

25 мг/дм³ до 0,5 мг/дм³). Серед усіх досліджених алюмосилікатів цеоліт продемонстрував найвищу ефективність очищення – 87 % за дві години, що забезпечило зниження концентрації забруднювача до 3,25 мг/дм³.

Цеоліти є природними мінералами з високорозвиненою пористою структурою. Їх унікальна кристалічна решітка має численні мікро- та мезопори, здатні вибірково поглинати іони та молекули різних забруднювачів із водного середовища. Однією з головних переваг цеолітів є їхня висока іоннообмінна здатність. Цеоліти також проявляють високу хімічну та термічну стабільність, що робить їх довговічними й економічно вигідними. Їх можна регенерувати за допомогою промивання розчинами солей або кислот, після чого вони зберігають свою адсорбційну активність.

Таким чином, природний цеоліт рекомендовано для промислового впровадження на очисних спорудах через високу ефективність та потенціал утилізації. Запропоновано технологічну схему, що включає доочищення стічних вод після біологічної обробки у контактних відстійниках, де використовується цеоліт (1 г/дм³ при 60 хв контакту). Осад, насичений фосфатами після адсорбції на цеоліті, рекомендовано використовувати як сировину для одержання мінеральних та органо-мінеральних добрив пролонгованої дії.

СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЇ ВИРОБНИЦТВА БІОГАЗУ З ОСАДІВ СТІЧНИХ ВОД ТА ОРГАНІЧНИХ ВІДХОДІВ НА КАНАЛІЗАЦІЙНИХ ОЧИСНИХ СПОРУДАХ

Кізеєв М.Д., Проценко С.Б., Новицька О.С., Кравченко Н.В.

*Національний університет водного господарства та природокористування
Україна, Рівне m.d.kiziev@nuwm.edu.ua*

Повномасштабна війна в Україні та глобальна енергетична криза актуалізували питання енергетичної незалежності об'єктів критичної інфраструктури, до яких належать каналізаційні очисні споруди (КОС), що є великими споживачами електричної енергії (1–3% від загального споживання в країні) та теплової енергії. Проте зміна парадигми – від споживача до виробника енергії – дозволяє перетворити традиційні КОС на енергопозитивні комплексні підприємства з переробки стічних вод (СВ) та органічних відходів. СВ мають значний енергетичний потенціал у вигляді органічних речовин, низькопотенційного тепла та біогенних елементів. Анаеробне зброджування осадів КОС з виробництвом біогазу когенерацією енергії є ключовою технологією для реалізації цього потенціалу. Додаткове залучення органічних відходів (побутового, промислового або сільськогосподарського походження) у процес спільного зброджування з осадами КОС дозволяє значно підвищити вихід біогазу, зробити КОС енергонезалежними та одночасно вирішити проблему утилізації органічних відходів міста.

Європейський Союз встановив амбітні цілі щодо досягнення енергетичної нейтральності КОС з популяційним еквівалентом (РЕ) понад 10 000 осіб до 2045 року згідно з новою Директивою про очищення міських СВ. Багато європейських КОС вже перевищили цю мету та досягли енергопозитивності.

КОС «Марселісборг» в Орхусі (Данія) є взірцем енергоефективності. Завдяки комплексній модернізації вони виробляють 150–192% енергії, необхідної для їх експлуатації. Основні заходи, що були реалізовані на цих КОС, включали: оптимізацію процесу видалення азоту з контролем в режимі реального часу, заміну повітродувки на високошвидкісні турбоагнітачі, контроль віку активного мулу з використанням частотних

перетворювачів та модернізацію когенераційної установки (КГУ) з досягненням 90% ефективності використання енергії. КОС нині виробляють електроенергії на 50% більше власних потреб і 2,5 ГВт тепла для системи централізованого тепlopостачання міста без використання додаткових вуглеводнів.

КОС «Кубратово» біля Софії (Болгарія) обслуговує 1,6 млн. жителів і виробляє на 16% більше електроенергії, ніж споживає. Надлишкову електроенергію реалізують в загальну мережу, забезпечуючи додатковий дохід підприємству.

Проект POWERSTEP у рамках Horizon 2020 за участю 15 організацій-партнерів з 7 країн Європи продемонструвала можливість досягнення 140–170% енергопозитивності на КОС у 6 містах Європи шляхом впровадження концепцій повномасштабного виробництва енергії за рахунок анаеробного зброджування осадів СВ і використання біогазу.

Провідні технології термічного гідролізу (ТНР) представлені процесами CAMBI, BIOTHELYS та Exelys (Veolia), BioTfuel та іншими. Проект біогазової станції на КОС м. Львів передбачає використання технології CAMBI від консорціуму RIKO-CAMBI.

Енергетичний баланс ТНР є позитивним – додатковий вихід біогазу (50% збільшення) повністю покриває енергетичні витрати на нагрів та підтримання тиску процесу, забезпечуючи енергетичну самодостатність технології. Економічної ефективності ТНР досягають головним чином через зменшення витрат на утилізацію осадів – для КОС на 500 тис. жителів економія становить 270 – 430 тис. євро/рік. Зменшення об'єму метантенків при використанні ТНР частково компенсує капітальні видатки установки термічного гідролізу осаду.

Осад СВ має відносно невисокий енергетичний потенціал – вихід біогазу 250 – 400 м³/т сухої органічної речовини (COP). Це обумовлено значним вмістом у надлишковому активному мулі важкозброджуваних компонентів бактеріальних клітин. Для підвищення «калорійності» субстрату та збільшення виходу біогазу застосовується спільне анаеробне зброджування осадів КОС з органічними відходами різного походження, що дозволяє одночасно вирішити дві важливі задачі: утилізувати велику кількість органічних відходів міста та значно підвищити вихід біогазу на існуючих потужностях КОС. Різноманітність субстратів оптимізує співвідношення C/N (вуглець/азот), забезпечує надходження мікроелементів та покращує сталість процесу анаеробного зброджування.

Для спільного зброджування з осадом СВ використовуються такі органічні відходи:

1. Харчові відходи – Енергетичний потенціал становить 550-750 м³ біогазу/т COP;
2. Органічна фракція твердих побутових відходів – Вихід біогазу - 400-600 м³/т COP;
3. Жири, олії та мастила – мають найвищий енергетичний потенціал – до 1000 м³ біогазу/т COP. Однак вони вимагають контролю при дозуванні (не більше 5-10% від загального завантаження) через ризик інгібування процесу та утворення піни;
4. Сільськогосподарські відходи – 200–450 м³ біогазу/т COP залежно від сировини;
5. Промислові органічні відходи.

Співвідношення осаду та органічних відходів є критичним параметром для максимізації «виходу» біогазу та сталості процесу зброджування. Результати досліджень показують різні оптимальні співвідношення залежно від мети.

Для максимального виходу біогазу: співвідношення «Осад/Органічні відходи» = 1/3 (25% осаду та 75% органічних відходів за вмістом COP) забезпечує максимальний вихід біогазу 618,7 мл/г COP з вилученням органіки 52,8% за ХСК.

Для збільшення продуктивності приблизно в 4 рази: співвідношення «Органічні відходи/Осад» = 3/1 (75% органічних відходів та 25% осаду за COP) у дослідженні в Швеції збільшило вихід біогазу приблизно вчетверо – з 1,0±0,1 до 3,8±0,3 л/(дм³·добу) при органічному навантаженні 5 г COP/(дм³·добу).

Для сталої роботи існуючих КОС рекомендовано поступове впровадження спільного зброджування осадів з додаванням харчових відходів до 12 – 35% за вмістом СОР від кількості осаду. Такий підхід дозволяє апробувати технологію без ризику дестабілізації процесу на існуючих спорудах. Навіть невеликі додавання органічних відходів ефективні. Додавання лише 1–5% харчових відходів до осаду збільшує вихід біогазу на 25–50%, що робить спільне зброджування економічно привабливим. Прикладами реалізації спільного зброджування осаду та органічних відходів у світі є КОС в м. Векшо (Швеція); у компанії «Есорго» (Норвегія) та в м. Сеул (Південна Корея).

Біогаз, отриманий при анаеробному зброджуванні, використовують в КГУ для одночасного виробництва електричної та теплової енергії. Когенерація забезпечує ефективність використання енергії біогазу до 85-90%.

Електроенергію можна використовувати для власних потреб КОС (на аерацію і перекачування СВ, для живлення обладнання біогазової станції) або реалізовувати в мережу за «зеленим» тарифом. Теплову енергію витрачають на підігрівання осаду в метантенках (основна частина), опалення та гаряче водопостачання будівель КОС, підсушування зневодненого осаду для зменшення його об'єму перед утилізацією.

Львівський проєкт біогазової станції передбачає встановлення КГУ потужністю близько 5 МВт електричної енергії для виробництва 39,4 млн. кВт·год електроенергії на рік. Після зміни концепції у 2024 році вся електроенергія використовуватиметься для власних потреб КОС, забезпечуючи повну енергетичну незалежність споруд.

КОС є значним джерелом викидів парникових газів. У США КОС викидають близько 47 млн. т CO₂-еквіваленту на рік, що є порівнянним з викидами 10 млн. автомобілів. Викиди від процесів очищення становлять біля 60% вуглецевого сліду КОС.

Основними видами парникових газів на КОС, що викидаються в повітря, є:

- 1) метан (CH₄) – витоки з метантенків, газгольдерів, відкритих резервуарів з осадом;
- 2) закис азоту (N₂O) – утворюється в процесі нітрифікації-денітрифікації в аеротенках (парниковий ефект N₂O у 298 разів сильніший за CO₂);
- 3) діоксид вуглецю (CO₂) – непрямі викиди від споживання електроенергії та тепла з викопних джерел.

Біогазова технологія забезпечує істотне зменшення викидів парникових газів через:

- утилізацію метану при спалюванні біогазу в КГУ замість його надходження в атмосферу при відкритому зберіганні осаду;
- заміщення викопних палив відновлюваним біогазом (біометаном);
- зменшення споживання електроенергії з мережі за рахунок власного виробництва;
- оптимізацію процесів біологічного очищення для зниження утворення N₂O.

Виробництво та використання біогазу може зменшити викиди парникових газів на КОС на 5-12%. При додатковому впровадженні термічного гідролізу та оптимізації процесів видалення азоту декарбонізація може досягати 15-20%. Європейський «зелений курс» встановлює обов'язкову декарбонізацію всіх секторів економіки до 2050 року, що робить модернізацію КОС з впровадженням біогазових технологій не тільки економічно вигідною, але й необхідною для країн ЄС та кандидатів на вступ, включаючи Україну.

В Україні «піонерами» впровадження біогазових технологій на КОС є «Водоканали» Львова та Харькова. Львівський проєкт є найбільш просунутим з точки зору підготовки документації, залучення фінансування та стану реалізації.

Технічні параметри оновленого проєкту біогазової станції на Львівських КОС такі:

- два метантенки по 15 000 м³ для термофільного зброджування осадів;
- попереднє оброблення осаду термічним гідролізом за технологією «САМБІ» (температурі 160°C, тиск 6 бар);
- розрахунковий вихід біогазу: 42 000 нм³/добу з вмістом метану 65%;

- когенераційні установки загальною електричною потужністю порядку 5 МВт;
- виробництво електроенергії для власних потреб КОС;
- теплова потужність когенерації: 4,5 МВт;
- повна енергетична незалежність КОС м. Львів.

Проект біогазової станції з термічним гідролізом осаду на КОС м. Львів демонструє сучасний підхід до створення енергонезалежних КОС в Україні та може стати прикладом для реплікації його в інших містах країни (Вінниці, Харкові, Рівне, Луцьку) з адаптацією масштабу відповідно до місцевих умов, до фінансування подібних об'єктів із залученням міжнародних кредитів, грантів та місцевого співфінансування.

Література

1. POWERSTEP Project. Full scale demonstration of energy positive sewage treatment plant concepts towards market penetration. Horizon 2020. URL: <https://powerstep.eu>
2. Aarhus Vand. Marselisborg WWTP - More than 100% energy self-sufficient. Denmark, 2024.
3. Sofiyska Voda. Kubratov WWTP Energy Positive Facility. Sofia, Bulgaria, 2023.
4. Gahlot P., Balasundaram G., Tyagi V.K., Atabani A.E., Suthar S., Kazmi A.A., Štěpanec L., Juchelková D., Kumar A. Principles and potential of thermal hydrolysis of sewage sludge to enhance anaerobic digestion // *Environmental Research*. – 2022. – Vol. 214. – 113856.
5. Kurbatova A., Bulatović J., Desnica E., Radetić L. Characteristics of Biogas Production and Synergistic Effect of Primary Sludge and Food Waste Co-Digestion // *BioEnergy Research*. – 2023. – Vol. 16. – P. 2339–2352.
6. Кізеєв М.Д., Проценко С.Б., Кравченко Н.В., Новицька О.С., Дебелий М.В. Оцінка економічної ефективності будівництва біогазової станції на каналізаційних очисних спорудах м. Львів. Сталій розвиток: захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування. VIII Міжнародний конгрес, 16-18 жовтня 2024, Україна, Львів : зб. матер. – Електрон. дан. – Київ : ГО «МНГ», 2024. С. 123. doi: <https://doi.org/10.56287/8285-40-1>.

ВПЛИВ МАГНІЮ ТА МАНГАНУ ОСВІТЛЕННЯ НА РІСТ І МЕТАБОЛІЗМ МІКРОВОДОРОСТІ *CHLORELLA VULGARIS*

Ковальова С.О.

Науковий керівник – Голуб Н.Б.

КПІ ім. Ігоря Сікорського, Україна, Київ, svitlayak@gmail.com

Мікрородості роду *Chlorella* є перспективними біооб'єктами для отримання цінних метаболітів – пігментів, ліпідів і антиоксидантів. Крім того, вони розглядаються як потенційні агенти біомоніторингу та біоочищення водних середовищ від забруднень [1].

Серед біогенних елементів для мікрородостей особливе значення мають магній (Mg^{2+}) і манган (Mn^{2+}), які є ключовими кофакторами фотосинтетичних процесів. Магній входить до складу хлорофілу та бере участь у стабілізації структури рибосом і фіксації вуглецю [2, 3], тоді як манган формує кластер Mn_4CaO_5 у фотосистемі II, забезпечуючи фотоліз води й утворення молекулярного кисню [4].

Разом з тим, надлишкові концентрації цих металів, у поєднанні з різними умовами освітлення, можуть чинити як стимулюючий, так і інгібуючий вплив на фотосинтез і метаболізм клітин. Зважаючи на це, дослідження впливу комбінованої дії спектру світла та