
УДК 620.952:662.767.2

Голуб Г., д-р техн. наук, професор, (НУБіП України), **Кухарець С.**, д-р техн. наук, професор, (ЖНАУ), **Марус О.**, канд. тех. наук, доцент (НУБіП України), **Ярош Я.**, канд. тех. наук, доцент (ЖНАУ)

Механіка руху частинок по обертових лопатках реакторів збродження

Відповідно до запропонованої технологічної схеми модульної біогазової установки розглядаються нові технічні рішення в системі перемішування реагента в метановому реакторі, які полягають у використанні зміни напрямку дії гравітаційних сил, які впливають на переміщення легкої і важкої фракцій біомаси, які заповнюють циліндричний внутрішній обертовий корпус з діаметрально виконаною перегородкою.

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

Ключові слова: агроєкосистема, біогаз, біопаливо, перемішування, ефективність, технологія, параметри, реактор, метантенк.

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 через порушення симбіозу ацетогенних та метаногенних бактерій. На практиці компроміс досягається повільним обертання мішалок або їхньою роботою 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 біомасу, яка плаває, що вказує на недоліки в роботі систем перемішування біомаси [2, 3].

Тому розроблення та обґрунтування методів визначення параметрів руху частинок біомаси в обертвовому метантенку, дозволять встановити раціональні значення технологічних та конструкційних параметрів біореактора.

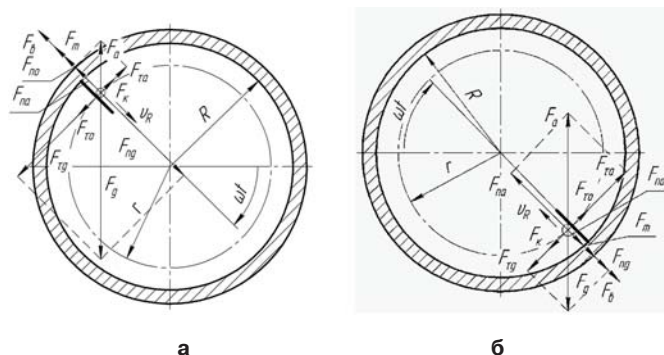
Аналіз останніх досліджень і публікацій. У результаті проведених наукових досліджень нами запатентовано ряд технічних рішень, які дозволяють у значній мірі усунути розшарування біомаси перемішуванням шарів біомаси зануреними обертвовими біогазовими реакторами. Визначено також рівень занурення обертвового метантенка в рідину, а також коефіцієнт його заповнення залежно від його геометричних параметрів та густини рідини, в яку він занурений. Встановлено також, що потужність, яка витрачається на подолання моменту опору в підшипниках залежить від рівня органічної біомаси в метантенку, його ваги, а також характеристик біогазу та біомаси [4, 5]. Потужність, яка 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 і перегородок всередині метантенка) [6, 7].

Однак, для запобігання розшаруванню біомаси та забезпечення її перемішування підняттям мінеральної складової біомаси, яка накопичується в нижній частині метантенка, та зануренням органічної складової біомаси, яка накопичується у верхній частині метантенка, необхідно знати параметри та траєкторії руху мінеральних та органічних частинок біомаси по перемішувальних лопатках та в порожнині обертвового метантенка.

Формулювання мети статті. Теоретично встановити параметри та траєкторії руху мінеральних та органічних частинок біомаси по перемішувальних лопатках та в порожнині метантенка в процесі його обертання.

Виклад основного матеріалу дослідження. У пропонованій нами модульній біогазовій установці [5, 8, 9, 10] для усунення розшарування біомаси та забезпечення її перемішування підняттям мінеральної складової біомаси, яка накопичується у нижній частині метантенка та занурення органічної складової біомаси, яка накопичується у верхній частині метантенка, необхідно мати значення переміщення та відносної швидкості частинок біомаси на перемішувальних

лопатках обертвового метантенка (рис. 1).



а **б**
 F_g – сила тяжіння, Н; F_a – сила Архімеда, Н; F_m – сила тертя, Н; F_k – коріолісова сила інерції, Н; F_b – відцентрова сила інерції, Н; F_{no} – сила, що притискує частинку до лопатки завдяки опору субстрату, Н; F_{no} – сила опору субстрату, яка протидіє руху частинки у радіальному напрямку, Н; r – поточний радіус положення частинки субстрату, м; v_R – відносна швидкість органічної частинки під час руху по лопатці, м/с; R – внутрішній радіус метантенка, м; ωt – кут повороту метантенка, рад.
 Рис. 1 – **Схема дії сил на мінеральні (а) та органічні (б) частинки субстрату**

Об'єднане диференціальне рівняння руху мінеральних (верхні знаки) та органічних (нижні знаки) частинок субстрату по лопатках обертвового метантенка має такий вигляд:

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

де r – поточний радіус положення частинки субстрату, м; f – коефіцієнт тертя частини субстрату по матеріалу лопатки метантенка, віднос. од.; ω – кутова швидкість обертання метантенка, c^{-1} ; g – прискорення земного тяжіння, m/c^2 ; t – час руху метантенка, с; k_1 – коефіцієнт пропорційності під час ламінарного обтікання органічних частинок субстратом, c^{-1} ; $k_2 = 18\eta/(\rho_c d_E^2)$; k_2 – коефіцієнт відношення густини, $k_2 = \rho_c/\rho_c$; ρ_c – густина субстрату, kg/m^3 ; ρ_c – густина частинки, kg/m^3 ; η – динамічна в'язкість субстрату, $Pa \cdot s$; d_E – еквівалентний діаметр, м.

Із урахуванням початкових умов під час роботи обертвового метантенка отримано переміщення, відносну швидкість та постійні диференційного рівняння, які становлять:

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

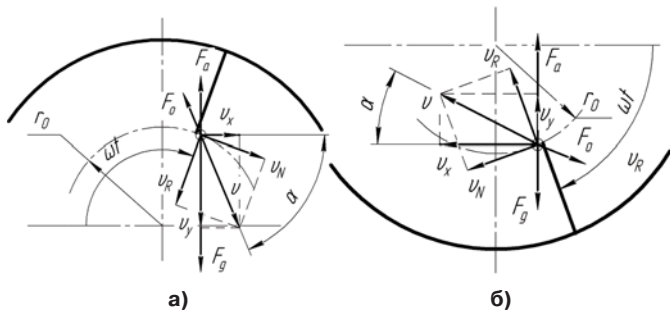
$$v_R = \frac{dr}{dt} = \lambda_1 C_1 \exp(\lambda_1 t) + \lambda_2 C_2 \exp(\lambda_2 t) + \frac{g(f^2 + 1)(k_2 - 1)}{4(\omega^2 f^2 + 1) + k_1^2(f^2 + 1)} (2\omega \cos(\omega t) \mp k_1 \sin(\omega t)) \quad (3)$$

$$C_1 = \frac{\Delta C_1}{\Delta} = \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \left[\left(R \mp \frac{k_1 k_3}{\omega} \right) + \frac{2\omega k_3}{\lambda_2} \right] \quad (4)$$

$$C_2 = \frac{\Delta C_2}{\Delta} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} \left(\pm \frac{k_1 k_3}{\omega} - \frac{2\omega k_3}{\lambda_1} - R \right) \quad (5)$$

$$k_3 = \frac{g(f^2 + 1)(k_2 - 1)}{4(\omega^2 f^2 + 1) + k_1^2(f^2 + 1)};$$

$$\lambda_{1,2} = \frac{k_1}{2} - f\omega \mp \sqrt{\omega^2(f^2 + 1) + \frac{k_1^2}{4}}$$



F_g – сила тяжіння, Н; F_a – сила Архімеда, Н; F_o – сила опору субстрату, Н; r_o – радіус, на якому закінчуються лопатки, м; ϑ – абсолютна швидкість частинки, м/с; ϑ_r – відносна швидкість частинки під час сходження із лопатки, м/с; ϑ_n – нормальна швидкість частинки під час сходження із лопатки, м/с; ϑ_x – проекція абсолютної швидкості частинки на вісь x, м/с; ϑ_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.

Рис. 2 – Схема дії сил на мінеральну (а) та органічну (б) частинки субстрату, що перебувають у вільному русі в об'ємі обертового метантенка

Розрахункова схема дії сил на мінеральну (а) та органічну (б) частинки субстрату, які перебувають у вільному русі в порожнині обертового метантенка, наведена на рис. 2. Для встановлення траєкторії руху мінеральних частинок складено систему диференціальних рівнянь руху мінеральних частинок субстрату після сходження із лопаток в порожнині метантенка з початковими умовами, які відповідають абсолютній швидкості в момент сходження частинки біомаси із лопатки $\vartheta = \vartheta_0$, кутові між абсолютною швидкістю та її проекцією на вісь в цей момент $\alpha = \alpha_0$, та прийнявши, що $x_0 = 0$, $y_0 = 0$, отримаємо:

$$\begin{cases} x = \frac{v_0 \cos \alpha_0}{k_1} [\pm 1 \mp \exp(-k_1 t)] \\ y = \frac{v_0 \sin \alpha_0}{k_1} [\mp \exp(-k_1 t) \pm 1] \pm \\ \pm \frac{g(1 - k_2)}{k_1^2} [1 - k_1 t - \exp(-k_1 t)] \end{cases} \quad (6)$$

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

На основі отриманих розв'язків рівнянь встановлено, що за середньої густини субстрату $\rho_c = 1025-1050$ кг/м³, мінеральної частини субстрату $\rho_m = 1150-1250$

кг/м³ та органічної частини субстрату $\rho_o = 800-900$ кг/м³ раціональні значення кутової швидкості метантенка становлять $\omega = 0,035$ 0,08 с⁻¹ за довжини лопатки метантенка $l = (0,775$ 0,825)R.

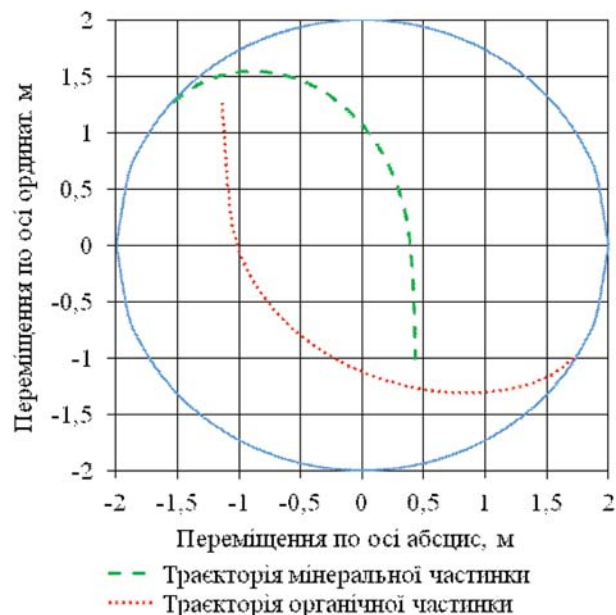


Рис. 3 – Приклад розрахунку траєкторії руху частинок субстрату (кутова швидкість обертання метантенка $\omega = 0,08$ рад/с, внутрішній радіус метантенка $R = 2$ м)

За цих значень кутової швидкості та довжини лопатки 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.

Висновки. Розроблена математична модель дозволяє встановити раціональні значення кутової швидкості обертового метантенка та його конструкційні параметри, виходячи із рівномірного перемішування та взаємопроникнення органічних та мінеральних складових субстрату, на основі визначення параметрів руху частинок біомаси по лопатках та в порожнині метантенка. Пропоновані рівняння можуть бути використанні для розрахунку широкого спектру ротаційних змішувачів, які оснащені лопатками.

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 Вінницького національного аграрного університету. Серія: Технічні науки. – Вінниця, 2012. – Вип. 10. – 186 с. – С. 17-19.
3. Голуб Г. Сучасні тенденції розвитку біогазових установок / Г. Голуб, В. Войтенко, Б. Рубан, В.

Ермоленко // Техніка і технології АПК (Науково-виробничий журнал). – 2012. – № 2 (29). – С. 18-21.

4. Кухарець С.М. Обґрунтування енергетичних витрат на привід обертового реактора біогазової установки / Кухарець С.М., Голуб Г.А. // Техніко-технологічні аспекти розвитку та випробування нової техніки і технологій для сільського господарства України: збірник наук. пр. / ДНУ УкрНДІПВТ ім. Л. Погорілого. – 2014. – Вип. 18 (32), кн. 2. – С. 356-365.

5. Голуб Г.А. Особливості конструкції модульної біогазової установки з обертовим реактором / Голуб Г., Кухарець С., Рубан Б. // Техніка і технології АПК (Науково-виробничий журнал). – 2014. – № 9 (60). – С. 10-14.

6. 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.

7. Кухарець С.М. Сировинна база та ефективність виробництва біогазу / Кухарець С.М., Голуб Г.А. // Наук. вісн. Нац. ун-ту біоресурсів і природокористування України. Серія техніка та енергетика АПК. – 2015. – Вип. 212, ч. 1. – С. 11–21.

8. Пат. 110077 Україна, МПК C02F 11/04, C02F 3/28. Метантенк / Голуб Г. А., Кухарець С. М. ; заявник і патентовласник Нац. ун.-т. біоресурсів і природокористування України. – № а 2014 09259; заявл. 19.08.2014; дата публікації 10.11.2015, Бюл. № 21.

9. Кухарець С.М. Обґрунтування енергетичних витрат на привід обертового реактора біогазової установки / Кухарець С.М., Голуб Г.А. // Техніко-технологічні аспекти розвитку та випробування нової техніки і технологій для сільського господарства України: збірник наук. пр. / ДНУ УкрНДІПВТ ім. Л. Погорілого. – Дослідницьке, 2014. – Вип. 18 (32), кн.2. С.356-365.

10. Особливості виробництва біопалива та отримання енергії в умовах агропромислового виробництва / Г. А. Голуб, С. М. Кухарець, В. О. Шубенко, Н. М. Бовсунівська // Техніка і технології АПК. – 2015. – № 2 (65). – С. 31–34.

Аннотація. В соответствии с предложенной технологической схемой модульной биогазовой установки рассматриваются новые технические решения в системе перемешивания реагирующего субстрата в метановом реакторе, которые заключаются в использовании изменения направления действия гравитационных сил, влияющих на перемещение легкой и тяжелой фракций биомассы, заполняют внутренний вращающийся корпус, выполненный в виде цилиндра с диаметральной перегородкой.

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

Summary. According to the proposed technological scheme modular biogas plant considered new technical solutions in the mixing reactant substrate in the methane reactor, which is to use changes in the direction of action of gravitational forces affecting the movement of the light and heavy fractions biomass filled inner rotating body formed as a cylinder with a diametrical partition.

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.

Стаття надійшла до редакції 11 лютого 2016 р.