

До спеціалізованої вченої ради
ДФ 35.052.004
Національного університету
«Львівська політехніка»
79013, м. Львів, вул. С. Бандери, 12

ВІДГУК

офіційного опонента

д-ра тех. наук, доцента Трохименко Ганни Григорівни
на дисертаційну роботу *Катишевої Вікторії В'ячеславівни*
**«ПІДВИЩЕННЯ РІВНЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ АТМОСФЕРИ
ПОГЛИНАННЯМ ВУГЛЕКИСЛОГО ГАЗУ ХЛОРОФІЛВМІСНИМИ
МІКРОВОДОРОСТЯМИ»**,

поданої на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю
101 Екологія (Галузь знань 10 Природничі науки)

Актуальність теми дослідження

Останні роки аномальні температурні зміни спостерігаються на всіх континентах нашої планети: температура б'є рекорди у Японії і Арктиці, лісові пожежі лютують у Каліфорнії і Греції, Австралії. Температура поверхні Землі у 2016 році була визнана експертами NASA найвищою за всю історію метеоспостережень. Основна причина глобального потепління - у збільшенні викидів вуглекислого газу в атмосферу. За прогнозами Світового банку, середньорічна температура в Україні до 2100 року може підвищитися на 3,2-4,5 градуса за Цельсієм, якщо викиди парникових газів будуть на нинішньому рівні.

Аби приєднатися до протидії глобальному підвищенню середньої температури понад півтора градуса Цельсія та запобігти негативним наслідкам зміни клімату, Україна у 2016 році підписала та ратифікувала Паризьку кліматичну угоду. У рамках цієї угоди країна зобов'язалась поступово скорочувати кількість викидів парникових газів. Вчені продовжують пошук розв'язання проблем, пов'язаних з глобальним потеплінням та зміною клімату

Після багатьох років досліджень і розробок у світі були відкриті нові геоінженерні технології, в даний час використовуються для уловлювання і видалення CO₂. Це дає надію на пом'якшення наслідків зміни клімату.

У ході досліджень вчені звернули увагу на здатність деяких водоростей поглинати у великих кількостях CO_2 та виробляти з нього екологічно чисте біопаливо. Як об'єкт досліджень все частіше виступає представник мікроводоростей *Chlorella vulgaris*, яка здатна поглинати набагато більше CO_2 , ніж інші рослини. Тому пошук умов, за яких використання водоростей буде найбільш ефективним на сьогодні для протидії негативним кліматичним змінам, є актуальною науковою проблемою як для України, так і світу в цілому. Отже, актуальність теми дисертаційної роботи Катишевої В. В. не викликає сумнівів.

Ступінь обґрунтованості, достовірності наукових положень, висновків, рекомендацій

Ступінь обґрунтованості та достовірності наукових результатів, висновків і рекомендацій дисертаційної роботи визначається високим методологічним та науковим рівнем проведених лабораторних експериментальних досліджень та теоретичної обробки отриманих результатів. При проведенні досліджень використовували сучасне обладнання та методи. При виконанні робіт з визначення вмісту мікроводоростей в одиниці об'єму середовища культивування використовували фотоколориметричний метод, для встановлення структури речовин - спектрофотометричний, хімічні та фізико-хімічні методи аналізу. Визначення концентрації біомаси мікроводоростей також проводили за допомогою фотоколориметричного методу. Для визначення приросту біомаси в залежності від впливу освітлення різного спектру випромінювання використовували культивування у різних фотобіореакторах. Для оцінки достовірності результатів були використані сучасні математичні методи обробки даних, математичного моделювання і статистичного аналізу.

Достовірність основних наукових положень і отриманих результатів у дисертації підтверджується коректністю застосування математичних методів, використанням стандартизованих пакетів MS Excel, Visio, автоматизованої системи проектування та креслення AutoCAD, опрацюванням значної кількості наукових праць українських та зарубіжних вчених, використанням повіреного обладнання, апробацією результатів.

Таким чином, можна стверджувати, що наукові положення, висновки і рекомендації, що надані у дисертаційній роботі, достатньою мірою обґрунтовані та достовірні.

Наукова новизна одержаних результатів

У дисертаційній роботі представлені результати вирішення науково-прикладного завдання розробки методу зменшення кількості парникових газів та газових викидів з використанням хлорофілвмісних мікроводоростей, встановлено механізм поглинання газів та вплив умов довкілля на швидкість такого поглинання.

Наукова новизна підтверджується наступними пунктами:

1). Вперше отримані математичні моделі поглинання вуглекислого газу хлорофілвмісними мікроводоростями, вирішення яких дозволяють розраховувати основні константи процесу очищення газових викидів від парникових газів; встановлено інгібітори та активатори процесу поглинання вуглекислого газу хлорофілвмісними мікроводоростями та зворотне інгібіювання діоксидом сульфуру процесу поглинання вуглекислого газу хлорофілвмісними мікроводоростями, визначено вид інгібіювання та допустиме значення концентрацій інгібітора, оптимальне – активатора, при яких поглинання вуглекислого газу хлорофілвмісними мікроводоростями є найбільш сприятливим;

2). Отримало подальший розвиток обґрунтування оптимальної температури процесу поглинання вуглекислого газу хлорофілвмісними мікроводоростями за умови присутності діоксиду сульфуру, оксидів нітрогену та інших супутніх оксидів; встановлено оптимальну довжину світлової хвилі для максимального поглинання вуглекислого газу хлорофілвмісними мікроводоростями за умови присутності діоксиду сульфуру, оксидів нітрогену та інших супутніх оксидів;

3). Відсутність згадування про подібну технологію поглинання вуглекислого газу у присутності діоксиду сульфуру, оксидів нітрогену та інших парникових газів біологічним методом у вітчизняних джерелах дозволяє стверджувати, що аналогів даної технології на момент написання дисертації в Україні не існує.

Практичне значення виконаного дослідження

Отримані здобувачем результати наукових досліджень дозволяють створити технологію поглинання парникових газів та пропонують до застосування інноваційні методи очищення промислових газових викидів на енергетичних підприємствах та станціях переробки муніципальних відходів,

що повністю відповідає стратегії нашої держави щодо виконання умов Паризької кліматичної угоди, ратифікованої Верховною Радою.

Отриманий патент України на корисну модель на спосіб очищення газових викидів за участі хлорофілвмісних мікроводоростей, розроблені та впроваджені у навчальний процес методичні вказівки “Очищення газових викидів від вуглекислого газу біологічним методом за допомогою хлорофілвмісних мікроводоростей *Chlorella*”.

Враховуючи необхідність викладання у лекційному курсі «Основи промислової екології» методів та заходів зі зменшення рівня забруднення атмосфери парниковими газами та викидами підприємств, результати дисертації Катишевої В. В., які повністю відповідають даній тематиці, використані у програмі курсу.

Повнота викладення наукових положень, висновків і рекомендацій у наукових публікаціях, захищених за темою дисертації

Основні результати дисертаційного дослідження достатньою мірою та у необхідній кількості висвітлено у 17 наукових працях, опублікованих на території України та закордоном. До переліку опублікованих праць включені: 6 статей у наукових фахових виданнях України, серед яких 2, що входять до наукометричних баз даних, 1 - Skopus, 1 - Index Copernicus; 1 стаття у зарубіжному виданні, яке входить до науково-метричної бази Skopus; 9 праць апробаційного характеру, що включають тези доповідей на міжнародних та всеукраїнських конференціях; 1 патент на корисну модель.

Праці Катишевої В. В. відповідають п. 11 «Порядку проведення експерименту з присудження ступеня доктора філософії», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 6 березня 2019 року № 167.

Структура та обсяг дисертації

Дисертаційна робота складається зі вступу, 5 розділів, списку використаних літературних джерел, висновків. Матеріали дисертаційної роботи викладено на 147 сторінках машинописного тексту, ілюстровано 40 рисунками, текст містить 2 таблиці, у бібліографії наведено 148 літературних джерел.

У вступі автором обґрунтовується актуальність теми дисертаційної роботи. Сформульовані мета та задачі дослідження, наукова новизна, практична цінність отриманих результатів. Визначені об'єкт та предмет дослідження, наведено методи дослідження, особистий вклад здобувача в

надрукованих роботах; надається інформація щодо апробації результатів дисертації та їх опублікування.

У першому розділі проведено детальний аналіз літературних джерел, в якому висвітлено та представлено загальну характеристику мікроводоростей *Chlorella*, розглянуто класифікацію та будову інших видів хлорофілвісних мікроводоростей. Також за літературними даними показані умови культивування мікроводоростей *Chlorella* в залежності від температури суспензії, вмісту вуглекислого газу, мінералізації та лужно-кислотного балансу середовища і виду спектру освітлення, надані характеристики обладнання, яке використовується для культивування мікроводоростей. Представлений світовий досвід культивування мікроводоростей в промислових умовах.

Другий розділ дисертації присвячений методам фізико-хімічного аналізу для визначення приросту біомаси мікроводоростей і вивчення впливу таких чинників як температура, концентрація вуглекислого газу, довжина світлової хвилі, вміст оксидів сульфуру та нітрогену на процес фотосинтезу. Представлені методики культивування мікроводоростей для подальшого вивчення процесу приросту біомаси в залежності від температури, концентрації вуглекислого газу, довжини світлової хвилі, концентрації оксидів сульфуру та нітрогену. Описано методику визначення концентрації вуглекислого газу (CO_2) за значенням Ph з метою спостереження за змінами приросту мікроводоростей під його впливом. Наведено схеми експериментальних установок культивування мікроводоростей у залежності від температури, спектру світла та різної концентрації досліджуваних йонів, прилади для визначення приросту біомаси мікроводоростей.

У третьому розділі представлені розроблені теоретичні основи масообміну процесу біологічного поглинання вуглекислого газу мікроводоростями, основні умови приросту мікроводоростей та встановлено фази росту в умовах експерименту. Автором запропоновано механізм транспорту вуглекислого газу у внутрішній об'єм клітин мікроводоростей, розглянуто етапи механізму та кінетику процесу біологічного очищення газу від CO_2 , вивчено динаміку приросту біомаси мікроводоростей в залежності від концентрації вуглекислого газу в середовищі культивування мікроводоростей. Для опису кінетики поглинання вуглекислого газу мікроводоростями застосовано рівняння Міхаеліса-Ментен. Визначено час поділів клітин, час генерації, швидкість росту популяції мікроводоростей, часу подвоєння їх біомаси, вплив температури на динаміку поглинання вуглекислого газу мікроводоростями. Це дозволило розрахувати коефіцієнти приросту - k , а також температурний коефіцієнт реакції фотосинтезу.

Досліджено вплив довжини світлової хвилі на динаміку приросту мікроводоростей з поглинанням вуглекислого газу. Також отримано відповідну аналітичну залежність $k=f(\lambda)$ коефіцієнту приросту мікроводоростей від довжини світлової хвилі.

Четвертий розділ описує результати дослідження впливу диоксиду сульфуру на динаміку поглинання вуглекислого газу хлорофілвмісними мікроводоростями *Chlorella*. Доведено відповідність експериментальних даних теорії Лайнуівера-Берка для випадку зворотнього неконкурентного інгібування і показано, що інгібування диоксиду сульфуру процесу поглинання вуглекислого газу хлорофілвмісними мікроводоростями у водному середовищі - зворотнє, неконкурентне. Визначено константу нестійкості комплексу диоксиду сульфуру з ферментом у ферментсубстратному комплексі, співвідношення $\text{CO}_2 : \text{SO}_2$, за якого може відбуватись процес фотосинтезу та приріст біомаси мікроводоростей, допустимі значення концентрацій диоксиду сульфуру для процесу поглинання вуглекислого газу хлорофілвмісними мікроводоростями у водному середовищі. Вивчено вплив оксидів нітрогену (N_xO_y) на швидкість поглинання вуглекислого газу хлорофілвмісними мікроводоростями у водному середовищі та отримано математичну модель приросту біомаси мікроводоростей при різних концентраціях оксидів нітрогену (N_xO_y), рішення якої дозволяє розраховувати критичні значення концентрацій оксидів нітрогену (N_xO_y) у водному розчині за відомими значеннями коефіцієнтів приросту - k . Отримано аналітичну залежність розрахунку значень концентрації аніону HSO_3^- , що дозволяє керувати процесом поглинання вуглекислого газу із залученням хлорофілвмісних мікроводоростей.

У п'ятому розділі запропоновано технологічну схему поглинання парникових газів, зокрема вуглекислого газу (CO_2), хлорофілвмісними мікроводоростями *Chlorella*. Представлені сучасні способи переробки біомаси мікроводоростей, що застосовуються, та які знаходяться на стадії розробки. Запропоновані можливі шляхи вирішення питання поводження з отриманою біомасою мікроводоростей в результаті очищення промислових газових викидів з урахуванням світового досвіду.

Загальні висновки, що містять основні результати дисертаційних досліджень, викладені достатньо повно та відображають хід виконання встановлених завдань дисертаційного дослідження.

Робота створює добре враження діловитим та послідовним розв'язанням комплексу питань. Відсутні суттєві перебільшення та недоробки.

Відсутність (наявність) порушень академічної доброчесності

За результатами перевірки дисертаційної роботи на наявність ознак академічного плагіату встановлено коректність посилань на першоджерело для текстових та ілюстративних запозичень; навмисних ілюстративних спотворень не виявлено. Звідси можна зробити висновок про відсутність порушень академічної доброчесності.

Зауваження до дисертаційної роботи

1. Не зовсім коректна назва підрозділу 2.3 «Методологія запису спектру поглинання водного розчину мікроводоростей», у той час як за змістом у даному підрозділі описуються просто загальні принципи спектрофотометрії.

2. У другому розділі відсутні методи математичної обробки отриманих даних, за якими оцінювалась статистична достовірність результатів дослідження.

3. З пункту 3.1 залишається незрозумілим, чи запропонований для хлорофілвмісних мікроводоростей п'яти етапний механізм поглинання вуглекислого газу клітинами мікроводоростей – це оригінальне авторське бачення процесу поглинання чи загальновідоме?

4. У роботі багаторазово згадується базове живильне середовище для культивування мікроводоростей, однак, склад такого середовища не наведений.

5. На рис. 3.1 показані криві приросту біомаси мікроводоростей у часі за різних значень концентрацій вуглекислого газу, однак, одиниці вимірювання часу не зазначені ані на рисунку, ані у тексті. Також з графіків, на мій погляд, важко відокремити або простежити перебіг лінійної фази та фази осідання.

6. З рис. 3.6, де показана залежність оберненої швидкості приросту мікроводоростей від оберненої концентрації субстрату (вуглекислого газу), хотілося б дізнатися, у чому полягає фізико-хімічне або біологічне трактування переходу кривої у негативну область оберненої концентрації субстрату.

7. На мій погляд, рис. 3.9 є не зовсім коректним, незрозуміло, це – математична екстраполяція, чи результат експериментальних досліджень? Також, не зовсім коректним з точки зору оформлення наукової роботи є закінчення підрозділу рисунком (це стосується і пункту 4.1).

8. На графіках рис. 4.9 немає пояснень до кривих №1 – №4, хоча у попередньому тексті та рис. 4.8 пояснення представлене.

9. Для газових викидів якого хімічного складу можливо застосовувати схему, представлену у 5-му розділі, щоб не відбувалося інгібування росту мікроводоростей у біореакторі?

10. Не зовсім зрозуміло, за вимогами якого ДСТУ зроблений бібліографічний опис як власного списку наукових праць, так і списку оброблених джерел інформації.

11. У тексті дисертації мають місце стилістичні, орфографічні та друкарські помилки.

Зазначені недоліки та зауваження принципово не впливають на ступінь наукової новизни та практичної значимості отриманих у дисертаційній роботі результатів, а також загальну позитивну оцінку виконаної праці. Зроблені здобувачем висновки та положення наукової новизни, що виносяться до публічного захисту, добре обґрунтовані, логічно пов'язані з отриманими експериментальними даними та відповідають поставленій меті і завданням дослідження.

Висновок про відповідність дисертаційної роботи вимогам МОН України

Дисертаційна робота Катишевої В. В. являє собою закінчене наукове дослідження, виконане автором самостійно на актуальну тему, що містить вирішення важливого екологічного завдання та має прикладний характер.

Наведені здобувачем у дисертації результати обґрунтовані, мають наукове та практичне значення для зменшення рівня газових викидів за допомогою створення біотехнології на основі застосування хлорофілвмісних водоростей.

Зміст дисертації викладено доступно, послідовно, аргументовано.

За актуальністю, науковою новизною, практичною цінністю, рівнем та обсягом проведених досліджень, якістю оформлення дисертаційна робота Катишевої Вікторії В'ячеславівни «Підвищення рівня екологічної безпеки атмосфери поглинанням вуглекислого газу хлорофілвмісними мікроводоростями», подана на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 101 Екологія (Галузь знань 10 Природничі науки), відповідає вимогам Міністерства освіти і науки України до кваліфікаційних наукових праць, а саме Наказу МОН України № 40 «Про затвердження вимог до оформлення дисертації» від 12.01.2017 (зі змінами, внесеними від 31.05.2019) та «Порядку проведення експерименту з присудження доктора

філософії» (Постанова Кабінету Міністрів України від 6 березня 2019 року № 167).

Вважаю, що здобувач Катишева Вікторія В'ячеславівна заслуговує присудження ступеня доктора філософії за спеціальністю 101 Екологія (Галузь знань 10 Природничі науки).

Офіційний опонент:

завідувачка кафедри екології
та природоохоронних технологій
Національного університету
кораблебудування імені адмірала Макарова,
д-р техн. наук, доцент

Г. Г. Трохименко

