

УДК 621.929:664

© І.М. Дударев, д.т.н.

Луцький національний технічний університет

А.В. Хомич, к.т.н., Т.П. Герасимик-Чернова, Ю.А. Хомич

Любешівський технічний коледж Луцького НТУ

ОБҐРУНТУВАННЯ КОНСТРУКЦІЇ ТА ПАРАМЕТРІВ СПІРАЛЬНОГО ЗМІШУВАЧА СИПКИХ МАТЕРІАЛІВ

У статті запропоновано конструкцію спірального змішувача сипких матеріалів. Теоретичним шляхом одержані залежності для обґрунтування конструктивних параметрів спірального змішувача сипких матеріалів.

СПІРАЛЬНИЙ ЗМІШУВАЧ, КОНСТРУКЦІЯ, ПАРАМЕТРИ, СИПКИЙ МАТЕРІАЛ, РІВНЯННЯ РУХУ.

Постановка проблеми. У харчових і переробних виробництвах, кормовиробництві та інших галузях промисловості для приготування сумішей з сипких матеріалів широко використовуються різноманітні конструкції змішувачів [1 – 4]: відцентрові, барабанні, вібраційні, черв'ячно-лопатеві, лопатеві відцентрової дії, гравітаційні, пневматичні, шнекові, стрічкові та інші. Визначальним фактором при виборі конструкції змішувача є фізико-механічні властивості компонентів суміші. Оскільки при виробництві окремих сумішей не допускається пошкодження компонентів суміші, тому для змішування цих компонентів не рекомендується використовувати змішувачі з активними робочими органами. Також важливе значення має обґрунтування раціонального режиму роботи змішувача, за якого було б забезпечено необхідний ступінь змішування компонентів без їх пошкодження. Враховуючи зазначене, дослідження спрямовані на обґрунтування нових конструкцій змішувачів сипких матеріалів та їх параметрів є актуальними.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Серед відомих конструкцій змішувачів сипких матеріалів найменші пошкодження компонентів суміші спричиняють барабанні змішувачі, а найменші витрати енергії – гравітаційні без рухомих робочих органів [1 – 4]. Разом з тим, барабанні змішувачі мають низький ступінь заповнення об'єму робочої камери, а у гравітаційних – ускладнено їх регулювання при використанні компонентів з різними фізико-механічними властивостями. Перспективним є обґрунтування конструкції та параметрів спірального змішувача сипких матеріалів, що має переваги барабанних і гравітаційних змішувачів, але разом з тим позбавлений їх

недоліків. Таким чином, необхідно проводити подальші дослідження у цьому напрямку.

Мета дослідження – обґрунтувати конструкцію та параметри спірального змішувача сипких матеріалів.

Результати дослідження. На основі аналізу конструкцій змішувачів пропонується спіральний змішувач сипких матеріалів (рис.1) [5], що містить диск, до якого прикріплено спіральний матеріалопровід. Спіральний матеріалопровід скручено по спіралі та утворено днищем і двома бортами. Вздовж спірального матеріалопроводу до днища прикріплені за принципом “один через один” об’єднувачі потоків та розділювачі потоку. Кожний об’єднувач потоків утворений двома спрямовувачами і має “V”-подібну форму зі звуженням від бортів до поздовжньої осі днища у напрямку руху потоку компонентів суміші сипких матеріалів днищем. Зі сторони, де спрямовувачі об’єднувача потоків наближаються один до одного, передбачено зазор між ними для проходження об’єданого потоку компонентів суміші сипких матеріалів. Протилежними сторонами спрямовувачі об’єднувачів потоків кріпляться до бортів. Кожний розділювач потоку утворений двома спрямовувачами і має “V”-подібну форму з розширенням від поздовжньої осі днища до бортів у напрямку руху потоку компонентів суміші сипких матеріалів днищем. Зі сторони, де спрямовувачі розділювача потоку наближаються до бортів, передбачено зазори між ними і бортами для проходження розділених потоків компонентів суміші. На першому витку спірального матеріалопроводу вздовж днища передбачено перегородку, яка розділяє простір між бортами на дві секції для різних компонентів суміші. Для завантаження компонентів передбачено дві завантажувальні горловини. Під спіральним матеріалопроводом встановлено ємкість для збору готової суміші сипких матеріалів.

Під час обертання диска з спіральним матеріалопроводом компоненти суміші сипких матеріалів подаються завантажувачами в необхідній пропорції у відповідні завантажувальні горловини. З горловин компоненти суміші спрямовуються у секції першого витка спірального матеріалопроводу. Внаслідок обертання спірального матеріалопроводу компоненти суміші окремими потоками починають рухатися його днищем між перегородкою і бортами в межах секцій. У кінці перегородки окремі потоки компонентів суміші надходять у простір між спрямовувачами першого по ходу сипких матеріалів об’єднувача потоків. У результаті об’єднання потоків компоненти змішуються і утворюють один потік суміші, який проходить через зазор між спрямовувачами об’єднувача потоків та спрямовується днищем до першого по ходу суміші розділювача потоку.

Спрямовувачами розділювача потоку потік суміші розділяється на два потоки суміші, які рухаються вздовж спрямовувачів розділювача потоку та, пройшовши зазор між спрямовувачами розділювача потоку і бортами, надходять двома окремими потоками суміші у простір між спрямовувачами наступного по ходу суміші об'єднувача потоків. Далі процес об'єднування в один потік суміші компонентів та її розділення на два потоки проходить аналогічно до описаного вище і багаторазово. Внаслідок багаторазового об'єднування потоків і їх розділення відбувається змішування сипких матеріалів, чим досягається необхідний ступінь змішування компонентів суміші. З кінця останнього витка спірального матеріалопроводу готова суміш компонентів спрямовується у ємкість для збору готової суміші.

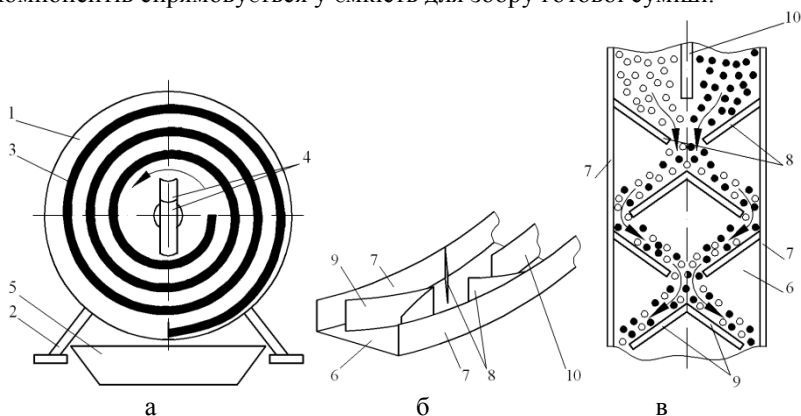


Рис. 1 – Спіральний змішувач сипких матеріалів (1 – диск; 2 – рама; 3 – спіральний матеріалопровід; 4 – завантажувальні горловини; 5 – ємкість для готової суміші; 6 – днище; 7 – борт; 8 – об'єднувач потоків; 9 – розділювач потоку; 10 – перегородка): а – спіральний змішувач; б – фрагмент спірального матеріалопроводу; в – фрагмент розгортки спірального матеріалопроводу

Для обґрунтування конструктивних параметрів змішувача розглянемо процес переміщення частинки сипкого матеріалу вздовж спрямовувача об'єднувача потоку спірального змішувача. Виділимо на спіральному матеріалопроводі фрагмент, що у площині рис. 2, а позначено *ab*, в межах якого розміщено спрямовувачі об'єднувача потоку. Нехай днищем вздовж спрямовувача переміщується частинка сипкого матеріалу, яку прийемо за матеріалу точку *A* (рис. 3). Враховуючи, що довжина розглядуваного фрагмента *ab* є значно

меншою за довжину витка спірального матеріалопроводу, оскільки $\angle\beta \ll 2\pi$ (де β – кут, що визначає довжину фрагмента спірального матеріалопроводу, на якому розміщено спрямовувач, град.), тоді для спрощення подальших розрахунків замінимо спіральний фрагмент ab матеріалопроводу на фрагмент a_1b_1 циліндричної форми (у площині рис. 2, а – фрагмент буде у вигляді дуги кола з радіусом $r = (r_a + r_b)/2$ (де r_a, r_b – відповідно менший та більший радіуси спірального фрагмента матеріалопроводу, м)). Така заміна можлива, оскільки зміна радіуса спірального фрагмента в межах кута $\beta \in$ незначною, тобто $r_a \approx r_b$. Для подальшого спрощення розрахунків замінимо фрагмент матеріалопроводу циліндричної форми на площину, тобто у площині рис. 2, б – замінимо дугу a_1b_1 хордою a_1b_1 , різниця між довжиною розглядуваних хорди та дуги є незначною, оскільки $\angle\beta \ll 2\pi$. Таким чином, у результаті зазначених спрощень отримаємо плоский фрагмент спірального матеріалопроводу, на якому розміщено об’єднувач потоку.

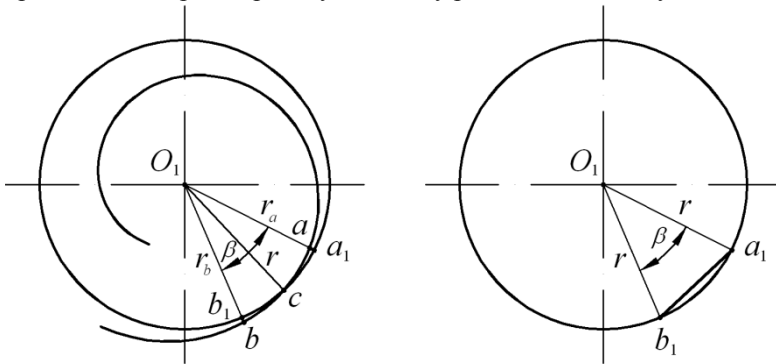


Рис. 2 – Схеми для пояснення перетворень: а – спірального фрагмента днища матеріалопроводу на фрагмент циліндричної форми; б – фрагмента днища циліндричної форми на площину

З врахуванням зазначених спрощень дослідимо відносний рух часинки сипкого матеріалу вздовж спрямовувача об’єднувача потоків (рис. 3). Для цього розмістимо рухому систему координат xyz на початку спрямовувача у точці O . Вісь x спрямуємо вздовж спрямовувача у напрямку руху частинки матеріалу. Вісь y спрямуємо перпендикулярно до поверхні спрямовувача у напрямку поздовжньої осі днища. Вісь z спрямуємо перпендикулярно поверхні днища у

напрямку осі обертання спірального матеріалопроводу. Під час руху частинки матеріалу днищем вздовж спрямовувача на неї будуть діяти сили: сила ваги частинки сипкого матеріалу mg [Н], що спрямована вертикально вниз (де m – маса частинки сипкого матеріалу, кг; g – прискорення вільного падіння, м/с²); внаслідок обертання спірального матеріалопроводу зі сталою кутовою швидкістю ω [рад./с] на частинку діє переносна сила інерції $P_{ин.} = m\omega^2 r$ [Н] (де r – відстань від осі обертання матеріалопроводу до частинки сипкого матеріалу, м), що спрямована вздовж радіус-вектора опущеного з точки O_1 (у площині рис. 3, б точка O_1 лежить на осі обертання спірального матеріалопроводу) до точки A ; коріолісова сила інерції $F_{\kappa} = 2m\omega V_r \sin(\omega, \overline{V_r})$ [Н] (де V_r – відносна швидкість руху частинки матеріалу вздовж спрямовувача, м/с), що спрямована вздовж додатного напрямку осі z ; нормальна реакція поверхні днища спірального матеріалопроводу $N_{\text{дн.}}$ [Н], що спрямована вздовж додатного напрямку осі z ; нормальна реакція поверхні спрямовувача об'єднувача потоків $N_{\text{сн.}}$ [Н], що спрямована вздовж додатного напрямку осі y ; сила тертя частинки сипкого матеріалу по днищу $F_{\text{тер.дн.}} = f_{\text{дн.}} N_{\text{дн.}}$ [Н] (де $f_{\text{дн.}}$ – коефіцієнт тертя частинки матеріалу по днищу), що спрямована у протилежному напрямку від напрямку вектора швидкості відносного руху частинки матеріалу $\overline{V_r}$; сила тертя частинки сипкого матеріалу по поверхні спрямовувача $F_{\text{тер.сн.}} = f_{\text{сн.}} N_{\text{сн.}}$ [Н] (де $f_{\text{сн.}}$ – коефіцієнт тертя частинки матеріалу по днищу), що спрямована у протилежному напрямку від напрямку вектора швидкості відносного руху частинки матеріалу $\overline{V_r}$. Для подальших розрахунків приймаємо, що коефіцієнти тертя частинки сипкого матеріалу по поверхні днища та спрямовувача рівні $f = f_{\text{дн.}} = f_{\text{сн.}}$. Складемо систему диференціальних рівнянь, що описують відносний рух частинки сипкого матеріалу:

$$\left. \begin{aligned} m\ddot{x} &= mg \sin \alpha \sin(\varphi_0 + \varphi) + P_{ин.} \sin \alpha \sin \gamma - F_{\text{тер.дн.}} - F_{\text{тер.сн.}}; \\ m\ddot{y} &= N_{\text{сн.}} - mg \cos \alpha \sin(\varphi_0 + \varphi) - P_{ин.} \cos \alpha \sin \gamma; \\ m\ddot{z} &= N_{\text{дн.}} + F_{\kappa} - mg \cos(\varphi_0 + \varphi) - P_{ин.} \cos \gamma; \end{aligned} \right\} (1)$$

де φ_0 – кут повороту матеріалопроводу за якого починається рух частинки сипкого матеріалу днищем вздовж спрямовувача (оскільки значення кутової швидкості ω невелике, то цей кут можна прийняти

рівним куту природного відкосу сипкого матеріалу), цей кут відкладається від вертикальної осі у напрямку обертання матеріалопроводу (рис. 3, б), рад.;

α – кут встановлення спрямовувачів об’єднувача потоків на днищі, град.

φ – кут повороту матеріалопроводу, $\varphi = \omega t$, рад.;

t – час, с;

γ – кут між перпендикуляром опущеним з точки O_1 до плоского фрагмента матеріалопроводу та радіусом-вектором опущеним з точки O_1 до точки A на поверхні плоского фрагмента, що характеризує положення частинки сипкого матеріалу на плоскому фрагменті, град.

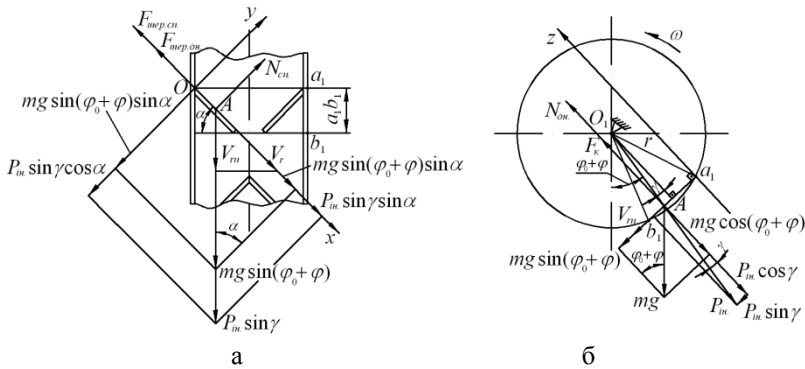


Рис. 3 – Розрахункові схеми до визначення переміщення та відносної швидкості частинки сипкого матеріалу вздовж спрямовувача: а – вид зверху на плоский фрагмент матеріалопроводу; б – вид збоку на плоский фрагмент матеріалопроводу

Оскільки кут $\angle\beta \leq 10^\circ$, тоді найбільше значення, яке може приймати кут $\angle\gamma \leq \angle\beta/2 = 5^\circ$. Враховуючи зазначене, можна прийняти, що $\sin \gamma = 0$ та $\cos \gamma = 1$. Тоді система рівнянь (1) матиме вигляд:

$$\left. \begin{aligned} m\ddot{x} &= mg \sin \alpha \sin(\varphi_0 + \varphi) - F_{mep.он} - F_{mep.cn}; \\ m\ddot{y} &= N_{cn} - mg \cos \alpha \sin(\varphi_0 + \varphi); \\ m\ddot{z} &= N_{он} + F_{кн} - mg \cos(\varphi_0 + \varphi) - P_{ін}. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Так як в межах кута $\angle\beta$ радіуси опущені з точки O_1 до розглядуваного плоского фрагмента ab матеріалопроводу змінюються не в значних межах, тоді за прийнятих припущень можна записати, що $r_a = r_b = r$ і відстань від точки O_1 до будь-якої точки розглядуваного плоского фрагмента ab в площині рис. 3, б є сталою та рівною r .

Враховуючи, що $V_r = \dot{x}$ та $\sin(\omega, \overline{V_r}) = \sin\alpha$, тоді коріолісова сила інерції визначається наступним чином $F_\kappa = 2m\omega\dot{x}\sin\alpha$.

Приймаємо, що під час обертання спірального матеріалопроводу частинка матеріалу переміщається днищем вздовж спрямовувача, тоді $y = \dot{y} = \ddot{y} = 0$ та $z = \dot{z} = \ddot{z} = 0$. З врахуванням зазначеного, з другого та третього рівнянь системи (2) визначимо нормальні реакції поверхонь спрямовувача N_{cn} та днища $N_{дн}$:

$$N_{cn} = mg \cos\alpha \sin(\varphi_0 + \varphi), \quad (3)$$

$$N_{дн} = mg \cos(\varphi_0 + \varphi) - 2m\omega\dot{x}\sin\alpha + m\omega^2 r. \quad (4)$$

Сили тертя $F_{тер.сн.}$ та $F_{тер.дн.}$ з врахуванням виразів (3) і (4), визначатимуться за залежностями:

$$F_{тер.сн.} = fmg \cos\alpha \sin(\varphi_0 + \varphi), \quad (5)$$

$$F_{тер.дн.} = fmg \cos(\varphi_0 + \varphi) - 2f\omega\dot{x}\sin\alpha + f\omega^2 r. \quad (6)$$

Підставимо значення сил у перше рівняння системи (2):

$$m\ddot{x} = mg \sin\alpha \sin(\varphi_0 + \varphi) - fmg \cos(\varphi_0 + \varphi) + 2f\omega\dot{x}\sin\alpha - f\omega^2 r - fmg \cos\alpha \sin(\varphi_0 + \varphi). \quad (7)$$

Після математичних перетворень диференціальне рівняння (7) матиме вигляд:

$$\ddot{x} - 2f\omega\dot{x}\sin\alpha = g((\sin\alpha - f \cos\alpha) \sin\varphi_0 - f \cos\varphi_0) \cos(\omega t) + g((\sin\alpha - f \cos\alpha) \cos\varphi_0 + f \sin\varphi_0) \sin(\omega t) - f\omega^2 r. \quad (8)$$

Введемо позначення $A = g((\sin\alpha - f \cos\alpha) \sin\varphi_0 - f \cos\varphi_0)$, $B = g((\sin\alpha - f \cos\alpha) \cos\varphi_0 + f \sin\varphi_0)$ та $D = -f\omega^2 r$, тоді рівняння (8) набуде вигляду:

$$\ddot{x} - 2f\omega\dot{x}\sin\alpha = A \cos(\omega t) + B \sin(\omega t) + D. \quad (9)$$

Розв'язок неоднорідного диференціального рівняння (9) шукатимемо у вигляді $x = x_1 + x_2$. Знайдемо розв'язок однорідного диференціального рівняння:

$$\frac{d^2 x}{dt^2} - 2f\omega \sin\alpha \frac{dx}{dt} = 0. \quad (10)$$

Складемо характеристичне рівняння для рівняння (10):

$$k^2 - 2f\omega k \sin \alpha = 0 \text{ або } k(k - 2f\omega \sin \alpha) = 0. \quad (11)$$

Корені характеристичного рівняння (11): $k_1 = 2f\omega \sin \alpha$ та $k_2 = 0$. Розв'язок однорідного диференціального рівняння (10) буде $x1 = c_1 e^{k_1 t} + c_2 e^{k_2 t} = c_1 e^{2f\omega \sin \alpha t} + c_2$.

Частковий розв'язок неоднорідного рівняння (9) будемо шукати у вигляді $x2 = x21 + x22$. Частковий розв'язок $x21$:

$$x21 = N \cos(\omega t) + M \sin(\omega t). \quad (12)$$

Двічі диференціюючи (12) та підставивши отримані значення у рівняння (9), визначимо значення сталих N та M :

$$N = \frac{2fB \sin \alpha - A}{\omega^2(1 + 4f^2 \sin^2 \alpha)}, \quad M = -\frac{2fA \sin \alpha + B}{\omega^2(1 + 4f^2 \sin^2 \alpha)}. \quad (13)$$

Підставляючи N та M у рівняння (12), отримаємо:

$$x21 = \frac{2fB \sin \alpha - A}{\omega^2(1 + 4f^2 \sin^2 \alpha)} \cos(\omega t) - \frac{2fA \sin \alpha + B}{\omega^2(1 + 4f^2 \sin^2 \alpha)} \sin(\omega t). \quad (14)$$

Частковий розв'язок $x22$:

$$x22 = Lt. \quad (15)$$

Двічі диференціюючи рівняння (15) та підставляючи отримані значення у (9), знайдемо L :

$$L = -\frac{D}{2f\omega \sin \alpha} = \frac{\omega r}{2 \sin \alpha}. \quad (16)$$

Частковий розв'язок неоднорідного рівняння (9):

$$x2 = \frac{2fB \sin \alpha - A}{\omega^2(1 + 4f^2 \sin^2 \alpha)} \cos(\omega t) - \frac{2fA \sin \alpha + B}{\omega^2(1 + 4f^2 \sin^2 \alpha)} \sin(\omega t) + \frac{\omega r t}{2 \sin \alpha}. \quad (17)$$

Загальний розв'язок диференціального рівняння (9):

$$x = c_1 e^{2f\omega \sin \alpha t} + c_2 + \frac{2fB \sin \alpha - A}{\omega^2(1 + 4f^2 \sin^2 \alpha)} \cos(\omega t) - \frac{2fA \sin \alpha + B}{\omega^2(1 + 4f^2 \sin^2 \alpha)} \sin(\omega t) + \frac{\omega r t}{2 \sin \alpha}. \quad (18)$$

Для визначення сталих c_1 і c_2 продиференціюємо (18):

$$\frac{dx}{dt} = V_r = 2f\omega \sin \alpha c_1 e^{2f\omega \sin \alpha t} - \frac{2fB \sin \alpha - A}{\omega(1 + 4f^2 \sin^2 \alpha)} \sin(\omega t) - \frac{2fA \sin \alpha + B}{\omega(1 + 4f^2 \sin^2 \alpha)} \cos(\omega t) + \frac{\omega r}{2 \sin \alpha}. \quad (19)$$

Враховуючи початкові умови $t = 0$, $x(0) = x_0$, $\dot{x}(0) = V_0$, із рівнянь (18) та (19) з врахуванням заміни A , B та D знайдемо сталі:

$$c_1 = \frac{1}{2f\omega \sin \alpha} \times$$

$$\times [V_0 + \frac{g}{\omega(1+4f^2 \sin^2 \alpha)} ((\sin \alpha - f \cos \alpha)(2f \sin \alpha \sin \varphi_0 + \cos \varphi_0) -$$

$$- f(2f \sin \alpha \cos \varphi_0 - \sin \varphi_0)) - \frac{\omega r}{2 \sin \alpha}];$$

$$c_2 = x_0 - \frac{1}{2f\omega \sin \alpha} \times$$

$$\times [V_0 + \frac{g}{\omega(1+4f^2 \sin^2 \alpha)} ((\sin \alpha - f \cos \alpha)(2f \sin \alpha \sin \varphi_0 + \cos \varphi_0) -$$

$$- f(2f \sin \alpha \cos \varphi_0 - \sin \varphi_0)) - \frac{\omega r}{2 \sin \alpha}] -$$

$$- \frac{g}{\omega^2(1+4f^2 \sin^2 \alpha)} [(\sin \alpha - f \cos \alpha)(2f \sin \alpha \cos \varphi_0 - \sin \varphi_0) +$$

$$+ f(2f \sin \alpha \sin \varphi_0 + \cos \varphi_0)].$$

Враховуючи заміну, загальний розв'язок неоднорідного диференціального рівняння (8) матиме вигляд:

$$x = c_1 e^{2f\omega t \sin \alpha} + c_2 + \frac{\omega r t}{2 \sin \alpha} + \frac{g}{\omega^2(1+4f^2 \sin^2 \alpha)} \times$$

$$\times [(2f \sin \alpha \sin \varphi_0 + \cos \varphi_0)(f \cos(\omega t) - (\sin \alpha - f \cos \alpha) \sin(\omega t)) +$$

$$+ (2f \sin \alpha \cos \varphi_0 - \sin \varphi_0)(f \sin(\omega t) + (\sin \alpha - f \cos \alpha) \cos(\omega t))].$$

Відносна швидкість частинки матеріалу вздовж спрямовувача:

$$V_r = 2f\omega c_1 \sin \alpha e^{2f\omega t \sin \alpha} + \frac{\omega r}{2 \sin \alpha} - \frac{g}{\omega(1+4f^2 \sin^2 \alpha)} \times$$

$$\times [(2f \sin \alpha \sin \varphi_0 + \cos \varphi_0)((\sin \alpha - f \cos \alpha) \cos(\omega t) + f \sin(\omega t)) +$$

$$+ (2f \sin \alpha \cos \varphi_0 - \sin \varphi_0)((\sin \alpha - f \cos \alpha) \sin(\omega t) - f \cos(\omega t))].$$

Задаючи шлях x , який проходить частинка матеріалу вздовж спрямовувача (для розрахунків доцільно приймати $x = L_{cn}$ (де L_{cn} – довжина спрямовувача об'єднувача потоків, м) та $x_0 = 0$, $V_0 = 0$), можна визначити час t_{cn} руху частинки вздовж спрямовувача (рис. 4).

Підставляючи значення часу $t_{cn.}$ у рівняння (23) можна визначити відносну швидкість $V_{rcn.}$ частинки при її сходженні з спрямовувача або це ж можна зробити за допомогою номограми (рис. 4).

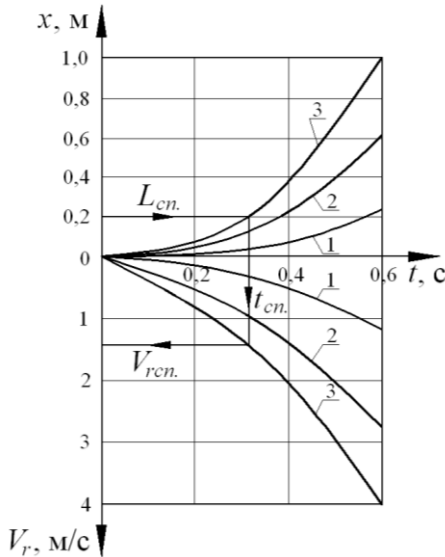


Рис. 4 – Номограма для визначення відносної швидкості $V_{rcn.}$ частинки сипкого матеріалу в момент її сходження з спрямовувача об'єднувача потоків при $x_0 = 0$, $V_0 = 0$, $\omega = 1,05$ рад./с, $\varphi_0 = \pi/4$ рад., $f = 0,4$ та $r = 0,3$ м: 1 – $\alpha = \pi/4$ рад.; 2 – $\alpha = \pi/3$ рад.; 3 – $\alpha = 1,308$ рад.

Дослідимо рух частинки матеріалу днищем матеріалопроводу після її сходження з спрямовувача об'єднувача потоків. Виділимо фрагмент спірального матеріалопроводу в межах між об'єднувачем потоків та розділювачом потоку (рис. 5). Для спрощення розрахунків здійснимо аналогічні спрощення до вище описаних, замінивши спіральний фрагмент матеріалопроводу на плоский. Дослідимо відносний рух частинки сипкого матеріалу (матеріальна точка А) днищем, що зійшла зі спрямовувача об'єднувача потоків. Для цього розмістимо рухому систему координат $\zeta\eta\tau$ у кінці спрямовувача в точці O (рис. 5, а, б). Вісь ζ спрямуємо паралельно до поздовжньої осі днища у напрямку руху частинки матеріалу. Вісь η спрямуємо

перпендикулярно до осі ζ у напрямку поздовжньої осі днища, тобто поперек днища. Вісь τ спрямуємо перпендикулярно поверхні днища у напрямку осі обертання спірального матеріалопроводу. Під час руху частинки матеріалу днищем на неї будуть діяти сили: сила ваги частинки сипкого матеріалу mg [Н]; переносна сила інерції $P_{in.} = m\omega^2 r$ [Н]; коріолісова сила інерції F_k [Н]; нормальна реакція поверхні днища спірального матеріалопроводу $N_{\partial n.}$ [Н]; сила тертя частинки сипкого матеріалу по днищу $F_{тер. \partial n.} = f_{\partial n.} N_{\partial n.}$ [Н].

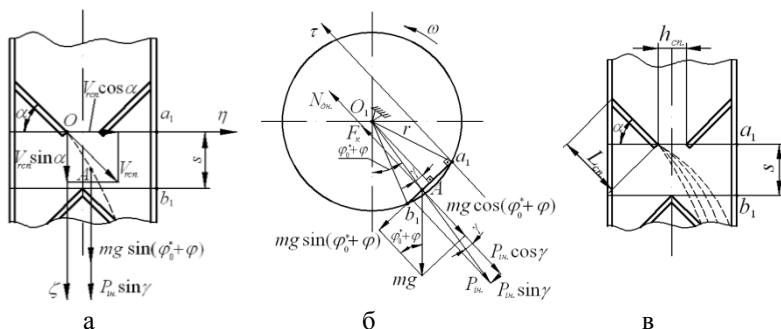


Рис. 5 – Розрахункові схеми до визначення переміщення частинки сипкого матеріалу днищем після сходження з спрямовувача: а – вид зверху на плоский фрагмент матеріалопроводу; б – вид збоку на плоский фрагмент матеріалопроводу; в – схема до визначення конструктивних параметрів матеріалопроводу

Складемо систему диференціальних рівнянь, що описують відносний рух частинки сипкого матеріалу днищем:

$$\left. \begin{aligned} m\ddot{\zeta} &= mg \sin(\varphi_0^* + \varphi) + P_{in.} \sin \gamma - F_{тер. \partial n. \zeta}; \\ m\ddot{\eta} &= -F_{тер. \partial n. \eta}; \\ m\ddot{r} &= N_{\partial n.} + F_k - mg \cos(\varphi_0^* + \varphi) - P_{in.} \cos \gamma. \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

де φ_0^* – кут повороту матеріалопроводу за якого починається рух частинки сипкого матеріалу днищем після сходження з спрямовувача об'єднувача потоків, $\varphi_0^* = \varphi_0 + \omega t_{cn.}$, рад.;

φ – кут повороту матеріалопроводу, $\varphi = \omega t$, рад.;

γ – кут між перпендикуляром опущеним з точки O_1 до плоского фрагмента матеріалоповоду та радіусом-вектором опущеним з точки O_1 до точки A на поверхні плоского фрагмента, що характеризує положення частинки сипкого матеріалу на плоскому фрагменті, град.;

$F_{тер.ди\zeta}$, $F_{тер.ди\eta}$ – проекції сили тертя $F_{тер.ди}$ відповідно на осі ζ та η , Н.

Для спрощення розрахунків знехтуємо силою тертя $F_{тер.ди}$. Врахуємо також, що частинка сипкого матеріалу не відривається від днища, тоді $\tau = \dot{\tau} = \ddot{\tau} = 0$. Крім того, враховуючи наведені вище припущення можна прийняти, що $\sin \gamma = 0$ та $\cos \gamma = 1$. Таким чином, з врахуванням усього зазначеного вище, для опису руху частинки сипкого матеріалу поверхнею днища достатньо першого та другого рівнянь системи (24), що після перетворень матимуть вигляд:

$$\left. \begin{aligned} m\ddot{\zeta} &= mg \sin(\varphi_0^* + \varphi); \\ m\ddot{\eta} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

Здійснимо тригонометричні перетворення у першому рівнянні системи (25) та врахуємо, що $\varphi = \omega t$, тоді отримаємо:

$$\left. \begin{aligned} m\ddot{\zeta} &= mg \sin \varphi_0^* \cos(\omega t) + mg \cos \varphi_0^* \sin(\omega t); \\ m\ddot{\eta} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (26)$$

Двічі проінтегруємо диференціальні рівняння системи (26) за початкових умов $t = 0$, $\zeta(0) = \eta(0) = 0$, $\dot{\zeta}(0) = V_{рен.} \sin \alpha$, $\dot{\eta}(0) = V_{рен.} \cos \alpha$:

$$\left. \begin{aligned} \dot{\zeta} &= \frac{g \sin \varphi_0^*}{\omega} \sin(\omega t) + \frac{g \cos \varphi_0^*}{\omega} (1 - \cos(\omega t)) + V_{рен.} \sin \alpha; \\ \dot{\eta} &= V_{рен.} \cos \alpha; \end{aligned} \right\} \quad (27)$$

$$\left. \begin{aligned} \zeta &= -\frac{g}{\omega^2} \sin(\varphi_0^* + \omega t) + t \left(V_{рен.} \sin \alpha + \frac{g \cos \varphi_0^*}{\omega} \right) + \frac{g \sin \varphi_0^*}{\omega^2}; \\ \eta &= V_{рен.} t \cos \alpha. \end{aligned} \right\} \quad (28)$$

За рівняннями системи (28) побудовані траєкторії переміщення частинок сипкого матеріалу днищем матеріалоповоду після сходження їх з спрямовувача об'єднувача потоків (рис. 6).

Задаючи з конструктивних міркувань величину зазору між спрямовувачами об'єднувача потоків $h_{ен.}$, кут α та довжину

спрямовувача L_{cn} , а також враховуючи, що усі траєкторії руху частинки сипкого матеріалу днищем після сходження з спрямовувача мають перетинати поздовжню вісь днища (у такому випадку забезпечуються найкращі умови для змішування сипких матеріалів), з другого рівняння системи (28) визначаємо час $t_{вісь}$, за який частинка матеріалу досягне поздовжньої осі днища, тобто

$$t_{вісь} = \frac{\eta}{V_{rcn} \cdot \cos \alpha} = \frac{h_{cn}}{2V_{rcn} \cdot \cos \alpha}.$$

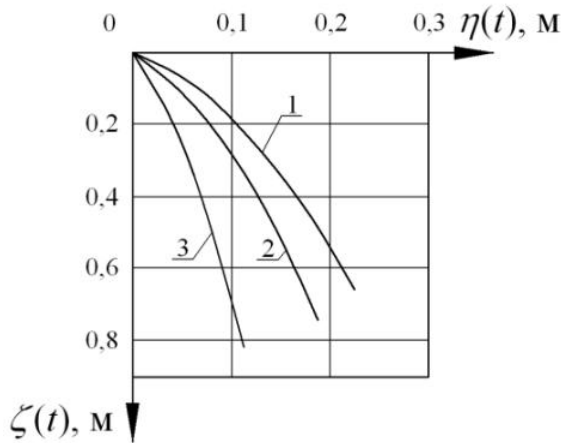


Рис. 6 – Траєкторії переміщення частинок сипкого матеріалу днищем матеріалопроводу після сходження їх з спрямовувача об'єднувача потоків при $\omega = 1,05$ рад./с, $\varphi_0 = \pi/4$ рад. та $t = 0,3$ с: 1 – $\alpha = \pi/4$ рад.; $t_{cn} = 0,566$ с; $V_{rcn} = 1,065$ м/с; $\varphi_0^* = 1,378$ рад.; 2 – $\alpha = \pi/3$ рад.; $t_{cn} = 0,379$ с; $V_{rcn} = 1,331$ м/с; $\varphi_0^* = 1,182$ рад.; 3 – $\alpha = 1,308$ рад.; $t_{cn} = 0,313$ с; $V_{rcn} = 1,562$ м/с; $\varphi_0^* = 1,113$ рад.

Підставляючи час $t_{вісь}$ у перше рівняння системи (28), отримаємо мінімально необхідне для перетину частинками матеріалу поздовжньої осі днища значення відстані $s = \zeta(t_{вісь})$ між об'єднувачем потоків та розділювачом потоку вздовж поздовжньої осі днища:

$$s \geq -\frac{g}{\omega^2} \sin\left(\varphi_0^* + \frac{\omega h_{cn.}}{2V_{rcn.} \cos \alpha}\right) + \frac{h_{cn.}}{2V_{rcn.} \cos \alpha} \left(V_{rcn.} \sin \alpha + \frac{g \cos \varphi_0^*}{\omega}\right) + \frac{g \sin \varphi_0^*}{\omega^2}. \quad (29)$$

Висновки. Запропоноване конструктивне рішення спірального змішувача сипких матеріалів, що дозволить забезпечити необхідний ступінь змішування компонентів суміші внаслідок багаторазового об'єднання та розділення потоків компонентів суміші без жодних силових дій на них, що унеможливило їх пошкодження. Крім того, теоретичним шляхом одержано залежності, які дозволяють обґрунтувати раціональні конструктивні параметри змішувача.

Література

1. Основы расчета и конструирования машин и автоматов пищевых производств: учебное пособие для вузов. Труд. колл. авторов. Под редакцией д-ра техн. наук, проф. Соколова А.Я. – М.: Машиностроение, 1969. – 637 с.
2. Макаров Ю.И. Аппараты для смешения сыпучих материалов / Ю.И. Макаров. – М.: Машиностроение, 1973. – 216 с.
3. Верлока И.И. Современные гравитационные устройства непрерывного действия для смешивания сыпучих компонентов / И.И. Верлока, А.Б. Капранова, А.Е. Лебедев // Электронный научный журнал “Инженерный вестник Дона”, №4 (2014) [Электронный ресурс]. – Режим доступа до журн.: <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2014/2599>
4. Багринцев И.И. Исследование процесса смешения сыпучих материалов в гравитационно-решетчатом смесителе с пневмоциркуляцией / И.И. Багринцев, А.И. Барвин, В.Б. Модестов // Вісник Східноукраїнського національного університету імені В. Даля. – №7 (154), ч. 2. – Луганськ, 2010.
5. Заявка на винахід № а201701162 від 08.02.2017. Спіральний змішувач сипких матеріалів / І.М. Дударев.