

Фалько О. Л., к.т.н., доцент (Рівненський технічний фаховий коледж Національного університету водного господарства та природокористування, o.l.falko@nuwm.edu.ua)

ТРАНСПОРТУВАННЯ У ВИРОБНИЧИХ УМОВАХ СИПКИХ ХІМІЧНИХ ТА ХАРЧОВИХ МАС НА БІЛЬШИЙ РІВЕНЬ ПО ВИСОТІ

Розглядається перспективна конструкція мобільного вібраційного конвеєра для транспортування сипких хімічних та харчових мас для різних технологічних цілей: на перевантаження, на розфасовку, на завантаження технологічних машин у виробничих лініях хімічних та харчових підприємств. Переміщення сипкого продукту нагору планується по віброуючій східчастій робочій поверхні, яка може мати кут нахилу до горизонту до 65 градусів. Робочий орган являє собою східчасту поверхню, над якою на регульованій відстані розташована пластина. Між східчастою поверхнею і пластиною існує простір для руху сипкого продукту, обгороджений з боків бортами. Все це разом є робочим органом, коливний рух якого здійснюється за допомогою вібратора. Пропонований мобільний вібраційний конвеєр має високу технологічну ефективність, достатню продуктивність, невеликі габаритні розміри і масу, чим обумовлена його мобільність.

Ключові слова: сипкий матеріал; сипучий продукт; вібраційний конвеєр; вібраційне переміщення.

Стан проблеми. На хімічних та харчових виробництвах існує необхідність транспортування сипучих мас (різні порошкові речовини, цукор, крупа, борошно ...) усередині виробничих цехів підприємств на нові місця згідно з технологічним процесом. В багатьох випадках необхідно підняти сипучий продукт на визначену висоту для завантаження зверху в бункерні ємності технологічних машин, або потрібно подати необхідну кількість сипучого продукту на верхній поверх виробничого приміщення. Якщо така операція проводиться рідко, то транспортування здійснюють вручну, оскільки використовувати механізовані засоби є нерентабельним через істотну вартість і низьку мобільність подібного обладнання. У

випадку частоті необхідності цих операцій встановлюється транспортує обладнання, наприклад, стрічково-ковшові транспортери [1]. Оскільки сучасні виробництва мають складні технологічні лінії, які багаторазово перетинаються на різних рівнях по висоті, то встановлене обладнання може ускладнювати прохід персоналу, частково перекривати вузькі проходи у цехах [1; 2, С. 198–208].

Актуальність. Для подібних ситуацій автором розроблений відносно компактний, легкий, економічний вібраційний конвеєр із східчастим робочим органом. Цей вібраційний конвеєр може відносно швидко бути встановленим в потрібному місці та також швидко прибирається або переставляється в інше потрібне місце у виробничому цеху [3; 4]. Конвеєр, запропонований у джерелах [3; 4] дозволяє здійснювати стабільне вібраційне переміщення сипучих продуктів тільки під кутом до 45 градусів до горизонту, що вимагає порівняно більших габаритів робочого органа по довжині й, відповідно, збільшеної маси всієї конструкції, внаслідок чого мобільність конструкції є зниженою.

Метою досліджень є обґрунтування конструкції вдосконаленого вібраційного конвеєра із східчастим робочим органом, що має можливість транспортування сипучих харчових вантажів наверх на платформи або в бункери під кутом до 65° до горизонту, проведення аналітичних досліджень процесу роботи даного пристрою.

Викладення основного матеріалу. Переміщення сипучих мас повинно відбуватися нагору з будь-якого горизонтального майданчика (як самий примітивний варіант) і подаватися в бункер чи іншу приймальну ємність, а можливо у працююче технологічне обладнання. Для створення маловартісного мобільного транспортера було вирішено вдосконалити відому конструкцію із джерела [3; 4]. На рис. 1 зображений нахилений до горизонту (максимально до 65 градусів) робочий орган вібраційного транспортера, його робоча поверхня 1, яка контактує з продуктом, виконана східчастою: складається зі сходинок визначеної довжини і висоти. Над східчастою поверхнею 1, на регульованій відстані розташована плоска поверхня 2. Увесь простір, розташований між поверхнею 1 і поверхнею 2, є простором робочого органу, який по обидва боки обгороджений бортами – 3, які жорстко й герметично з'єднані з поверхнями 1 і 2. Частина 1, 2 і 3 і є робочим органом. Східчаста поверхня 1 складається з набору двох видів поверхонь 4 і 5,

494

розташованих під кутом одна до одної, фактично це сходинок заданої довжини, ширини й висоти. При нахиленому робочому органі під кутом до 65 градусів, поверхні 4 становлять із горизонтом гострий кут, більший кута нахилу до горизонту всього робочого органу (близько 75 градусів до горизонту), а поверхні 5 утворюють тупий кут з горизонтом.

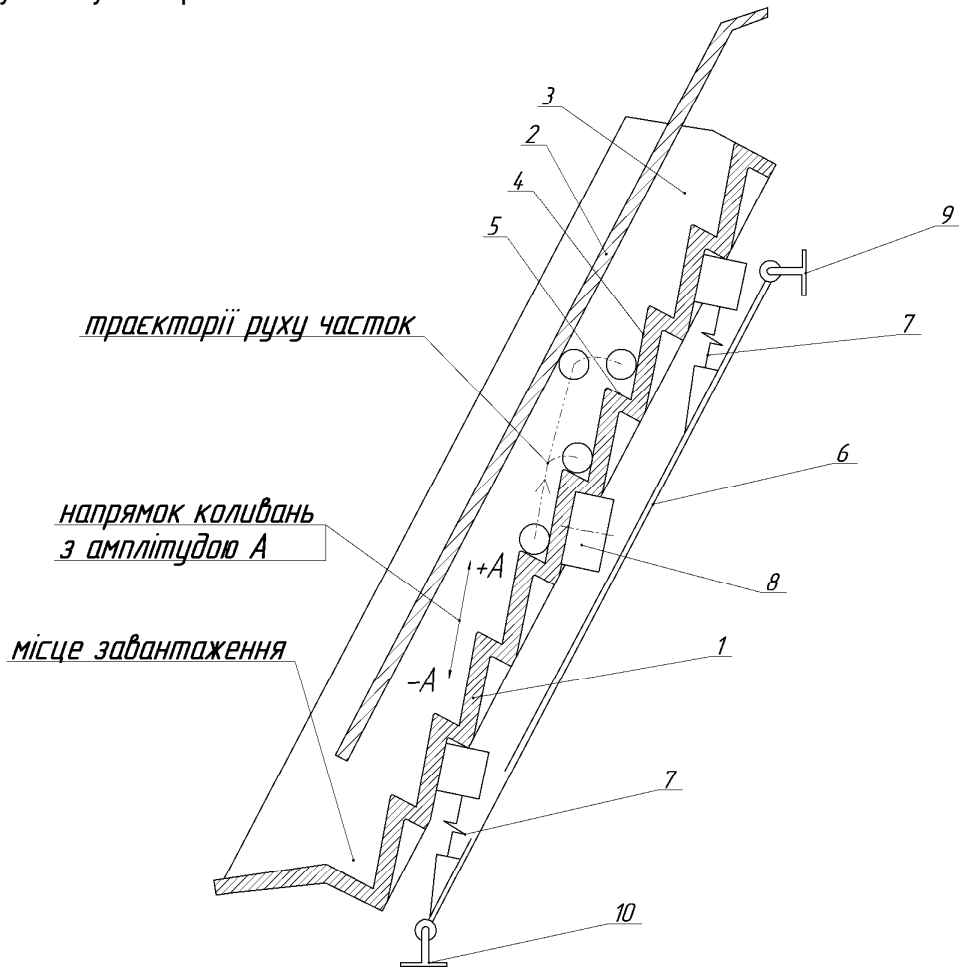


Рис. 1. Конструктивна схема вібраційного конвеєра зі східчастим робочим органом

Зібраний робочий орган кріпиться до рами 6 за допомогою пружних елементів 7, а також до робочого органу кріпиться інерційний вібратор 8. Завдяки цьому робочий орган здатен здійснювати синусоїдальні коливання паралельно своїм поверхням 4. Рама 6 кріпиться за допомогою верхнього кріплення 9 до стабільної поверхні на верхньому поверсі, а за допомогою нижнього

кріплення 10 рама 6 кріпиться до підлоги виробничого приміщення на нижньому рівні.

У якості вібраційного привода може бути використаний будь-який, наприклад, електромагнітний вібратор, але тоді він ще додатково кріпиться до рами 6 (статор вібратора), а не тільки до робочого органу.

Функціонування цієї вібраційної машини відбувається в наступний спосіб. Після подачі напруги вібратор запускається й за кілька секунд виводить робочий орган у режим стабільних гармонійних коливань. Сипучий продукт завантажується на нижню частину східчастої поверхні 1, яка коливається в заданому напрямку паралельно поверхням 4. Завантаження здійснюється вручну, або сипучий продукт подається автоматизовано. Під впливом коливальних рухів від поверхонь 5 маса продукту швидко проштовхується нагору по нахилу робочого органу – ковзанням по поверхням – 4 кожної сходинки та потрапляє на вищий рівень у місце призначення. Поверхні – 5 у кожному періоді коливань обмежують рух сипучого продукту назад донизу і штовхають його нагору уздовж лінії нахилу поверхонь – 4 робочого органа. Далі сипучий продукт потрапляє на наступну, верхню за розташуванням сходинку і цей процес переміщення багаторазово повторюється. Верхня пластина 2 і бічні борти 3 перешкоджають розпиленню чи висипанню сипучого харчового матеріалу із простору робочого органу. Цей режим вібраційного переміщення має місце тільки для дрібнодисперсних продуктів, на зразок борошна, цукрової пудри, манної крупи, різних порошкових матеріалів.

Для сипких продуктів з крупними частками (крупни) процес руху нагору відбувається етапами: 1) ковзання по пластині 4, 2) етап польоту від пластини 4 до верхньої пластини 2, 3) етап польоту після співударяння з пластиною 2 до нижньої східчастої поверхні 1.

У конструкцію також введено пластину (на кресленні не вказана), яка обмежує висоту шару сипкого продукту на вході знизу у простір між поверхнями 1 і 2 робочого органу. Фіксована висота шару продукту дозволяє реалізувати потрібний режим вібраційного переміщення сипкого продукту залежно від типу (гранулометричного складу) харчового сипкого продукту.

Базуючись на практичному досвіді [4; 5], було вирішено прийняти наступні граничні умови для даного процесу вібраційного переміщення:

- кут нахилу поверхонь 4 до горизонту повинен бути на 10–15 градусів меншим прямого кута, але більшим ніж нахил всього робочого органа до горизонту;
- кут спрямованості коливань повинен збігатися з кутом нахилу поверхонь 4 до горизонту для найповнішого використання енергії від коливань для процесу переміщення;
- для запобігання опаданню харчового матеріалу донизу і закупорки прохідного перерізу між поверхнями 1, 2 і 3 робочого органа треба, щоб положення верхньої пластини 2 гарантувало відбиття шару часток сипкого матеріалу на нижню східчасту поверхню 1 у процесі вібраційного переміщення;
- товщина шару харчового матеріалу повинна бути в межах, які дозволять реалізацію пропонованого режиму вібраційного переміщення.

У межах статті при аналітичних дослідженнях розглядаємо тільки режим вібраційного переміщення для дрібнодисперсних продуктів. Для цього прийемо рухому систему координат XOY (рис. 2), що жорстко пов'язана з поверхнею 4, за аналогією із джерелами [5; 6]. У цій системі ми будемо розглядати рух шару часток сипучого продукту.

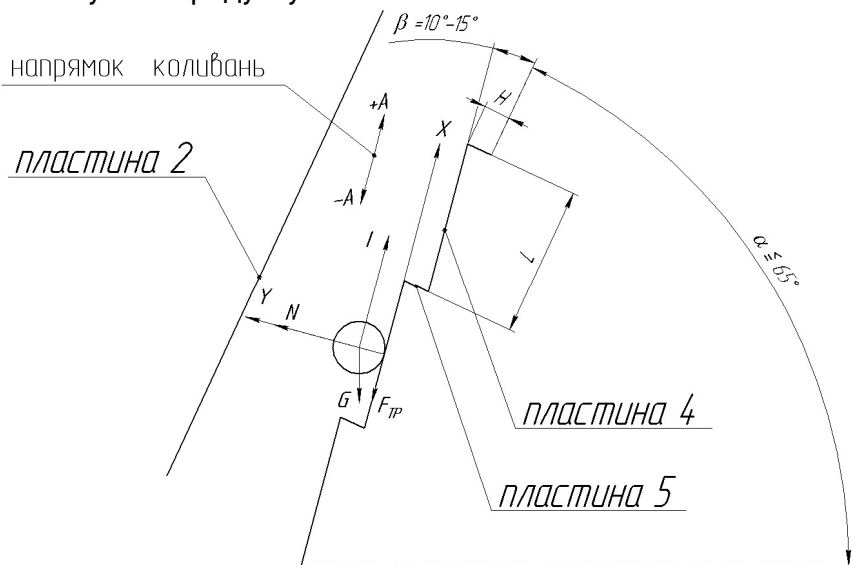


Рис. 2. Схема сил, що діють на частку (шар) сипкого продукту

Приймаємо наступне: шар сипучого продукту є однорідним за гранулометричним складом; точка масою m ідеалізує шар часток сипучого продукту або його частку, що рухається у шарі, де взаємодії

часток взаємно врівноважуються, тому вплив з боку інших часток не враховується. Опір повітряного середовища на шар сипкого продукту вважаємо невідчутним через маленькі відстані на етапах ковзання і при потраплянні на верхню сходинку.

Під час вібраційного переміщення на матеріальну точку масою m діють сили (рис. 2): $G = mg$ (g – прискорення вільного падіння), нормальної реакції N , сили інерції I , сили тертя F_{mp} . Рівняння сил, діючих на матеріальну точку по осях X и Y , будуть виглядати наступним чином:

$$\begin{cases} m\ddot{x} = I - G \cos[90 - (\alpha + \beta)] - F_{mp} = mA\omega^2 \sin \omega t - mg \sin(\alpha + \beta) - F_{mp}, \\ m\ddot{y} = N - G \sin[90 - (\alpha + \beta)] = N - mg \cos(\alpha + \beta), \end{cases} \quad (1)$$

де A – амплітуда коливань робочого органу, m , ω – циклічна частота коливань робочого органу, s^{-1} , α – кут нахилу робочого органу до горизонту, град., β – кут нахилу сходинок (поверхонь 4) до робочого органу (до загального напрямку переміщення сипкого продукту), град., t – поточний час, s .

Переміщення продукту уздовж осі Y на етапі ковзання відсутнє, друге рівняння системи (1) буде дорівнювати нулю. Звідси отримаємо рівняння для нормальної реакції

$$N = mg \cos(\alpha + \beta). \quad (2)$$

Використавши відомий закон для сили тертя, знайдемо її значення F_{mp} , спираючись на попереднє рівняння (2):

$$F_{mp} = \mu N = \mu mg \cos(\alpha + \beta). \quad (3)$$

У перше рівняння системи (1) підставимо значення F_{mp} з виразу (3) і розділивши його на m , після невеликих перетворень одержимо диференціальне рівняння руху частки на етапі ковзання по поверхні:

$$\ddot{x} = A\omega^2 \sin \omega t - g \sin(\alpha + \beta) - \mu g \cos(\alpha + \beta). \quad (4)$$

Інтегруючи рівняння (4) по dt , одержимо закон зміни швидкості матеріальної точки на етапі ковзання:

$$\dot{x} = -A\omega[\cos \omega t - \cos \omega t_0] - g(t - t_0)[\sin(\alpha + \beta) + \mu \cos(\alpha + \beta)] + \dot{x}_0, \quad (5)$$

де \dot{x}_0 – початкова швидкість руху на кожному етапі ковзання уздовж осі X .

Приймаємо $\dot{x}_0 = 0$, оскільки рух сипучого вантажу починається в кожному періоді коливань від упорної поверхні 5 сходинки нагору уздовж пластини 4 ковзанням по ній. Цьому руху протидіють сила гравітації та сила тертя. Тому після кожного етапу переміщення рух шару сипучої маси уздовж осі X зупиняється перед наступним етапом ковзання.

Інтегруючи (5) по dt , одержимо закон зміни координати матеріальної точки на етапі ковзання:

$$x = -A[\sin \omega t - \sin \omega t_0] + A\omega \cos \omega t_0(t - t_0) - 0,5g(t - t_0)^2 [\sin(\alpha + \beta) + \mu \cos(\alpha + \beta)] + \dot{x}_0(t - t_0) + x_0, \quad (6)$$

де x_0 – початкова координата руху на кожному етапі ковзання уздовж осі X . Виходячи з описаного вище режиму руху із зупинками в кожному періоді коливань, приймемо $x_0 = 0$ у момент t_0 .

Дорівнявши рівняння (4) до нуля, визначимо момент початку ковзання $t = t_0$:

$$\varphi_0 = \omega t_0 = \arcsin \left[\frac{g}{A\omega^2} (\sin(\alpha + \beta) + \mu g \cos(\alpha + \beta)) \right]. \quad (7)$$

Процес початку руху та зсипання часток на верхню по розташуванню сходинку починається з моменту $\varphi_0 = \omega t_0$ (фазовий кут початку етапу ковзання) до моменту $\varphi_1 = \omega t_1$ (фазовий кут кінця етапу ковзання) у кожному періоді коливань. Після зсипання частки в кожному періоді коливань, рухаються в сипучому шарі до краю наступної сходинки.

Для визначення моменту зупинки ковзання $\varphi_1 = \omega t_1$ необхідно дорівняти до нуля швидкість ковзання – рівняння (5) при $\dot{x} = 0$ при $\varphi = \varphi_1 = \omega t_1$:

$$-A\omega[\cos \alpha t_1 - \cos \alpha t_0] - g(t_1 - t_0)[\sin(\alpha + \beta) + \mu \cos(\alpha + \beta)] = 0. \quad (8)$$

Розв'язати таке рівняння (8) найкраще методом послідовних наближень, наприклад, у Mathcad.

Визначивши значення фазових кутів φ_0 з виразу (7) і φ_1 з виразу (8), підставимо їх у формулу (6) і з урахуванням початкових нульових значень одержимо аналітичний вираз для визначення переміщення матеріальної точки, що ідеалізує шар сипучого вантажу, за етап ковзання:

$$x_{01} = -A[\sin \omega t_1 - \sin \omega t_0] + A\omega \cos \omega t_0(t_1 - t_0) - 0,5g(t_1 - t_0)^2 [\sin(\alpha + \beta) + \mu \cos(\alpha + \beta)]. \quad (9)$$

Етап ковзання може тривати впродовж декількох (n) періодів коливань. Середню швидкість вібраційного переміщення сипучого вантажу уздовж осі X (\bar{v}_x) знайдемо як відношення переміщення за етап ковзання x_{01} до часу цілої кількості (n) періодів коливань робочого органу, протягом яких відбувається цей етап ковзання. Час одного періоду коливань: $T = 2\pi/\omega$. Тоді:

$$\begin{aligned} \bar{v}_x = \frac{x_{01}}{nT} = & -\frac{A\omega}{2\pi n} [\sin \omega t_1 - \sin \omega t_0] + \frac{A\omega^2}{2\pi n} \cos \omega t_0 (t_1 - t_0) - \\ & - \frac{\omega g}{4\pi n} (t_1 - t_0)^2 [\sin(\alpha + \beta) + \mu \cos(\alpha + \beta)]. \end{aligned} \quad (10)$$

Однак результуючий вектор вібраційного переміщення вантажу спрямований не уздовж осі X по сходинках, а уздовж нахилу робочого органу до горизонту, тобто відрізняється від напрямку ковзання на кут β (рис. 2). У такому випадку середня швидкість вібраційного переміщення складе:

$$\begin{aligned} \bar{v} = \bar{v}_x \cos \beta = \frac{x_{01}}{Tn} \cos \beta = & -\frac{A\omega}{2\pi n} [\sin \omega t_1 - \sin \omega t_0] \cos \beta + \\ & + \frac{A\omega^2}{2\pi n} \cos \omega t_0 (t_1 - t_0) \cos \beta - \\ & - \frac{\omega g}{4\pi n} (t_1 - t_0)^2 [\sin(\alpha + \beta) + \mu \cos(\alpha + \beta)] \cos \beta. \end{aligned} \quad (11)$$

Тоді теоретичну продуктивність можна визначити за аналогією [5] з урахуванням значення, розрахованого по формулі (11):

$$Q = 3600 \bar{v} S \psi \alpha_s, \quad (12)$$

де S – площа поперечного перерізу робочого органу, м; ψ – коефіцієнт заповнення поперечного перерізу робочого органу вібраційного конвеєра, для робочого органу відкритого типу із прямокутним перетином, розташованим під значним кутом нахилу, прийmemo $\psi \approx 0,8$ [5]; α_s – уведений автором коефіцієнт, що враховує вплив значення кута нахилу робочого органу до горизонту на зниження висоти шару продукту. Цей коефіцієнт залежить від згаданого кута нахилу та від виду продукту (геометричної форми і розмірів одиниць сипучого продукту). Він повинен визначатися експериментально при різних кутах для різних продуктів.

Слід зазначити, що описаний процес (режим) вібраційного переміщення буде достатньо стабільним лише за умови, що за весь час етапу ковзання $t_1 - t_0$ частина шару матеріалу встигне зміститися

у від'ємну сторону по осі Y уздовж пластини 5 від краю нижньої по розташуванню сходинок на висоту наступної сходинок H (рис. 2) на вищу по розташуванню сходинок. В іншому випадку стабільного руху нагору не буде, виникне процес розпилення дрібнодисперсного сипкого продукту.

Для перевірки цієї умови визначимо час Δt падіння матеріальної точки на відстань $-H$ уздовж осі Y на наступну верхню сходинок з краю попередньої нижньої. За законами кінематики:

$$-H = -\frac{g * \Delta t^2}{2} \sin \beta \Rightarrow \Delta t = \sqrt{\frac{2H}{g * \sin \beta}}. \quad (13)$$

Повинна виконуватися умова $\Delta t \leq t_1 - t_0$. Для дотримання цієї умови слід підібрати потрібну величину H – висоти сходинок й визначити відповідну їй довжину L . З рисунка 2 очевидно:

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{H}{L} \Rightarrow L = \frac{H}{\operatorname{tg} \beta}, \quad H = L * \operatorname{tg} \beta. \quad (14)$$

Тоді формула (13) набуде нового виду:

$$\Delta t = \sqrt{\frac{2L}{g * \cos \beta}} \leq t_1 - t_0 \quad (15)$$

Висновки

- Обґрунтовані принцип дії й конструкція нового вібраційного конвеєра. Пропонована східчаста конструкція робочого органу дозволяє транспортувати вантажі під кутами до 65 градусів нахилу до горизонту (замість 8 градусів нахилу для плоскої робочої поверхні [6]).
- Завдяки введенню в конструкцію пластини 2 стало можливим збільшити кут напрямку транспортування матеріалу нагору, що надає можливість зменшити довжину й, відповідно, масу конструкції попереднього мобільного конвеєра [4].
- Проведено базові аналітичні дослідження процесу вібраційного переміщення сипучого матеріалу усередині східчастого робочого органу.

1. Дробот В. І. Довідник з технології хлібопекарського виробництва. К. : Руслана, 1998. 415 с. 2. Тertiшній О. О., Опарін С. О., Рябік П. В. Механічні процеси в хімічній технології. Дніпропетровськ : ДВНЗ УДХТУ, 2015. 215 с. 3. Віброконвеєр із східчастим робочим органом: пат. на корисну модель 86034 / Шамота В. П., Тимохін Ю. В., Фалько О. Л. Бюл. № 23. Заявл. 10.12.2013. 4. Шамота В. П., Фалько А-др Л., Фалько А. Л. Віброконвейер для транспортовки вверх сыпучих пищевых продуктов. *Вестник Донского*

государственного аграрного университета. *Сельскохозяйственные науки*. 2017. № 2 (24.1). Ч. 1. С. 128–134. **5.** Повідайло В. Вібраційні процеси та обладнання : навч. посіб. Львів : Вид-во НУ «Львівська політехніка», 2004. 246 с. **6.** Вибрации в технике : справочник / под ред. И. И. Блехмана. М. : Изд-во «Машиностроение», 1979. Т. 2. 351 с.

REFERENCES:

1. Drobot V. I. Dovidnyk z tekhnolohii khlibopekarskoho vyrobnytstva. K. : Ruslana, 1998. 415 s. **2.** Tertyshnyi O. O., Oparin S. O., Riabik P. V. Mekhanichni protsesy v khimichnii tekhnolohii. Dnipropetrovsk : DVNZ UDKhTU, 2015. 215 s. **3.** Vibrokonveier iz skhidchastym robochym orhanom: pat. na korysnu model 86034 / Shamota V. P., Tymokhin Yu. V., Falko O. L. Biul. № 23. Zaiavl. 10.12.2013. **4.** Shamota V. P., Falko A-dr L., Falko A. L. Vibrokonveyer dlya transportirovki vverh syipuchih pischevyih produktov. *Vestnik donskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. Selskohozyaystvennyie nauki*. 2017. № 2 (24.1). CH. 1. S. 128–134. **5.** Povidailo V. Vibratsiini protsesy ta obladnannia : navch. posib. Lviv : Vyd-vo NU «Lvivska politekhnika», 2004. 246 s. **6.** Vibratsii v tehnikе : spravochnik / pod red. I. I. Blehmana. M. : Izd-vo «Mashinostroenie», 1979. T. 2. 351 s.

Falko O. L., Candidate of Engineering (Ph.D.), Associate Professor
(Technical College of the National University of Water and
Environmental Engineering, Rivne, o.l.falko@nuwm.edu.ua)

TRANSPORTATION IN PRODUCTION CONDITIONS OF FLUID CHEMICAL AND FOOD MASSES TO A GREATER HEIGHT LEVEL

A promising design of a mobile vibrating conveyor for upward transportation of powdery and fine-grained loose masses is considered. Use is possible at chemical and food industries for various technological purposes: for overloading, for packaging, for loading technological machines in the production lines of chemical and food enterprises. The upward movement of the loose product is planned along a vibrating stepped work surface, which consists of successively located steps of a certain height and length. The vibrating working surface can have a total angle of inclination to the horizon of up to 65 degrees – this is the largest angle of the direction of transporting the product upwards. The working body is a stepped surface above which a plate is located at an adjustable distance. Between the stepped surface and the upper plate there is a space for the movement of the loose product, enclosed on the sides by the sides.

All this together is a working body, the oscillating movement of which is carried out with the help of a vibrator.

The functioning of this vibration machine is as follows. After the voltage is applied, the vibrator starts and in a few seconds brings the working body into the mode of stable harmonic oscillations. The bulk product is loaded onto the lower part of the stepped surface, which oscillates in a given direction parallel to the sloping surfaces of the steps. Under the influence of oscillating movements from the resistance surfaces of the steps, the mass of the product is quickly pushed up the slope of the working body – sliding on the gentle surfaces of each step and falls on a higher level to the destination. The contact surfaces of the steps in each period of oscillation limit the movement of the bulk product back down and push it up along the direction of oscillation of the working body. Next, the bulk product gets to the next, upper step and this process of movement is repeated many times. The upper plate and the sides of the working body prevent spraying or spilling of loose food material from the space of the working body.

This mode of vibration movement takes place only for finely dispersed products, such as flour, powdered sugar, semolina, various powder materials. For loose products with large particles (for example, various cereals), the process of upward movement occurs in stages: 1) the stage of sliding on the smooth surfaces of the steps; 2) flight stage from the stepped surface to the upper plate; 3) the stage of flight after co-impact with the upper plate to the stepped surface.

It is also necessary to insert a plate into the structure to limit the height of the layer of loose product at the entrance from below into the space of the working body. The fixed height of the product layer allows you to implement the desired mode of vibration movement of the loose product depending on the type (granulometric composition) of the food loose product.

Within the scope of this article, only the mode of vibration movement for finely dispersed products was considered during analytical studies. In the article, basic analytical studies of the process of vibrational movement of bulk material inside the stepped working body are carried out. The proposed mobile vibrating conveyor will have high technological efficiency, sufficient productivity, small dimensions and mass, which will determine its mobility.

Keywords: loose material; loose product; vibrating conveyor; vibrating movement.