

**Дейнека К.Ю.**

к.т.н., викладач вищої категорії

*Технічний коледж
Національного
університету водного
господарства
та природокористування*

Науменко Ю.В.

д.т.н., професор

*Національний
університет водного
господарства та
природокористування*

Deineka K.

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

Naumenko Yu.

*The National University of
Water and Environmental
Engineering*

УДК 621.926.5:539.215:531.36

ВПЛИВ СТРУКТУРИ ПОЛІДИСПЕРСНОГО ЗАВАНТАЖЕННЯ ОБЕРТОВОГО БАРАБАНА НА САМОЗБУДЖЕННЯ АВТОКОЛИВАНЬ

Розглянуто вплив на самозбудження автоколиваний фазної структури полізернистого заповнення циліндричної камери барабана, що стаціонарно обертається навколо горизонтальної осі. Застосовано метод візуального аналізу картин руху заповнення у поперечному перерізі камери, швидкість обертання якої повільно змінюється. Встановлено два біфуркаційних значення швидкості обертання із максимальним розмахом автоколиваний. Верхнє біфуркаційне значення є дещо меншим за швидкісну межу переходу циркуляційного режиму руху заповнення в режим пристінкового шару під час прискорення обертання. Нижнє біфуркаційне значення є дещо меншим за швидкісну межу зворотного переходу режимів руху під час сповільнення обертання. Зареєстровано ефект режимного гістерезису усталеного руху зернистого заповнення в стаціонарно – обертовій камері. Ефект полягає у перевищенні швидкості обертання при переході циркуляційного режиму руху в режим пристінкового шару, під час прискорення обертання, над швидкістю при зворотному переході режимів, під час сповільнення обертання. Виявлено, що розбіжність між верхнім та нижнім біфуркаційними значеннями швидкості обертання, прояв ефекту режимного гістерезису та розмах автоколиваний збільшуються зі зниженням фрикційної взаємодії заповнення із поверхнею камери. З'ясовано, що зменшення фрикційної взаємодії зумовлене зниженням вмісту дрібної фази у полізернистому заповненні та ступенем заповнення камери.

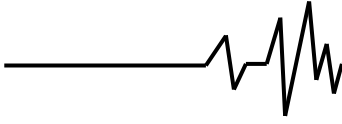
Ключові слова: розмах автоколиваний, полізернисте заповнення, обертовий барабан, біфуркаційна швидкість, режимний гістерезис.

Постановка проблеми. Різноманітна переробка багатьох зернистих матеріалів здійснюється переважно в машинах барабанного типу міжгалузевого призначення. Проте значна частка завантаження камери обертового барабана є малорухливою і не бере участі у циркуляційному робочому процесі. Це зумовлює високу механічну енергоємність такого технологічного обладнання.

Використання ефекту самозбудження автоколиваний, при нестійких режимах руху механічної системи барабанного машинного агрегату [1], дозволяє активізувати циркуляцію внутрішньокамерного завантаження. При цьому

його пасивна частина приводиться у відносний рух, що посилює інтенсивність взаємодії елементів робочого середовища. Таке технологічне застосування базується на традиційних конструктивних рішеннях обладнання із камерою барабана без додаткових виступаючих енергообмінних елементів, що зазнають пришвидшеного абразивного зношування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Паламарчук І.П., Цуркан О.В., Янович В.П., Герасимов О.О., Пентюк Б.М. та Жегалюк О.В. в роботі [2], а також Янович В.П., Драчишин В.І., Паламарчук В.І. та Сизова Т.Ю. у [3],



досліджували експериментальними методами амплітудні та частотні параметри коливних робочих органів технологічного обладнання, що завантажено дисперсними оброблюваними середовищами. Аналогічні методи використали Калетнік Г.М. та Янович В.П. в [4] для з'ясування режимних характеристик таких систем. Однак одержані в цих роботах результати були пов'язані переважно зі стаціонарними лінійними коливаннями заповнених порожнин, що здійснюють малі поступальні переміщення, і не стосуються автоколивних циркуляційних зернистих течій із немалими розмахами в камері барабана.

Seiden G. у роботі [5] виявив, що поведінка зернистого завантаження обертового барабана має яскраво виражений нестійкий характер. Gray J.M.N.T. [6] встановив, що така нестійкість проявляється у виникненні лавиноподібного обрушення вільної поверхні та перерозподілу частинок всередині середовища із утворенням кластерів.

Явище лавиноподібного обрушення поблизу вільної поверхні зернистого завантаження досліджувалось різноманітними експериментальними методами. Amon D.L., Niculescu T. та Utter B.C. у роботі [7] застосували метод візуалізації картин руху у поперечному перерізі для вивчення впливу вертикальної вібрації барабана на втрату стійкості руху та обрушення вільної поверхні заповнення. Метод візуалізації використали Huang X., Вес S. та Colombani J. в [8] для встановлення ефекту зниження стійкості руху при лавиноподібному обрушенні вільної поверхні полізернистого завантаження зі збільшенням вмісту та підвищенням дисперсності дрібної фази. Подібні дослідження виконали Xiao H., McDonald D., Fan Y., Umbanhowar P.B., Ottino J.M. та Lueptow R.M. в [9] для з'ясування впливу ступеня заповнення барабана на втрату стійкості течії при обрушенні. Marteau E. та Andrade J.E. у роботі [10] методом візуалізації встановили визначальний вплив дилатансії зернистого завантаження на втрату стійкості при обрушенні. На підставі отриманих результатів було запропоновано спрощену розмірну пластичну модель для кількісного прогнозування нестійкої поведінки середовища. За допомогою швидкісної відеозйомки Wang N., Xu J., Guo X., Lu H., Zhao H., Li W. та Liu H. в [11] досліджували обрушення вільної поверхні зернистого заповнення бункера при його розвантаженні. Було виявлено близькість профілю швидкості зсувної течії до прогнозу за в'язкою реологічною моделлю.

Обмеженість можливостей візуалізації зумовила широке залучення в останній час методів томографічного аналізу поведінки

зернистого завантаження обертового барабана. Zivkovic V., Yang H., Zheng G. та Biggs M. у роботі [12] вивчали динаміку перехідної течії при обрушенні внаслідок втрати стійкості заповнення барабана із використанням спекл-візуальної спектроскопії. Стійкі та нестійкі стани повільної течії завантаження при обрушенні досліджували Li R., Yang H., Zheng G. та Sun Q.C. в [13] зі застосуванням цифрової обробки зображень, для визначення положення вільної поверхні, та спекл-спектроскопії, для реєстрації динамічних параметрів і псевдотемператури.

Проте отримані результати стосуються течій лише окремих частин монодисперсного зернистого завантаження переважно при повільному обертанні барабана. Натомість більшість оброблюваних в барабанних машинах середовищ є полідисперсними, а швидкість обертання не є малою.

Формулювання мети досліджень.

Передбачалось встановити закономірності самозбудження автоколиваний, що зумовлені багатофазною структурою полізернистого завантаження камери обертового барабана.

Виклад основного матеріалу дослідження.

Візуально було визначено умови самозбудження автоколиваний в камері радіуса R двофазного зернистого матеріалу, що містив частинки сферичної форми з відносним розміром $d_1/(2R)=0,026$ та дисперсні частинки довільної форми зі середнім відносним розміром $d_2/(2R)=0,003$.

Вміст дрібної фази у полізернистому завантаженні оцінювався за значенням ступеня заповнення K_{M3}

$$K_{M3} = \frac{W_{M3}}{K \cdot \pi \cdot R^2 \cdot L}, \quad (1)$$

де W_{M3} – об'єм дрібної фази в завантаженні у спокої.

Дискретні значення ступеня заповнення камери завантаженням k становили 0,175, 0,2, 0,225 та 0,4. Значення ступеня заповнення полідисперсного зернистого завантаження другою дрібною фазою K_{M3} складали 0,05, 0,225 та 0,4. Значення $K_{M3}=0,4$ відповідає максимальному вмісту дрібної фази (100 %), тобто повному заповненню проміжків між сферичними частинками крупної фази при щільній упаковці у стані спокою. Значення $K_{M3}=0,225$ відповідає середньому вмісту такої фази (56,3 %), значення $K_{M3}=0,05$ – малому вмісту (12,5 %).

Виявилось, що автоколивання завантаження в камері обертового барабана із максимальним розмахом виникають при біфуркаційних значеннях відносної швидкості обертання $\psi_{\omega 1}$ та $\psi_{\omega 2}$ ($\psi_{\omega} = \omega / \sqrt{g/R}$, ω – кутова швидкість, g – гравітаційне



прискорення), що пов'язані із відповідними межами взаємного переходу режимів руху завантаження (рис. 1). Верхнє біфуркаційне значення відносної швидкості обертання $\psi_{\omega 1}$ є дещо меншим за швидкісну межу переходу циркуляційного режиму руху завантаження в режим руху у вигляді пристінкового шару під час прискорення обертання барабана. Натомість нижнє біфуркаційне значення відносної швидкості $\psi_{\omega 2}$ є дещо меншим за швидкісну межу переходу режиму руху завантаження у вигляді пристінкового шару в циркуляційний режим руху під час сповільнення обертання. Біфуркаційні значення відносної швидкості обертання $\psi_{\omega 1}$ та $\psi_{\omega 2}$ відповідають режиму завантаження в режимі із повним підкиданням частинок.

Було, також, зареєстровано ефект режимного гістерезису усталеного руху зернистого завантаження в камері стаціонарно обертового барабана, що є пов'язаним із межами взаємного переходу режимів руху. Таке явище є аналогічним встановленому раніше ефекту режимного гістерезису течії рідини в циліндричній камері, що стаціонарно обертається навколо горизонтальної осі [14]. З'ясувалось, що прояв ефекту гістерезису посилюється зі зменшенням фрикційної взаємодії завантаження із поверхнею камери барабана, яке відбувається при зниженні ступеня заповнення камери завантаженням та зниженні вмісту дрібної фази у полідисперсному зернистому завантаженні.

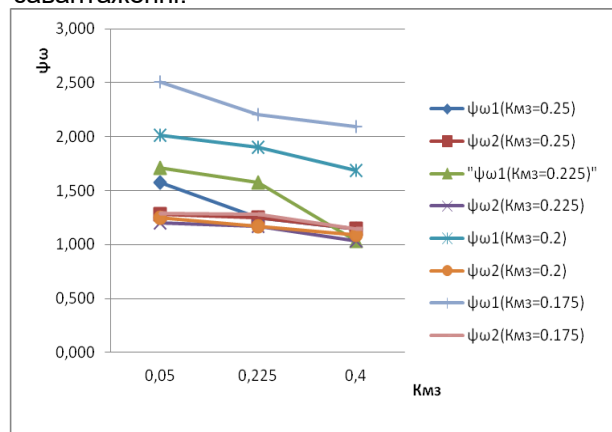
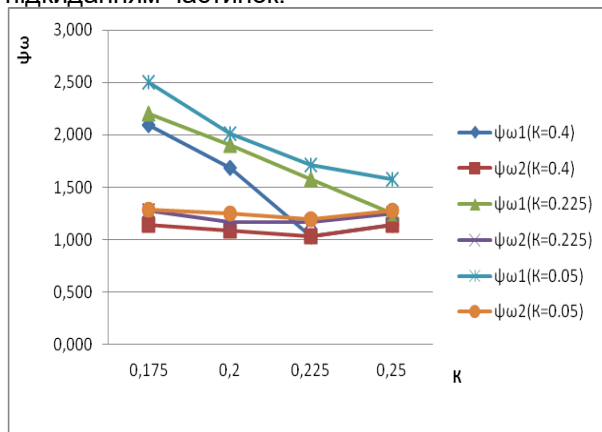


Рис. 1. Залежності біфуркаційних значень відносної швидкості обертання барабана $\psi_{\omega 1}$ та $\psi_{\omega 2}$: а – від ступеня заповнення камери κ при вмісті дрібної фази у полізернистому завантаженні $K_{mz}=0,05, 0,225$ та $0,4$; б – від вмісту дрібної фази K_{mz} при ступені заповнення $\kappa=0,175, 0,2, 0,225$ та $0,25$

Верхнє біфуркаційне значення відносної швидкості обертання $\psi_{\omega 1}$, що змінювалось у межах 1,03...2,5, зростає зі зменшенням фрикційної взаємодії завантаження із

поверхнею камери (рис. 2). Воно збільшується зі зниженням ступеня заповнення камери завантаженням κ (рис. 2 а) та вмісту в завантаженні дрібної фази K_{mz} (рис. 2 б).

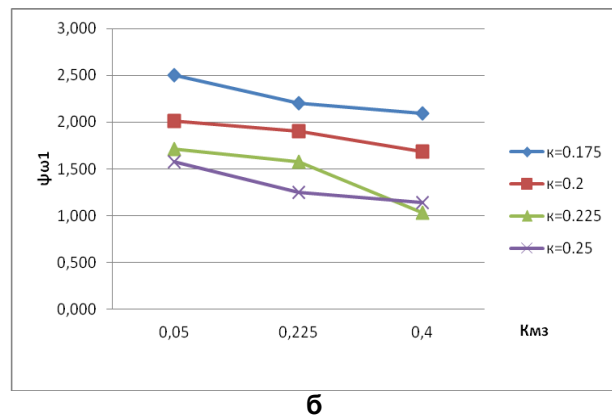
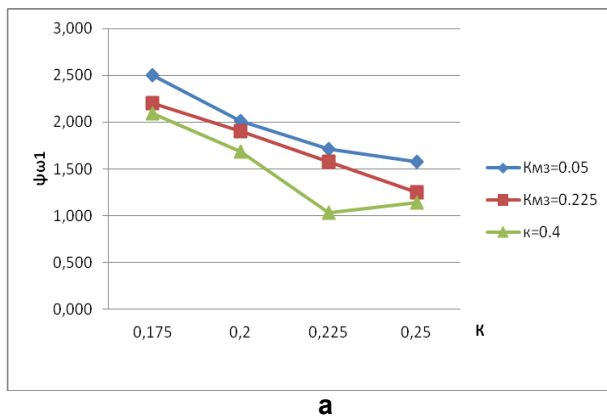
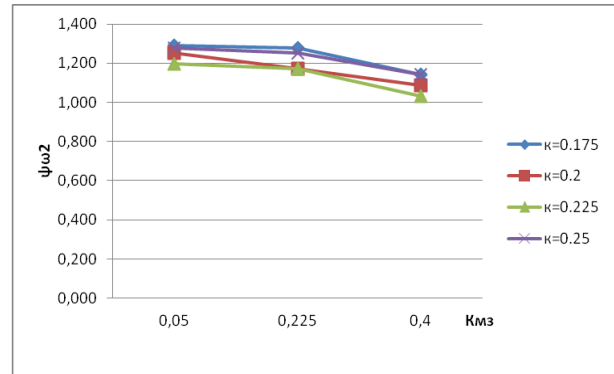
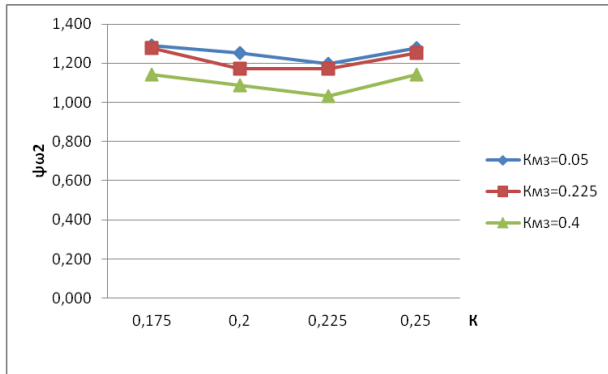


Рис. 2. Залежності верхнього біфуркаційного значення відносної швидкості обертання $\psi_{\omega 1}$: а – від ступеня заповнення камери κ при вмісті дрібної фази у полізернистому завантаженні $K_{mz}=0,05, 0,225$ та $0,4$; б – від вмісту дрібної фази K_{mz} при ступені заповнення $\kappa=0,175, 0,2, 0,225$ та $0,25$



Нижнє біфуркаційне значення відносної швидкості обертання $\psi_{\omega 2}$, що змінювалось у мажах 1,03...1,29, визначається переважно умовами стійкості руху системи і слабо залежить від фрикційної взаємодії

завантаження із поверхнею камери (рис. 3). Воно дещо зростає при зниженні ступеня заповнення камери завантаженням κ (рис. 3 а) та вмісту дрібної фази κ_{M3} (рис. 3 б).



а

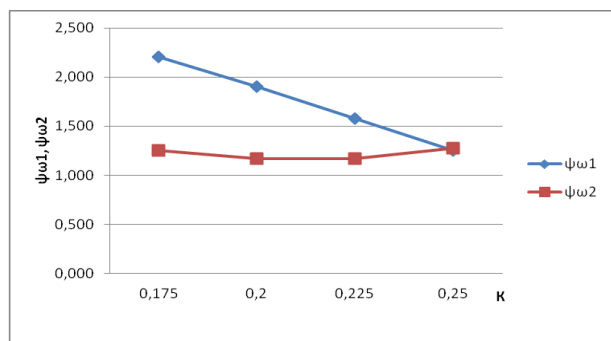
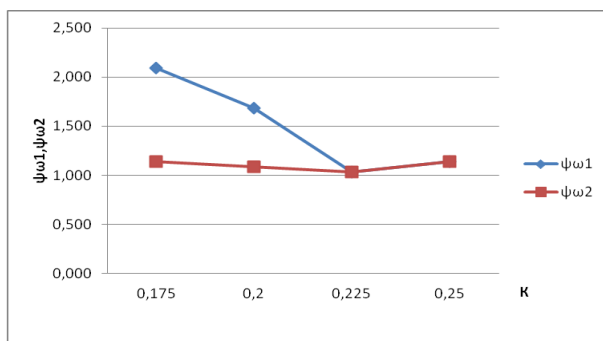
б

Рис. 3. Залежності нижнього біфуркаційного значення відносної швидкості обертання $\psi_{\omega 2}$: а – від ступеня заповнення камери κ при вмісті дрібної фази у полізернистому завантаженні $\kappa_{M3}=0,05, 0,225$ та $0,4$; б – від вмісту дрібної фази κ_{M3} при ступені заповнення $\kappa=0,175, 0,2, 0,225$ та $0,25$

Величина верхнього значення швидкості обертання перевищує величину нижнього біфуркаційного значення – $\psi_{\omega 1} > \psi_{\omega 2}$. Відмінність між цими значеннями, що змінюється у межах $\psi_{\omega 1}/\psi_{\omega 2}=1...1,94$, збільшується із посиленням прояву режимного гістерезису руху завантаження, тобто зі зменшенням фрикційної взаємодії завантаження із поверхнею камери барабана.

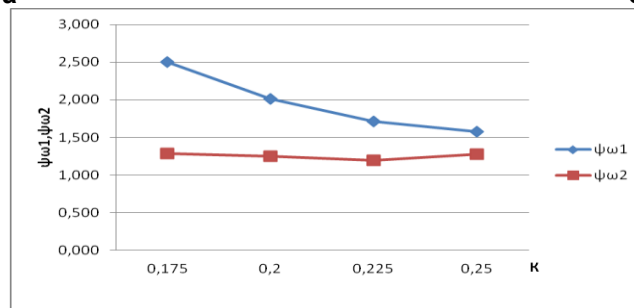
значеннями $\psi_{\omega 1}$ та $\psi_{\omega 2}$ зростає зі зменшенням вмісту дрібної фази у полідисперсному зернистому завантаженні κ_{M3} (рис. 4). Зокрема, для максимального вмісту ($\kappa_{M3}=0,4$) така розбіжність виникає лише при ступені заповнення камери $\kappa < 0,225$ (рис. 4 а), для середнього вмісту ($\kappa_{M3}=0,225$) – лише при $\kappa < 0,25$ (рис. 4 б), а для малого вмісту ($\kappa_{M3}=0,05$) – за будь-якого заповнення камери ($\kappa \leq 0,25$) (рис. 4 в).

Розбіжність між біфуркаційними



а

б



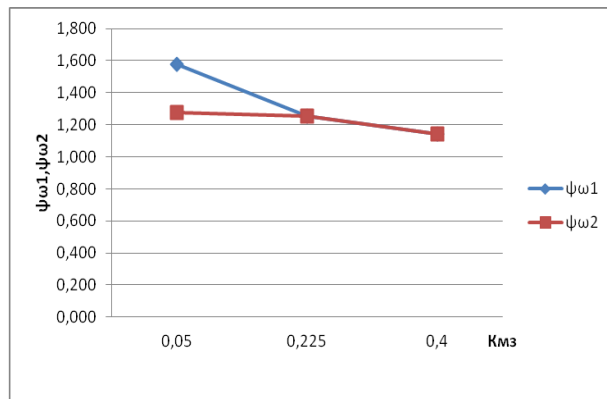
в

Рис. 4. Залежності біфуркаційних значень відносної швидкості обертання $\psi_{\omega 1}$ та $\psi_{\omega 2}$ від ступеня заповнення камери κ при вмісті дрібної фази у полізернистому завантаженні $\kappa_{M3}=0,4$ (а); $\kappa_{M3}=0,225$ (б); $\kappa_{M3}=0,05$ (в)

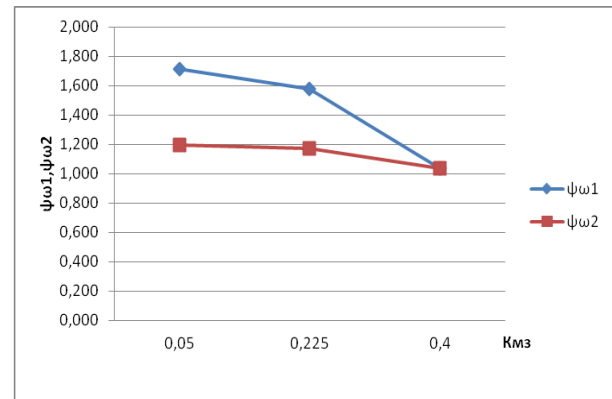


Розбіжність між біфуркаційними значеннями $\psi_{\omega 1}$ та $\psi_{\omega 2}$ зростає, також, зі зменшенням ступеня заповнення камери k (рис. 5). Причому, для ступеня заповнення $k=0,25$ така розбіжність виникає лише при вмісті дрібної фази, що є менший за середній,

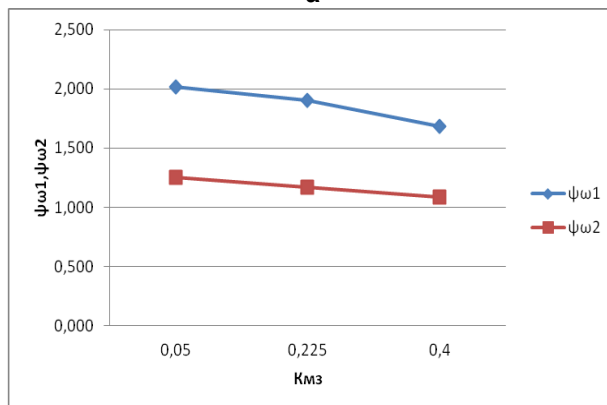
$k_{M3} < 0,225$ (рис. 5а), для $k=0,225$ – лише при вмісті, що є менший за максимальний, $k_{M3} < 0,4$ (рис. 5 б), а для $k \leq 0,2$ ($k=0,2$ та $k=0,175$) – за будь-якого вмісту дрібної фази ($k_{M3} \leq 0,4$) (рис. 5 в та 5 г).



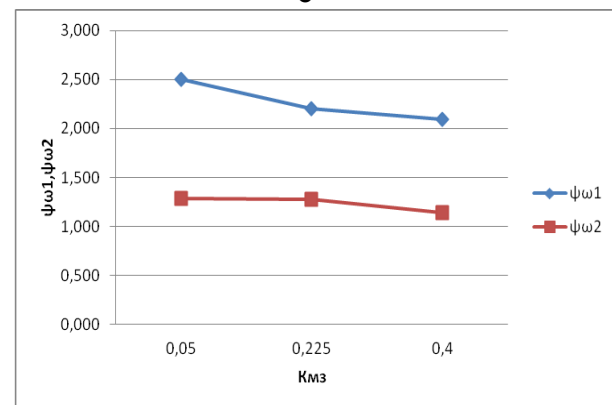
а



б



в



г

Рис. 5. Залежності біфуркаційних значень відносної швидкості обертання $\psi_{\omega 1}$ та $\psi_{\omega 2}$ від вмісту дрібної фази у полізернистому завантаженні k_{M3} при ступені заповнення камери $k=0,25$ (а); $k=0,225$ (б); $k=0,2$ (в); $k=0,175$ (г)

Було також встановлено, що розмах автоколивань зростає зі зменшенням фрикційної взаємодії завантаження із поверхнею камери і досягає максимуму при мінімальному заповненні камери та мінімальному вмісті в ньому дрібної фази. Причому розмах автоколивань для нижнього біфуркаційного значення $\psi_{\omega 2}$ переважно перевищує розмах для верхнього значення $\psi_{\omega 1}$.

Висновки.

1. Встановлено біфуркаційні значення швидкості обертання барабана при самозбудженні автоколивань полізернистого внутрішньокамерного завантаження із максимальним розмахом.

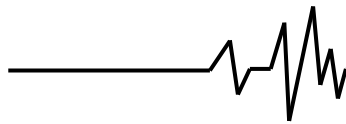
2. Верхнє біфуркаційне значення швидкості обертання є дещо нижчим за швидкісну межу переходу циркуляційного режиму руху завантаження в режим руху у вигляді пристінкового шару під час прискорення обертання барабана. Натомість нижнє біфуркаційне значення є дещо нижчим за

швидкісну межу зворотного переходу режимів руху під час сповільнення обертання.

3. Зареєстровано ефект режимного гістерезису усталеного руху зернистого завантаження в камері стаціонарного обертального барабана, який полягає у перевищенні величини швидкості обертання при переході циркуляційного режиму руху в режим пристінкового шару, під час прискорення обертання, над величиною швидкості при зворотному переході режимів, під час сповільнення обертання.

4. Розбіжність між верхнім та нижнім біфуркаційними значеннями швидкості обертання зростає, прояв ефекту режимного гістерезису посилюється і розмах автоколивань збільшується зі зниженням фрикційної взаємодії завантаження із поверхнею камери барабана.

5. Зменшення фрикційної взаємодії із поверхнею камери зумовлена зниженням вмісту дрібної фази у полідисперсному



зернистому завантаженні та ступеня заповнення камери.

6. Подальшого з'ясування потребує вплив інших геометричних характеристик полізернистого завантаження обертового барабана на кінематичні параметри автоколивань, що самозбуджуються.

Список використаних джерел

1. Deineka K.Yu. The tumbling mill rotation stability / K.Yu. Deineka, Yu.V. Naumenko // *Naukovyi Visnyk Nationalnoho Hirnychoho Universytetu*. – 2018. – № 1(163). – P. 60-68.

2. Паламарчук І.П. Визначення амплітудно-частотних та енергетичних параметрів вібраційної сушарки для сушіння насіння / І.П. Паламарчук, О.В. Цуркан, В.П. Янович, О.О. Герасимов, Б.М. Пентюк, О.В. Жегалюк // *Вібрації в техніці та технологіях*. – 2012. – № 3(67). – С. 121-125.

3. Янович В.П. Експериментальна оцінка амплітудно-частотних характеристик віброконвеєрної технологічної машини / В.П. Янович, В.І. Драчишин, В.І. Паламарчук, Т.Ю. Сизова // *Вібрації в техніці та технологіях*. – 2015. – № 2(78). – С. 145-150.

4. Калетник Г.М. Обґрунтування режимних та конструктивних параметрів граційного млина для виробництва високоактивних преміксів / Г.М. Калетник, В.П. Янович // *Вібрації в техніці та технологіях*. – 2017. – № 1(84). – С. 15-21.

5. Seiden, G. Complexity, segregation, and pattern formation in rotating-drum flows / G. Seiden // *Reviews of Modern Physics*. 2011. – V. 83. – № 4. – P. 1323–1365.

6. Gray J.M.N.T. Particle segregation in dense granular flows / J.M.N.T. Gray // *Annual Review of Fluid Mechanics*. 2018. – V. 50. – P. 407-433.

7. Amon D.L. Grain avalanches in a two-dimensional rotating drum with imposed vertical vibration / D.L. Amon, T. Niculescu, B.C. Utter // *Phys. Rev. E*. 2013. – V. 88. – Is. 1. – N. 012203.

8. Huang, X. Ambivalent role of fine particles on the stability of a humid granular pile in a rotating drum / X. Huang, S. Bec, J. Colombani // *Powder Technology*. 2015. – V. 279. – P. 254-261.

9. Xiao H. Controlling granular segregation using modulated flow / H. Xiao, D. McDonald, Y. Fan, P.B. Umbanhowar, J.M. Ottino, R.M. Lueptow // *Powder Technology*. 2017. – V. 312. – P. 360-368.

10. Marteau E. A model for decoding the life cycle of granular avalanches in a rotating drum / E. Marteau, J.E. Andrade // *Acta Geotechnica*. 2018. – V. 13. – Is. 3. – P. 549-555.

11. Wang N. Velocity profiles of avalanches during hopper discharge / N. Wang, J. Xu,

X. Guo, H. Lu, H. Zhao, W. Li, H. Liu // *Fuel*. 2018. – V. 218. – P. 350-356.

12. Zivkovic V. Time-resolved granular dynamics of a rotating drum in a slumping regime as revealed by speckle visibility spectroscopy / V. Zivkovic, H. Yang, G. Zheng, M. Biggs // *EPJ Web of Conferences*. 2017. – V. 140. – N. 06020.

13. Li R. Granular avalanches in slumping regime in a 2D rotating drum / R. Li, H. Yang, G. Zheng, Q.C. Sun // *Powder Technology*. 2018. – V. 326. – P. 322-326.

14. Naumenko Yu.V. The regime hysteresis of viscous flow with free surface in rotating horizontal cylinder / Yu.V. Naumenko // *International Journal of Fluid Mechanics Research*. – 2004. – Vol. 31. – N. 4. – P. 358-368.

Список джерел у транслітерації

1. Deineka, K.Yu., & Naumenko, Yu.V. (2018). The tumbling mill rotation stability. *Naukovyi Visnyk Nationalnoho Hirnychoho Universytetu – Scientific Bulletin of National Mining University*, 1(163), 60-68.

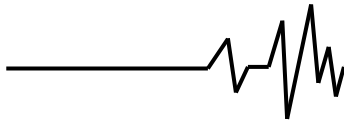
2. Palamarchuk, I.P., Tsurkan, O.V., Yanovych, V.P., Herasymov, O.O., Pentiuk, B.M., & Zhehaliuk, O.V. (2012). Vyznachennia amplitudno-chastotnykh ta enerhetychnykh parametriv vibratsiinoi susharki dlia sushinnia nasinnia [Determination of frequency and power parameters of a vibrating dryer for convective drying pumpkin seeds]. *Vibratsii v tekhnitsi ta tekhnolohiiakh – Vibration in Technics and Technologies*, 3(67), 121-125 [in Ukrainian].

3. Yanovych, V.P., Drachyshyn, V.I., Palamarchuk, V.I., & Sizova, T.Y. (2015). Eksperymentalna otsinka amplitudno-chastotnykh kharakterystyk vibrokonveiernoi tekhnolohichnoi mashyny [Experimental evaluation frequency response vibroconveyor technological mashine]. *Vibratsii v tekhnitsi ta tekhnolohiiakh – Vibration in Technics and Technologies*, 2(78), 145-150 [in Ukrainian].

4. Kaletnik, H.M., & Yanovych, V.P. (2017). Obgruntuvannia rezhymnykh ta konstruktyvnykh parametriv hratsiinoho mlyna dlia vyrobnytstva vysokoaktyvnykh premiksiv [The rational of operation and design parameters vibration mill for the production of highly premixes]. *Vibratsii v tekhnitsi ta tekhnolohiiakh – Vibration in Technics and Technologies*, 1(84), 15-21 [in Ukrainian].

5. Seiden, G. (2011). Complexity, segregation, and pattern formation in rotating-drum flows. *Reviews of Modern Physics*, 83, 4, 1323–1365.

6. Gray, J.M.N.T. (2018). Particle segregation in dense granular flows. *Annual*



Review of Fluid Mechanics, 50, 407–433.

7. Amon, D.L., Niculescu, T., & Utter, B.C. (2013). Grain avalanches in a two-dimensional rotating drum with imposed vertical vibration. *Phys. Rev. E*, 88, 1, 012203.

8. Huang, X., Bec, S., & Colombani, J. (2015). Ambivalent role of fine particles on the stability of a humid granular pile in a rotating drum. *Powder Technology*, 279, 254-261.

9. Xiao, H., McDonald, D., Fan, Y., Umbanhowar, P.B., Ottino, J.M., & Lueptow, R.M. (2017). Controlling granular segregation using modulated flow. *Powder Technology*, 312, 360-368.

10. Marteau, E., & Andrade, J.E. (2018). A model for decoding the life cycle of granular avalanches in a rotating drum. *Acta Geotechnica*, 13, 3, 549-555.

11. Wang, N., Xu, J., Guo, X., Lu, H., Zhao, H., Li, W., & Liu, H. (2018). Velocity profiles of avalanches during hopper discharge. *Fuel*, 218, 350-356.

12. 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.

13. 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.

14. Naumenko, Yu.V. (2004). The regime hysteresis of viscous flow with free surface in rotating horizontal cylinder. *International Journal of Fluid Mechanics Research*, 31, 4, 358-368.

ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРЫ ПОЛИДИСПЕРСНОЙ ЗАГРУЗКИ ВРАЩАЮЩЕГОСЯ БАРАБАНА НА САМОВОЗБУЖДЕНИЕ АВТОКОЛЕБАНИЙ

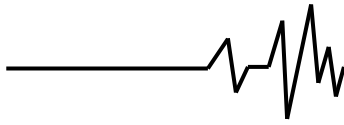
Рассмотрено влияние на самовозбуждение автоколебаний фазной структуры полизернистого заполнения цилиндрической камеры барабана, стационарно вращающегося вокруг горизонтальной оси. Применен метод визуального анализа картин движения заполнения в поперечном сечении камеры, скорость вращения которой медленно изменяется. Установлено два бифуркационных значения скорости вращения с максимальным размахом автоколебаний. Верхнее бифуркационное значение является несколько меньшим скоростной границы перехода циркуляционного режима движения заполнения в режим пристеночного слоя при ускорении вращения. Нижнее бифуркационное значение является несколько меньшим скоростной границы обратного перехода режимов движения во время замедления

вращения. Зарегистрирован эффект режимного гистерезиса установившегося движения зернистого заполнения в стационарно вращающейся камере. Эффект заключается в превышении скорости вращения при переходе циркуляционного режима движения в режим пристеночного слоя, при ускорении вращения, над скоростью при обратном переходе режимов, во время замедления вращения. Выявлено, что расхождение между верхним и нижним бифуркационными значениями скорости вращения, проявление эффекта режимного гистерезиса и размах автоколебаний увеличиваются при снижении фрикционного взаимодействия заполнения с поверхностью камеры. Установлено, что уменьшение фрикционного взаимодействия обусловлено снижением содержания мелкой фазы в полизернистом заполнении и степени заполнения камеры.

Ключевые слова: размах автоколебаний, полизернистое заполнение, вращающийся барабан, бифуркационная скорость, режимный гистерезис.

INFLUENCE OF STRUCTURE OF POLYDISPERSE FILL OF ROTATING DRUM ON SELF-OSCILLATION

The influence on self-oscillations of the phase structure of polygranular fill of a cylindrical chamber of a drum, which rotates stationary around horizontal axis, is considered. The method of visual analysis of fill motion pictures in a cross section of a camera, the rotational speed of which is slowly changing, is applied. Two bifurcation values of a rotational speed with the maximum self-oscillation swing are established. The upper bifurcation value is somewhat less than the speed limit of a transformation of a circulation mode of a fill flow to a bed layer mode during acceleration of rotation. The lower bifurcation value is somewhat less than the speed limit of a reverse transformation of flow modes during deceleration of rotation. The effect of the mode hysteresis of a steady-state granular fill flow in a stationary rotating chamber is registered. The effect is to exceed a rotational speed when a circulation mode transforms to a bed layer mode, during acceleration of rotation, over speed of a reverse transformation of modes, during deceleration of rotation. It was found that the difference between an upper and lower bifurcation values of a rotational speed, the effect of a mode hysteresis, and the self-oscillation swing increases with the relaxation of a frictional interaction of a fill with a chamber surface. It was found that the relaxation of a frictional interaction is caused by the decrease in the content of a fine phase in a



polygranular fill and the chamber degree of filling. polygranular fill, rotating drum, bifurcation speed,
Keywords: *self-oscillation swing, mode hysteresis.*

Відомості про авторів

Дейнека Катерина Юріївна – кандидат технічних наук, викладач вищої категорії Технічного коледжу Національного університету водного господарства та природокористування (вул. Орлова, 35, м. Рівне, Україна, 33027, e-mail: deineka-kateryna@ukr.net).

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: informal9m@i.ua).

Дейнека Катерина Юрьевна – кандидат технических наук, преподаватель высшей категории Технического колледжа Национального университета водного хозяйства и природопользования (ул. Орлова, 35, г. Ровно, Украина, 33027, e-mail: deineka-kateryna@ukr.net).

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: informal9m@i.ua).

Deineka Kateryna – Candidate of Technical Sciences (Ph.D), Lecturer of the highest category of the Technical College of the National University of Water and Environmental Engineering (St. Orlova, 35, Rivne, Ukraine, 33027, e-mail: deineka-kateryna@ukr.net).

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: informal9m@i.ua).