

УДК: 662.767.2

О. О. Землянка;

М. В. Губінський, д. т. н., проф.

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ФЛОТАЦІЙНИХ ПРОЦЕСІВ НА ПРОДУКТИВНІСТЬ БІОГАЗОВОЇ УСТАНОВКИ

Проведено лабораторні та промислові дослідження негативного впливу флоатаційних процесів на продуктивність ферментатора біогазової установки. Оцінено вплив цього фактору в залежності від часу в конкретних умовах протікання процесу.

Вступ

У сучасній теплоенергетиці роль альтернативних джерел енергії безперервно зростає. Один з перспективних методів отримання альтернативних джерел енергії є отримання біогазу шляхом анаеробного бродіння органічних відходів. Успішне застосування його в дрібних сільськогосподарських фермах залежить від досконалості діючих анаеробних процесів та їх оптимізації. Однією з необхідних умов безперервного протікання процесу та підвищення його продуктивності в установках малої потужності, що підтверджено експериментальними дослідженнями, є перемішування.

З метою визначення впливу технологічних параметрів на процес ферментації з використанням перемішування та отримання оптимальних режимів роботи біогазової установки проведено імітаційне дослідження з використанням математичної моделі [1]. Структурно математична модель метаногенерації (анаеробного бродіння) складається з блоків, які описують гідродинаміку, теплообмін, та кінетику в реакторі біогазової установки. Система рівнянь, яка описує кінетику в циліндричному реакторі біогазової установки, має вигляд:

$$\begin{cases} \frac{\partial W}{\partial \tau} + \frac{\partial(uW)}{\partial r} + \frac{\partial(vW)}{\partial z} + \frac{uW}{r} = -kWf_h(S); \\ \frac{\partial S}{\partial \tau} + \frac{\partial(uS)}{\partial r} + \frac{\partial(vS)}{\partial z} + \frac{uS}{r} = D_S \left(\frac{\partial^2 S}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 S}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial S}{\partial r} \right) + \chi kWf_h(S) - \rho_m T_f f_m(S) \frac{SB}{K_S + S}; \\ \frac{\partial B}{\partial \tau} + \frac{\partial(uB)}{\partial r} + \frac{\partial(vB)}{\partial z} + \frac{uB}{r} = D_B \left(\frac{\partial^2 B}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 B}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial B}{\partial r} \right) + Y_i \rho_m T_f f_m(S) \frac{SB}{K_S + S} - k_d B; \\ \frac{\partial P}{\partial \tau} + \frac{\partial(uP)}{\partial r} + \frac{\partial(vP)}{\partial z} + \frac{uP}{r} = A(1 - Y_i) \rho_m T_f f_m(S) \frac{SB}{K_S + S}, \end{cases} \quad (1)$$

де r, z — поточні координати; u, v — радіальна та осьова складові швидкості; W — концентрація органічної речовини; k — константа гідролізу; k_d — коефіцієнт розпаду біомаси; S — концентрація субстрату — летючих жирних кислот (ЛЖК); χ — стехіометричний коефіцієнт видобутку субстрату з органічної речовини; B — концентрація метаногенних мікроорганізмів; P — концентрація продуктів метаболізму; ρ_m — максимальна питома швидкість утилізації ЛЖК; K_S — константа швидкості, що дорівнює концентрації субстрату, за якої швидкість росту культури дорівнює половині максимальної; $f_h(S)$ — функція інгібування стадії гідролізу субстратом; $f_m(S)$ — функція інгібування стадії метаноутворення субстратом; D_S — коефіцієнт дифузії субстрату; D_B — коефіцієнт дифузії мікроорганізмів; Y_i — економічний коефіцієнт виходу одиниці продукту з одиниці біомаси ($\partial P / \partial B$); A — масова частка метану в біогазі; T_f — безрозмірна температурна функція для реакцій метаноутворення [4]

© О. О. Землянка, М. В. Губінський, 2010

$$T_f = e^{-(t_m - t)^2 / \sigma^2},$$

де t — температура рідини, °C; t_m — оптимальна температура розвитку мікроорганізмів.

Вона дозволяє отримати дані розподілу концентрацій речовин у об'ємі реактора, середньоінтегровані величини концентрацій і температури.

Вплив перемішування враховано наявністю кінематичних складових в лівих частинах рівнянь збереження хімічної компоненти. Перемішування приводить до зміни поля концентрації кожної з речовин та поля температур у об'ємі реактора. Числове дослідження впливу кожного з цих факторів для мезофільного режиму описано в роботі [2], і дозволяє стверджувати, що під час перемішування частка збільшення виходу газу за рахунок вирівнювання перепаду концентрацій в об'ємі реактора не може перевищувати 7 %, а за рахунок вирівнювання перепаду температур — 43 %.

Результати розрахунків з використанням математичної моделі [1] (рис. 1) достатньо збігаються з практичними [4] тільки у випадку наявності достатнього перемішування або низькій концентрації органічної речовини в реакторі ($W < 5$ %).

динаміка виходу метана

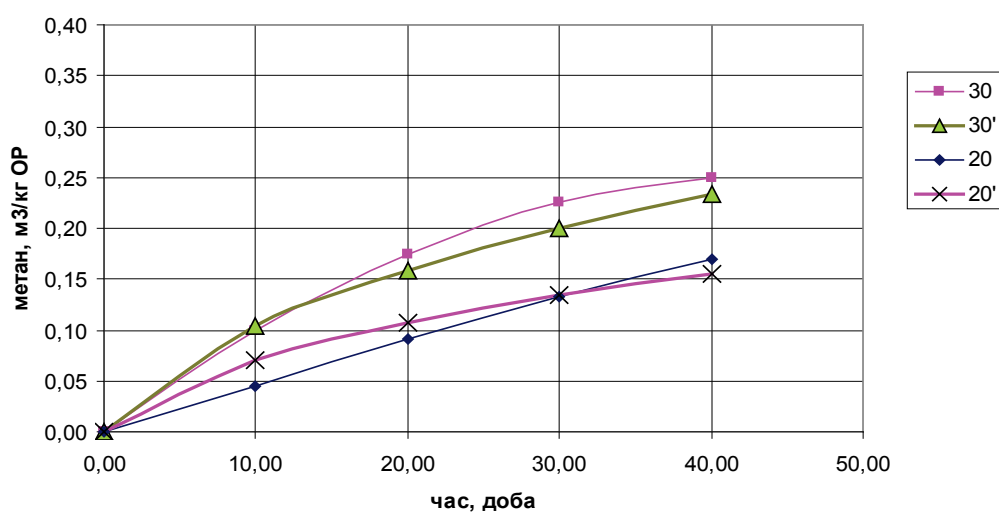


Рис. 1. Динаміка виходу біогазу: 30 — експериментальні дані [4] з 30 °C; 30' — результати розрахунків моделі з 30 °C; 20 — експериментальні дані [4] з 20 °C; 20' — результати розрахунків моделі з 20 °C

У протилежному випадку для роботи з $W > 5$ % (без перемішування) під час переробки відходів рослинництва, сільгоспвиробництва тощо, в залежності від умов перебігу процесу, вірогідна така динаміка виходу біогазу (рис. 2, 6) [2, 5]. Це підтверджено також безпосередньо даними власних експериментальних досліджень на установці об'ємом 6 м³ (рис. 4).

Таким чином, математична модель [1] має обмеження з використання і не дає відповіді на два важливих питання:

- 1) чому виникає загроза зупинки реактора без перемішування протягом 2 діб за наявності вільної конвекції рідини;
- 2) чим саме зумовлена оптимальна періодичність перемішування об'єму реактора.

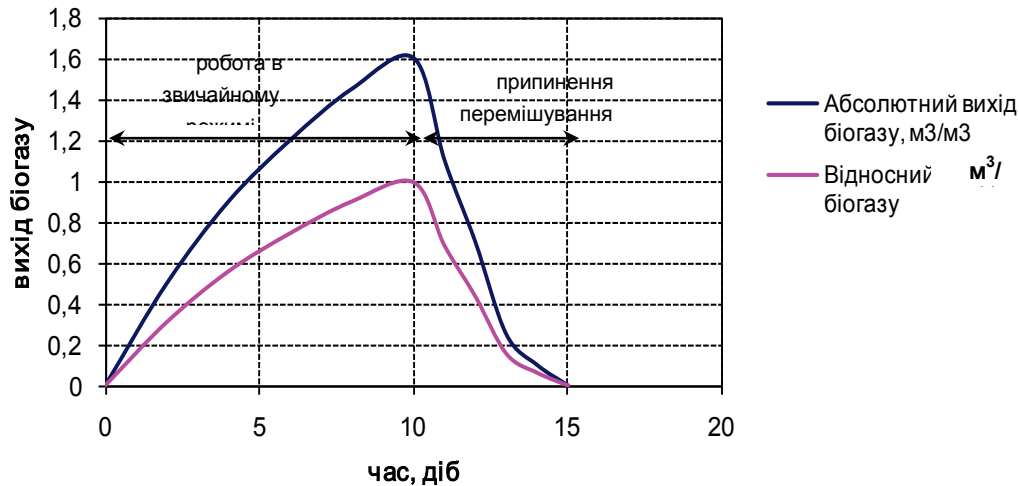


Рис. 2. Динаміка виходу біогазу у випадку роботи біогазової установки з призупиненням перемішування за даними [2, 5]

Аналізуючи ці два питання робимо висновок, що можливо у числовому дослідженні процесу метаногенерації не враховані важливі фізико-хімічні процеси, що суттєво впливають на динаміку роботи біогазової установки. До таких процесів, в першу чергу, відноситься флотація нерозчинених часток сировини пухирцями біогазу, які мають місце у експериментальних дослідженнях [3] та експлуатації біогазових установок (БГУ) [4].

Метою дослідження є отримання кількісної залежності впливу процесу флотації на процес газогенерації шляхом експериментального дослідження з використанням лабораторної та промислової БГУ. Результатом цього дослідження має бути функція інгібування процесу газогенерації за рахунок явища флотації.

Методика досліджень

Дослідження впливу флотаційних процесів на метанотворення потребує визначення механізму цього явища. Для цього розглянемо контрольний об'єм реакційного простору, який має деяку концентрацію W органічної речовини, не розчиненої в рідині, яка постійно гідролізується під час контакту з водою. Як відомо з [4], бактерії мають властивість адсорбуватися на поверхні і утворювати газ, як показано на рис. 3. При цьому, площа контакту фаз поверхні частки з водою постійно зменшується за рахунок утворення пухирців на поверхні часток. Під впливом пухирців частинки спливають на поверхню та утворюють щільний шар, що також перешкоджає виходу біогазу на поверхню та збільшує тиск газу у розчині.

Таким чином, маємо, що вихід метану залежить від активної площі поверхні частки органічної речовини, а кількісний опис інгібування процесу газогенерації за рахунок явища флотації можливий з використанням функції:

$$P = f(F_{surf}), \quad (2)$$

де F_{surf} — активна площа поверхні часток органічної речовини.

Перша частина досліджень проводилась на діючій експериментальній біогазовій установці з робочим об'ємом реактора 6 м^3 (рис. 4), сировиною для якої є відходи свинарської ферми вологістю 86 %. В реакторі підтримувалась середня по об'єму температура $30 \text{ }^\circ\text{C}$, навантаження за кількістю перероблюваних відходів 300 літрів за добу.

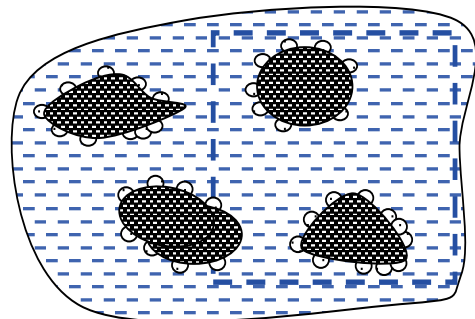


Рис. 3. Контрольний об'єм реакційного простору

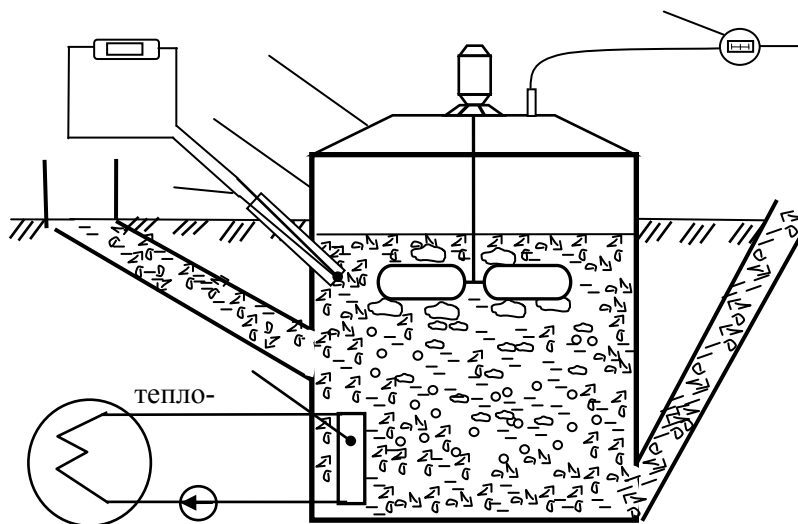


Рис. 4. Схема експериментальної біогазової установки об'ємом 6 м³:
 1 — ферментатор; 2 — мішалка; 3 — підігрівач; 4 — кришка реактора;
 5 — термометр; 6 — мішалка

Температурний режим в реакторі підтримувався підігрівачем 3 і фіксувався за допомогою термометри 5. Вихід біогазу реєструється за допомогою газового лічильника 2. В реакторі відбувалося анаеробне бродіння відходів з утворенням біогазу без перемішування розчину. Суть досліджень полягала в отриманні динаміки виходу біогазу в залежності від часу в умовах відсутності перемішування. Дані досліджень наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Експериментальні дослідження виходу біогазу під час роботи установки без перемішування

Час, діб	Вихід біогазу, м ³ /м ³ _{реакт}	Відносний вихід біогазу, %
0	1,60	1,00
1	1,10	0,69
2	0,70	0,44
3	0,25	0,16
4	0,10	0,06
5	0,00	0,00

Другою частиною досліджень були лабораторні експерименти (рис. 5), що проводились в прозорій склянці з сировиною протягом п'яти діб за таких умов, що і перша частина досліджень.

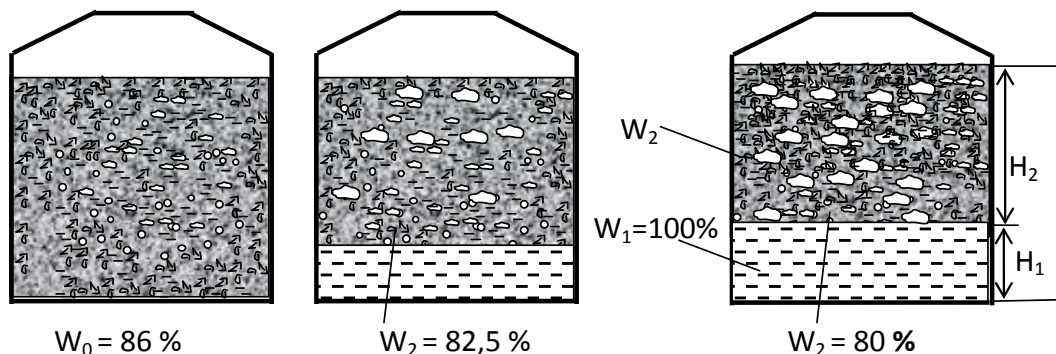


Рис. 5. Результати спостережень лабораторних досліджень

Проведені вимірювання рівнів рідини та шару флотованої маси через рівні проміжки часу. *Мета досліджень* полягає в отриманні даних динаміки флотаційних процесів в залежності від часу в умовах відсутності перемішування для подальшого співставлення з даними експериментальних досліджень динаміки виходу біогазу. На основі даних про рівні рідини, шар флотованої маси H_1 , H_2 та вологість рідини в початковий момент часу W_0 обчислена вологість флотованої маси за формулою

$$W_2 = (W_0 - 100 \cdot H_1) / H_2, \quad (3)$$

а також вільну вологу флотованої маси.

Дані лабораторних вимірювань та результати розрахунків наведені в табл. 2.

Таблиця 2

Лабораторні вимірювання рівнів рідини, шару флотованої маси, та розрахункові значення вологості флотованої маси

№ досліджу	Час, діб.	H_1	H_2	Вологість флотованої маси		Вільна волога флотованої маси	
				%	віднос.	%	віднос.
1	0	0	1	86	1,00	9,33	1,00
2	1	0,2	0,8	82,5	0,96	5,83	0,63
3	2	0,3	0,7	80	0,93	3,33	0,36
4	3	0,35	0,65	78,46154	0,91	1,79	0,19
5	4	0,4	0,6	76,66667	0,89	0,00	0,00
6	5	0,4	0,6	76,66667	0,89	0,00	0,00

Результати і обговорення

Аналіз результатів першої частини досліджень (табл. 1, рис. 6) вказує на те, що сам факт поступового зупинення роботи реактора із зупиненням перемішування, підтверджує припущення про механізм дії інгібування процесу метаногенерації явищем флотації, але цих даних недостатньо для виключення співпадіння цих двох фактів.

Аналізуючи дані другої частини досліджень (табл. 2, рис. 6), спостерігаємо, що в процесі флотації з рідкої суміші псевдотвердої органіки та води, вода відтісняється донизу, а інша частина у вигляді суміші твердої фази з водою поступово концентрується у верхній частині склянки з меншою концентрацією вологи. Процес флотації триває доки лінія розділу фаз не стабілізується, а концентрація вільної вологи в верхній частині склянки не буде дорівнювати нулю.

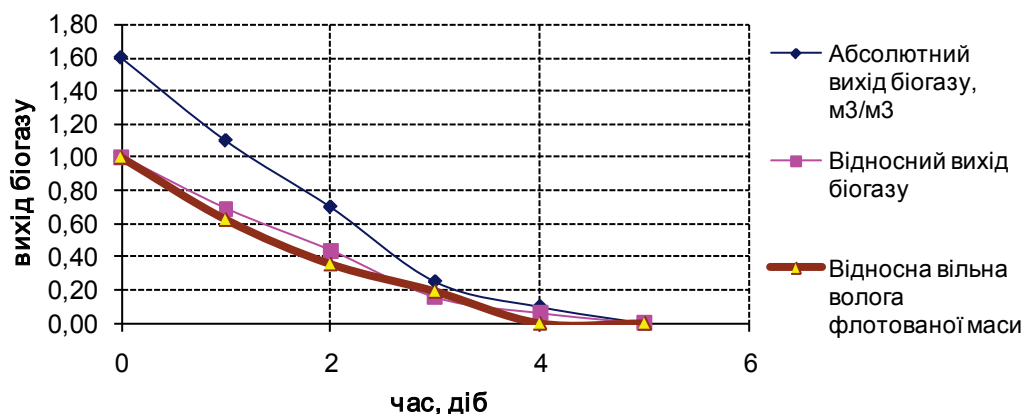


Рис. 6. Результати спостережень експериментальних досліджень

Зі співставлення результатів першої та другої частини досліджень (рис. 6) випливає, що за відсутності перемішування, графіки залежностей відносного виходу біогазу та відносної вільної вологи від часу збігаються. Це опосередковано доводить, що площа поверхні контакту фаз води та органічної частки (активна площа поверхні), змінюється в часі за таким самим законом і поступово зменшується до нуля в процесі флотації (рис. 7). Це дозволяє зробити висновок, що саме активна площа пове-

рхні, в першу чергу, впливає на зменшення виходу біогазу до нульового значення.

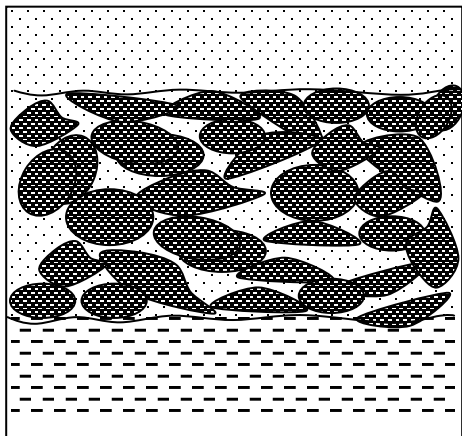


Рис. 7. Шар флотованої маси в верхній частині реактора за нульового значення вільної вологи

верхні часток органічної речовини. Кількісна оцінка функції інгібування процесу метаноутворення — відносне зменшення активної площі поверхні контакту фаз $f(\tau)$, може бути здійснена за залежністю (4), яка справедлива для циліндричних вертикальних реакторів зі співвідношенням висоти і діаметра $H/D = 1 \dots 1,5$ у переробці відходів свинарської ферми. Надалі ця залежність буде використана для математичного моделювання процесу отримання біогазу в установках малого об'єму.

Апроксимуючи графік залежності відносної вільної вологи флотованої маси від часу, отримано функцію інгібування процесу газогенерації флотоційним процесом за рахунок зменшення активної площі поверхні:

$$f(\tau) = 0,0335\tau^2 - 0,3719\tau + 1,000. \quad (4)$$

Висновки

Запропоновано механізм впливу флотації пухирців біогазу на продуктивність реактора біогазової установки, який підтверджено результатами експериментальних досліджень в лабораторних умовах та на діючій БГУ.

Результати досліджень доводять, що процес флотації є головною причиною зниження динаміки виходу біогазу за рахунок зменшення активної площі по-

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Землянка О. О. Математичне моделювання кінетики процесу анаеробного бродіння органічних відходів в ферментаторі біогазової установки / О. О. Землянка // Интегрированные технологии и энергосбережение, 2007. — № 4. — С. 47—52.
2. Землянка О. О. Вплив технологічних факторів на продуктивність біогазової установки / О. О. Землянка, М. В. Губінський : Теплотехника и энергетика в металлургии : труды XV международной конференции НМетАУ (Днепропетровск, 7—9 октября 2008 г.). — Днепропетровск : Новая идеология, 2008. — 101 с.
3. Землянка О. О. Експериментальне дослідження роботи перемішувачів пристроїв з метою гідродинамічного вдосконалення роботи біогазової установки / О. О. Землянка, М. В. Губінський // Металургійна теплотехніка : зб. наук. пр. Національної металургійної академії України. — Дніпропетровськ : ПП Грек О. С., 2007. — С. 151—156.
4. Баадер В. Биогаз. Теория и практика / В. Баадер ; пер. с англ. : под ред. В. Д. Виленского. — М. : Энергоатомиздат, 1984. — 152 с.
5. Дубровскис В. С. Аппараты для исследования анаэробной переработки сельскохозяйственных отходов. Эксплуатация и совершенствование ферментационных установок / В. С. Дубровскис. — Рига, 1986. — С. 111—120.
6. Vavilin V. A. 2003b. A distributed model of solid waste anaerobic digestion: sensitivity analysis / V. A. Vavilin, S. V. Rytov, Pavlostathis S. G., Jokela J., Rintala J. Wat Sci Technol 48/4: 147—154.
7. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости / С. Патанкар ; пер. с англ. — М. : Энергоатомиздат, 1984. — 152 с.

Рекомендована кафедрою теплоенергетики

Надійшла до редакції 22.12.09
Рекомендована до друку 10.02.10

Землянка Олександр Олександрович — головний інженер проєктів НПП «БиогазПроект»;
Губінський Михайло Володимирович — професор кафедри промислової теплоенергетики.

Національна металургійна Академія України, м. Дніпропетровськ