

Теоретично досліджено кінематичні особливості руху суміші у вертикальному розчинозмішувачі примусової дії, шнекові стрічки якого мають твірну, котра змінює свій кут нахилу до осі стрічок залежно від висоти розміщення. Отримано схеми руху та залежності для розрахунку переміщень, швидкостей та прискорень часток суміші, що дозволяє проектувати розчинозмішувачі з новими геометричними параметрами

Ключові слова: будівництво, приготування будівельних розчинних сумішей, шнек, твірна шнека, еліпс

Теоретически исследовано кинематические особенности движения смеси в вертикальном растворосмесителе принудительного действия, шнековые ленты которого имеют образующую с переменным углом наклона к оси лент в зависимости от высоты размещения. Получены схемы движения и зависимости для расчета перемещений, скоростей и ускорений частиц смеси, что позволяет проектировать растворосмесители с новыми геометрическими параметрами

Ключевые слова: строительство, приготовление строительных растворов, шнек, образующая шнека, эллипс

УДК 69.002.5

DOI: 10.15587/1729-4061.2015.43053

АНАЛІЗ КІНЕМАТИКИ СУМІШІ В КОРПУСІ ЗМІШУВАЧА З ВЕРТИКАЛЬНИМ ШНЕКОМ ЗІ ЗМІННОЮ ТВІРНОЮ

Б. О. Коробко

Кандидат технічних наук, доцент*
E-mail: bogdankorobko75@gmail.com

О. С. Васильєв

Кандидат технічних наук, доцент*
E-mail: a_vasiliev_76@mail.ru

І. А. Рогозін

Старший викладач*

E-mail: ria_workbox@mail.ru

*Кафедра будівельних машин та обладнання ім. Олександра Онищенка

Полтавський національний технічний університет ім. Юрія Кондратюка
пр. Першотравневий, 24, м. Полтава, Україна, 36011

1. Вступ

У будівництві до розчинозмішувачів ставиться багато вимог. Вони повинні мати відносно просту конструкцію, велику продуктивність, низькі показники енергоспоживання, високу надійність і забезпечувати високу якість приготування будівельних розчинних сумішей різних типів. При проектуванні змішувача повинна бути відома механіка процесів, які в ньому відбуваються. Вона обумовлена, з одного боку, схемою розташування робочих органів у просторі та їх геометричними параметрами, а з іншого боку – відносним рухом часток суміші, що передбачається кінематикою процесу змішування [1]. Головним чином, на механіку процесів змішування впливають кінематичні фактори, котрі визначають характер відносного руху часток розчинної суміші, що переміщується. Аналіз кінематики процесів змішування дозволяє зробити вибір раціональної схеми розташування робочих органів у просторі, котра забезпечить основні вимоги, що висуваються до змішувачів. Також він дає можливість отримати вихідні дані для визначення зусиль і крутних моментів, що діють на робочий орган змішувача, та його споживаної потужності.

2. Аналіз літературних даних і постановка проблеми

У відомих конструкціях розчинозмішувачів примусової дії, котрі мають робочий орган, виконаний у ви-

гляді шнеку чи шнекової стрічки, гвинтова поверхня шнеків утворюється твірною з постійним кутом до осі. Це є характерним для сучасних машин останніх років [1], а також для попередніх розробок [2], з вертикальним [3] та горизонтальним [4, 5] розміщенням вала. У такому випадку суміш у змішувачі отримує примусову дію до руху в радіальному напрямку тільки в одну сторону відносно осі по всій довжині осі шнекової поверхні [3, 6, 7]. Це має істотний вплив на інтенсивність перемішування при вертикальному розміщенні вала робочого органа. Для таких машин, щоб забезпечити різнонаправлені радіальні напрямки руху суміші по висоті корпусу і досягти кращої циркуляції компонентів суміші [4], шнекові поверхні виготовляються зі змінним кутом нахилу твірної до осі шнека по висоті [8].

При вдосконаленні обладнання змішувачів, зміні його параметрів постає питання оцінки ефективності запропонованих рішень. Важливою складовою ефективності роботи змішувача є кількість енергії та потужності, які витрачаються на перемішування для досягнення якісного приготування будівельної розчинної суміші. Отримання рівнянь для визначення витраченої на перемішування потужності для типових конструкцій змішувачів, а також при змінних геометричних параметрах системи набуває все більшого значення [9, 10] і є особливо актуальним для проектування нових машин [11–12]. Це можна здійснити шляхом розгляду сил опору, що виникають під час роботи змішувача, та коефіцієнту корисної дії привода. Один із шляхів визначення сил базується на принципах механіки су-

ціальних середовищ. А для цього необхідно розглянути кінематику суміші при перемішуванні за нових умов.

3. Мета та задачі дослідження

Метою даного дослідження є визначення кінематики процесу змішування вертикального розчинозмішувача примусової дії, шнекові стрічки якого мають твірну, котра змінює свій кут нахилу до осі стрічок залежно від висоти розміщення. А також отримання вихідних даних для розрахунку зусиль опору та споживаної потужності для змішувачів подібних конструкцій і рекомендацій щодо раціональної схеми розташування робочих органів у просторі.

Для досягнення поставленої мети для елементарної дискретної частки суміші, котра рухається по зовнішній частині поверхні стрічки шнека, вирішувалися наступні задачі:

- отримати розрахункові залежності переміщення;
- визначити напрямки та величини складових швидкості руху;
- визначити напрямки та величини складових прискорення руху.

4. Аналіз кінематики суміші у корпусі змішувача

Кінематику суміші розглянуто в циліндричному корпусі змішувача, в якому обертається вертикальний стрічковий шнековий робочий орган (рис. 1, а, б). Робочий орган складається з вертикального вала 1 із нижньою опорою на підшипниковий вузол на дніщі корпуса. По зовнішньому радіусу змішувача на кронштейнах 2 і 3 встановлені дві шнекові стрічки 4 з твірною, котра змінює кут нахилу залежно від висоти розміщення таким чином, що в найнижчій частині шнекової стрічки твірна є перпендикулярною до осі шнека, а з рухом угору по шнековій стрічці твірна поступово збільшує свій кут нахилу θ вгору від осі шнека до периферії у вертикальній площині (рис. 2) та сягає свого максимального значення у найвищій частині. Це максимальне значення дорівнює куту α , під яким установлені зовнішні шнекові стрічки до горизонтальної площини (рис. 1, б). Змінна твірна по висоті шнекової стрічки забезпечується шляхом виготовлення її у вигляді плоскої поверхні. Ця плоска поверхня отримана на площині, котра проходить через вісь нижнього кронштейна 3 під кутом α до горизонтальної площини.

Механіку процесу, котра відбувається у корпусі змішувача, можна дослідити, використовуючи принципи механіки суцільних середовищ [13–15]. Для цього прийнято припущення, що середовище, котре перемішується, є однорідним по всьому об'єму. Частота обертання змішувача є постійною, що відповідає встановленому режиму роботи обладнання та руху середовища. А точкою відліку є вісь симетрії корпуса змішувача Oz (рис. 3), рух часток суміші в цій системі відліку приймається за відносний [16].

Розглянемо кінематику руху елементарної дискретної частки суміші у вигляді точки М навколо осі корпуса змішувача Oz [17]. Приймаємо дві системи координат із початком координат О у центрі кола дніща корпуса змішувача (рис. 3). Осі нерухомої системи ко-

ординат x, y, z та осі системи координат x_1, y_1, z_1 , котра буде мати площину x_1Oz_1 , яка співпадає з площиною стрічки, і буде обертатися разом із робочим органом змішувача. Схема руху частки суміші у корпусі змішувача у площині xOy показана на рис. 4. Точка М, яка безпосередньо контактує зі шнековою стрічкою та стінкою корпуса змішувача, буде здійснювати складний рух. Розподілимо його на переносний рух по колу з радіусом R_0 у площині xOy (наприклад, із положення АОВ до положення А'ОВ' із кутовою швидкістю робочого органа ω) і відносний рух у площині x_1Oz_1 , яка буде розміщена під кутом α до горизонталі. Відносний рух буде переміщенням по стрічці догори. Оскільки шнекова стрічка є площиною під кутом до осі циліндричного корпуса змішувача, то таке переміщення відбуватиметься по еліптичній траєкторії [18] від точки А до точки В. Еліпс траєкторії буде мати малу піввісь b , яка буде рівною радіусу корпуса змішувача, $b=R_0$, і велику піввісь a , котру можна знайти за формулою:

$$a = \frac{H}{\sin \alpha}, \tag{1}$$

де H – висота робочого органа змішувача.

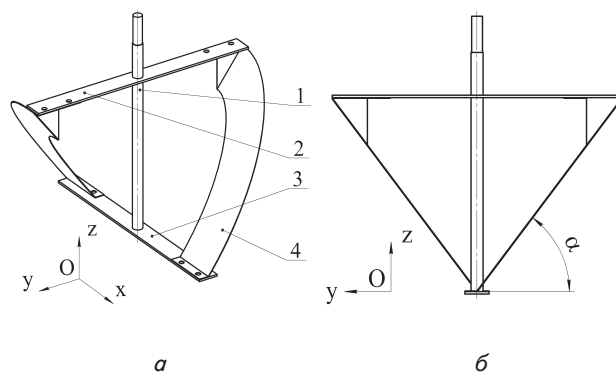


Рис. 1. Робочий орган змішувача: а – вид аксонометрії; б – вид у площині yOz ; 1 – вертикальний вал, 2 – верхній кронштейн, 3 – нижній кронштейн, 4 – шнекова стрічка зі змінною твірною

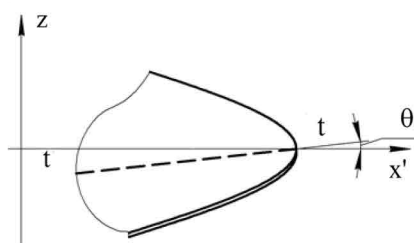


Рис. 2. Середня ділянка шнекової стрічки у вертикальній площині, що проходить через вісь z : $t-t$ – твірна шнекової стрічки у вертикальній площині; θ – кут нахилу твірної

Відносне переміщення точки матиме прискорення a^r , котре розкладається на нормальне a_n^r , спрямоване до центра О, і дотичне a_t^r , спрямоване по дотичній до еліптичної траєкторії (рис. 5).

Переносний рух точки М по колу від положення у початковий момент часу $M(t)$ до положення у контрольний момент часу $M^e(t_1)$ (рис. 4) матиме прискоро-

рення a^e , котре розкладається на нормальне a_n^e , спрямоване до осі Oz , і дотичне a_τ^e , спрямоване по дотичній до кола (рис. 6).

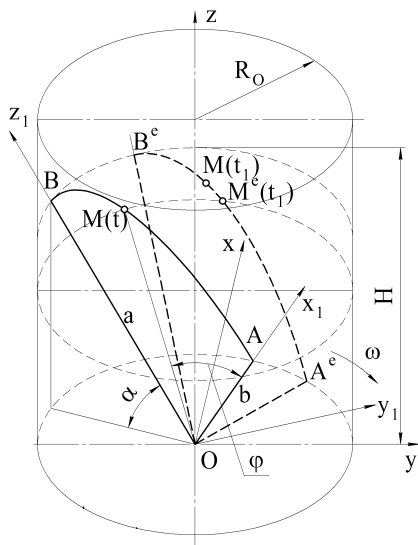


Рис. 3. Схема руху частки суміші у корпусі змішувача

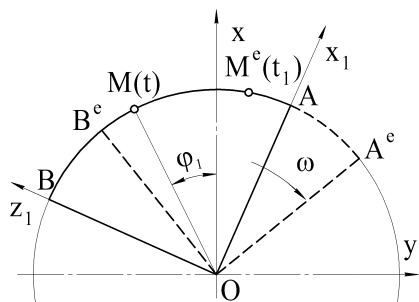


Рис. 4. Схема руху частки суміші у корпусі змішувача у площині xOy

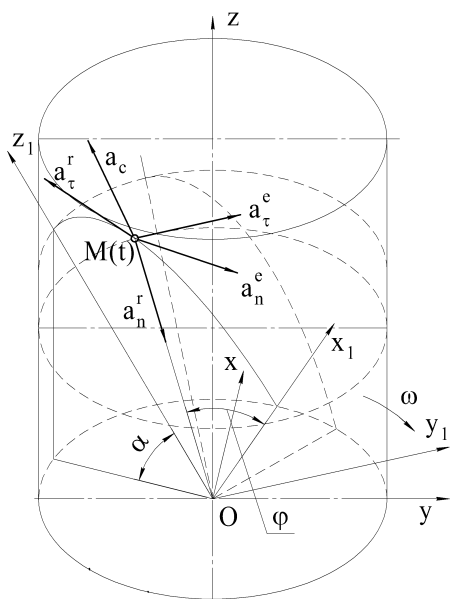


Рис. 5. Схема прискорень частки суміші

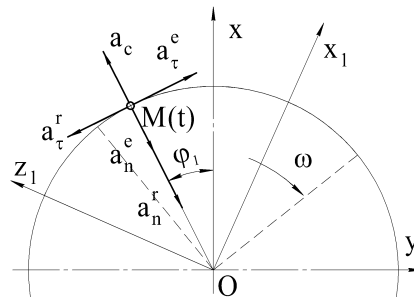


Рис. 6. Схема прискорень частки суміші у площині xOy

Точка M рухається по складній криволінійній траєкторії, тому під час її руху виникатиме прискорення Коріоліса a_c .

Для того, щоб була можливість охарактеризувати відносні переміщення у зоні контакту точки M зі стрічкою шнеку, у площині x_1Oz_1 введемо полярну систему координат із радіусом $r(\varphi)$ ($0 \leq r(\varphi) \leq a$) та полярним кутом φ ($0 \leq \varphi \leq \frac{\pi}{2}$), котрий буде відкладатися від додаткового напрямку осі Ox_1 у площині x_1Oz_1 (рис. 3). Зміна кута φ за часом становитиме:

$$\varphi = \omega_1 \cdot t, \tag{2}$$

де ω_1 – кутова швидкість обертання точки в площині x_1Oz_1 у відносному русі, котра залежить від кутової швидкості робочого органа ω , властивостей середовища, що перемішується, та геометричних параметрів змішувача і може бути розрахована за конкретних виробничих умов [1, 3]; t – час.

Залежностями для переходу з полярної системи координат у декартову будуть:

$$x_1 = r(\varphi) \cdot \cos \varphi; \tag{3}$$

$$z_1 = r(\varphi) \cdot \sin \varphi, \tag{4}$$

де $r(\varphi)$ – радіус руху матеріальної точки M , що залежить від φ .

Радіус $r(\varphi)$ виразимо через малу піввісь еліпса. Для цього скористаємося рівнянням еліпса у площині x_1Oz_1 :

$$x_1^2/a^2 + z_1^2/b^2 = 1 \tag{18}, \text{ тоді:}$$

$$\frac{[r(\varphi)]^2}{a^2} \sin^2 \varphi + \frac{[r(\varphi)]^2}{b^2} \cos^2 \varphi = 1. \tag{5}$$

Домножимо вираз на b^2 :

$$\frac{[r(\varphi)]^2 \cdot b^2}{a^2} \sin^2 \varphi + [r(\varphi)]^2 \cos^2 \varphi = b^2. \tag{6}$$

Спростимо залежність, використавши коефіцієнт еліптичності траєкторії точки M у відносному русі k [18]:

$$k = \frac{b}{a}, \tag{7}$$

тоді отримаємо:

$$r(\varphi) \cdot \sqrt{k^2 \sin^2 \varphi + \cos^2 \varphi} = b. \quad (8)$$

Звідки:

$$r(\varphi) = \frac{b}{\sqrt{k^2 + \cos^2 \varphi (1 - k^2)}}. \quad (9)$$

Виразимо величину коефіцієнта еліптичності через геометричні параметри змішувача:

$$k = \frac{b}{a} = \frac{R_0 \cdot \sin \alpha}{H}. \quad (10)$$

При відомій кутовій швидкості ω_1 точки М у відносному русі та відстані r можна знайти швидкість відносного руху v_r^r :

$$v_r^r = r(\varphi) \cdot \omega_1. \quad (11)$$

Переносний рух буде відбуватися, коли точка М у результаті обертання робочого органа здійснюватиме в площині xOy рух по колу з радіусом r_1 ($0 \leq r_1 \leq R_0$).

Щоб охарактеризувати переносний рух, у площині xOy введемо полярну систему координат з радіусом r_1 і полярним кутом φ_1 ($0 \leq \varphi_1 \leq 2\pi$), котрий буде відкладатися від додаткового напрямку вісі Ox у площині xOy (рис. 4). Зміна кута φ_1 за часом становитиме:

$$\varphi_1 = \omega_2 \cdot t, \quad (12)$$

де ω_2 – кутова швидкість обертання точки в площині xOy у переносному русі, визначається аналогічно до ω_1 .

Переходимо з полярної системи координат у декартову:

$$x = r_1 \cdot \cos \varphi_1; \quad (13)$$

$$y = r_1 \cdot \sin \varphi_1. \quad (14)$$

Тепер маємо можливість визначити швидкість переносного руху v_r^e точки М:

$$v_r^e = r_1 \cdot \omega_2. \quad (15)$$

Прискорення при відносному і переносному русі визначаються за формулами:

$$a^r = \frac{dv_r^r}{dt}; \quad (16)$$

$$a^e = \frac{dv_r^e}{dt}. \quad (17)$$

Також необхідно знайти прискорення Кориоліса. Воно визначається за формулою:

$$a_c = 2 \cdot \omega_2 \cdot v_r^r \cdot \sin \beta = 2 \cdot \omega_2 \cdot \omega_1 \cdot r(\varphi) \cdot \sin \beta, \quad (18)$$

де β – кут між векторами v_r^r і ω_2 .

Значення $\sin \beta$ у формулі можна замінити на $\cos \gamma$ (рис. 5), де γ – кут між вектором відносної швидкості vr_r^r та проекцією цього вектора на площину xOy vr_r^r , адже:

$$\sin \beta = \sin \left(\frac{\pi}{2} + \gamma \right) = \cos \gamma. \quad (19)$$

Тому необхідно знайти значення $\cos \gamma$, для цього скористаємося виразом:

$$vr_r^r = gr \cdot \omega_1 = v_r^r \cdot \cos \gamma, \quad (20)$$

де gr – проекція $r(\varphi)$ на площину xOy , яка буде становити: $gr = R_0$.

Тоді $\cos \gamma$ знайдемо з виразу:

$$\begin{aligned} \cos \gamma &= \frac{vr_r^r}{v_r^r} = \frac{\omega_1 \cdot R_0 \cdot \sqrt{k^2 + \cos^2 \varphi (1 - k^2)}}{\omega_1 \cdot R_0} = \\ &= \sqrt{k^2 + \cos^2 \varphi (1 - k^2)}. \end{aligned} \quad (21)$$

Отже, всі переміщення, швидкості та прискорення точки М можуть бути розраховані.

5. Висновки

Проведеними дослідженнями встановлено особливості кінематики процесу змішування для вертикального шнекового розчинозмішувача зі змінною твірною. Отримано залежності (3) і (4), котрі дозволяють проводити розрахунки координат переміщення часток суміші при відносному русі. Рівняння (13) та (14) описують переміщення при переносному русі. Напрямки швидкостей відносного руху vr_r^r і переносного руху v_r^e будуть аналогічні до напрямків відповідних прискорень a_r^r та a_r^e (рис. 5), а їх величини можуть бути знайдені за формулами (11) і (15). Напрямки тангенціального і нормального прискорень відносного та переносного руху, а також прискорення Кориоліса, визначено і показано на рис. 5. Рівняння (16) та (17) дають змогу знайти величини прискорень відповідно відносного й переносного руху, а рівняння (18) – прискорення Кориоліса.

Таким чином, розглянутий аналіз кінематики суміші дає можливість отримати вихідні дані для визначення сил опору руху робочого органа змішувача та його споживаної потужності, може бути корисним при виборі раціональної схеми розташування робочих органів у просторі. Це дозволить ґрунтовно проектувати розчинозмішувачі з новими специфічними геометричними параметрами, коли застосовуються шнекові поверхні, які будуються по твірним зі змінним кутом нахилу до вісі змішувача.

Література

1. Онищенко, О. Г. Створення та дослідження шпунтурних станцій і агрегатів нового покоління [Текст]: монографія / О. Г. Онищенко, І. О. Іваницька, К. М. Ващенко. – Полтава: ПолтНТУ, 2010. – 157 с.
2. Геррман, Х. Шнековые машины в технологии [Текст]: пер. с нем. – Л.: Химия, 1975. – 232 с.

3. Маслов, А. Г. Исследование рациональных параметров бетоносмесителя с вертикальным шнеком [Текст] / А. Г. Маслов, Ю. С. Саленко // Вісник КДПУ ім. М. Остроградського. – 2009. – Вип. 1 (54), Ч. 1. – С. 81–84.
4. Стренк, Ф. Перемешивание и аппараты с мешалками [Текст] / Ф. Стренк; Пер. с польск. – Л.: Химия, 1975. – 384 с.
5. Jovanovic, A. Discrete element modelling of screw conveyor-mixers [Text] / A. Jovanovic, L. Pezo, S. Stanojlovic, N. Kosanic, L. Levic // Hemijska industrija. – 2015. – Vol. 69, Issue 1. – P. 95–101. doi: 10.2298/hemind130412026j
6. Григорьев, А. М. Винтовые конвейеры [Текст] / А. М. Григорьев. – М.: Машиностроение, 1972. – 248 с.
7. Ferraris, C. F. Concrete Mixing Methods and Concrete Mixers [Text] / C. F. Ferraris // Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology. – 2001. – Vol. 106, Issue 2. – P. 391–399. doi: 10.6028/jres.106.016
8. Деклараційний пат. на корисну модель 81413 Україна, МПК (2006.01) B28C 5/16. Установка розчинозмішувальна з вертикальним шнеком [Текст] / Коробко Б. О., Васильєв О. С., Рогозін І. А. – № u 201301300; заявл. 04.02.2013; опубл. 25.06.2013, Бюл. № 12. – 4 с.
9. Назаренко, І. І. Машина для виробництва будівельних матеріалів [Текст]: підручник / І. І. Назаренко. – К.: КНУБА, 1999. – 488 с.
10. Добронравов, С. С. Строительные машины и основы автоматизации [Текст]: учебник / С. С. Добронравов, В. Г. Дронов. – М.: Высш. школа, 2001. – 575 с.
11. Онищенко, А. Г. Новые машины для механизации отделочных работ в строительстве [Текст] / А. Г. Онищенко, А. В. Васильев, С. В. Попов // Строительные и дорожные машины. – 2006. – № 1. – С. 7–9.
12. Noor, M. A. Rheology of High Flowing Mortar and Concrete [Text] / M. A. Noor, T. Uomoto // Materials and Structures. – 2004. – Vol. 37, Issue 272. – P. 513–521. doi: 10.1617/13965
13. Ильюшин, А. А. Механика сплошной среды [Текст] / А. А. Ильюшин. – М.: МГУ, 1978. – 286 с.
14. Ottino, J. M. The kinematics of mixing: stretching, chaos, and transport [Text] / J. M. Ottino. – Cambridge: Cambridge University Press, 1989.
15. Rao, K. K. An Introduction to Granular Flow [Text] / K. K. Rao, P. R. Nott. – New York: Publ. in the USA by Cambridge University Press, 2008. – 490 p. doi: 10.1017/cbo9780511611513.003
16. Лозовая, С. Ю. Исследование перемещения загрузки в помольно-смесительном устройстве периодического действия. Т. 2 [Текст]: сб. докл. междунар. науч.-практ. конф. / С. Ю. Лозовая, И. А. Лымарь // Инфотехстроймех – 2010. – Белгород: Изд-во БГТУ, 2010. – С. 24–28.
17. Яблонский, А. А. Курс теоретической механики. Ч. 1. Статика. Кинематика [Текст] / А. А. Яблонский, В. Н. Никифорова. – 5-е изд., перераб. – М.: Высшая школа, 1977. – 368 с.
18. Королёв, Ю. И. Начертательная геометрия. 2-е изд. [Текст]: учебник / Ю. И. Королёв. – СПб.: Питер, 2010. – 256 с.