

Приведены условия биоконверсии биомассы в биогаз метанобразующими бактериями. Представлена классификация по температурному режиму. Описанные основные этапы преобразования биомассы в биогаз и фазы при периодическом сбраживании в метантенке. На примере зависимости выхода биогаза во времени расписана длительность протекания фаз метанового сбраживания навоза ВРХ.

**Биогаз, субстрат, биошлам, метантенк, газгольдер, температурный режим, лог-фаза, экспоненциальная (логарифмическая) фаза, фаза замедления роста, фаза отмирания.**

*These conditions bioconversion of biomass into biogas metanoutvoryuyuchymy bacteria. Presented their classification according to temperature conditions. We describe the main stages of converting biomass to biogas and fermented with periodic phase-no digesters. For example depending on biogas yields at the time painted duration flow phase methane fermentation of cattle manure.*

**Biogas substrate bioshlam, digesters, gasholder, temperature re-bench, ba-phase exponential (logarithmic) phase, the phase of slow growth phase of extinction.**

УДК 620:95

## **КІНЕТИКА АНАЕРОБНОЇ ФЕРМЕНТАЦІЇ РОСЛИННОЇ БІОМАСИ**

**Г.А. Голуб, доктор технічних наук, професор  
О.В. Дубровіна, здобувач**

*Приведено методикау отримання кінетичних рівнянь анаеробної ферментації рослинної біомаси.*

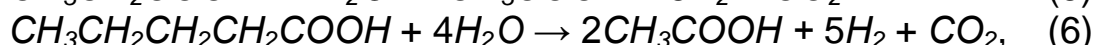
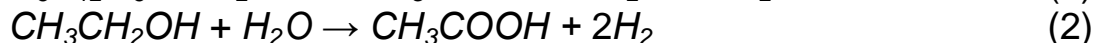
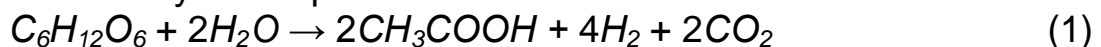
**Кінетичні рівняння, рослинна біомаса, анаеробна ферментація, рівень розкладу, швидкість процесу.**

**Постановка проблеми.** Аналітичний опис анаеробної ферментації рослинної біомаси є одним із напрямків, що дозволяє узагальнити дослідження біогазових установок, а тому отримання швидкісних параметрів процесу метанового бродіння в біогазових установок потребує постійного узагальнення.

© Г.А. Голуб, О.В. Дубровіна, 2013

**Аналіз останніх досліджень.** Отримання енергії за рахунок анаеробного зброджування гною та посліду є процесом, який не конкурує із харчовими потребами людства, а тому нами розроблено ряд схем біоенергоконверсії органічної сировини в агроєкосистемах, які включають біогазові технології, в тому числі і в поєднанні з аеробним зброджуванням [1]. Останнім часом набуває значення виробництво біогазу із органічної біомаси, яка утворюється при переробці цукрових буряків [2, 3]. 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 [4]. 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 [5, 6].

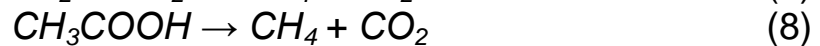
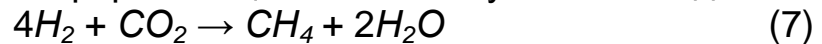
Нами запатентовано ряд технічних рішень, які дозволяють у значній мірі усунути розшарування біомаси за рахунок забезпечення перемішування шарів біомаси із використанням занурених обертових біогазових реакторів. Визначено також рівень занурення обертового метантенка в рідину, а також коефіцієнт його заповнення від геометричних параметрів обертового метантенка та густини рідини, в яку занурений обертовий метантенк при забезпеченні його знаходження у завислому стані [7]. Відомо [8, 9], що на першій стадії анаеробного зброджування під дією бактерій відбувається гідроліз субстрату з утворенням органічних кислот, спиртів, простих вуглеводів. На другій стадії утворюється оцтова кислота, водень та вуглекислий газ. Ці стадії анаеробного зброджування можуть бути узагальнені наступними рівняннями:



де  $C_6H_{12}O_6$  – глюкоза;  $CH_3CH_2OH$  – етанол;  $CH_3CHONCOOH$  – лактат;  $CH_3CH_2CH_2COOH$  – масляна кислота;  $CH_3CH_2COOH$  – пропіонова кислота;  $CH_3CH_2CH_2CH_2COOH$  – валеріанова кислота;  $H_2O$  – вода;  $CH_3COOH$  – оцтова кислота;  $H_2$  – водень;  $CO_2$  – вуглекислий газ.

У подальшому, метаногенез відбувається за рахунок діяльності мікроорганізмів, які відновлюють вуглекислий газ до метану, а також

таких, що розкладають в кінцевому підсумку оцтову кислоту на метан і вуглекислий газ [8]. Рівняння біохімічних реакцій стадії метаногенезу анаеробної ферментації мають наступний вигляд:



де  $CH_4$  – метан.

Розрахунковий матеріальний баланс анаеробної ферментації вищенаведених органічних речовин біомаси показав, що мікробіологічний розклад під час анаеробної ферментації 1 кг органічної речовини супроводжується виділенням в середньому 0,4 кг метану та 0,7 кг вуглекислого газу [10]. Встановлено також, що під час анаеробного зброджування максимальний рівень розкладу органічної речовини біомаси гною становить 53 % [11], біомаси зеленої маси трав – 45 % та кукурудзяного силосу – 59 % [12, 13]. Однак питання отримання кінетичних рівнянь анаеробної ферментації рослинної біомаси на основі експериментальних даних процесу зброджування потребує проведення відповідних досліджень.

**Мета досліджень** – розробити методику отримання кінетичних рівнянь анаеробної ферментації рослинної біомаси на основі експериментальних даних процесу зброджування.

**Результати досліджень.** Технології виробництва біогазу постійно удосконалюються в напрямку підвищення концентрації біометану та скорочення строків ферментації. Оскільки розклад органічної речовини обумовлений розвитком мікроорганізмів, ріст яких описується кінетичними рівняннями [14], а також вважаючи, що швидкість розкладу органічної речовини під час біогазової ферментації пропорційна кількості нерозкладеної органічної речовини [15], що ще може бути розкладена, кінетичне рівняння анаеробної ферментації органічної біомаси в диференційній формі буде мати вигляд:

$$\frac{dM}{d\tau} = -k(M - M^*), \quad (9)$$

де  $M$  – вміст органічної речовини біомаси, що не розклалася на поточний момент часу біогазової ферментації, кг;  $M^*$  – вміст органічної речовини біомаси, яка не розкладається під час біогазової ферментації, кг;  $k$  – параметр процесу біогазової ферментації, який характеризує її швидкість,  $\text{діб}^{-1}$ ;  $\tau$  – час біогазової ферментації, діб.

Провівши математичні перетворення та інтегрування диференційного рівняння у межах умісту органічної речовини від початкового значення до поточного, одержимо однопараметричне рівняння процесу анаеробної ферментації, яке визначає вміст органічної речовини, що не розклалася на поточний момент часу:

$$M = M^* + (M_0 - M^*) \exp(-k\tau), \quad (10)$$

де  $M_0$  – загальний уміст органічної речовини біомаси на початок біогазової ферментації, кг.

В той же час кількість органічної речовини біомаси, яка розклалася на поточний момент часу, становить:

$$M_0 - M = (M_0 - M^*) [1 - \exp(-k\tau)]. \quad (11)$$

Привівши кількість органічної речовини, що розклалася на поточний момент часу, до загального вмісту органічної речовини на початок біогазової ферментації, одержимо формулу для визначення рівня розкладу органічної речовини на поточний момент часу

$$\alpha = \alpha_0 [1 - \exp(-k\tau)], \quad (12)$$

де  $\alpha_0 = \frac{M_0 - M^*}{M_0}$  – максимальний рівень розкладу органічної речовини в процесі анаеробної ферментації, відносних од.

Враховуючи те, що максимальний рівень розкладу органічної сировини біомаси при довгостроковій експозиції під час анаеробної ферментації становить для біомаси зеленої маси трав – 45 %, а для кукурудзяного силосу – 59 % [12, 13], кінетичне рівняння процесу анаеробної ферментації рослинної біомаси буде мати вигляд:

– для зеленої маси трав

$$\alpha = 0,45 [1 - \exp(-k_{3MT}\tau)]; \quad (13)$$

– для кукурудзяного силосу

$$\alpha = 0,59 [1 - \exp(-k_{KC}\tau)]. \quad (14)$$

Розрахунок параметра процесу анаеробної ферментації, який характеризує її швидкість, проведемо згідно методики [16] та на основі експериментальних даних за формулою:

$$k = \exp \left[ N^{-1} \left( \sum \ln \left( \frac{\alpha_0}{\alpha_0 - \alpha_i} \right) - \sum \ln \tau_i \right) \right], \quad (15)$$

де  $N$  – кількість вимірів;

Для розрахунку швидкості процесу анаеробної ферментації біомаси зеленої маси трав та кукурудзяного силосу, скористаємося експериментальними даними [12, 13].

Розрахунки показали, що для процесу анаеробної ферментації швидкість розкладу органічної речовини становить: для зеленої маси трав –  $k_{3MT} = 0,095 \text{ дїб}^{-1}$ ; для кукурудзяного силосу –  $k_{3MT} = 0,119 \text{ дїб}^{-1}$ .

Таким чином, кінетичні рівняння процесу анаеробної ферментації біомаси зеленої маси трав та кукурудзяного силосу будуть мати наступний вигляд:

– для зеленої маси трав

$$\alpha = 0,45 [1 - \exp(-0,095\tau)]; \quad (16)$$

– для кукурудзяного силосу

$$\alpha = 0,59 [1 - \exp(-0,119\tau)]. \quad (17)$$

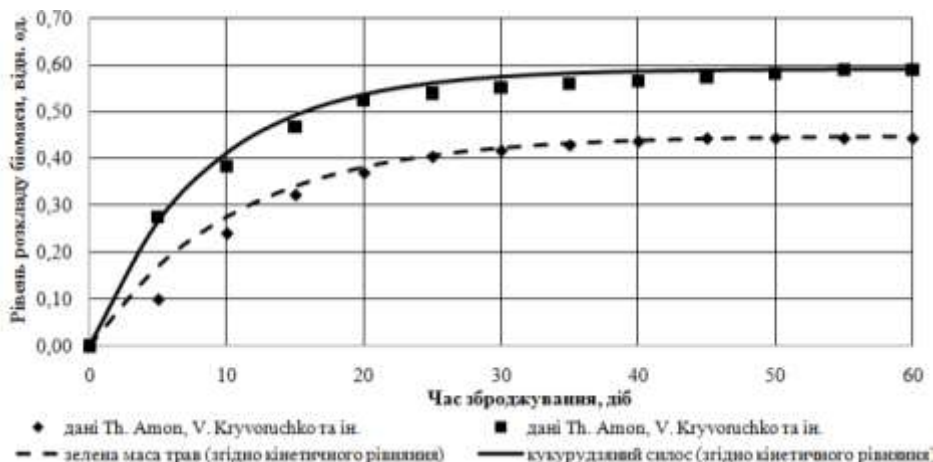


Рис. Кінетика процесу біогазової ферментації органічної сировини.

У графічному вигляді кінетичні рівняння (16), (17) приведені на рисунку.

**Висновок.** Розроблені кінетичні рівняння розкладу органічної сировини під час процесу анаеробної ферментації біомаси зеленої маси трав та кукурудзяного силосу. Установлено, що швидкість процесу анаеробної ферментації кукурудзяного силосу на чверть перевищує швидкість процесу анаеробної ферментації біомаси зеленої маси трав.

### Список літератури

1. Golub G., Linnik M., Dubrovina O. Technical means for production of biogas. – Proceedings of the 5th Research and Development Conference of Central- and Eastern European Institutes of Agricultural Engineering. – Kiev: National Agricultural University of Ukraine, 2007. – part 1. – 2007 p. – P. 131-136.
2. V. Kryvoruchko, T. Amon, B. Amon, V. Dubrovin, M. Melnychuk, E. Krasowski. Co fermentation of sugar by-products with typical agricultural substrates. – Motrol: Commission of Motorization and Energetics in Agriculture. / An International Journal on Operation of Farm and Agri-Food Industry Machinery. – Lublin-Kiev-Simferopol-Mukolayiv-Lviv-Rzeszow, 2012. – Том 14, No 3. – 223 с. – P. 32-39.
3. Голуб Г.А., Гох В.В. Використання жому і меляси в суміші з соломною для виробництва біогазу. – Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: Техніка та енергетика АПК / Редколегія: Д.О. Мельничук (відповідальний редактор) та інші – К., 2012. – Вип. 170, ч. 2. – 387 с. – С. 74–80.
4. Руководство по биогазу. От получения до использования / Специальное агентство возобновляемых ресурсов (FNR). 5-е издание. – Гюльцов: Германия, 2012. –213 с.
5. Голуб Г.А., Дубровина О.В., Рубан Б.О., Войтенко В.О. Технічне забезпечення виробництва біогазу / Збірник наукових праць Вінницького національного

аграрного університету. Серія: Технічні науки. – Вінниця, 2012. – Вип. 10. – 186 с. – С. 17–19.

6. Голуб Г., Войтенко В., Рубан Б, Єрмоленко В. Сучасні тенденції розвитку біогазових установок / Техніка і технології АПК. – 2012. – № 2 (29). – С. 18-21.

7. Голуб Г.А., Дубровіна О.В. Обґрунтування рівня занурення та коефіцієнта заповнення біомасою обертового метантенка. – Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: Техніка та енергетика АПК / Редколегія: Д.О. Мельничук (відповідальний редактор) та інші – К., 2012. – Вип. 170, ч. 2. – 387 с. – С. 55-61.

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

9. Экологическая биотехнология: Пер. с англ./Под ред. К.Ф. Форстера, Д.А.Дж. Вейза. – Л.: Химия, 1987. – 384 с.

10. Голуб Г.А., Дубровіна О.В., Войтенко В.О., Гох В.В. Аналіз метаноутворення в біогазових установках. – Сучасні проблеми збалансованого природокористування: Збірник наукових праць / Подільський державний аграрно-технічний університет (ПДАТУ); Науковий редактор: Бахмат М.І. – Кам'янець-Подільський, 2012. – Спеціальний випуск до VII науково-практичної конференції. – 334 с. – С. 141-145.

11. Використання біомаси на енергетичні потреби в сільському господарстві. Біогазові технології / Таргоня В.С., Клименко В.П., Луценко М.М., Бабинець Т.Л.; за ред. В.І. Кравчука. – Дослідницьке: УкрНДІПВТ ім. Л. Погорілого, 2009. – 72 с.

12. Amon, T., Kryvoruchko, V., Amon, B., Zollitsch, W., Mayer, K., Buga, S., Amid, A. (2004): Biogaserzeugung aus Mais – Einfluss der Inhaltsstoffe auf das spezifische Methanbildungsvermögen von früh- bis spätreifen Maissorten. In: Vereinigung der Pflanzenzüchter und Saatgutkaufleute Österreichs: 54. Bundesanstalt für Alpenländische Landwirtschaft, Höhere Bundeslehranstalt für alpenländische Landwirtschaft: "Züchertagung der Vereinigung der Pflanzenzüchter und Saatgutkaufleute Österreichs", 25. bis 27. November 2003, Raumberg/Trautenfels.

13. Amon, T., Kryvoruchko, V., Amon, B., Buga, S., Mayer, K., Zollitsch, W., Pötsch, E., (2003): Biogas aus Klee gras, Feldfutter- und Dauerwiesenmischungen. Der fortschrittliche Landwirt, 22, 52-53.

14. Франс Дж., Торнли Дж. Х. М. Математические модели в сельском хозяйстве: Пер. с англ. А.С. Калянского. – М.: Агропромиздат, 1987. – 400 с.

15. Огороднік А.І., Голуб Г.А. Кінетична модель процесу компостування субстрату у грибництві // Міжвідомчий тематичний науковий збірник "Механізація та електрифікація сільського господарства". – Київ. – 1997. – Вип. 82. – С. 67-70.

16. Холькин Ю.И. Технология гидролизных производств. – М.: Лесная промышленность, 1989. – 496 с.

*Приведено методуку получения кинетических уравнений анаэробной ферментации растительной биомассы.*

***Кинетические уравнения, растительная биомасса, анаэробная ферментация, уровень разложения, скорость процесса.***

*The procedure of obtaining kinetic equations of anaerobic fermentation of biomass is given.*

***Kinetic equations, plant biomass, anaerobic fermentation, the level of decomposition, speed of process.***