УДК 620.95

ОБҐРУНТУВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ВИТРАТ НА ПРИВІД ОБЕРТОВОГО РЕАКТОРА БІОГАЗОВОЇ УСТАНОВКИ

С.М. Кухарець, кандидат технічних наук, докторант
Г.А. Голуб, доктор технічних наук, професор
Науково-дослідний інститут техніки і технологій Національного університету біоресурсів і природокористування України

Наведено результати теоретичних досліджень по визначенню енергетичних витрат на привід обертового реактора біогазової установки.

Ключові слова: реактор, біомаса, біогаз, перемішування, потужність.

Постановка проблеми. Підвищення енергетичної ефективності біогазових установок є одним із головних напрямків покращення технологічного процесу виробництва біогазу, а тому обґрунтування методів визначення питомої потужності та енергетичних параметрів експлуатації біогазових установок потребує постійного удосконалення.

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 припинення 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].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В результаті проведених нами наукових досліджень розроблено ряд запатентованих 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 (відстань від його центра обертання до рівня рідини, в яку він занурений), а також коефіцієнт його заповнення (відстань від центра обертового метантенка до рівня біомаси в ньому) від геометричних параметрів обертового метантенка та густини рідини, в яку занурений обертовий метантенк при забезпеченні його знаходження у завислому стані [4].

Формулювання цілей статті. Визначити енергоємність обертання реактора у завислому стані, зануреним у воду.

Виклад основного матеріалу дослідження Використана при проведенні досліджень розрахункова схема обертового реактора приведена на рис. 1.

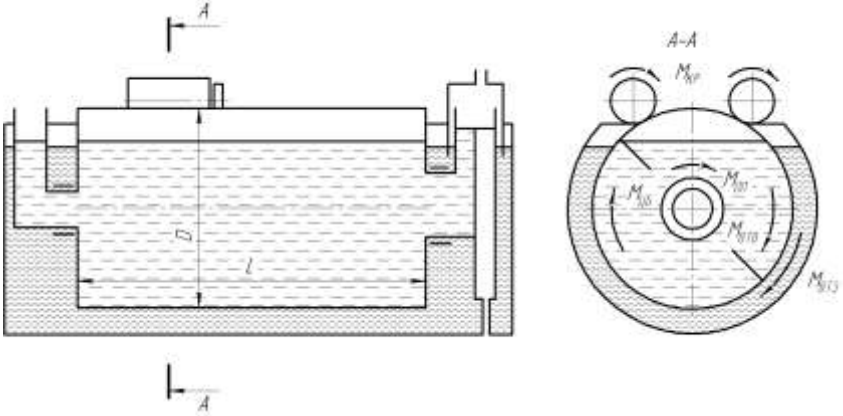

Рис. 1. Розрахункова схема обертового реактора:
D – внутрішній діаметр реактора, м; *L* – робоча довжина реактора, м; M_{KP} – крутний момент для забезпечення обертання реактора, Н·м; $M_{ОП}$ – момент опору підшипникових вузлів, Н·м; $M_{ВТЗ}$ – момент в'язкого тертя зовнішньої поверхні реактора об рідину, в яку занурений реактор, Н·м; $M_{ВТВ}$ – момент в'язкого тертя внутрішньої поверхні реактора об рідку біомасу, яка знаходиться в реакторі, Н·м; $M_{ЦБ}$ – момент, необхідний для забезпечення циркуляції біомаси в реакторі, Н м.

У загальному випадку рівняння динаміки обертання реактора має наступний вигляд:

$$J\frac{d\omega}{dt} = M_{KP} - M_{ОП} - M_{ВТЗ} - M_{ВТВ} - M_{ЦБ} \qquad (1)$$

де M_{KP} – крутний момент для забезпечення обертання реактора, Н·м; $M_{ОП}$ – момент опору підшипникових вузлів, Н·м; $M_{ВТЗ}$ – момент в'язкого тертя зовнішньої поверхні реактора об рідину, в яку занурений реактор, Н·м; $M_{ВТВ}$ – момент в'язкого тертя внутрішньої поверхні реактора об рідку біомасу, яка знаходиться в реакторі, Н·м; $M_{ЦБ}$ – момент, необхідний для забезпечення циркуляції біомаси в реакторі, Н м; J – момент інерції метантенка відносно осі його обертання, кг·м^2; $\frac{d\omega}{dt}$ - кутове прискорення обертання реактора, рад/с^2.

Помноживши кожен член рівняння (1) на кутову швидкість обертання реактора, та взявши за припущення, що момент в'язкого тертя внутрішньої поверхні реактора об рідку біомасу, яка знаходиться в реакторі можна врахувати при визначенні моменту, необхідного для забезпечення циркуляції біомаси в реакторі, отримаємо:

$$N_{КР} = N_{ОП} + N_{ВТЗ} + N_{ЦБ} + J\omega\frac{d\omega}{dt} \quad (2)$$

де ω – кутова швидкість обертання реактора, рад/с; $N_{КР}$ – потужність для забезпечення обертання реактора, Вт; $N_{ОП}$ – потужність опору підшипникових вузлів, Вт; $N_{ВТЗ}$ – потужність в'язкого тертя зовнішньої поверхні реактора об рідину, в яку занурений реактор, Вт; $N_{ЦБ}$ – потужність для забезпечення циркуляції біомаси в реакторі під час його обертання, Вт.

Аналізуючи даний вираз, який по суті є енергетичним балансом обертового реактора, можна сказати, що постійне значення споживаної потужності буде лише при повному заповненні внутрішнього об'єму метантенка.

Момент опору підшипникових вузлів буде залежати від занурення реактора в рідину. Без занурення момент опору підшипникових вузлів максимальний, по мірі занурення він буде зменшуватися, оскільки сила Архімеда буде компенсувати вагу реактора. При подальшому зануренні момент опору підшипникових вузлів знову буде збільшуватися через перекомпенсацію ваги реактора силою Архімеда.

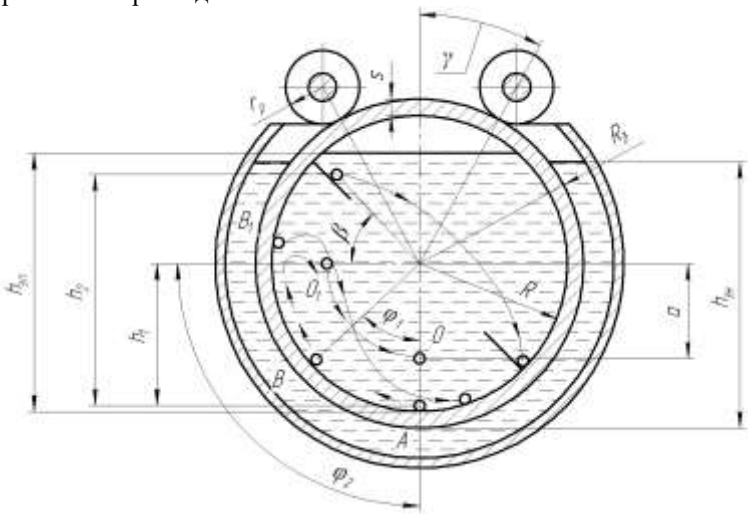

Рис. 2. Розрахункова схема для розрахунку затрат енергії на циркуляцію біомаси:

h_1– висота піднімання біомаси під дією сил тертя, м; h_2- висота підіймання біомаси лопатями, м; $h_{зп}$ – висота заповнення реактора біомасою, м; $h_{зн}$ – глибина занурення реактора, м; s – товщина стінки реактора, м; R – внутрішній радіус біореактора, м; $R_Б$ – зовнішній радіус біореактора, м; r_r – радіус ролика, м; a – відстань від осі реактора до частинки біомаси після однієї циркуляції, м; γ – кут установлення привідних роликів, град; φ_1 – теоретичний кут піднімання частинки біомаси, град; φ_2 – дійсний кут піднімання частинки біомаси, град; β – кут тертя між біомасою та матеріалом біореактора, град.

Потужність для забезпечення обертання ректора (рис. 2), виходячи із формули 2 із врахуванням власних досліджень та відповідних досліджень [4, 5, 6, 7, 8] можна записати у вигляді:

$$N_{KP} = \omega f d_n g \left| R_Б^2 L \rho \left(\pi - \frac{2\arccos\left(\frac{h_{зн} - R_Б}{R_Б}\right) - \sin\left(2\arccos\left(\frac{h_{зн} - R_Б}{R_Б}\right)\right)}{2} \right) - \right.$$

$$\left. -\pi \left(R^2 L \rho_б k_з + k_k \rho_м \left(\left(R_Б^2 - R^2 \right) L + 2 R_Б^2 s \right) + R^2 L \rho_Г \left(1 - k_з\right) \right) \right| + 4 L \eta \omega^2 \arcsin\left(\frac{h_{зн} - R_Б}{R_Б}\right) \frac{R_Б^2 R_З^2}{R_З^2 - R_Б^2} + \quad (3)$$

$$+ \pi R^2 L \rho_Б g k_з k_{см} \left(\frac{(1-k)\omega}{2\varphi_2} + \frac{k\left(1+\sin\beta\right)}{\frac{\pi}{2}+\beta + \frac{9R\left(1+\sin\beta\right)\eta_Б}{2\left(\rho_Б^{'} - \rho_Б\right) g r_{ср}}} \right) + \frac{\pi R_Б^4}{4} \omega \frac{d\omega}{dt};$$

де N_{KP} – потужність для забезпечення обертання реактора, Вт; ω – кутова швидкість обертання реактора, рад/с; L– довжина біореактора, м; R – внутрішній радіус біореактора, м; $R_Б$ – зовнішній радіус біореактора, м; $R_З$ – внутрішній радіус зовнішнього, заповненого рідиною корпуса, м; $d_П$ – діаметр цапфи підшипника, м; s – товщина стінки реактора, м; $h_{зн}$ - глибина занурення реактора, м; β – кут тертя між біомасою та матеріалом біореактора, рад; φ_2 – дійсний кут піднімання елементарної частинки біомаси в результаті взаємодії з іншими частинками біомаси, рад; $\eta_Б$ – динамічна в'язкість біомаси в реакторі, Па·с; η – динамічна в'язкість рідини в яку занурено реактор, Па·с; $r_{ср}$ - середній розмір твердої частинки біомаси, м; $\rho_Б^{/}$- щільність твердої фракції біомаси, кг/м^3; $\rho_Б$ - щільність біомаси, кг/м^3; $\rho_м$ – об'ємна маса матеріалу із якого виготовлено реактор, кг/м^3; $\rho_Г$ – щільність біогазу, кг/м^3; ρ- щільність рідини, в яку занурено біореактор, кг/м^3; g– прискорення вільного падіння, м/с^2; f – коефіцієнт тертя кочення; $k_з$ – коефіцієнт заповнення біореактора біомасою; $k_{см}$ - коефіцієнт вмісту в біомасі сухої маси; k – коефіцієнт, що характеризує ступінь впливу лопаток на перемішування біомаси в обертовому реакторі; $k_к$ – конструкційний коефіцієнт, що враховує збільшення ваги біореактора за рахунок додаткових конструкційних елементів (лопаток та ін.).

Отримані залежності дозволяють визначити глибину занурення обертового біогазового реактора в рідину, коефіцієнт заповнення реактора біомасою, що забезпечують мінімальні енергетичні витрати на обертання біореактора.

Виходячи із розв'язку рівняння (3) можна встановити параметри при яких витрати енергії на обертання метантенка будуть мінімальні. Аналіз цього рівняння вказує на те що потужність, що витрачається на подолання моме-

нту опору в підшипниках залежить від рівня органічної біомаси в ньому, ваги метантенка, характеристик біогазу та біомаси, так як це впливає на величину сили що, діє на підшипники, на яких встановлено метантенк. Потужність, що витрачається на перемішування біомаси залежить від характеристик біомаси (густини, вмісту сухої речовини, розміру частинок сухої речовини) та конструкційних характеристик метантенка (кутова швидкість, геометричні розміри: внутрішній радіус та робоча довжина розміри та розміщення лопаток,мішалок та перегородок всередині метантенка.

Потужність, що витрачається на подолання сил в'язкого тертя в основному залежить від швидкості обертання метантенку, та при швидкостях при яких він обертається, величина даної потужність прямує до нуля. Тому нею можна знехтувати. Крім, того при прискореннях кутової швидкості для обертового метантенку незначні, то і потужність, що витрачається на подолання моменту інерції метантенка незначна.

Параметри, що впливають на потужність обертання біореатора, представленні в табл. 1

Таблиця 1. Параметри, що впливають на витрати енергії при обертанні біореактора

Назва параметра	Позначення	Розмірність	Розрахункове чи прийняте значення	Примітка
1	2	3	4	5
Параметри біореактора				
Геометричні				
Внутрішній радіус	R	м	1,7	[8]
Робоча довжина	L	м	8,0	
Зовнішній радіус	$R_Б$	м	1,705	
Технологічні				
Коефіцієнт заповнення біомасою	$k_З$		0,94	власні дослідження
Кутова швидкість	ω	рад/с	0,1	
Глибина занурення	$h_{зн}$	м	3,4	
Кутове прискорення	$\frac{d\omega}{dt}$	рад/с^2	0,1	
Конструкційні				
Коефіцієнт, що характеризує вплив внутрішньої конструкції біореактора на інтенсивність перемішування	k		0,5	власні дослідження

продовження таблиці 1

1	2	3	4	5
Діаметр цапф підшипників	$d_П$	м	0,5	[12]
Тип підшипників (коефіцієнт тертя в підшипниках)	f		0,1	
Конструкційний коефіцієнт збільшення ваги	$k_к$		1,1	
Товщина стінок	s	м	0,005	[13]
Об'ємна маса матеріалу із якого виготовлено реактор	$\rho_м$	кг/м^3	4830	
Параметри зовнішнього корпуса				
Геометричні				
Внутрішній радіус	$R_З$	м	1,8	[8]
Технологічні				
Динамічна в'язкість рідини в яку занурено реактор	η	Па·с	0,005	[8, 11]
Щільність рідини в яку занурено біореактор	ρ	кг/м^3	1000	
Параметри біомаси				
Щільність	$\rho_Б$	кг/м^3	1030	[1, 8, 9, 10]
Щільність твердої фракції (сухої маси)	$\rho_Б^/$	кг/м^3	1240	
Динамічна в'язкість	$\eta_Б$	Па·с	0,15	
Середній розмір частинки твердої фракції	$r_{ср}$	м	0,01	
Коефіцієнт, що характеризує вміст сухої маси	$k_{см}$		0,1	
Параметри біогазу				
Щільність	$\rho_Г$	кг/м^3	1,20	[1, 8, 10]
Емпіричні параметри				
Кут тертя між біомасою та матеріалом біореактора	β	рад	0,61	[8,13]
Кут піднімання частинки біомаси в результаті взаємодії із іншими частинками	φ_2	рад	2,36	власні дослідження

продовження таблиці 1

1	2	3	4	5
Потужність на перемішування біомаси	$N_{ЦБ}$	Вт	5456,9	розрахункові величини
Потужність на подолання сил в'язкого тертя	$N_{ВТЗ}$	Вт	Близько 0	
Потужність, що витрачається на подолання моменту опору в підшипниках	$N_{ОП}$	Вт	близько 0	
Потужність на подолання сили інерції	N_I	Вт	близько 0	
Потужність для забезпечення обертання реактора	$\boldsymbol{N_{КР}}$	**Вт**	**5457,0**	

Очевидно, що одним із показників що мають значний вплив на енерговитрати при обертанні метантенка та показники його роботи є відношення об'єму запевненого біомасою та загального об'єму метантенка, або коефіцієнт заповнення $k_З$.

При рекомендованих параметрах біомаси, біогазу та обраних конструкційних параметрах біореактора, можна оцінити вплив коефіцієнту заповнення, на витрати енергії при обертанні метантенка та визначити його оптимальне значення.

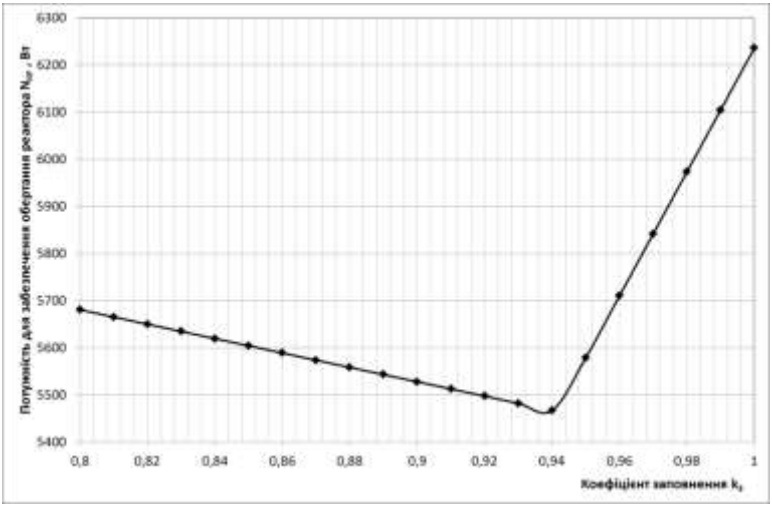

Рис.3 Залежність потужності для забезпечення обертання біореактора від коефіцієнту заповнення (при повному зануренні біореактора)

Висновки з даного дослідження

1. Потужність, що витрачається на подолання моменту опору в підшипниках залежить від рівня органічної біомаси в ньому, ваги метантенка, характеристик біогазу та біомаси, так як це впливає на величину сили що, діє на підшипники, на яких встановлено метантенк. Потужність, що витрачається на перемішування біомаси залежить від характеристик біомаси (густини, вмісту сухої речовини, розміру частинок сухої речовини) та конструкційних характеристик метантенка (кутова швидкість, геометричні розміри: внутрішній радіус та робоча довжина розміри та розміщення лопаток,мішалок та перегородок всередині метантенка.

2. При рекомендованих параметрах біомаси, біогазу та обраних конструкційних параметрах біореактора, можна оцінити вплив коефіцієнту заповнення, на витрати енергії при обертанні метантенка та визначити його оптимальне значення. Для параметрів наведених в таблиці 1, значення коефіцієнту заповнення – 0,95.

3. Використання залежності 1 дозволяє підібрати при проектуванні обертових метантенків основні конструкційні параметри, що дозволяють отримати мінімальні енерговитрати без зниження якості роботи метантенка.

Бібліографічний список

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. 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 – К., 2012. – Вип. 170, ч. 2. – 387 с. – С. 55-61.

5. Бауман В.А. Механическое оборудование предприятий строительных материалов, изделий и конструкций / В.А. Бауман, Б.В. Клушанцев, В.Д. Мартынов. – М.: Машиностроение, 1981. – 324 с.

6. Гідравліка та ії використання в агропромисловому комплексі: підручник [В.А. Дідур, О.Д. Савченко, Д.П. Журавель та ін.] – К.: «Аграрна освіта», 2008. – 577 с.

7. Новітні технології біоконверсії: Монографія [Я.Б. Блюм, Г.Г. Гелетуха, І.П. Григорюк та ін.]. – К. «Аграр Медіа Груп», 2010. – 326 с.

8. 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.

9. Брагинец Н.В. Курсовое и дипломное проектирование по механизации животноводства / Н.В. Брагинец, Д.А. Палишкин. – М.: Агропромиздат, 1991. – 191с.

10. Биомасса как источник енергии: Пер с. англ. / Под ред. С. Соуфера, О. Забарски. – М.: Мир, 1985. – 368 с.

11. Куклинг Х. Справочник по физике: Пер с нем. / Кухлинг Х. // 2-е изд. М.: Мир, 1985. – 520 с.

12. Анурьев В.И. Справочник конструктора-машиностроителя: в 3-х т. / В.И. Анурьев // Т.2. – 9-е изд., перераб и доп. / под ред. Н.А. Жестоковой. - М.: Машиностроение, 2006. – 290с.

13. Писаренко Г.С. Справочник по сопротивлению материалов / Г.С. Писаренко, А.П. Яковлев, В.В. Матвеев // 2-е изд., перераб и доп. / под ред. Г.С. Писаренко. - К.:Наукова думка, 1988. – 736с.

Аннотация

The results of theoretical research to determine the cost of the energy to drive the rotating reactor biogas unit.

Summary

Приведены результаты теоретических исследований по определению энергетических затрат на привод вращающегося реактора биогазовой установки.