

ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ РУХУ ЧАСТИНОК БІОМАСИ ПІД ЧАС ОБЕРТАННЯ МЕТАНТЕНКА

***Г.А. Голуб, доктор технічних наук
Національний університет біоресурсів і
природокористування України***

***С.М. Кухарець, кандидат технічних наук
Житомирський національний агроекологічний університет***

Розроблено математичну модель для визначення параметрів руху частинок біомаси в обертовому метантенку, яка дозволяє встановити раціональні значення кутової швидкості метантенка та його конструктивні параметри.

Біомаса, метантенк, біогаз, перемішування, рух частинки.

Постановка проблеми. Експлуатація біогазових установок показала, що сприяння контакту анаеробних бактерій із біомасою субстрату забезпечується за рахунок перемішування субстрату, однак при цьому інтенсивного перемішування слід уникати, оскільки це може призвести до погіршення анаеробного зброджування за рахунок порушення симбіозу ацетогенних та метаногенних бактерій. На практиці компроміс досягається за рахунок повільного обертання мішалок або їх роботи упродовж короткого часу [1]. У той же час, досвід експлуатації реакторів біогазових установок показав, що практично неможливо усунути розшарування біомаси в реакторі на мінеральний осад та органічну плаваючу біомасу, що вказує на недоліки в роботі систем перемішування біомаси [2, 3].

Підвищення ефективності роботи біогазових установок є одним із головних напрямків покращення технологічного процесу виробництва біогазу, а тому обґрунтування методів визначення параметрів руху частинок біомаси в обертовому метантенку, які дозволять встановити раціональні значення кутової швидкості метантенка та його конструктивні параметри потребує подальшого удосконалення.

Аналіз останніх досліджень. У результаті проведених наукових досліджень нами запатентовано ряд технічних рішень, які дозволяють у значній мірі усунути розшарування біомаси за рахунок забезпечення перемішування шарів біомаси із використанням занурених обертових біогазових реакторів. Визначено також рівень занурення обертового метантенка в рідину, а також коефіцієнт його заповнення в залежності від його геометричних параметрів та густини рідини, в яку занурений обертовий метантенк при забезпеченні його знаходження у завислому стані [4].

© Г.А. Голуб, С.М. Кухарець, 2015

Встановлено також, що потужність, що витрачається на подолання моменту опору в підшипниках залежить від рівня органічної біомаси в метантенку, його ваги, а також характеристик біогазу та біомаси [5, 6]. Потужність, що витрачається на перемішування біомаси залежить від характеристик біомаси (густини, вмісту сухої речовини, розміру частинок сухої речовини) та конструкційно-кінематичних характеристик метантенка (кутова швидкість, внутрішній радіус, довжина, геометричні розміри та розміщення лопаток, мішалок й перегородок всередині метантенка) [7, 8].

Однак, для недопущення розшарування біомаси та забезпечення її перемішування шляхом підняття мінеральної складової біомаси, яка накопичується в нижній частині метантенка та занурення органічної складової біомаси, яка накопичується в верхній частині метантенка, необхідно знати параметри та траєкторії руху мінеральних та органічних частинок біомаси по перемішувальним лопаткам та в об'ємі обертового метантенка.

Мета досліджень. Теоретично встановити параметри та траєкторії руху мінеральних та органічних частинок біомаси по перемішувальним лопаткам та в об'ємі метантенка в процесі його обертання.

Результати досліджень. Розрахункова схема дії сил на мінеральну (а) та органічну (б) частинки субстрату, що взаємодіють із перемішувальними лопатками обертового метантенка приведена на рис. 1: F_g – сила тяжіння, Н; F_a – сила Архімеда, Н; F_m – сила тертя, Н; F_k – коріолісова сила інерції, Н; F_e – відцентрова сила інерції, Н; F_{no} – сила опору субстрату, яка протидіє руху частинки у радіальному напрямку, Н; F_{to} – сила, що притискує частинку до лопатки завдяки опору субстрату, Н; r – поточний радіус положення частинки субстрату, м; u_R – відносна швидкість органічної частинки під час руху по лопатці, м/с; R – внутрішній радіус метантенка, м; ωt – кут повороту метантенка, рад.

Для визначення відносної швидкості та встановлення траєкторії руху мінеральних частинок біомаси виходячи із рис. 1 (а) складено диференціальне рівняння руху мінеральної частинки субстрату у вигляді матеріальної точки по лопатці обертового метантенку. Із врахуванням діючих на мінеральну частинку сил, рівняння її руху по лопатці буде мати вигляд:

$$m \frac{dv_R}{dt} = F_e + F_m + F_{na} + F_{no} - F_{ng}, \quad (1)$$

де: F_e – відцентрова сила інерції частинки, Н; F_m – сила тертя частинки, Н; F_{na} – складова сили Архімеда, що діє вздовж лопатки на частинку, Н; F_{no} – сила опору субстрату, яка протидіє руху частинки в радіальному напрямку, Н; F_{ng} – складова сили тяжіння частинки, що діє вздовж лопатки, Н; u_R – відносна швидкість частинки під час руху по лопатці, м/с.

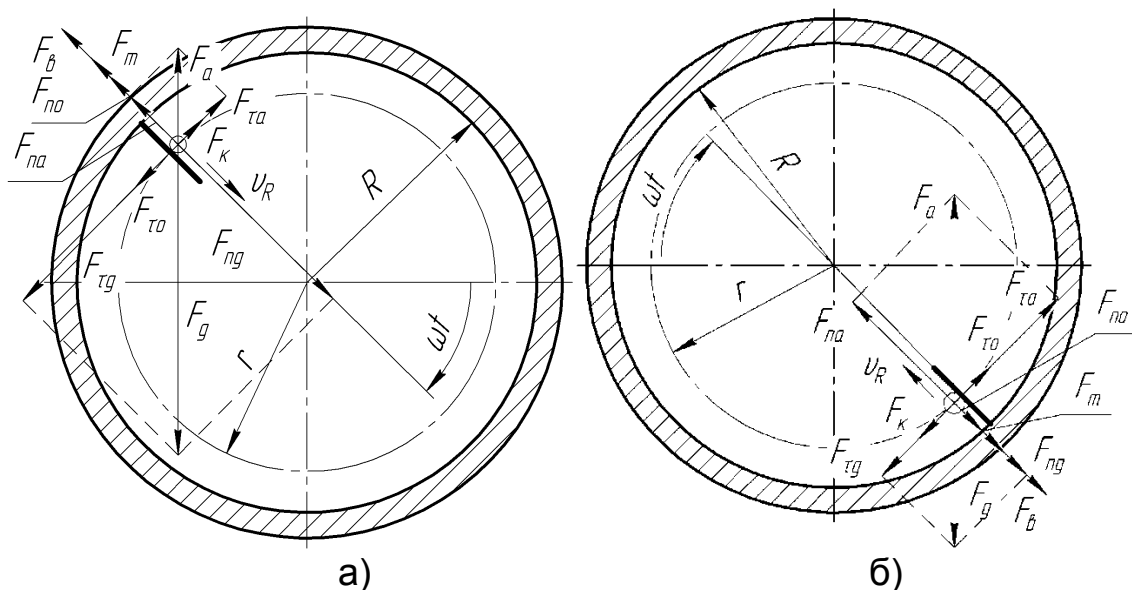


Рис. 1. Схема дії сил на мінеральну (а) та органічну (б) частинки субстрату, що взаємодіють із перемішувачими лопатками:

Сила тертя визначається силами, що притискують частину до лопатки:

$$F_m = f(F_{\tau o} + F_{\tau g} - F_{\tau a} - F_{\kappa}), \quad (2)$$

де: $F_{\tau o}$ – сила, що притискує частинку до лопатки завдяки опору субстрату, Н; $F_{\tau g}$ – складова сили тяжіння частинки, що діє перпендикулярно до лопатки, Н; $F_{\tau a}$ – складова сила Архімеда для частинки, що діє перпендикулярно до лопатки, Н; F_{κ} – коріолісова сила інерції частинки, Н; f – коефіцієнт тертя частини субстрату по матеріалу лопатки метантенка, відн. од.

Враховуючи, що:

$$F_{\delta} = m_q r \omega^2; F_g = m_q g; F_a = \rho_c g V_q; F_{\kappa} = 2m_q \omega \frac{dr}{dt}; \quad (3)$$

$$F_{no} = m_q k_1 \frac{dr}{dt}; F_{\tau o} = m_q k_1 r \omega,$$

де: m_q – маса частинки, кг; ω – кутова швидкість обертання метантенка, с^{-1} ; r – поточний радіус положення частинки субстрату, м; g – прискорення земного тяжіння, м/с^2 ; V_q – об'єм частинки, м^3 ; k_1 – коефіцієнт пропорційності при ламінарному обтіканні частинок субстратом, с^{-1} ; $k_1 = 18\eta/(\rho_c d_E^2)$; k_2 – коефіцієнт співвідношення густини субстрату і частинки, $k_2 = \rho_c/\rho_q$; ρ_c – густина субстрату, кг/м^3 ; ρ_q – густина частинки, кг/м^3 ; η – динамічна в'язкість субстрату, Па с; d_E – еквівалентний діаметр частинки, м.

Із врахуванням (3) та (2) рівняння руху мінеральної частинки субстрату по поверхні лопатки обертового метантенка можна записати в наступному вигляді:

$$\begin{aligned} \frac{d^2 r}{dt^2} + (2f\omega - k_1) \frac{dr}{dt} - (\omega^2 + fk_1\omega)r = \\ = g \left[f(1 - k_2) \cos(\omega t) + (k_2 - 1) \sin(\omega t) \right]. \end{aligned} \quad (4)$$

Це рівняння є лінійним рівнянням другого порядку з постійними коефіцієнтами та правою частиною у вигляді тригонометричного поліному [9]. Відповідне до нього однорідне диференціальне рівняння буде мати вигляд:

$$\frac{d^2 r}{dt^2} + (2f\omega - k_1) \frac{dr}{dt} - (\omega^2 + fk_1\omega)r = 0. \quad (5)$$

Характеристичне рівняння цього однорідного диференціального рівняння буде мати вигляд:

$$\lambda^2 + (2f\omega - k_1)\lambda + (-\omega^2 - fk_1\omega) = 0. \quad (6)$$

Корені характеристичного рівняння матимуть вигляд:

$$\lambda_1 = \frac{k_1}{2} - f\omega - \sqrt{\omega^2(f^2 + 1) + \frac{k_1^2}{4}}; \quad \lambda_2 = \frac{k_1}{2} - f\omega + \sqrt{\omega^2(f^2 + 1) + \frac{k_1^2}{4}}. \quad (7)$$

Загальний розв'язок диференціального рівняння буде мати вид:

$$r = C_1 \exp(\lambda_1 t) + C_2 \exp(\lambda_2 t) + r_{цр}, \quad (8)$$

де: C_1, C_2 – постійні величини диференціального рівняння.

Частковий розв'язок неоднорідного диференціального рівняння запишемо у вигляді тригонометричного полінома:

$$r_{цр} = M \cos(\omega t) + N \sin(\omega t), \quad (9)$$

перша похідна якого має вигляд:

$$r'_{цр} = -M\omega \sin(\omega t) + N\omega \cos(\omega t), \quad (10)$$

а друга похідна відповідно наступний вигляд:

$$r''_{цр} = -M\omega^2 \cos(\omega t) - N\omega^2 \sin(\omega t). \quad (11)$$

Рівняння (4) представимо у вигляді:

$$\begin{aligned} & \left[-M\omega^2 \cos(\omega t) - N\omega^2 \sin(\omega t) \right] + (2f\omega - k_1) \times \\ & \times \left[-M\omega \sin(\omega t) + N\omega \cos(\omega t) \right] - (\omega^2 + fk_1\omega) \times \\ & \times \left[M \cos(\omega t) + N \sin(\omega t) \right] = gf(1 - k_2) \cos(\omega t) + g(k_2 - 1) \sin(\omega t). \end{aligned} \quad (12)$$

Для знаходження коефіцієнтів M і N на основі даного рівняння використаємо систему рівнянь:

$$\begin{cases} (-2\omega^2 - fk_1\omega)M + (2f\omega^2 - k_1\omega)N = gf(1 - k_2) \\ (-2f\omega^2 + k_1\omega)M + (-2\omega^2 - fk_1\omega)N = g(k_2 - 1). \end{cases} \quad (13)$$

Розв'язавши дану систему за методом Крамера [9]:

$$\Delta = \begin{vmatrix} -2\omega^2 - fk_1\omega & 2f\omega^2 - k_1\omega \\ -2f\omega^2 + k_1\omega & -2\omega^2 - fk_1\omega \end{vmatrix} = \omega^2 \left[4(\omega^2 f^2 + 1) + k_1^2 (f^2 + 1) \right], \quad (14)$$

$$\Delta_M = \begin{vmatrix} gf(1-k_2) & 2f\omega^2 - k_1\omega \\ g(k_2-1) & -2\omega^2 - fk_1\omega \end{vmatrix} = \omega g k_1 (f^2 + 1)(k_2 - 1), \quad (15)$$

$$\Delta_N = \begin{vmatrix} -2\omega^2 - fk_1\omega & gf(1-k_2) \\ -2f\omega^2 + k_1\omega & g(k_2-1) \end{vmatrix} = 2\omega^2 g (f^2 + 1)(k_2 - 1), \quad (16)$$

отримаємо:

$$M = \frac{\Delta_M}{\Delta} = \frac{g k_1 (f^2 + 1)(k_2 - 1)}{\omega \left[4(\omega^2 f^2 + 1) + k_1^2 (f^2 + 1) \right]}, \quad (17)$$

$$N = \frac{\Delta_N}{\Delta} = \frac{2g (f^2 + 1)(k_2 - 1)}{4(\omega^2 f^2 + 1) + k_1^2 (f^2 + 1)}. \quad (18)$$

Тоді частковий розв'язок неоднорідного диференційного рівняння руху частинки матиме вигляд:

$$r_{qp} = \frac{g (f^2 + 1)(k_2 - 1)}{4(\omega^2 f^2 + 1) + k_1^2 (f^2 + 1)} \left(\frac{k_1}{\omega} \cos(\omega t) + 2 \sin(\omega t) \right). \quad (19)$$

Повний розв'язок неоднорідного диференційного рівняння руху частинки як сума загального (8) та часткового розв'язків (19) матиме вигляд:

$$r = C_1 \exp(\lambda_1 t) + C_2 \exp(\lambda_2 t) + \frac{g (f^2 + 1)(k_2 - 1)}{4(\omega^2 f^2 + 1) + k_1^2 (f^2 + 1)} \left(\frac{k_1}{\omega} \cos(\omega t) + 2 \sin(\omega t) \right). \quad (20)$$

Відносна швидкість мінеральної частинки під час руху по лопатці складе:

$$v_R = \frac{dr}{dt} = \lambda_1 C_1 \exp(\lambda_1 t) + \lambda_2 C_2 \exp(\lambda_2 t) + \frac{g (f^2 + 1)(k_2 - 1)}{4(\omega^2 f^2 + 1) + k_1^2 (f^2 + 1)} (2\omega \cos(\omega t) - k_1 \sin(\omega t)). \quad (21)$$

Прийнявши, що $\frac{g (f^2 + 1)(k_2 - 1)}{4(\omega^2 f^2 + 1) + k_1^2 (f^2 + 1)} = k_3$ та враховуючи поча-

ткові умови: $t=0$, $r=R$ (де R – внутрішній радіус метантенка), $u=u_{Rn}=0$, для знаходження постійних диференціювання C_1 та C_2 запишемо систему рівнянь:

$$\begin{cases} C_1 + C_2 = R - \frac{k_1 k_3}{\omega} \\ \lambda_1 C_1 + \lambda_2 C_2 = -2\omega k_3. \end{cases} \quad (22)$$

Розв'яжемо дану систему методом Крамера:

$$\Delta = \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ \lambda_1 & \lambda_2 \end{vmatrix} = \lambda_2 - \lambda_1; \quad (23)$$

$$\Delta_{C_1} = \begin{vmatrix} R - \frac{k_1 k_3}{\omega} & 1 \\ -2\omega k_3 & \lambda_2 \end{vmatrix} = \lambda_2 \left(R - \frac{k_1 k_3}{\omega} \right) + 2\omega k_3; \quad (24)$$

$$\Delta_{C_2} = \begin{vmatrix} 1 & R - \frac{k_1 k_3}{\omega} \\ \lambda_1 & -2\omega k_3 \end{vmatrix} = -2\omega k_3 - \lambda_1 \left(R - \frac{k_1 k_3}{\omega} \right); \quad (25)$$

$$C_1 = \frac{\Delta_{C_1}}{\Delta} = \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \left[\left(R - \frac{k_1 k_3}{\omega} \right) + \frac{2\omega k_3}{\lambda_2} \right]; \quad (26)$$

$$C_2 = \frac{\Delta_{C_2}}{\Delta} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} \left(\frac{k_1 k_3}{\omega} - \frac{2\omega k_3}{\lambda_1} - R \right). \quad (27)$$

Знаючи постійні інтегрування можна знайти відстань, що проходить мінеральна частинка по лопатці та встановити зміну швидкості її переміщення за встановлений проміжок часу.

Аналогічно, для визначення відносної швидкості та встановлення траєкторії руху органічних частинок біомаси виходячи із рис. 1 (б) складено диференціальне рівняння руху органічної частинки субстрату у вигляді матеріальної точки по лопатці обертового метантенку. Із врахуванням діючих на органічну частинку сил, рівняння її руху по лопатці буде мати вигляд:

$$m \frac{dv_R}{dt} = F_{na} - F_e - F_m - F_{no} - F_{ng}. \quad (28)$$

Сила тертя визначається силами, що притискують частину до лопатки:

$$F_m = f (F_{\tau o} + F_{\tau a} - F_{\tau g} - F_{\kappa}). \quad (29)$$

Із врахуванням (28) та (29) рівняння руху органічної частинки субстрату по поверхні лопатки обертового метантенка можна записати в наступному вигляді:

$$\begin{aligned} \frac{d^2 r}{dt^2} + (2f\omega - k_1) \frac{dr}{dt} - (\omega^2 + fk_1\omega)r = \\ = g [f(k_2 - 1)\cos(\omega t) + (1 - k_2)\sin(\omega t)]. \end{aligned} \quad (30)$$

Отримане рівняння є також лінійним рівнянням другого порядку з постійними коефіцієнтами та правою частиною у вигляді тригонометричного поліному, а відповідного і його розв'язок аналогічний вище наведеному розв'язку рівняння руху мінеральної частинки.

Частковий розв'язок рівняння (30) буде мати вигляд:

$$r_{qp} = \frac{g(f^2 + 1)(k_2 - 1)}{4(\omega^2 f^2 + 1) + k_1^2(f^2 + 1)} \left(2\sin(\omega t) - \frac{k_1}{\omega} \cos(\omega t) \right). \quad (31)$$

Повний розв'язок неоднорідного диференційного рівняння (30), як сума загального та часткового розв'язків наступний:

$$r = C_1 \exp(\lambda_1 t) + C_2 \exp(\lambda_2 t) + \frac{g(f^2 + 1)(k_2 - 1)}{4(\omega^2 f^2 + 1) + k_1^2(f^2 + 1)} \left(2\sin(\omega t) - \frac{k_1}{\omega} \cos(\omega t) \right). \quad (32)$$

Відносна швидкість органічної частинки під час руху по лопатці складе:

$$v_R = \frac{dr}{dt} = \lambda_1 C_1 \exp(\lambda_1 t) + \lambda_2 C_2 \exp(\lambda_2 t) + \frac{g(f^2 + 1)(k_2 - 1)}{4(\omega^2 f^2 + 1) + k_1^2(f^2 + 1)} (2\omega \cos(\omega t) + k_1 \sin(\omega t)). \quad (33)$$

Враховуючи початкові умови: $t=0$, $r=R$ (де R – внутрішній радіус метантенка), $v=u_{Rn}=0$, знайдемо постійні диференціювання C_1 та C_2 :

$$C_1 = \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \left[\left(R + \frac{k_1 k_3}{\omega} \right) + \frac{2\omega k_3}{\lambda_2} \right]; \quad (34)$$

$$C_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} \left(-\frac{2\omega k_3}{\lambda_1} - R - \frac{k_1 k_3}{\omega} \right). \quad (35)$$

Знаючи постійні інтегрування за рівнянням (32) можна знайти відстань, що проходить органічна частинка по лопатці за встановлений проміжок часу. А за рівнянням (33) можна встановити зміну швидкості переміщення органічної частинки по лопатці за встановлений проміжок часу.

Розрахункова схема дії сил на мінеральну (а) та органічну (б) частинки субстрату, що перебувають у вільному русі в об'ємі оборотового метантенка приведена на рис. 2. Для встановлення траєкторії руху мінеральних частинок біомаси виходячи із рис. 2 (а) складено диференційне рівняння руху мінеральних частинок субстрату після сходження із лопаток в об'ємі метантенка. Очевидно, що на мінеральні та органічні частинки субстрату, які рухаються всередині метантенку після сходження із лопаток діють такі сили:

$$F_g = m_q g; F_a = m_q k_2 g; F_o = m_q k_1 v. \quad (36)$$

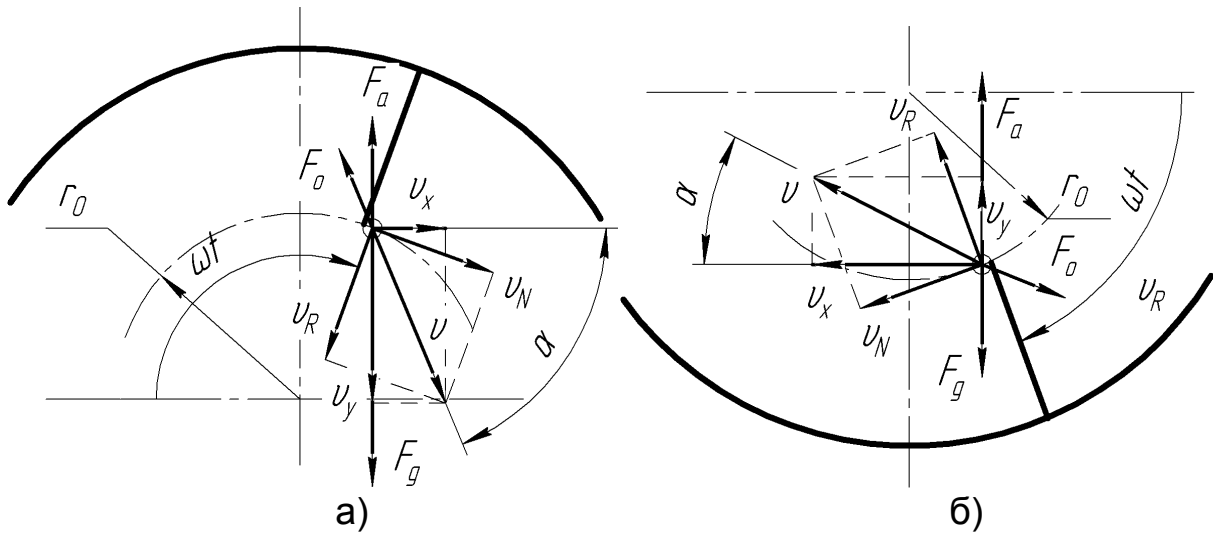


Рис. 2. Схема дії сил на мінеральну (а) та органічну (б) частинки субстрату, що перебувають у вільному русі в об'ємі обертового метантенка: F_g – сила тяжіння, Н; F_a – сила Архімеда, Н; F_o – сила опору субстрату, Н; r_0 – радіус на якому закінчуються лопатки, м; v – абсолютна швидкість частинки, м/с; v_R – відносна швидкість частинки під час сходження із лопатки, м/с; v_N – нормальна швидкість частинки під час сходження із лопатки, м/с; v_x – проекція абсолютної швидкості частинки на вісь x , м/с; v_y – проекція абсолютної швидкості частинки на вісь y , м/с; α – кут між абсолютною швидкістю та її проекцією на вісь x , рад; ωt – кут повороту метантенка при сходженні частинки із лопатки, рад.

Відповідно до рівнянь (36) та з урахуванням того, що мінеральна частинка буде тонути, побудовано рівняння руху центру маси такої частинки:

$$\begin{cases} \frac{d^2 x}{dt^2} = -k_1 v \cos \alpha \\ \frac{d^2 y}{dt^2} = g(k_2 - 1) + k_1 v \sin \alpha, \end{cases} \quad (37)$$

де: x – переміщення мінеральної частинки вздовж осі абсцис, м; y – переміщення мінеральної частинки вздовж осі ординат, м; t – час руху мінеральної частинки після сходження із лопатки метантенка, с.

Для встановлення траєкторії руху органічних частинок біомаси виходячи із рис. 2 (б) та з урахуванням того, що органічна частинка буде спливати, побудовано рівняння руху центру маси такої частинки:

$$\begin{cases} \frac{d^2x}{dt^2} = k_1 v \cos \alpha \\ \frac{d^2y}{dt^2} = g(k_2 - 1) - k_1 v \sin \alpha. \end{cases} \quad (38)$$

Для визначення траєкторій руху мінеральної та органічної частинок після сходження з лопаток метантенка використаний метод послідовного диференціювання [9, 10], який дає наближені розв'язки систем рівнянь (38) та (39) у вигляді степеневого ряду Тейлора.

Враховуючи початкові умови, що відповідають абсолютній швидкості в момент сходження частинки біомаси із лопатки $u=u_0$, кутів між абсолютною швидкістю та її проекцією на вісь в цей момент $\alpha=\alpha_0$, та прийнявши $x_0=0$, $y_0=0$, запишемо:

- для мінеральної частинки:

$$\begin{cases} x = \frac{v_0 \cos \alpha_0}{k_1} [1 - \exp(-k_1 t)] \\ y = \frac{v_0 \sin \alpha_0}{k_1} [\exp(-k_1 t) - 1] + \frac{g(1 - k_2)}{k_1^2} [1 - k_1 t - \exp(-k_1 t)]; \end{cases} \quad (39)$$

- для органічної частинки:

$$\begin{cases} x = \frac{v_0 \cos \alpha_0}{k_1} [\exp(-k_1 t) - 1] \\ y = \frac{v_0 \sin \alpha_0}{k_1} [1 - \exp(-k_1 t)] - \frac{g(1 - k_2)}{k_1^2} [1 - k_1 t - \exp(-k_1 t)]. \end{cases} \quad (40)$$

Згідно до отриманих систем рівнянь можна побудувати траєкторію руху мінеральної та органічної частинок після сходження з лопаток. На основі проведених розрахунків встановлено, що за середньої густини субстрату $\rho_c = 1025-1050 \text{ кг/м}^3$, густини мінеральної частини субстрату $\rho_m = 1150-1250 \text{ кг/м}^3$ та густини органічної частини субстрату $\rho_o = 800-900 \text{ кг/м}^3$, раціональні значення кутової швидкості метантенка становлять $\omega = 0,035-0,08 \text{ с}^{-1}$.

На основі знайдених рівнянь руху мінеральних та органічних частинок компонентів субстрату по лопатках метантенка та після сходження їх із лопаток знайдено траєкторії руху частинок всередині барабана (рис. 3).

За значень кутової швидкості та внутрішнього радіусу метантенка, прийнятих при розрахунку, а також довжині лопатки метантенка $l=(0,775-0,825)R$, мінеральні частинки будуть підійматися у верхню частину метантенка, після чого частинки будуть відокремлюватися від лопатки та рухатися вниз, а органічні частинки субстрату будуть занурюватися у нижню частину біореактора, після чого будуть відокремлюватися від лопатки та рухатися вгору, внаслідок цього буде

забезпечуватися рівномірне перемішування та взаємопроникнення складових субстрату.

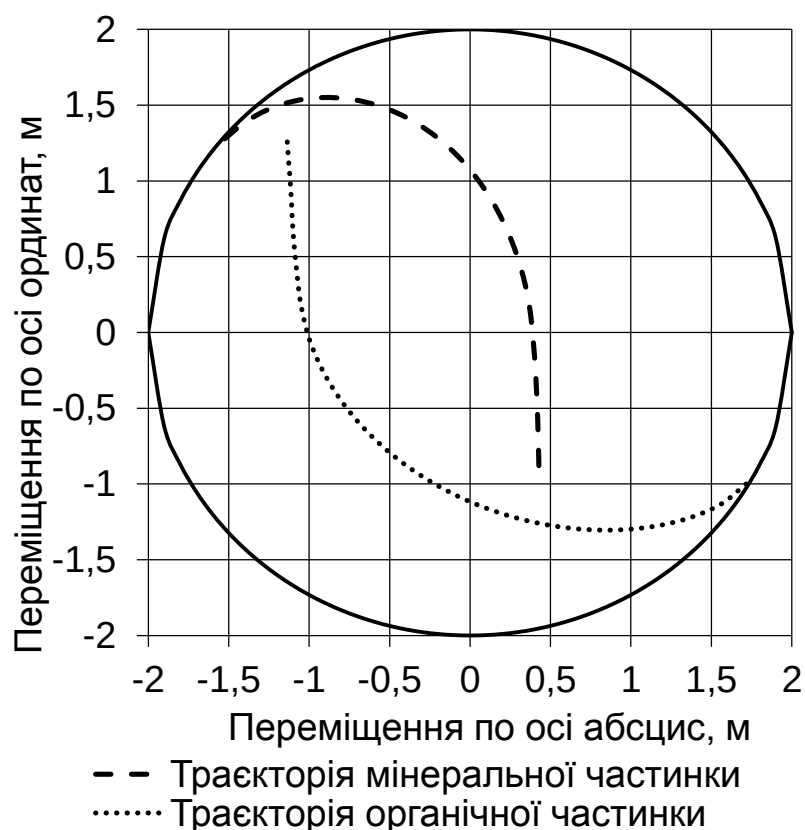


Рис. 3. Приклад розрахунку траєкторії руху частинок субстрату (кутова швидкість обертання метантенка $\omega=0,08$ рад/с, внутрішній радіус метантенка $R=2$ м).

Висновок. Розроблена математичну модель дозволяє встановити раціональні значення кутової швидкості обертового метантенка та його конструктивні параметри на основі визначення параметрів руху частинок біомаси по лопатках та в об'ємі метантенка. Встановлено також, що рівномірне перемішування та взаємопроникнення органічних та мінеральних складових субстрату забезпечується за раціональних значень кутової швидкості метантенка від $0,035$ до $0,08$ с^{-1} та довжині лопаток метантенка від $77,5$ до $82,5$ % його внутрішнього радіуса.

Список літератури

1. *Руководство по биогазу. От получения до использования / Специальное агентство возобновляемых ресурсов (FNR). 5-е издание. – Гюльцов: Германия, 2012. – 213 с.*
2. Голуб Г.А. Технічне забезпечення виробництва біогазу / Г.А. Голуб, О.В. Дубровіна, Б.О. Рубан, В.О. Войтенко // Збірник наукових праць Вінницько-

- го національного аграрного університету. Серія: Технічні науки. – Вінниця, 2012. – Вип. 10. – С. 17–19.
3. Голуб Г. Сучасні тенденції розвитку біогазових установок / Г. Голуб, В. Войтенко, Б. Рубан, В. Єрмоленко // Техніка і технології АПК. – 2012. – № 2 (29). – С. 18–21.
4. Голуб Г.А. Обґрунтування рівня занурення та коефіцієнта заповнення біомасою обертового метантенка / Г.А. Голуб, О.В. Дубровіна // Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: техніка та енергетика АПК. – 2012. – Вип. 170, ч. 2. – С. 55–61.
5. Кухарець С.М. Обґрунтування енергетичних витрат на привід обертового реактора біогазової установки / С.М. Кухарець, Г.А. Голуб // Техніко-технологічні аспекти розвитку та випробування нової техніки і технологій для сільського господарства України / ДНУ УкрНДІПВТ ім. Л. Погорілого. – 2014. – Вип. 18 (32), кн. 2. – С. 356–365.
6. Голуб Г. Особливості конструкції модульної біогазової установки з обертовим реактором / Г. Голуб, С. Кухарець, Б. Рубан // Техніка і технології АПК. – 2014. – № 9 (60). – С. 10–14.
7. Технологія переробки біологічних відходів у біогазових установках з обертовими реакторами / [Г.А. Голуб, О.В. Сидорчук, С.М. Кухарець та ін.; за ред. Г.А. Голуба]. – К.: НУБіП України, 2014. – 106 с.
8. Кухарець С.М. Сировинна база та ефективність виробництва біогазу / С.М. Кухарець, Г.А. Голуб // Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: техніка та енергетика АПК. – 2012. – Вип. 212, ч. 1. – С. 11–21.
9. Бронштейн И.Н. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов / И.Н. Бронштейн, К.А. Семендяев. – 13-е изд., испр. – М.: Наука, 1986. – 544 с.
10. Голуб Г.А. Агропромислове виробництво їстівних грибів. Механіко-технологічні основи / Г.А. Голуб. – К.: Аграрна наука, 2007. – 332 с.

Разработана математическая модель для определения параметров движения частиц биомассы во вращающемся метантенке, которая позволяет установить рациональные значения угловой скорости метантенка и его конструктивные параметры.

Биомасса, метантенк, биогаз, перемешивания, движение частицы.

The mathematical model to determine the parameters of particle motion in a rotating biomass digesters, which allows establishing rational values of angular velocity digesters and its design parameters is developed.

Biomass, digesters, biogas, mixing, motion of particle.