

**Annotation.** *Modeling the process of heat and mass transfer is executed with the use of program complex the COMSOL Multiphysics 3.5a. As a result of numerical calculation the temperature fields are got in the system a pipe bunch and heat-accumulating material. The dynamics of accumulation process of thermal energy in the investigated object is studied.*

**Key words:** *heat accumulator, accumulating material, heat exchange processes, phase transition.*

УДК 663.18; 621.311.26.031

## **МЕТОДИКА ВИРОЩУВАННЯ МІКРОВОДОРОСТЕЙ У ФОТОРЕАКТОРІ ПРИ УТИЛІЗАЦІЇ ГАЗІВ ТВЕРДООКСИДНИХ ПАЛИВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ**

***Н. В. Бурега, аспірант\****

***Тернопільський національний педагогічний університет***

***імені В. Гнатюка***

***e-mail: rutmik@ukr.net***

**Анотація.** *Розроблено методику вирощування водоростей, запропоновано конструкцію плоского, вертикального фотореактора промислового типу.*

**Ключові слова:** *фотореактор, живильне середовище, вуглекислий газ, мікроводорості, *Chlorella vulgaris*.*

Дедалі більше наукових відкриттів, що здійснюються в нашій країні, зумовлюються необхідністю постійного економічного зростання, яке неминує призводить до збільшення споживання енергоносіїв та негативного глобального антропогенного впливу парникових газів на Земну екосистему. Тому в останніх дослідженнях зосереджено увагу на пошуку нових, дешевих відновлюваних джерел енергії або способів зменшення викидів вуглекислоти.

Одним із найбільш перспективних напрямів енергетики у комплексах генерації теплової та електричної енергії є використання мікробіотехнологій. Оскільки життєвий цикл одноклітинних мікроводоростей супроводжується швидким метаболізмом та фотосинтезом, вони можуть бути використані як фільтр вуглекислоти, так і генератора біопалива.

**Мета досліджень** – аналіз методів лабораторного культивування мікроводоростей та розробка методики їх вирощування з подачею повітря з підвищеним вмістом CO<sub>2</sub> у плоскому фотореакторі.

**Матеріали і методика досліджень.** Дослідження процесу утворення екологічно чистої, високоенергетичної біосировини базується на законах збереження маси, електротехніки, електрохімії та біологічних процесах фотосинтезу.

---

\* Науковий керівник – доктор технічних наук, професор В. С. Федорейко

**Результати досліджень.** Відомі фізико-хімічні методи утилізації діоксиду вуглецю є дорогими та енергозатратними. Саме тому, використання мікроорганізмів нині є одним із найперспективніших і відносно недорогих методів переробки CO<sub>2</sub>, а їх здатність накопичувати у клітинах велику кількість ліпідів (до 80% у перерахунку на суху масу) та можливість деяких штамів подвоювати біомасу кожні 3–4 години, робить мікрководорості перспективними для застосування в енергетиці [1].

Проаналізувавши одноклітинні мікрководорості [3], для проведення досліджень було обрано *Chlorella vulgaris* Beijer – що характеризується відносно простою технологією отримання великих (промислових) кількостей біомаси та стійкістю до високих концентрацій вуглекислоти.

Культивування *Chlorella vulgaris* Beijer проводиться у середовищі Фітцджеральда в модифікації Цендера і Горхема із освітленням протягом 16 годин на добу в умовах накопичувальної культури в люменостаті у скляних колбах (250 мл) за температури +22...+25 °C та освітленні лампами денного світла (інтенсивність 2500 лк).

Вміст діоксиду вуглецю в атмосферному повітрі є невисоким (0,03–0,06 %), що, у свою чергу, обмежує і сповільнює нарощування біомаси водоростей, тому більш перспективним для їх культивування є використання промислових викидів газів, які містять від 3 до 20 % CO<sub>2</sub> від загальної суміші повітря. Деякі види водорості *Chlorella* можуть рости у відносно високих температурних середовищах (до +42 °C) при подачі повітря з концентрацією CO<sub>2</sub> вище за 40 % [2].

На основі отриманих результатів про зміни приросту біомаси від режиму подачі CO<sub>2</sub> авторів Н. Б. Голуб та Д. В. Воєводи можна зробити висновки про те, що подача вуглекислого газу у культиватор із концентрацією 10–15 % дає змогу збільшити кількість та швидкість росту культури в 5–6 раз на добу [1].

Для проведення успішного культивування мікрководоростей в лабораторних дослідках необхідно вирішити ряд проблем, а саме: проблему стерильності приміщення, посуду, поживних середовищ. У лабораторних умовах стерилізація проводиться в автоклавах або сушильних шафах. Розлив живильного середовища, пересівання культур здійснюють у спеціальних боксах, які перед роботою стерилізують 20–30 хв бактерицидними лампами БУВ-40. Посів проводять над полум'ям газового пальника або спиртівки по типу звичайних мікробіологічних посівів. Перед проведенням масового культивування проводиться підготовка інокуляту для засіву середовища, що має велике значення для однорідності посівного матеріалу. Організми вирощують у відносно невеликих за об'ємом колбах (до 5 л) протягом 5–20 днів, залежно від темпу зростання та отримання бажаної концентрації водоростей.

Також існує проблема забруднення посівів іншими мікрководоростями та бактеріями під час культивування. Не менш важливою проблемою є підтримка раціональних умов у реакторах росту, які обладнуються джерелами освітлення – лампами денного світла у спеціальних термостатах-

люміностатах, що дає можливість встановлювати певний режим температури та освітлення [4].

Специфіка вирощування мікроорганізмів для енергетичних комплексів також накладає на технологію ряд вимог: ціна реакційного середовища, мінімізація енергії, необхідної для підтримки раціональних робочих параметрів, неможливість стерилізації реакторів у автоклавах та робота в різноманітних погодних умовах із урахуванням режимів роботи хімічного джерела живлення та палива, яке воно використовує.

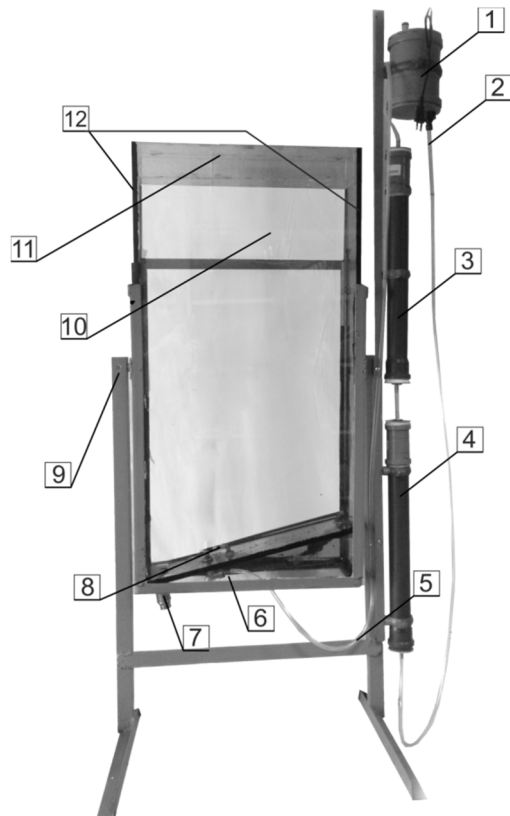
Проаналізувавши ряд промислових варіантів культивування мікроводоростей, відкритих та закритих систем, у лабораторії енергетичного менеджменту було розроблено плоский вертикальний фотореактор (див. рисунок), загальним об'ємом 75 літрів (1000 мм висота, 500 мм ширина та 150 мм глибини), а робочим – 50 літрів. Будова даного культиватора має ряд переваг над іншими системами закритого типу: простота конструкції; велика світлосприймальна частина природного освітлення з можливістю штучної досвідки; можливість терморегуляції та регуляції подачі газів; особливість основи, яка виконана у похилій формі, що сприяє простому збору культури для подальших досліджень, а також відносно великі об'єми середовища культивування у співвідношенні собівартості виготовлення (див. таблицю).

#### Еквівалентне співвідношення матеріалів і ціни для одиниці об'єму

Назва	ККД проп. здат. сонячного світла, %	Діаметр, мм	Довжина, мм	Об'єм, л	Ціна (грн)	1л/грн
Скляна трубка	85	92 мм	3000 мм	80 л	540	6,75
Акрилова	90–92%	200 мм	4000 мм	125 л	4500	36
Акваріум	90%			1л	5	5

Оскільки передбачається, у першу чергу, забезпечувати утилізацію вуглекислоти в перспективних хімічних джерелах струму типу SOFC паливних елементів, немає потреби у фільтруванні вихлопних газів. Проте, існує необхідність фільтрації повітря, для унеможливлення зараження культури бактеріями, іншими водоростями та грибками. Тому, методика проведення культивування у великих масштабах має певні відмінності, а саме: стерилізація робочого об'єму реактора відбувається за допомогою концентрованого розчину NaOH, який розпилюється в робочій області, а згодом змивається великою кількістю дистильованої води.

Цю операцію повторюють тричі, після чого робочу область та відповідні датчики стерилізують за рахунок бактерицидної лампи БУВ-40 протягом двох годин і знову промивають дистильованою водою. У реактор заливають попередньо підготовлене та стерилізоване поживне середовище і накривають зовнішньою кришкою та вмикають аерацію і контроль внутрішньої температури. Завдяки підвищеному тиску унеможливується потрапляння мікроорганізмів у реактор. У момент, коли температура робочої області досягає необхідного параметра, у реактор вводиться інокулят, а установка підключається до хімічного джерела струму.



#### **Плоский, вертикальный фотореактор:**

- 1 – повітряний насос; 2 – трубка подачі суміші до фільтрів; 3 – повітряний фільтр; 4 – водяний фільтр; 5 – трубка подачі очищеної газової суміші до ФТБР; 6 – кран; 7 – отвір для зливу (кран); 8 – аераційна трубка; 9 – залізний корпус із можливістю регулювання кута прийому природного світла; 10 – скляний плоский акваріум; 11 – акрилова кришка; 12 – світлодіодні стрічки

Перед запуском фотореактора, підготовленого за вищерозглянутою методикою, кран 9 ставимо у закрите положення, для того, щоб харчове середовище з водоростями не потрапило у патрубки із газовою сумішшю. Заливши підготовлене заздалегідь середовище з водоростями у скляний акваріум 10, закриваємо його герметично кришкою 11, яка виготовлена з акрилового скла і служить як підставка для рН-метра, термометра, терморегулятора, і в якій передбачено отвір для введення додаткового поживного середовища та системи отворів відведення газів. Суміш необхідних газів подається через отвір у резервуар 1 із насосами, які, у свою чергу, нагнітають повітря через патрубок 2 у водяний фільтр з метою грубою очистки, після чого гази потрапляють у повітряний фільтр 3. Після 5 хвилин роботи насосів плавно повертаємо кран 9 і подаємо суміш газів у середовище культивування через закріплену на дні аераційну трубку, яка подрібнює бульбашки газу, що, у свою чергу, покращує газомасообмін і не пошкоджує культуру.

На основі даних рівня рН (5,5–7) регулюємо подачу вуглекислого газу у середовище культивування, підтримуємо температуру середовища за рахунок терморегулятора та здійснюємо досвітку LED стрічками необхідного спектра.

Кріплення та корпус фотореактора виконано з передбаченням можливості зміни кута нахилу світосприймальної частини до сонця, що дасть можливість захоплювати більше світлової та теплової енергії.

На даному етапі проводяться роботи над автоматизацією процесів подачі та регулювання суміші газів, підбору спектра освітлення на базі світлодіодних стрічок та можливості їх використання разом із природним освітленням.

### Висновки

1. Проаналізовано методику стерилізації обладнання перед початком закладання культури у середовище фотореактора, методику вирощування водоростей та відношення CO<sub>2</sub> до суміші аераційних газів під час культивування водоростей.

2. Обґрунтовано вибір мікроводорості *Chlorella vulgaris* Beijer, для проведення подальших досліджень, і розглянуто середовище Фітцджеральда в модифікації Цендера і Горхема №11 як подальшого культивування.

3. З метою проведення досліджень утилізації CO<sub>2</sub> розроблено плоский, вертикальний фотореактор із робочим об'ємом у 50 літрів та запропоновано власну методику стерилізації біореактора для генерації біосировини.

### Список літератури

1. Голуб Н. Б. Використання водоростей для одержання енергоносіїв (утилізація CO<sub>2</sub>) / Н. Б. Голуб, Д. В. Воєвода // ІТЕ. – 2012. – № 4. – С. 18–21.

2. Senthil Chinnasamy. Biomass production potential of a wastewater algal *Chlorella vulgaris* ARC 1 under elevated levels of CO<sub>2</sub> and temperature S. Chinnasamy, B. Ramakrishnan, A. Bhatnagar, K. C. Das // International journal of molecular sciences. – 2009. – № 10. – P. 518–532. – ISBN 1422-0067.

3. Пальчик А. О. Утилізація діоксиду вуглецю шляхом промислового вирощування мікроводоростей в енергосистемі на базі паливного елемента [Електронний журнал] / А. О. Пальчик, О. М. Фендьо, Н. В. Бурега // Енергетика і автоматика, 2014. – № 4 (22). – Стаття № 9. – 80 с.

4. Сиренко Л. А. Методы физиолого-биохимического исследования водорослей в гидробиологической практике / Л. А. Сиренко, А. И. Сакевич, Л. Ф. Осипов. [и др.]. – К. : Наук. думка, 1975. – 247 с.

## МЕТОДИКА ВИРАЩИВАННЯ МИКРОВОДОРОСЛЕЙ В ФОТОРЕАКТОРЕ ПРИ УТИЛІЗАЦІИ ГАЗОВ ТВЕРДООКСИДНИХ ТОПЛИВНИХ ЕЛЕМЕНТОВ

*Н. В. Бурега*

**Аннотация.** *Разработана методика выращивания водорослей, предложена конструкция плоского, вертикального фотореактора промышленного типа.*

**Ключевые слова:** *фотореактор, питательная среда, углекислый газ, микроводоросль, Chlorella vulgaris.*

## METHOD OF GROWING MICROALGAE IN EDITOR UTILIZATION OF GASES OF SOLID OXIDE FUEL CELLS

*N. Burega*

**Abstract.** *The analysis of the training environment and the cultivation of algae cultivation methods proposed design of a flat, vertical fotobioreaktor of industrial type.*

**Key words:** *fotoreaktor, culture medium, carbon dioxide, microalgae, Chlorella vulgaris.*

УДК 535.3

## ДИЕЛЕКТРИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ МАТРИЧНИХ ДИСПЕРСНИХ СИСТЕМ ІЗ ДВОШАРОВИМИ ВКЛЮЧЕННЯМИ В НАБЛИЖЕННІ МАКСВЕЛЛ-ГАРНЕТТА

*С. В. Шостак, кандидат фізико-математичних наук  
e-mail: nni.elektrik@gmail.com*

**Анотація.** *Розраховано діелектричні втрати в матричних дисперсних системах із двошаровими кульовими включеннями. У наближенні Максвелл-Гарнетта проведено детальний аналіз залежностей ефективної діелектричної проникності як від частоти зовнішнього поля, так і від параметрів системи.*

**Ключові слова:** *діелектричні втрати, матричні дисперсні системи, ефективна діелектрична проникність.*

Дослідженню діелектричних втрат (ДВ) у матричних дисперсних системах (МДС) присвячена значна кількість робіт [1–8]. У деяких із цих робіт досліджено частотні залежності дійсної та уявної частини ефективної діелектричної проникності таких систем залежно від їх фізико-хімічних параметрів, причому в основному вивчалися (МДС) із діелектричною матрицею з включеннями різної форми та природи.

Основною задачею щодо знаходження ДВ у МДС є розрахунок частотної залежності уявної частини ефективної діелектричної проникності  $\text{Im}\tilde{\varepsilon}(\omega)$  у таких системах з урахуванням їх складу і структури та подальше обчислення величини ДВ за формулою:

$$W = \frac{1}{4\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \omega \left[ \tilde{\varepsilon}''(\omega) |\mathbf{E}_{\omega}|^2 + \tilde{\mu}''(\omega) |\mathbf{H}_{\omega}|^2 \right] d\omega, \quad (1)$$

де  $\mathbf{E}_{\omega}$  і  $\mathbf{H}_{\omega}$  – Фур'є компоненти зовнішніх полів  $\mathbf{E}(r,t)$  і  $\mathbf{H}(r,t)$ ;  $\tilde{\varepsilon}''$  і  $\tilde{\mu}''$  – відповідно, уявні частини ефективних діелектричної та магнітної проникності МДС.