

## **ВІДГУК**

офіційного опонента на дисертаційну роботу  
Вдовиченко Альони Андріївни  
на тему «Утилізація газових викидів мікроводоростями»,  
представлену на здобуття ступеня доктора філософії

в галузі знань 16 Хімічна та біоінженерія  
за спеціальністю 162 Біотехнології та біоінженерія

### **Актуальність теми дисертації.**

Розвиток транспорту, промисловості та паливної енергетики призводить до значних викидів парникових ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{O}_3$ ) та токсичних газів ( $\text{CO}$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ ), що впливають на навколишнє середовище та становлять загрозу для клімату і здоров'я людини. Підвищення атмосферного рівня парникових газів (ПГ) за останні п'ять десятиліть вважається основною причиною глобального потепління. Хоча вуглекислий газ є не єдиним ПГ в атмосфері, його частка становить 65% від загального обсягу глобальних викидів, відповідаючи за 60% ефектів глобального потепління.

Сьогодні в атмосферу викидається 22 млрд. тонн  $\text{CO}_2$  з антропогенних джерел. Викид  $\text{CO}_2$  внаслідок використання викопного палива є основною причиною того, що концентрація  $\text{CO}_2$  збільшилася нині з доіндустріального рівня 270 ppm до 430 ppm. У найближчі сто років попит на енергію, як очікується, збільшиться більш як удвічі, що, за оцінками фахівців, призведе до подвоєння викидів  $\text{CO}_2$  до 2050 року. Наслідки такого безпрецедентного зростання концентрації  $\text{CO}_2$  можуть бути такими: закислення океану, підвищення рівня моря, збурення клімату і руйнування екосистем (Sabine, 2004; Thomas, 2004; Wigley, 1996). За останні три десятиліття викиди вуглецю збільшилися приблизно на 50 % і продовжують зростати у зв'язку з глобальною індустріалізацією та урбанізацією, що триває. Якщо безперервний викид цього небезпечного газу в атмосферу не буде обмежений, це може призвести до серйозних наслідків для планети.

Щоб скоротити викиди ПГ, існує гостра потреба у стратегіях пом'якшення наслідків зростання рівня атмосферного  $\text{CO}_2$ . Розробляються програми декарбонізації, спрямовані на видалення вуглецю з атмосфери та поглинання його на невизначений термін або дуже значний період. Викиди ПГ можна знизити за рахунок скорочення використання викопного палива та сприяння зв'язуванню  $\text{CO}_2$ . Атмосферний  $\text{CO}_2$  може бути секвестрований за допомогою фізичних, хімічних та біологічних підходів. Відповідно до обраного методу конверсії  $\text{CO}_2$  уловлюється та перетворюється на продукти з доданою вартістю Одним із найефективніших підходів є біологічна фіксація  $\text{CO}_2$ . Рослини та мікроорганізми можуть уловлювати атмосферний  $\text{CO}_2$  за допомогою механізму фотосинтетичного концентрування вуглецю та перетворювати уловлений карбон у біопродукти. Мікроводорослі мають дуже швидкий темп зростання в порівнянні з наземними рослинами, здатні поглинати значну частину окислів нітрогену і сульфуру з газових викидів, а їх ефективність у вловлюванні та секвестрації вуглецю в 10–50 разів

вища за наземні рослини. Біомаса мікроводоростей знаходить застосування як сировина для виробництва біопалива.

Через це розробка біотехнологій використання мікроводоростей для уловлювання та секвестрації вуглецю і очистки димових викидів від токсичних газів є актуальним науковим і прикладним завданням, для розв'язання якого необхідні широкі дослідження росту мікроводоростей, якісних змін складу біомаси і ефективності секвестрації залежно від складу газових викидів і швидкості введення газів в об'єм культури.

### **Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та новизни**

Положення та висновки дисертації обґрунтовані достатньою кількістю якісно проведених досліджень. Авторкою дисертації чітко окреслені мета та завдання дослідження. Завдання дослідження, положення наукової новизни і висновки дисертації є логічно взаємопов'язаними. Результати досліджень отримані автором особисто. Дисертаційна робота є оригінальною науковою працею, яка виконана на належних методичному та теоретичному рівнях. Робота має послідовну та логічну структуру і є комплексним та завершеним науковим дослідженням. Варто зазначити, що визначення мети дослідження цілком відповідає актуальності теми та її науково-практичному значенню. Крім того, мета і завдання досліджень з усією повнотою витікають із назви обраної дисертаційної праці. Наведені у дисертації об'єкт, предмет та методи дослідження відповідають основним напрямкам роботи.

### **Наукова новизна**

В дисертаційному дослідженні А. Вдовиченко вперше встановлено максимальні граничні концентрації оксидів сульфуру та нітрогену в газових викидах, за яких не відбувається припинення росту і накопичення біомаси мікроводоростей *Chlorella vulgaris*; За допомогою дифузора відпрацьовано режими барботування культурального середовища CO<sub>2</sub>, визначено раціональний розмір і кількість отворів дифузора, за якого відбувається максимальний приріст біомаси; набуло подальшого розвитку: - встановлення залежності впливу газових викидів на якісний і кількісний склад мікроводоростей *C. vulgaris*.

Достовірність результатів, отриманих в дисертаційній роботі, забезпечується коректною постановою задач досліджень, великим обсягом проведених експериментальних досліджень, високим збігом даних, та результатами проведених досліджень, а також апробацією результатів дисертаційної роботи у виробничих умовах.

Отже, в дисертаційній роботі поставлене наукове завдання виконано повністю, здобувач повною мірою оволодів методологією наукової діяльності.

### **Оцінка змісту дисертації, її завершеність та дотримання принципів академічної доброчесності**

За своїм змістом дисертаційна робота здобувача Вдовиченко А.А. повністю відповідає Стандарту вищої освіти зі спеціальності 162 Біотехнології та біоінженерія та напрямкам досліджень відповідно до освітньої програми Біотехнології.

Дисертаційна робота є завершеною науковою працею і свідчить про наявність особистого внеску здобувача у науковий напрям біотехнології.

Розглянувши звіт подібності за результатами перевірки дисертаційної роботи на текстові співпадіння, можна зробити висновок, що дисертаційна робота Вдовиченко Альони Андріївни є результатом самостійних досліджень здобувача і не містить елементів фальсифікації, компіляції, фабрикації, плагіату та запозичень. Використані ідеї, результати і тексти інших авторів мають належні посилання на відповідне джерело.

### **Мова та стиль викладення результатів**

Дисертаційна робота написана державною мовою. Матеріали дисертації викладено послідовно з використанням загальноприйнятої термінології, логічно і обґрунтовано поділено на розділи. Дисертаційна робота оформлена відповідно до вимог наказу МОН України від 12 січня 2017 р. № 40 «Про затвердження вимог до оформлення дисертації».

Дисертація складається з вступу, 5 розділів, висновків, списку літератури та додатків. Загальний обсяг дисертації складає 174 сторінок, в тому числі 104 сторінок основного тексту, до якого входить вступ, 4 розділи та висновки. Дисертація має належним чином оформлену анотацію, список використаних джерел зі 96 найменувань та 2 додатки

У вступі (с. 18-22) обґрунтовано актуальність роботи, сформульовано мету, об'єкт, предмет досліджень та задачі, які розв'язуються в роботі. Окреслено наукову новизну і практичне значення отриманих результатів. Наведено інформацію щодо апробації, структури та обсягу роботи.

У першому розділі (с. 23-47) наведено аналіз літературних джерел, сформульовано завдання дослідження, які необхідно вирішити для створення технології утилізації газових викидів. Обґрунтовано необхідність утилізації ПГ для пом'якшення несприятливих наслідків антропогенної діяльності, переваги біологічних методів секвестрації вуглецю і очистки димових викидів від токсичних газів. Показана перспективність використання мікроводоростей в цьому процесі, обумовлену їх здатністю до фотосинтетичного поглинання вуглекислого газу, що забезпечує нарощування біомаси.

Відзначено, що мікроводорості здатні поглинати також нітроген і сульфур, які у вигляді оксидів містяться у газових викидах і можуть бути в певних дозах використані як елементи живлення. В розділі з використанням даних літератури доведено, що висока фотосинтетична активність мікроводоростей, їх ефективність при низьких концентраціях вуглекислого газу, вища швидкість його поглинання і засвоєння, а також здатність до утилізації оксидів азоту та сірки перевершує можливості вищих рослин. В розділі проаналізована наявна інформація щодо культивування *Chlorella* за використання димових газів, ефективності поглинання газових викидів і їх впливу на приріст біомаси.

Тому визначення раціональних параметрів для утилізації газових викидів є завданням для подальших досліджень. Встановлено вплив на культивування мікроводоростей таких компонентів газових викидів, як оксиди вуглецю, сірки, азоту. Визначено можливість використання газових викидів при культивуванні мікроводоростей *Chlorella* sp. Проаналізовано можливі перешкоди застосування газових викидів для культивування мікроводоростей та визначено шляхи використання нарощеної біомаси мікроводоростей.

**У другому розділі** (с. 48-62) описана загальна організація досліджень, наведено використані методи дослідження, опис установок, методику виконання експериментів, склад поживного середовища, використані культури, підготовку газових викидів до утилізації мікроводоростями.

**В третьому розділі** (с. 63-95) наведено експериментальні дані щодо впливу режиму подачі вуглекислого газу на ріст мікроводоростей. Розглянуто ефективність використання дифузорів з різними параметрами для барботування вуглекислого газу. Визначено оптимальну швидкість подачі газу за заданої концентрації. Показано, що використання дифузору з діаметром отворів 0,12 мм сприяє насичення культурального середовища джерелом карбону (CO<sub>2</sub>), що підвищує швидкість росту в першу добу на 40 % а в третю – на 20 %, порівняно з барботуванням без дифузора. Встановлено раціональну періодичність подачі газу. Проаналізовано застосування рециркуляції для ефективного поглинання вуглекислого газу мікроводоростями. Визначені раціональні умови культивування мікроводоростей *Chlorella* sp., які забезпечували найвищу швидкість росту клітин.

**В четвертому розділі** (с. 96-130) наведено результати дослідження утилізації газових викидів мікроводоростями, вплив азотної та сульфатної кислот на ріст культури. Визначено вплив рециркуляції газових викидів на ефективність їх утилізації та склад біомаси мікроводоростей, зокрема, ліпідів. Досліджено використання газових викидів з вугільної ТЕЦ для культивування мікроводоростей і визначено вплив на біомасу мікроводоростей та ціанобактерій газових викидів після спалювання біогазу. Показано, що у водному середовищі оксиди утворюють кислоти, що призводить до зниження рН ( $\leq 4$ ), тому вміст оксидів нітрогену і сульфору у газових викидах чинить значний вплив на утилізацію токсичних газів *C. vulgaris*. Визначено максимальні граничні концентрації кислотних оксидів SO<sub>2</sub> та NO<sub>2</sub>.

Підвищення вмісту вуглекислого газу (>5%) у газових викидах призводить до підвищення біосинтезу ліпідів вдвічі, зниженню швидкості росту біомаси до 2 разів для одnobіореакторної системи та на 10-50% у мультибіореакторній системі. Періодична подача газових викидів з ТЕЦ за підтримання сталого рН підвищує швидкість росту біомаси в 2 рази, порівняно з попереднім варіантом, в цьому випадку ефективність поглинання CO<sub>2</sub> складає 10 %.

В розділі наведені дані про те, що клітини *Arthrospira platensis*, як і хлорела, ефективно поглинають газові викиди після спалювання біогазу, при цьому не відбувається значних змін в якісному складі біомасі *A. platensis*. Результати свідчать, що при культивуванні за використання газових викидів необхідно підтримувати значення рН>5,

оскільки газові складові закислюють середовище, що спричиняє зупинку росту культур мікроводоростей та ціанобактерій.

**В п'ятому розділі** (с. 131-150) наведено графічну модель залежності швидкості росту клітин від технологічних параметрів процесу утилізації газових викидів. В моделі враховано дію кислот, утворених з оксидів азоту і сірки, що не спричиняють зупинку приросту при збереженні рН вище 4.

За експериментальними даними розроблено технологічну схему утилізації газових викидів мікроводоростями. Виготовлено дослідно-промислову установку об'ємом 100 дм<sup>3</sup>, яку впроваджено на ТОВ «РОСТОК-ПРИЛАД ЛТД» (акт впровадження додаток А). Наведено розрахунки собівартості роботи спроектованої установки для утилізації газових викидів.

**Висновки** (с. 151-152). У цьому розділі автор наводить 6 конкретних висновків, які логічно витікають з результатів досліджень і спрямовані на досягнення поставленої меті роботи.

Додатки (с. 166-174) містять акти впровадження результатів дисертаційної роботи, які підтверджують наукову новизну, теоретичне та практичне значення дисертаційної роботи; а також списки опублікованих за темою дисертації праць.

Отже, авторка дисертаційної роботи добре володіє і самостійно аналізує отриманий матеріал, об'єктивно й аргументовано його оцінює. Загалом, робота за переліком проведених досліджень, значенням отриманих результатів та їх оформленням складає позитивне враження.

### **Оприлюднення результатів дисертаційної роботи**

Наукові результати дисертації висвітлені у 3 наукових публікаціях здобувача, серед яких: 2 статті у наукових виданнях, включених на дату опублікування до переліку наукових фахових видань України; 2 статті у періодичних наукових виданнях, проіндексованих у базах даних Web of Science Core Collection та/або Scopus, з яких 1 стаття у виданнях, віднесених до першого — третього квартилів (Q1—Q3) відповідно до класифікації SCImago Journal and Country Rank або Journal Citation Reports; 0 патентів на винахід, що пройшли кваліфікаційну експертизу та безпосередньо стосується наукових результатів дисертації; 0 патентів України на корисну модель; 0 одноосібних монографій, що рекомендовані до друку Вченою радою КПІ ім. Ігоря Сікорського та пройшли рецензування.

Також результати дисертації були апробовані на 8 наукових фахових конференціях.

Таким чином, наукові результати описані в дисертаційній роботі повністю висвітлені у наукових публікаціях здобувача.

### **Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи**

Відзначаючи хороший рівень роботи, наукове та прикладне значення результатів, доцільно висловити деякі зауваження та питання дискусійного характеру:

- Виникає питання, щодо складу живильного середовища для культивування *Arthrospira platensis* (с. 49). Вміст  $\text{NaHCO}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , нітратів і сульфатів значно перевищує концентрацію цих солей в середовищі Зароука та інших середовищах, які використовуються при вирощуванні *A. platensis* (див., наприклад, Stunda-Zujeva, 2020). Очевидно, що надзвичайно високий вміст нітратів не сприятиме поглинанню оксидів нітрогену з газових викидів;
- Не визначено, як рахували кількість клітин *A. platensis*, яка має ниткоподібну структуру;
- Згідно матеріалів роботи при культивуванні як *Chlorella*, так і *A. platensis* відбувалось підвищення рН середовища (с. 69: з 5,7 до 6,5 для *Chlorella*) (с. 125: значне підвищення рН культурального середовища *A. platensis*). Авторка вважає, що це свідчить про раціональні умови для життєдіяльності мікрободоростей (с. 66, 69). Слід більш детально пояснити причини підвищення рН при рості цих мікрободоростей, а також чому це сприяє створенню раціональних умов для їх життєдіяльності;
- на рис.3.3 наведено залежність рН від часу пропускання  $\text{CO}_2$  (t) за різної концентрації біомаси. В тексті (с. 66) стверджується, що «Більша концентрація клітин призводить до більшого споживання вуглекислого газу із середовища і, як наслідок, відбувається підвищення рН». Однак, з рисунку видно, що рН середовища падає з часом при всіх досліджених концентраціях клітин;
- у тексті зустрічаються невдалі, незрозумілі вирази (наприклад, с. 28: «Температура впливає на поглинання  $\text{CO}_2$  мікрободоростями через зміну активності ферментів карбоксилази (?) та RuBisCo, оскільки фермент є білковою одиницею, низька температура призводить до змін аміноструктур (?), тоді як висока температура розтягує та розриває (?) поліпептидний ланцюг, що призводить до порушення секвестрації  $\text{CO}_2$ »; с. 27: « $\text{CO}_2$  поглинається 5-бісфосфаткарбоксилазою (RuBisCo), рибулозою-1 у рибулозу-1 і 5-бісфосфат (RuBP) під час фази карбоксилювання», а також помилки. Так, в розділі «Змісті» (с. 15) пропущений «РОЗДІЛ 3. Вплив параметрів подачі вуглекислого газу на культивування мікрободоростей». На с. 17 невірно розкрито скорочення для рибулозодифосфаткарбоксилази, «RuBisCo – 5-бісфосфаткарбоксилаза», а також помилково розкрито скорочення для рибулозо-1,5-бісфосфату «RuBP – рибулоза-1 і 5-бісфосфат»;
- В роботі використані два виду мікрободоростей, тому в підписах до рисунків розділів 3 і 4 слід визначати, до якої культури відносяться відповідні дані.

Вважаю, що висловлені зауваження не є визначальними і не зменшують загальну наукову новизну та практичну значимість результатів та не впливають на позитивну оцінку дисертаційної роботи.

## Висновок про дисертаційну роботу

Представлена робота являє собою завершене дослідження, при виконанні якого отримані нові і достовірні результати, необхідні для створення наукових основ біотехнології використання мікроводоростей для утилізації газових викидів. Вважаю, що дисертаційна робота здобувача ступеня доктора філософії Вдовиченко Альони Андріївни на тему «Утилізація газових викидів мікроводоростями» виконана на високому науковому рівні, не порушує принципів академічної доброчесності та є закінченим науковим дослідженням, сукупність теоретичних та практичних результатів якого розв'язує наукове завдання, що має істотне значення для Хімічної та біоінженерії. Дисертаційна робота за актуальністю, практичною цінністю та науковою новизною повністю відповідає вимогам чинного законодавства України, що передбачені в п.6 – 9 «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44.

Здобувач Вдовиченко Альона Андріївна заслуговує на присудження ступеня доктора філософії в галузі знань 16 Хімічна та біоінженерія за спеціальністю 162 Біотехнології та біоінженерія.

### Офіційний опонент

Заступник директора

Інституту ботаніки

ім. М.Г. Холодного НАН України

Доктор біологічних наук, професор



Олена Золотарьова

«30» травня 2025 року



Підпис Золотарьової О.  
Засвідчую  
Відділ кадрів