

ВИВЧЕННЯ ПРОЦЕСУ МАСООБМІНУ ПРИ ПЕРЕТВОРЕННІ ВУГЛЕКИСЛОГО ГАЗУ У МЕТАН БІОЛОГІЧНИМ МЕТОДОМ

В. В. Дячок, О. Б. Левко

Національний університет "Львівська політехніка"

пл. Святого Юра, 2, м. Львів, 79000, Україна. E-mail: olenka-lev5@mail.ru

Наведено результати експериментального дослідження кінетики приросту біомаси мікроводоростей при поглинанні вуглекислого газу за участі мікроводоростей типу хлорели. Дана рослина має великі переваги над звичайними наземними рослинами в тім, що мікроводорості мають високі темпи приросту, що сприяє швидкому перетворенню вуглекислого газу у біомасу. Завдяки їм використовується екологічно чистий процес поглинання вуглекислого газу із застосуванням фотосинтезу. Досліджено процес масообміну при реалізації біологічних методів очищення газових викидів. Запропоновано чотири етапи процесу біохімічного поглинання вуглекислого газу мікроводоростями при його барботуванні через водний розчин. Досліджено процеси, що супроводжують поглинання та трансформацію вуглекислого газу у метан біохімічним методом. Показано перспективу застосування біохімічних методів очищення газових викидів від вуглекислого газу. Запропоновано технологічну схему біометанізації маси мікроводоростей.

Ключові слова: вуглекислий газ, фотосинтез, біометанізація, мікроводорості.

ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССА МАСООБМЕНА ПРИ ПРЕОБРАЗОВАНИИ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА В МЕТАН БИОЛОГИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

В. В. Дячок, Е. Б. Левко

Національний університет «Львівська політехніка»

пл. Святого Юра, 2, г. Львів, 79000, Україна. E-mail: olenka-lev5@mail.ru

Приведены результаты экспериментального исследования кинетики прироста биомассы микроводорослей при поглощении углекислого газа при участии микроводорослей типа хлореллы. Данное растение имеет большие преимущества над обычными наземными растениями в том, что микроводоросли имеют высокие темпы прироста, способствует быстрому превращению углекислого газа в биомассу. Благодаря им используется экологически чистый процесс поглощения углекислого газа с применением фотосинтеза. Исследован процесс массообмена при реализации биологических методов очистки газовых выбросов. Предложено четыре этапа процесса биохимического поглощения углекислого газа микроводорослями при его барботировании через водный раствор. Исследованы процессы, сопровождающие поглощение и трансформацию углекислого газа в метан биохимическим методом. Показано перспективу применения биохимических методов очистки газовых выбросов от углекислого газа. Предложена технологическая схема биометанализации массы микроводорослей.

Ключевые слова: углекислый газ, фотосинтез, биометанализация, микроводоросли.

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ. В зв'язку із збільшенням вуглекислого газу в атмосфері, в кількостях, що перевищують природну здатність до самоочищення, в останні роки особливо актуальним є проблема очищення газових викидів. Серед відомих методів очищення особливої уваги заслуговують біологічні. Біологічне очищення, як відомо, базується на здатності мікроорганізмів включати в схеми метаболізму найрізноманітніші хімічні сполуки - забрудники. Розкладання забрудників відбувається під дією ферментів, що виробляються мікроорганізмами в середовищі забрудників, які підлягають усуненню. До цих методів слід віднести і фотосинтез. Одним із способів подолання проблеми підвищеного вмісту вуглекислого газу в атмосфері є його поглинання хлорофілсинтезуючими мікроорганізмами. На сьогоднішній день особливої уваги заслуговують мікроводорості. Мікроводорості є одноклітинними, рослиноподібними організмами, абсорбуючими вуглекислий газ, зростання яких зумовлюється процесом фотосинтезу. До них належить така мікроводорість, як хлорела - одноклітинна зелена водорість, має вигляд мікроскопічної нерухомої кульки до 15 мкм у діаметрі. Використання мікроводоростей має ряд суттєвих переваг, завдяки чудовій здатності мікроорганізмів адаптуватися у край несприятливих умовах (високої концентрації та токсичності, складній суміші забруднюючих речовин і т.д.). Хлорела невибаглива до умов

існування і здатна до інтенсивного розмноження, тому зустрічається всюди: у прісних водоймах, морях і ґрунтах. Водорості ростуть у 7-10 разів швидше за наземні рослини і відповідно поглинають більше двоокису вуглецю. Для існування їм потрібен вуглекислий газ, який вони беруть з навколишнього середовища, і за допомогою сонячної енергії вони перетворюють його на біомасу. Нарешті мікроводорості можуть бути збродені в анаеробних умовах у газ метан.

Таким чином, застосування одноклітинної водорості хлорели, дає можливість не тільки здійснювати біологічні процеси очищення газових викидів від вуглекислого газу, але й слугувати сировиною для одержання газу метану.

Мета роботи полягає у вивченні масообмінних процесів, які супроводжують поглинання вуглекислого газу мікроводоростями та біометанізацію утвореної біомаси.

МАТЕРІАЛИ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ.

В основі процесів масообміну клітини із зовнішнім середовищем лежить складний ряд організованих певним чином у часі і просторі біохімічних процесів. В результаті цих процесів змінюються концентрації речовини, кількість окремих клітин, біомаса організмів, можуть змінюватися і інші величини.

Основою сучасної стратегії дослідження і опису біохімічних процесів, ускладнених масоперенесенням, є поетапне вивчення впливу

дифузійних факторів та пошук такого режиму проведення процесу, коли вплив масопереносу є незначний або може бути знехтуваний.

Процес біохімічного поглинання вуглекислого газу мікрородоростями при його барботуванні через водний розчин умовно можна поділити на чотири етапи:

- *перший етап*; підвід CO₂ із основного об'єму розчину до поверхні колоній біомаси мікрородоростей. Кількісно цей процес можна описати рівнянням масовіддачі:

$$dM/dt = \beta F(C - C_n). \quad (1)$$

де β – коефіцієнт масовіддачі від основного об'єму розчину до поверхні колоній мікрородоростей; M – маса CO₂, що перейшла в об'ємі розчину до поверхні мікрородоростей; τ – час; F – площа поверхні масообміну; C , C_n – концентрація CO₂ у розчині і на поверхні колоній мікрородоростей.

- *другий етап*; дифузія CO₂ в міжклітинному просторі до поверхні клітини мікрородорості. Проникнення розчинених в рідкій фазі газоподібних субстратів до поверхні мембрани клітини проходить шляхом молекулярної дифузії з подальшим транспортом через мембрану у внутрішній об'єм клітини. Кількісно процес міжклітинного переносу описується рівнянням:

$$D_m = \varepsilon \cdot D. \quad (2)$$

де ε – коефіцієнт, що визначає пористість колоній мікрородоростей; D_m – коефіцієнт дифузії CO₂ в міжклітинному просторі колоній мікрородоростей; D – коефіцієнт дифузії CO₂ у воді.

- *третій етап*; транспорт CO₂ через клітинну мембрану у внутрішній об'єм клітини мікрородорості. Проникнення вуглекислого газу через клітинну мембрану може здійснюватися, як за рахунок активного, так і пасивного транспорту. У випадку пасивного транспорту процес має дифузійний характер, та представлений формулою:

$$\gamma = -DgradC. \quad (3)$$

де γ – густина об'ємного потоку вуглекислого газу через клітинну мембрану; C – концентрація CO₂ в міжклітинному об'ємі розчину; D – коефіцієнт дифузії CO₂ через клітинну мембрану. Активний транспорт описується рівнянням Міхаеліса-Ментена:

$$U = U_{max} \frac{[S]}{k_m + [S]}. \quad (4)$$

де k_m – константа Міхаеліса-Ментена, що характеризує швидкість ферментативної реакції в залежності від концентрації субстрату у стаціонарному процесі; U_{max} – максимальна швидкість ферментативної реакції; S – концентрація субстрату (CO₂).

- *четвертий етап*; фотосинтез.

Шлях дифузії закінчується в хлоропластах, де CO₂ вступає в реакцію фотосинтезу. Кінетика фотосинтезу описується рівнянням:

$$\frac{dC}{dt} = [C_{CO_2}] \cdot [C_{H_2O}]. \quad (5)$$

де k – константа швидкості хімічної реакції фотосинтезу.

Згідно правила адитивності сумарний коефіцієнт масопереносу K визначається:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\beta} + \frac{l}{D_m} + \frac{\delta}{D_c} + \frac{1}{k}}. \quad (6)$$

де β – коефіцієнт масовіддачі від основного об'єму розчину до поверхні колоній мікрородоростей; l – умовний середній розмір колоній мікрородоростей; δ – товщина мембрани клітини мікрородорості; D_c – коефіцієнт дифузії через клітинну мембрану; k – коефіцієнт швидкості реакції фотосинтезу.

Якщо припустити, що проникнення вуглекислого газу через клітинну мембрану у внутрішній об'єм клітини мікрородорості здійснюється за рахунок активного транспорту, то тоді кінетика процесу може бути описана рівнянням Міхаеліса-Ментена.

$$U = \frac{U_{max} [S]}{k_m + [S]}. \quad (7)$$

Дане рівняння пов'язує швидкість біохімічної реакції з концентрацією субстрату. Ферментативний транспорт вуглекислого газу через клітинну мембрану та біохімічна реакція фотосинтезу супроводжується процесом приросту біомаси. Тому визначивши константу Міхаеліса-Ментена на основі експериментальних даних досліджень динаміки поглинання вуглекислого газу, слід припустити, що вона рівна сумі двох останніх членів знаменника рівняння (6).

Експериментальні дослідження проводились у трьох фотобіореакторах. Перший фотобіореактор – контрольний, де у живильному середовищі містились мікрородорості. У другому фотобіореакторі барботували повітря, а в третьому – вуглекислий газ. При барботуванні вуглекислого газу через водний розчин у фотобіореакторі підвід вуглекислого газу з основного об'єму розчину до поверхні колоній біомаси мікрородоростей є досить інтенсивним. Тому коефіцієнт масовіддачі - β є відносно значною величиною, а оберненим його значенням (див. (6)) можемо знехтувати. Враховуючи пористість колоній мікрородоростей ($\varepsilon=0,4$), можна припустити конвективний масоперенос вуглекислого газу в міжклітинному об'ємі колоній, а відтак другим коефіцієнтом знаменника виразу (6) також нехтуємо. Таким чином, сумарне значення коефіцієнту масопереносу - K пропорційне константі Міхаеліса-Ментена k_m :

$$k_m \sim K.$$

Апаратурне оформлення досліджень забезпечує достатніми кількостями вуглекислого газу мікрободоростям у всьому об'ємі фотобіореактора. Організація перемішування та освітлення за допомогою сонячної енергії сприяє інтенсифікації процесів поглинання вуглекислого газу із повітря, що супроводжувалось зростанням кількості клітин мікрободоростей (біомаси). Система аерації забезпечувала необхідну подачу потрібної кількості вуглекислого газу при можливо мінімальних затратах енергії і створенні сприятливих з точки зору масообміну і гідродинаміки умов роботи фотобіореактора.

Температура середовища культивування становила $23 \pm 1^\circ\text{C}$, при денному освітленні. рН середовища становило 6,5. Відбір біомаси водоростей здійснювали на протязі 55 діб, з встановленим інтервалом п'ять днів.

Визначення концентрації біомаси водоростей проводили фотоколориметричним методом. Використовуючи одержані дані динаміки поглинання вуглекислого газу, отримали кінетичні криві, яка зображена на рисунку 1.

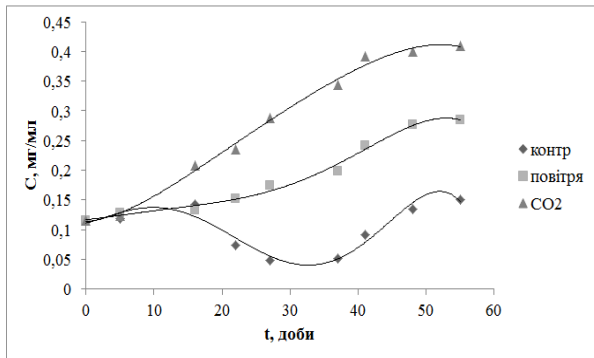
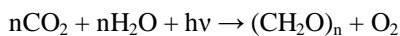


Рисунок 1 – Криві приросту біомаси мікрободоростей

Сумарну реакцію окиснення (тобто аеробного) фотосинтезу можна записати як:



де: hv - енергія сонячного світла, а $(\text{CH}_2\text{O})_n$ узагальнена формула біомаси.

Необмежений у часі експоненційний ріст культури мікрободоростей можливий лише у випадку постійного додавання всіх необхідних для росту компонентів (поживні речовини, аерація, світло, тощо) та видалення продуктів життєдіяльності. Середовище містить обмежену початкову кількість поживних речовин, і мікрободорості ростуть, як правило, доки вміст якогось необхідного їм компонента не досягне критичної величини, після чого ріст сповільнюється. Якщо спостерігати за ростом мікрободоростей в рідкому середовищі, яке добре перемішується, то виявляється, що швидкість росту змінюється в часі. Крива, яка описує залежність числа живих клітин, або густини біомаси мікрободоростей від часу приведена на рисунку 1. Це є типові криві приросту, які мають так звану S-подібну форму і дозволяють виділити чотири фази приросту, які проходять у певній послідовності та виражені більшою або меншою мірою: початкову,

або лаг-фазу, лінійну фазу, стаціонарну фазу, фази осідання культури (рис. 1).

Оскільки в контрольному біореакторі відсутнє барботування, при певній концентрації мікрободоростей у ній відбувається їх асоціація, укрупнення з подальшим осідання і крива, яка описує їх приріст прямує донизу. Залишкова кількість мікрободоростей у розчині продовжує ділитися і крива повертає верх (рис.1). При барботуванні повітря чи вуглекислого газу утворені асоціати мікрободоростей у фотобіореакторі підтримуються у середовищі барботування, тому криві приросту у кожному конкретному випадку напружені верх (рис.1).

Застосовуючи рівняння (7) визначаємо максимальну швидкість приросту мікрободоростей - U_{max} та константу Міхаеліса-Ментена - k_m у трьох фотобіореакторах. У першому – контрольний - $U_{max} = 0,07$ л/добу, $k_m = 3,5 \cdot 10^{-4}$ доба⁻¹; у другий, куди барботували повітря $U_{max} = 0,07$ л/добу, $k_m = 4,2 \cdot 10^{-4}$ доба⁻¹; у третьому, куди барботували CO_2 , $U_{max} = 0,104$ л/добу, $k_m = 4,2 \cdot 10^{-2}$ доби⁻¹ (рис. 2).

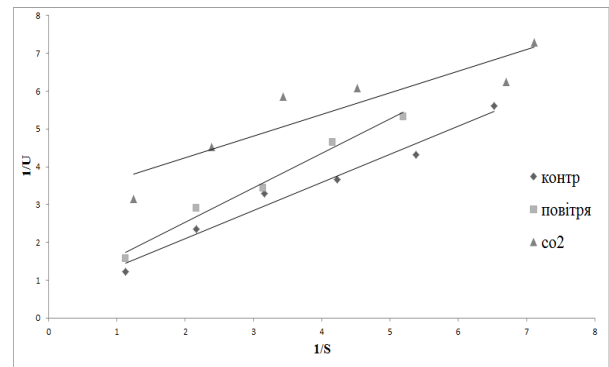


Рисунок 2 – Залежність обернених величин приросту мікрободоростей від концентрації субстрату

Надмірне накопичення біомаси теж не зовсім позитивне явище при проектуванні технологій біологічного очищення, а тому необхідно передбачити і способи переробки отриманої біомаса теж. Одним із перспективних способів переробки біомаси мікрободоростей є метанове бродіння.

Згідно сучасним уявленням анаеробне метанове зброджування включає чотири взаємозалежних стадії:

I) стадія ферментативного гідролізу складних органічних речовин з утворенням більш простих розчинених речовин;

II) стадія кислотоутворення з виділенням коротко ланцюгових летких жирних кислот (ЛЖК), амінокислот, спиртів, а також водню і вуглекислого газу (кислотогенна стадія);

III) ацетогенна стадія перетворення ЛЖК, амінокислот і спиртів в оцтову кислоту, яка дисоціює на аніони ацетату і катіони водню;

IV) метаногенна стадія - утворення метану з оцтової кислоти, а також в результаті реакції відновлення воднем вуглекислого газу.

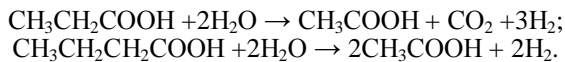
Деякими авторами перші дві стадії об'єднуються в одну і процес розглядається як тристадійний.

В процесі анаеробного зброджування беруть участь п'ять груп бактерій. До групи 1 відносяться

ферментативні бактерії, представлені в основному родами *Bacillus*, *Micrococcus*, *Pseudomonas*, *Clostridium* і т.д., що здійснюють стадію ферментативного гідролізу і кислотоутворення. Майже всі бактерії цієї групи відносяться до швидкозростаючих факультативних анаеробів з оптимумом рН = 6,5-7,6. Бактерії виділяють в середовище біологічні каталізатори - екзоферменти, за участю яких і здійснюються гідроліз. Швидкість гідролізу залежить від природи органічних речовин і умов його проведення: необхідно забезпечити достатню кількість ферментів, створити умови для їх контакту з органічним субстратом, витримувати оптимальні температури і значення рН.

Оскільки подальші стадії анаеробного зброджування не можуть розпочатися, доки не відбудеться гідроліз, загальна швидкість процесу може лімітуватися стадією гідролізу. Стадія кислотоутворення зазвичай не лімітує наступні стадії зброджування, оскільки здійснюють її невибагливі бактерії які ростуть з високою швидкістю. Але інтенсивно протікаючі стадії гідролізу і кислотоутворення (їх загальна тривалість близько 7 год) можуть призвести до накопичення летких кислот і зниження рН, що часто є прямою причиною придушення зростання бактерій задіяних подальших стадій процесу.

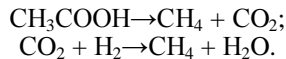
Ацетогенна стадія здійснюється двома групами ацетогенних бактерій. Перша утворює ацетат з виділенням водню з розчинних продуктів попередньої стадії кислотоутворення. Хімічні рівняння утворення оцтової кислоти з пропіонової і масляної кислот:



Друга група ацетогенних бактерій утворює оцтову кислоту шляхом використання водню для відновлення CO_2 (ацетогени, що використовують водень):



На метаногенній стадії метаногенні бактерії утворюють метан двома шляхами - шляхом розщеплення ацетату і відновлення вуглекислоти воднем.



Першим шляхом утворюється 72% метану, другим - 28%.

У процесі можуть брати участь 5 основних груп метанових бактерій, що розрізняються морфологічно: *Methanococcus*, *Methanobacterium*, *Methanospirillum*, *Methanotrix*, *Methanosarcina*.

Таким чином, при метанового зброджування необхідно завжди розглядати не окремі групи бактерій, а всю групу в цілому. Ефективність процесу зброджування в такій групі залежить не тільки від діяльності організмів, що беруть участь у даній реакції, але і від життєдіяльності бактерій, які споживають продукти цієї реакції. Накопичення продуктів обміну однієї зі стадій процесу веде до гальмування інших. Бактерії, що працюють на різних стадіях, мають свої морфологічні і

фізіологічні особливості, що виражається в різних швидкостях росту, чутливості до рН і O_2 .

В даній роботі проводиться дослідження анаеробного бродження біомаси. Принципова технологічна схема процесу метанового бродіння зображена на рисунку 3.

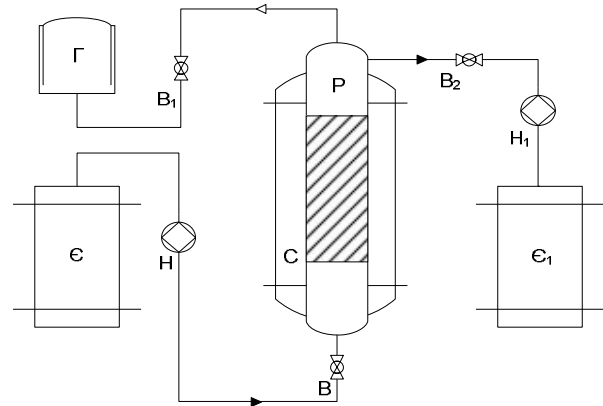


Рисунок 3 – Принципова технологічна схема процесу метанового бродіння біомаси мікрободоростей:

В, В₁, В₂ – запірні кулькові вентилі; Г – газгольдер; Є – ємність для суспензії біомаси; Є₁ – ємність стічної води; Н, Н₁ – перистальтичні насоси; Р – біореактор; С – обігрівальна оболонка

Суспензія мікрободоростей із ємності (Є), за допомогою перистальтичного насоса (Н) подається у нижню частину біореактора (Р). Обігрів реактора здійснюється завдяки грійчій оболонки (С). У процесі біорозкладу утворений біогаз, відкачується у газгольдер (Г). Суспензія знаходиться у замкнутому циклі. Стічна вода відкачується з верхньої частини біореактора за допомогою насоса (Н₁) і збирається у ємності (Є₁). Оптимальний час перебування суспензії у біореакторі становить 5-8 годин в залежності від умов бродження та консистенції субстрату. Робочий об'єм реактора два літри. Температурний режим мезофільний (32-34°C); рН=7,0-7,9; швидкість прокачування суспензії через реактор 9,6 літра на добу. Для біометанізації органічних сполук застосовувалися археї родів: *Methanococcus*, *Methanobacterium*, *Methanospirillum*, *Methanotrix*, *Methanosarcina*. Процес біометанізації здійснювався безперервно протягом двох тижнів (336 годин). В результаті перебігу процесу очищення середня продуктивність реактора по біогазу становила 250-300 см³/добу.

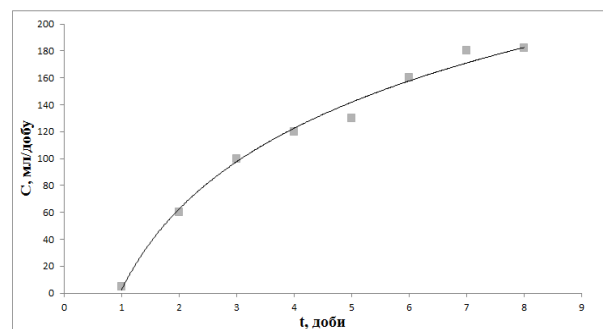


Рисунок 4 – Залежність концентрації метану від часу

ВИСНОВКИ. Вивчені процеси, що супроводжують біохімію приросту біомаси мікрободоростей та їх біометанізацію. Визначені основні кінетичні константи біохімічного перетворення вуглекислого газу у метан, що дозволяє розраховувати обладнання при реалізації процесів у промислових умовах.

ЛІТЕРАТУРА

1. Нетрусов А. И, Бонч-Осмоловская Е. А, Горленко В. М. Экология микроорганизмов: Учебник, для студ. Вузов; Под ред. А.И. Нетрусова. – М.: Издат. центр «Академия», 2004. – 272 с.

2. Davey M.E., O'Toole G.A. Microbial Biofilms: from Ecology to Molecular Genetics // *Microbiology and molecular biology reviews*. – 2000 – V. 64, № 4. – P. 847–867.

3. Теплер Е.З., Шильникова В.К., Переверзева Г.И. Практикум по микробиологии. – М.: Дрофа, 2004. – 256 с.

4. Стеценко О. В., Виноградова Р. П. Біоорганічна хімія: Навч. посібник. – К.: Вища шк., 1992. – 327с.

5. Висоцький С.П., Чернюк А.О. Використання біореакторів для видалення карбонатної кислоти з димових газів // *Вісті Автомобільно-дорожнього інституту ДонНТУ*. – 2009. – № 2(9). – с. 231–234.

6. Pulz O. Photobioreactors: production systems for phototrophic microorganisms // *Appl. Microbiol. Biotechnol.* – 2001. – V. 57. – P. 287–293.

7. Калюжний С.В. Біотехнологія, кінетичні основи мікробіологічних процесів. – М.: Вища шк., 2000. – 296 с.

8. Польовий А.Н. Моделювання дифузійного опору на шляху молекул CO₂ в зелений листок. Одеса: Вісник, 2009. – 300 с.

9. Різниченко Н.Ф. Математичні моделі біологічних процесів. – М.: МГУ, 1996. – 300 с.

10. Семенов В. Г. Производство биодизельного топлива из масла микроводорослей. – <http://www.abercade.ru/research/analysis/2519.html>.

11. Ewers Johannes. Algae: putting carbon dioxide in a bind / Dr. Johannes Ewers, Georg Wiechers // *Power Engineering International*. – 2009. – № 3. – Vol. 17. – P. 58–61.

A STUDY OF MASS TRANSFER WHILE CONVERTING CARBON DIOXIDE TO METHANE WITH BIOLOGICAL METHODS

V. Dyachok, O. Levko

National University "Lviv Polytechnic"

vul. George Square, 2, Lviv, 79000, Ukraine. E-mail: olenka-lev5@mail.ru

Here were shown the results of an experimental study of kinetic growth of microalgae biomass while absorbing carbon dioxide with type chlorine micro algae involved. This given plant has big advantages over the regular embryophyta since the microalgae has higher growth rate which allows faster carbon dioxide to biomass conversion. Thanks to these algae we can use more ecologically pure process of absorbing carbon dioxide with the use of photosynthesis. We've investigated the purification methods of gas emissions with the use of mass exchange. Four stages of microalgae biochemical carbon dioxide absorption processes were offered after sparging it through aqua solutions. The processes that led to absorption and transformation of carbon dioxide to methane with biochemical methods were investigated. Were shown promising methods of gas emission purifications of carbon dioxide. Was offered a technological scheme of biomethanization of microalgae mass.

Key words: carbon dioxide, photosynthesis, biomethanization, microalgae.

REFERENCES

1. Netrusov, A.I., Bonch-Osmolovskaya, E.A. and Gorlenko, V.M. (2004), *Ecologia microorganismiv* [Microorganisms Ecology]: high school textbook, Ed. Netrusova A. I.-: publishing center "Akademia", Moscow, Russia.

2. Davey, M.E. and O'Toole, G.A. (2000), *Microbial Biofilms: from Ecology to Molecular Genetics* // *Microbiology and molecular biology reviews*, V. 64, № 4. - pp. 847-867.

3. Tepper, E.Z., Shilnikov, V.K. and Pereversev, G.I. (2004) *Praktykum po mikrobiologii* [Workshop on microbiology]. - Drofa, Moscow, Russia.

4. Stetsenko, O.V. and Vinogradova, R.P. (1992), *Bioorganichna khimija* [Bioorganic Chemistry]: tutorial, vyhcha shkola, Kyiv, Ukraine.

5. Visotski, S.P. and Cherniuk, A.A. (2009) "The use of bioreactors in carbon dioxide extraction from the flue gas". // *Visnik Donetskogo nationalnogo universytetu*. – no 2(9). – pp. 231–234.

6. Pulz, O. (2001) Photobioreactors: production

systems for phototrophic microorganisms // *Appl. Microbiol. Biotechnol.*—V. 57. — pp. 287–293.

7. Kaliuzhnyi, S.V. (2000), *Biotehnologia, kinetichni osnovy mikrobiologichnyh protsesiv*, [Biotechnology, kinetic basics of microbiological processes], vyshcha shkola, Moscow, Russia.

8. Poliovui, A.N. (2009), "Modeling the diffusion resistance inside of the green leaf on the way of CO₂ molecules". *Odeskyi derjavnii ecoljichnyi universytet*, no 7. - p.300.

9. Ryznuchenko, N.F. (1996), *Matematychni modeli biologichnykh protsesiv*, [Mathematical models of biological processes], Moscow, Russia.

10. Semenov, V.G. (2009), "Manufacturing a biodiesel out of microalgae oil", available at: <http://www.abercade.ru/research/analysis/2519.html> (access December 24, 2013).

11. Ewers Johannes. (2009), Algae: putting carbon dioxide in a bind / Dr. Johannes Ewers, Georg Wiechers // *Power Engineering International*. no 3. – Vol. 17. pp. 58–61.