

УДК 519.6

РОЗРОБКА ВИСОКОЕФЕКТИВНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ОТРИМАННЯ БІОГАЗУ

Н. Ф. Стародуб, доктор біологічних наук, професор

С. А. Шворов, доктор технічних наук, професор

Д. С. Комарчук, кандидат технічних наук

В. Є. Лукін, кандидат педагогічних наук

В. В. Устимчук, інженер

Національний університет біоресурсів і природокористування України

E-mail: lukin2008@ukr.net

Анотація. *Аналіз останніх досліджень і публікацій показує, що в біогазових установках (БГУ) не передбачається застосування різних видів сезонної біомаси. При цьому неоптимальне керування процесом завантаження різних видів субстратів може призвести до значного зменшення виходу біогазу. Перспективним напрямком усунення зазначеного недоліку є розробка біогазової технології, за допомогою якої забезпечується завантаження БГУ різними видами вхідних субстратів і спеціальних домішок та створення необхідних умов для отримання максимально можливого об'єму біогазу.*

Метою досліджень є розробка інноваційної високоефективної біогазової технології щодо підготовки вхідних субстратів та оптимального дозування спеціальних домішок для отримання максимальних об'ємів біогазу.

Одним із напрямків інтенсифікації процесів зброджування є деструкційна (кавітаційна) обробка сировини та оптимальне дозування спеціальних домішок для різних видів сировини, оптимальне підігрівання і перемішування з необхідною інтенсивністю завантаженого субстрату, що забезпечує ефективне використання всього об'єму резервуара БГУ, виключає утворення «мертвих» зон, розширення осаду, відкладання мінералізованого осаду та утворення кірки, а також сприяє вирівнюванню температурного поля та покращенню газоутворення.

Процес інтенсифікації зброджування полягає в тому, що потік різних видів сировини у роторно-пульсаційному апараті БГУ подрібнюється до необхідного мікроскопічного рівня та гомогенізується. У процесі обробки рвуться зв'язки довгих волокон (лігнін, целюлоза). Дисперсність збільшується так, що частинки зменшуються в розмірах до 0,1 мкм. Тому бактеріям, які беруть участь в процесах утворення біогазу, легше розкласти біогенні матеріали. У результаті вміст метану в біогазі збільшується до 70-75 %.

За допомогою спеціального імунного біосенсору визначається кількість та інтенсивність росту мікробної популяції у збродженій біомасі, що необхідно для оптимального дозування різних видів спеціальних домішок, які дозволяють значно збільшити вихід біогазу.

Були отримані результати кількісного аналізу бактерій в біореакторній системі за допомогою імунного біосенсора на основі поверхневого плазмонного резонансу. З огляду отриманих результатів можна впевнено стверджувати, що чутливість аналізу досягає значного рівня, а головне, вона покриває діапазон коливання концентрації мікробних клітин для забезпечення оптимального стану каталітичного процесу бродіння. Наведені дані добре узгоджуються з раніше отриманими результатами щодо кількісного тестування деяких патогенних бактерій.

Ключові слова: *біогазова технологія, біогазова установка, енергетичні культури, субстрати, домішки, біогаз, метан, оптичний імунний біосенсор, бактерії*

Актуальність. Одним з важливих секторів відновлювальних джерел енергії у світі є виробництво та енергетичне використання біогазу [8]. Крім того, повне і швидке впровадження біогазових технологій для переробки відходів рослинництва і тваринництва одночасно радикально поліпшить енергетичний баланс країни та екологічний стан територій. Отримання максимально можливих об'ємів біометану планується на основі використання не лише різноманітних відходів з великих ферм, а й вирощування та збір спеціальних енергетичних культур (ЕК) і домішок, що стимулюють процес бродіння при їх переробці у біогазових установках (БГУ). Одним із перспективних напрямків підвищення ефективності функціонування біогазових установок є розробка інноваційної вискоелективної біогазової технології, за допомогою якої забезпечується інтенсивна (з урахуванням біологічної складової) переробка різних видів субстратів у біогазових установках.

Аналіз останніх досліджень та публікацій показує, що фіксоване дозування вхідних субстратів визначається ще на етапі конструювання БГУ. У встановленому технологічному процесі не передбачається застосування в БГУ різних видів сезонної біомаси. При цьому неоптимальне керування процесом

завантаження різних видів субстратів може призвести до значного зменшення виходу біогазу [6, 8]. Перспективним напрямком усунення зазначеного недоліку є розробка біогазової технології, за допомогою якої забезпечується завантаження БГУ різними видами вхідних субстратів і спеціальних домішок та створення необхідних умов для отримання максимально можливого об'єму біогазу.

Мета дослідження – розробка інноваційної високоефективної біогазової технології щодо підготовки вхідних субстратів та оптимального дозування спеціальних домішок для отримання максимальних об'ємів біогазу.

Матеріали та методи дослідження. Одним із напрямків інтенсифікації процесів зброджування є оптимальне дозування та деструкційна (кавітаційна) обробка різних видів сировини, оптимальне підігрівання і перемішування з необхідною інтенсивністю завантаженого субстрату, що забезпечує ефективне використання всього об'єму резервуара БГУ, виключає утворення «мертвих» зон, розшарування осаду, відкладання мінералізованого осаду та утворення кірки, а також сприяє вирівнюванню температурного поля та покращенню газоутворення [4, 7].

Процес інтенсифікації зброджування полягає в тому, що потік різних видів сировини у роторно-пульсаційному апараті БГУ подрібнюється до необхідного мікроскопічного рівня та гомогенізується. У процесі обробки рвуться зв'язки довгих волокон (лігнін, целюлоза). Дисперсність збільшується так, що частинки зменшуються в розмірах до 0,1 мкм. Тому бактеріям, які беруть участь в процесах утворення біогазу, легше розкласти біогенні матеріали. У результаті вміст метану в біогазі збільшується до 70-75 %.

За допомогою спеціального імунного біосенсору визначається кількість та інтенсивність росту мікробної популяції у зброджуваній біомасі, що необхідно для оптимального дозування різних видів спеціальних домішок, які дозволяють значно збільшити вихід біогазу. Під домішками в цьому випадку розуміється

суміш з ензимів, мікроелементів тощо, застосування яких забезпечує збільшення виходу біогазу від 20 до 40 % без зміни конструкції біогазової станції. На біогазових установках у Німеччині домішки такого типу дають гарантований вихід біогазу до 45 %. Орієнтовна їх вартість становить близько 42 EUR/кг, при витраті 1-2 кг за добу для біогазової електричної станції з потужністю 1 МВт.

Основою високоефективної біогазової технології є система керування БГУ, за допомогою якої на основі аналізу даних від біосенсора забезпечується дозування різних видів сировини, подрібнювання її до необхідного мікроскопічного рівня та оптимальне дозування спеціальних домішок (рис. 1).



Рис. 1. Структурна схема технології отримання біогазу

Результати досліджень. Як показують результати теоретичних та практичних досліджень, найбільший вихід біометану дають субстрати з високою концентрацією енергії: свіжа трава, бадилля буряка, кукурудза, зернові рослини [1, 2, 6, 8]. Найменший вихід біогазу з органічного сухого субстрату має солома.

У промислових обсягах біогаз отримують переважно з органічних відходів, ґрунтуючись на керованому процесі розкладання різних видів органічної сировини в анаеробних (безкисневих) умовах. Процес виробництва біогазу

можна розділити на чотири фази: гідроліз, кислотогенез, ацетогенез та метаногенез.

Під час гідролісної фази в результаті життєдіяльності бактерій стійкі субстанції (протеїни, жири та вуглеводи) розкладаються на прості складові (амінокислоти, глюкозу, жирові кислоти). Отримані під час гідролісної фази прості складові розкладаються на органічні кислоти (оцтову, пропіонову, масляну), спирт, альдегіди, водень, діоксид вуглецю, а також такі гази, як аміак і сірководень. Цей процес протікає доти, поки розвиток бактерій не сповільнюється під впливом утворених кислот. На третій фазі з кислот, утворених під час кислотоутворюючої фази, під впливом ацитогенних груп бактерій виробляється оцтова кислота. На останній фазі оцтова кислота розкладається на метан, вуглекислий газ і воду.

За допомогою запропонованої біогазової технології забезпечуються такі ключові умови виробництва біогазу.

Бактерії можуть активно працювати тільки в умовах відсутності кисню, тобто в анаеробних умовах. При цьому виробництво біогазу здійснюється у вологому середовищі, адже лише за таких умов бактерії можуть функціонувати.

Оптимальним режимом для всіх груп бактерій є діапазон температури 35-40 °С, що також забезпечує біогазова технологія з урахуванням прогнозованої температури навколишнього середовища.

У процесі бродіння кількість виробленого газу поступово зростає відповідно збільшенню його тривалості, причому спочатку воно відбувається швидше, а в міру зростання тривалості бродіння – повільніше. Гідролісні і кислотоутворюючі бактерії в середовищі з рівнем рН 4,5-6,3 досягають оптимуму своєї активності, тоді як бактерії, що утворюють оцтову кислоту і метан, можуть жити лише при нейтральному або при слабо лужному рівні з рН 6,8-8. Для всіх бактерій дійсним є правило: якщо рівень рН перевищує

оптимальний, то вони стають менш активними у своїй життєдіяльності, що затримує утворення біогазу.

Продукти обміну речовин кожної групи бактерій є поживними речовинами для подальшої групи бактерій. Всі вони працюють з різною швидкістю. Бактерії не можна «перегодовувати», оскільки тоді одна з груп не встигне накопичити субстрат для наступної. Тому в кожному конкретному проекті розраховується і програмується періодичність подання субстрату.

Розмір бактерій 1/1000 мм. Чим дрібніші частинки субстрату, тим більша поверхня зіткнення їх з бактеріями, у результаті чого період бродіння буде скорочуватися, а утворення метану прискорюватися.

Якісне перемішування субстратів важливе не лише для уникнення появи кірки і осаду, а й для того, щоб біогаз виводився на поверхню.

Мікроорганізми звикають до певного «раціону». Зміни, якщо вони вносяться, мають бути поступовими.

Відомо, що співвідношення вуглецю до азоту в різних типах гнойових відходах свиней та в рідких відходах ВРХ у більшості випадків не перевищує значення 15, а для стабільного протікання процесу метанового бродіння оптимальним співвідношенням є діапазон 10-30:1 [8]. Натомість, співвідношення вуглецю до азоту в ЕК у більшості випадків перевищує значення 30. Очевидно, що змішування гнойових відходів та ЕК дозволить оптимізувати склад суміші за співвідношенням вуглецю до азоту, що вказує на доцільність їх сумісного зброджування.

За допомогою спеціального оптичного імунного біосенсору на основі поверхневого плазмонного резонансу (ППР) визначається кількість та інтенсивність росту мікробної популяції у зброджуваній біомасі, що необхідно для оптимального дозування різних видів ЕК та спеціальних домішок, які в комплексі з кавітаційними деструкторами біомаси дозволяють значно збільшити вихід біогазу для отримання різних видів енергії.

Оптичний імунний біосенсор розроблюється на основі принципу ППР та відпрацьовується базовий алгоритм для оцінки інтенсивності росту мікробної популяції в зброджуваній біомасі протягом переробки біомаси та домішок у біогазовій установці. Для цього отримуються поліклональні антисироватки до генералізованої мікробної популяції, а із них виділяються специфічні антитіла у вигляді імуноглобулінів G. Останні використовуються як специфічні селективні сайти для кількісної біосенсорної ідентифікації відповідних мікробних клітин. Щоб досягти високої чутливості аналізу, поверхня трансдюцера біосенсора попередньо оброблюється проміжними шарами. При цьому використовуються шари з ряду поліелектролітів та деяких білків стафілококу. Сенсорна діаграма аналізу представлена на рис. 2, з якої видно, як змінюється резонансний кут ППР за умови контакту трансдюцерної поверхні з різними компонентами.

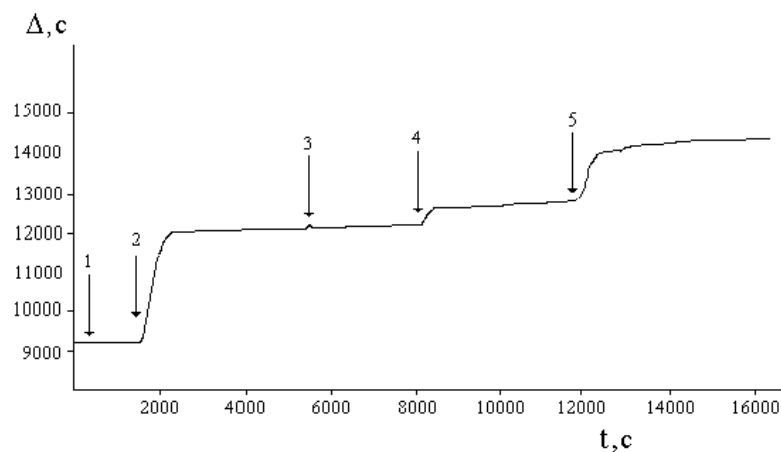


Рис. 2. Відгук біосенсора на основі ППР на присутність окремих компонент у вимірювальній комірці:

1-5 – дистильована вода, антитіла, що специфічні до окремих типів мікробних клітин, бичачий сироватковий альбумін і самі мікробні клітини в концентрації 10^2 та 10^4 в мл, відповідно. Абсциса – час аналізу, ордината – час зміни резонансного кута

Попередньо отримані результати з кількісної оцінки вище згаданих специфічних базових груп бактерій у досліджуваному середовищі за

допомогою оптичного ППР біосенсора представлено на рис. 3. З огляду отриманих результатів можна впевнено стверджувати, що чутливість аналізу досягає значного рівня, а головне – вона покриває діапазон коливання концентрації мікробних клітин для забезпечення оптимального стану каталітичного процесу бродіння.

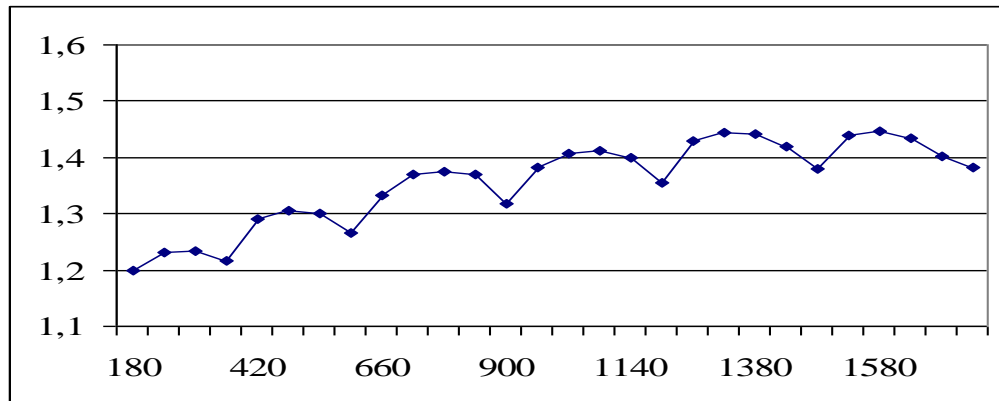


Рис. 3. Біосенсорна діаграма кількісного аналізу бактерій в біореакторній системі за допомогою імунного біосенсора на основі ППР:
абсциса – час (с) аналізу, ордината – час зміни резонансного кута, 10^2 - 10^6 клітин/мл.

Звертає увагу експресність аналізу та його простота, особливо зважаючи на ту ситуацію, що трансдюцерні поверхні будуть попередньо підготовлені. У такому випадку час аналізу буде в межах 5 хв, а сама процедура включає лише нанесення краплини мікробного середовища, промивання трансдюцерної поверхні ППР та здійснення реєстрації сигналу.

Наведені дані добре узгоджуються з раніше отриманими нами результатами щодо кількісного тестування деяких патогенних бактерій [3, 5].

На основі застосування інноваційної високоефективної біогазової технології забезпечується:

реалізація необхідного ступеню подрібнення і гомогенізації сировини, що інтенсифікує виробництво біогазу;

зменшення періоду зброджування біомаси завдяки високій дисперсності біомаси і інтенсифікації процесів анаеробного бродіння;

економія витрат на будівництво і експлуатацію БГУ;

інтенсивне вивільнення природних ензимів, які є біологічними каталізаторами процесу зброджування біомаси, що також збільшує обсяг виробленого біогазу;

стабілізація температурних та біологічних процесів за деструкції біомаси з клітинних і субклітинних матеріалів, що не допускає піноутворення і плаваючої кірки у верхній частині біореактора. Таким чином, увесь корисний об'єм реактора використовується ефективно. Процентний вміст метану в біогазі збільшується до 70-75 %.

Висновки і перспективи

На основі проведеного аналізу ключових умов, що впливають на ефективність виробництва біометану, розроблено структуру інноваційної високоефективної біогазової технології щодо підготовки вхідних субстратів та оптимального дозування спеціальних домішок для різних видів субстратів для отримання максимальних об'ємів біогазу.

Список літератури

1. Гелету́ха Г. Г. Перспективи біогазу в Україні // Економічна правда, 2013. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.epravda.com.ua/columns/2013/07/3/383399/>.
2. Гелету́ха Г.Г. Развитие биогазовых технологий в Украине и Германии: нормативно-правовое поле, состояние и перспектива / Гелету́ха Г.Г., Кучерук П., Матвеев Ю. Б. – Киев-Гюльцов, 2013. – 71 с.
3. Efficiency of Instrumental Analytical Approaches at the Control of Bacterial Infections in Water, Foods and Feed / N. Starodub, J. Ogorodniichuk, O. Novgorodova // Biosensors for Security and Bioterrorism Applications, Edited by Dimitrios P. Nikolelis - 2016. – 199 p.
4. Метод оптимального дозування вхідних субстратів та спеціальних домішок для біогазових установок / С. А. Шворов, О. М. Юрченко, Д. С. Комарчук, П. Г. Охріменко // [Відновлювальна енергетика](#). – 2015. – № 2. – С. 80-83.

5. Optical Immune Biosensors for Salmonella Typhimurium Detection // J. Ogorodniichuk, N. Starodub, T. Lebedeva, P. Shpylovyy // *Advances in Biosensors and Bioelectronics (ABB)*. – 2013. – V 2. – Is. 3. – P. 39-46.

6. Сидоров Ю. І. Сучасні біогазові технології / Ю. І. Сидоров // *Biotechnologia acta*. – 2013. – Vol. 6, №1. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://biot_2013_6_1_6.pdf.

7. Шворов С.А. Система керування процесом завантаження біомаси та спеціальних домішок в біореактор для отримання максимальних об'ємів біогазу та органічних добрив / С. А. Шворов, П. Г. Охріменко, Д. В. Чирченко // *Енергетика і автоматика*. – 2014. – № 3. – С. 155-161.

8. Эдер Б. Биогазовые установки. Практическое пособие / Эдер Б., Шульц Х. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.zorg-biogas.com>.

References

1. Heletukha, H. Perspektivy`vy` biogazu v Ukrayini [Prospects for the biogas production in Ukraine]. Available at : <http://www.epravda.com.ua/columns/2013/07/3/383399/>.

2. Heletukha, H., Kucheruk, P., Matveev, Iu. (2013). Razvytye byohazovykh tekhnolohiyi v Ukrayne y Hermanyyu: normatyvno-pravovoe pole, sostoianye y perspektyva [The development of biogas technology in Ukraine and Germany, regulatory and legal field, status and perspectives], Hyultsov-Kiev, 71.

3. Starodub, N., Ogorodniichuk, J., Novgorodova, O. (2016). Efficiency of Instrumental Analytical Approaches at the Control of Bacterial Infections in Water, Foods and Feed, *Biosensors for Security and Bioterrorism Applications*, 199.

4. Shvorov, S., Yurchenko, O., Komarchuk, D., Ochrimenko, P. (2015). Metod optymalnoho dozuvannia vkhidnykh substrativ ta spetsialnykh domishok dlia biohazovykh ustanovok [The method of optimal dosing incoming substrates and special additives for biogas]. *Renewable Energetics*, 2, 80–83.

5. Ogorodniichuk, J., Starodub, N., Lebedeva, T., Shpylovyy, P. (2013). Optical Immune Biosensors for Salmonella Typhimurium Detection. *Advances in Biosensors and Bioelectronics (ABB)*, 2(3), 39–46.

6. Sidorov, Yu (2013). Suchasni biogazovi texnologiyi [Modern biogas technology]. Available at : http://biot_2013_6_1_6.pdf.

7. Shvorov, S., Okhrimenko, P., Chyrchenko, D., (2014). Systema keruvannia protsesom zavantazhennia biomasy ta spetsialnykh domishok v bioreaktor dlia otrymannia maksymalnykh ob'iemiv biohazu ta orhanichnykh dobryv [The control system booting process biomass and special additives to the bioreactor to maximize the volume of biogas and organic fertilizer]. *Power and Automation*, 3, 155–161.

8. Eder, B., Schultz, H. Biogazovyye ustanovki. Prakticheskoye posobiye [Byogas installation. Practical manual]. Available at : <http://www.zorg-biogas.com>.

РАЗРАБОТКА ВЫСОКОЭФФЕКТИВНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ БИОГАЗА

Н. Ф. Стародуб, С. А. Шворов, Д. С. Комарчук, В. Е. Лукин

Аннотация. *Анализ последних исследований и публикаций показывает, что в биогазовых установках (БГУ) не предполагается применение различных видов сезонной биомассы. При этом неоптимальное управление процессом загрузки различных видов субстратов может привести к значительному уменьшению выхода биогаза. Перспективным направлением устранения указанного недостатка является разработка биогазовой технологии, с помощью которой обеспечивается загрузка БГУ различными видами входных субстратов и специальных добавок, а также создание необходимых условий для получения максимально возможного объема биогаза.*

Целью исследований является разработка инновационной высокоэффективной биогазовой технологии по подготовке входных субстратов и оптимальной дозировке специальных добавок для получения максимальных объемов биогаза.

Одним из направлений интенсификации процессов сбраживания является разрушительная (кавитационная) обработка сырья, и оптимальная дозировка специальных добавок для различных видов сырья. Оптимальный подогрев и перемешивание с необходимой интенсивностью загружаемого субстрата обеспечивает эффективное использование всего объема резервуара БГУ, исключает образование «мертвых» зон, расслоение осадка, откладывание минерализованного осадка и образование корки, а также способствует выравниванию температурного поля и улучшению газообразования.

Процесс интенсификации сбраживания заключается в том, что поток различных видов сырья в роторно-пульсационном аппарате БГУ измельчается до необходимого микроскопического уровня и гомогенизируется. В процессе обработки рвутся связи длинных волокон (лигнин, целлюлоза). Дисперсность увеличивается таким образом, что частицы уменьшаются в размерах до 0,1 мкм. Поэтому бактериям, которые участвуют в процессах образования биогаза, легче раскладывать биогенные материалы. Поэтому содержание метана в биогазе увеличивается до 70-75 %.

С помощью специального иммунного биосенсора определяется количество и интенсивность роста микробной популяции в сброженной биомассе, что необходимо для оптимальной дозировки различных видов специальных добавок, которые позволяют значительно увеличить выход биогаза.

Получены результаты количественного анализа бактерий в биореакторной системе с помощью иммунного биосенсора на основе поверхностного плазмонного резонанса. Учитывая полученные результаты, можно уверенно утверждать, что чувствительность анализа достигает значительного уровня, а главное она покрывает диапазон колебания

концентрации микробных клеток для обеспечения оптимального состояния каталитического процесса брожения. Приведенные данные хорошо согласуются с ранее полученными нами результатами по количественному тестированию некоторых патогенных бактерий.

Ключевые слова: биогазовая технология, биогазовая установка, энергетические культуры, субстраты, примеси, биогаз, метан, оптический иммунный биосенсор, бактерии

DEVELOPMENT HIGH EFFECTIVE TECHNOLOGIES OF BIOGAS PRODUCTION

N. Starodub, S. Shvorov, D. Komarchuk, V. Lukin

Abstract. *Analysis of recent research and publications shows that fixed dosing input substrates is determined at the stage of designing biogas devices. In the established technological process is not expected the use of the different types of seasonal biomass for the biogas devices. However, sub-optimal process control loading different types of substrates can significantly reduce the release of biogas. One promising avenue eliminate these shortcomings is the development of biogas technologies, through which the load of biogas devices are provided by the different types of input substrates and special additives and creation the necessary conditions for obtaining the maximum possible amount of biogas.*

The purpose of this research is to develop highly innovative biogas technology based on dosing incoming substrates and special additives for various types of substrates, the optimum heating and mixing a substrate for obtaining maximum amounts of biogas.

One of the areas of intensification of fermentation is the optimal dosage, destruction, (cavitation) and processing various feedstocks, optimal heating and mixing with optimal intensity loaded substrate, providing efficient use of the entire volume of the tank gas device, prevents the formation of "dead" zones, separation of sludge, laying mineralized sediment and crust formation, and also helps equalize the temperature field and the improvement of gas.

Fermentation process intensification is that the flow of various raw materials in the rotary-pulsation gas device should be microscopic crushed to the required level and then should be homogenised. During the treatment the long fibers (lignin, cellulose) are destroyed. Dispersion increases so that the particles are reduced in size to 0.1 microns. Because strains of bacteria that are involved in the formation of biogas the biogenic materials decompose easily. As a result, the methane content in biogas is increased to 70-75%.

Using a special immune biosensor it was determined the number and rate of growth of microbial populations in the fermented biomass necessary for optimal dosing of various kinds of special additives, which can significantly increase the biogas yield.

Were the results of quantitative analysis of bacteria in a bioreactor system using immune biosensor based on surface plasmon resonance (SPR). In view of the results we can confidently assert that the sensitivity analysis reaches a significant level, and most importantly, it covers a range of fluctuation of the concentration of microbial cells to provide optimal catalytic state fermentation. Moreover, it is necessary to note the express analysis and its simplicity, especially in view of the situation, if transducer surfaces will be preliminary repaired. In this case, the analysis will be within 5 minutes, and the procedure only involves applying drops microbial environment, rinsing the transducer surface and the registration signal. The data are in good agreement with previous results of our quantitative testing on some pathogenic bacteria.

Key words: *biogas technology, biogas plant, energy crops, substrates, additives, biogas, methane, immune optical biosensor bacteria*