

В.В. Дячок, О.Б. Левко

Національний університет “Львівська політехніка”,  
кафедра прикладної екології та збалансованого природокористування

## МАСООБМІН В БІОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСАХ

© Дячок В.В., Левко О.Б., 2013

Досліджено процес та визначено кінетичні константи біохімічного очищення газових викидів від CO<sub>2</sub> за участі мікроводоростей – хлорели. Доведено перспективу застосування біохімічних методів очищення газу. Запропоновано технологічну схему біохімічного очищення газу від двоокису вуглецю.

**Ключові слова:** парниковий газ, спосіб очищення, фотосинтез.

The process is researched and the kinetic constants of biochemical purification of gas emission from CO<sub>2</sub> with the involvement of microalgae - chlorella are determined. The perspective of the use of biochemical methods of gas purification is proved. The technological scheme of biological gas purification from carbon dioxide is offered.

**Key words:** greenhouse gas, method of purification, photosynthesis.

**Постановка проблеми.** Проблема забруднення атмосферного повітря виникла у зв'язку з розвитком промислового виробництва. Особливої гостроти вона набула у другій половині ХХ ст. – в період науково-технічної революції, яка характеризується надзвичайно високими темпами росту промислового виробництва, споживання електроенергії та використання моторних транспортних засобів. Вуглекислий газ – це “ковдра” Землі. Він легко пропускає ультрафіолетові промені, які обігривають нашу планету, і відбиває інфрачервоні промені, що випромінюються з її поверхні у космічний простір. І якщо раптом вуглекислий газ зникне з атмосфери, то це передусім позначиться на кліматі. На Землі стане набагато холодніше, дощі будуть випадати дуже рідко.

Правда, така катастрофа нам поки що не загрожує. Скоріше, навіть, навпаки. Спалювання органічних речовин – нафти, вугілля, природного газу, деревини – поступово збільшує вміст вуглекислого газу в атмосфері. Вуглекислий газ в атмосфері Землі станом на 2011 рік представлений у кількості 0,0392 % [8]. Роль вуглекислого газу у життєдіяльності біосфери полягає насамперед у підтримці процесу фотосинтезу, який здійснюється рослинами. Будучи парниковим газом, вуглекислий газ у повітрі впливає на теплообмін планети з навколишнім простором і в такий спосіб бере участь у формуванні клімату планети.

У зв'язку з активним використанням людством викопних енергоносіїв як палива відбувається швидке збільшення концентрації цього газу в атмосфері. Враховуючи небезпечний вплив цього газу, актуальним стає розроблення ефективних методів очищення газових викидів від вуглекислого газу.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У зв'язку із збільшенням вуглекислого газу в атмосфері в кількостях, що перевищують природну здатність до самоочищення, останніми роками особливо актуальною стала проблема розроблення способів очищення газових викидів. Серед відомих методів біологічне очищення має багато істотних переваг завдяки здатності мікроорганізмів адаптуватися у край несприятливих умовах (високій концентрації та токсичності, складній суміші забруднювальних речовин тощо).

Біологічні методи очищення ґрунтуються на здатності мікроорганізмів включати до схеми метаболізму різні хімічні сполуки. Розкладання речовин відбувається під дією ферментів, що виробляються мікроорганізмами у середовищі газів, які очищаються.

До біологічного очищення газових викидів від CO<sub>2</sub> можна зарахувати фотосинтез. Одним із способів подолання проблеми зменшення вмісту вуглекислого газу в атмосфері є його поглинання

хлорофілсинтезуючими мікроорганізмами. Сьогодні на особливу увагу заслуговують мікроводорості. До них належить така мікроводорість, як хлорела – одноклітинна зелена водорість, що має вигляд мікроскопічної нерухомої (без джгутиків) кульки до 15 мкм у діаметрі. Зовні клітини вкриті твердою двоконтурною оболонкою целюлозної природи.

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 і відповідно “вбивають” більше двоокису вуглецю, ніж наземні рослини. Для існування їм потрібен вуглекислий газ, який вони беруть з навколишнього середовища, і за допомогою сонячної енергії перетворюють його на корисні речовини.

Одним із способів зменшення кількості CO<sub>2</sub> є створення так званих “вуличних ліхтарів” – масивних резервуарів, заповнених водою і водоростями, що вдень, під сонячним світлом, активно переробляють CO<sub>2</sub> та інші речовини, причому в колосальних кількостях. Експериментальний зразок “лампи” поглинає до однієї тонни вуглекислого газу за рік. Це у 200 разів більше, ніж за цей самий час поглинає вуглекислий газ одне дерево. Отже, такі “ліхтарі” цілком здатні вирішити проблему переробки надмірної кількості вуглецевих викидів. Погано, що у закритих неосвітлених приміщеннях фотосинтез відбуватися не буде: резервуар із водоростями вимагає штучного освітлення сам, хоча і називається лампою [5].

Отже, застосування одноклітинної водорості хлорели дає можливість не тільки здійснювати біологічні процеси очищення газових викидів від вуглекислого газу, але й продукувати цінний продукт, який є джерелом вітамінів і мікроелементів.

**Мета роботи** – змоделювати процес транспорту вуглекислого газу із повітря у внутрішній об’єм клітини мікроводорості та вивчити кінетику приросту біомаси мікроводоростей під час поглинання CO<sub>2</sub>.

**Теоретична частина.** Основою сучасної стратегії кінетичного дослідження і описання біологічних процесів, ускладнених масоперенесенням, є роздільне кількісне вивчення впливу кінетичних і дифузійних чинників та пошук такого режиму проведення процесу, коли вплив масопереносу незначний або ним можна знехтувати.

Процес біологічного поглинання вуглекислого газу із водного розчину умовно можна поділити на чотири етапи:

– *перший етап: підвід CO<sub>2</sub> із основного об’єму розчину до поверхні біомаси колоній мікроводоростей.*

Кількісно цей процес можна оцінити рівнянням масовіддачі:

$$dM/d\tau = \beta F (C - C_n), \quad (1)$$

де  $\beta$  – коефіцієнт масовіддачі;  $M$  – маса CO<sub>2</sub>, що перейшла з об’єму розчину до поверхні мікроводорості;  $\tau$  – час;  $F$  – площа поверхні масообміну;  $C$ ,  $C_n$  – концентрація CO<sub>2</sub> у розчині і на поверхні колоній мікроводоростей;

– *другий етап: дифузія CO<sub>2</sub> у міжклітинному просторі до поверхні клітини мікроводорості.*

Проникнення розчинених у 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

$$D_m = m D_l, \quad (2)$$

де  $m$  – коефіцієнт, що визначає пористість колоній мікроводоростей;  $D_m$  – коефіцієнт дифузії CO<sub>2</sub> у міжклітинному просторі колоній мікроводоростей;  $D$  – коефіцієнт дифузії CO<sub>2</sub> у воді;

– *третій етап: транспорт CO<sub>2</sub> через клітинну мембрану у внутрішній об’єм клітини мікроводорості.*

Проникнення вуглекислого газу через клітинну мембрану може здійснюватися як за рахунок активного, так і пасивного транспорту. У разі пасивного транспорту процес має дифузійний характер та поданий формулою

$$\gamma = -D \text{ grad } C; \quad (3)$$

де  $\gamma$  – стаціонарний потік;  $C$  – концентрація  $\text{CO}_2$  в об'ємі розчину;  $D$  – коефіцієнт дифузії  $\text{CO}_2$  через клітинну мембрану.

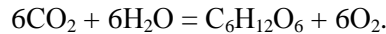
Активний транспорт можна описати рівнянням Міхаеліса–Ментена:

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

де  $k_m$  – константа Міхаеліса–Ментена, що характеризує швидкість ферментативної реакції залежно від концентрації субстрату у стаціонарному процесі;  $U_{\max}$  – максимальна швидкість ферментативної реакції;  $S$  – концентрація субстрату ( $\text{CO}_2$ );

– четвертий етап: фотосинтез.

Шлях дифузії закінчується у хлоропластах, де  $\text{CO}_2$  вступає в реакцію фотосинтезу:



Кінетика фотосинтезу описується таким рівнянням:

$$\frac{dC}{dt} = k[C_{\text{CO}_2}] \cdot [C_{\text{H}_2\text{O}}], \quad (5)$$

де  $k$  – константа швидкості хімічної реакції фотосинтезу. Згідно з рівнянням Арреніуса:

$$k = a \cdot \exp^{E/RT},$$

яке виражає залежність константи швидкості хімічної реакції  $k$  від температури  $T$ ;  $E$  – енергія активації;  $R$  – газова стала.

Згідно з правилом адитивності, сумарний коефіцієнт масопереносу  $K$  визначається так:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{b} + \frac{l}{D_m} + \frac{d}{D_c} + \frac{1}{k_o}}, \quad (6)$$

де  $\beta$  – коефіцієнт масовіддачі від основного об'єму розчину до поверхні колоній мікрободоростей;  $l$  – умовний середній розмір колоній мікрободоростей;  $D_m$  – коефіцієнт дифузії  $\text{CO}_2$  у міжклітинному просторі колоній мікрободоростей;  $d$  – товщина мембрани клітини мікрободорості;  $D_c$  – коефіцієнт дифузії через клітинну мембрану;  $k_o$  – коефіцієнт швидкості реакції фотосинтезу.

В основу процесів обміну клітини з середовищем і внутрішнього метаболізму покладений складний ряд організованих в певний спосіб у часі і просторі реакцій. В результаті цих процесів змінюються концентрації різних речовин, кількість окремих клітин, біомаса організмів, можуть змінюватися й інші величини. Виникає питання, як змінюється чисельність клітин в системі з часом і чи може у ній встановитися стаціонарний стан, коли кількість клітин змінюватися не буде. Це типове завдання, яке виконується за допомогою звичайних диференціальних рівнянь.

Нехай в деякий момент часу  $t$  концентрація клітин в середовищі становить  $N$ . Швидкість  $\frac{dN}{dt}$  зміни концентрації клітин у середовищі складається зі швидкості їх розмноження  $V_{\text{розм.}}$  і швидкості їх загибелі  $V_{\text{загіб.}}$ :

$$\frac{dN}{dt} = V_{\text{розм.}} - V_{\text{загіб.}}. \quad (7)$$

У простому випадку швидкість розмноження, тобто збільшення концентрації клітин на одиницю часу, пропорційна до їх чисельності у кожен момент:

$$V_{\text{розм.}} = k_1 N,$$

де  $k_1$  – константа пропорційності, що залежить від умов середовища (температура, наявність поживних речовин тощо).

Аналогічно

$$V_{\text{загіб.}} = k_2 N,$$

де  $k_2$  – константа пропорційності, що визначає інтенсивність процесів загибелі клітин. Звідси випливає, що

$$\frac{dN}{dt} = k_1 N - k_2 N = kN, \quad (8)$$

де  $k=k_1-k_2$ ;

$$\int_{N_0}^N \frac{dN}{N} = k \int_0^t dt. \quad (9)$$

Розв'язавши рівняння (9), ми зрозуміли, як змінюється концентрація клітин у середовищі  $N=N(t)$ :

$$N = N_0 e^{kt}, \quad (10)$$

де  $N_0$  – концентрація клітин у початковий момент часу  $t=0$ ; спостерігається за системою.

Легко побачити, що залежно від стану констант швидкості процесу загибелі  $k_2$  і розмноження  $k_1$  частка цієї популяції буде різною [15].

Якщо  $k_1 > k_2$ ,  $k > 0$ , то і в системі відбуватиметься безкінечний ріст кількості клітин:

$$N(t) \rightarrow \infty \text{ за } t \rightarrow \infty,$$

якщо  $k_1 < k_2$ , то з часом популяція вимиратиме:

$$N(t) \rightarrow 0 \text{ за } t \rightarrow \infty,$$

і тільки в одному випадку за  $k_1 = k_2$  кількість клітин залишатиметься постійною:

$$N = N_0.$$

Отже, приріст біомаси пропорційний до кількості поглинутого  $\text{CO}_2$ :

$$\frac{dN}{dt} \approx \frac{dM_{\text{CO}_2}}{dt}.$$

Тому коефіцієнт масопереносу  $K$  пропорційний до коефіцієнта приросту  $k$ :

$$k \sim K.$$

**Експериментальна частина.** З метою вивчення кінетики біохімічного очищення газу від  $\text{CO}_2$  була проведена серія експериментальних досліджень. Водорості культивували за температури  $23 \pm 1$  °C на освітленні лампи денного світла. Відбір біомаси водоростей здійснювали упродовж 50 діб на початку досліду (через 2 год після внесення вуглекислого газу), зі встановленим інтервалом у п'ять днів. Початкове та усі наступні визначення концентрації біомаси водоростей проводили фотоколориметричним методом.

Використовуючи одержані дані кінетики біологічного очищення газу від  $\text{CO}_2$ , отримали кінетичну криву, яка зображена на рис. 1.

Отримана експериментальна залежність в логарифмічних координатах  $\ln N = f(t)$  описує рівняння прямої лінії, яке уможливить визначити коефіцієнт  $k = 0.0107$  доба<sup>-1</sup> (рис. 2):

$$\ln N = \ln N_0 + kt.$$

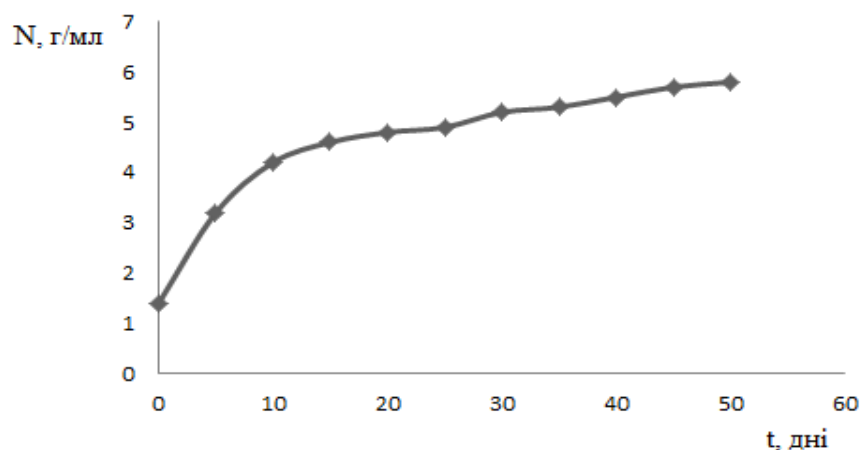


Рис. 1. Кінетична крива приросту біомаси

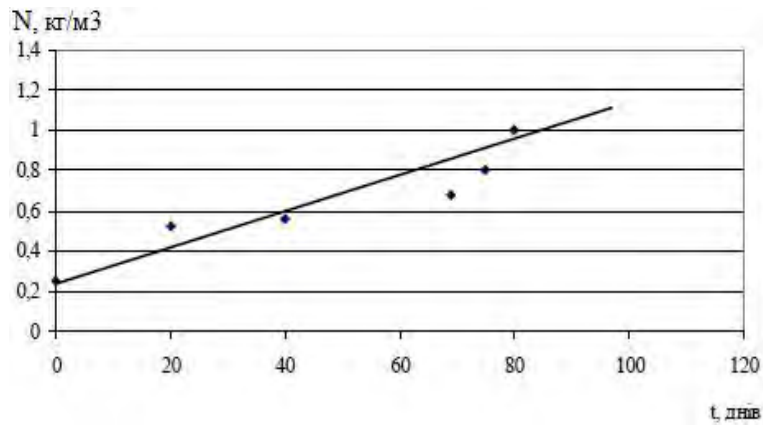


Рис. 2. Логарифмічна залежність приросту біомаси мікробіодоростей від часу

**Висновок.** Вивчено кінетику приросту біомаси водоростей, визначено основні кінетичні константи біохімічного поглинання двоокису вуглецю, що дало змогу розрахувати обладнання під час реалізації процесу у промислових умовах.

1. *Экология микроорганизмов: учеб. для студ. вузов / А.И. Нетрусов, Е.А. Бонч-Осмоловская, В.М. Горленко и др.; под ред. А.И. Нетрусова. – М.: Изд. центр “Академия”, 2004. – 272 с.*
2. *Сухарев С.М., Чундак С.Ю., Сухарева О.Ю. Техноэкология та охорона навколишнього середовища. – Львів: Новий світ-2000, 2004. – 254 с.*
3. *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.*
4. *Теннер Е.З., Шильникова В.К., Переверзева Г.И. Практикум по микробиологии. – М.: Дрофа, 2004. – 256 с.*
5. <http://ubr.ua/uk/tv/technologii/htar-vodorostiah-poglina>.
6. *Запольський А.К., Салюк А.І. Основи екології. – К.: Вища шк., 2001. – 358 с.*
7. *Берлянд М.Е. Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы. – Л.: Гидрометеиздат, 1975. – 448 с.*
8. [http://24tv.ua/news/newsVideo.dovodorosti\\_mozhut\\_vryativati\\_zemlyu\\_vid\\_globalnogo\\_poteplynnya&objectId=61](http://24tv.ua/news/newsVideo.dovodorosti_mozhut_vryativati_zemlyu_vid_globalnogo_poteplynnya&objectId=61).
9. <ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/012/i1199e/i1199e0.pdf>.
10. *Родионов А.И., Кузнецов Ю.П., Соловьев Г.С. Защита биосферы от промышленных выбросов. – М.: Химия; Колос, 2005. – 392 с.*