

## **ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОЦЕСУ ФЕРМЕНТАЦІЇ ОСАДІВ СТІЧНИХ ВОД ДЛЯ ПОКРАЩЕННЯ ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕНОСТІ ОЧИСНИХ СПОРУД**

**Кравченко В. І.** - кандидат технічних наук, доцент,  
доцент кафедри гідротехнічного будівництва, водної та електричної  
інженерії  
Херсонський державний аграрно-економічний університет  
ORCID: 0000-0003-2245-7194

*У статті Кравченка В. І. «Підвищення ефективності процесу ферментації осадів стічних вод для покращення енергозабезпеченості очисних споруд» надана інформація, яка стосується відновлюваних джерел енергії у галузі очистки стічних вод та обробки осадів, з метою їх використання як ресурсу на комунальних очисних спорудах для власного виробництва енергії. Комунальні очисні споруди потребують подачі значних об'ємів електроенергії, яка необхідна для транспортування стічних вод, ведення технологічних процесів та експлуатації адміністративних об'єктів. Біогаз, що утворюється при анаеробному зброджуванні осадів стічних вод, є цінним джерелом відновлюваної енергії, який може покращити енергетичний баланс об'єкта. Досягнення повної енергозабезпеченості на очисних спорудах можливе за рахунок впровадження технології анаеробного сумісного зброджування, яка здатна компенсувати енергетичний дефіцит очисних споруд, а також забезпечити переробку мулових осадів. За такою технологією передбачається додавати до осадів ко-субстрати, які характеризуються значним вмістом легкоферментованої органіки та мають високий біогазовий потенціал. У статті розглянуті відомі заходи по інтенсифікації виробництва біогазу та визначено переваги та обмеження*

процесу ко-ферментації у порівнянні з моноферментацією. В роботі визначено вплив можливої реалізації процесу сумісного зброджування на енергоефективність станції очистки стічних вод у місті Кропивницький. Проаналізовані технологічна і енергетична ефективність процесу ко-ферментації осадів стічних вод з відходами м'ясопереробного підприємства. На основі аналізу показано, що при сумісному зброджуванні осадів і відходів м'ясокомбінату можна додатково, у порівнянні з моноферментацією, отримувати приріст метану у кількості  $774 \text{ м}^3 \text{ CH}_4/\text{добу}$ , що еквівалентно  $2800 \text{ МВт} \cdot \text{год}/\text{рік}$  енергії. Застосування на підприємстві когенераційної установки дозволить додатково отримувати  $980 \text{ МВт} \cdot \text{год}/\text{рік}$  електричної та  $1500 \text{ МВт} \cdot \text{год}/\text{рік}$  теплової енергії та покривати потреби в енергії у високій степені.

**Ключові слова:** осади стічних вод, очисні споруди, анаеробне зброджування, ко-субстрати, ко-ферментація, біогаз, енергоефективність

***Kravchenko V.I. Increasing the efficiency of the sewage sludge fermentation process to improve the energy security of treatment plants***

*The article by V. I. Kravchenko “Increasing the efficiency of the fermentation process of sewage sludge to improve the energy security of treatment facilities” provides information on renewable energy sources in the field of wastewater treatment and sludge processing, with the aim of using them as a resource at municipal treatment facilities for their own energy production. Municipal treatment facilities require the supply of significant volumes of electricity, which is necessary for the transportation of wastewater, the conduct of technological processes and the operation of administrative facilities. Biogas formed during anaerobic digestion of sewage sludge is a valuable source of renewable energy that can improve the energy balance of the facility. Achieving full energy security at treatment facilities is possible through the implementation of anaerobic co-digestion technology, which is able to compensate for the energy deficit of treatment facilities, as well as ensure the processing of sludge. This technology involves adding co-substrates to the*

*sludge, which are characterized by a significant content of easily fermented organic matter and have a high biogas potential. The article reviews known measures to intensify biogas production and identifies the advantages and limitations of the co-fermentation process compared to mono-fermentation. The paper determines the impact of the possible implementation of the co-fermentation process on the energy efficiency of the wastewater treatment plant in the city of Kropyvnytskyi. The technological and energy efficiency of the co-fermentation process of sewage sludge with waste from a meat processing plant are analyzed. Based on the analysis, it is shown that with co-fermentation of sludge and waste from a meat processing plant, it is possible to additionally obtain an increase in methane in the amount of 774 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/day, which is equivalent to 2800 MWh/year of energy. The use of a cogeneration plant at the enterprise will allow to additionally obtain 980 MWh/year of electrical energy and 1500 MWh/year of thermal energy and cover energy needs to a high degree.*

**Keywords:** *sewage sludge, treatment plants, anaerobic digestion, co-substrates, co-fermentation, biogas, energy efficiency*

**Вступ.** Останні десятиліття дефіцит енергії став важливою глобальною проблемою, а з урахуванням військової агресії з боку РФ, вона ще більше загострилася. Відновлювані джерела енергії набувають великого значення через обмежені запаси викопного палива і зростаюче занепокоєння щодо зміни клімату. З огляду на це, муніципальні стічні води та їх осади є важливим джерелом енергії, оскільки щодня утворюються та очищаються величезні обсяги стічних вод. Незважаючи на свою достатню надійність та доведену ефективність, сучасні процеси очистки стічних вод та обробки їх осадів вимагають великих енерговитрат. Так, електрична енергія використовується на всіх стадіях очистки, де задіяні системи електроприводу у вигляді електродвигунів. Електродвигуни застосовуються для стиснення, перекачування і транспортування рідин і газів за допомогою насосів, вентиляторів і компресорів. Також вони застосовуються у змішувачах, пресах

та інших пристроях для переробки відходів, відокремлених від стічних вод (піску, осадів) [1].

Системи електроприводу застосовуються на кожному етапі очистки стічних вод: змішування, аерація, перекачування, що входять до складу системи очистки стічних вод, впливають на споживання електроенергії [2].

Теплова енергія використовується при переробці осадів стічних вод (ОСВ) у метантенках, осушувачах, а також на соціальні потреби працівників, опалення технічних і адміністративних будівель тощо. Тому систему очистки стічних вод також слід розглядати як теплоенергетичну систему [3].

Найвищі енерговитрати виникають при аерації активного мулу, перекачуванні і перемішуванні активного мулу. Крім того, енерговитрати пов'язані з підтримкою оптимальної температури у метантенах і сушінням осаду стічних вод.

На сьогодні економія енергії на КОС переважно пов'язана з удосконаленням або заміною енергоємного обладнання (насосів, змішувачів, повітродувок), а також з впровадженням інтелектуальних систем управління і контролю процесів очистки стічних вод. Однак разом з тим, слід розглядати можливість виробництва електричної і теплової енергії з ОСВ, шляхом ефективного їх збродження у метантенках та продукування біогазу [4]. Для досягнення енергетичної забезпеченості на очисних спорудах необхідно розробити технології, які здатні здійснювати очищення стічних вод і переробку їх осадів із позитивним енергетичним балансом.

**Метою роботи** є виявлення шляхів підвищення ефективності процесу ферментації для виходу біогазу з осадів стічних вод та зниження енергоспоживання на очисних спорудах.

**Виклад основного матеріалу.** ОСВ має значний потенціал рекуперації енергії, що може позитивно вплинути на енергетичний баланс всього підприємства [5]. З урахуванням енергетичного балансу очисних споруд, найбільш раціональним рішенням є анаеробне збродження ОСВ, що здійснюють у метантенках (рис. 1) біогазових установок.

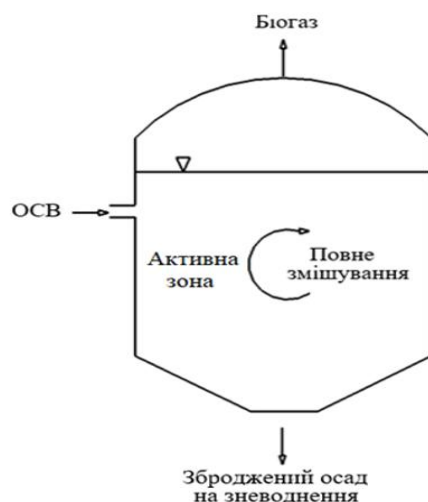


Рисунок 1 – Схема метантенка для анаеробного збродження осадів стічних вод

Однак ОСВ характеризуються низьким співвідношенням вуглецю до азоту (C/N), низькою анаеробною деструкцією, а також відносно низьким біогазовим потенціалом [6].

Сьогодні одним з пріоритетів технології анаеробного збродження є інтенсифікація виробництва біогазу, а також підвищення стабільності процесу. Підвищити ефективність ферментації ОСВ з метою збільшення виходу біогазу можна досягнути наступними технологічними та фізико-хімічними заходами:

- попередньою обробкою осадів (механічна дезінтеграція, термічна обробка, хімічна та фізико-хімічна обробка);
- оптимізацією режимів ферментації (температурний режим: мезофільний або термофільний, гідравлічний час утримання, органічне навантаження);
- контроль інгібіторів та хімічних показників (рН (6,8-7,4) і лужність, аміак та сірководень, мікроелементи);
- конструктивні та технологічні рішення (ефективне перемішування без руйнування біоценозу), багатоступенева ферментація, двофазні метантенки, автоматизовані системи контролю (SCADA).

Однак найбільш перспективним рішенням є біологічний метод інтенсифікації продукування біогазу, при якому передбачається сумісне зброджування ОСВ з іншими відходами (процес ко-ферментації) [7, 8].

У порівнянні з попередньо згаданими методами обробки ОСВ, процес ко-ферментації характеризується відносно низькою вартістю реалізації. У порівнянні з моноферментацією сумісне зброджування має значні переваги, а саме: покращення виробництва біогазу і метану, підвищення ефективності біорозкладання, а також підвищення стабільності процесу. Також важливо, що така стратегія включає в себе невикористаний біогазовий потенціал існуючих метантенків [9].

Успішне застосування цієї стратегії залежить від кількох чинників, у тому числі від типу і дози ко-субстрату, а також від правильно вибраних робочих умов. Однак вирішальним елементом ко-ферментації є вибір субстратів, сумісних за складом основній сировині. Такі компоненти повинні забезпечувати необхідний баланс живильних речовин у сировині [10], покращити співвідношення вуглець/азот (C/N), а також розбавляти інгібуючі або токсичні сполуки в основній сировині [11]. Окрім того, перевага повинна віддаватися відходам з високим біогазовим потенціалом і значним вмістом мікро- і макроелементів.

Для ко-ферментації з ОСВ найефективнішими є органічні відходи, які підвищують вміст легкоферментованої органіки, забезпечують оптимальний баланс C/N та швидкість метаногенезу і не викликають інгібування. До таких високоенергетичних субстратів відносяться харчові відходи, жири, олії, жировловлювальні відходи (відомі як FOG), а також відходи агропромислового комплексу. У таблиці 1 представлені можливі органічні відходи для ко-ферментації з ОСВ.

Таблиця 1 - Найбільш ефективні органічні відходи для ко-ферментації з осадами стічних вод

Назва відходів	ОСВ	Жири, олії, жировмісні відходи	Відходи м'ясопереробки	Харчові відходи	Відходи молочної промисловості	Рослинні та агровідходи
----------------	-----	--------------------------------	------------------------	-----------------	--------------------------------	-------------------------

Вихід метану, м <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /т VS	250-350	900–1200	600–800	500–700	450–650	200-420
C/N	10–15	40–50	20–25	15–25	< 15:1	> 40:1

Менш ефективними для збродження з ОСВ вважаються: солома і тирса, через низьку біодоступність; курячий послід, через надлишок аміаку (NH<sub>3</sub>); кістки, оскільки є майже небіодеградовані.

При анаеробному збродженні (метаногенезі) співвідношення C/N є дуже важливим параметром живлення мікроорганізмів, що впливає на ефективність ферментації, стабільність процесу та утворення біогазу. Його оптимальне співвідношення зазвичай повинно становити 25–30:1. ОСВ характеризується низьким співвідношенням C/N (10-15:1) і низькою анаеробною деструкцією.

Якщо C/N нижче ~20:1, тобто при надлишку азоту, відбувається утворення токсичного амонію (NH<sub>3</sub>) з пригніченням мікроорганізмів і, отже, метаногенезу. При цьому необхідно збільшувати С-фракцію, тобто додавати побічні вуглецевмісні матеріали, або змішувати з іншими відходами. При C/N вище ~35–40:1, тобто при недоліку азоту, відбувається уповільнене зростання мікроорганізмів, що знижує продуктивність.

ОСВ та жировмісні відходи мають протилежні C/N властивості. Змішування їх разом може дати більш оптимальне співвідношення для метаногенезу – ближче до 25–30:1, що підвищить продуктивність біогазу та стабільність процесу. Тому осадки повинні зброджуватися сумісно із субстратами, які містять значну кількість органічних речовин, які легко розкладаються. Також існує потреба у різних мікро- і макроелементах, які дефіцитні в ОСВ.

Враховуючи викладене вище, найбільш доцільним є застосування наступних субстратів: органічні фракції твердих побутових відходів, жиромасложирові відходи, різні побічні продукти агропромислового виробництва, наприклад, відходи фруктів та овочів, гліцерин та відходи скотобійні [12]. Серед перелічених субстратів значний інтерес являє використання відходів,

що характеризуються значною жирністю. Такі побічні продукти утворюються у харчовій промисловості, включаючи бойні, м'ясокомбінати, а також підприємства по виробництву жирів та олії.

Так, наприклад, для ко-ферментації з осадами стічних вод на КОС м. Кропивницький можуть слугувати відходи продукції м'ясокомбінату ТДВ «М'ясокомбінат «Ятрань». Це підприємство м'ясопереробної галузі з повним циклом обробки м'яса, яке спеціалізується на випуску ковбасних і м'ясних виробів із сировини тваринного походження (великої рогатої худоби, свиней, птахів). Звісно, на такому підприємстві утворюються виробничі відходи та стоки (жири, органіка тощо), які мають проходити очищення перш ніж спрямовуватися у мережу або водні об'єкти.

Приклад розрахунку ефективності ко-ферментації ОСВ з комунальних очисних споруд міста Кропивницький з відходами м'ясокомбінату «Ятрань» представлено у таблиці 2 з наступними вихідними даними: витрата стічних вод 50 000 м<sup>3</sup>/добу; утворення зневодненого осаду ≈ 0,8 кг сухої речовини (СР)/ м<sup>3</sup>; вміст летких речовин (VS) 65% СР; кількість відходів м'ясокомбінату «Ятрань» - 10 т/добу (вологих), СР 20%, VS 85% від СР.

Таблиця 2 - Розрахунок ефективності ко-ферментації ОСВ з комунальних очисних споруд м. Кропивницький з відходами м'ясокомбінату «Ятрань»

Параметр	ОСВ	Відходи м'ясокомбінату	ОСВ + відходи м'ясокомбінату
СР, кг /добу	$50000 \cdot 0,8 = 40000$	$10000 \cdot 0,2 = 2000$ кг	
VS, кг /добу	$40000 \cdot 0,65 = 26000$	$2000 \cdot 0,85 = 1700$	$26000 + 1700 = 27700$
Питомий вихід біогазу, м <sup>3</sup> біогазу/кг VS	0,3	0,7	
Метан	60 %	65%	
Вихід біогазу, м <sup>3</sup> /добу	$26000 \cdot 0,3 = 7800$	$1700 \cdot 0,7 = 1190$	$7800 + 1190 = 8990$
Вихід метану, м <sup>3</sup> СН <sub>4</sub> /добу	$7800 \cdot 0,6 = 4680$	$1190 \cdot 0,65 = 774$	$4680 + 774 = 5454$

Результати розрахунку показують, що при ко-ферментації ОСВ КОС м. Кропивницький з відходами м'ясокомбінату «Ятрань» можна отримати приріст виробництва метану у кількості  $774 \text{ м}^3 \text{ CH}_4/\text{добу}$  (~15%) у порівнянні з анаеробною переробкою тільки ОСВ. При теплоті згоряння метану  $9,97 \text{ кВт}\cdot\text{год} / \text{м}^3 \text{ CH}_4$ , додаткова енергія складе:  $774 \cdot 9,97 = 7720 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{добу} \approx 2800 \text{ МВт}\cdot\text{год}/\text{рік}$ .

На сьогодні виробництво з біогазу тільки теплової енергії може бути успішно замінено обладнанням для комбінованого виробництва теплової та електричної енергії. Такі когенераційні установки дають можливість виробляти електричну енергію, яка може бути використана для власних потреб об'єкта, що значно дешевше ніж купувати її з мережі. При надлишку електричної енергії, вона може реалізовуватися у загальну розподільчу електромережу. Для розглянутих умов при когенерації з електричним ККД  $\eta_e = 35 \%$  додатково можна отримувати  $980 \text{ МВт}\cdot\text{год}/\text{рік}$  електричної та  $1500 \text{ МВт}\cdot\text{год}/\text{рік}$  теплової енергії.

**Висновки.** Ефективним шляхом досягнення повної енергозабезпеченості на комунальних очисних спорудах є впровадження анаеробного зброджування осадів стічних вод з додаванням ко-субстратів, що характеризуються відносно високим біогазовим потенціалом.

На основі аналізу показано, що очисні споруди у місті Кропивницький при застосуванні процесу ко-ферментації власних відходів та відходів м'ясопереробного підприємства ТДВ «Ятрань» зможуть одержувати приріст метану у кількості  $774 \text{ м}^3 \text{ CH}_4/\text{добу}$  у порівнянні зі зброджуванням тільки осадів стічних вод та виробляти при цьому в середньому більше енергії на  $2800 \text{ МВт}\cdot\text{год}/\text{рік}$ . При використанні когенераційної установки додатково можна буде отримувати  $980 \text{ МВт}\cdot\text{год}/\text{рік}$  електричної та  $1500 \text{ МВт}\cdot\text{год}/\text{рік}$  теплової енергії.

Застосування технології сумісного зброджування дасть можливість компенсувати енергетичний дефіцит очисних споруд та забезпечити комплексне очищення стічних вод і переробку осадів із досягненням

позитивного енергетичного балансу. Така технологія буде сприяти ефективному поводженню з відходами та принесе прибутковість як комунальним очисним спорудам, так і м'ясопереробному підприємству.

### **СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:**

1. Masło, A., Czarnota, J., Szaja, A., Szulzyk-Cieplak, J., Łagód, G. The enhancement of energy efficiency in a wastewater treatment plant through sustainable biogas use: case study from Poland // *Energies*. 2020. Vol. 13, Issue 6056. P. 1–21. URL: <https://www.mdpi.com/journal/energies>.
2. Drewnowski, J., Remiszewska-Skwarek, A., Duda, S., Łagód, G. Aeration process in bioreactors as the main energy consumer in a wastewater treatment plant. Review of solutions and methods of process optimization // *Processes*. – 2019. Vol. 7, Issue 311. URL: [https://www.researchgate.net/publication/333360917\\_Aeration\\_Process\\_in\\_Bioreactors\\_as\\_the\\_Main\\_Energy\\_Consumer\\_in\\_a\\_Wastewater\\_Treatment\\_Plant\\_Review\\_of\\_Solutions\\_and\\_Methods\\_of\\_Process\\_Optimization](https://www.researchgate.net/publication/333360917_Aeration_Process_in_Bioreactors_as_the_Main_Energy_Consumer_in_a_Wastewater_Treatment_Plant_Review_of_Solutions_and_Methods_of_Process_Optimization).
3. Di Fraia, S., Massarotti, N., Vanoli, L. A novel energy assessment of urban wastewater treatment plants // *Energy Conversion and Management*. 2018. Vol. 163. P. 304–313. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0196890418301742>.
4. Кравченко, В. І. Застосування осадів стічних вод для підвищення енергоефективності роботи комунальних очисних споруд / В. І. Кравченко // *Таврійський науковий вісник. Серія: Технічні науки / Херсонський державний аграрно-економічний університет*. Херсон: Видавничий дім «Гельветика», 2025. Вип. 4, ч. 2. С. 236–242. DOI: <https://doi.org/10.32782/tnv-tech.2025.4.2.25>.
5. Caposciutti, G., Vaccioli, A., Ferrari, L., Desideri, U. Biogas from anaerobic digestion: power generation or biomethane production? // *Energies*. 2020. Vol. 13, Issue 743. URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/13/3/743>.

6. Silvestre, G., Rodríguez-Abalde, A., Fernández, B., Flotats, X., Bonmatí, A. Biomass adaptation over anaerobic co-digestion of sewage sludge and trapped grease waste // *Bioresource Technology*. 2011. Vol. 102. P. 6830–6836. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S096085241100513X>.
7. Mata-Álvarez, J., Dosta, J., Romero-Güiza, M. S., Fonoll, X., Peces, M., Astals, S. A critical review on anaerobic co-digestion achievements between 2010 and 2013 // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014. Vol. 36. P. 412–427. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032114002664>.
8. Chow, W. L., Chong, S., Lim, J. W., Chan, Y. J., Chong, M. F., Tiong, T. J., Chin, J. K., Pan, G.-T. Anaerobic co-digestion of wastewater sludge: a review of potential co-substrates and operating factors for improved methane yield // *Processes*. 2020. Vol. 8, Issue 39. URL: <https://www.mdpi.com/2227-9717/8/1/39>.
9. Xie, S., Higgins, M. J., Bustamante, H., Galway, B., Nghiem, L. D. Current status and perspectives on anaerobic co-digestion and associated downstream processes // *Environmental Science: Water Research & Technology*. 2018. Vol. 4. P. 1759–1770. URL: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2018/ew/c8ew00356d>.
10. Siddique, M. N. I., Wahid, Z. A. Achievements and perspectives of anaerobic co-digestion: a review // *Journal of Cleaner Production*. 2018. Vol. 194. P. 359–371. URL: <https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=3941576>.
11. Grosser, A., Neczaj, E. Sewage sludge and fat rich materials co-digestion – performance and energy potential // *Journal of Cleaner Production*. 2018. Vol. 198. P. 1076–1089. URL: <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/full/10.5555/20193344815>.
12. Bulak, P., Proc, K., Pawłowska, M., Kasprzycka, A., Berus, W., Bieganski, A. Biogas generation from insects breeding post production wastes // *Journal of Cleaner Production*. 2020. Vol. 244. Article 118777. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652619336479>.

## REFERENCES:

1. Masło, A., Czarnota, J., Szaja, A., Szulzyk-Cieplak, J., & Łagód, G. (2020). The enhancement of energy efficiency in a wastewater treatment plant through sustainable biogas use: Case study from Poland. *Energies*, 13(21), 6056. <https://www.mdpi.com/journal/energies>
2. Drewnowski, J., Remiszewska-Skwarek, A., Duda, S., & Łagód, G. (2019). Aeration process in bioreactors as the main energy consumer in a wastewater treatment plant: Review of solutions and methods of process optimization. *Processes*, 7(311). [https://www.researchgate.net/publication/333360917\\_Aeration\\_Process\\_in\\_Bioreactors\\_as\\_the\\_Main\\_Energy\\_Consumer\\_in\\_a\\_Wastewater\\_Treatment\\_Plant\\_Review\\_of\\_Solutions\\_and\\_Methods\\_of\\_Process\\_Optimization](https://www.researchgate.net/publication/333360917_Aeration_Process_in_Bioreactors_as_the_Main_Energy_Consumer_in_a_Wastewater_Treatment_Plant_Review_of_Solutions_and_Methods_of_Process_Optimization)
3. Di Fraia, S., Massarotti, N., & Vanoli, L. (2018). A novel energy assessment of urban wastewater treatment plants. *Energy Conversion and Management*, 163, 304–313. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0196890418301742>
4. Kravchenko, V. I. (2025). Zastosuvannia osadiv stichnykh vod dlia pidvyshchennia enerhoefektyvnosti roboty komunal'nykh ochysnykh sporud [Application of sewage sludge to improve the energy efficiency of municipal wastewater treatment plants]. *Tavriiskyi naukovi visnyk. Serii: Tekhnichni nauky*, 4(2), 236–242. <https://doi.org/10.32782/tnv-tech.2025.4.2.25> [in Ukrainian]
5. Caposciutti, G., Baccioli, A., Ferrari, L., & Desideri, U. (2020). Biogas from anaerobic digestion: Power generation or biomethane production? *Energies*, 13(3), 743. <https://www.mdpi.com/1996-1073/13/3/743>
6. Silvestre, G., Rodríguez-Abalde, A., Fernández, B., Flotats, X., & Bonmatí, A. (2011). Biomass adaptation over anaerobic co-digestion of sewage sludge and trapped grease waste. *Bioresource Technology*, 102(17), 6830–6836. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S096085241100513X>

7. Mata-Álvares, J., Dosta, J., Romero-Güiza, M. S., Fonoll, X., Peces, M., & Astals, S. (2014). A critical review on anaerobic co-digestion achievements between 2010 and 2013. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 36, 412–427. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032114002664>
8. Chow, W. L., Chong, S., Lim, J. W., Chan, Y. J., Chong, M. F., Tiong, T. J., Chin, J. K., & Pan, G.-T. (2020). Anaerobic co-digestion of wastewater sludge: A review of potential co-substrates and operating factors for improved methane yield. *Processes*, 8(1), 39. <https://www.mdpi.com/2227-9717/8/1/39>
9. Xie, S., Higgins, M. J., Bustamante, H., Galway, B., & Nghiem, L. D. (2018). Current status and perspectives on anaerobic co-digestion and associated downstream processes. *Environmental Science: Water Research & Technology*, 4(11), 1759–1770. <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2018/ew/c8ew00356d>
10. Siddique, M. N. I., & Wahid, Z. A. (2018). Achievements and perspectives of anaerobic co-digestion: A review. *Journal of Cleaner Production*, 194, 359–371. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652619336479>
11. Grosser, A., & Neczaj, E. (2018). Sewage sludge and fat rich materials co-digestion: Performance and energy potential. *Journal of Cleaner Production*, 198, 1076–1089. <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/full/10.5555/20193344815>
12. Bulak, P., Proc, K., Pawłowska, M., Kasprzycka, A., Berus, W., & Bieganski, A. (2020). Biogas generation from insects breeding post production wastes. *Journal of Cleaner Production*, 244, 118777. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652619336479>