

8. Глухов В.В., Лисочкина Т.В., Некрасова Т.П. Экономические основы экологии. - СПб.: Специальная литература, 1997. - 304 с.
9. Клир Дж. Системология. Автоматизация решения системных задач. /Пер.с англ. - М.: Радио и связь, 1990. - 544 с.
10. Бешелев С.Д., Гурвич Р.Г. Экспертные оценки. - М.: Наука, 1973. — 157 с.
11. Батищев Д.И. Методы оптимального проектирования. — М.: Радио и связь, 1984.-248 с.
12. Одум Г., Одум Э. Энергетический баланс человека и природы: /Пер. С англ. - М.: Прогресс, 1978 - 380 с.

УДК 628.385

**Черниш Є., Пляцук Л. (Україна, Суми)**

### **ПРОБЛЕМАТИКА СТВОРЕННЯ ЕФЕКТИВНОЇ БІОТЕХНОЛОГІЧНОЇ СИСТЕМИ АНАЕРОБНОЇ ПЕРЕРОБКИ ОСАДІВ ПРОМИСЛОВИХ СТОКІВ**

З розвитком промисловості, зростанням міст і підвищенням ступеня їх благоустрою зростає обсяг стічних вод. На території очисних споруд накопичується осад промислових стоків (ОПС). Ліквідація чи утилізація ОПС на сьогоднішній день - актуальна проблема на всій території України, яка потребує нагального вирішення.

В Україні для зневоднювання осадів використовуються переважно великі мулові площадки, розташовані на околицях міст. На очисних спорудах каналізації значної частини комунальних підприємств, на жаль, питання видалення, обробки, знезараження та утилізація осадів належним чином не вирішені.

У результаті відсутності ефективного обробки відзначається поступове зростання обсягів ОПС (для України щорічно близько 40 млн. т) [1], що становить реальну загрозу вторинного забруднення навколишнього середовища. Внаслідок перенавантаження існуючих мулових ставків та площадок, вони стають джерелами забруднення ґрунту, ґрунтових і поверхневих водних об'єктів, повітря.

Ведуться розробки нових ефективних методів обробки (знешкодження, обезводнення) [2] з наступною утилізацією осадів міських стічних вод. Цей напрямок є надзвичайно важливим не тільки в Україні, Росії й інших країнах СНД, але і в усьому світі.

Актуальним є впровадження біотехнологічних систем в процеси переробки вторинних ресурсів. Одним з таких напрямків є біогазові технології, що можуть ефективно застосовуватися для вирішення проблеми утилізації ОПС.

За статистикою Мінпаливенерго, потенціал біоенергії в Україну складає 73 млн. т умовного палива, еквівалент 62,7 млрд. м<sup>3</sup> газу. Сьогодні використовуються лише 3% всього потенціалу поновлюваних джерел енергії. За умови переробки в метантенках навіть половини утворених осадів в Україні щорічно може бути отримано понад 200 млн. м<sup>3</sup> біогазу, що відповідає 140 тис. т умовного палива [1]. Це могло б значною мірою забезпечити покриття енергетичних потреб самих станцій та знизити екологічне навантаження на прилеглі до них території.

#### **Аналіз попередніх досліджень**

В наукових колах розробляються моделі анаеробного розкладання органічних відходів [3-8], що розглядають різні біохімічні, фізико-хімічні аспекти їх конверсії і фактори впливу на динаміку виходу біогазу. Створені до теперішнього часу моделі метаноутворення у переважній більшості представляють собою напівемпіричні математичні співвідношення, що зв'язують величини інтенсивності процесу утворення метану зі значеннями тих чи інших факторів та умов середовища, що створюються в ферментаторі. Такі моделі не враховують процес сукцесії в асоціації мікроорганізмів та зміну відповідно домінуючих видів в межах окремих екологічних ніш.

Модель Сигріста (1993) – структурна модель, що бере до уваги аміачне інгібування, лізис та гідроліз клітинної біомаси, опис фізико-хімічної системи рівня рН [4]. На наш погляд, специфіка утворення продуктів біохімічних реакцій та споживання їх анаеробами в даній біохімічній моделі не повністю відображена. Наприклад, види ацетогенних мікроорганізмів представлені лише пропіонат-окислюючими та окислюючими жирні кислоти ацетогенами, тобто такими, що не споживають як субстрат Н<sub>2</sub> та СО<sub>2</sub>, але в багатьох дослідженнях, зокрема Заварзина Г. А. [5,6], доведена досить активна участь окремих видів ацетогенів у перетворенні даних газів в ацетати та конкуренція за них з метаногенами.

Модель Гавала (1996) [4] описує процес сумісного розкладання агропромислових стоків. Припускається, що стічні води складаються з карбогідратів та білків (нерозчинних та розчинних) та інших розчинних органічних речовин. В даній моделі акцент ставиться на ацетокластичному метаногенезі, не враховується участь гідрогенотрофних метаногенів.

Заварзин Г. А. та Колотилова Н. М. [6] розглядають біохімічні цикли за участю різних груп мікроорганізмів, зокрема метаногенів. Сформульована авторами модель метаногенної спільноти, на наш погляд, є найбільш вдалою.

Особливу увагу заслуговує дослідження В. А. Вавіліна [7] флуктуації та самокаталізу в природі. В його дослідженнях показано, що для ефективного метаноутворення необхідне збалансоване протікання послідовних і паралельних стадій, що не призводить до накопичення проміжних продуктів - потенційних інгібіторів процесу. В практиці використання метантенків дуже часто відбувається накопичення такого проміжного

продукту як ацетату [6,7], що гальмує процес гідролізу та метаногенезу. Таким чином, важливим є дослідження механізмів здійснення біохімічних реакцій в синтрофних групах мікроорганізмів-деструкторів ОПС та чітка визначеність щодо формалізованої моделі процесу.

На сьогодні проводяться наукові розробки математичних моделей [8-10], орієнтованих на дослідження та побудову надійних адаптивних систем управління в умовах промислового використання, розробляються імітаційні моделі функціонування біореакторів, що дозволяє оцінювати переваги, недоліки та цінності їх впровадження. Основою ж їх формування є адекватна біохімічна модель процесу анаеробної конверсії органічних відходів.

Завдання створення біотехнологічних систем із саморегуляцією знаходиться на перетині різних галузей науки, що робить цю проблему по суті «вільною»[8]. Впровадження біогазових технологій є важливою ланкою у розвитку технологій раціонального використання ресурсів і, для їх розробки необхідно застосовувати комплексний підхід, що поєднує в собі новітні здобутки в екології мікроорганізмів, програмуванні та інженерній справі.

Метою даної роботи є визначення основних біохімічних принципів розробки ефективної біотехнологічної системи переробки осадів промислових стоків з отриманням біогазу. Завдання: 1. Конструювання субстратно-продуктивних зв'язків в асоціації мікроорганізмів-деструкторів ОПС. 2. Визначення лімітуючої стадії процесу. 3. Розробка біохімічної моделі процесу.

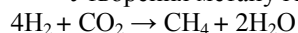
### Матеріали і результати дослідження

При створенні біотехнологічної системи для переробки ОПС першочергове значення має конструювання субстратно-продуктивних зв'язків мікробіологічної системи та формування адекватної біохімічної моделі процесу на їх основі. Для побудови такої моделі необхідно дотримуватися декількох вимог [9]. По-перше, вона повністю повинна кількісно описувати з мікробіологічної точки зору всі основні процеси утворення метану. По-друге, необхідно, щоб ця схема враховувала вплив мікробних популяцій одна на одну (наприклад, синтрофні взаємодії) - так можна перевірити, чи правильні наші уявлення про структуру та інтенсивності мікробних взаємодій. Моделей, що відповідають першій вимозі, небагато (див. розд. «Актуальність роботи»). Виконання другої вимоги пов'язане з необхідністю отримання значної кількості кінетичних параметрів.

Процес анаеробної деструкції органічної речовини складається з кількох послідовних стадій. Перша стадія: гідролітичні мікроорганізми за допомогою екзоферментів здійснюють розкладання нерозчинних полімерів до розчинних мономерів з подальшим зброджуванням ацидогенами розчинних органічних сполук. Друга стадія: утворені прості сполуки ( $H_2$ ,  $CO_2$ , ацетати тощо) споживаються різними видами бактерій, що підтверджено в працях [6,7,8,11]. До таких груп відносяться: ацетокластичні, гідрогенотрофні метаногени і гомоацетогени, якщо в системі є джерело сульфату, тоді необхідно також розглядати сульфатредукторів. При роботі метантенків фактор впливу метаболітів сульфідогенів (насамперед, сірководню) є можливою умовою виникнення поломки реактору.

В об'ємі метантенку ці групи бактерій водночас споживають одні й ті ж самі сполуки. Прикладом може слугувати випадки конкуренції між гідрогенотрофними метаногенами та гомоацетатогенами [6,7].

- Утворення метану гідрогенотрофними метаногенами:

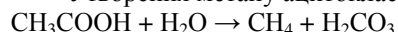


- Утворення оцтової кислоти гомоацетогенами:

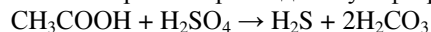


Гомоацетогени також є синтрофами у відношенні до ацетатокластичних метаногенів та ацетатотрофних сульфатредукторів, які використовують як субстрат ацетати [6,7].

- Утворення метану ацетокластичними метаногенами:



- Утворення сірководню сульфатредукторами:



Ці всі процеси цілком пояснюються взаємообумовленістю існування даних груп мікроорганізмів в одному консорціумі.

Зауважимо, що метановий цикл супроводжується по перше утилізацією суміші  $CO_2 + H_2$ , про що свідчать праці [5,6,11]. Наприклад, за дослідженнями [6], на початку метаногенезу в метантенках активно розвиваються гідрогенотрофні метаногени, надалі ж в дію вступають ацетокластичні метаногени, що починають домінувати. На наш погляд, це цілком обумовлено біоенергетикою системи, тобто її термодинамікою.

Першорядне значення для термодинаміки мікробіологічної системи має концентрація метаболітів в ній. Вона визначається спорідненістю організмів до субстратів, а звідси і кінетикою їх росту. З іншого боку, кінетика росту визначає конкуренцію між видами при занятті однієї і тієї ж екологічної ніші [7].

Таким чином, між групами мікроорганізмів є термодинамічно зумовлені зворотні зв'язки і регуляторні зв'язки. Наприклад, [12] реакція розкладання ЛЖК на ацетат і водень термодинамічно не вигідна і здатна забезпечити ріст мікроорганізмів тільки при дуже низькій концентрації продуктів реакції, тобто швидкого і повного видалення  $H_2$ . Функцію видалення  $H_2$  виконують гідрогенотрофи (в першу чергу гідрогенотрофні метаногени, та за наявності акцепторів електронів  $SO_4^{2-}$  – сульфатвідновлюючі бактерії). Це і є синтрофна група.

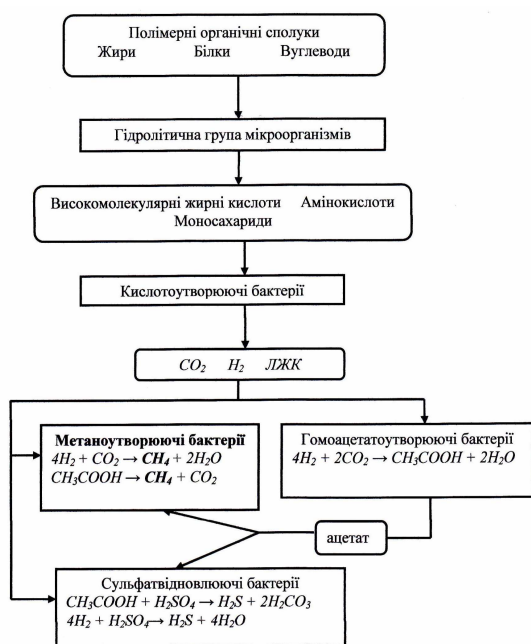


Рис. 1 Біохімічна модель асоціації анаеробних мікроорганізмів-деструкторів осадів промислових стоків

Принципове значення має визначення лімітуючої стадії процесу анаеробної конверсії. Так як, основною складовою органічної фракції ОПС є мікробна клітковина - несприятливий субстрат для біодеградації, ми можемо зробити висновок, що гідроліз є лімітуючою стадією анаеробного збродження осадів. Під час гідролізу відбувається руйнування клітковини і розкладання позаклітинних полімерних речовин у результаті утворюються доступні органічні матеріали, що споживаються на наступних етапах метаногенезу [6]. Однак, при різних умовах роботи реактора дана стадія не завжди є однаковою.

Нами сформована схема трофічних взаємодій в асоціації анаеробних мікроорганізмів-деструкторів ОПС (рис. 1.), яка, на наш погляд, є оптимальною для подальшої розробки відповідної математичної моделі. В такій біохімічній моделі зображені субстратно-продуктні зв'язки, які виникли при накладанні схем метаногенезу, гомоацетогенезу та сульфідогенезу, що спричинено вмістом в ОПС речовин (сполук сірки тощо), які споживаються різними групами мікроорганізмів.

Це необхідно враховувати для того, щоб запобігти виникненню аварійних ситуацій у системі, і розробки прогнозу розвитку процесу переробки ОПС та знаходженню відповідних важелів впливу на нього, спрямованих на стимулювання розвитку саме видів метаногенів, а, отже, на збільшення вмісту метану в біогазі.

В промислових масштабах підтримувати якісне і кількісне співвідношення різних видів мікроорганізмів у метантенках не має можливості, тому необхідно впливати на регуляторні механізми системи за рахунок введення певних видів чи синтрофних груп мікроорганізмів, використання просторового поділу етапів анаеробної конверсії, системи циркуляції збродженого осаду та впровадженням ефективної системи контролю за процесом в цілому.

### Висновки

Отже, були визначені основні біохімічні принципи створення біогазової технології в напрямку розробки ефективної системи анаеробної конверсії осадів промислових стоків, що засновано на аналізі мікробіологічної компоненти системи, дослідженні трофічних зв'язків в асоціації мікроорганізмів-деструкторів органічних відходів, визначені лімітуючої стадії процесу та розробки відповідної біохімічної моделі.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Благодарная Г.И., Шевченко А.А. Развитие технологии анаэробной переработки осадков как источника альтернативной энергии на муниципальных очистных сооружениях // Коммунальное хозяйство городов: Науч.-техн. сб. Вып.88. – К.: Техніка, 2009. – С. 117-122. - (Серия «Технические науки и архитектура»).
2. Rulkens W.H. Sustainable sludge management – what are the challenges for the future? // Water Science and Technology. Vol 49. № 10, 2004. - P. 11–19.
3. Миндубаев А.З., Белостоцкий Д.Е., Минзанова С.Т. Метаногенез: биохимия, технология, применение // Учебные записки. Казахского государственного университета. Естественные науки. Биотехнология. Том 152, кн. 2, 2010. – С. 178-191.
4. Lyberatos G., Skiadas I. Modelling of anaerobic digestion – a review // Global Nest: the Int. J. Vol 1. 1999. - № 2. - P. 63 - 76.
5. Заварзин Г.А. Бактерии и состав атмосферы. - М. Наука. 1984. – 199 с.
6. Заварзин Г.А., Колотилова Н.Н. Введение в природоведческую микробиологию - М.: Книжный дом «Университет», 2001. - 256 с.
7. Вавилин В.А. Автокатализ и флуктуации в природе // Природа. 2005. - №6. - С. 52 – 59.
8. Distributed Model of Solid Waste Anaerobic Digestion. Effects of Leachate Recirculation and pH Adjustment / V.A. Vavilin, S.V. Rytov, L.Ya. Lokshina, S.G. Pavlostathis, M.A. Barlaz //Biotechnol Bioeng. 2003. - №81(1). – P. 66-73.
9. Сабреков А.Ф., Глаголева М.В. К математическому моделированию микробного сообщества цикла метан // Динамика окружающей среды и глобальные изменения климата: Сборник научных трудов кафедры ЮНЕСКО Югорского государственного университета. Новосибирск: НГУ. Вып. 1, 2008. - С.89-102.
10. Боровска Т.М., Северилов П.В. Моделирование и оптимизация систем производства биогаза // Наукові праці ВНТУ. - 2009. - № 2. – [Електронний ресурс].– Режим доступу: <http://www.nbu.gov.ua/e-journals/vntu/index.html>.
11. Мир микробов. Том 2. / Р. Стейниер, Э. Эдельберг, Дж. Ингрэм. - М. Мир, 1979. - 331 с.
12. Нетрусов А. И., Бонч-Осмаловский Е.А., Горленко В.М. Экология микроорганизмов. - М.: Издательский центр «Академия», 2004. – 272 с.