

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**Одеська національна академія харчових технологій**



**ДИГТЯР СЕРГІЙ ВІКТОРОВИЧ**

**УДК (57+631.147):582.232**

**РОЗРОБКА БІОТЕХНОЛОГІЇ ПЕРЕРОБКИ  
МАСОВИХ ФОРМ ГІДРОБІОНТІВ**

Спеціальність 03.00.20 – біотехнологія (технічні науки)

**АВТОРЕФЕРАТ**

**дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук**

**Одеса – 2019**

Дисертацією є рукопис

Роботу виконано на кафедрі біотехнологій та біоінженерії  
Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського  
Міністерства освіти і науки України

**Науковий керівник:** доктор біологічних наук, професор,  
**Никифоров Володимир Валентинович**,  
Кременчуцький національний університет імені  
Михайла Остроградського Міністерства освіти і науки  
України, перший проректор, м. Кременчук

**Офіційні опоненти:** доктор біологічних наук, професор,  
**Кричківська Лідія Василівна**  
завідувач кафедри органічного синтезу і  
нанотехнологій Національного технічного університету  
«Харківський політехнічний інститут», м. Харків

доктор технічних наук,  
старший науковий співробітник,  
**Коваленко Олена Олександрівна**  
завідувач кафедри біоінженерії і води Одеської  
національної академії харчових технологій, м. Одеса

Захист відбудеться «18» грудня 2019 р. о 10<sup>30</sup> на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 41.088.02 Одеської національної академії харчових технологій за адресою: 65039, м. Одеса, вул. Канатна, 112, ауд. А234

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Одеської національної академії харчових технологій за адресою: 65039, м. Одеса, вул. Канатна, 112.

Автореферат розісланий «18» листопада 2019 р.

Вчений секретар спеціалізованої  
вченої ради Д 41.088.02  
д.т.н., професор



**Г.В. Крусір**

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Останнім часом особливо гостро постала проблема збагачення води поживними речовинами у результаті антропогенної діяльності, зокрема збільшення вмісту доступних форм Нітрогену, Фосфору та Карбону, що сприяє зростанню біопродукції водоростей та інших масових форм гідробіонтів. Це явище відоме як «культурна евтрофікація». Вибухоподібне утворення біомаси синьо-зелених водоростей (ціаней або ціанобактерій) у каскаді дніпровських водосховищ уже має сезонний характер, зумовлюючи дисбаланс у гідроекосистемах.

Одним із дієвих заходів протидії «цвітінню» Дніпра може бути вчасне вилучення значної частини надлишкової біомаси ціанобактерій із води з її подальшим ефективним використанням у господарстві. Розробка та впровадження технологічного процесу виробництва метану та добрива із їх біомаси є однією з перспективних природоподібних біотехнологій, здатних знизити гостроту проблеми «цвітіння» водойм, мінімізувати екологічні ризики та забезпечити регіон додатковими енергоресурсами.

Пошук ефективних технологій з отримання біопалива ведеться в рамках програми диверсифікації джерел природного газу в Україні. Вирішення проблем з енергозабезпеченням малих господарств дешевим біопаливом на основі органічної речовини, видобутої з альтернативних джерел, надасть змогу оптимізувати технологічні процеси залежно від сезону та доступної сировини.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Роботу виконано відповідно до тематичного плану НДР кафедри біотехнологій та біоінженерії Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського, також під час фундаментальних досліджень та прикладних розробок за рахунок загального фонду держбюджету: «Фізико-хімічна біологія метаногенезу гідробіонтів» (№ ДР 0108U002170), «Екологічна біотехнологія виробництва метану із синьо-зелених водоростей» (№ ДР 0115U002528) та білатерального українсько-австрійського науково-дослідного проекту «Способи переробки біомаси ціаней, що викликають «цвітіння» водойм» (№ ДР 0117U003299).

**Метою роботи** є розробка нового технологічного процесу виробництва біогазу та органо-мінерального добрива на основі процесів біодеструкції та біоконверсії органічної маси водних організмів, що складається переважно із ціанобактерій. Задля досягнення вказаної мети поставлено та вирішено наступні **завдання**:

– визначено видовий склад вихідного субстрату для біометаногенезу та його мікробіологічні характеристики, а також еколого-економічне значення ціанобактерій та перспективи ефективного використання їх біомаси;

– досліджено фізико-хімічні та біологічні аспекти процесу біометаногенезу й особливості біохімічних процесів виробництва біогазу, змодельовано процес біометаногенезу у лабораторних умовах, визначено хімічний склад зразків біогазу різного походження та проведено порівняльний аналіз їх фізичних властивостей;

– створено новий безвідходний технологічний процес, що забезпечує

раціональне використання природних ресурсів (надлишкової біомаси гідробіонтів) і диверсифікує отримання біопалива II генерації;

- обґрунтовано наукові засади безпечної технології переробки біомаси ціаней на основі процесу біометаногенезу;

- виконано проект біометаногенної установки та розроблено технічні умови процесу переробки масових форм гідробіонтів з отриманням метану й органо-мінерального добрива;

- досліджено застосування різних субстратів для отримання біогазової метановмісної суміші, розроблено технічні умови щодо цільових продуктів біотехнології;

- розроблено математичну модель процесу біометаногенезу методом центрального композиційного рототабельного планування та створено віртуальний комплекс для контролю й автоматизації технологічного процесу виробництва метану та добрива з моно- і мультисубстратів;

- визначено техніко-економічну ефективність біоконверсії органічної маси ціанобактерій.

Об'єкт дослідження – природоохоронна біотехнологія переробки надлишкової біомаси ціанобактерій, що утворюється під час «цвітіння» води внаслідок її евтрофікації.

Предмет дослідження – ціанобактерії, біомаса яких є новим відновлювальним субстратом для виробництва цільових продуктів.

Методи дослідження – комплекс адекватних до отриманих результатів математичних, фізико-хімічних та біологічних методів з використанням сучасного обладнання та комп'ютерних технологій.

**Наукова новизна отриманих результатів** полягає у наступному:

- вперше здійснено наукове обґрунтування способу отримання метану і добрива із масових форм гідробіонтів на прикладі ціанобактерій, що дає можливість застосовувати результати роботи для вирішення проблеми економічно доцільного використання відновлюваного субстрату, а також під час подальшого розроблення природоподібних біотехнологій з використанням інших відновлюваних субстратів;

- вперше розроблено технічні умови процесів біометаногенезу та продукування органо-мінерального добрива на основі субстрату із біомаси ціаней, що дозволяє вирішувати конкретні соціоекологічні проблеми, викликані «цвітінням» водойм;

- вперше запропоновано практичні шляхи утилізації дигестату, в тому числі застосування його у сільському та лісовому господарстві;

- удосконалено процедуру та алгоритм розрахунку потужностей промислової установки для біометаногенезу.

**Практичне значення одержаних результатів** полягає у можливості використання результатів теоретичних та практичних досліджень дисертаційної роботи у біотехнологічному виробництві, природоохоронній галузі й альтернативній енергетиці, сільському та лісовому господарстві, фармакології та косметології, а саме шляхом застосування біомаси ціаней для отримання цінних біологічно активних речовин та біопалива II генерації. Упровадження

результатів роботи надасть можливість знизити екологічний ризик негативного впливу явища «цвітіння» водойм на довкілля та здоров'я людини, а також зменшити антропогенний вплив на гідроекосистему Дніпра – основного джерела прісної води в Україні.

Наукові результати дисертації адаптовано до навчального процесу підготовки біотехнологів у ЗВО (КрНУ та ПДАА), у вигляді методичних вказівок щодо виконання лабораторних робіт з дисциплін «біофізика», «біоенергетика» та «екологічна біотехнологія». Практична цінність роботи також підтверджується відповідними актами впровадження у природоохоронну діяльність об'єкту природно-заповідного фонду України – парку-пам'ятки садово-паркового мистецтва у м. Кременчук «Ювілейний», а також на комплексних очисних спорудах КП «Кременчукводоканал». Результати досліджень захищено двома патентами на розробку корисних моделей та оприлюднено у науковій монографії.

**Особистий внесок здобувача.** Основні наукові ідеї, положення та результати теоретичних досліджень розроблено, сформульовано й отримано безпосередньо дисертантом. Теоретичні узагальнення, розробка математичних моделей, аналіз та інтерпретацію отриманих даних, висновки роботи є авторськими. Експериментальні дослідження і промислові випробування опрацьовано за особистої участі здобувача.

Внесок дисертанта в роботу, виконану у співавторстві, полягає в обґрунтуванні напрямків досліджень, плануванні експериментів і обробленні результатів, фізичному моделюванні процесів, опрацюванні практичних рекомендацій щодо застосування результатів, розробленні положень, що виносяться на захист.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення й результати дисертаційного дослідження апробовано на багатьох міжнародних та всеукраїнських науково-технічних конференціях, форумах і з'їздах: «Ідеї академіка В.І. Вернадського та проблеми сталого розвитку освіти і науки» (Кременчук, 2006, 2018), «Сучасні проблеми екології» (Житомир, 2007), «Транзитна територія: екологія і транспорт» (Кременчук, КУЕІТУ, 2011), «Новые технологии НТ МИС 4Э» (Кременчук, 2012), «Проблеми екологічної безпеки» (Кременчук, 2015), «Фізичні процеси та поля технічних і біологічних об'єктів» (Кременчук, 2015–2016), «Екологія і природокористування в системі оптимізації відносин природи і суспільства» (Тернопіль, 2016), «Сталий розвиток – погляд у майбутнє» (Львів, 2017), «Sustainable development – state and prospects» (Lviv-Slavske, Ukraine, 2018), «Bundesalgenstammtisch», (September 27-28, 2018 KIT, Karlsruhe Institut für Technologie) тощо.

**Публікації.** За темою дисертації опубліковано 22 наукові праці, у тому числі одна монографія (у співавторстві), 11 статей у наукових фахових виданнях (вісім у співавторстві), 10 тез доповідей на конференціях (п'ять у співавторстві), а також захищено інтелектуальну власність за тематикою дисертації двома патентами на корисну модель (у співавторстві).

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми досліджень, визначено наукову новизну, практичне значення одержаних результатів, сформульовано загальну мету, наведено апробацію результатів досліджень та особистий внесок здобувача, подано відомості про публікації автора і структуру роботи.

У **першому розділі** на основі літературних даних здійснено аналіз перспектив використання біомаси гідробіонтів як субстрату для біометаногенезу з урахуванням регіональних умов місцевих гідроекосистем, а також з'ясовано масштаби та періодичність процесу «цвітіння». Було визначено видовий склад фітопланктону, зокрема доведено домінуючу роль ціанобактерій виду *Microcystis aeruginosa* Kützinger у плямах «цвітіння» (рис. 1).

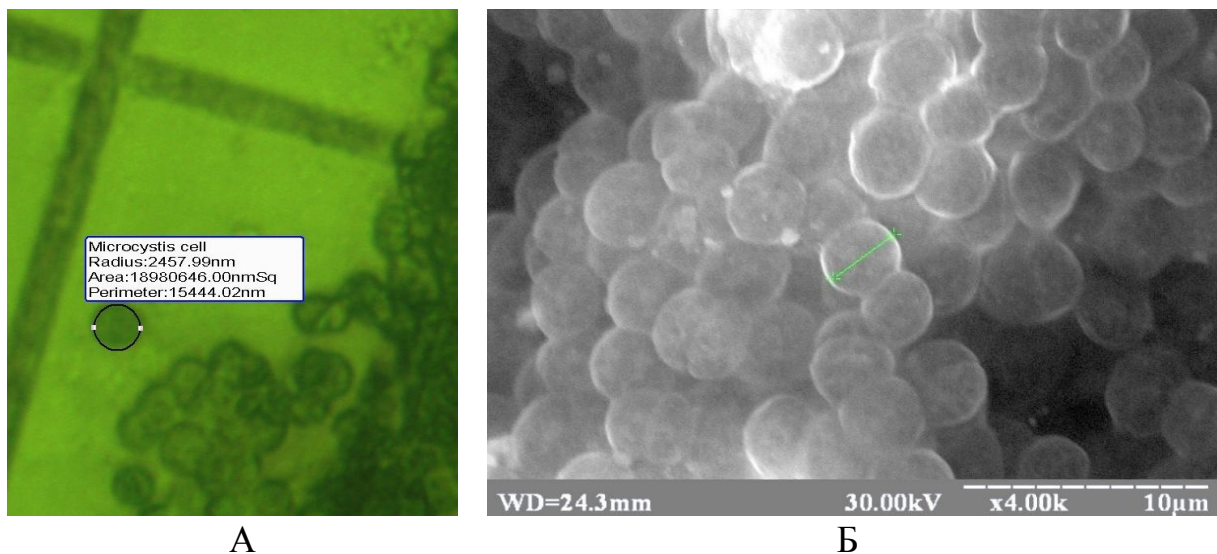


Рис. 1 – Домінуючий у Кременчуцькому водосховищі збудник «цвітіння» води *Microcystis aeruginosa*  
 А – оптична мікрофотографія, 600<sup>x</sup>; Б – скановане зображення поверхні колонії, 4000<sup>x</sup>

Указано на біологічний аспект екологічної небезпеки для місцевих гідроекосистем, зокрема явища евтрофікації, анаеробної деструкції хімічних сполук органічного походження, що потрапили до водойми, а також шкодочинність альготоксинів ціаней.

Доведено, що при порушенні екологічної рівноваги в гідробіоценозах під впливом антропогенних факторів істотно змінюються процеси авторегуляції їх формування, найбільш збалансовані в урівноважених наземних фітоценозах. Це впливає на рівень накопичення біологічно активних речовин у водному середовищі, що позначається на формуванні якості води і функціональній активності гідробіонтів.

Звернено увагу на те, що під час масового відмирання синьо-зелених водоростей (СЗВ) унаслідок накопичення продуктів розкладу, які легко окислюються, концентрація кисню у воді зменшується до повного зникнення. У результаті виникають умови для замору і масової загибелі риби (липень – серпень 2001–2004 і 2013–2016 років). Дефіцит кисню, який раніше відзначався в річці дуже рідко, після зарегулювання стоку набуває величезних масштабів на значній акваторії водосховищ дніпровського каскаду. Лужність води в період «цвітіння» у верхньому шарі збільшується до 9,6. Двооксид вуглецю влітку

зазвичай у поверхневих шарах відсутній, у той же час, у придонних шарах води на глибині 15–20 м його концентрація досягає 19,0 мг/дм<sup>3</sup>. Уміст біогенних елементів у воді водосховища коливається в різні сезони року в широких межах.

Високий ступінь накопичення у воді водосховища сполук Нітрогену та Фосфору суттєво впливає на інтенсивний розвиток планктонних СЗВ. Після їх відмирання на поверхні водойми утворюються величезні скупчення біогенних речовин і бактеріальних агломерацій з характерним запахом скатолу. Останній є продуктом розкладу триптофану, що міститься в біомасі СЗВ, причому додатково утворюються індол зі специфічним запахом і серин, який під дією сульфатредукуючих ферментів розкладається до відповідних етерів із неприємним запахом метил-меркаптану, що й надає природним водам запаху гниття. Також наведено дані щодо субстрату та біологічних агентів розробленої технології.

У **другому розділі** викладено відомості про об'єкт, предмет і методи досліджень. Подано програму досліджень, що відображає основні їх напрями, і взаємозв'язок етапів вирішення поставлених завдань (рис. 2).

Основний об'єкт досліджень у дисертаційній роботі – екологічна (природоохоронна) біотехнологія переробки надлишкової біомаси СЗВ та інших гідробіонтів, що утворюється у наслідок евтрофікації води під час її «цвітіння».

Предметом наших досліджень є ціанобактерії, біомасу яких доцільно використовувати як новий відновлювальний субстрат для отримання корисних продуктів. При цьому в якості субстрату і біоагентів виступають різні групи прокариот. У першому випадку це переважно представники фотоавтотрофних мікроорганізмів – продуценти первинної біомаси у трофічних ланцюгах. У другому – комплекс хемоавтотрофних бактерій-симбіонтів, що забезпечують розпад і руйнування даної біомаси з отриманням у результаті кінцевих продуктів, що можуть бути ефективно використані людиною задля забезпечення своїх економічних потреб. Під час виконання дисертаційної роботи використано емпіричні методи дослідження:

– методи мікроскопіювання за використанням оптичного мікроскопу Ningbo Shengheng XS–3330 та електронного мікроскопу PEM–106 В;

– лабораторно-аналітичні для визначення фізико-хімічних властивостей зразків біогазу, рентгенофлуоресцентний аналіз за допомогою аналізатора EXPERT 3L для вимірювання масової частки (%) основних хімічних елементів у зразках субстратного біоматеріалу, абсорбційний аналіз для визначення складових компонентів у зразках біогазу за допомогою газового хроматографу Кристал – 2000М (методика аналізу ДСТУ ISO 6974-1:2007, ДСТУ ISO 6974-4:2007);

– методи біотестування для визначення фітотоксичного ефекту органічно-мінерального добрива на сільськогосподарські культури та для виявлення гострої токсичної дії відпрацьованого в ході біоконверсії субстрату на живі тест-об'єкти (методика аналізу відповідно до Національного стандарту України: Якість води. (ISO 6341:1996, MOD) ДСТУ 4173:2003);

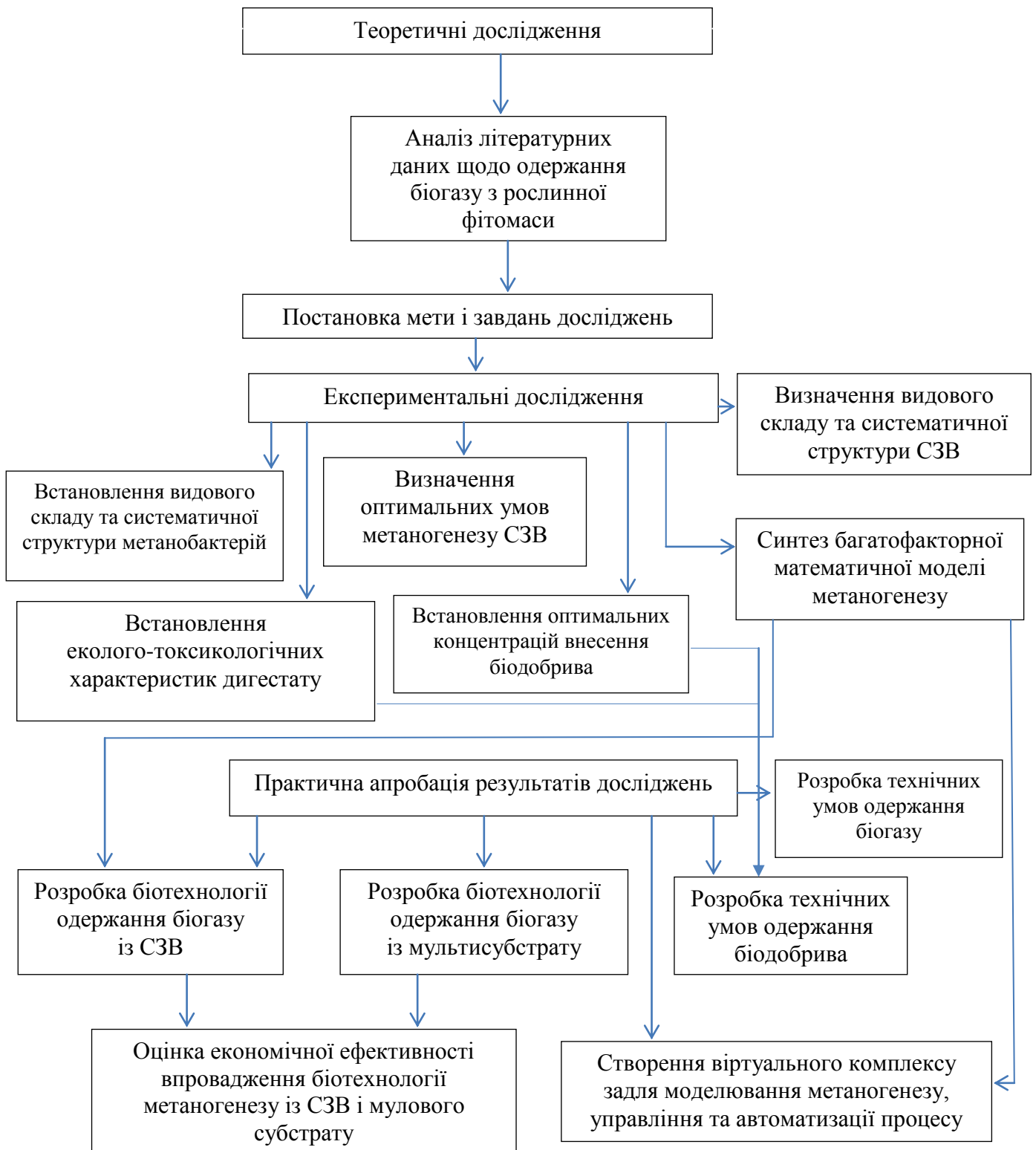


Рис. 2 Програма досліджень

- математичний метод варіаційної статистики для обробки отриманих експериментальних даних та оцінювання ступеня їх достовірності;
- метод системного аналізу для отримання та узагальнення результатів і розрахунків, а також метод планування експерименту.

У третьому розділі створено і вивчено математичну модель продуктивності ціанобактерій в умовах дніпровських водосховищ. З'ясовано значення факторів, які впливають на зростання біомаси СЗВ та інших гідробіонтів. Установлено зв'язок між біомасою ціанобактерій у поверхневих шарах водойм і швидкістю течії та вітру. Під час визначення видового складу СЗВ було встановлено, що біомаса, яка відбиралася безпосередньо із плям «цвітіння», на 95 % складається із фітомаси *Microcystis aeruginosa* Kützing. Ці дані візуально підтверджуються при центрифугуванні концентрованої органічної речовини з плям «цвітіння» протягом 40 хв.

У випадку Кременчуцького та Кам'янського водосховищ у слизових обгортках ціаней, а також на їх гетероцистах мешкають бактерії-супутники, біомаса яких зазвичай становить 10 % від загальної біомаси ціанобактерій, але в деяких випадках може досягати 50–60 %. Мікроорганізми, що мешкають у слизу бентосних колоній мікроцистісу у процесі метаболізму можуть зв'язувати Фосфор донних відкладень і екскретувати його, роблячи доступним для справжніх (еукаріотичних) водоростей. Крім того, вони можуть змінювати фізико-хімічні умови в середині седиментів, стимулюючи також вивільнення Фосфору. Відомо, що бактерії-супутники володіють більш високою здатністю до активного хемосинтезу.

Під час мікроскопування був визначений середній діаметр клітин мікроцистісу, який склав 3,14 мкм. Об'єм його середньостатистичної клітини, що має кулясту форму, дорівнює близько 15 мкм<sup>3</sup>, а її маса відповідно 15 мкг. Результати мікроскопування зразків показали, що чисельність клітин у них може сягати до 1 млн/см<sup>3</sup> і більше. Таким чином, в умовах Кременчуцького та Кам'янського водосховищ маса *Microcystis aeruginosa* Kützing становить  $\approx 4,14 \cdot 10^7$  т за вегетаційний період, що в перерахунку на суху вагу може сягати від 1,61 до  $2,50 \times 10^5$  т органічної речовини.

Досліджено інші субстрати, які традиційно використовуються з метою отримання біогазової суміші: відходи сільського господарства (як тваринницької так і рослинницької галузі), а також активний мул водоочисних споруд – суміш аеробних мікроорганізмів, які здатні сорбувати і окислювати поліютанти стічних вод. Якість активного мулу залежить від виду і кількості органічних забруднень, наявності токсичних домішок, повноти попереднього відстоювання, тривалості та інтенсивності аерації, навантаження на активний мул тощо.

Доведено, що деградація органічних сполук під час біометаногенезу здійснюється як багатоступінчатий процес, в якому їх молекулярний карбоскелет поступово руйнується під дією численних груп мікроорганізмів. Розглянуто етапи метаногенезу, їх послідовність та особливості, а також групи мікроорганізмів, що забезпечують протікання кожного з них. Розкрито біохімічні питання деструкції органічної речовини ціанобактерій та перетворення її на інші, більш зручні для господарчого споживання, макроергічні сполуки. Вивчено мікробіологічні аспекти біометаногенезу, зокрема визначено оптимальні характеристики середовища, що забезпечують максимальну ефективність процесу.

З'ясовано вплив якості субстрату на процес утворення біогазу. З одного боку, різноманітність складу метаногенної асоціації бактерій дозволяє переробляти практично будь-які органічні відходи. З іншого боку, для підтримання на потрібному рівні життєдіяльності усіх мікроорганізмів необхідно дотримання в субстраті співвідношення вмісту Нітрогену до Карбону<sup>12</sup> (за окремими джерелами до 30) до одного. Якщо співвідношення C:N надмірне ( $\gg 30$ ), то брак Нітрогену спричиняє уповільнення процесу метанового зброджування, якщо ж воно замале ( $\ll 10$ ), то утворюється значна кількість амоніаку, який є токсичним для бактерій. За допомогою комплексу фізико-хімічних методів було також з'ясовано вміст органічних сполук у свіжій біомасі СЗВ та дигестаті (табл. 1).

Досліджено також концентрат органічної речовини, попередньо доведений до повітряно-сухого стану шляхом висушування протягом двох діб у сушильній шафі за температури  $+100^{\circ}\text{C}$ . Розроблено технічні умови на дигестат як біологічне добриво, оскільки вміст фульво- (365 оD/г) і гумінових (600оD/г) кислот свідчить про його велику органічну складову (табл. 1). Додатково визначено елементний склад дигестату методами рентгенофлуоресцентного аналізу. Ефективність мінеральної складової біодобрива визначається вмістом у ньому біогенних елементів N/P/K – 13,7–15,0/1,3–6,6/1,5–2,1 % (табл. 1, 2).

У результаті хімічного аналізу субстрату і дигестату було визначено їх рН, ХСК, БСК<sub>5</sub> та співвідношення вмісту Карбону до Нітрогену. Серед нижчих карбонових кислот найбільший вміст зафіксовано для ізомасляної кислоти (до 204 мг/дм<sup>3</sup> у субстраті та до 43 мг/дм<sup>3</sup> у дигестаті). У щойно відібраній біомасі ціанобактерій виявлено оцтову й пропіонову кислоти (84 мг/дм<sup>3</sup> і 92 мг/дм<sup>3</sup> відповідно). Серед решти зразків нижчі карбонові кислоти трапляються у незначних кількостях (табл. 1).

Під час детального дослідження фізико-хімічних та біологічних параметрів метаногенезу ціаней встановлено, що:

а) наявність аліфатичних органічних речовин у біомасі СЗВ типу оцтової, пропіонової, фенілоцтової й інших кислот збільшує вихід біогазу;

б) гетероциклічні сполуки неароматичного характеру (цистеїн), до складу яких входять Нітроген і Сульфур, є джерелом утворення в біогазі сірководню і невеликих кількостей амоніаку;

в) ароматичні речовини типу фенолу, похідні толуолу, ксилолу є інгібіторами біометаногенезу;

г) біометаногенез відбувається за експоненціальним законом з оптимальним виходом біогазу в мезофільних умовах ( $t = 35\text{--}37^{\circ}\text{C}$ ). Підвищення температури збільшує вміст побічних домішок (CO, H<sub>2</sub>S, NH<sub>3</sub>) і ненасичених вуглеводнів типу етилену, пропілену тощо.

## Вміст органічних сполук у біомасі ціаней

Зразок	Суша речовина		Водний розчин	
	субстрат	дигестат	субстрат	дигестат
місце і дата відбору	Кременчук: червень, 2017			
Обробка зразків: температура сушки, °C	105	105	рідина	рідина
стабілізація проб, °C	-22	-22	-22	-22
вміст води, %	99,00	99,20	-	-
Вміст сухих речовин, %	0,52	0,39	-	-
pH (у воді)	7,10	7,50	-	-
Провідність, mS/cm	2,67	3,88	-	-
ХСК, г/кг	-	-	10,43	9,43
NH <sub>4</sub> -N (CaCl <sub>2</sub> ) мг/кг сухої речовини	3,40	6,80	340 мг/дм <sup>3</sup>	550 мг/дм <sup>3</sup>
NO <sub>3</sub> -N (CaCl <sub>2</sub> ) мг/дм <sup>3</sup> сухої речовини	0	0	1	2
N <sub>Kjedahl</sub> , мг/дм <sup>3</sup>	9,10	10,00	900	800
повна втрата при прокалюванні (550°C), %	84,80	79,00	-	-
C <sub>орг.</sub> , %	40,10	37,10	-	-
C/N	8/1	4/1	-	-
Оцтова кислота, мг/дм <sup>3</sup>	-	-	84	<20
Пропіонова кислота, мг/дм <sup>3</sup>	-	-	92	<20
Ізомасляна кислота, мг/дм <sup>3</sup>	-	-	204	43
Масляна кислота, мг/дм <sup>3</sup>	-	-	<20	<20
Ізовалеріанова кислота, мг/дм <sup>3</sup>	-	-	<20	<20
Валеріанова кислота, мг/дм <sup>3</sup>	-	-	<20	<20
Загальний вміст летючих жирних кислот, мг/дм <sup>3</sup>	-	-	380	43
Рацемат глюконової кислоти, мг/дм <sup>3</sup>	-	-	98	91
Лактоза, мг/дм <sup>3</sup>	-	-	21	<20
Галактоуронова кислота, мг/дм <sup>3</sup>	-	-	25	<20
Ксилоза, мг/дм <sup>3</sup>	-	-	<20	<20
N-ацетил-D-глюкозамін, мг/дм <sup>3</sup>	-	-	30	<20
гліцерин, мг/дм <sup>3</sup>	-	-	36	<20
Фульвокислоти, оD/г	95	65	745	365
Гумінові кислоти, оD/г	90	110	680	600
Гумінові речовини (сума), оD/г	185	175	1425	965
БСК <sub>5</sub> , мг O <sub>2</sub> / дм <sup>3</sup>	-	-	1750	530
Загальний Фосфор	0,4 %	6,6 %	43 мг/дм <sup>3</sup>	33 мг/дм <sup>3</sup>
Загальний Калій	1,1 %	1,5 %	115 мг/дм <sup>3</sup>	120 мг/дм <sup>3</sup>
Загальний Кальцій	0,7 %	0,7 %	70 мг/дм <sup>3</sup>	30 мг/дм <sup>3</sup>
Загальний Магній	1,3 %	1,3 %	130 мг/дм <sup>3</sup>	105 мг/дм <sup>3</sup>

Таблиця 2

## Елементний склад дигестату

Елементи	C	O	N	K	Ca	P	Mg	S	Si	Cu	Cl
Вага, %	44,66	31,81	12,67	2,14	1,92	1,34	1,30	0,69	0,61	0,60	0,22

У четвертому розділі на підставі результатів оригінальних досліджень запропоновано векторну схему технологічного процесу переробки органічної речовини гідробіонтів (рис. 3), починаючи від збору субстрату до отримання цільових продуктів.

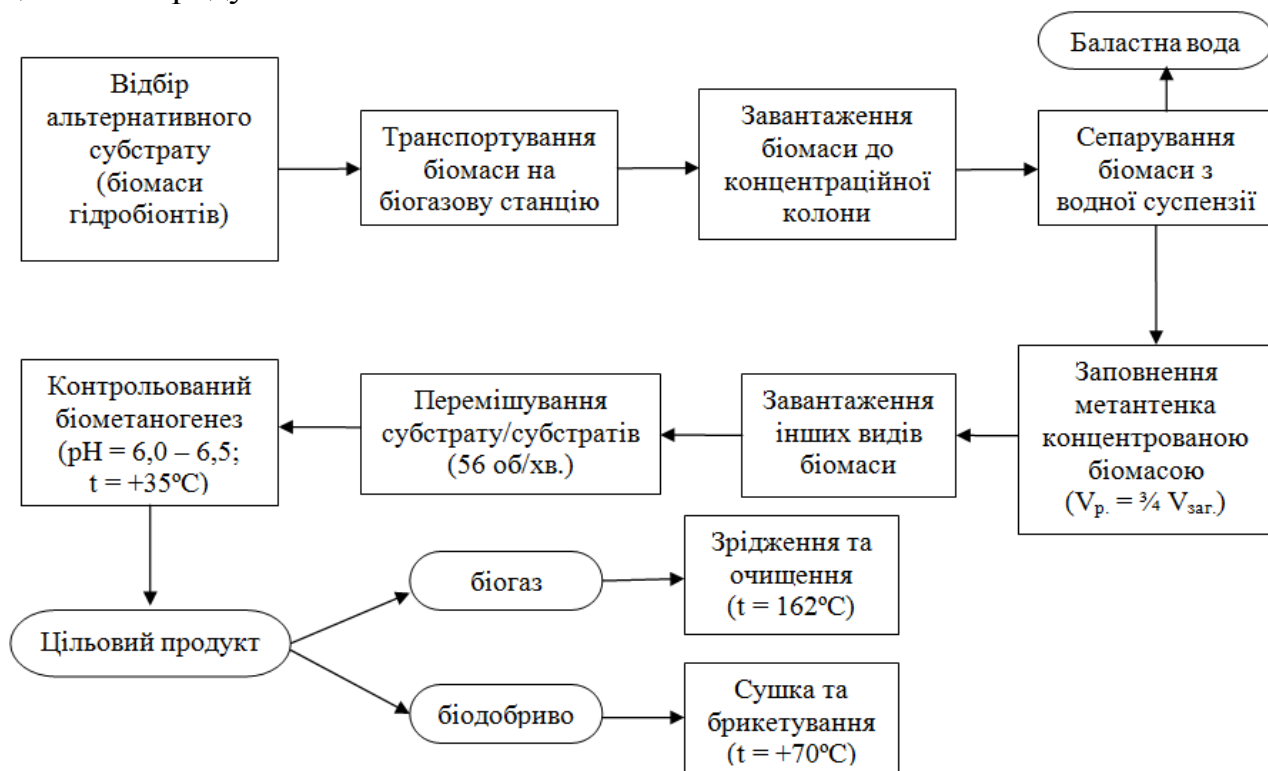


Рис. 3 – Векторна схема технологічного процесу біоконверсії органічного субстрату в цільовий продукт

Досліджено загальний хімічний склад речовин, що є цільовими продуктами запропонованої біотехнології, а також механізм їх отримання, в першу чергу біогазової суміші, що утворюється під час деструкції органічної речовини гідробіонтів та подальшого контрольованого процесу метаногенного бродіння. Основним компонентом біогазу є метан у кількості, що дає змогу використовувати його для задоволення побутових і промислових потреб.

Визначено фізичні та хімічні властивості отриманих зразків біогазу, та здійснено порівняльний аналіз відповідних газових проб, добутих із різних органічних субстратів (табл. 3 і 4). Приблизний склад біогазу, що утворюється в результаті розкладу органічної речовини гідробіонтів (на основі біомаси активного мулу): метан – від 40 % до 70 %, двооксид вуглецю – від 30 % до 45 %, Нітроген, сірководень, Гідроген та інші гази – від 5 %: до 10 %. Теплотворна здатність біогазу – від 18 МДж/м<sup>3</sup> до 25 МДж/м<sup>3</sup>. Межі вибухонебезпечності суміші біогазу з повітрям – від 4 % до 12 %.

Таблиця 3

Хімічний склад біогазу, утвореного із активного мулу		
CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>	Інші гази (N <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> S, H <sub>2</sub> та ін.)
55,0 %	37,5 %	7,5 %

**Хімічний склад біогазу (%), утвореного із ціанобактерій**

№	CH <sub>4</sub> +H <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	CO	H <sub>2</sub> S	Інші
1	70,10	20,05	8,15	0,36	0,15	0,04	1,15
2	72,00	19,07	7,05	0,49	0,22	–	1,17
3	71,75	20,77	6,75	0,73	–	–	–
4	71,90	20,00	7,23	0,43	0,22	–	0,22
5	70,14	22,04	7,34	0,34	0,11	0,03	–
6	71,15	21,05	7,30	0,33	0,12	–	0,05
7	73,09	20,14	6,13	–	0,54	–	0,10
8	72,05	19,05	7,02	0,03	0,02	0,09	1,74
9	70,30	21,05	7,25	0,80	0,60	–	–
10	71,11	20,01	6,30	0,55	–	–	2,03
11	73,00	19,11	5,98	0,30	0,29	–	1,32
12	71,15	20,05	5,41	0,18	0,10	–	3,11
13	71,56	20,28	6,02	0,42	0,16	–	1,56
14	71,74	19,95	7,31	0,59	0,27	–	0,14
15	70,25	20,21	5,47	0,85	0,15	0,07	3,00
16	72,77	19,18	6,12	0,27	0,13	–	1,53
17	70,26	21,09	6,54	0,21	0,23	–	1,67
18	72,05	19,54	7,00	0,48	0,25	–	0,68
19	69,78	22,87	5,97	0,35	–	–	1,03
20	67,99	24,14	6,18	0,30	0,18	–	1,21
21	72,54	19,91	5,11	0,41	0,09	–	1,94
22	70,97	20,10	7,00	0,43	0,11	–	1,39
23	73,25	18,88	5,01	0,55	–	–	2,31
24	72,14	19,14	6,05	0,61	0,21	–	1,85
25	70,23	21,13	5,55	0,40	0,24	0,05	2,40
Σсеред.	71,33	20,35	6,45	0,42	0,18	0,01	1,26

За результатами досліджень було розроблено технічні умови (ТУ), що поширюються на «Біогаз із органічної речовини гідробіонтів», які встановлюють його кількісні та якісні характеристики. Відповідно до цих ТУ біогаз використовують безпосередньо як паливо або для когенераційних установок. З 1 м<sup>3</sup> біогазу можна отримати 1,6–2,0 кВт-год. електроенергії або 1,6–2,9 кВт-год. рекуперованої теплової енергії у разі його використання у когенераційній установці. Встановлено, що біогаз, отриманий із органічної речовини гідробіонтів відповідає вимогам, наведеним у таблиці 5.

Таблиця 5

**Технічні вимоги до біогазової суміші**

Параметр	Одиниця виміру	Значення
Тиск газу	кПа	1,5–100
Мінімальний вміст метану	%	55–65
Теплотворна здатність	МДж/кг (ккал/кг)	≥ 5500 (≥ 23,01)
Теплота згорання	кВт-год/нм <sup>3</sup>	≥ 5
Вміст Хлору	мг/нм <sup>3</sup> CH <sub>4</sub>	Cl ≤ 100
Вміст Флюору	мг/нм <sup>3</sup> CH <sub>4</sub>	F ≤ 50
Сумарний вміст Хлору і Флюору	мг/нм <sup>3</sup> CH <sub>4</sub>	Cl+F ≤ 100
Вміст Силіцію	мг/нм <sup>3</sup> CH <sub>4</sub>	Si ≤ 5
Вміст Сульфуру	мг/нм <sup>3</sup> CH <sub>4</sub>	S ≤ 300
Вміст сірководню	мг/нм <sup>3</sup> CH <sub>4</sub>	H <sub>2</sub> S ≤ 306
Вміст амоніаку	мг/нм <sup>3</sup> CH <sub>4</sub>	NH <sub>3</sub> ≤ 38
Відносна вологість	%	≤ 60
Температура газової суміші	°C	10 ≤ T ≤ 30

Розроблено також ТУ, які поширюються на «Орґано-мiнеральне бiодобриво на основi дигестату», встановлено кiлькiснi та якiснi характеристики бiодобрива, що виробляється iз вiдпрацьованої в ходi метаногенезу орґанiчної речовини гiдробiонтiв. За агрохiмiчними та фiзико-хiмiчними показниками орґанiчна сумiш вiдповiдає нормам, наведеним у таблицi 6.

Таблиця 6

### Агрохiмiчнi та фiзико-хiмiчнi показники орґанiчної сумiшi

Назва показникiв	Норма	
	для використання у сiльському господарствi	для використання у лiсовому господарствi, зеленому будiвництвi та для рекультивациi земель
Вмiст фракцiй $\geq 50$ мм, на суху речовину, %, не бiльше	2	2
Орґанiчна речовина, на сухий продукт, %, не менше	40	40
Масова частка вологи, %	20–95	20–95
Показник рН, одиницi	6,0–8,0	6,0–8,0
Нiтроген ( $N_xO_x$ ) загальний, %	1,8	1,5
Фосфор ( $P_2O_5$ ) загальний, %	2,0	1,8
Калiй ( $K_2O$ ) загальний, %	0,1	0,1

Також дослiджено кiнетику отримання бiогазу. Результати камеральних дослiджень переконливо свiдчать, як i у випадку отримання лiпидiв iз СЗВ, що задля добування бiогазу попередня гiдродинамiчна кавiтацiя виявилась найефективнiшою. Отриманi данi покладено в основу розроблення технологiї їх переробки, яка передбачає збiр та гiдродинамiчну кавiтацiю бiомаси для отримання iз неї бiогазу й екстракцiї лiпидiв, як сировини для виробництва бiодизелю (бiопалива III генерацiї). Технологiю захищено вiдповiдними охоронними документами України. Визначено iншi бiотехнологiчнi шляхи комплексної переробки орґанiчної маси гiдробiонтiв (рис. 3).

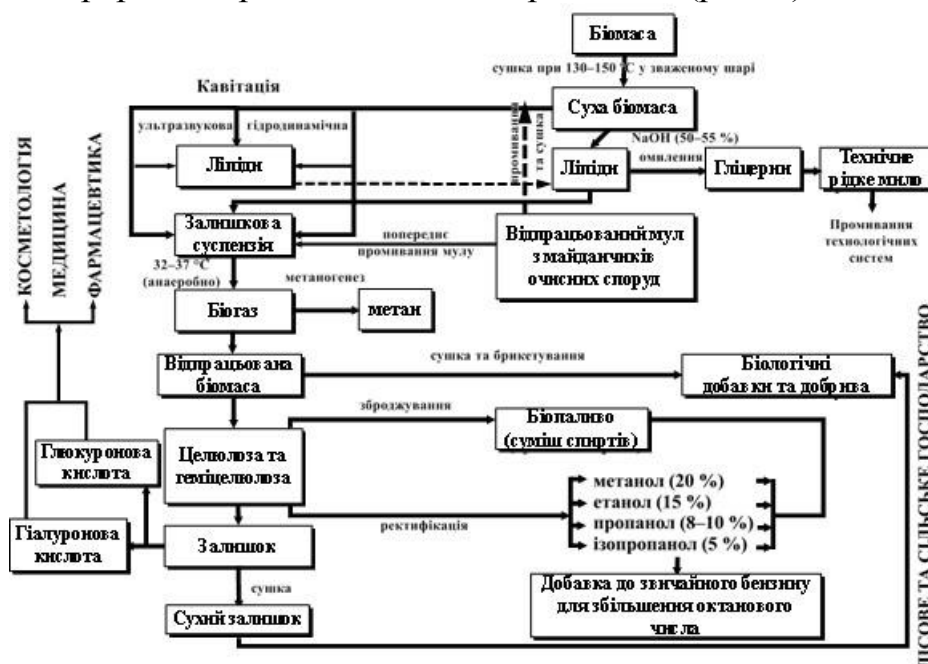
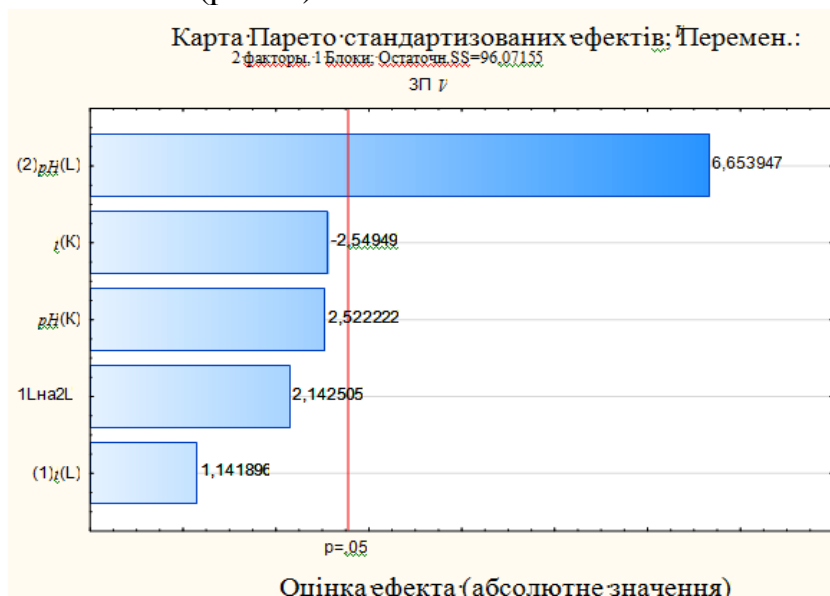


Рис.3 – Шляхи переробки гiдробiонтiв та галузі застосування її продуктiв

У п'ятому розділі подано математичну модель біометаногенезу, яка враховує різні чинники метаногенезу для кількісного оцінювання ефектів їх взаємодії. Стандартизована карта Парето, дозволила встановити значущі чинники впливу на величину об'єму біогазу із субстрату СЗВ та їх суміші з активним мулом. Перетин стандартизованих ефектів вертикальною лінією, яка становить 95 %-ну довірчу ймовірність, вказує, що вплив чинників на функцію відгуку статично значимий (рис. 5).



(а)



(б)

Рисунок 5 – Карта Парето для змінних субстрату СЗВ (а) і суміші СЗВ й активного мулу очисних споруд м. Кременчук (б)

Графічно побудовано поверхні відгуку, що ілюструють залежність величини об'єму біогазу із субстрату СЗВ від змінних чинників (рис. 6).

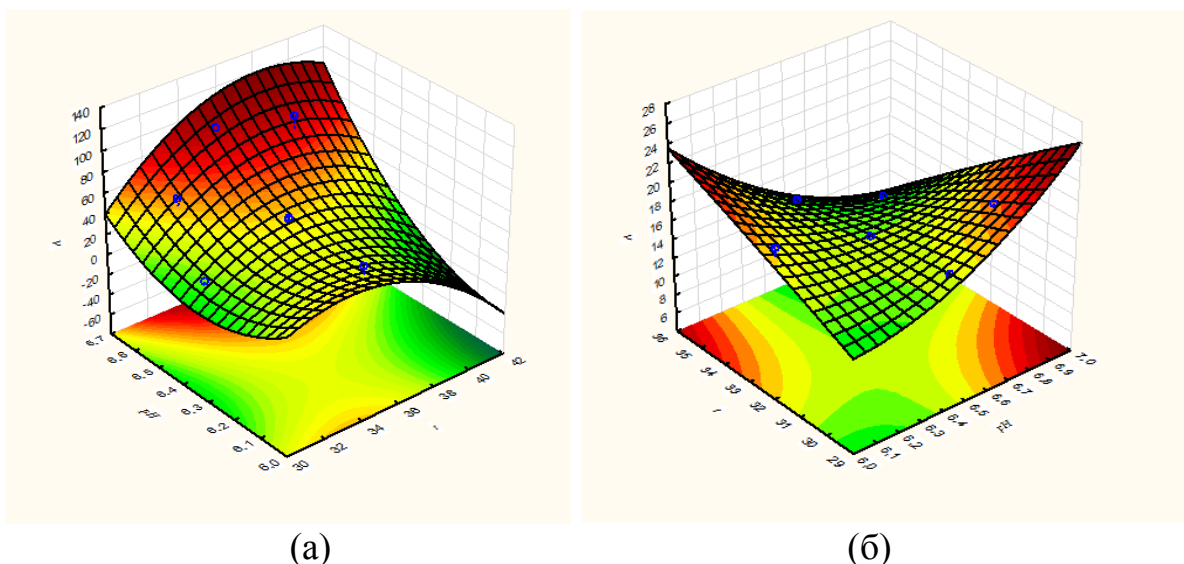


Рисунок 6 – Вплив температури й рН на величину об'єму біогазу, одержаного із субстрату ціанобактерій (а) та їх суміші з активним мулом (б)

Розкрито конструкційні особливості біометаногенної установки та наведено розрахунки, що дозволяють використати отримані практичні результати у промислових масштабах. Запропоновано та спроектовано пристрій для підвищення густини субстратної речовини – «Концентратор-дайджестер для утилізації біомаси ціанобактерій», що являє собою розташовану горизонтально циліндричну ємність висотою 2480 мм з днищем діаметру 930 мм, виготовлену із застосуванням того ж матеріалу та способів зварних з'єднань, що і концентраційна колона.

До складу установки із збирання та використання біогазу входять: пристрої для відбору органічної речовини; концентраційна колона; метантенк (дайджестер); накопичувальна ємність для біогазу (газгольдер); свіча для факельного спалювання надлишку біогазу, або в аварійних ситуаціях.

Розроблено ТУ процесу отримання біогазової метановмісної суміші. Визначено потенційну користь даної розробки для ряду галузей промисловості. Відповідно до цих ТУ відбір органічної речовини, призначеної для переробки на біогаз, може здійснюватися з поверхні як природних так і штучних водойм, зокрема ставків та водосховищ.

Прогнозування кількості біогазу, що утворюється, виконують з урахуванням складу і властивостей сировини, її свіжості, місця відбору, умов та терміну зберігання, рН водної витяжки з субстрату. Також визначено оптимальні параметри маси для анаеробного зброджування: вологість – від 90 % до 92 %; масова частка золи – від 15 % до 16 %; показник рН у межах 6,0–7,5 од.; початкове відношення Карбону до Нітрогену (С:N) повинно наближатися до 12:1.

За використанням цих та інших параметрів створено віртуальний комплекс технологічного процесу виробництва метану та добрива (рис. 8) із моно- та мультисубстратних сумішей, як на основі масових форм гідробіонтів, так і з використанням традиційних джерел органіки (відходів тваринницької та рослинницької галузей сільського господарства). Робота біогазової установки



## ВИСНОВКИ

На підставі оригінальних результатів проведених теоретичних та експериментальних досліджень розроблено біотехнологію переробки масових форм гідробіонтів на прикладі ціанобактерій з отриманням ряду цінних цільових продуктів.

1. З'ясовано еколого-економічне значення ціаней та перспективи ефективного використання їх біомаси. Визначено видовий склад вихідного субстрату для біометаногенезу (*Microcystis aeruginosa*), біомаса якого на окремих ділянках водосховища може сягати 70–100 г/м<sup>3</sup>, а також його мікробіологічні характеристики.

2. Досліджено фізичний, хімічний і біологічний аспекти процесу біометаногенезу, встановлено послідовність біохімічних процесів при виробництві біогазу із СЗВ та з'ясовано їх особливості. Змодельовано процес біометаногенезу у лабораторних умовах, у результаті чого отримано перші зразки біогазової суміші із малих об'ємів (до 1 дм<sup>3</sup>) субстрату на основі біомаси гідробіонтів з плям «цвітіння» та доведено її прийнятні енергетичні властивості. Визначено хімічний склад зразків біогазу різного походження (вміст метану до 73 %) та виконано порівняльний аналіз їх фізичних властивостей.

3. Створено новий безвідходний технологічний процес, що забезпечує раціональне використання природних ресурсів (надлишкової біомаси ціаней) та диверсифікує отримання біопалива II і III генерацій. Застосування запропонованої біотехнології дозволяє суттєво зменшити негативні наслідки явища «цвітіння» природних і штучних водойм у регіоні, а також отримати цінні енергетичні продукти у вигляді біометану, біодизелю, біодобрива та цілого ряду органічних речовин, перспективних для використання у косметичній, фармакологічній та хімічній галузях економіки.

4. Здійснено обґрунтування наукових засад екологічно безпечної біотехнології переробки ціаней, доведено ефективність використання за субстрат біомаси інших масових форм гідробіонтів (вищої водної рослинності, морських макрофітів тощо), а також мультисубстратних сумішей (листяний опад, активний мул, стічні води молокопереробних підприємств, відходи після урожайної діяльності та тваринництва), в яких співвідношення С:N наближається до значень 10:1 – 30:1.

5. Створено проект біометаногенної установки та розроблено технічні умови процесу переробки масових форм гідробіонтів з отриманням метану та органо-мінерального добрива. За проектованою схемою побудовано експериментальну дослідну біогазову установку на базі лабораторії екологічної біотехнології і біоенергетики Кременчуцького національного університету.

6. Досліджено застосування різних субстратів для отримання біогазової метановмісної суміші. Проведено критичний аналіз результатів теоретичних та практичних досліджень. Розроблено технічні умови щодо цільових продуктів біотехнології – біогазу та органо-мінерального добрива. Визначено оптимальне розведення дигестату (1:100), яке дає максимальний фітостимулюючий ефект для більшості видів досліджуваних культурних рослин.

7. Розроблено математичну модель процесу біометаногенезу методом центрального композиційного рототабельного планування повного факторного експерименту ПФЕ-2 із зірковими точками. Створено віртуальний комплекс технологічного процесу виробництва метану та добрива на основі моно- та мультисубстратних сумішей, в яких може бути використано як масові форми гідробіонтів, так і традиційні джерела органіки (відходи сільського та лісового господарства).

8. Розраховано техніко-економічний ефект біоконверсії органічної маси ціанобактерій. Економія витрат на виробництво біометану за рахунок субстрату, оскільки біомаса СЗВ є безкоштовною, становить щонайменше 42 €/т. Додатковий прибуток зумовлений сплатою відповідних підприємств за переробку їх відходів, що транспортуються до біогазових станцій муніципального користування також за рахунок власника.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

### Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації

#### Статті у виданнях, що індексуються у МНБД («SCOPUS»)

1. V. Nykyforov, M. Malovanyu, T. Kozlovs'ka, O. Novokhatko, S. Digtar. The biotechnological ways of blue-green algae complex processing. // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – Kharkov, 2016. – № 5/10 (83). – P. 11–18. *Особистий внесок – експериментальні дослідження.*

#### Статті у фахових виданнях України

2. Никифоров В.В., Козловская Т.Ф., Дегтярь С.В. Гидробионты как новый субстрат для получения клар-газа. // *Екологічна безпека*, Кременчук, 2008, – № 2 (2). – С. 28–30. *Особистий внесок – дослідження ефективності біоконверсії органічної речовини гідробіонтів з метою отримання біогазу.*
3. Alferov V.P., Pronin V.M., Shmandiy V.M., Nikiforov V.V., Digtar S.V., Kharlamova E.V. Some ways for using of pollution biomass. // *Екологічна безпека*, Кременчук, 2010, – № 1 (9).–С. 9–13. *Особистий внесок – аналіз шляхів переробки біомаси гідробіонтів з плям «цвітіння».*
4. Зюман Б.В., Дігтяр С.В., Плакущий В.О. Результати дослідження екологічної ситуації на каскаді водосховищ річки Дніпро. *Нові технології*, 2013.–№ 1–2 (39–40). – С. 106–109. *Особистий внесок – підбір статистичних даних та літературного матеріалу щодо гідрологічного режиму дніпровських водосховищ.*
5. Sergy Digtar. Qualitative and quantitative characteristics of biogas of cyanea organic mass // *Environmental Problems*. Lviv Polytechnic Publishing House, 2016.–V. 1.–№ 2 (2). – P. 149–153. *Особистий внесок – експериментальні дослідження та аналіз отриманих результатів.*
6. А.В. Пасенко, О.В. Новохатько, Т.Ф. Козловська, С.В. Дігтяр, О.О. Никифорова. Основні підходи до математичного моделювання біологічної продуктивності ціаней як сировинної бази біоконверсії // *Екологічна безпека*, Кременчук, 2016.– № 2 (22). – С. 118–127. *Особистий*

*внесок – надання фактичного матеріалу для експериментальних досліджень.*

7. M. Yelizarov, S. Digtar, S. Shlyk. The feasible methods for cyan bacteria harvesting from the water body surface. // *Вісник КрНУ*, 2016. – Випуск 6 (101). – С. 91–95. *Особистий внесок – аналіз властивостей біомаси ціанобактерій з плям «цвітіння».*

#### **Тези доповідей на науково-практичних конференціях**

8. Дігтяр С.В. Перспективи отримання клар-газу з біомаси синьозелених водоростей *Microcystis aeruginosa* / Матеріали VII Міжнародної науково-практичної конференції «*Біосферно-ноосферні ідеї В.І. Вернадського та еколого-економічні проблеми розвитку регіонів*» (14 – 16 вересня). – Кременчук, 2006. – С. 52. *Особистий внесок – літературний огляд питання розвитку технології біометаногенезу.*
9. Дегтярь С.В. «Цветение» водоёмов и пути рационального использования избыточной планктонной биомассы. / Тези IV міжнародної конференції студентів, магістрів та аспірантів «*Сучасні проблеми екології*». – Житомир, 2007. – С.183–185. *Особистий внесок – аналіз інформації щодо можливих шляхів подолання наслідків явища «цвітіння».*
10. Никифоров В.В., Козловская Т.Ф., Дегтярь С.В. Возможности интенсификации процессов образования биогаза из цианобактерий // Тези доповідей XII міжнародної науково-практичної конференції «*Біосферно-ноосферні ідеї В.І.Вернадського й еколого-економічні та гуманітарні проблеми розвитку регіонів*» – Кременчук, КДУ імені Михайла Остроградського, 2010. – С.75–76. *Особистий внесок – визначення оптимальних умов протікання процесу біометаногенезу на основі субстрату із біомаси ціанобактерій.*
11. Дігтяр С.В., Зюман Б.В., Плакущий В.О. Проблема забруднення водосховищ на р. Дніпро та можливі шляхи її подолання. // Тези доповідей на міжвузівській науково-практичній конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «*Новітні технології та інновації*» (НТІ – 2013), Кременчук, 2013, – С. 68–69. *Особистий внесок – підбір статистичних даних щодо екологічного стану дніпровських водосховищ та їх аналіз.*
12. M. Yelizarov, T. Kozlovs'ka, S. Digtar Prospects for obtaining valuable products from cyanobacteria biomass. // the International Conference «*Applied Biotechnology in Mining*», National Technical University «Dnipro Polytechnic» Dnipro, Ukraine, April 25–27, 2018. *Особистий внесок – аналіз властивостей біомаси ціанобактерій.*
13. K. Meixner, L. Kamarad, E. Binner, O. Tkachenko, S.Digtar, V. Nykyforov, S. Shlyk Algae Blooms for Power supply. // *Bundesalgenstammtisch*, September 27-28, 2018 KIT, Karlsruher Institut für Technologie. – P. 56. *Особистий внесок – дослідження можливостей впровадження біотехнології отримання біогазу з органічної речовини гідробіонтів в умовах «цвітіння» водойм.*

### Наукові параці, опубліковані в наукових журналах

14. Дігтяр С.В. Проблема «цвітіння» верхів'я Дніпродзержинського водосховища та шляхи її вирішення. // *Вісник проблем біології і медицини*, Полтава, 2006. – №4.– С.28–30. *Особистий внесок – аналітичний огляд екологічних аспектів проблеми «цвітіння» водойм та вибір оптимальних шляхів застосування надлишкової біомаси гідробіонтів.*

### Патенти

15. Луговий А.В., Єлізаров О.І., Никифоров В.В., Дігтяр С.В. Спосіб отримання біогазу із синьозелених водоростей. Патент на корисну модель № 24106 від 25.06.2007. – К., Бюл. №9. *Особистий внесок – проведення експериментальних досліджень.*
16. Никифоров В.В., Єлізаров М.О., Пасенко А.В., Дігтяр С.В., Шлик С.В. Спосіб виробництва метану та добрива. Патент на корисну модель № 104743 від 10.02.2016. – К., Бюл. № 3. *Особистий внесок – дослідження особливостей протікання процесу метаногенезу залежно від субстрату.*

### АНОТАЦІЯ

**Дігтяр С.В.** Розробка біотехнології переробки масових форм гідробіонтів. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 03.00.20 – Біотехнологія. – Одеська національна академія харчових технологій Міністерства освіти і науки України, Одеса, 2019.

У дисертації вирішено завдання щодо розробки безвідходної біотехнології отримання біопалива II генерації (метановмісної газової суміші) за використанням нового, відновлювального субстрату – біомаси ціаней та застосуванням дигестату як органо-мінерального добрива для потреб сільського та лісового господарства.

Досліджено й розкрито фізико-хімічний та біологічний аспекти процесу біометаногенезу, встановлено послідовність біохімічних реакцій при виробництві біогазу із СЗВ та з'ясовано їх особливості. Визначено видовий склад вихідного субстрату для біометаногенезу та його мікробіологічні характеристики. Встановлено хімічний склад зразків біогазу різного походження та здійснено порівняльний аналіз їх фізичних властивостей.

Вдосконалено традиційну біотехнологію отримання біогазу за рахунок використання нового субстрату – надлишкової органічної речовини гідробіонтів з плям «цвітіння», яка складається в основному з біомаси ціанобактерій. Розроблено новий екологічно безпечний технологічний процес, що забезпечує раціональне використання відновлювальних природних ресурсів (утилізацію гідробіонтів).

Обґрунтовано доцільність застосування як енергетичного першоджерела надлишкової біомаси ціанобактерій, яка утворюється під час «цвітіння» водойм. Змодельовано процес біометаногенезу у лабораторних умовах. Визначено еколого-економічне значення СЗВ та перспективи ефективного використання їх біомаси та обґрунтовано наукові засади безпечної біотехнології переробки біомаси ціаней.

Розроблено віртуальний комплекс технологічного процесу виробництва метану та добрива з моно- та мультисубстратів на основі біомаси ціанобактерій та інших масових форм гідробіонтів, а також традиційних джерел органічної речовини (відходи харчової промисловості та сільськогосподарського виробництва, листовий опад зелених зон населених пунктів, активний мул і осад очисних споруд тощо).

Результати досліджень використовуються в навчальному процесі Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського та Полтавського національного педагогічного університету імені В.Г. Короленка. Практичні рекомендації застосовуються у природоохоронній діяльності об'єкту природно-заповідного фонду України – парку-пам'ятки садово-паркового мистецтва у м. Кременчук «Ювілейний», а також на комплексних очисних спорудах КП «Кременчукводоканал».

**Ключові слова:** біотехнологія, гідробіонти, ціанобактерії, евтрофікація, метаногенез, біоконверсія, біоенергетика, біодобриво.

### ABSTRACT

**Digitar S.V.** Development of the biotechnology for hydrobionts mass forms processing. – Manuscript.

Thesis for a Candidate Degree in Technical Sciences (PhD): Specialty 03.00.20 – Biotechnology. – Odesa National Academy of Food Technologies of the Ministry of Education and Sciences of Ukraine, Odesa, 2019.

In the Thesis solved the issue of the development of non-waste biotechnology for receiving the 2nd generation biofuel (gas mixture containing methane) with the use of a new renewable substrate – biomass of cyanobacteriae and further application of a digestate as organic and mineral fertilizer for the purposes of agriculture and forestry. Physical and chemical aspects of bio-methanogenesis were disclosed and researched; the sequence of bio-chemical reactions in production of biogas from blue-green algae was established and their features were determined.

The species composition of the initial substrate for bio-methanogenesis and its microbiological properties were determined. The chemical composition of biogas samples of different origin has been established and comparative analysis of their physical properties has been carried out.

The traditional biotechnology of biogas production has been improved through the use of a new substrate – an excess hydrobionts organic matter from «blooming» spots, which consists mainly of the cyanobacteria biomass. A new environmentally safe technological process, which ensures rational use of natural resources, has been developed.

The practicability of the use of a cyanobacteria biomass that appears during the «bloom» of water reservoirs has been substantiated. The ecological and economic importance of blue-green algae and prospects of their biomass use were determined, and the scientific foundations for safe cyanobacteria biomass processing have been substantiated.

The virtual complex of technological process for the production of methane and fertilizer from mono- and multisubstrates based on cyanobacteria biomass and other

hydronions mass forms, as well as traditional sources of organic matters (like food industry and agricultural wastes, leaf litter from green zones of populated areas, activated sludge of waste treatment facilities, etc.) has been developed.

The results of the research are used in the educational process of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskiy National University and Poltava V.G. Korolenko National Pedagogical University. Practical recommendations are applied during the environmental activities at the natural reserve fund of Ukraine and reserve fund object – the «Yuvileinyi» park, a monument of landscape art in the city of Kremenchuk, as well as at the water treatment facilities of the «Kremenchukvodokanal» utility company.

**Key words:** biotechnology, hydrobionts, cyanobacteria, eutrophication, methanogenesis, bio-conversion, bio-energetics, bio-fertilizer.

### АННОТАЦИЯ

**Дегтярь С.В.** Разработка биотехнологии переработки массовых форм гидробионтов. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 03.00.20 – Биотехнология. – Одесская национальная академия пищевых технологий Министерства образования и науки Украины, Одесса, 2019.

В диссертации решена задача по разработке безотходной биотехнологии получения биотоплива II поколения (метаносодержащей газовой смеси) с использованием нового, возобновляемого субстрата – биомассы цианей и применением дигестата как биоудобрения в сельском и лесном хозяйстве.

Исследованы и раскрыты физико-химический и биологический аспекты процесса биометаногенеза, установлена последовательность биохимических реакций при производстве биогаза из СЗВ и выяснены их особенности. Исследован видовой состав исходного субстрата для биометаногенеза, доказана доминирующая роль цианобактерий вида *Microcystis aeruginosa* Kützing в пятнах «цветения». Определены его микробиологические характеристики – в ходе микроскопирования был определён средний диаметр микроцистиса, который составил 3,14 мкм. Объём его среднестатистической клетки, имеющей шаровидную форму, составил около 15 мкм<sup>3</sup>, а её масса соответственно 15 мкг. Установлен химический состав проб биогаза различного происхождения (содержание метана от 55 % – из субстрата на основе активного ила до 73% – на основе биомассы цианобактерий) и осуществлен сравнительный анализ их физических свойств.

Усовершенствована традиционная биотехнология получения биогаза за счет использования нового субстрата – избыточного органического вещества гидробионтов, изъятых из пятен «цветения», состоящего главным образом из биомассы цианобактерий. Разработан новый экологически безопасный технологический процесс, обеспечивающий рациональное использование возобновляемых природных ресурсов (утилизацию гидробионтов) с использованием отработанного дигестата в качестве биоудобрения.

Обоснована целесообразность применения в качестве энергетического

первоисточника избыточной биомассы цианобактерий, образующейся во время «цветения» водоемов. Смоделирован процесс биометаногенеза в лабораторных условиях. Определены эколого-экономическое значение СЗВ и перспективы эффективного использования биомассы. В условиях Кременчугского и Каменского водохранилищ масса *Microcystis aeruginosa* Kützing составляет  $\approx 4,14 \times 10^7$  т за вегетационный период, что в пересчёте на сухой вес может составлять от 1,61 до  $2,50 \times 10^5$  т органического вещества. Также были научно обоснованы процессы и механизмы биотехнологии её переработки.

Разработан виртуальный комплекс технологического процесса производства метана и удобрения из моно- и мультисубстратов на основе биомассы цианобактерий и других массовых форм гидробионтов, а также традиционных источников органического вещества (отходы пищевой промышленности и сельскохозяйственного производства, листовая опад зеленых зон населенных пунктов, активный ил и осадок очистных сооружений и т.п.).

Результаты исследований используются в учебном процессе Кременчугского национального университета имени Михаила Остроградского и Полтавского национального педагогического университета имени В.Г. Короленко. Практические рекомендации применяются в природоохранной деятельности объекта природно-заповедного фонда Украины – парка-памятки садово-паркового искусства в г. Кременчуг «Юбилейный», а также на комплексных очистных сооружениях КП «Кременчугводоканал».

**Ключевые слова:** биотехнология, гидробионты, цианобактерии, эвтрофикация, метаногенез, биоконверсия, биоэнергетика, биоудобрение.

Підписано до друку 05.11.2019 р.  
Формат 60 × 90/16. Папір друкарський.  
Гарнітура Times New Roman Суг. Друк ризограф.  
Ум. друк. арк. 1,5. Наклад 100 прим.  
Замовлення № 1169

Віддруковано у видавничому відділі  
Одеської національної академії харчових технологій  
65039, м. Одеса, вул. Канатна, 112

