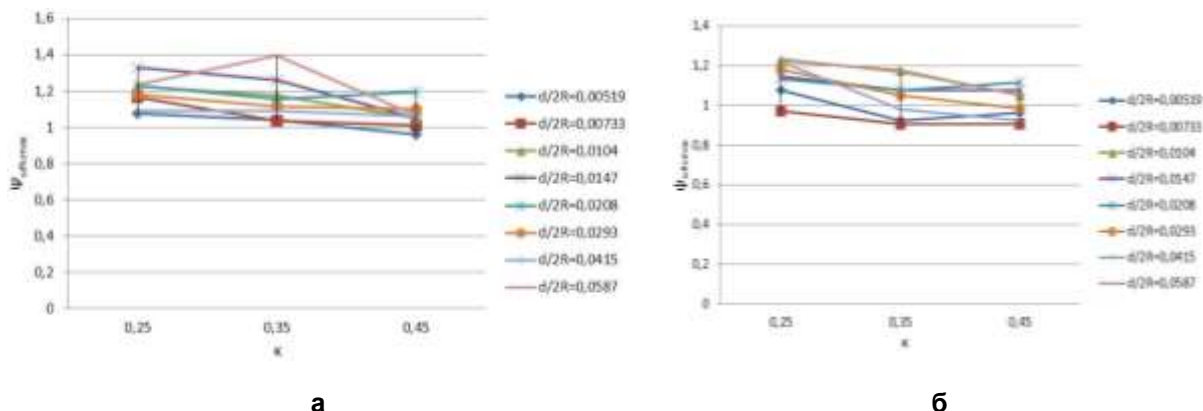


Рис. 2. Залежності відносної швидкості обертання барабана при максимальному розмаху автоколивань завантаження $\psi_{\omega R_{max}}$ від вмісту у заповненні частинок дрібної фракції K_M при відносному розмірі частинок крупної фракції $d_{2R}=0.00519, 0.00733, 0.0104, 0.0147, 0.0208, 0.0293, 0.0415$ та 0.0587 для ступеня заповнення камери завантаженням $\kappa=0.25$ (а), $\kappa=0.35$ (б) та $\kappa=0.45$ (в)

Відносна швидкість обертання при досягненні максимального розмаху автоколивань завантаження камери $\psi_{\omega R_{max}}$ спадає зі збільшенням вмісту дрібної фракції у заповненні K_M (рис. 2). Інтенсивність спадання $\psi_{\omega R_{max}}$, зі збільшенням K_M , посилюється при

малих значеннях K_M та зменшенні ступеня заповнення камери κ .

На рис. 3 наведено графіки залежностей $\psi_{\omega R_{max}}$ від κ при $d_{2R}=0.00519-0.0587$ для чотирьох значень K_M .



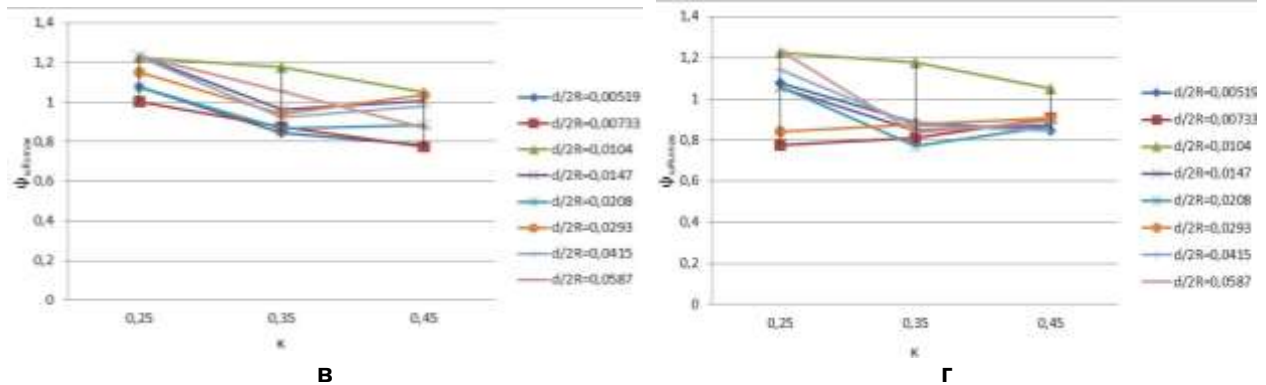
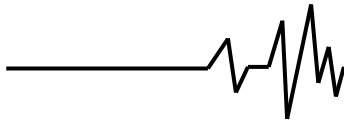


Рис. 3. Залежності відносної швидкості обертання барабана при максимальному розмаху автоколивань завантаження $\Psi_{\omega R_{umax}}$ від ступеня заповнення камери завантаженням κ при відносному розмірі частинок крупної фракції $d_{2R}=0.00519, 0.00733, 0.0104, 0.0147, 0.0208, 0.0293, 0.0415$ та 0.0587 для вмісту у заповненні частинок дрібної фракції $\kappa_M=0$ (а), 0.25 (б), 0.5 (в) та 1 (г)

Відносна швидкість обертання при досягненні максимального розмаху автоколивань $\Psi_{\omega R_{umax}}$ спадає зі збільшенням ступеня заповнення камери κ (рис. 3). Інтенсивність спадання $\Psi_{\omega R_{umax}}$, зі збільшенням κ , посилюється при малих значеннях κ та зменшенні вмісту дрібної фракції у заповненні κ_M .

Висновки. 1. Зареєстровано ефект спадання відносної швидкості обертання барабана при досягненні максимального розмаху автоколивань полізернистого завантаження камери $\Psi_{\omega R_{umax}}$ із посиленням зв'язних властивостей середовища.

2. Відносна швидкість обертання $\Psi_{\omega R_{umax}}$ спадає зі зменшенням відносного розміру частинок крупної фракції заповнення d_{2R} та збільшенням вмісту дрібної фракції у заповненні κ_M і ступеня заповнення камери завантаженням κ .

3. Інтенсивність спадання відносної швидкості $\Psi_{\omega R_{umax}}$, зі зменшенням d_{2R} , різко посилюється при малих значеннях відносних розмірів $d_{2R}<0.015$ та зменшенні ступеня заповнення камери барабана κ .

4. Інтенсивність спадання відносної швидкості $\Psi_{\omega R_{umax}}$, зі збільшенням κ_M , посилюється при малих значеннях κ_M та зменшенні ступеня заповнення камери κ .

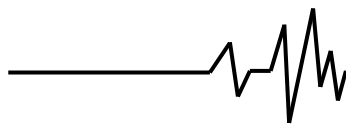
5. Інтенсивність спадання відносної швидкості $\Psi_{\omega R_{umax}}$, зі збільшенням κ , посилюється при малих значеннях κ та зменшенні вмісту дрібної фракції у заповненні κ_M .

6. При зміні вмісту дрібної фракції в завантаженні у межах $\kappa_M=0-1$, відносного розміру частинок крупної фракції у камері $d_{2R}=0.00519-0.0587$ та ступеня заповнення камери $\kappa=0.25-0.45$, відносна швидкість обертання барабана при досягненні максимального розмаху автоколивань двофракційного полізернистого завантаження камери набуває значень $\Psi_{\omega R_{umax}}=0.777-1.4$.

7. Подальшого з'ясування потребує вплив структури полізернистого завантаження обертального барабана на інші частотні характеристики автоколивань, що самозбуджуються.

Список використаних джерел

1. Deineka, K. Y., Naumenko, Y. V. (2018). The tumbling mill rotation stability. *Naukovyi Visnyk Nationalnoho Hirnychoho Universytetu*, 1 (163), 60-68. doi.org/10.29202/nvngu/2018-1/10
2. Lv, J., Wang, Z., Ma, S. (2020). Calculation method and its application for energy consumption of ball mills in ceramic industry based on power feature deployment. *Advances in Applied Ceramics*. doi.org/10.1080/17436753.2020.1732621
3. Дейнека, К. Ю., Науменко, Ю. В. (2016). Параметри автоколивань внутрішньокамерного завантаження барабанного млина. *Вібрації в техніці та технологіях*, 3 (83), 29-34.
4. Deineka, K., Naumenko, Y. (2019). Revealing the effect of decreased energy intensity of grinding in a tumbling mill during self-excitation of auto-oscillating of the intrachamber fill. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1 (1 (97)), 6-15. doi.org/10.15587/1729-4061.2019.155461
5. Deineka, K., Naumenko, Y. (2019). Establishing the effect of a decrease in power intensity of self-oscillation grinding in a tumbling mill with decrease of intrachamber fill. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6 (7(102)), 43-52. doi.org/10.15587/1729-4061.2019.183291
6. Науменко, Ю. В., Дейнека, К. Ю. (2017). Вплив ступеня заповнення обертальної камери на автоколивання зернистого завантаження. *Вібрації в техніці та технологіях*, 4 (87), 65-69.
7. Дейнека, К. Ю., Науменко, Ю. В. (2018). Вплив структури полідисперсного завантаження



обертового барабана на самозбудження автоколивань. *Вібрації в техніці та технологіях*, 3 (90), 75-82.

8. Дейнека, К. Ю., Науменко, Ю. В. (2019). Вплив дрібної фракції полізернистого завантаження обертового барабана на розмах автоколивань. *Вібрації в техніці та технологіях*, 4 (95), 31-37. [doi:10.37128/2306-8744-2019-4-4](https://doi.org/10.37128/2306-8744-2019-4-4)

9. Gray, J. M. N. T. (2018). Particle segregation in dense granular flows. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 50, 407-433. doi.org/10.1146/annurev-fluid-122316-045201

10. Kasper, J. H., Magnanimo, V., Jarray, A. (2019). Dynamics of discrete wet granular avalanches in a rotary drum. *Proceedings of the 8th International Conference on Discrete Element Methods (DEM8)*.

11. Marteau, E., Andrade, J. E. (2018). A model for decoding the life cycle of granular avalanches in a rotating drum. *Acta Geotechnica*, 13, 549-555. doi.org/10.1007/s11440-017-0609-2

12. Balmforth, N. J., McElwaine, J. N. (2018). From episodic avalanching to continuous flow in a granular drum. *Granular matter*, 20, 52. doi.org/10.1007/s10035-018-0822-1

13. Han, R., Zhang, Y.-F., Li, R., Chen, Q., Feng, J.-Y., Kong, P. (2020). Avalanching patterns of irregular sand particles in continual discrete flow. *Chinese Physics B*, 29(2), 024501. doi.org/10.1088/1674-1056/ab65b8

14. Yang, H., Li, R., Kong, P., Sun, Q. C., Biggs, M. J., Zivkovic, V. (2015). Avalanche dynamics of granular materials under the slumping regime in a rotating drum as revealed by speckle visibility spectroscopy. *Physical Review E*, 91, 042206. doi.org/10.1103/PhysRevE.91.042206

15. Zivkovic, V., Yang, H., Zheng, G., Biggs, M. (2017). Time-resolved granular dynamics of a rotating drum in a slumping regime as revealed by speckle visibility spectroscopy. *EPJ Web of Conferences*, 140, 06020. [doi:10.1051/epjconf/201714006020](https://doi.org/10.1051/epjconf/201714006020)

16. Yang, H., Zhang, B. F., Li, R., Zheng, G., Zivkovic, V. (2017). Particle dynamics in avalanche flow of irregular sand particles in the slumping regime of a rotating drum. *Powder Technology*, 311, 439-448. doi.org/10.1016/j.powtec.2017.01.064

17. Li, R., Yang, H., Zheng, G., Sun, Q. C. (2018). Granular avalanches in slumping regime in a 2D rotating drum. *Powder Technology*, 326, 322-326. doi.org/10.1016/j.powtec.2017.12.032

18. Lin, S. H., Yang, H., Li, R., Zheng, G., Zivkovic, V. (2018). Velocities of irregular particles in a continuously avalanching surface flow within a rotating drum. *Powder Technology*, 338, 376-382. doi.org/10.1016/j.powtec.2018.07.040

19. Mou, S., Yang, H., Li, R., Wang, B., Sun, Q., Kong, P. (2019). An improved wavelet analytical method for studying particle dynamics of the passive layer within a granular drum. *J. Phys.: Conf. Ser.*,

1237, 042071. [doi:10.1088/1742-6596/1237/4/042071](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1237/4/042071)

20. Mou, S. H., Yang, H., Li, R., Zhang, G. H., Sun, Q. C., Kong, P. (2019). Particle dynamics of the passive layer within a granular drum using wavelet analysis. *Powder Technology*, 344, 1-9. doi.org/10.1016/j.powtec.2018.11.108

21. Li, R., Yang, H., Zheng, G., Chen, Q., Sun, Q. C. (2019). Study of granular state transition in a rotation drum by using speckle visibility spectroscopy and the edit distance with real penalty algorithm. *Powder Technology*, 347, 10-16. doi.org/10.1016/j.powtec.2019.02.043

22. Zhang, Y. J., Yang, H., Li, R., Chen, Q., Sun, Q. C., Kong, P. (2019). Accumulation phenomenon in continuous flow of irregular particles in rotating drum. *Powder Technology*, 355, 333-339. doi.org/10.1016/j.powtec.2019.07.051

23. Chen, Q., Yang, H., Li, R., Xiu, W. Z., Han, R., Sun, Q. C., Zivkovic, V. (2019). Compaction and dilatancy of irregular particles avalanche flow in rotating drum operated in slumping regime. *Powder Technology*, 356, 376-382. doi.org/10.1016/j.powtec.2019.09.047

24. Chen, Q., Yang, H., Li, R., Xiu, W. Z., Zheng, G., Kong, P. (2020). Rearrangement of irregular sand particles in a rotary drum after avalanche flow. *Powder Technology*, 360, 549-554. doi.org/10.1016/j.powtec.2019.10.083

25. Qiang, Z. D., Wang, B. D., Li, R., Chen, Q., Zheng, G., Zivkovic, V., Yang, H. (2020). The surface structure and the active layer depth of the irregular sand particles in a continuously avalanching flow. *Powder Technology*, 360, 1037-1046. doi.org/10.1016/j.powtec.2019.11.010

26. Li, R., Zheng, G., Chen, Q., Xiu, W. Z., Yang, H. (2020). Two types of particle dynamics in the passive layer of a granular bed composed of irregular particles. *Powder Technology*, 362, 231-237. doi.org/10.1016/j.powtec.2019.11.081

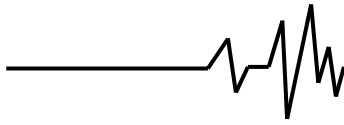
27. Yang, H., Zhu, Y., Li, R., Sun, Q. (2020). Kinetic granular temperature and its measurement using speckle visibility spectroscopy. *Particuology*, 48, 160-169. [doi:10.1016/j.partic.2018.07.011](https://doi.org/10.1016/j.partic.2018.07.011)

Список джерел у транслітерації

1. Deineka, K. Y., & Naumenko, Y. V. (2018). The tumbling mill rotation stability. *Naukovy Visnyk Nationalnoho Hirnychoho Universytetu – Scientific Bulletin of National Mining University*, 1 (163), 60-68. doi.org/10.29202/nvngu/2018-1/10

2. Lv, J., Wang, Z., & Ma, S. (2020). Calculation method and its application for energy consumption of ball mills in ceramic industry based on power feature deployment. *Advances in Applied Ceramics*. doi.org/10.1080/17436753.2020.1732621

3. Deineka, K. Y., & Naumenko, Y. V. (2016). Parametry avtokolyvan vnutrishnokamernoho



zavantazhennia barabannoho mlyna [Self-oscillation parameters of tumbling mill intrachamber fill]. *Vibratsii v tekhnitsi ta tekhnolohiiakh – Vibration in Technics and Technologies*, 3 (83), 29-34 [in Ukrainian].

4. Deineka, K., & Naumenko, Y. (2019). Revealing the effect of decreased energy intensity of grinding in a tumbling mill during self-excitation of auto-oscillating of the intrachamber fill. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1, 1 (97), 6-15. doi.org/10.15587/1729-4061.2019.155461

5. Deineka, K., & Naumenko, Y. (2019). Establishing the effect of a decrease in power intensity of self-oscillation grinding in a tumbling mill with decrease of intrachamber fill. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6 (7(102)), 43-52. doi.org/10.15587/1729-4061.2019.183291

6. Naumenko, Y. V., & Deineka, K. Y. (2017). Vplyv stupenia zapovnennia obertovoi kamery na avtokolyvannia zernystoho zavantazhennia [The influence of the degree of filling of the rotating chamber on the self-oscillating grain fill]. *Vibratsii v tekhnitsi ta tekhnolohiiakh – Vibration in Technics and Technologies*, 4 (87), 65-69 [in Ukrainian].

7. Deineka, K. Y., & Naumenko, Y. V. (2018). Vplyv struktury poldispersnogo zavantazhennia obertovoho barabana na samozbudzhennia avtokolyvan [Influence of structure of polydisperse fill of rotating drum on self-excited self-oscillations]. *Vibratsii v tekhnitsi ta tekhnolohiiakh – Vibration in Technics and Technologies*, 3 (90), 75-82 [in Ukrainian].

8. Deineka, K. Y., & Naumenko, Y. V. (2019). Vplyv drobnoi fraktsii polizernystoho zavantazhennia obertovoho barabana na rozmakh avtokolyvan [Influence of small fraction of polygranular fill of rotating drum on self-oscillation swing]. *Vibratsii v tekhnitsi ta tekhnolohiiakh – Vibration in Technics and Technologies*, 4 (95), 31-37 [in Ukrainian]. [doi:10.37128/2306-8744-2019-4-4](https://doi.org/10.37128/2306-8744-2019-4-4)

9. Gray, J. M. N. T. (2018). Particle segregation in dense granular flows. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 50, 407-433. doi.org/10.1146/annurev-fluid-122316-045201

10. Kasper, J. H., Magnanimo, V., & Jarray, A. (2019). Dynamics of discrete wet granular avalanches in a rotary drum. *Proceedings of the 8th International Conference on Discrete Element Methods (DEM8)*.

11. Marteau, E., & Andrade, J. E. (2018). A model for decoding the life cycle of granular avalanches in a rotating drum. *Acta Geotechnica*, 13, 549-555. doi.org/10.1007/s11440-017-0609-2

12. Balmforth, N. J., & McElwaine, J. N. (2018). From episodic avalanching to continuous flow in a granular drum. *Granular matter*, 20, 52. doi.org/10.1007/s10035-018-0822-1

13. Han, R., Zhang, Y.-F., Li, R., Chen, Q., Feng, J.-Y., & Kong, P. (2020). Avalanching patterns of irregular sand particles in continual discrete flow. *Chinese Physics B*, 29(2), 024501. doi.org/10.1088/1674-1056/ab65b8

14. Yang, H., Li, R., Kong, P., Sun, Q. C., Biggs, M. J., & Zivkovic, V. (2015). Avalanche dynamics of granular materials under the slumping regime in a rotating drum as revealed by speckle visibility spectroscopy. *Physical Review E*, 91, 042206. doi.org/10.1103/PhysRevE.91.042206

15. Zivkovic, V., Yang, H., Zheng, G., & Biggs, M. (2017). Time-resolved granular dynamics of a rotating drum in a slumping regime as revealed by speckle visibility spectroscopy. *EPJ Web of Conferences*, 140, 06020. [doi:10.1051/epiconf/201714006020](https://doi.org/10.1051/epiconf/201714006020)

16. Yang, H., Zhang, B. F., Li, R., Zheng, G., & Zivkovic, V. (2017). Particle dynamics in avalanche flow of irregular sand particles in the slumping regime of a rotating drum. *Powder Technology*, 311, 439-448. doi.org/10.1016/j.powtec.2017.01.064

17. Li, R., Yang, H., Zheng, G., & Sun, Q. C. (2018). Granular avalanches in slumping regime in a 2D rotating drum. *Powder Technology*, 326, 322-326. doi.org/10.1016/j.powtec.2017.12.032

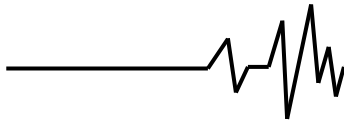
18. Lin, S. H., Yang, H., Li, R., Zheng, G., & Zivkovic, V. (2018). Velocities of irregular particles in a continuously avalanching surface flow within a rotating drum. *Powder Technology*, 338, 376-382. doi.org/10.1016/j.powtec.2018.07.040

19. Mou, S., Yang, H., Li, R., Wang, B., Sun, Q., & Kong, P. (2019). An improved wavelet analytical method for studying particle dynamics of the passive layer within a granular drum. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 1237, 042071. [doi:10.1088/1742-6596/1237/4/042071](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1237/4/042071)

20. Mou, S. H., Yang, H., Li, R., Zhang, G. H., Sun, Q. C., & Kong, P. (2019). Particle dynamics of the passive layer within a granular drum using wavelet analysis. *Powder Technology*, 344, 1-9. doi.org/10.1016/j.powtec.2018.11.108

21. Li, R., Yang, H., Zheng, G., Chen, Q., & Sun, Q. C. (2019). Study of granular state transition in a rotation drum by using speckle visibility spectroscopy and the edit distance with real penalty algorithm. *Powder Technology*, 347, 10-16. doi.org/10.1016/j.powtec.2019.02.043

22. Zhang, Y. J., Yang, H., Li, R., Chen, Q., Sun, Q. C., & Kong, P. (2019). Accumulation phenomenon in continuous flow of irregular particles in rotating drum. *Powder Technology*, 355, 333-339. doi.org/10.1016/j.powtec.2019.07.051



23. Chen, Q., Yang, H., Li, R., Xiu, W. Z., Han, R., Sun, Q. C., & Zivkovic, V. (2019). Compaction and dilatancy of irregular particles avalanche flow in rotating drum operated in slumping regime. *Powder Technology*, 356, 376-382. doi.org/10.1016/j.powtec.2019.09.047

24. Chen, Q., Yang, H., Li, R., Xiu, W. Z., Zheng, G., & Kong, P. (2020). Rearrangement of irregular sand particles in a rotary drum after avalanche flow. *Powder Technology*, 360, 549-554. doi.org/10.1016/j.powtec.2019.10.083

25. Qiang, Z. D., Wang, B. D., Li, R., Chen, Q., Zheng, G., Zivkovic, V., & Yang, H. (2020). The surface structure and the active layer depth of the irregular sand particles in a continuously avalanching flow. *Powder Technology*, 360, 1037-1046. doi.org/10.1016/j.powtec.2019.11.010

26. Li, R., Zheng, G., Chen, Q., Xiu, W. Z., & Yang, H. (2020). Two types of particle dynamics in the passive layer of a granular bed composed of irregular particles. *Powder Technology*, 362, 231-237. doi.org/10.1016/j.powtec.2019.11.081

27. Yang, H., Zhu, Y., Li, R., Sun, Q. (2020). Kinetic granular temperature and its measurement using specklevisibility spectroscopy. *Particuology*, 48, 160-169. [doi:10.1016/j.partic.2018.07.011](https://doi.org/10.1016/j.partic.2018.07.011)

ЗНАЧЕНИЕ СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ БАРАБАНА ПРИ САМОВОЗБУЖДЕНИИ АВТОКОЛЕБАНИЙ С МАКСИМАЛЬНЫМ РАЗМАХОМ ПОЛИЗЕРНИСТОЙ ВНУТРИКАМЕРНОЙ ЗАГРУЗКИ

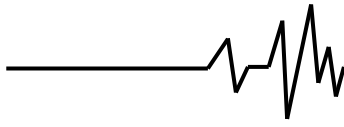
Рассмотрено влияние структуры двухфракционной полизернистой внутрикамерной загрузки на величину скорости вращения барабана при самовозбуждении автоколебаний загрузки с максимальным размахом. Пульсационный режим движения такого загрузки камеры используется при автоколебательном процессе измельчения в барабанной мельнице. В качестве крупной фракции, которая моделировала мелющие тела, были использованы сферические частицы несвязного зернистого материала размером 2.2 мм. В качестве мелкой фракции, которая моделировала частицы измельчаемого материала, был использован цемент. В качестве факторов экспериментальных исследований были приняты: степень заполнения промежутков между частицами крупной фракции в состоянии покоя дисперсными частицами мелкой фракции 0, 25, 50 и 100%, относительный размер частиц крупной фракции в камере барабана 0.519, 0.733, 1.04, 1.47, 2.08, 2.93, 4.15 и 5.87% (радиус камеры барабана 212, 150, 106, 75, 53, 37.5, 26.5 и 18.75 мм), степень заполнения камеры в состоянии покоя 25, 35 и 45%. Был применен метод визуального анализа переходных

процессов автоколебательных режимов поведения загрузки в поперечном сечении камеры вращающегося барабана. Выполнены измерения скорости вращения барабана при самовозбуждении автоколебаний загрузки. Величина размаха автоколебаний оценивалась по приросту разницы максимального и минимального значения дилатансии загрузки за один период пульсаций. Величина относительной скорости вращения барабана при максимальном размахе автоколебаний загрузки изменялась в пределах 0.777-1.4. Зарегистрирован эффект снижения относительной скорости вращения барабана при достижении максимального размаха автоколебаний полизернистой загрузки камеры с усилением связанных свойств заполнения. Установлено снижение относительной скорости вращения с уменьшением относительного размера частиц крупной фракции заполнения и увеличением содержания мелкой фракции в заполнении и повышением степени заполнения камеры загрузкой. Выявлено резкое усиление интенсивности снижения относительной скорости вращения при значении относительного размера крупных частиц, меньшем 0.015.

Ключевые слова: скорость вращения барабана, максимальный размах автоколебаний, двухфракционная полизернистая загрузка камеры, мелкая фракция.

THE DRUM ROTATION VELOCITY VALUE WHEN AUTO-OSCILLATION SELF-EXCITATION WITH MAXIMUM SWING OF A POLYGRANULAR INTRACHAMBER FILL

The influences of the structure of two-fractional polygranular intrachamber fill on the drum rotation velocity value when auto-oscillation self-excitation with maximum swing is considered. The pulsating mode of flow of such intrachamber fill is used in the self-oscillating grinding process in a tumbling mill. Spherical particles of non-coherent granular material of 2.2 mm size were used as a large fraction modeling the grinding bodies. Cement was used as the small fraction modeling the particles of the crushed material. The factors of experimental studies were accepted: the gaps between particles of large fraction degree of filling at rest dispersed particles of small fraction 0, 25, 50 and 100%, the relative size of particles of large fraction in the drum chamber 0.519, 0.733, 1.04, 1.47, 2.08, 2.93, 4.15 and 5.87% (drum chamber radius 212, 150, 106, 75, 53, 37.5, 26.5 and 18.75 mm), the chamber degree of filling at rest 25, 35 and 45%. The method of visual analysis of transient processes of self-oscillating fill flow modes in the cross section of a rotating chamber



was applied. Measurements of the drum rotation velocity during fill self-excited self-oscillations were performed. The magnitude of the self-oscillation swing was estimated by the increase in the difference of the maximum and minimum values of the fill dilatation over one period of pulsating. The magnitude of the relative drum rotation velocity at the maximum range of fill self-oscillation swing varied within 0.777-1.4. The effect of a decrease in the relative drum rotation velocity value, when the maximum polygranular intrachamber fill self-oscillations swing, with enhanced fill coherent properties has been registered. A decrease in the

relative rotational velocity was established with a decrease in the relative particle size of large fill fraction and an increase in the content of small fill fraction and an increase in the chamber degree of filling. A sharp intensification of the decrease in the relative rotation velocity at a value of the relative size of large particles of less than 0.015 is revealed.

Keywords: drum rotation velocity, maximum self-oscillation swing, two-fractional polygranular intrachamber fill, small fraction.

Відомості про авторів

Дейнека Катерина Юрївна – кандидат технічних наук, голова циклової комісії «Галузеве машинобудування» Технічного коледжу Національного університету водного господарства та природокористування (вул. Орлова, 35, м. Рівне, Україна, 33027, e-mail: k.yu.deineka@nuwm.edu.ua).

Науменко Юрій Васильович – доктор технічних наук, професор кафедри будівельних, дорожніх, меліоративних, сільськогосподарських машин і обладнання Національного університету водного господарства та природокористування (вул. Соборна, 11, м. Рівне, Україна, 33028, e-mail: y.v.naumenko@nuwm.edu.ua).

Змієвський Анатолій Миколайович – провідний інженер центру інформаційних технологій Національного університету водного господарства та природокористування (вул. Соборна, 11, м. Рівне, Україна, 33028, e-mail: a.m.zmiievskiy@nuwm.edu.ua).

Дейнека Екатерина Юрьевна – кандидат технических наук, председатель цикловой комиссии «Отраслевое машиностроение» Технического колледжа Национального университета водного хозяйства и природопользования (ул. Орлова, 35, г. Ровно, Украина, 33027, e-mail: k.yu.deineka@nuwm.edu.ua).

Науменко Юрий Васильевич – доктор технических наук, профессор кафедры строительных, дорожных, мелиоративных, сельскохозяйственных машин и оборудования Национального университета водного хозяйства и природопользования (ул. Соборная, 11, г. Ровно, Украина, 33028, e-mail: y.v.naumenko@nuwm.edu.ua).

Змиевский Анатолий Николаевич – ведущий инженер центра информационных технологий Национального университета водного хозяйства и природопользования (ул. Соборная, 11, г. Ровно, Украина, 33028, e-mail: a.m.zmiievskiy@nuwm.edu.ua).

Deineka Kateryna – Candidate of Technical Sciences (Ph.D), Chairman of the Cycle Commission "Industry Engineering" of the Technical College of the National University of Water and Environmental Engineering (St. Orlova, 35, Rivne, Ukraine, 33027, e-mail: k.yu.deineka@nuwm.edu.ua).

Naumenko Yurii – Doctor of Technical Sciences (Dr.Sc), Professor of the Department of construction, road, reclamation, agricultural machines and equipment of the National University of Water and Environmental Engineering (St. Soborna, 11, Rivne, Ukraine, 33018, e-mail: y.v.naumenko@nuwm.edu.ua).

Zmiievskiy Anatolii – Leading Engineer of the Center of Information Technologies of the National University of Water and Environmental Engineering (St. Soborna, 11, Rivne, Ukraine, 33018, e-mail: a.m.zmiievskiy@nuwm.edu.ua).