

**ОДЕСЬКА НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ  
ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ**

**ЗБІРНИК ПРАЦЬ**

*XVII Міжнародної наукової конференції*  
**«УДОСКОНАЛЕННЯ ПРОЦЕСІВ І  
ОБЛАДНАННЯ ХАРЧОВИХ ТА  
ХІМІЧНИХ ВИРОБНИЦТВ»**

*3-8 вересня 2018 р.*



**ОДЕСА  
2018**

Публікуються доповіді, представлені на XVII Міжнародній науковій конференції «Удосконалення процесів і обладнання харчових та хімічних виробництв» (3 – 8 вересня 2018 р.) і присвячені актуальним проблемам підвищення енергоефективності в сфері АПК, харчових та хімічних виробництвах, розробки та впровадження ресурсо-та енергоефективних технологій та обладнання, альтернативних джерел енергії.

Редакційна колегія:

Доктор техн. наук, професор  
Кандидат техн. наук

О.Г. Бурдо  
Ю.О. Левтринська

## МІЖНАРОДНИЙ НАУКОВИЙ ОРГКОМІТЕТ

<b>Єгоров</b> <i>Богдан Вікторович</i>	– голова, Одеська національна академія харчових технологій, ректор, д.т.н., професор
<b>Бурдо</b> <i>Олег Григорович</i>	– вчений секретар, Одеська національна академія харчових технологій, д.т.н., професор
<b>Атаманюк</b> <i>Володимир Михайлович</i>	– Національний університет «Львівська політехніка», д.т.н., професор
<b>Васильєв</b> <i>Леонард Леонідович</i>	– Інститут тепло- і масообміну ім. А.В. Ликова, Республіка Білорусь, д.т.н., професор
<b>Гавва</b> <i>Олександр Миколайович</i>	– Національний університет харчових технологій, д.т.н., професор
<b>Гумницький</b> <i>Ярослав Михайлович</i>	– Національний університет „Львівська політехніка”, д.т.н., професор
<b>Долинський</b> <i>Анатолій Андрійович</i>	– Інститут технічної теплофізики, почесний директор, д.т.н., академік НАН України
<b>Зав’ялов</b> <i>Владимир Леонідович</i>	– Національний університет харчових технологій, д.т.н., професор
<b>Сукманов</b> <i>Валерій Олександрович</i>	– Полтавський університет економіки і торгівлі, д.т.н., професор
<b>Колтун</b> <i>Павло Семенович</i>	– Technident Pty. Ltd., Australia, Dr.
<b>Корнієнко</b> <i>Ярослав Микитович</i>	– Національний технічний університет України „Київський політехнічний інститут”, д.т.н., професор
<b>Малежик</b> <i>Іван Федорович</i>	– Національний університет харчових технологій, д.т.н., професор
<b>Михайлов</b> <i>Валерій Михайлович</i>	– Харківський державний університет харчування та торгівлі, д.т.н., професор
<b>Паламарчук</b> <i>Ігор Павлович</i>	– Національний університет біоресурсів та природокористування України, д.т.н., професор
<b>Снежкін</b> <i>Юрій Федорович</i>	– Інститут технічної теплофізики, директор, д.т.н., академік НАН України
<b>Сорока</b> <i>Петро Гнатович</i>	– Український державний хіміко-технологічний університет, д.т.н., почесний професор
<b>Тасімов</b> <i>Юрій Миколайович</i>	– Віце-президент союзу наукових та інженерних організацій України
<b>Товажнянський</b> <i>Леонід Леонідович</i>	– Національний технічний університет „Харківський політехнічний інститут”, д.т.н., професор, член-кореспондент НАН України
<b>Ткаченко</b> <i>Станіслав Йосифович</i>	– Вінницький національний технічний університет, г. Вінниця, д.т.н., професор
<b>Черевко</b> <i>Олександр Іванович</i>	– Харківський державний університет харчування та торгівлі, ректор, д.т.н., професор
<b>Шит</b> <i>Михайл Львович</i>	– Інститут енергетики Академії Наук Молдови, к.т.н., в.н.с.
<b>Сухий</b> <i>Константин Михайлович</i>	– ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет», д. хім. н., професор

---

**СЕКЦІЯ 1.**

**ТЕОРЕТИЧНІ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ  
ДОСЛІДЖЕННЯ ГІДРАВЛІЧНИХ,  
ТЕПЛОВИХ, МАСООБМІННИХ ПРОЦЕСІВ**

---

Отримані результати дозволяють стверджувати, що при зневодненні рослинних тканин уже в другому періоді їх сушіння відбувається значне зростання енерговитрат через початок видалення води з гідратних оболонок наявних в рослинному соку розчинних речовин.

#### Література

1. Лыков А. В. Теория сушки. – М.: «Энергия», 1968. – 472 с.
2. Зайцев И.Д., Асеев Г.Г. Физико-химические свойства бинарных и многокомпонентных растворов неорганических веществ: справочное издание. – М.: «Химия», 1988. – 416 с.
3. Михайлик В.А. Экспериментальное исследование гидратации сахарозы // Наукові праці Одеської національної академії харчових технологій. – 2006. – Вип.28, т.2. – С. 370-374.
4. Михайлик В.А., Давидова О.О., Манк В.В. Дослідження гідратації D-глюкози та D-фруктози // Проблеми та перспективи створення і впровадження нових ресурсо- та енергоощадних технологій, обладнання в галузях харчової і переробної промисловості : матеріали VI міжнародн. наук.-техн. конф., Київ, 19–21 жовт. 1999 р. : у 3 ч. – К.: «УДУХТ», 2000. – Ч.1. – С. 106.
5. Исаков В.Т. Естественное и искусственное структурирование воды. Сайт o8ode.ru. – Режим доступа: [http://www.o8ode.ru/article/learn/water\\_structure.htm](http://www.o8ode.ru/article/learn/water_structure.htm)
6. Фрэнкс Ф. Вода, лед и растворы простых молекул // Вода в пищевых продуктах; под ред. Р.Б. Докуорта; пер. с англ. – М.: «Пищевая промышленность», 1980. – С. 14-32.
7. Брунауер С. Адсорбция газов и паров. – М.: «Гос. изд-во иностранной литературы», 1948. – 768.
8. Симатос Д., Фоур М., Бонжур И., Коуч М. Применение дифференциального термического анализа и дифференциальной сканирующей калориметрии при изучении воды в пищевых продуктах / Вода в пищевых продуктах. Под ред. Р.Б. Докуорта. – М.: «Пищевая промышленность», 1980. – С. 156-170.
9. Калориметричний пристрій для визначення питомої теплоти випаровування вологи і органічних рідин з матеріалів: пат. 84075 Україна: МПК<sup>8</sup> G01 N25/26, G01 N25/28. № а200613266; заявл. 15.12.06; опубл. 10.09.08.
10. Никитина Л.М. Таблицы равновесного удельного влагосодержания и энергия связи влаги с материалами. – М.-Л.: «Госэнергоиздат», 1963. – 176 с.
11. Сушка древесины: справочник / Составители С. Алюшин и др. – К.: «Тристан», 2004. – 448 с.
12. Згурський А.В., Поліщук Г.Є., Кропивницька І.О. Перерозподіл пектинових речовин в овочевій сировині при виробництві морозива // Харчова промисловість. – 2011. – № 10. – С. 50-55.
13. Химический состав пищевых продуктов : справочные таблицы : в 2 кн. / Под ред. И.М. Скурихина и М.Н. Волгарева. – М.: «Агропромиздат», 1987.
14. Гупало О. П., Тушницький О. П. Хімія деревини : навч. посібник – К.: «Знання», 2008. – 276 с.

УДК 628. 54

## ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ДІОКСИДУ СУЛЬФУРУ ТА НІТРОГЕНУ НА ПРОЦЕС ПОГЛИНАННЯ ВУГЛЕКИСЛОГО ГАЗУ ХЛОРОФІЛСИНТЕЗУЮЧИМИ МІКРОВОДОРОСТЯМИ

Дячок В.В. д. т. н. професор, Катишева В.В. аспірант, Гуглич С.І. к. т. н. доцент,  
Мандрик С.Т., магістр

Національний університет «Львівська Політехніка»

## STUDY OF THE INFLUENCE OF SULFUR AND NITROGEN DIOXIDE TO THE PROCESS OF CARBOHYDRATE GAS ABSORPTION WITH CHLOROPHYSYNTHESIZED 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

*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 мікробіот. Використання мікробіот 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 концентрацій 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 природи мікроводоростей типу *Chlorella*.

**Ключові слова:** вуглекислий газ ( $CO_2$ ), діоксид сульфуру ( $SO_2$ ), діоксид нітрогену ( $NO_2$ ), мікроводорості *Chlorella*, інгібітори, активатори, константа нестійкості.

**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 noncompetitive 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 chlorophyllsyntheszing 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 ( $CO_2$ ), sulfur dioxide ( $SO_2$ ), nitrogen dioxide ( $NO_2$ ), *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. Мікроводорості, 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 мікроводоростей 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 мікроводоростями 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 мікроводоростями.

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

**Теоретична частина.**

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

Перетворення забруднюючих речовин всередині клітини мікроводорості 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 мікроводорості, 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 Лайнувера – 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 Лайнувера-Берка, побудованого для різних концентрацій інгібітора, можна зробити висновок 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 мікроводорості - *Chlorella vulgaris*. Водорості культивували протягом 12 діб у чотирьох фотобіореакторах об'ємом  $1,5 \text{ дм}^3$  за умови присутності йонів  $\text{HSO}_3^{-2}$  і  $\text{NO}^{-3}$  (діоксид сульфуру з водного середовища засвоюється мікроводоростями у вигляді йону  $\text{HSO}_3^{-2}$ , оксиди азоту,  $\text{NO}^{-3}$ ). 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  $\text{HSO}_3^{-2}$  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  $\text{HSO}_3^{-2}$ .

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

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 ( $\text{HSO}_3^{-2}$ ), ( $\text{NO}^{-3}$ ) відповідають значенням оптичних густин.

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

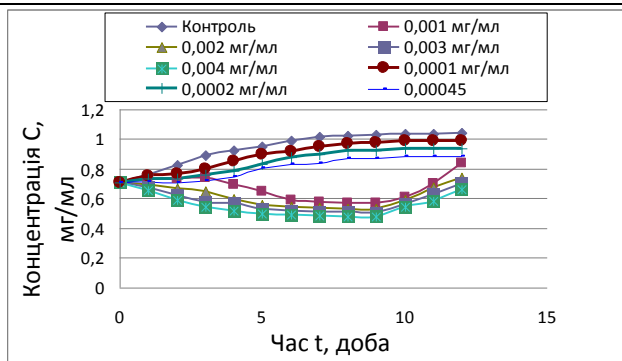


Рис. 1. Графік залежності концентрації мікробіомаси від часу при відповідних значеннях концентрацій інгібітора.

Отримані дані свідчать про те, що при зростанні вмісту концентрації інгібітора приріст біомаси мікробіомаси зменшується у порівнянні з контрольним зразком. У контрольному зразку, натомість, спостерігається її збільшення. Очевидно діоксид сульфуру є інгібітором процесу фотосинтезу.

З (рис. 2.) видно, що збільшення концентрації клітин мікробіомаси суттєво залежить від концентрації  $\text{NO}_3^-$  в порівнянні з контролем. Так, приріст мікробіомаси в рідкому середовищі, яке добре перемішується, змінюється в часі в залежності від концентрації аніону  $\text{NO}_3^-$ . Із зростанням концентрації  $\text{NO}_3^-$  збільшується приріст клітин мікробіомаси, 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 мікробіомаси. Водночас спостерігається збільшення маси клітин мікробіомаси в контрольній ємності, яка не зазнала впливу аніону  $\text{NO}_3^-$ .

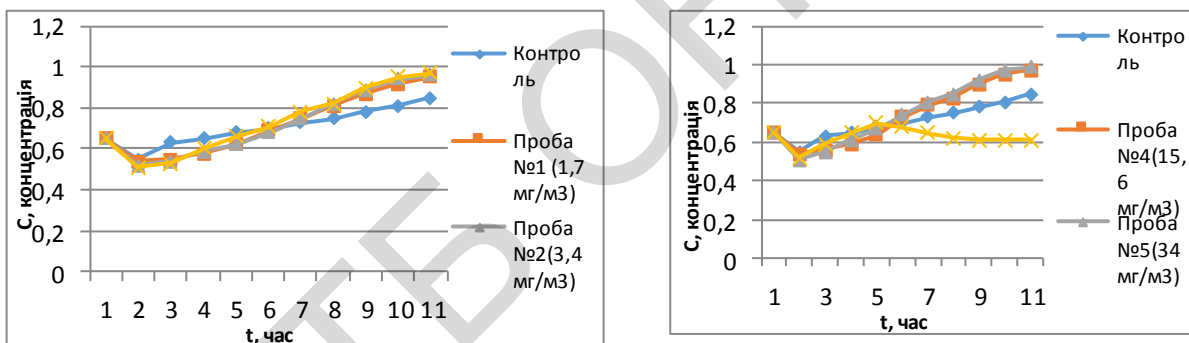


Рис.2 - Зміна концентрації клітин мікробіомаси в часі при відповідних значеннях концентрацій активатора.

Детальніший аналіз даних на рис.1, рис.2 дозволяє стверджувати, що зміна чисельності клітин мікробіомаси 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 мікробіомаси;

Дане рівняння в координатах  $\ln \frac{C}{C_0} = f(t)$ , дозволяє визначити коефіцієнт приросту  $\mu$  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,  $\mu = 0$ .

Аналізуючи експериментальні дані досліджень представлені на рис. 3(1), 3(2) можемо

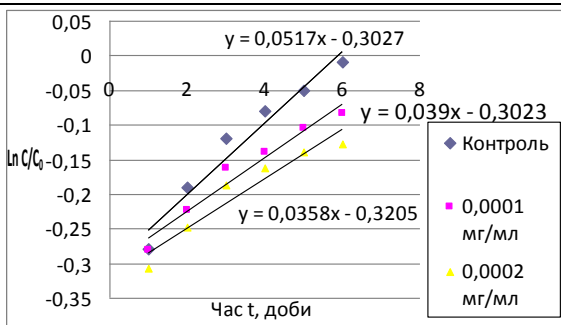


Рис. 3 (1). - Залежність зміни логарифму концентрації клітин мікродоростей від часу (при відповідних концентраціях  $\text{HSO}_3^{-2}$ ).

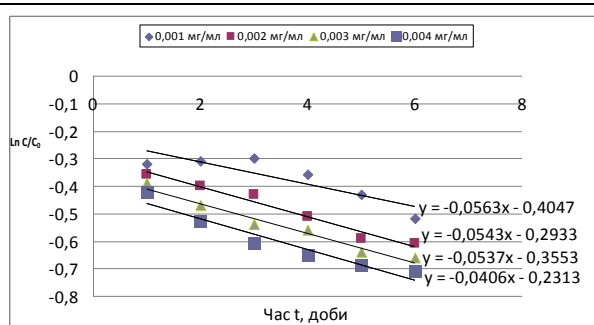


Рис. 3(2). - Залежність зміни логарифму концентрації клітин від часу (при відповідних концентраціях  $\text{HSO}_3^{-2}$ ).

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 мікродоростей 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  $C(\text{HSO}_3^{-2})=0,0002 \text{ мг/мл}$ ,  $\mu = 0,035 \text{ д}^{-1}$  (рис. 3(1)).

При значенні концентрації  $\text{HSO}_3^{-2}$  (рис. 3(2)):  $0,001 \text{ мг/мл}$ ;  $0,002 \text{ мг/мл}$ ;  $0,003 \text{ мг/мл}$ ;  $0,004 \text{ мг/мл}$ , 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 -  $0,0001 \text{ мг/мл}$ ,  $K_M = 6,2 \text{ мг/мл}$ , а  $1/V_{\max} = 24,29 \text{ мг/мл}\cdot\text{добу}$ , за концентрації інгібітора -  $0,0002 \text{ мг/мл}$ ,  $K_M = 6,2 \text{ мг/мл}$ ,  $1/V_{\max} = 16,54 \text{ мг/мл}\cdot\text{добу}$ , для контрольного дослідження визначено  $K_M = 6,2 \text{ мг/мл}$ , а  $1/V_{\max} = 3,44 \text{ мг/мл}\cdot\text{добу}$ .

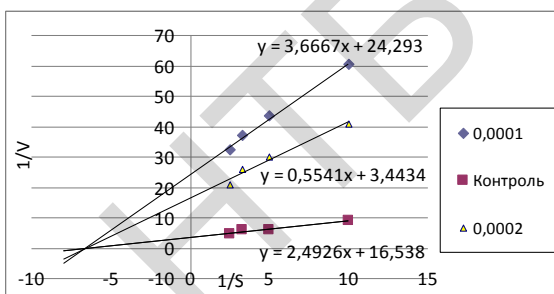


Рис.4 (5)- Графік Лайнуївера-Берка для визначення типу інгібування  $\text{HSO}_3^{-2}$

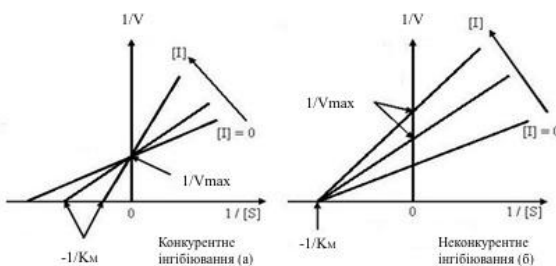


Рис.5( 6) - Графік Лайнуївера – Берка для конкурентного (а) та неконкурентного (б) інгібування за літературними даними [3]

В серії експериментів з визначенням  $1/V_{\max}$  за різних концентрацій інгібітора  $\text{HSO}_3^{-2}$  і постійних концентрацій  $\text{CO}_2$  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  $K_I$ .

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  $K_I=10,425 \text{ мг/мл}$ .

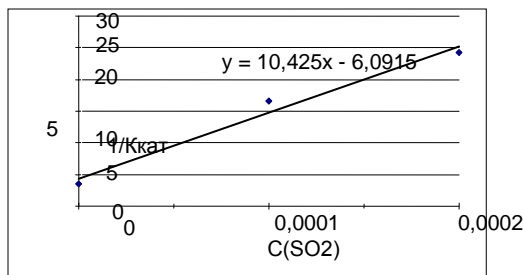


Рис. 6 – Графік знаходження константи нестійкості при неконкурентному інгібуванні

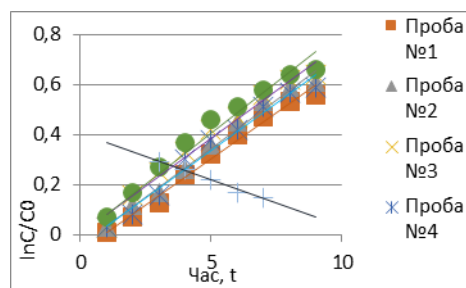


Рис. 7 – Залежність зміни логарифму концентрації клітин мікроводоростей від часу (за відповідних концентрацій  $\text{NO}_3^-$ )

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

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

$$\begin{cases} \frac{dC}{dx} = \mu_1 C - \mu_2 C \\ \frac{dC}{dx} = \mu_1 C; \\ x = 0, C = C_0; \end{cases} \quad (2)$$

де,  $x$  – концентрація  $\text{NO}_3^-$ ;  $C$  – концентрація мікроводоростей у суспензії [4].

Використовуючи дані математичної обробки результатів експериментальних досліджень приросту популяції ми знайшли коефіцієнт приросту  $\mu_1$  та  $\mu_2$ . Після підстановки отриманих значень у розв'язок математичної моделі (2) рівняння (3) розраховуємо оптимальне значення  $\text{NO}_3^-$  для приросту мікроводоростей типу *Chlorella*.

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

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

**Висновок.** Досліджено фактори впливу на динаміку поглинання вуглекислого газу хлорофіл синтезуючими мікроводоростями типу *Chlorella*: вміст  $\text{HSO}_3^-$  та  $\text{NO}_3^-$ . Доведено зворотне інгібування діоксином сульфуру процесу поглинання вуглекислого газу хлорофіл синтезуючими мікроводоростями типу *Chlorella* відповідно до теорії Лайнуївера-Берка. Встановлено допустимі значення концентрацій  $\text{HSO}_3^-$ , процесу фотосинтезу мікроводоростями. Визначено константу нестійкості ферментсубстратного комплексу ферменту з інгібітором. Встановлено розрахункове значення оптимальної концентрації  $\text{NO}_3^-$  для приросту мікроводоростей типу *Chlorella*.

#### Література.

1. Манаков М. Н. Победимский Д.Г. Теоретические основы технологии микробиологических производств. – М.: Агропромиздат, 1990. – 272 с.
2. Полторац О. М., Чухрай О.С. Физико-химические основы ферментативного катализа / Ред. М.М. Поплавская. – М.: Висшая школа., 1972. – 311 с.
3. Золотарьова О.К., Шнюкова Є.І., Сиваш О.О., Михайленко Н.Ф. Перспективи використання мікроводоростей 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 мікроводоростями // 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. (2013) Cultivation of microalgae species in tertiary municipal wastewater supplemented with CO<sub>2</sub> 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.

УДК 628.356.2

## ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ АБСОРБЦІЇ КИСНЮ В РОТОРНО-ПУЛЬСАЦІЙНОМУ АПАРАТІ

Obodovych O. M., Sydorenko V. V.

Institute of Engineering Thermophysics of National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv

## RESEARCH OF THE EFFICIENCY OF OXYGEN ABSORPTION IN ROTOR-PULSATING APPARATUS

Ободович О.М., д-р техн. наук, Сидоренко В.В. канд.техн.наук

Інститут технічної теплофізики НАН України, Київ

*Анотація. В роботі наведено результати досліджень по швидкості розчинення кисню в водних розчинах в установці, що складається з ежекційного вузла та диспергатора-змішувача, що є роторно-пульсаційним апаратом. Принцип енергоощадності обладнання полягає в максимальному використанні енергії, що підводиться, для отримання кінцевого продукту. Обладнанням, що дозволяє інтенсифікувати процеси подрібнення, емульгування, розчинення, перемішування та ін. в рідині є роторно-пульсаційні апарати. Метою роботи була оцінка ефективності використання роторно-пульсаційного апарата в процесі аерації водних розчинів. Основними показниками, що визначали ефективність аерації, були витрата повітря, окислювальна здатність (сульфітне число), поверхневий коефіцієнт масопередачі  $k_L$  та ефективність аерації. Методом, що застосовувався для одержання експериментальних даних, став метод хімічного окиснення киснем повітря сульфїту натрію, що був складовою модельного розчину. Розрахункові параметри були одержані використанням відповідних співвідношень. Представлено схему та принцип роботи установки. Експериментально визначено вплив швидкості обертання ротору на швидкість розчинення кисню. Досліди було проведено за наявності статора та без нього. Наведено порівняльну характеристика умов аерації, сульфїтного числа та ефективності аерації відносно відповідних літературних даних деяких аераційних пристроїв за узагальненим критерієм аерації. Зроблено висновки щодо енергоощадності запропонованого обладнання.*

**Ключові слова:** аерація, окиснення, роторно-пульсаційний апарат, енергоефективність.

**Abstract.** *This work presents the results of research on the oxygen dissolution rate in water solutions in the setup, consisting of jet unit and disperser-mixer which is rotor-pulsed apparatus. The principle of energy-saving equipment is to maximize the use of supplied energy to obtain the final product. Equipment, allow to intensify processes of mixing, emulsifying, dissolving etc. in liquid are rotor-pulsed apparatuses. Aim of the work was to evaluate the efficiency of the rotor-pulsating apparatus in the process of aeration of aqueous solutions. The main parameters that determined the efficiency of aeration were air flow, mass transfer rate (sulfite number), surface mass transfer coefficient  $k_L$  and effectiveness of aeration. The method used to obtain experimental data was the method of chemical oxidation by air's oxygen of sodium sulfide, which was part of the model solution. Calculated parameters were obtained using the corresponding ratios. The scheme and the principle of the setup are presented. Experimentally, the influence of rotor's rotational speed on the oxygen dissolution rate is determined. The experiments were conducted in the presence of stator and without it. A compare of aeration conditions, sulfite number and energy efficient is given in relation to the corresponding literary data of some aeration devices according to the generalized aeration criterion. Conclusions regarding the energy saving of the proposed equipment are made.*

**Key words:** aeration, oxidation, rotor-pulsed apparatus, energy efficiency.

## ЗМІСТ

### ТЕОРЕТИЧНІ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ГІДРАВЛІЧНИХ, ТЕПЛОВИХ, МАСООБМІННИХ ПРОЦЕСІВ

ВПЛИВ МЕТОДИКИ РОЗМІЩЕННЯ СИРОВИННИХ ПОЛІН ПРИ ВИРОБНИЦТВІ ДЕРЕВНОГО ВУГЛЛЯ ПІРОЛІЗНИМ СПОСОБОМ НА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ ПРОЦЕСУ	
<b>Товажнянский Л.Л., Вель В.Є., Миронов А.М.</b> .....	5
ТЕПЛООБМІННИКИ КРІОМОДУЛІВ НА БАГАТОКОМПОНЕНТНИХ СУМІШАХ	
<b>Литвиненко М.П., Туз В.О.</b> .....	10
ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОЦЕСУ СУШІННЯ ФІТОЕСТРОГЕННОЇ СИРОВИНИ	
<b>Петрова Ж.О., Слободянюк К.С.</b> .....	12
ЗВ'ЯЗОК ЯВИЩА ГІДРОДИНАМІЧНОЇ КАВІТАЦІЇ ТА ЗМІНИ ТЕМПЕРАТУРНИХ ПОКАЗНИКІВ ВОДИ	
<b>Авдєєва Л.Ю., Жукотський Е.К., Макаренко А.А.</b> .....	17
КОНВЕКТИВНО-ТЕРМОРАДІАЦІЙНЕ СУШІННЯ ЯБЛУЧНИХ СНЕКІВ ЗА УМОВ РУХУ ПОВІТРЯ	
<b>Малежик І. Ф., Дубковецький І. В., Стрельченко Л. В.</b> .....	20
ДОСЛІДЖЕННЯ КІНЕТИКИ ЕКСТРАГУВАННЯ СІРЧАНОКИСЛОЇ МІДІ ЗА УМОВ ВАКУУМУВАННЯ	
<b>Симак Д.М. Склабінський В.І.</b> .....	24
ВПЛИВ РОЗЧИННИХ РЕЧОВИН НА СТАН ВОДИ В РОСЛИННИХ ТКАНИНАХ ТА КІНЕТИКУ ЇХ СУШІННЯ	
<b>Дмитренко Н.В.</b> .....	30
ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ДІОКСИДУ СУЛЬФУРУ ТА НІТРОГЕНУ НА ПРОЦЕС ПОГЛИНАННЯ ВУГЛЕКИСЛОГО ГАЗУ ХЛОРОФІЛСИНТЕЗУЮЧИМИ МІКРОВОДОРОСТЯМИ	
<b>Дячок В.В., Катишева К.В., Гуглич С.І., Мандрик С.Т.</b> .....	35
ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ АБСОРБЦІЇ КИСНЮ В РОТОРНО-ПУЛЬСАЦІЙНОМУ АПАРАТІ	
<b>Ободович О.М., Сидоренко В.В.</b> .....	41
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОМПОЗИЦИОННОГО СОСТАВА БАКТЕРИАЛЬНОГО ПРЕПАРАТА «БИФАЦИЛ» НА ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССА РАСПЫЛИТЕЛЬНОГО ОБЕЗВОЖИВАНИЯ И КАЧЕСТВЕННЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ КОНЕЧНОГО ПРОДУКТА	
<b>Переяславцева Е.А.</b> .....	44
ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАХИСТУ ОБ'ЄКТІВ ХАРЧОВОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ	
<b>Рябова І.Б., Петухова О.А., Горносталя С.А., Щербак С.М.</b> .....	50
ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ СУШІННЯ СУСПЕНЗОВАНОГО ГРИБА ШИЇТАКЕ В СИСТЕМІ «КРАПЛЯ-ПАРОГАЗОВЕ СЕРЕДОВИЩЕ»	
<b>Шаркова Н.О., Турчина Т.Я., Жукотський Е.К., Костянець Л.О.</b> .....	55
КОНВЕКТИВНЕ ЗНЕВОДНЕННЯ КОРЕНЕПЛОДІВ БАТАТУ ПРИ ВИРОБНИЦТВІ ХАРЧОВИХ ПРОДУКТІВ	
<b>Шапар Р.О., Гусарова О.В.</b> .....	58
ДОСЛІДЖЕННЯ ФІЛЬТРАЦІЙНОГО СУШІННЯ БУРЯКОВОГО ЖОМУ ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА БЮКОРМІВ	
<b>Гнатів З.Я., Мосюк М.І., Дулеба В.П.</b> .....	62
ПРОЦЕС ЕКСТРАГУВАННЯ З ПЛОДІВ ШИПШИНИ У ВАКУУМНОМУ МІКРОХВИЛЬОВОМУ АПАРАТІ	
<b>Левтринська Ю.О., Альхурі Юсеф, Голінська Я.А., Терзієв С.Г.</b> .....	66

### МОДЕЛЮВАННЯ КОМБІНОВАНИХ ПРОЦЕСІВ ПЕРЕНОСУ. ОПТИМІЗАЦІЯ ОБЛАДНАННЯ І СИСТЕМ

ТЕПЛООБМІН ПРИ ПЛАВЛЕННІ ТА КРИСТАЛІЗАЦІЇ ТЕПЛОАКУМУЛЮЮЧИХ МАТЕРІАЛІВ	
<b>Корінчевська Т.В., Снежкін Ю.Ф., Михайлик В.А.</b> .....	73