

УДК 663.18; 621.311.26.031

**УТИЛІЗАЦІЯ ДІОКСИДУ ВУГЛЕЦЮ ШЛЯХОМ ПРОМИСЛОВОГО  
ВИРОЩУВАННЯ МІКРОВОДОРОСТЕЙ  
В ЕНЕРГОСИСТЕМІ НА БАЗІ ПАЛИВНОГО ЕЛЕМЕНТУ**

*А.О. Пальчик, кандидат технічних наук*

*Н.В. Бурега, аспірант*

*О.М. Фендьо, кандидат технічних наук*

*Тернопільський національний педагогічний університет  
імені Володимира Гнатюка*

*Запропонована структурна схема енергетичної системи на основі фотоанаеробних біотехнологій та твердооксидного паливного елемента.*

*Біотехнології, фотобіореактор, мікрородорості, система, твердооксидний паливний елемент.*

Паливно-енергетичні ресурси з кожним роком стають дорожчими як для промисловості, так і для населення. Життєвий рівень людства диктує доцільність нарощування потужностей енергетики надзвичайно швидкими темпами, а екологічні проблеми, спричинені втручанням техногенезу та надмірною емісією надр планети, змушують більш економічно і раціонально використовувати отриману енергію. Необхідність генерування великої кількості електричної, теплової або механічної енергії в різноманітних енергетичних системах супроводжується надмірною кількістю викидів діоксиду вуглецю, який порушує речовинно-енергетичний баланс планети.

Головним каталізатором нових глобальних тенденцій на ринку енергетики та екології, який в даний момент досягає рівня загрози, виступають альтернативні види палива, значна частина яких, спрямована на зменшення викидів парникових

газів, шляхом створення автономних енергетичних комплексів на базі поновлювальних джерел енергії.

Перспективним напрямком, який на сьогодні розвивається, є використання мікроорганізмів в енергетичних комплексах для генерації біогазу, біодизелю та водню. Життєвий цикл мікроорганізмів супроводжується процесом фотосинтезу, що дозволяє поглинати діоксид вуглецю та генерувати кисень.

**Мета досліджень** – аналіз методів утилізації діоксиду вуглецю із атмосфери і димових газів та обґрунтування способу промислового вирощування мікробіодоростей в енергосистемі на базі твердооксидного паливного елемента.

**Матеріали і методика досліджень.** Дослідження процесу екологічно чистого енергозабезпечення базується на законах збереження маси, електротехніки, електрохімії та біологічних процесах фотосинтезу.

**Результати досліджень.** Початок третього тисячоліття співпадає з двома головними кризами для людства: екологічною та енергетичною. Масове та нерациональне використання консервованих видів енергії веде до невинного зменшення кількості їх запасів, а втручання техногенезу – сприяє виділенню надмірної кількості викидів діоксиду вуглецю, який порушує екологічний стан планети. Вирішення даних проблем, сконцентровує все більш значний науковий та виробничий потенціал розвинених країн світу.

Проаналізувавши досвід утилізації діоксиду вуглецю шляхом абсорбції-десорбції водним розчином аміну та вилучення  $\text{CO}_2$  із димових газів, а також шляхом гетерогенних 15 каталітичних реакцій вуглекислоти з аміаком ( $\text{NH}_3$ ) [1], зробили висновки: по-перше, це складні і небезпечні процеси, через використання хімічні сполуки (вторинні і третинні аміни або ж аміак), а по-друге – складність та довго тривалість процесу.

Значно простіший та перспективніший напрямок – вдосконалений метод переробки вуглекислого газу шляхом подачі рідкого діоксиду вуглецю на глибину 450 м у зону з вмістом сірководню ( $\text{H}_2\text{S}$ ) не менш 1,5 мг/л, а далі у ґрунт на глибину 1-3 м [2]. Це значно ефективніший і надійніший метод

депонування діоксиду вуглецю у вигляді його гідратів, який збереже кислотний баланс морської води, підвищить вміст планктону та унеможливить надходження діоксиду вуглецю з моря в атмосферу. Така переробка є екологічно чистою та не має негативної дії на екологічний ланцюг, проте має високу собівартість та енергетичні затрати. Утворений планктон, який може служити джерелом біосировини, залишиться на дні водойми, що відповідно не повністю вирішує поставлене завдання.

Одним із новітніх методів у біоенергетичній сфері є використання водоростей (табл.1.) [3], які здатні зв'язувати вуглець і азот в аеробних умовах, виділяючи при цьому чистий кисень, а можливість накопичувати у клітинах велику кількість ліпідів (до 80% у перерахунку на суху масу) та подвоєння біомаси кожні 40 годин, – робить мікроводорості перспективними для застосування їх у енергетиці та інших галузях народного господарства.

**Таблиця 1 – Відносна швидкість росту біомаси мікроорганізмів**

Вид	Відносна швидкість росту, мг/дм <sup>3</sup>					
	Період культивування, доба					
	10	20	30	40	50	60
<i>Nostoc sp.</i>	2,62±0,08	1,26±0,04	0,41 ±0,01	0,22±0,13	0,11±0,08	0,06±0,02
<i>Nostoc linckia</i>	3,41±0,10	2,74±0,08	0,36±0,10	0,27±0,08	0,14±0,10	0,05±0,03
<i>Anabaena flos-aquae</i>	8,25±1,31	3,39±0,22	1,46±0,41	0,91 ±0,35	0,49±0,12	0,14±0,08
<i>Lyngbya limnetica</i>	5,63±1,02	1,28±0,10	0,29±0,12	0,20±0,14	0,09±0,03	0,06*0,023
<i>Chlorella vulgaris</i>	2,71±0,32	1,22±0,65	0,38±0,28	0,23±0,18	0,11±0,09	0,08±0,04
<i>Selenastrum gracile</i>	5,35±0,47	3,02±0,33	1,83±0,31	0,47±0,14	0,28±0,03	0,10±0,02
<i>Ankistrodesmus braunii</i>	10,97±0,52	4,30±0,44	1,63±0,20	0,48±0,02	0,41±0,08	0,19±0,01
<i>Dunaliella salina</i>	5,09±0,86	2,40±0,12	1,18±0,33	0,71 ±0,52	0,26±0,22	0,13±0,01

Одна тонна фотопланктону при своєму зростанні поглинає 1,6 тонн CO<sub>2</sub>, генеруючи при цьому 1,2 тонни кисню.

Експерименти з масового вирощування мікроорганізмів проводяться з початку 50-х років і, за тривалий час, було досягнуто значного прогресу як в технології їх масового культивування (відкриті та закриті системи), так і в

спектрі їхнього застосування (рослинництво, тваринництво, медицині, промисловості та енергетиці).

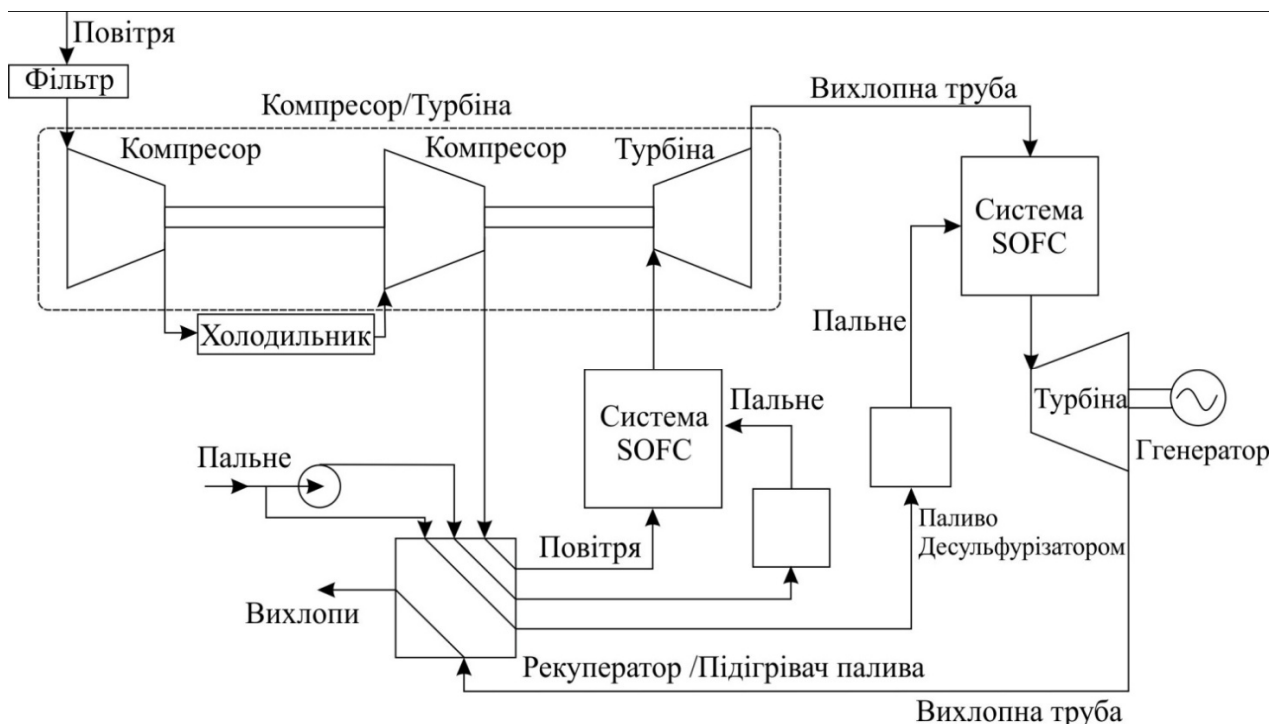
Сьогодні, світові компанії Algenol Biofuels, Dow Chemical, Global Green Solutions, GreenFuel Technologies та інші, вкладають значні кошти для вдосконалення технологій масового вирощування як в спеціальних установках (фотобіореакторах), так і в природних водоймах.

Недоліком широкомасштабного культивування є необхідність забезпечення «свіжими» вихлопами і димом, що обмежує область застосування способу, тому що пристрої для його реалізації повинні розташовуватися в безпосередній близькості від джерел забруднення. Дану «проблему» було вирішено у 2010 році, коли Algenol Biofuels разом із компанією Dow Chemical почали будівництво експериментального заводу площею у 24 акри в Техасі, який буде споживати близько 1,8 тонни CO<sub>2</sub> на добу від промислових підприємств і виробляти 100 000 галонів етанолу на рік. Слід зазначити, що подібні схеми розроблені й з успіхом застосовуються в Росії. Система «Біосоляр», московської теплової електроцентралі, являє собою комплекс з культивації мікроводоростей, з яких виділяються харчові й кормові добавки або ж елементи для наповнення метанників. Для культивації мікроводоростей необхідний CO<sub>2</sub>, який подається до них після очищення в результаті спалювання біогазу в котлах ТЕС. [4].

Сьогодні, в напрямку модернізації старих ТЕС, що мають низький ККД і рекордний за кількістю викидів діоксиду вуглецю в атмосферу, розробляється ціла низка новітніх технологій, однією із яких є використання твердооксидних паливних елементів (SOFC – Solid Oxid Fuell Cell). Особливість в тому, що вони можуть в один технологічний етап перетворювати хімічне паливо (H<sub>2</sub> та CH<sub>4</sub>) на електричний струм із надзвичайно високим ККД, який сягає близько 70%. Використання паливних елементів та біотехнологій – один із шляхів зменшення викидів вуглекислоти в атмосферу, який зможе підвищити енергоефективність генерації електричної енергії та дозволить побудувати

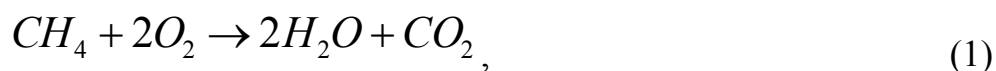
самодостатню систему автономного енергопостачання об'єктів господарювання із нульовим викидом парникових газів.

У SOFC-технологіях електрохімічних генераторів, в якості електроліту, використовується твердий керамічний матеріал (стабілізований ітрієм оксид цирконію), який проводить атоми кисню від катода до анода при температурі понад 1000 °С [5]. Високі температури стеку дозволяють використовувати забруднені види палива: біогаз, газ, утворені при піролізі або газифікації вугілля (рис. 1.) [6]. Енергетичний ККД стеків становить понад 70 %



**Рис. 1. Структурна схема енергосистеми на основі твердооксидного паливного елемента (SOFC) та біогазу, в якості палива**

Напруга в паливному елементі залежить від потенціалу Нернста поляризації катода, аноду та внутрішнього опору електроліту. Під час використання метану в якості палива, рівняння матимуть вигляд:



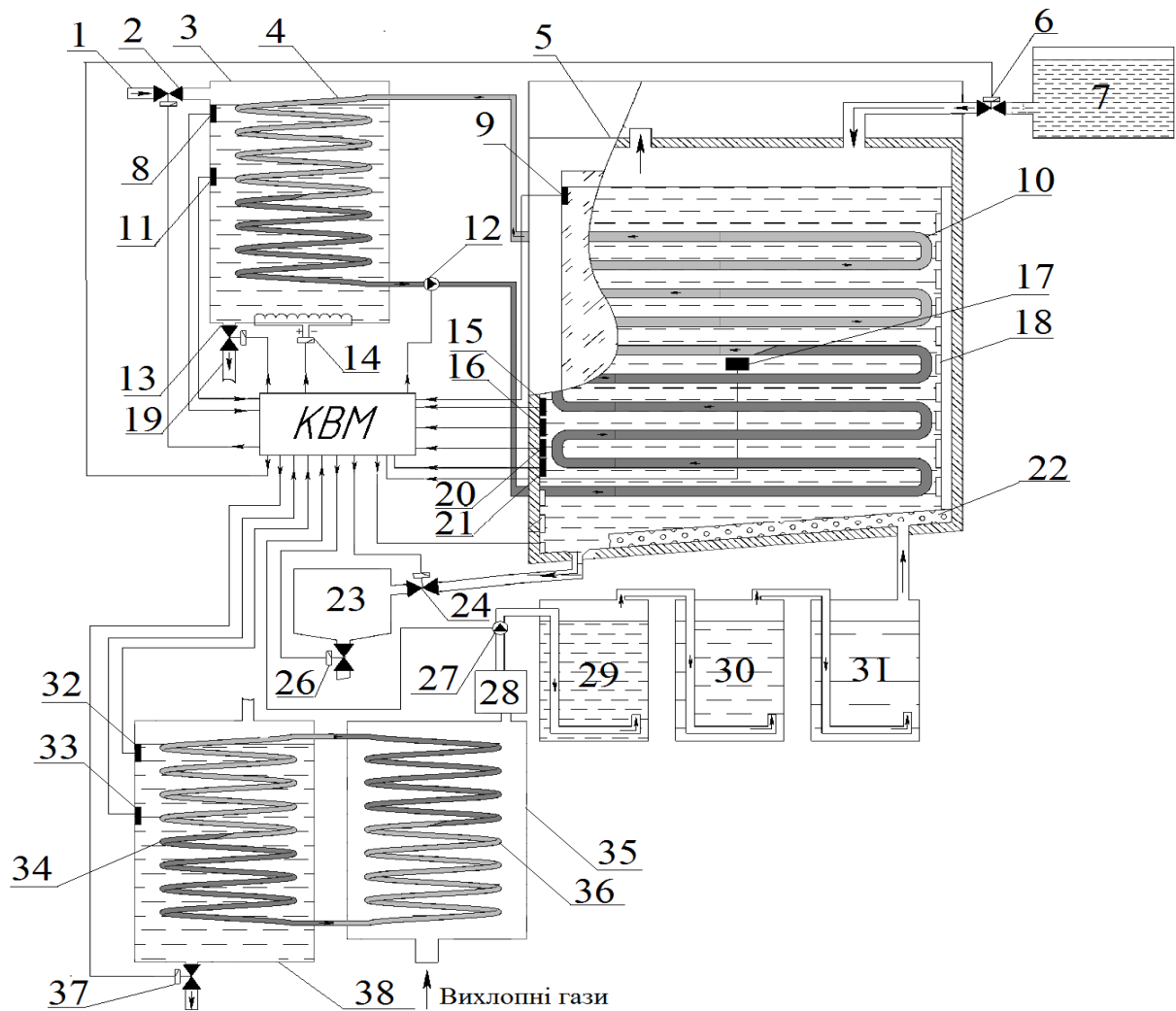
$$E = E^o + \left(\frac{RT}{8F}\right) \ln\left[\frac{P_{CH_4}}{P_{H_2O}^2 P_{CO_2}}\right] + \left(\frac{RT}{8F}\right) \ln[P_{O_2}^2] \quad (2)$$

Імплементация мікробіотехнології в енергосистему, на базі твердооксидного паливного елемента, дозволить мінімізувати викиди діоксиду вуглецю в атмосферу та підвищити загальний ККД для об'єкта господарювання, за рахунок генерування біосировини із мікроводоростей.

Промислове вирощування мікроорганізмів вирішується шляхом відбору димових газів із енергетичних установок та подальшого нагнітання їх у культиватор, де відбувається поглинання діоксиду вуглецю мікроводоростями. За рахунок використання датчиків та контрольно-вимірювального модуля, підтримується раціональний газово-мінеральний склад поживного середовища та відповідні інсоляційно-температурні режими, які забезпечуються системами тепло-масообміну (рис. 2).

Відпрацьовані гази із паливних комірок потрапляють у камеру для вихлопів разом із атмосферним повітрям, яке проходить очищення (від пилу та грубих часточок) через мокрі фільтри (нейтралізація мікроорганізмів та сірководню за рахунок хімічної взаємодії із  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ). Відфільтрована газова суміш потрапляє в культиватор і утворює мікроскопічні бульбашки, які в свою чергу збагачують мікроорганізми діоксидом вуглецю та перемішують їх за рахунок аерліфту. Задня частина культиватора виконана у формі теплообмінника із чорним забарвленням, що підвищує поглинання сонячного випромінювання культиватором і дозволяє нагрівати його під дією сонячного випромінювання до  $25^{\circ}\text{C}$ . Розміщені в культиваторі мікроорганізми отримують необхідне сонячне випромінювання через його прозору фронтальну поверхню. За рахунок даних із датчиків освітленості, рН, концентрації солей, КВМ регулює рівень освітленості через додаткове освітлення світлодіодними стрічками (розташованих на бокових стінках культиватора) та коректує живильне середовище, вводячи додаткову його порцію у ємність культивування.

Важливим елементом процесу культивування є температура середовища, регулювання якої відбувається за рахунок його теплообміну із ємністю для підігріву води через системи теплообмінників.



**Рис. 1. Технологічна система роботи гібридної установки промислового вирощування мікродоростей шляхом утилізації діоксиду вуглецю:**

1 – патрубок подачі води; 2, 6, 13, 24, 26, 37 – електромагнітний клапан; 3, 38 – теплоізольована ємність для підігріву води; 4, 10, 34, 36 – теплообмінник; 5 – плоский скляний культиватор, 7 – ємність для живильного середовища; 8, 9, 32 – датчик рівня; 11, 21, 31 – датчик температури; 12 – циркуляційний насос; 14 – електричний підігрівач; 15 – датчик рН; 16 – датчик концентрації солей; 17 – датчик освітленості; 18 – світлодіодні стрічки; 19 – трубопровід; 20 – датчик концентрації мікроорганізмів; 22 – аераційна трубка; 23 – ємність збору вирощеної культури; 27 – повітряний насос; 28 – фільтр грубих часток; 29,30 – мокрий фільтр на основі перенасиченого розчину  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , 31 – дистильована вода; 35 – камера вихлопних газів.

В разі підвищення температури в культиваторі вище 27<sup>0</sup>С, КВМ вмикає циркуляційний насос і за рахунок теплообмінника, розташованого на задній частині культиватора, знижує її. Якщо температура у культиваторі та ємності підігріву води нижча 21<sup>0</sup>С, то КВМ вмикає електропідігрівач та утримує температуру середовища на заданому рівні. Щоб запобігти перегріванню мікроорганізмів (вище 27<sup>0</sup>С), КВМ виводить частину води із ємності для її підігріву та вводить додаткову порцію холодної – із загальної мережі. Виведена вода (температурою 21<sup>0</sup>С ) потрапляє у другу ємність, де догрівається до 60 градусів за рахунок низькопотенційної теплової енергії вихлопних газів, отриманої з теплообмінника, яка може використовуватись у потребах енергосистеми чи об'єкту господарювання. Така система культивування мікроводоростей дозволяє безперервно генерувати біомасу мікроорганізмів, відбирати вуглекислоту із атмосфери та систем, що спалюють метан, а також використовувати низькопотенційну теплову енергію із сонячного випромінювання та вихлопних газів для продукування ліпідів.

### **Висновки**

1. Проаналізовано основні методи утилізації діоксиду вуглецю та встановлено, що відомі процеси є складними, довготривалими та небезпечними, через використання хімічних сполук (вторинні і третинні аміни або ж аміак).

2. Обґрунтовано імплементацію мікробіотехнологій на базі фотобіореакторів у енергосистему із твердооксидним паливним елементом, що забезпечує фільтрацію біогазу від СО<sub>2</sub> та дозволяє отримати додаткову масу ліпідів, як сировину для подальшої ферментації або синтезу біодизелю.

3. Запропоновано технологічну схему безперервної інтенсифікації процесу вирощування мікроводоростей для отримання ліпідів у промислових масштабах та поглинання діоксиду вуглецю із димових газів, отриманих внаслідок роботи енергетичних установок на базі твердооксидних паливних елементів SOFC.



### Список літератури

1. Патент України «Спосіб утилізації діоксиду вуглецю промислових викидів у продукти енергетичного призначення» / Бобков О.І., Бойко А.Г., Бортишевський В.А., Корж Р.В. Хороших О.Т. // Реєстраційний № 79814 від 25.03. 2010, опубл. Бюл. № 6. – Київ. – 2010.

2. Патент України «Спосіб утилізації діоксиду вуглецю з концентрованих джерел його одержання» / Патон Б. Є., Бондаренко Б. І., Гожик П. Ф., Дмитрієв В. М., Жук Г. В., Іванов В. О., Оршанський Ю. Р., Плічко В. С., П'ятничко О. І., Смирнов Л. Ф., Шмідт І. К. // Реєстраційний № 96669 від 25.11.2011, опубл. Бюл. № 22. – Київ. – 2011.

3. Баланда О. В. Загальний вміст ліпідів у зелених і синьозелених водоростях в умовах лабораторного культивування [Електронний ресурс] / О. В. Баланда, А. Г. Маєвська, О. А. Мурченко, Т. І. Суслов, О. В. Бабучко – Режим доступу : [http://nd.nubip.edu.ua/2011\\_7/11bom.pdf](http://nd.nubip.edu.ua/2011_7/11bom.pdf).

4. Рустамов Н. А. Биомасса как источник энергии // Энергия: Экономика. Техника. Экология. / Н. А. Рустамов. — 2005. — № 6. — С. 20–28.

5. Kawada T. Reaction between solid oxide fuel cell materials / [T. Kawada, N. Sakai, H. Yokokawa, M. Dokiya, I. Anzai] // Central Technical Research Institute, Yokohama. — 2002. — P. 196.

6. Hirschenhofer J.H. Fuel Cell Handbook. Fourth Edition/ [J.H. Hirschenhofer, D.B. Stauffer, R.R. Engleman, and M.G. Klett] // U.S. Department of Energy, Office of Fossil Energy. Federal Energy Technology Center. — 1998. — P. 198.

*Предложена структурная схема энергетической системы на основе фото анаэробных биотехнологий и твердооксидных топливного элемента.*

***Биотехнологии, фотобиореактор, микроводоросли, система, твердооксидных топливный элемент.***

*A structural diagram of the power system based on photos anaerobic biotechnology and solid oxide fuel cell.*

***Biotechnology, fotobioreaktor, microalgae, system, solid oxide fuel cell.***