

З.А. Стоцько, д.т.н., проф.
В.Г. Топільницький, к.т.н., доц.
Я.М. Кусий, к.т.н., доц.
Д.П. Ребот, к.т.н., асист.

Національний університет «Львівська політехніка»

Вплив параметрів сепаратора вібраційного типу з горизонтальним нашаруванням сит на інтенсивність процесу сепарування

Для проведення досліджень обрано сепаратор вібраційного типу з горизонтальним нашаруванням сит, який має нескладну конструкцію, просте обслуговування, характеризується незначною чутливістю до параметрів суміші, що піддається сепаруванню, різноманітністю форм коливань, можливістю автоматизованого вивантаження одержаних складових фракцій суміші та автоматизацією процесу сепарування. Насамперед побудована нелінійна математична модель для опису динаміки сепаратора з горизонтальним нашаруванням сит із застосуванням асимптотичних методів нелінійної механіки та рівняння Лагранжа. Модель являє собою систему аналітичних залежностей функцій координат точок системи сит сепаратора від його кінематичних, геометричних та силових параметрів. Ці залежності дали можливість дослідити рівень впливу вказаних параметрів сепаратора на чинники інтенсивності процесу сепарування, зокрема на амплітуду коливного руху горизонтально нашарованих сит. Результати досліджень доцільно застосовувати як на етапах проектування вібраційного сепаратора з горизонтальним нашаруванням сит, так і при виборі параметрів та режимів його експлуатації.

Ключові слова: *нелінійна модель; вібраційний сепаратор; сито; дебалансний привід; пружна підвіска; амплітуда коливань; асимптотичний метод; рівняння Лагранжа; кінематичні, геометричні та силові параметри.*

Постановка проблеми. Технологічний процес сепарування є невід'ємною частиною процесу продукування багатьох виробів (гірничодобувна промисловість, сільське господарство, переробне харчове виробництво, медицина тощо). Якість сепарування, його швидкодія та продуктивність суттєво впливатимуть на функціональність кінцевого виробу. Важливим завданням сьогодення є дослідження та розвиток явища сепарації сумішей різних речовин, а в розрізі цього – винайдення таких сепараторів, які відрізнятимуться високою ефективністю функціонування та універсальністю. Для реалізації цих завдань власне і стоїть питання вивчення динаміки різних видів сепараторів шляхом їх моделювання. Нелінійна, адекватна, параметрична, універсальна модель для опису динаміки сепаратора спростить та пришвидшить процес його розрахунку й розроблення оптимальної конструкції, дозволить вибрати режими роботи сепаратора для забезпечення його максимальної продуктивності.

Аналіз останніх досліджень. Необхідність застосування явища сепарації обумовлює використання широкої низки сепараторів, які можна класифікувати на сепаратори з рухомими та нерухомими ситами [1]. Власне сепаратори першого виду мають суттєво вищу продуктивність і, відповідно, рівень застосування через кращий рівень взаємодії поверхні сита зі сумішшю, яку варто відсепарувати. Рівень раціональності процесу сепарування також зростає із збільшенням кількості просіюючих поверхонь (сит) в конструкції сепаратора [2, 3]. Концентричне [4] розміщення сит у сепараторах барабанного типу, або послідовне розміщення сит округлої чи U-подібної форми перерізу [5] в конструкціях сепараторів уможливають їх ефективне застосування як сепараторів – транспортерів з одночасним забезпеченням явищ сепарування і перенесення відсепарованих фракцій у просторі.

Сепаратори з рухомими ситами є досить складними динамічними системами, ефективне проектування яких та наступна експлуатація можливі лише на основі їх ґрунтового теоретичного дослідження, зокрема із застосуванням математичного моделювання. Існує низка спроб теоретичного опису динаміки сепараторів, проте всі вони мають своє обмежене застосування. Так в [6, 7] теоретично досліджують лише динаміку окремих частин сепаратора, немає досліджень цілого сепаратора як єдиної динамічної системи. В [8] досліджують рух коливних поверхонь лише в лінійній постановці задачі і отримані теоретичні моделі є лінійними, що звужує можливість їх застосування. В [9] динаміка сепараторів досліджується чисельними методами.

Авторами статті, на основі асимптотичних методів нелінійної механіки [10], розроблено низку моделей вібраційних оброблювальних систем [4, 5, 11, 12], в тому числі і сепараторів, у вигляді сукупностей аналітичних виразів, куди входили ключові параметри даних систем – кінематичні, геометричні та силові. Дані моделі є нелінійними та дають можливості описати динамічні процеси, що

$$+ \sin(L_1 \sin klt + L_2 \cos klt)(C_1 b - C_2 q) - d(C_1 + C_2) + (M_1 + M_D)g \times \sin\left(\sqrt{\frac{C}{M_1}}(t-u)\right) du, \\ \varphi(t) = L_1 \sin klt + L_2 \cos klt. \quad (3)$$

У системі виразів (1)–(3) позначено: $x_{02}(t)$, $y_{02}(t)$ – координати центру мас поперечного перерізу сита; $\varphi(t)$ – кут його повороту в коливному русі; M_1 – маса завантаженої системи сит; M_D – маса дебалансу; r – відстань між центром мас дебалансу та його центром обертання (дебалансний ексцентриситет); C – сумарна жорсткість лівої та правої систем пружин підвіски C_1 та C_2 ; ω – кутова швидкість дебалансів; β – полярний кут системи координат, пов'язаний з рухомим перерізом сита відносно його початкового положення; b та q , d та f – відповідно пари горизонтальних та вертикальних координат лівої та правої підвіски сепаратора відносно центру мас перерізу сита; S – відстань між віссю обертання дебалансу та віссю сита сепаратора.

Інтерпретацією мети представлених досліджень є визначення величини та вагомості чинників, які впливають на ефективність функціонування вібраційного сепаратора з горизонтальним нашаруванням сит. При цьому потрібно мати на увазі, що деякі параметри можна нескладно варіювати при застосуванні сепаратора, а деякі – ні. Останні треба чітко визначити та закласти незмінно в конструкцію самого сепаратора ще стадії його проектування. Ключовим чинником швидкості сепарування є амплітуда коливань сит та значення частоти цих коливань. Частота коливного руху сит, через застосування двигунів приводу змінного струму, може бути вхідним параметром.

З практики застосування вібраційних технологічних систем можна зробити висновок, що на амплітуду вібраційного коливного руху такої системи впливатиме: а) величина коливної маси;

б) значення збурюючої сили; в) жорсткість підвіски вібраційної технологічної машини; г) конструктивні особливості цілої системи.

До величини коливної маси, в даному випадку, відносимо суму мас циліндричних сит, сипкої суміші, дебалансів, які кріпляться до рухомої частини рами (чи сит), рухомих елементів рами та частин приводу (дебалансних валів, їх опор, півмуфти пружної частини муфти, кожухів, елементів кріплень, кришок тощо). Її можна нескладно змінювати в процесі експлуатації сепаратора шляхом зміни маси суміші на ситах, маси дебалансів тощо.

Значення збурюючої сили при наявності дебалансного приводу можна змінювати кількістю обертів дебалансів (а це проблематично при застосуванні асинхронних електродвигунів змінного струму з коротко замкнутим ротором). Також, а це є основним, значення збурюючої сили можна нескладно змінювати, змінюючи величину маси неврівноваженої частини дебалансу та величину розташування цієї маси щодо осі обертання дебалансів (дебалансний ексцентриситет).

Жорсткість підвіски можна регулювати шляхом зміни кількості або типу пружин підвіски (конструктивно це можна передбачити). Якщо система має пневматичний привід, то жорсткість підвіски змінюється величиною тиску в пневмобалонах, що стоять замість пружин. А це взагалі нескладно, хоча такий тип підвіски є менш надійним за пружинний.

Конструктивні особливості цілого сепаратора теж впливають на амплітуду коливань сита. До них належать розміри та форма сита, місце розташування приводу та підвіски. Вивчати значення їхнього впливу на амплітуду досить складно (лише шляхом моделювання). Змінювати їх в процесі використання сепаратора досить проблематично. Тому вплив конструктивних параметрів варто враховувати при проектуванні сепаратора.

Для вивчення впливу параметрів сепаратора з горизонтальним нашаруванням сит перелічених вище на інтенсивність сепарування використано модель руху сепаратора та прикладну програму MahtCAD. Засобами цієї програми опрацьована отримана модель та проведені необхідні дослідження (результати наведено нижче). Вхідні дані параметрів сепаратора є такими (табл. 1):

Таблиця 1

Вхідні величини основних параметрів сепаратора

№ з/п	Позначення параметра	Кількісний показник	Назва параметра
1	r	0.04 м	Відстань між центром мас дебалансу та його центром обертання
2	ω	110 c^{-1}	Кутова швидкість дебалансів
3	M_D	4 кг	Маса дебалансу
4	M_1	255 кг	Маса завантаженої системи сит
5	C_1, C_2	10 кН/м	Жорсткість лівої та правої систем пружин підвіски
6	b, q	1,4 м	Пара горизонтальних координат лівої та правої підвіски сепаратора
7	d, f	0.5 м	Пара вертикальних координат лівої та правої підвіски сепаратора
8	S	0.1 м	Відстань між віссю дебалансу та віссю перерізу сита сепаратора
9	β	10°	Полярний кут системи координат, пов'язаний з рухомим перерізом сита відносно його початкового положення

Згідно з вхідними даними, на графіках (рис. 2–8) відтворено вплив параметрів сепаратора вібраційного типу з горизонтальним нашаруванням сит на амплітуду коливного руху його сита як визначального чинника ефективності процесу сепарування. При чому розглянуто вплив вертикальної складової амплітуди як такої, що відповідає за підкидання суміші ситом та за інтенсивність їх взаємодії.

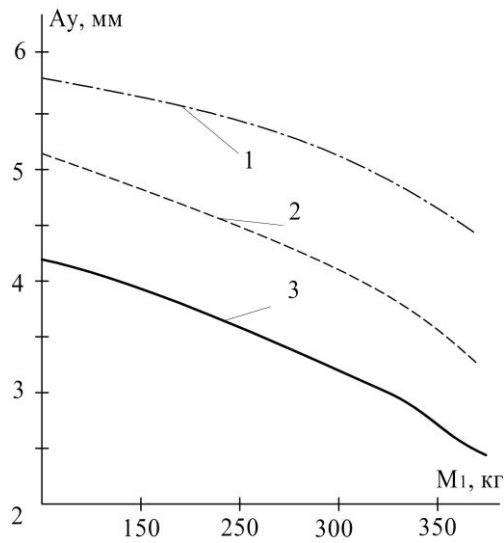


Рис. 2. Залежність вертикальної складової амплітуди коливань вібраційного сепаратора від коливної маси при кутовій швидкості обертання дебалансів $\omega_1 = 100 \text{ с}^{-1}$: 1 – жорсткість підвіски 10 кН/м, 2 – 13 кН/м, 3 – 16 кН/м.

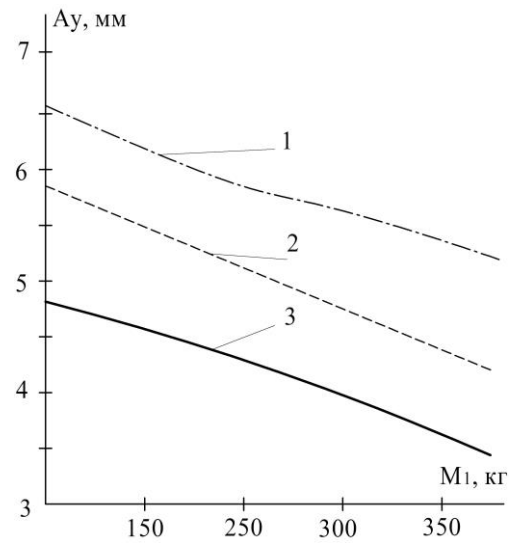


Рис. 3. Залежність вертикальної складової амплітуди коливань вібраційного сепаратора від коливної маси при кутовій швидкості обертання дебалансів $\omega_2 = 50 \text{ с}^{-1}$: 1 – жорсткість підвіски 10 кН/м, 2 – 13 кН/м, 3 – 16 кН/м.

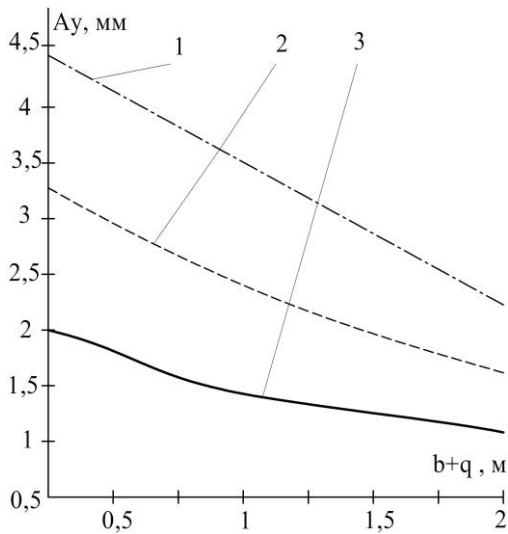


Рис. 4. Залежність амплітуди коливань вібраційного сепаратора від розташування підвіски: 1 – коливна маса 100 кг, 2 – коливна маса 200 кг, 3 – коливна маса 300 кг

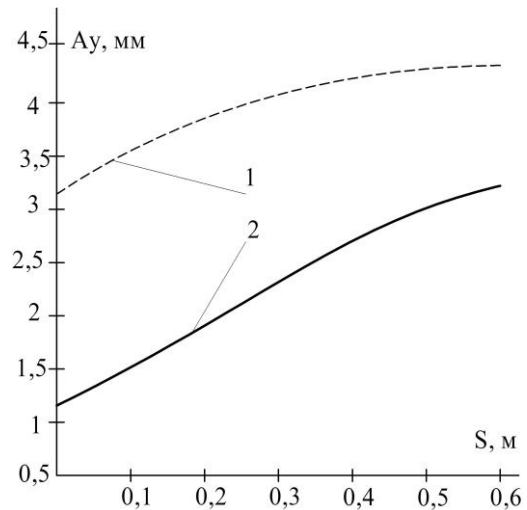


Рис. 5. Залежність амплітуди коливань вібраційного сепаратора від розташування дебалансу: 1 – коливна маса 180 кг, 2 – коливна маса 360 кг

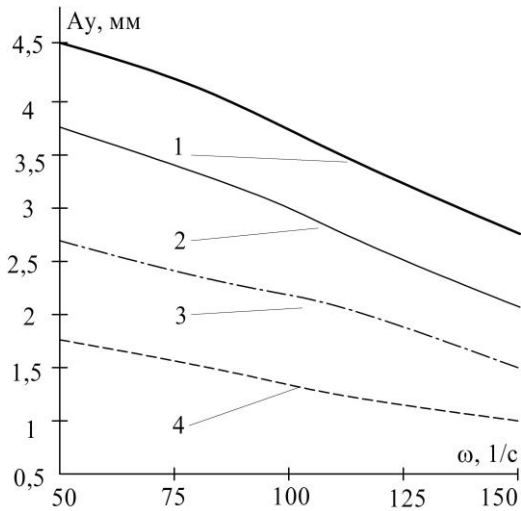


Рис. 6. Залежність вертикальної складової амплітуди коливань вібраційного сепаратора від кутової швидкості обертання дебалансів:

1 – нерівноважена маса дебалансу 4 кг,
2 – 3 кг, 3 – 2 кг, 4 – 1 кг

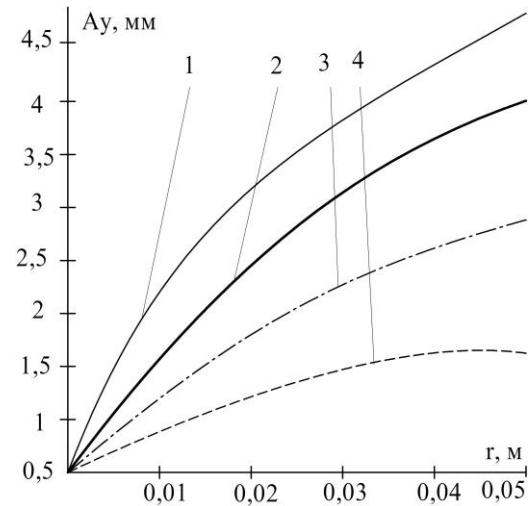


Рис. 7. Залежність вертикальної складової амплітуди коливань вібраційного сепаратора від дебалансного ексцентриситету:

1 – нерівноважена маса дебалансу 4 кг,
2 – 3 кг, 3 – 2 кг, 4 – 1 кг

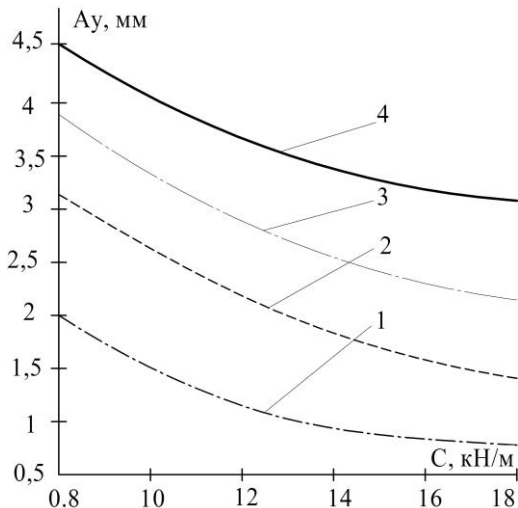


Рис. 8. Залежність вертикальної складової амплітуди коливань вібраційного сепаратора від жорсткості підвіски: 1 – дебалансний ексцентриситет 0,01 м, 2 – 0,02 м, 3 – 0,03 м, 4 – 0,04 м

За допомогою побудованих графічних залежностей, на основі розробленої математичної моделі сепаратора вібраційного типу з горизонтальним нашаруванням сит, можна зробити кількісні висновки щодо впливу його параметрів на інтенсивність сепарування.

Амплітуда коливань сита сепаратора залежить від маси суміші на ситі і зменшується зі збільшенням цієї маси (рис. 2). Залежність є нелінійною. Зокрема, наприклад, при зростанні маси коливної частини сепаратора від 150 до 350 кг (приблизно в 2,33 раза), амплітуда зменшиться в 1,44 раза (від 3,9 мм до 2,7 мм). Тут кутова швидкість обертання дебалансів становить 100 с^{-1} , жорсткість підвіски 16 кН/м. Інші параметри системи є сталими.

Амплітуда коливань сита сепаратора залежить від кутової швидкості обертального руху дебалансів сепаратора (рис. 2, 3). Вона зменшується нелінійно зі збільшенням кутової швидкості. Зокрема (як приклад) при збільшенні кутової швидкості обертального руху дебалансу від 50 с^{-1} до 100 с^{-1} (в 2 рази), амплітуда, відповідно, зменшилася приблизно 1,18 раза (з 4,6 мм до 3,9 мм). В цьому прикладі коливна маса становить 150 кг, жорсткість підвіски 16 кН/м. Інші параметри системи є сталими. Якщо аналізувати графік, зображений на рисунку 6, то при збільшенні кутової швидкості обертального руху дебалансу від 50 с^{-1} до 150 с^{-1} (в 3 рази), амплітуда, відповідно, зменшилася приблизно 1,67 раза (з 4,5 мм до 2,7 мм) при обертальному русі дебалансу масою в 4 кг.

Інтенсивність сепарування є у нелінійній залежності від жорсткості підвіски сепаратора. Вона зменшується зі збільшенням жорсткості (рис. 8). Зокрема, при зростанні жорсткості пружин підвіски сепаратора з 8 до 18 кН/м (в 2,25 раза), амплітуда коливань сита (інтенсивність сепарування) зменшилася в 2,3 раза (з 3,2 до 1,4 мм) при дебалансному ексцентриситеті в 0,02 м. Інші параметри системи є сталими.

Інтенсивність сепарування є у нелінійній залежності від дебалансного ексцентриситету і збільшується із його зростанням (рис. 7). Зокрема за зростання цього показника від 0,01 м до 0,05 м (5 разів), амплітуда коливного руху сита зросла від 1,6 до 4 мм – в 2,5 раза. Тут невірноважена обертова маса дебалансу складає 3 кг. Інші параметри системи є сталі.

Інтенсивність сепарування є у нелінійній залежності від невірноваженої обертової маси дебалансу і збільшується зі зростанням останньої (рис. 6, 7). Зокрема, при зростанні невірноваженої обертової маси дебалансу з 1 кг до 4 кг (в 4 рази), амплітуда коливного руху зросла від 1,55 до 4,2 мм – в 2,7 разів за кутової швидкості обертання дебалансу 75 Гц. Інші параметри системи є сталі.

Тепер проаналізуємо вплив на амплітуду коливань та інтенсивність сепарування геометричних параметрів сепаратора з горизонтальним нашаруванням сит. Інтенсивність сепарування є у нелінійній залежності від розташування пружин підвіски – величини $b+q$ (рис. 4). Для сепаратора з коливною частиною в 200 кг за зростання відстані між пружинами від 0,5 до 2 м (4 рази), амплітуда коливного руху сита зменшилася від 3 до 1,6 мм – 1,9 раза. Звідси робимо висновок, що збільшення відстані між опорами в сепараторі в площині обертового руху дебалансів веде до зменшення інтенсивності сепарування, за незмінних інших параметрів системи.

Інтенсивність сепарування є у нелінійній залежності від розміщення осі обертового руху дебалансу S (рис. 5). Зі зростанням цього показника (при піднятті дебалансної осі конструктивно вгору щодо сита) у сепараторі з коливною масою 360 кг з 0 до 0,6 м, амплітуда коливного руху сепаратора зростає з 1,15 до 3,25 мм, тобто 2,83 раза.

Таким чином, виходячи з проведеного аналізу, такі показники, як дебалансний ексцентриситет, величина невірноваженої обертової маси дебалансу, жорсткість пружин підвіски та кутова швидкість обертання дебалансу визначально впливають на інтенсивність сепарування. Перші два показники (дебалансний ексцентриситет, величина невірноваженої обертової маси дебалансу) можна легко змінювати при експлуатації сепаратора, застосовуючи систему змінного дебалансного приводу. Геометричні параметри сепаратора (розташування пружин підвіски та розміщення осі обертового руху дебалансу) теж впливають на інтенсивність сепарування. Проте це не є експлуатаційні показники при визначенні режимів сепарування. Їх треба враховувати на стадії проектування сепаратора з горизонтальним нашаруванням сит.

Висновки. Ключовим чинником швидкості сепарування є амплітуда коливань сит та значення частоти цих коливань. Виходячи з практичного досвіду експлуатації вібраційних технологічних систем, на амплітуду вібраційного коливного руху системи впливатиме: величина коливної маси; значення збурюючої сили; жорсткість підвіски вібраційної технологічної машини; конструктивні особливості цілої системи.

Згідно з вхідними даними, побудованою моделлю руху сепаратора та прикладним програмним забезпеченням, відтворено вплив параметрів сепаратора вібраційного типу з горизонтальним нашаруванням сит на амплітуду його коливного руху сит як визначального чинника ефективності процесу сепарування.

Отримані результати досліджень можна застосувати при розробленні конструкцій вібраційних сепараторів з горизонтальним нашаруванням сит, а також при виборі ефективних режимів їх функціонування для забезпечення максимальної інтенсивності процесу сепарування.

Список використаної літератури:

1. Johnson E. Low profile vibratory screen separators. Increasing capacity for tough materials / E.Johnson // Powder and bulk engineering. – 2004. – № 12. – P. 17–23.
2. Singh R. Vibratory separators still make the grade for screening dry bulk powders / R.Singh // Eng. Elsevier Advanced Technology: Filtration and separation. – Oxford. – 2004. – Vol. 41 (1). – P. 20–24.
3. Hosking J. The effect of some operating conditions on the efficiency of separation of a vibratory screen / J.Hosking, F.Shrgold. – London : Quarry Managers Journal, 1962. – 140 p.
4. Modeling the dynamics of vibratory separator of the drum type with concentric arrangement of sieves / V.Topilnytskyu, D.Rebot, M.Sokil, O.Velyka and other // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2017. – No. 7 (86). – P. 26–35.
5. Математична модель дослідження динаміки вібраційного сепаратора з послідовним розміщенням сит / З.А. Стоцько, В.Г. Топільницький, Я.М. Кусий, Д.П. Ребот // Вібрації в техніці та технологіях. – 2018. – № 2 (89). – С. 49–57.
6. Lawinska K. Analysis of sieve holes blocking in a vibrating screen and a rotary and drum screen / K.Lawinska, R.Modrzewski // Journal «Fizykochemiczne Problemy Mineralurgii – Physicochemical Problems of Mineral Processing». – 2017. – Vol. 53. – P. 812–828.
7. Zhou N. Dynamic characteristics analysis and optimization for lateral plates of the vibration screen / N. Zhou // Journal of Vibroengineering. – 2015. – Vol. 17 (4). – P. 1593–1604.
8. Субач А.П. Динамика процессов и машин объемной обработки / А.П. Субач. – Рига : Зинатне, 1991. – 240 с.
9. Ivanov K. New Modelling and Calculation Methods for Vibrating Screens and Separators / K.Ivanov, L.Vaisberg // Journal «Lecture Notes in Control and Information Sciences». – 2015. – Vol. 22. – P. 55–61.

10. Митропольский Ю.А. Нелинейная механика. Одночастотные колебания. / Ю.А. Митропольский. – К. : Ин-т математики НАН Украины, 1997. – 385 с.
11. The influence of the loose medium parameters on the process of vibratory separation / Z.Stotsko, B.Sokil, V.Topilnytskyj, D.Rebot // Journal of Manufacturing and Industrial Engineering. – 2013. – Vol 12. – P. 17–19.
12. Investigation of the dynamics of vibratory separator with unbalanced drive / V.G. Topilnytskyu, Z.A. Stotsko, J.M. Kysyj, D.P. Rebot // Вісник НУЛП. Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні та приладобудуванні. – Львів : НУЛП, 2014. – № 786. – С. 53–61.

References:

1. Johnson, E. (2004), «Low profile vibratory screen separators. Increasing capacity for tough materials», *Powder and bulk engineering*, Vol. 12, pp. 17–23.
2. Singh, R. (2004), «Vibratory separators still make the grade for screening dry bulk powders», *Eng. Elsevier Advanced Technology: Filtration and separation*, Vol. 41 (1), Oxford, pp. 20–24.
3. Hosking, J. and Shrgold, F. (1962), «The effect of some operating conditions on the efficiency of separation of a vibratory screen», *Quarry Managers Journal*, London, 140 p.
4. Topilnytskyu, V., Rebot, D., Sokil, M., Velyka, O. and other (2017), «Modeling the dynamics of vibratory separator of the drum type with concentric arrangement of sieves», *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Applied Mechanics*, No. 7 (86), pp. 26–35.
5. Stotsko, Z.A., Topilnytskyi, V.G., Kysyi, Y.M. and Rebot, D.P. (2018), «Matematychna model doslidzhennia dynamiky vibratsiinoho separatora z poslidovnym rozmishchenniam syt», *Vibratsii v tekhnitsi ta tekhnolohiiakh*, No. 2 (89), pp. 49–57.
6. Lawinska, K. and Modrzewski, R. (2017), «Analysis of sieve holes blocking in a vibrating screen and a rotary and drum screen», *Journal «Fizykochemiczne Problemy Mineralurgii – Physicochemical Problems of Mineral Processing»*, Vol. 53, pp. 812–828.
7. Zhou, N. (2015), «Dynamic characteristics analysis and optimization for lateral plates of the vibration screen», *Journal of Vibroengineering*, Vol. 17 (4), pp. 1593–1604.
8. Subach, A.P. (1991), *Dynamica processov i mashyn obyemnoy obroboty*, Zinatne, Riga, 240 p.
9. Ivanov, K. and Vaisberg, L. (2015), «New Modelling and Calculation Methods for Vibrating Screens and Separators», *Journal «Lecture Notes in Control and Information Sciences»*, Vol. 22, pp. 55–61.
10. Mitropolskii, Yu.A. (1997), *Nelineynaya mekhanika. Odnochastotnye koljebaniya*, Ins.matematiki NAN Ukrainy, Kyiv, 385 p.
11. Stotsko, Z., Sokil, B., Topilnytskyj, V. and Rebot, D. (2013), «The influence of the loose medium parameters on the process of vibratory separation», *Journal of Manufacturing and Industrial Engineering*, Vol 12, pp. 17–19.
12. Topilnytskyu, V.G., Stotsko, Z.A., Kysyj, J.M. and Rebot, D.P. (2014), «Investigation of the dynamics of vibratory separator with unbalanced drive», *Journal «Avtomatyzaciya vyrobnychyh procesiv v mashynobydyvanni ta prylyadobydyvanni»*, No. 786, pp. 53–61.

Стоцько Зіновій Антонович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри «Проектування та експлуатація машин» Національного університету «Львівська політехніка».

Наукові інтереси:

- автоматизація технологічних процесів та виробництв;
- вібраційні оброблювальні технології.

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0423-8561>

Тел.: (067) 735–40–37.

E-mail: stotsko@lp.edu.ua.

Топільницький Володимир Григорович – кандидат технічних наук, доцент кафедри «Проектування та експлуатація машин» Національного університету «Львівська політехніка».

Наукові інтереси:

- вібраційні оброблювальні технології;
- динаміка і міцність машин.

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5191-326X>

Кусий Ярослав Маркіянович – кандидат технічних наук, доцент кафедри «Технологія машинобудування» Національного університету «Львівська політехніка».

Наукові інтереси:

- технології покращення якості поверхонь виробів.

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5741-486X>

Ребот Дарія Петрівна – кандидат технічних наук, асистент кафедри «Проектування та експлуатація машин» Національного університету «Львівська політехніка».

Наукові інтереси:

- вібраційні оброблювальні технології.

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3583-0800>

Стаття надійшла до редакції 02.05.2019.