

Серілко Л. С., к.т.н., доцент, Сасюк З. К., к.с.-г.н., доцент, Серілко Д. Л., к.т.н., доцент (Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне, l.s.serilko@nuwm.edu.ua, z.k.sasiuk@nuwm.edu.ua, d.l.serilko@nuwm.edu.ua), **Часов Д. П., к.т.н., доцент** (Дніпровський державний технічний університет)

РОЗРОБКА КОНСТРУКЦІЇ ТА МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ ВИСОКОЕФЕКТИВНОГО ІНЕРЦІЙНОГО КОНВЕЄРА

Авторами проведено дослідження конструкції інерційного конвеєра для транспортування сипких матеріалів. Запропоновано зменшити силу тертя між вантажем і жолобом в моменти часу, коли швидкість жолоба відносно вантажа буде напрямлена в протилежний бік. Розроблено математичну модель руху втулки по поверхні вала під дією двох взаємно перпендикулярних коливань. Для імітації процесу транспортування матеріалів запропонованою конструкцією інерційного конвеєра було розроблено експериментальну установку. Проведено експериментальні дослідження, які підтверджують адекватність математичної моделі руху втулки по поверхні вала під дією двох взаємно перпендикулярних коливань. Відносна похибка отриманих результатів становить 17–21%.

Ключові слова: інерційний конвеєр; коливання; динамічні навантаження; сила тертя; транспортування матеріалу.

Інерційні та вібраційні конвеєри відносяться до хитких конвеєрів, в яких робочий орган здійснює циклічний рух. Вібраційні конвеєри мають кращі техніко-економічні показники, але їх не бажано застосовувати для транспортування деяких вантажів (металева стружка, вологий цукор, бетонна суміш, тощо), оскільки в цьому випадку матеріал транспортується за рахунок мікропідкидань. Особливо виділяються інерційні конвеєри з постійним тиском на дно жолоба, які транспортують вантажі за рахунок бігармонічного характеру руху жолоба. Вони застосовуються для транспортування різних сипких та штучних вантажів, особливо таких, де є небажаним режим роботи з підкиданням частинок матеріалу. Крім того, при роботі інерційного

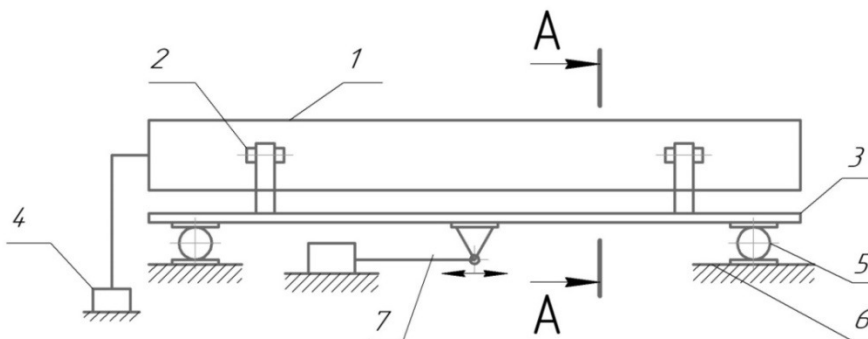
конвеєра відсутній контакт вантажу з деталями, які обертаються, як, наприклад, у гвинтовому конвеєрі.

Аналіз матеріалів. Рух частинок сипкого матеріалу в коливних конвеєрах розглянуто в роботі [1]. Встановлено, що для більшості цих матеріалів можна застосовувати теорію руху одиничних частинок. В роботі [2] наведено результати дослідження руху матеріальної точки по внутрішній поверхні похилого циліндру, який обертається з постійною кутовою швидкістю навколо своєї осі. В результаті чисельного інтегрування диференційних рівнянь руху встановлено, що матеріальна точка здійснює складний рух, коливальний рух по поверхні циліндра та прямолінійний в осьовому напрямку. Амплітуда, частота коливань та осьова швидкість залежать від кутової швидкості обертання циліндра його кута нахилу до горизонту та коефіцієнта тертя між частинкою та поверхнею циліндра. В результаті теоретичних досліджень впливу коливань, перпендикулярних до площини ковзання на коефіцієнт тертя встановлено, що макроскопічний коефіцієнт тертя є функцією лише двох безрозмірних параметрів – безрозмірної швидкості ковзання та безрозмірної амплітуди коливань [3]. Теоретичні дослідження тертя ковзання під впливом плоских коливань, перпендикулярні до напрямку ковзання, наведені в роботі [4]. В цьому випадку встановлено, що жорсткість контакту відіграє центральну роль при малих амплітудах коливання. Проведено дослідження впливу нормальних та бокових коливань на енергетичну ефективність руху тіла по поверхні [5]. Встановлено, що рух при наявності поперечних коливань вимагає більше затрат енергії, ніж рух без коливань. У випадку нормальних коливань ці затрати можуть бути меншими при деяких комбінаціях параметрів системи. В роботі [6] наведено огляд існуючих моделей активного контролю статичного тертя на тертя ковзання у випадку нормальних тангенціальних та поперечних коливань. Дослідженню роботи механічних систем з перетвореним сухим тертям присвячені роботи [7; 8; 9; 10; 11; 12].

Методика досліджень. Метою роботи є розробка конструкції високоефективного інерційного конвеєра та моделювання його роботи. Для досягнення мети авторами розроблено конструкцію інерційного конвеєра для транспортування сипких матеріалів, в якій запропоновано зменшити силу тертя між вантажем і жолобом в моменти часу, коли його швидкість відносно вантажа буде напрямлена в протилежний бік.

Поставлена задача досягається тим, що у інерційному конвеєрі, який складається із жолоба, встановленого з можливістю здійснювати крутильні коливання відносно рами, яка встановлена з можливістю здійснювати зворотньо-поступальний рух по нерухомій основі і приводів для реалізації цих рухів. Привод крутильних коливань працює в постійному режимі з частотою, яка вдвічі менша від частоти повздовжніх коливань.

Оскільки в запропонованій конструкції інерційного конвеєра жолоб може здійснювати неперервні коливальні рухи не тільки в повздовжньому напрямку, але і крутильні коливання навколо осі симетрії жолоба, то це забезпечує рух матеріалу відносно дна жолоба з необхідними амплітудою і частотою. Враховуючи те, що частота цих крутильних коливань вдвічі менша від частоти повздовжніх коливань, то при русі жолоба в напрямку транспортування матеріалу середнє значення сили тертя між жолобом і матеріалом буде більшим від середнього значення сили тертя в дотичному до поверхні жолобі напрямку, що забезпечує рух матеріалу разом із жолобом. При зворотньому русі жолоба середнє значення сили тертя в дотичному до поверхні жолобі напрямку буде більшим від середнього значення сили тертя між жолобом і матеріалом в повздовжньому напрямку. Отже, матеріал буде рухатися по інерції, що забезпечує неперервний рух матеріалу в необхідному напрямку. Через те, що процес крутильних коливань відбувається безперервно, то прискорення елементів конструкції конвеєра, і, як наслідок, динамічні навантаження на них будуть значно меншими, в порівнянні з роботою в режимі періодичного пуску та зупинки.



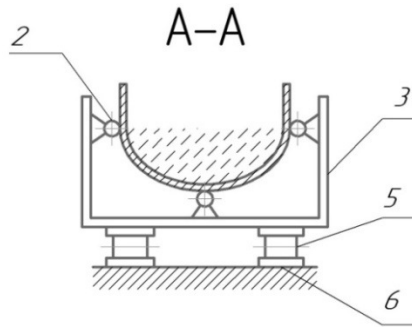


Рис. 1. Схема інерційного конвеєра
(зверху – фронтальний вигляд, знизу – розріз А-А)

Інерційний конвеєр (рис. 1) складається із жолоба 1, який за допомогою роликів 2 встановлений на рамі 3 з можливістю здійснювати крутильні коливання відносно осі симетрії жолоба за допомогою привода 4. Рама 3 встановлена на котках 5 з можливістю рухатися вздовж осі жолоба конвеєра по нерухомій основі 6, за допомогою привода зворотньо-поступального руху 7.

При русі жолоба 1 вперед за рахунок привода 7, вантаж, який знаходиться на жолобі починає рухатися разом із жолобом. Як видно з графіків (рис. 2, рис. 3), кутова швидкість крутильних коливань жолоба 1, за рахунок привода 4 в цей час буде мінімальною, а отже сила тертя в повздовжньому напрямку буде мати максимальне значення, що забезпечує рух матеріалу разом із жолобом. При русі жолоба 1 в зворотньому напрямку, кутова швидкість поперечних коливань жолоба 1 буде максимальною (рис. 2, рис. 3). Внаслідок цього сила тертя в повздовжньому напрямку матиме мінімальне значення, що дозволяє забезпечити рух матеріалу по інерції вздовж поверхні жолоба.

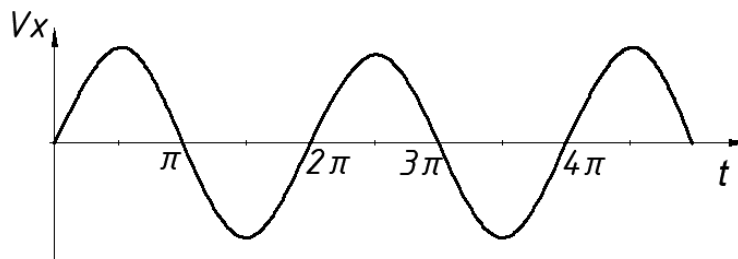


Рис. 2. Графік залежності швидкості повздовжніх коливань жолоба конвеєра від часу

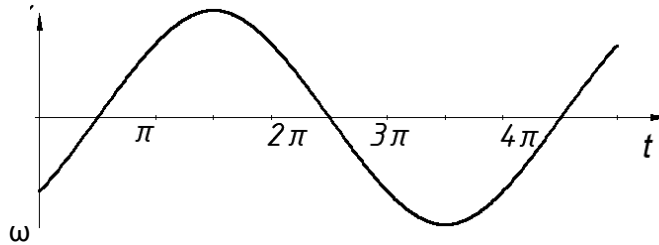


Рис. 3. Графік залежності швидкості кутової швидкості крутильних коливань жолоба конвеєра від часу

Як бачимо, запропонований пристрій дозволяє зменшити динамічні навантаження на елементи інерційного конвеєра та спростити його конструкцію, що дозволить зменшити його вартість та покращити енергетичні показники процесу транспортування матеріалів цим конвеєром.

Дослідження математичної моделі. Для імітації процесу транспортування матеріалів запропонованою конструкцією інерційного конвеєра була розроблена експериментальна установка, схема якої наведена на рисунку 4. Вона складається з втулки 1, вала 2, який може обертатися в підшипниках 3 і 4, до втулки шарнірно кріпиться маятник 5. На кінці вала 2 закріплений маятник 6 який може коливатися у вертикальній площині перпендикулярній до осі вала 2. Маятник 5 може коливатися у вертикальній площині, яка проходить через вісь симетрії вала 2.

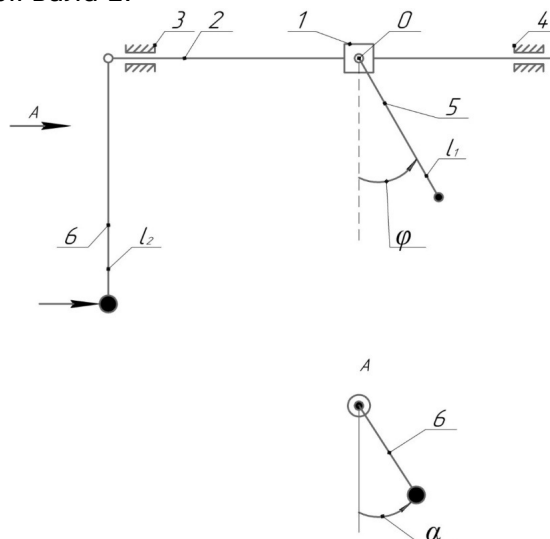


Рис. 4. Схема експериментальної установки, яка імітує роботу інерційного конвеєра

Розглянемо рух втулки 1 масою m_1 по поверхні вала 2. До втулки шарнірно кріпиться маятник 5 довжиною l_1 масою m_1 . На кінці вала 2 закріпленій маятник 6 довжиною l_2 .

Для спрощення задачі розглянемо вільні незатухаючі коливання маятників, тобто знехтуємо тертям в підшипниках 3 і 4 і в цапфі втулки 1. Оскільки довжина $l_2=4 l_1$, отже частота коливань маятника 5 буде вдвічі більшою від частоти коливань маятника 6. Частота коливань маятника 6 буде рівна $\omega = \sqrt{\frac{g}{l_2}}$.

$$\omega = \sqrt{\frac{g}{l_2}}.$$

Тоді рівняння руху маятників матиме вигляд:

$$\begin{aligned} \varphi &= \varphi_0 \cos 2\omega t; \\ \alpha &= \alpha_0 \sin \omega t. \end{aligned} \quad (1)$$

Розрахункова схема руху втулки наведена на рисунку 5.

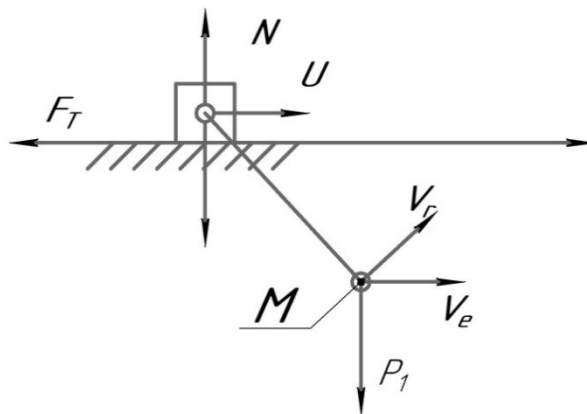


Рис. 5. Розрахункова схема руху втулки

Запишемо теорему про зміну кількості механічної системи в проекції на вісь x .

$$\frac{dK_x}{dt} = \sum F_{KX}^e. \quad (2)$$

$$\sum F_{KX}^e = -F_T. \quad (3)$$

Оскільки вал 2 коливається з кутовою швидкістю $\dot{\alpha}$, то проекція сили тертя на вісь x буде змінюватися по закону:

$$F_T = fN \frac{\dot{x}}{\sqrt{\dot{x}^2 + (r\dot{\alpha})^2}}, \quad (4)$$

де r – радіус вала 2.

Проекція кількості руху механічної системи на вісь x буде рівна:

$$K_x = mu + m_1(V_e + V_r \cos \phi), \quad (5)$$

де $V_e = u$ – переносна швидкість точки М, $V_r = l_1 \dot{\phi}$ – відносна швидкість точки М.

При малих значеннях ϕ , $\cos \phi = 1$, тоді рівняння (2) з врахуванням (5) матиме вигляд:

$$\frac{d}{dt} [u(m + m_1) + m_1 l_1 \dot{\phi}] = -F_T. \quad (6)$$

Оскільки

$$N = (m + m_1)g, \quad \frac{d\dot{u}}{dt} = \ddot{x}, \quad \ddot{\phi} = -4\phi_0 \omega^2 \cos 2\omega t, \quad \dot{\alpha} = \alpha_0 \omega \cos \omega t,$$

то рівняння руху втулки матиме вигляд:

$$\ddot{x} = \frac{m_1 l_1 \phi_0 \omega^2 \cos 2\omega t}{m_1 + m_2} - fg \frac{\dot{x}}{\sqrt{\dot{x}^2 + (2\alpha_0 \omega \cos \omega t)^2}}. \quad (7)$$

Оскільки рівняння (7) є суттєво нелінійним, то його не можна проінтегрувати в квадратурах.

Розв'язуючи це рівняння чисельним методом отримано залежності координати x від часу, які наведено на рисунках 6, 7, 8 при наступних параметрах $l_1 = 0,25$ м, $l_2 = 1$ м, $m = 0,07$ кг, $\omega = 3,16$ рад/с.

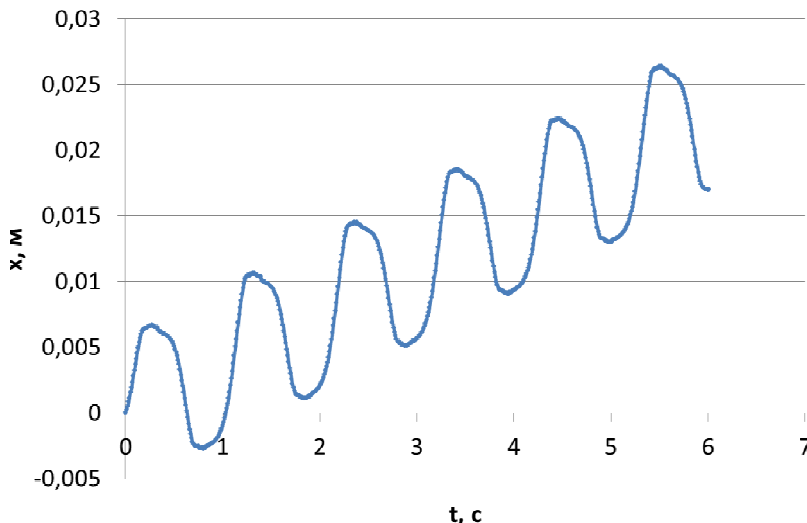


Рис. 6. Залежність переміщення втулки x від часу ($m_1 = 0,2$ кг)

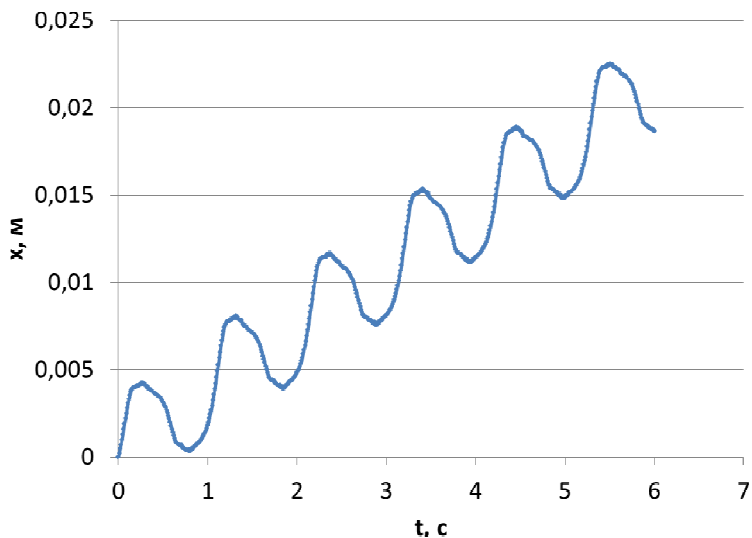


Рис. 7. Залежність переміщення втулки x від часу ($m_1=0,15 \text{ кг}$)

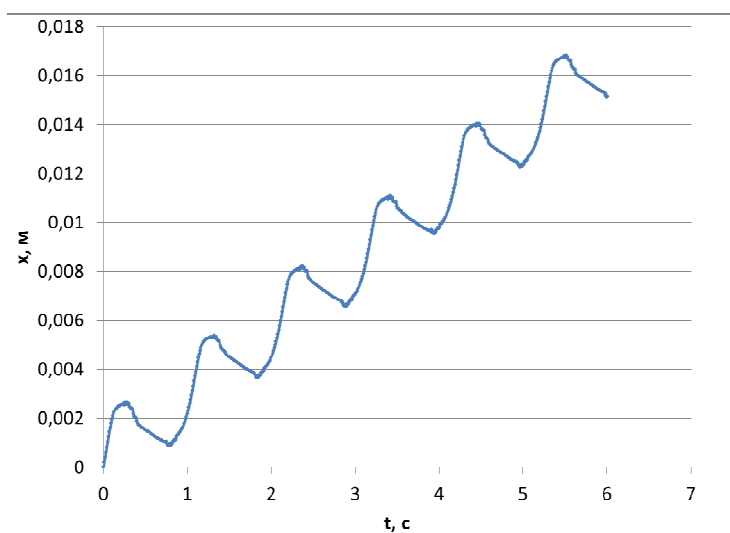


Рис. 8. Залежність переміщення втулки x від часу ($m_1=0,12 \text{ кг}$)

Як видно з наведених графіків, середня швидкість руху втулки суттєво залежить від сили інерції, тобто від маси маятника 5.

В теорії інерційних конвеєрів середня швидкість руху матеріал по жолобу конвеєра є важливою характеристикою, від якої залежить продуктивність цих транспортних засобів.

Експериментальні дослідження. Загальний вигляд експериментальної установки наведено на рисунку 9.

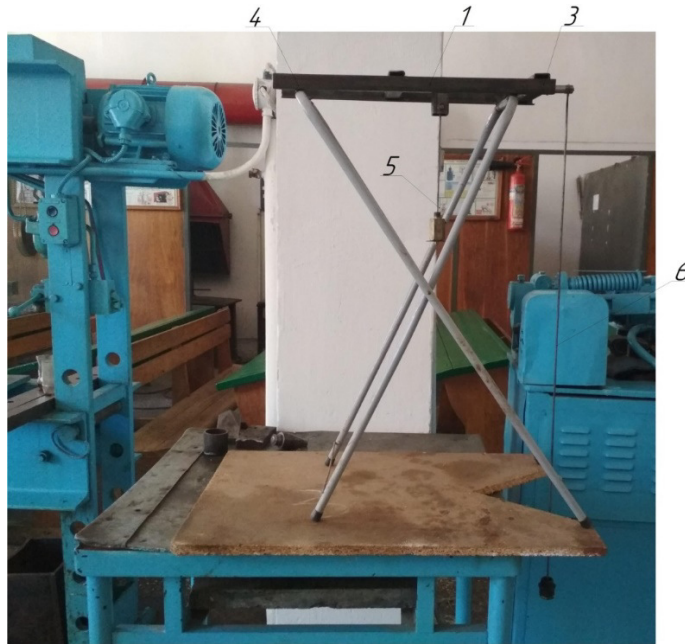


Рис. 9

Послідовність виконання експериментальних досліджень наступна. Відхиляли маятники 5 і 6 на кути $\varphi_0 = 20^\circ, \alpha_0 = 20^\circ$. Маятник 6 відпускали і коли він займав крайнє нижнє положення відпускали маятник 5, це забезпечувало необхідні закони руху маятників. Отже коли, маятник 5 займає крайнє праве положення (рис. 4), то сила інерції, яка діє на втулку буде мати максимальнє значення. В цей час, маятник 6 займає нижнє положення, тобто, кутова швидкість вала 2 буде максимальною, а отже і сила тертя між втулкою і валом буде направлена по дотичній до поверхні вала і не перешкоджатиме руху втулки в осьовому напрямку. Коли маятник 5 займе крайнє лівє положення і сила інерції буде направлена вліво, то маятник 6 буде займати крайнє положення, а отже швидкість вала буде дорівнювати нулю. Сила тертя, в цьому випадку буде направлена в осьовому напрямку і перешкоджатиме руху втулки. За рахунок цього втулка буде мікрострибками рухатися вправо. Вимірюючи пройдений втулкою шлях S , за проміжок часу t можна визначити середню швидкість руху втулки V_c .

$$V_c = S/t. \quad (8)$$

На рисунку 10 наведено графічні залежності швидкості руху втулки від маси маятника 5, отримані теоретичним та експериментальним шляхами.

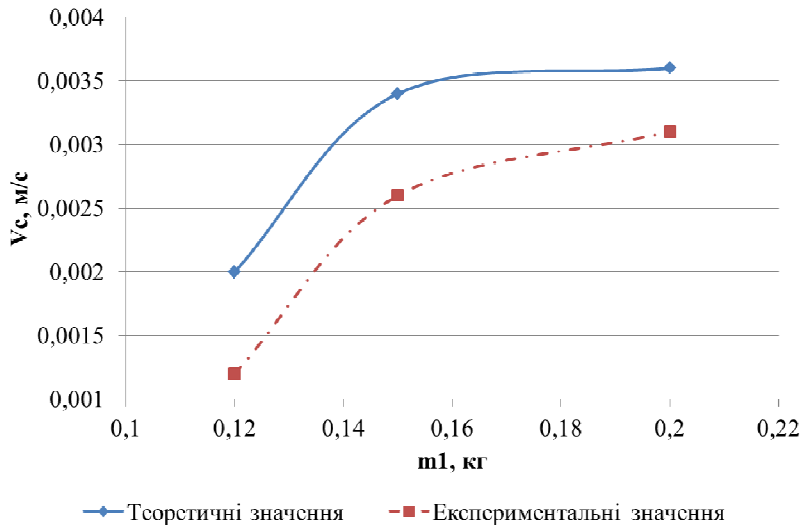


Рис. 10. Графічні залежності швидкості руху втулки від маси маятника 5, отримані теоретичним та експериментальним шляхами

Відносна похибка отриманих результатів становить 17–21%. Розбіжність даних пояснюється тим, що ми не враховували силу тертя в цапфах втулки.

Висновки. 1. Аналіз існуючих літературних джерел показує, що одним із найбільш прогресивних видів транспорту, який забезпечує високу продуктивність та техніко-економічну доцільність при великих вантажопотоках є конвеєри. Інерційні конвеєри, як машини, що відносяться до динамічних коливальних систем, мають високу стабільність в зв'язку з тим, що амплітуда коливання жолоба в процесі роботи є постійною.

2. Запропонована конструкція інерційного конвеєра з постійним тиском сипкого матеріалу на дно жолоба зменшує до мінімуму сили тертя між вантажем і жолобом в моменти часу, коли його швидкість відносно вантажа буде напрямлена в протилежний бік, що призводить до збільшення продуктивності інерційного конвеєра.

3. Розроблена математична модель руху втулки по поверхні валу під дією двох взаємно перпендикулярних коливань. Встановле-

но, що середня швидкість руху втулки змінюється від 0,002 м/с до 0,0036 м/с в залежності від маси маятника.

4. Проведені експериментальні дослідження підтверджують адекватність запропонованої математичної моделі руху втулки по поверхні валу під дією двох взаємно перпендикулярних коливань, яка імітує процес транспортування матеріалів запропованою конструкцією інерційного конвеєра. Відносна похибка отриманих результатів становить 17–21%. Розбіжність даних пояснюється тим, що ми не враховували силу тертя в цапфах втулки.

1. Gaberson H. A. Particle motion on oscillating conveyors-part 2. practical solutions to the equations of motion and the extension of the theory to beds of granular material. *J. Eng. Ind.* 1972. 94, 57–63. doi: 10.1115/1.3428155. 2. Пилипака С. Ф., Грищенко І. Ю., Пилипака Т. С. Дослідження руху частинки по внутрішній поверхні похилого циліндра, що обертається навколо власної осі. *Motrol «Motoryzacjai energetika rolnictwa»*. Lublin, 2010. Т. 12В. С. 113–126. 3. Popov M., Popov V. L., Popov N. V. / Reduction of friction by normal oscillations. I. influence of contact stiffness. *Friction*. 2017. 5, 45–55. doi: 10.1007/s40544-016-0136-4. 4. Benad J., Nakano K., Popov V. L., Popov M. Active control of friction by transverse oscillations. *Friction*. 2018a. 7, 1–12. doi: 10.1007/s40544-018-0202-1. 5. Benad J., Popov M., Nakano K., Popov V. L. Stiff and soft active control of friction by vibrations and their energy efficiency. *Forsch. Ingenieurw.* 2018b. 82, 331–339. doi: 10.1007/s10010-018-0281-1. 6. Popov M. The Influence of Vibration on Friction: A Contact-Mechanical Perspective. *Front. Mech. Eng.* 2020. 6:69. doi: 10.3389/fmech.2020.00069. 7. Рогатинський Р. М., Серілко Л. С., Сасюк З. К., Серілко Д. Л. Дослідження динаміки інерційних конвеєрів. *Вібрації в техніці та технологіях* : всеукраїнський науково-технічний журнал. Вінниця, 2018. Вип. 2(89). С. 41–48. 8. Serilko L. S., Lyashuk O. L., Sasyuk Z. K., Serilko D. L. The research of inertial conveyor transitional chute oscillations influence on its technical and economic indicators. *Resource-saving technologies of raw-material base development in mineralmini* : multi-authored monograph. Petrosani, Romania Universitas Publishing, 2020. P. 293–309. 9. Mitropolsky A. Averaging method in nonlinear mechanics. *International Journal of Non-Linear Mechanics*. March 1967. Vol. 2, Issue 1. P. 69–96. 10. Jan A. Sanders Ferdinand Verhulst James Murdock. Averaging Methods in Nonlinear Dynamical Systems. 2007. Edition 2, 432 p. 11. Grebenikov E. A. Methods of averaging equations in celestial mechanics. *American Institute of Physics*. 1965. Vol. 9, No. 1. Pp. 190–194. 12. Mzaki Dakel, Jean-Jacques Sinou. Stability and nonlinear self-excited friction-induced vibrations for a minimal model subjected to multiple

coalescence patterns. *Jve international ltd. : journal of vibroengineering*. feb 2017. Vol. 19. Pp. 604–628.

REFERENCES:

1. Gaberson H. A. Particle motion on oscillating conveyors-part 2. practical solutions to the equations of motion and the extension of the theory to beds of granular material. *J. Eng. Ind.* 1972. 94, 57–63. doi: 10.1115/1.3428155.
2. Pylypaka S. F., Hryshchenko I. Yu., Pylypaka T. S. Doslidzhennia rukhu chastyntky po vnutrishnii poverkhni pokhyloho tsylindra, shcho obertaietsia navkolo vlasnoi osi. *Motrol «Motoryzaczai energetika rolnictwa»*. Lublin, 2010. T. 12B. S. 113–126.
3. Popov M., Popov V. L., Popov N. V. / Reduction of friction by normal oscillations. I. influence of contact stiffness. *Friction*. 2017. 5, 45–55. doi: 10.1007/s40544-016-0136-4.
4. Benad J., Nakano K., Popov V. L., Popov M. Active control of friction by transverse oscillations. *Friction*. 2018a. 7, 1–12. doi: 10.1007/s40544-018-0202-1.
5. Benad J., Popov M., Nakano K., Popov V. L. Stiff and soft active control of friction by vibrations and their energy efficiency. *Forsch. Ingenieurw.* 2018b. 82, 331–339. doi: 10.1007/s10010-018-0281-1.
6. Popov M. The Influence of Vibration on Friction: A Contact-Mechanical Perspective. *Front. Mech. Eng.* 2020. 6:69. doi: 10.3389/fmech.2020.00069.
7. Rohatynskiy R. M., Serilko L. S., Sasiuk Z. K., Serilko D. L. Doslidzhennia dynamiky inertiinykh konveieriv. *Vibratsii v tekhnitsi ta tekhnolohiiakh : vseukrainskyi naukovo-tekhnichnyi zhurnal*. Vinnytsia, 2018. Vyp. 2(89). S. 41–48.
8. Serilko L. S., Lyashuk O. L., Sasyuk Z. K., Serilko D. L. The research of inertial conveyor transitional chute oscillations influence on its technical and economic indicators. *Resource-saving technologies of raw-material base development in mineralmini : multi-authored monograph*. Petrosani, Romania Universitas Publishing, 2020. P. 293–309.
9. Mitropolsky A. Averaging method in nonlinear mechanics. *International Journal of Non-Linear Mechanics*. March 1967. Vol. 2, Issue 1. P. 69–96.
10. Jan A. Sanders Ferdinand Verhulst James Murdock. Averaging Methods in Nonlinear Dynamical Systems. 2007. Edition 2, 432 p.
11. Grebenikov E. A. Methods of averaging equations in celestial mechanics. *American Institute of Physics*. 1965. Vol. 9, No. 1. Pp. 190–194.
12. Mzaki Dakel, Jean-Jacques Sinou. Stability and nonlinear self-excited friction-induced vibrations for a minimal model subjected to multiple coalescence patterns. *Jve international ltd. : journal of vibroengineering*. feb 2017. Vol. 19. Pp. 604–628.

Serilko L. S., Candidate of Engineering (Ph.D.), Associate Professor, Sasiuk Z. K., Candidate of Agricultural Sciences (Ph.D.), Associate Professor, Serilko D. L., Candidate of Engineering (Ph.D.), Associate Professor (National University of Water and Environmental Engineering, Rivne), **Chasov D. P., Candidate of Engineering (Ph.D.), Associate Professor** (Kamianske, Dnipropetrovsk Region)

DEVELOPMENT OF THE DESIGN AND SIMULATION OF THE WORK OF A PERFORMANCE INERTIAL CONVEYOR

The authors conducted research on the design of an inertial conveyor for transporting loose materials. The task is achieved by the fact that the inertial conveyor has a chute, which carries out torsional oscillations relative to the frame. At the same time, the frame makes a reciprocating movement on a fixed base. The implementation of these movements is carried out with the help of a drive. The torsional oscillation drive operates in constant mode with a frequency that is half the frequency of longitudinal oscillations. It is proposed to reduce the force of friction between the load and the chute at moments when the speed of the chute relative to the load will be directed in the opposite direction. Since the process of torsional oscillations occurs continuously, the acceleration of the conveyor structural elements and the dynamic loads on them will be much smaller, compared to the operation in the mode of periodic start and stop. A mathematical model of the movement of the sleeve along the shaft surface under the action of two mutually perpendicular vibrations has been developed. At the same time, it was established that the average speed of movement of the sleeve depends significantly on the force of inertia, that is, on the mass of the pendulum. An experimental setup was developed to simulate the process of transporting materials with the proposed design of the inertial conveyor. Experimental studies have been carried out, which confirm the adequacy of the mathematical model of the movement of the sleeve on the shaft surface under the action of two mutually perpendicular vibrations. Graphs of the dependence of the speed of movement of the sleeve on the mass of the pendulum, which were obtained by theoretical and experimental methods, were constructed. The relative error of the obtained results is 17–21%.

Keywords: inertial conveyor; oscillations; dynamic loads; friction force; material transportation.