

ІНГІБІТОРИ ТА АКТИВАТОРИ ПРОЦЕСУ ПОГЛИНАННЯ ВУГЛЕКИСЛОГО ГАЗУ ХЛОРОФІЛСИНТЕЗУЮЧИМИ МІКРОВОДОРОСТЯМИ

Дячок В.В. д. т. н. професор, Катішева В.В. аспірант, Гуглич С.І. к. т. н. доцент,
Мандрик С.Т., магістр
Національний університет «Львівська Політехніка», м. Львів

Анотація. Відходи сучасних виробництв становлять серйозну загрозу для навколишнього середовища, що спонукає до розробки новітніх методів їх утилізації. Вміст вуглекислого газу в атмосфері вже давно є предметом обговорення на політичному рівні держав світу, лідери яких з року в рік шукають шляхи зменшення шкідливих викидів в атмосферу. В цьому випадку застосування біологічних методів є об'єктивною умовою для використання фотосинтетичних властивостей мікроводоростей. Використання мікроводоростей в процесах очищення промислових газових викидів має суттєві переваги завдяки здатності поглинати в десятки разів більшу кількість вуглекислого газу в порівнянні з наземними рослинами та здатності адаптуватися до несприятливих умов: низькі температури середовища та освітленість, лужно-кислотний баланс, вплив інгібіторів і т. д. За рахунок дослідження цих факторів можна отримати більш глибоке розуміння біологічних методів знешкодження забрудників, та процесів що відбуваються у досліджуваних об'єктах.

У продуктах спалювання палива завжди міститься велика кількість оксидів, найбільш небезпечними є діоксид сульфуру та оксиди азоту. Тому вивчення впливу їх на процес фотосинтезу хлорофіл синтезуючими мікроводоростями є важливим. Результати експериментальних досліджень процесу поглинання вуглекислого газу із промислових газових викидів хлорофілсинтезуючими мікроводоростями типу *Chlorella* засвідчують про вплив діоксиду сульфуру та оксидів азоту на динаміку поглинання. Доведено зворотнє неконкурентне інгібування фермент-субстратного комплексу клітини мікроводорості діоксином сульфуру відповідно до теорії Лайнуївера-Берка та активування оксидами нітрогену. Встановлені допустимі значення концентрації інгібітора, діоксиду сульфуру, в процесі поглинання вуглекислого газу хлорофілсинтезуючими мікроводоростями. Визначено константу нестійкості комплексу ферменту та ферментсубстратного комплексу з інгібітором. Встановлено значення оптимальної концентрації оксидів нітрогену, як активатора приросту мікроводоростей типу *Chlorella*.

Ключові слова: вуглекислий газ (CO₂), діоксид сульфуру (SO₂), діоксид нітрогену (NO₂), мікроводорості *Chlorella*, інгібітори, активатори, константа нестійкості.

INHIBITORS AND ACTIVATORS OF THE PROCESS OF ABSORPTION CARBON DIOXIDE BY CHLOROPHYSYNTHESIZING MICROALGAE

Vasil Dyachok, Doctor of Engineering Science, Professor; Viktoriia Katysheva postgraduate.
Serhii Huhlych, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Solomiia Mandryk, master
Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine

Abstract. The waste of modern production poses a serious threat to the environment, which prompts development of modern methods of their utilization. The content of carbon dioxide in the atmosphere has been the subject of discussion at the political level of the states of the world, whose leaders are looking for ways to reduce harmful emissions to the atmosphere from year to year. In this case, the use of biological methods are objective conditions for the use photosynthetic properties of microalgae. The use of microalgae in the process of purifying industrial gas emissions has significant advantages due to the ability to absorb dozens of times more carbon dioxide than terrestrial plants and adapt to adverse conditions: low temperatures and illumination, alkaline-acid balance, the effect of inhibitors, etc. Through the study of these factors can gain a deeper understanding of biological methods of neutralizing pollutants and the processes occurring in the investigated objects.

The products of combustion of fuel always contain a large number of oxides, the most dangerous are sulfur dioxide and nitrogen oxides. Therefore, the study of their influence on the process of photosynthesis by chlorophyllsynthesizing microalgae is important. The results of experimental studies on the process of carbon dioxide absorption from industrial gas emissions by chlorophyllsynthesizing *Chlorella* microalgae demonstrate the influence of sulfur dioxide and nitrogen oxides on the absorption dynamics. The phenomenon of sulfur dioxide inhibition and activation by nitrogen oxides of the process of photosynthesis is established. Reverse non-competitive inhibition of the microalgae cell-enzyme-substrate complex with dioxin sulfur was proved in accordance with the Linouiver-Burke theory and the activation by nitrogen oxides is proved. The permissible values of

the inhibitor concentrations in the process of carbon dioxide absorption by chlorophylls synthesizing microalgae is established. The instability constant of the enzyme complex and the enzyme substrate complex with the inhibitor is determined. The value of optimal concentration of nitrogen dioxide as an activator of the growth of the Chlorella microalgae is established.

Key words: carbon dioxide (CO₂), sulfur dioxide (SO₂), nitrogen dioxide (NO₂), Chlorella microalgae, inhibitors, activators, instability constant.

Постановка проблеми. Нещодавно науковці вперше в світі розробили математичне рівняння для опису впливу людської діяльності на біосферу. Відтак дослідники з Australian National University встановили, що люди провокують зміну клімату в 170 разів швидше за природні чинники [9].

Напрямок в екології, що передбачає використання живих організмів у процесах поглинання забрудників називається біологічним очищенням. Розкладання забрудників відбувається за участі ферментів, що виробляються мікроорганізмами. Прикладом біологічного методу очищення від діоксиду карбону є фотосинтез. Мікродорості, на відміну від наземних рослин поглинають у 7-10 разів більше діоксиду карбону за однаковий проміжок часу та володіють здатністю адаптуватися у край несприятливих умовах. Такі властивості мікродоростей є об'єктивною умовою застосування їх для розроблення біотехнологій очищення промислових газових викидів від діоксиду карбону [4,8].

Найвагоміші чинники, що впливають на процес фотосинтезу мікродоростями є ступінь аерації вуглекислим газом, температура, освітленість, лужно-кислотний баланс, вплив інгібіторів та активаторів реакції фотосинтезу і т. д. За рахунок дослідження цих факторів можна отримати більш глибоке розуміння біологічних процесів, що відбуваються у досліджуваному об'єкті [5]. Джерелом вуглекислого газу є спалювання палива. У продуктах спалювання завжди містяться оксиди сульфуру та азоту. Тому необхідним є вивчення впливу цих компонентів на процес фотосинтезу хлорофілсинтезуючими мікродоростями.

Мета роботи полягає у вивченні впливу оксидів сульфуру та нітрогену на процес поглинання вуглекислого газу хлорофілсинтезуючими мікродоростями типу Chlorella.

Теоретична частина. Основою процесів масообміну клітини із зовнішнім середовищем є послідовність організованих певним чином у часі і просторі біохімічних реакцій, в результаті яких відбувається зміна концентрації речовини, кількості окремих клітин, біомаси мікродоростей тощо.

Перетворення забруднюючих речовин всередині клітини мікродорості відбувається завдяки дії ферментів. Механізм дії ферментів полягає в утворенні з речовиною-субстратом фермент-субстратного комплексу, який і сприяє перебігу біохімічної реакції. [1,2]. Швидкість біохімічних реакцій, яка каталізується ферментами залежить не тільки від природи і концентрації ферменту та субстрату, але й від присутності – інгібіторів і активаторів. Інгібування і активація ферментів і ферментних систем є важливішими засобами регулювання метаболізму і пристосування до умов навколишнього середовища досліджуваних одноклітинних водоростей [2]. Інгібування ферментів діоксидом сульфуру є одним із факторів, що регулює процес біохімічної реакції у клітині. Діоксид сульфуру проникаючи через клітинну мембрану у внутрішнє середовище клітини мікродорості, за механізмом подібним до вуглекислого газу.

Інгібітори, які знижують активність ферментів за умови взаємодії з тими самими функціональними групами активних центрів, що й субстрати є конкурентними. Інгібітори, які знижують активність ферментів за умови взаємодії з іншими функціональними групами - неконкурентні. Конкурентне інгібування можна послабити або зовсім усунути підвищенням концентрації субстрату. На

неконкурентне інгібування концентрація субстрату не впливає. Конкурентне інгібування легше всього виявити, побудувавши графіки Лайнуівера – Берка, тобто графіки в координатах $1/V$ від $1/[S]$ за різних концентрацій інгібітора. Для дійсного конкурентного інгібування - це прямі лінії, що відрізняються між собою тангенсом кута нахилу та перетинають вісь ординат в одній точці (рис. 5 а). Наявність конкурентного інгібітора не змінює максимального значення швидкості реакції $1/V_{max}$. У присутності конкурентного інгібітора уявна величина константи Міхаеліса $1/K_m$ більша, ніж її значення на величину, що дорівнює різниці в довжині відрізків, які відсікаються на осі абсцис.

За графіком Лайнуівера-Берка, побудованого для різних концентрацій інгібітора, можна зробити висновки про те, що неконкурентний інгібітор знижує значення $1/V_{max}$, тоді як величина $1/K_m$ залишається сталою (рис. 5 б) [1].

Швидкість ферментативної реакції також визначається присутністю в середовищі активаторів – речовин, які підвищують швидкість реакції. Активатори не можуть діяти за конкурентним типом, приєднуючись до активного центру ферменту і перешкоджати перетворенню субстрату. Неконкурентна активація зустрічається часто, оскільки такі активатори не впливають на утворення фермент-субстратного комплексу і прискорюють перетворення субстрату в продукт [3,7].

Експериментальна частина. Для дослідження впливу інгібування та активування на процес поглинання вуглекислого газу використовували мікродорості - Chlorella vulgaris. Водорості культивували протягом 12 діб у чотирьох фотобіореакторах об'ємом 1,5 дм³ за умови присутності йонів HSO₃⁻² і NO⁻³ (діоксид сульфуру з водного середовища засвоюється мікродоростями у вигляді йону HSO₃⁻², оксиди

азоту, NO^{-3}). Водорості отримували однакову кількість відповідного спектру світла та вуглекислого газу, який барботується. У всіх фотобіореакторах, рН середовища - 6,5, температура становила $25 \pm 1^\circ\text{C}$. Базове живильне середовище містило рівну кількість інокулянту із культурою мікроводоростей *Chlorella vulgaris*.

У першому фотобіореакторі концентрація HSO_3^{-2} становила 0,0001 мг/мл, у другому – 0,0002 мг/мл, у третьому – 0,001 мг/мл, і т.д. – 0,002 мг/мл ; 0,003 мг/мл ; – 0,004 мг/мл. Відповідно контрольний, який не містив HSO_3^{-2} .

Для дослідження впливу оксидів азоту на приріст хлорофілсинтезуючих мікроводоростей у перший фотобіореактор містив NO^{-3} концентрацією 1,7 мг/м³, другий – 3,4 мг/м³, третій – 8,5 мг/м³, і т. д. – 15,6 мг/м³, – 34 мг/м³, – 68 мг/м³.

Відбір проб з розчину біомаси мікроводоростей здійснювали кожен день та визначали концентрації біомаси мікроводоростей колориметричним методом з використанням синього світлофільтра згідно закону Бугера-Ламберта-Бера. Товщина шару кювети 10 мм. Оскільки оптична густина пропорційна концентрації мікроводоростей, то одержані експериментальні дані накопичення біомаси мікроводоростей в залежності від часу в межах досліджуваних концентрацій (HSO_3^{-2}), (NO^{-3}) відповідають значенням оптичних густин.

При обробці експериментальних даних було отримано графічні залежності, що ілюструють зміну концентрації мікроводоростей в часі за різних значень інгібітора – діоксиду сульфору (рис.1) та активатора - оксиду азоту (рис. 2) відповідно в розчині при одноразовому введенні.

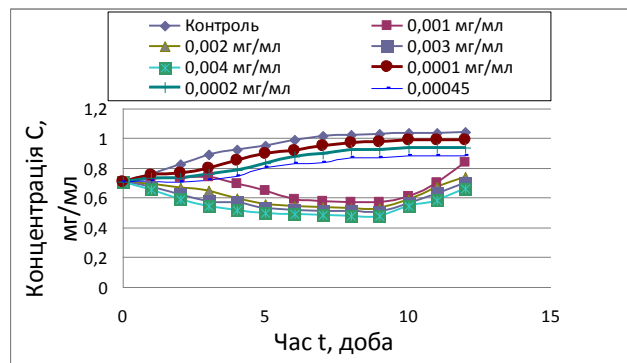


Рис. 1. Графік залежності концентрації мікроводоростей від часу при відповідних значеннях концентрацій інгібітора.

Отримані дані свідчать про те, що при зростанні вмісту концентрації інгібітора приріст біомаси мікроводоростей зменшується у порівнянні з контрольним зразком. У контрольному зразку, натомість,

спостерігається її збільшення. Очевидно діоксид сульфору є інгібітором процесу фотосинтезу.

З (рис. 2.) видно, що збільшення концентрації клітин мікроводоростей суттєво залежить від концентрації NO_3^- в порівнянні з контролем. Так, приріст мікроводоростей в рідкому середовищі, яке добре перемішується, змінюється в часі в залежності від концентрації аніону NO_3^- . Із зростанням концентрації NO_3^- збільшується приріст клітин мікроводоростей, але до певного значення. Як видно на (рис.2.) 6 проба на другий день поводить себе так само як інші, тобто теж пристосовується, з третього дня починається ріст, який навіть на 5 день є вищий ніж у контрольній пробі, проте з шостого дня ми бачимо спад і наступні п'ять днів не спостерігається ні приросту ні відмирання мікроводоростей. Водночас спостерігається збільшення маси клітин мікроводоростей в контрольній ємності, яка не зазнала впливу аніону NO_3^- .

Детальніший аналіз даних на рис.1, рис.2 дозволяє стверджувати, що зміна чисельності клітин мікроводоростей за одиницю часу в умовах експерименту визначається кількістю народжених та відмерлих клітин. Кількісно цей процес можна описати відомим рівнянням [1]:

$$C = C_0 e^{\pm \mu t} \quad (1)$$

де C , C_0 - біжуча та початкова концентрація мікроводоростей;

Дане рівняння в координатах $\ln \frac{C}{C_0} = f(t)$, дозволяє визначати коефіцієнт приросту – μ рис.

3(1) та рис. 3(2) [1]. Коефіцієнт приросту, як слідує з , рис. 3(1) може бути $\mu > 0$ (за сприятливих умов), за умови дії негативного зовнішнього чинника (інгібітору фотосинтезу), може набувати від'ємного значення $\mu < 0$, рис. 3(2), а також бути рівним нулю, $\mu = 0$.

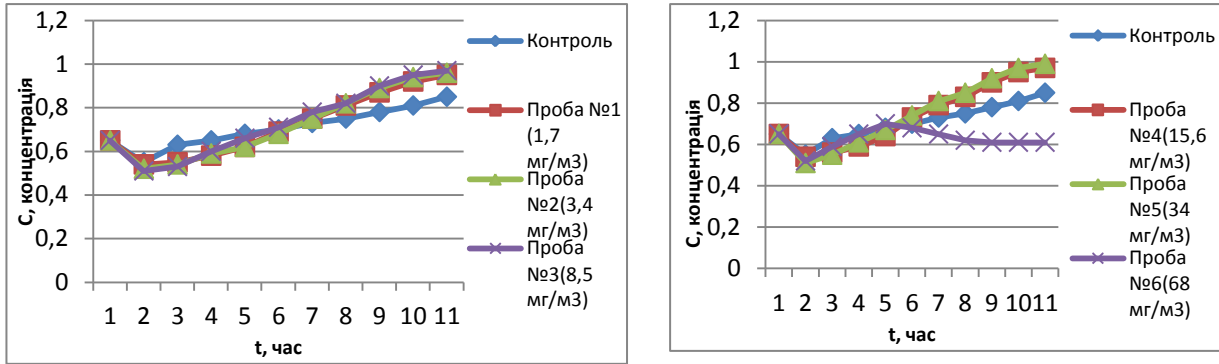


Рис.2. Зміна концентрації клітин мікрободоростей в часі при відповідних значеннях концентрацій активатора.

Аналізуючи експериментальні дані досліджень представлені на рис. 3(1), 3(2) можемо стверджувати, що розв'язок (1) графічно представляється кривими на рис. 3(1), 3(2) та рис. 7. З рис 3(1) видно, що чисельність клітин мікрободоростей зростає з часом і коефіцієнт приросту становить при $C(\text{HSO}_3^{-2})=0$, $\mu = 0,0517 \text{ д}^{-1}$; при $C(\text{HSO}_3^{-2})=0,0001 \text{ мг/мл}$, $\mu = 0,039 \text{ д}^{-1}$; при $C(\text{HSO}_3^{-2})=0,0002 \text{ мг/мл}$, $\mu = 0,0358 \text{ д}^{-1}$ (рис. 3(1)).

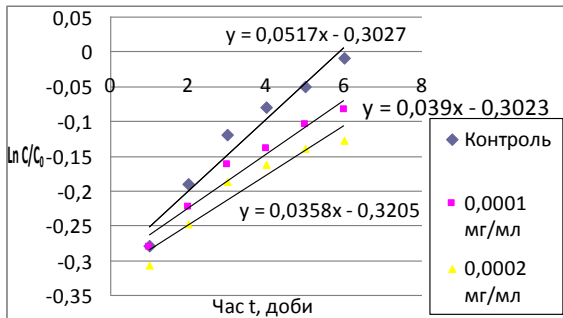


Рис. 3(1). Залежність зміни логарифму концентрації клітин мікрободоростей від часу (при відповідних концентраціях HSO_3^{-2}).

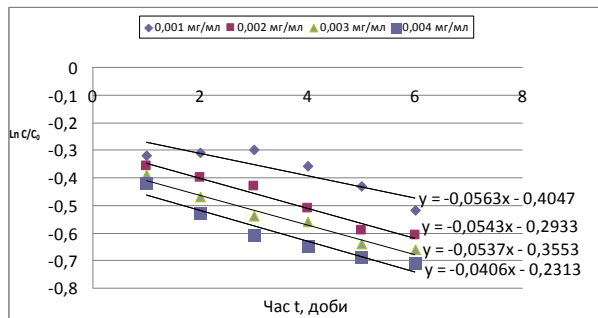


Рис. 3(2). Залежність зміни логарифму концентрації клітин від часу (при відповідних концентраціях HSO_3^{-2}).

При значенні концентрацій HSO_3^{-2} (рис. 3(2)): 0,001 мг/мл; 0,002 мг/мл; 0,003 мг/мл; 0,004 мг/мл, чисельність особин з часом спадає, коефіцієнти приросту є меншими нуля $\mu < 0$. Числові значення цього коефіцієнту: $\mu = -0,0563 \text{ д}^{-1}$; $\mu = -0,0543 \text{ д}^{-1}$; $\mu = -0,0537 \text{ д}^{-1}$; $\mu = -0,0406 \text{ д}^{-1}$ відповідно (рис. 3(2)). Таким чином інгібуючі властивості діоксид сульфуру очевидні.

Порівнюючи літературні дані – графік Лайнуївера-Берка (рис.5(б)) з експериментально отриманими прямими (рис. 4), слід зауважити їх подібність. Тому можна вважати, що отримані результати підтверджують неконкурентне інгібування, той його випадок коли інгібітор приєднується до ферменту не в активному центрі, де зв'язується субстрат, а в іншому місці молекули. Тобто неконкурентний інгібітор знижує активність ферментів, не зачіпаючи його активного центру, не перешкоджаючи утворенню фермент-субстратного комплексу, він зв'язується зворотньо, як з вільним ферментом, так і в фермент-субстратному комплексі, утворюючи неактивні комплекси [2, 6].

Характерним для отриманого графіка (рис. 4) є змінне $1/V_{\max}$ тоді як константа K_M залишається без змін, а це означає, що при будь якій концентрації інгібітора експериментальні криві в координатах Лайнуївера-Берка утворюють прямі, що перетинаються в точці $1/K_M$ відсікаючи відрізки $1/V_{\max}$, що дозволяє визначати значення K_M та $1/V_{\max}$. за концентрацій інгібітора - 0,0001 мг/мл, $K_M = 6,2 \text{ мг/мл}$, а $1/V_{\max} = 24,29 \text{ мг/мл}\cdot\text{добу}$, за концентрації інгібітора - 0,0002 мг/мл, $K_M = 6,2 \text{ мг/мл}$, $1/V_{\max} = 16,54 \text{ мг/мл}\cdot\text{добу}$, для контрольного дослідження визначено $K_M = 6,2 \text{ мг/мл}$, а $1/V_{\max} = 3,44 \text{ мг/мл}\cdot\text{добу}$.

В серії експериментів з визначенням $1/V_{\max}$ за різних концентрацій інгібітора HSO_3^{-2} і постійних концентрацій CO_2 і концентрації фермента, повинна виходити пряма в координатах $1/V_{\max} = f(I)$, рівняння [3].

При концентрації інгібітора $[I] = 0,0001 \text{ мг/мл}$; $[I] = 0,0002 \text{ мг/мл}$, знаходимо константу нестійкості комплексу ферменту за умови неконкурентного інгібування K_1 .

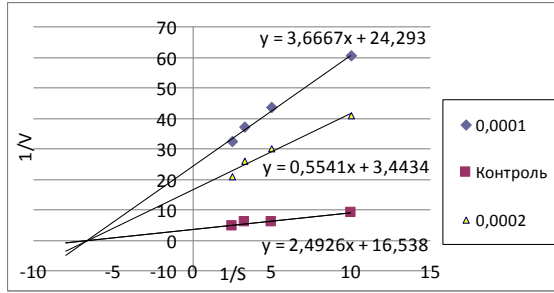


Рис.4 Графік Лайнуївера-Берка для визначення типу інгібування HSO_3^{-2} .

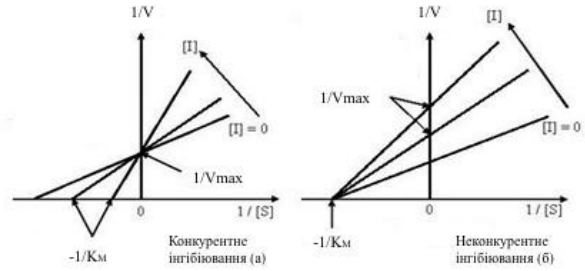


Рис.5. Графік Лайнуївера – Берка для конкурентного (а) та неконкурентного (б) інгібування за літературними даними [3].

Оскільки кожна з прямих на осі ординат відсікає відрізок рівний $1/V_{\max}$, то за допомогою ординат цих точок та певних значень концентрацій інгібітора було побудовано пряму (рис. 6), тангенс кута нахилу якої, дозволив визначити константу нестійкості $K_I=10,425$ мг/мл.

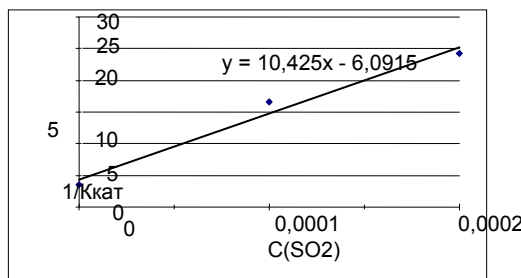


Рис. 6. Графік знаходження константи нестійкості при неконкурентному інгібуванні.

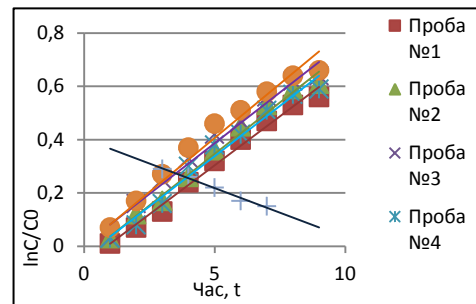


Рис. 7. Залежність зміни логарифму концентрації клітин мікрободоростей від часу (за відповідних концентрацій NO_3^-).

Отримані залежності (рис 7.) дозволяють визначити коефіцієнти приросту μ , які становлять: для контрольної проби $\mu = 0,036$ д⁻¹; при концентрації NO_3^- 1,7 мг/м³ – 0,077 д⁻¹; при концентрації NO_3^- 3,4 мг/м³ – 0,077 с⁻¹; при концентрації NO_3^- 8,5 мг/м³ – 0,076 с⁻¹; при концентрації NO_3^- 15,6 мг/м³, $\mu = 0,075$ д⁻¹; при концентрації NO_3^- 34 мг/м³, $\mu = 0,075$ д⁻¹; при концентрації NO_3^- 68 мг/м³, $\mu = -0,037$ д⁻¹. Оскільки в 1-5 пробах є збільшення приросту біомаси мікрободоростей, то значення коефіцієнта приросту – додатне. У випадку шостої проби, коли концентрація $\text{NO}_3^- = 68$ мг/м³ має місце зменшення приросту мікрободоростей, тому значення коефіцієнта приросту μ – від'ємне.

Математичним формулюванням моделі приросту біомаси мікрободоростей за умови наростання концентрації окисидів азоту є система рівнянь (2):

$$\begin{cases} \frac{dC}{dx} = \mu_1 C - \mu_2 C \\ \frac{dC}{dx} = \mu_1 C; \\ x = 0, C = C_o; \end{cases} \quad (2)$$

де, x – концентрація NO_3^- ; C – концентрація мікрободоростей у суспензії [4].

Використовуючи дані математичної обробки результатів експериментальних досліджень приросту популяції ми знайшли коефіцієнт приросту μ_1 та μ_2 . Після підстановки отриманих значень у розв'язок математичної моделі (2) рівняння (3) розраховуємо оптимальне значення NO_3^- для приросту мікрободоростей типу *Chlorella*.

$$x_{\max} = \frac{\ln \mu_2 - \ln \mu_1}{(\mu_1 + \mu_2)} = \frac{\ln(-0,037) - \ln(0,076)}{(0,076 - 0,037)} = 18,46 \text{ мг/м}^3; \quad (3)$$

Це є та концентрація окислів нітрогену за якої досягається максимальне значення концентрації біомаси мікрободоростей в середовищі культивування.

Висновок. Досліджено фактори впливу на динаміку поглинання вуглекислого газу хлорофіл синтезуючими мікрободоростями типу *Chlorella*: вміст HSO_3^{-2} та NO_3^- . Доведено зворотнє інгібування діоксидом сульфуру процесу поглинання вуглекислого газу хлорофіл синтезуючими мікрободоростями типу *Chlorella* відповідно до теорії Лайнуївера-Берка. Встановлено допустимі значення концентрацій HSO_3^{-2} ,

процесу фотосинтезу мікрободоростями. Визначено константу нестійкості ферментсубстратного комплексу ферменту з інгібітором. Встановлено розрахункове значення оптимальної концентрації NO_3^- для приросту мікрободоростей типу *Chlorella*.

Література.

1. Манаков М. Н. Победимский Д.Г. Теоретические основы технологии микробиологических производств. – М.: Агропромиздат, 1990. – 272 с.
2. Полторак О. М., Чухрай О.С. Физико-химические основы ферментативного катализа / Ред. М.М. Поплавская. – М.: Высшая школа., 1972. – 311 с.
3. Золотарьова О.К., Шнюкова С.І., Сиваш О.О., Михайленко Н.Ф. Перспективи використання мікрободоростей у біотехнології / Під ред. О.К. Золотарьової. – К.: Альтерпрес, 2008. – 234 с.
4. Дячок В. В., Гуглич С.І., Левко О. Б. Вивчення впливу температури на кінетику поглинання вуглекислого газу мікрободоростями // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Хімія, технологія речовин та їх застосування. - 2015. - № 812. - С. 365-372.
5. Dyachok V., Huhlych S., Yatchyshyn, Y., Zaporochets Y., Katysheva V. About the problem of biological processes complicated by mass transfer // Chemistry & chemical technology. - 2017. - Vol. 11, №1. P. 111-116.
6. Stepan D. J., Shockey R. E., Moe T. A., Dorn R. I. 2.3 carbon dioxide sequestration using microalgae systems // Energy and Environmental Research Center, University of North Dakota. - 2002 - N.1. - P.27
7. Глобальне потепління. Як Земля змінює своє обличчя. Спецпроект ТСН.ua. <https://tsn.ua/special-projects/warming/>. – від 25 березня 2017.
8. Min-Kyu Ji, Reda A.I. Abou-Shanabab, Seong-Heon Kim, El-Sayed Salama, Sang-Hun Lee, Akhil N.Kabra, Youn-Suk Lee, Sungwoo Hong, Byong-Hun Jeon. Cultivation of microalgae species in tertiary municipal wastewater supplemented with CO2 for nutrient removal and biomass production // Ecological Engineering, 2013, 58, P. 142-148.
9. Guanyi Chen, Liu Zhao, Yun Qi. Enhancing the productivity of microalgae cultivated in wastewater toward biofuel production: A critical review // Applied Energy, 2015, V.137, P. 282-291.
10. Sheng-Yi Chiu Chien-Ya Kao Tsai-Yu Chen Yu-Bin Chang Chiu-Mei Kuo Chih-Sheng Lin. () Cultivation of microalgal *Chlorella* for biomass and lipid production using wastewater as nutrient resource // Bioresource Technology, 2015, 184, P. 179-189.

References

1. Manakov M. N. Pobedymskiy D.H. (1990) Teoreticheskiye osnovy tekhnolohyy mykrobiolohycheskykh proyvodstv. M.: Ahropromyzzdat., 272.
2. Poltorak O.M., Chukhray O.S. (1972). Fyzyko-khymycheskiye osnovy fermentatyvnoho katalyza / Red. M.M. Poplavskaiia. M.: Vysshiaia shkola., 311.
3. Zolotar'ova O.K., Shnyukova Ye.I., Syvash O.O., Myxajlenko N.F. (2008). Perspektyvy vykorystannya mikrovodorostej u bioteknologiyi. K.: Al'terpres. 234.
4. Dyachok V. V., Huhlych S. I., Levko O.B. (2015). Vyvchennia vplyvu temperatury na kinytyku poglynannya vuglekyslogo gazu mikrovodorostyamy, 812, 365-372.
5. Dyachok V., Huhlych S., Yatchyshyn Y., Zaporochets Y., Katysheva V. (2017) About the problem of biological processes complicated by mass transfer. 11,1, 111-116.
6. Stepan, D. J. Shockey R. E., Moe T. A., Dorn R. I. (2002) 2.3 carbon dioxide sequestration using microalgae systems, 1, 1-27.
7. Hlobalne poteplinnia. Yak Zemlia zminiue svoie oblychchia. Spetsproekt TSN.ua. (2017) <https://tsn.ua/special-projects/warming>. vid 25 bereznia.
8. Min-Kyu Ji, Reda A.I. Abou-Shanabab, Seong-Heon Kim, El-Sayed Salama, Sang-Hun Lee, Akhil N.Kabra, Youn-Suk Lee, Sungwoo Hong, Byong-Hun Jeon. (2013) Cultivation of microalgae species in tertiary municipal wastewater supplemented with CO2 for nutrient removal and biomass production. Ecological Engineering, 58, 142-148.
9. Guanyi Chen, Liu Zhao, Yun Qi. (2015) Enhancing the productivity of microalgae cultivated in wastewater toward biofuel production: A critical review. Applied Energy, 137, 282-291.
10. Sheng-Yi Chiu Chien-Ya Kao Tsai-Yu Chen Yu-Bin Chang Chiu-Mei Kuo Chih-Sheng Lin. (2015) Cultivation of microalgal *Chlorella* for biomass and lipid production using wastewater as nutrient resource. Bioresource Technology, 184, 179-189.

Отримано в редакцію 05.05.2018
Прийнято до друку 25.06.2018

Received 05.05.2018
Approved 25.06.2018

УДК: 544.723

DOI: <http://dx.doi.org/10.15673/swonaft.v82i1.1011>

ВИЛУЧЕННЯ БІЛКІВ ЗІ СТИЧНИХ ВОД ХАРЧОВИХ ВИРОБНИЦТВ ШЛЯХОМ ЗАСТОСУВАННЯ НВЧ ВИПРОМІНЮВАННЯ

Сабадаш В.В. канд. техн. наук, доцент
Гумницький Я.М. д-р техн. наук, професор
Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів

Анотація. В роботі приведено результати досліджень кінетики вилучення білків з модельного середовища, зміни оптичної густини дисперсій білка в результаті дії на досліджувану дисперсію випромінювання надвисокочастотного діапазону. Процес денатурації дисперсій білка, що моделюють стічні води підприємств харчової промисловості, здійснювали під дією НВЧ випромінювання з частотою 2450 Гц. Обробленню піддавали водні дисперсії альбуміну та казеїну з масовою часткою сухих речовин 5% за по-