

**ПІДВИЩЕННЯ ВИХОДУ БІОГАЗУ В БІОГАЗОВИХ УСТАНОВКАХ ЗА  
РАХУНОК ДОДАВАННЯ СИРОВАТКИ ДО ГНОЮ ВРХ**

*Каміль Віташек, кандидат технічних наук, доцент*

*Познаньський університет наук про життя, Польща*

*С. А. Шворов, доктор технічних наук, професор*

*О. О. Опришко, кандидат технічних наук, доцент*

*А. О. Дудник, кандидат технічних наук, доцент*

*К. Д. Сидорович, студентка ОС Магістр*

*В. В. Якушов, аспірант*

*Національний університет біоресурсів і природокористування України*

*E-mail: [sosdok@nubip.edu.ua](mailto:sosdok@nubip.edu.ua)*

**Анотація.** Нині гостро постає проблема заміщення природного газу біометаном на основі широкого застосування біогазових установок, які забезпечать отримання біогазу, теплової, електричної енергії та високоякісних добрив шляхом анаеробного зброджування органічних відходів. Одним із напрямів підвищення виходу біогазу є інтенсифікація зброджування відходів тваринництва. Метою статті є підвищення виходу біогазу на біогазових установках за рахунок додавання молочної сироватки до гною великої рогатої худоби. Для досягнення зазначеної мети вирішувалися такі завдання: експериментально визначався вихід біогазу при періодичному завантаженні в метантенк гною великої рогатої худоби з додаванням сироватки; на основі отриманих експериментальних даних здійснювалось знаходження інтервалу унімодальності для максимального виходу біогазу при квазібезперервному режимі завантаження метантенка. Розглянуто процес метаногенезу гною великої рогатої худоби з додаванням сироватки у лабораторні міні-реактори біогазових установках Познаньського університету наук про життя.

**Ключові слова:** *міні-реактори, біогазові установки, дослідження метаногенезу, гній великої рогатої худоби, молочна сироватка*

**Актуальність.** Проблема підвищення виходу біогазу на сучасних біогазових установках за рахунок утилізації відходів промислового тваринництва потребує інноваційних підходів через впровадження інноваційних технологій, що забезпечують мінімізацію екологічних ризиків і є економічно рентабельними. Кожний рік у світі виробляється приблизно 140 млн. т молочної сироватки та 78 % її

зливається в каналізацію, завдаючи великих екологічних збитків навколишньому середовищу. В Україні щорічне виробництво сироватки складає понад 3 млн. т, значна частина якої потрапляє до стічних вод [1]. Питання є актуальним не тільки для України, а і для інших країн, так в Марокко проводились дослідження щодо метанового бродіння молочного шламу, де отримали перспективні результати [2]. Сироватка має складний хімічний склад і її частина погано розкладається, що становить істотну проблему навіть при збродженні, і в роботі [3] впроваджували обробку ультразвуком для прискорення процесу. Методика обробки ускладнюється тим, що склад сироватки може змінюватися навіть в межах єдиного резервуару і в роботі [4] запропоновано спеціальні масиви потенціометричних сенсорів для постійного моніторингу в проточних пристроях.

Тобто нині для промислового отримання біогазу шляхом утилізації відходів сироватки розроблено ряд технологічних рішень, які постійно удосконалюються та потребують подальших досліджень. Перспективним шляхом є використання сироватки як компоненту для полегшення збродження іншої біомаси.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій** показує, що додавання в БГУ сироватки в якості косубстрату збільшує вихід біогазу та вміст метану в біогазі. У роботі [5] визначено, що додавання молочної сироватки до гною ВРХ збільшує вихід метану на 84 %. Як показано в роботі [6], при сумісному збродженні в БГУ гною ВРХ із сироваткою після виробництва казеїну вихід біогазу збільшується приблизно на 78 %. У роботі [7] стверджується, що ефективність процесу збродження в БГУ була однаковою при вмісті сироватки в субстраті від 15 % до 75 % з середнім виходом метану  $1,37 \text{ м}^3/\text{м}^3$  субстрату за добу, що потребує проведення подальших досліджень.

**Мета дослідження** – підвищення виходу біогазу на біогазових установках за рахунок додавання молочної сироватки до гною великої рогатої худоби.

Для досягнення зазначеної мети вирішувалися такі завдання: експериментально визначався вихід біогазу при періодичному завантаженні в метантенк гною великої рогатої худоби з додаванням сироватки; на основі отриманих експериментальних даних здійснювалось знаходження інтервалу

унімодальності для максимального виходу біогазу при квазібезперервному режимі завантаження метантенка.

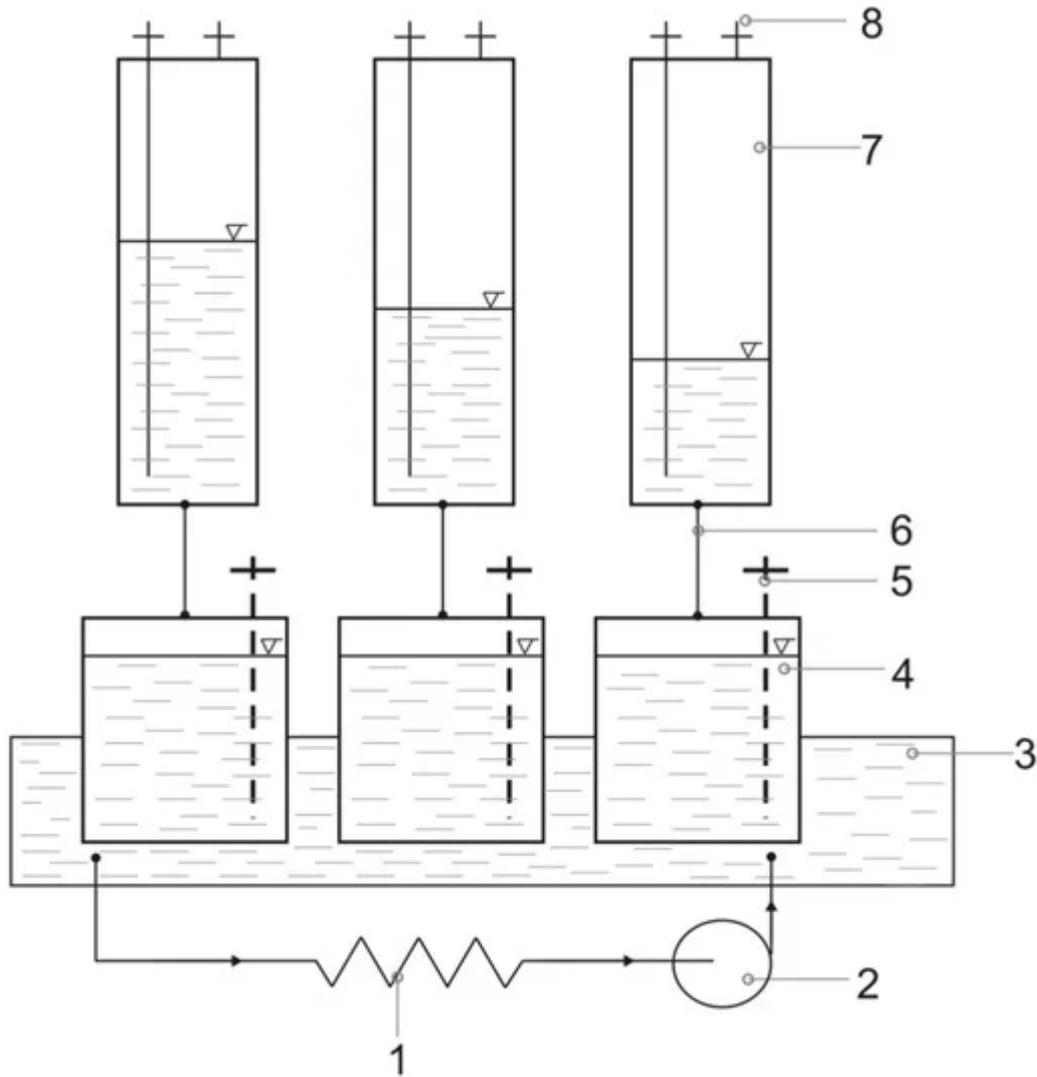
**Матеріали та методи дослідження.** Для проведення дослідження використовувались лабораторні міні-реактори біогазових установок (рис. 1) з системою контролю та управління процесом метанового бродіння (рис. 2) Познанського університету наук про життя. Випробування проводилися на основі німецького стандарту DIN 38 414/S8 і VDI 4630.



**Рис. 1. Лабораторний міні-реактор біогазової установки**

На схемі метантенку для зброджування біогазу показані такі компоненти: 1 – водонагрівач з регулятором температури в межах 20–70 °С; 2 – водяний насос; 3 – водяна сорочка з температурою 39 °С ± 1 °С; 4 – біодигестер ємністю 2 дм<sup>3</sup>; 5 – патрубок для відбору проб біогазової суміші; 6 – труба для транспортування виробленого біогазу; 7 – градуйований біогазовий резервуар; 8 – клапан відбору проб газу.

Режим завантаження метантенка – періодичний, температурний режим – мезофільний. За допомогою системи контролю та управління процесом метанового бродіння забезпечується завантаження гною та сироватки в кожний міні-реактор біогазової установки та відбувається моніторинг виходу біогазу (біометану).



**Рис. 2. Схема метантенка, що використовується для виробництва біогазу**

Основні фізико-хімічні параметри лігноцелюлозної біомаси були визначені на кафедрі інженерії біосистем Познанського університету природничих наук, Польща, де біомаса також була анаеробно розщеплена. На рис. 1 показано вид збоку камер варочного котла. Скляні варильні котли місткістю 2 дм<sup>3</sup> поміщали у водяну сорочку (температуру мезофільного зброджування встановлювали на рівні 39 °С ± 1 °С). Біогаз, який утворювався в процесі, зберігався в циліндричних ємкостях з оргскла об'ємом 5 дм<sup>3</sup>, заповнених нейтральною рідиною, яка перешкождала розчиненню в них газів, переважно вуглекислого газу. Рівень рідини зменшувався в міру збільшення кількості утвореного газу.

Біогазову суміш готували з урахуванням співвідношення сухої органічної речовини субстрату та сухої органічної речовини інокулята. Цей коефіцієнт не може

перевищувати 0,5. Вміст органічної сухої речовини посівного матеріалу становив 1,5–2 % від свіжої маси (м/м).

Процес анаеробного зброджування тривав до тих пір, поки він не припинився (добовий об'єм виробленого біогазу становив менше 1% від загального об'єму). Маса біогазової суміші в усіх пробах була однаковою, тобто 1200 г.

### 1. Вихідні дані для обґрунтування оптимальних значень дозування сироватки

Вхідні дані				Свіжа маса	
Вид силосу,	pH	Електролітична провідність [мСм/см]	Час бродіння [дні]	Суша маса [%]	Суша органічна маса [% с.м.]
SILA	pH	COND	TIME	DM	ODM
Гнойова жижа ВРХ					
Гній великої рогатої худоби	7,63	17,12	37	3,76	69,22
Гній великої рогатої худоби	7,63	17,12	37	3,67	68,96
Гній великої рогатої худоби	7,63	17,12	37	3,66	-
Гній великої рогатої худоби	7,87	26,8	37	3,12	56,70
Гній великої рогатої худоби	7,87	26,8	37	3,11	56,17
Гній великої рогатої худоби	7,87	26,8	37	3,09	-
Сироватка					
Сироватка SBW1	7,85	17,97	13	6,41	92,21
Сироватка SBW2	7,87	18,04	13	6,3906	92,217195
Сироватка SBW3	7,83	18,02	13	6,3435	92,53911
Сироватка SZW1	7,85	16,83	14	4,7711	91,414141
Сироватка SZW3	7,85	16,89	14	4,6707	90,712074

Концентрації метану, вуглекислого газу, сірководню, аміаку та кисню в біогазі вимірювали за допомогою сертифікованого газоаналізатора Geotech GA5000. Кумулятивні обсяги біогазу та метану, вироблених у процесі, були розраховані за

допомогою програмного забезпечення MS Excel та переведені з  $\text{дм}^3 \cdot \text{г}^{-1}$  у  $\text{м}^3 \cdot \text{Мг}^{-1}$ . Кожного разу ефективність біогазу субстратів, які піддавалися і не піддавалися подрібненню та екструзії, перевіряли в трьох повторях [9].

Вихідні данні для обґрунтування оптимальних значень дозування сироватки наведені в таблиці 1, а значення щодо виходу біогазу представлені в таблиці 2.

## 2. Результати визначення виходу біогазу

Вихід					
Свіжа маса		Суша речовина		Суша органічна речовина	
Накопичений метан Свіжа речовина	Накопичувальний біогаз СМ	Кумулятивний метан $[\text{м}^3/\text{т DM}]$	Кумулятивний біогаз $[\text{м}^3/\text{т DM}]$	Кумулятивний метан $[\text{м}^3/\text{т д.м.}]$	Кумулятивний біогаз $[\text{м}^3/\text{т д.м.}]$
Гній великої рогатої худоби					
8,253	12,041	223,062	325,444	322,856	471,044
8,489	12,377	229,439	334,515	332,088	484,156
Сироватка					
25,882	47,350	405,481	741,821	439,204	803,517
25,763	47,203	403,618	739,523	437,187	801,024
25,196	46,113	394,737	723,337	427,567	782,511
18,665	34,777	395,098	736,145	433,302	807,326
18,688	34,946	395,579	739,730	433,829	811,258

Визначення оптимального дозування сироватки базується на знаходженні таких експериментальних даних, при яких забезпечується інтенсифікація бродіння з максимальним виходом біогазу. На основі отриманих даних експериментальних досліджень щодо дозування сироватки, визначаються певні закономірності, характер зв'язків між рівнями факторів (x) і функціями відгуку (y). Обробка результатів досліджень здійснюється для всіх отриманих даних (генеральна сукупність) та вибірково. При цьому проводяться розрахунки середніх значень виходу біогазу; середніх квадратичних відхилень; коефіцієнтів регресії та визначається довірчий інтервал для середнього значення; найменшої істотної

різниці; оцінюється достовірність отриманих результатів (перевірка нульової гіпотези) [8].

За допомогою отриманої математичної моделі визначається залежність між  $x$  і  $y$ , яку можна подати у вигляді многочлену виду:

$$y = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + \dots + a_m x^m. \quad (1)$$

Один із методів знаходження коефіцієнтів рівнянь, які описують експериментальні точки, є метод найменших квадратів.

Взаємозв'язок між змінними  $x$  і  $y$  можна описати такою залежністю:

$$y = a_0 + a_1 x + a_2 x^2. \quad (2)$$

Оскільки ця крива не накладається точно на експериментальні точки, то під час знаходження  $i$ -го значення за формулою (2), порівняно з табличним значенням  $y_i$ , буде виникати похибка:

$$y_i - a_0 - a_1 x_i - a_2 x_i^2 = \varepsilon_i. \quad (3)$$

Задача знаходження коефіцієнтів рівняння полягає в тому, щоб сумарна похибка для всіх  $n$  точок була мінімальною:

$$\sum_{i=1}^n \varepsilon_i = \sum_{i=1}^n (y_i - a_0 - a_1 x_i - a_2 x_i^2) \rightarrow \min. \quad (4)$$

Але цей критерій у розрахунку коефіцієнтів рівняння не може бути використаний, бо є додатні та від'ємні значення похибок. І коли сума  $\varepsilon_i$  буде в рівнянні (4) дорівнювати 0, то це не означатиме, що похибок немає і рівняння вибране найкраще.

Враховуючи це, як критерій оцінки рівняння вибрано мінімум суми квадратів похибок:

$$\sum_{i=1}^n (\varepsilon_i)^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - a_0 - a_1 x_i)^2 \rightarrow \min. \quad (5)$$

У результаті розв'язання задачі з використанням ППП MathCad, визначаються коефіцієнти рівнянь, середньоквадратичні похибки рівнянь і будується графік  $f(x)$ .

Постановка задачі оптимізації передбачає наявність одного параметра оптимізації  $x$  (кількість органічних відходів) і цільової функції  $f(x) \rightarrow \max$  (вихід біогазу), визначеної в області допустимих значень  $x \in D$ , де  $D = [a, b]$ , а  $a$  і  $b$  – дійсні

числа вибрані на діапазоні  $[-\infty, +\infty]$ . Те, що пошук оптимуму обмежений пошуком мінімального значення, не грає суттєвої ролі, оскільки пошук максимуму  $f(x)$  еквівалентний пошуку мінімуму  $-f(x)$ .

При наявності декількох рішень – мінімумів, точкою глобального мінімуму функції  $f(x)$  в області допустимих значень  $D$  буде така точка  $x^*$ , при якій виконується умова:

$$f(x^*) \leq f(x) \text{ при всіх } x \in D. \quad (6)$$

Точкою локального мінімуму функції буде точка  $x^*$ , в якій, при наявності додатного числа  $r$ , виконується умова:

$$f(x^*) \leq f(x) \text{ при всіх } x \in \{x: |x^* - x| \leq r\}. \quad (7)$$

Вирішення цієї задачі однопараметричної оптимізації може здійснюватися багатьма методами, серед яких найбільш популярними є методи: “золотого розтину” або Фібоначчі, дихотомії або половинного ділення, квадратичної апроксимації або Паулла та інші [10]. Для їх використання слід спочатку знайти інтервал  $[a, b]$ , в середині якого знаходиться тільки одна точка мінімуму  $x^*$ , тобто такий інтервал, на якому функція буде унімодальною. Унімодальною на інтервалі  $a \leq x \leq b$  функція  $f(x)$  буде тільки тоді, коли вона монотонна по обидва боки від оптимальної точки  $x^*$ . Властивістю унімодальної функції є те, що коли на інтервалі  $[a, b]$  є дві точки  $x_1$  і  $x_2$ , і при цьому  $a < x_1 < x_2 < b$ , тоді при:

$$f(x_1) \leq f(x_2) \text{ значення } x^* < x_2,$$

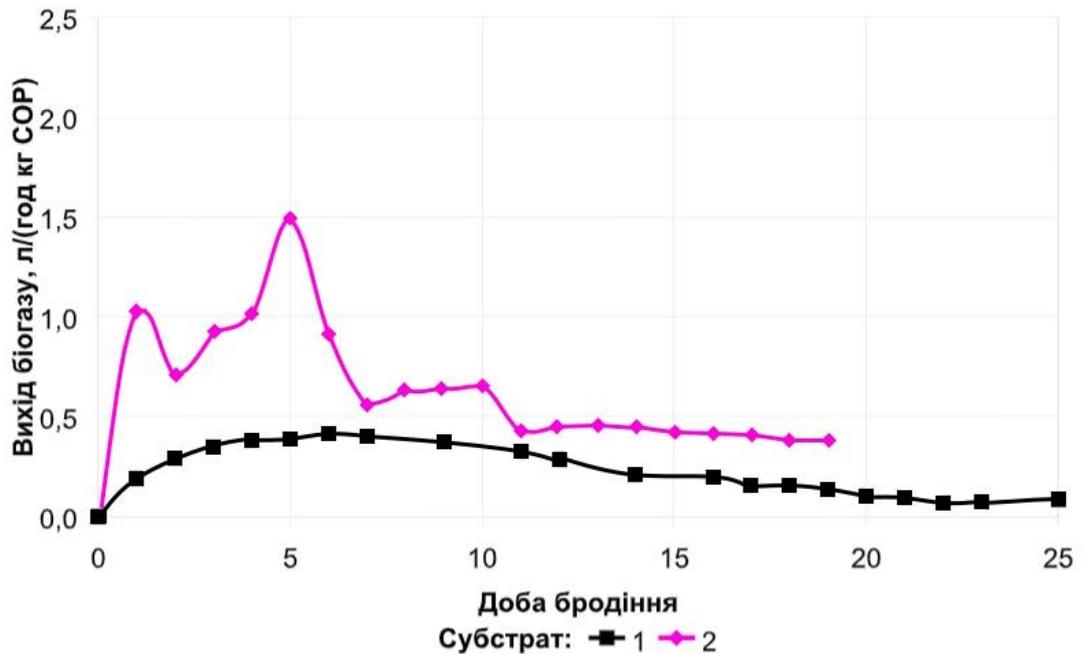
$$\text{а при } f(x_1) \geq f(x_2) \text{ значення } x^* > x_2.$$

Ця властивість унімодальної функції широко використовується в методах оптимізації, які зменшують інтервал  $[a, b]$ . Це такі методи, як “золотого перетину”, половинного ділення та рівномірного пошуку.

Інтервал унімодальності (невизначеності)  $[a, b]$  знаходиться послідовними зростаючими кроками в напрямку зменшення цільової функції до тих пір поки вона не почне зростати.

**Результати досліджень та їх обговорення.** На основі застосування цього математичного апарату отримане порівняння динаміки виходу біогазу при

монозброджуванні гною ВРХ (субстрат 1) та з оптимальним (субстрат 2) додаванням молочної сироватки (рис. 3).



**Рис. 3. Динаміка інтенсивного виходу біогазу при зброджуванні суцільного субстрату ВРХ та субстрату із заміною 60 % води сироваткою при температурі бродіння 35 °С**

Із рис. 3 видно, що інтенсифікація та найбільший вихід біогазу в границях інтервалу унімодальності забезпечується тільки при оптимальному додаванні до субстрату із заміною 60 % води в субстраті сироваткою.

Результати порівняння накопичених виходів біогазу (табл. 2) дають можливість надати практичні науково обґрунтовані методичні рекомендації щодо оптимального дозування та інтенсивного зброджування молочної сироватки.

Таким чином, за допомогою розробленого математичного апарату визначені оптимальні обсяги дозування сироватки для квазібезперевного завантаження метантенка, тобто обґрунтована оптимальна рецептура дозування сироватки для інтенсифікації зброджування гною великої рогатої худоби.

В умовах енергетичної кризи значимість результатів досліджень полягає в тому, що за допомогою спеціальних дозаторів при оптимальному додаванні в метантенки промислових біогазових заводів сироватки збільшується вихід біогазу

(біометану), а це дозволяє значно покращити екологічну обстановку в регіоне та отримати термін окупності біогазової установки до 6,4 років.

### **Висновки і перспективи.**

1. В умовах сільськогосподарського підприємства тваринницького типу накопичується достатньо велика кількість тваринницьких відходів (як правило, гною великої рогатої худоби та молочної сироватки), які необхідно використати в якості сировини для виробництва біогазу. Однак вихід біогазу із суцільного гною великої рогатої худоби недостатній для швидкої окупності капіталовкладень в біогазову установку. Для інтенсифікації бродіння та підвищення виходу біогазу до гною великої рогатої худоби необхідно додавати косубстрати, в якості яких можна використовувати сироватку.

2. Розроблені методичні основи інтенсифікації бродіння, які базуються на знаходженні інтервалу унімодальності, в границях якого за допомогою методу дихотомії забезпечується підвищення виходу біогазу за рахунок додавання до субстрату оптимальної кількості сироватки.

3. Розроблені методичні рекомендації збільшення виходу біогазу на промислових біогазових заводах, використання яких дозволяє в умовах енергетичної кризи науково обґрунтовано покращити екологічну обстановку в регіоні та отримати додаткові енергетичні ресурси. При цьому наявні органічні відходи, які скидаються на стихійних та легалізованих полігонах, здатні повністю забезпечити біогазові заводи високопродуктивними косубстратами, що дозволить значно скоротити та отримати термін окупності біогазових установок до 6,4 років.

### **Список використаних джерел**

1. Мусійчук О. Перспективи використання продуктів переробки молочної сироватки. Товари і ринки. 2008. №1. С. 78-83.
2. I. Beniche, F. Karouach, M. Bakraoui and H. E. Bari, "Energy Recovery Study by the Anaerobic Digestion of Dairy Dudge from Moroccan Industry," 2019 7th International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC), Agadir, Morocco, 2019, pp. 1-6, doi: 10.1109/IRSEC48032.2019.9078301
3. J. H. El Achkar, R. Ziade, N. Louka, R. G. Maroun and Z. Hobaika, "Treatment of dairy waste by anaerobic digestion to produce methane as green energy," 2020 5th International Conference on Renewable Energies for Developing Countries (REDEC), Marrakech, Morocco, 2020, pp. 1-6, doi: 10.1109/REDEC49234.2020.9163848.

4. P. Ciosek, A. Buczkowska, E. Witkowska, W. Wróblewski, A. Zamojska and K. Szewczyk, "Miniaturized flow-through sensor array for methane fermentation monitoring," *SENSORS*, 2009 IEEE, Christchurch, New Zealand, 2009, pp. 1502-1505, doi: 10.1109/ICSENS.2009.5398463.

5. Vivekanand V., Mulat D. G., Eijsink V. G. H. Synergistic effects of anaerobic co-digestion of whey, manure and fish ensilage. *Bioresource Technology*. 2018. Vol. 249. C. 35-41. doi: 10.1016/j.biortech.2017.09.169.

6. Brown N., Guttler J., Shilton A. Overcoming the challenges of full scale anaerobic co-digestion of casein whey. *Renewable Energy*. 2016. Vol. 96, Iss. A. P. 425-432. doi: 10.1016/j.renene.2016.04.044.

7. Rico C., Munoz N., Fernandez J. High-load anaerobic co-digestion of cheese whey and liquid fraction of dairy manure in a one-stage UASB process: Limits in co-substrates ratio and organic loading rate. *Chemical Engineering Journal*. 2015. Vol. 262. P. 794-802. doi: 10.1016/j.cej.2014.10.050.

8. Rogovskii, I.L., Polishchuk, V.M., Titova, L.L., Sivak, I.M., Vyhovskyi, A.Yu., Drahnev, S.V., Voinash, S.A. (2020). Study of Biogas During Fermentation of Cattle Manure Using A Stimulating Additive In Form Of Vegetable Oil Sediment. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2020. 15 (22). 2652-2663.

9. Witaszek, K.; Herkowiak, M.; Pilarska, A.A.; Czekala, W. Methods of Handling the Cup Plant (*Silphium perfoliatum* L.) for Energy Production. *Energies* 2022, 15, 1897. <https://doi.org/10.3390/en15051897>

10. C. Qiu, X. Song, X. Qi, Y. Han, H. Fan and N. Yang, "Analysis of multi-stage active distribution network planning based on golden section Fibonacci tree optimization method," 2021 China International Conference on Electricity Distribution (CICED), Shanghai, China, 2021, pp. 742-746, doi: 10.1109/CICED50259.2021.9556789.

## References

1. Musiichuk, O. (2008). Perspektyvy vykorystannia produktiv pererobky molochnoi syrovatky [Prospects for the use of whey processing products]. *Goods and Markets*, 1, 78-83.

2. I. Beniche, F. Karouach, M. Bakraoui, H. E. Bari (2019). Energy Recovery Study by the Anaerobic Digestion of Dairy Sludge from Moroccan Industry, 7th International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC), Agadir, Morocco, 2019, 1-6, doi: 10.1109/IRSEC48032.2019.9078301

3. J. H. El Achkar, R. Ziade, N. Louka, R. G. Maroun, Z. Hobaika (2020). Treatment of dairy waste by anaerobic digestion to produce methane as green energy, 5th International Conference on Renewable Energies for Developing Countries (REDEC), Marrakech, Morocco, 2020, 1-6, doi: 10.1109/REDEC49234.2020.9163848.

4. P. Ciosek, A. Buczkowska, E. Witkowska, W. Wróblewski, A. Zamojska, K. Szewczyk (2009). Miniaturized flow-through sensor array for methane fermentation monitoring, *SENSORS*, IEEE, Christchurch, New Zealand, 2009, 1502-1505, doi: 10.1109/ICSENS.2009.5398463.

5. Vivekanand, V., Mulat, D. G., Eijsink, V. G. H. (2018). Synergistic effects of anaerobic co-digestion of whey, manure and fish ensilage. *Bioresource Technology*, 249, doi: 10.1016/j.biortech.2017.09.169.

6. Brown, N., Guttler, J., Shilton, A. (2016). Overcoming the challenges of full scale anaerobic co-digestion of casein whey. *Renewable Energy*, 96, A, 425-432. doi: 10.1016/j.renene.2016.04.044.
7. Rico, C., Munoz, N., Fernandez, J. (2015). High-load anaerobic co-digestion of cheese whey and liquid fraction of dairy manure in a one-stage UASB process: Limits in co-substrates ratio and organic loading rate. *Chemical Engineering Journal*, 262, 794-802. doi: 10.1016/j.cej.2014.10.050.
8. Rogovskii, I.L., Polishchuk, V.M., Titova, L.L., Sivak, I.M., Vyhovskiy, A.Yu., Drahnev, S.V., Voinash, S.A. (2020). Study of Biogas During Fermentation of Cattle Manure Using A Stimulating Additive In Form Of Vegetable Oil Sediment. *ARP Journal of Engineering and Applied Sciences*, 15 (22). 2652-2663.
9. Witaszek, K.; Herkowiak, M.; Pilarska, A.A.; Czekala, W. (2022). Methods of Handling the Cup Plant (*Silphium perfoliatum* L.) for Energy Production. *Energies*, 15, 1897. <https://doi.org/10.3390/en15051897>
10. C. Qiu, X. Song, X. Qi, Y. Han, H. Fan and N. Yang (2021). Analysis of multi-stage active distribution network planning based on golden section Fibonacci tree optimization method, *China International Conference on Electricity Distribution (CICED)*, Shanghai, China, 2021, 742-746, doi: 10.1109/CICED50259.2021.9556789.

## **INCREASING BIOGAS YIELD IN BIOGAS PLANTS BY ADDING WHEY TO CATTLE MANURE**

***K. Witaszek, S. Shvorov, O. Opryshko, A. Dudnyk, K. Sydorovych,  
V. Yakushov***

**Abstract.** *Currently, the problem of replacing natural gas with biomethane based on the widespread use of biogas plants, which will ensure the production of biogas, heat, electricity and high-quality fertilizers by anaerobic digestion of organic waste, is acute. One of the directions of increasing biogas yield is the intensification of fermentation of livestock waste. The aim of the article is to increase biogas yield in biogas plants by adding whey to cattle manure. To achieve this goal, the following tasks were solved: the biogas yield was experimentally determined when cattle manure was periodically loaded into the methane tank with the addition of whey; based on the experimental data obtained, the unimodality interval for the maximum biogas yield was found in the quasi-continuous mode of loading the methane tank. The process of methanogenesis of cattle manure with the addition of whey in laboratory mini-reactors of biogas plants of the Poznań University of Life Sciences was considered. Using the dichotomy method, the optimal volumes of whey addition to the substrate were substantiated, which ensure the maximum increase in biogas (biomethane) yield.*

**Key words:** *mini-reactors, biogas plants, methanogenesis research, cattle manure, whey*