

ПРОБЛЕМИ ВИКОРИСТАННЯ МІКРОБІОЛОГІЧНИХ СИСТЕМ У ПРОЦЕСІ РЕМІСІЇ ВУГЛЕКИСЛОГО ГАЗУ ІЗ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ

А. О. Пальчик, кандидат технічних наук, доцент

E-mail: proton1neutron@gmail.com

Я. П. Замора, кандидат технічних наук, доцент

E-mail: zamora@bigmir.net

Н. В. Бурега, кандидат технічних наук

E-mail: buregan@ukr.net

Тернопільський національний педагогічний університет ім. В. Гнатюка

Анотація. *Ініціативи Кіотського протоколу, Паризької конвенції про зміни клімату 2015 року, преміальний фонд підтримки революційних інновацій X Prize та оголошений гранд Ілоном Маском про винахід кращої технології вловлювання вуглекислоти із загальним бюджетом у 100 млн доларів дають змогу стверджувати про високу актуальність проблеми абсорбції вуглекислого газу із атмосферного повітря.*

На наш погляд, великою перспективою є використання біологічних фотосинтезуючих культур та технологічних рішень на їх основі, що забезпечуватимуть абсорбцію вуглекислого газу, оскільки цей процес у далекому минулому вже змінив атмосферу Землі. Крім того, використання рослин дозволить не лише поглинути вуглекислий газ із атмосфери, але і отримати додаткову сировину, багату на вуглеводні та ліпіди, а також генерувати кисень. У цьому технологічному рішенні проблеми наявності парникових газів встановлено доцільність застосування процесу вирощування одноклітинних мікроводоростей у системах фотореакторів. Визначено енергетичні та техніко-економічні показники функціонування систем утилізації вуглекислоти на основі типових підходів. Виявлено потребу у створенні системи автоматичного аналізу стану культури на базі використання штучного інтелекту та систем автоматичного розпізнавання образів. Доведено необхідність інтеграції теплоаккумулятора у будову фотореактора для згладжування добових перепадів температур (що в свою чергу мінімізувало енерговитрати) та систем додаткового освітлювання та перемішування. Запропоновано ряд власних конструкцій фотореакторів та подальші шляхи їх модернізації із використання полімерних плівок для ізоляції робочого простору фотореакторів з метою уникнення зараження культури.

Ключові слова: *парникові гази, фотореактор, хлорела, вуглекислота, адсорбція, SOFC*

Актуальність. Нині антропогенний вплив людської життєдіяльності через надмірні викиди парникових газів уже призводить до аномальних змін клімату, що несе пряму загрозу існування біосфери нашої планети та людства в цілому. На зменшення кількості викидів парникових газів, в основному вуглекислого газу, спрямовані такі міжнародні ініціативи, як Кіотський протокол, Паризька конвенція про зміни клімату 2015 року, приватні преміальні фонди підтримки революційних інновацій X Prize та власні гранди, за прикладом Ілона Маска із його фінансовою пропозицією в розмірі 100 млн доларів для пошуку кращої технології вловлювання та переробки вуглекислоти. Більшість відомих технологій спрямовані на зменшення кількості викидів парникових газів у атмосферу за рахунок поглинання і довгострокового консервування CO₂ шляхом його закачування в надра Землі. Тому дослідження спрямовані на розробку систем адсорбції вуглекислоти із атмосфери є актуальними науковими завданнями.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Перспективною технологією утилізації вуглекислого газу є використання живих організмів із найбільш ефективними механізмами фотосинтезу. Такий підхід надає можливість вилучати та структурувати вуглекислоту у целюлозу, ліпіди або сахариди. Ця сировина широко використовуватиметься в подальшому в хімічній та фармакологічній промисловостях, сільському господарстві та енергетиці. Окрім того, в певний геологічний момент нашої планети саме мікроводорості кардинально змінили склад атмосфери Землі, вилучивши з нього більшість вуглекислого газу. David Sieg, Tram Nguye, Ayhan Demirbas вперше запропонували використання мікроводоростей в енергетиці завдяки високій швидкості їх росту та зважаючи на поглинання ними вуглекислого газу. Серед сучасних вітчизняних дослідників слід відзначити праці Грубінка В. В., Сидорова І. Ю., Кузьмінського Є. В., Золотарьова О. К., Голуба Н. Б., які приділяли увагу культивуванню мікроводоростей у галузі фармацевтики та для енергетичних потреб [1, 2]. Проведений аналіз виходу рослинної оливи з одиниці площі продемонстрував, що найбільш продуктивними культурами для виготовлення біосировини є мікроводорості. У процесі їх досліджень було встановлено можливість використання мікрокультури для абсорбції вуглекислого

газу із атмосфери в промислових масштабах за рахунок їх швидкого росту в фотореакторах, який значно перевищує показники відомих багатоклітинних енергетичних культур (рис. 1) [3].

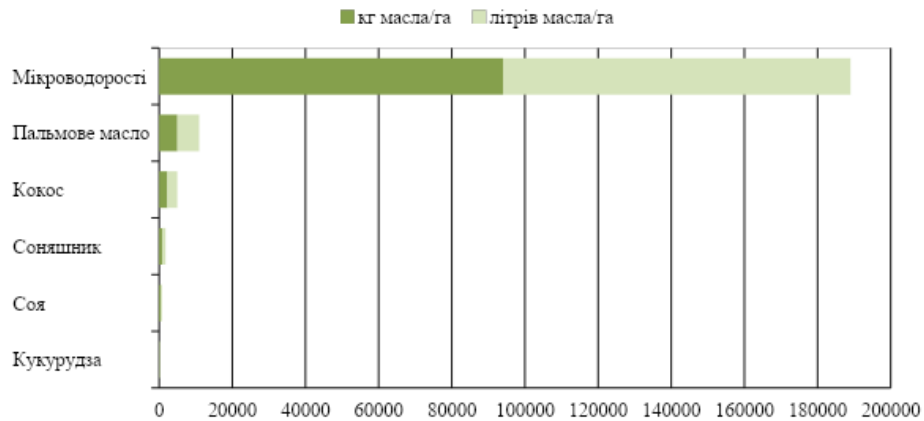


Рис. 1. Виробництво мастила з різної сировини з одного гектару

Мета дослідження – проаналізувати проблеми імплементації мікробіотехнологічних систем в технологічний процес емісії вуглекислого газу із атмосфери Землі, отриманої під час генерації теплової та електричної енергії на базі електрохімічних генераторів для зменшення кількості викидів вуглекислоти.

Матеріали і методи дослідження. Дослідження процесу емісії вуглекислого газу із земної атмосфери в біомасу базується на законах збереження маси та екологічного оптимуму, загальновідомих теоретичних основах функціонування біологічних систем та процесах фотосинтезу з використанням даних, отриманих на основі методів імітаційного та фізичного моделювання, теорії ймовірності.

Результати досліджень та їх обговорення. Одним із найбільш перспективних напрямків застосування мікрроводоростей для абсорбції вуглекислого газу із атмосфери є його безпосередня утилізація під час генерації теплової та електричної енергії на базі твердооксидних паливних елементів SOFC технології [4]. Такий підхід дозволяє отримувати електричну енергію з метану із ефективністю у 60-70 %, у той час коли питання саме конструктивних особливостей утилізаторів вуглекислоти залишається відкритим.

Нині існує два основних підходи вирощування мікробіодоростей у промислових масштабах, які базуються на використанні фотореакторів закритого та відкритого типу. Використання систем вирощування мікроорганізмів закритого типу обґрунтовано потребою контролю чистоти фотосинтезуючої монокультури мікробіодоростей (рис. 2, в, г).

Відкриті систем дають змогу значно збільшити об'єми фотореакторів, проте несуть цілу низку ризиків зараження мікробіодоростей іншими видами бактерій та грибків, що суттєво знижує ефективність процесу абсорбції вуглекислого газу та не дозволяє отримати на виході чистий матеріал біокультури із заданими показниками (рис. 2 а, б). Тому наші дослідження були спрямовані в першу чергу на аналіз закритих систем.

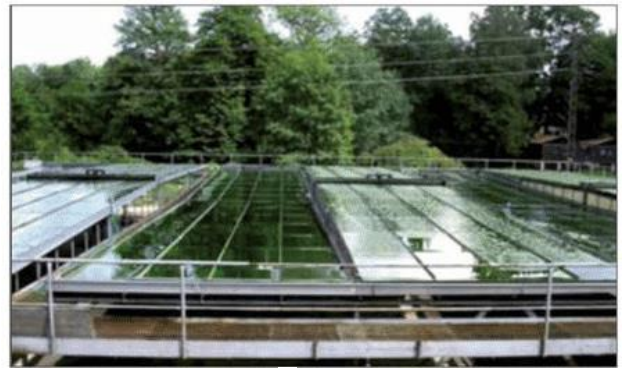
В обох підходах аналіз поточного стану культури здійснюється системою автоматичного керування на основі даних, отриманих від датчиків, проте кількість цієї інформації є недостатньою для повного розуміння того, що відбувається всередині фотореактора (зараження іншими типами бактерій, фаза росту в якій знаходиться культура, а її аналіз під час мікроскопії оператором потребує значних затрат часу).

Тому нами було запропоноване рішення аналізу культури в поточному часі за рахунок використання систем розпізнавання образів машинного зору [5]. Невирішеним залишилася проблеми масштабування площ культивування мікробіодоростей через економічні та технічні особливості їх вирощування.

Конструкція системи фотореактора (рис. 3) повинна виконувати функції вимірювання та контролю температури, освітленості, концентрації необхідних мінералів, кислотності середовища та його газонаповнення CO₂, а також рівномірним розподілом субстрату культури за рахунок перемішування. Фактично фотобіореактор є симбіозом технологічної системи та біологічного об'єкту із системою інтелектуального управління.



а



б



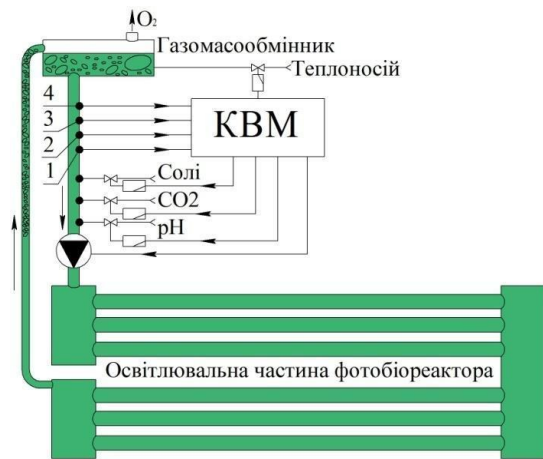
в



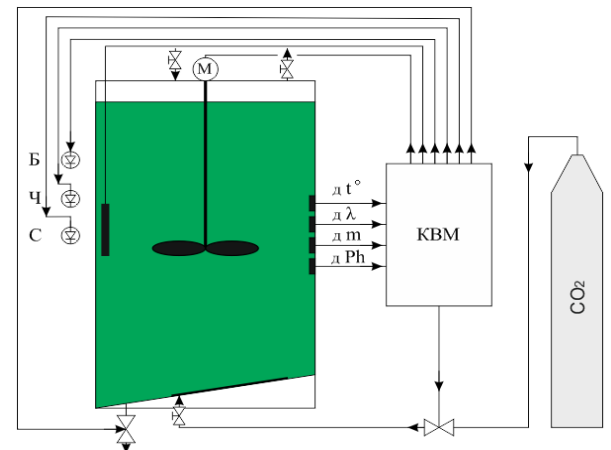
г

Рис. 2. Системи фотореакторів:

а – відкрита проточна; *б* – відкрита ставкова; *в* – плоска закрита; *г* – закрита трубчаста



а

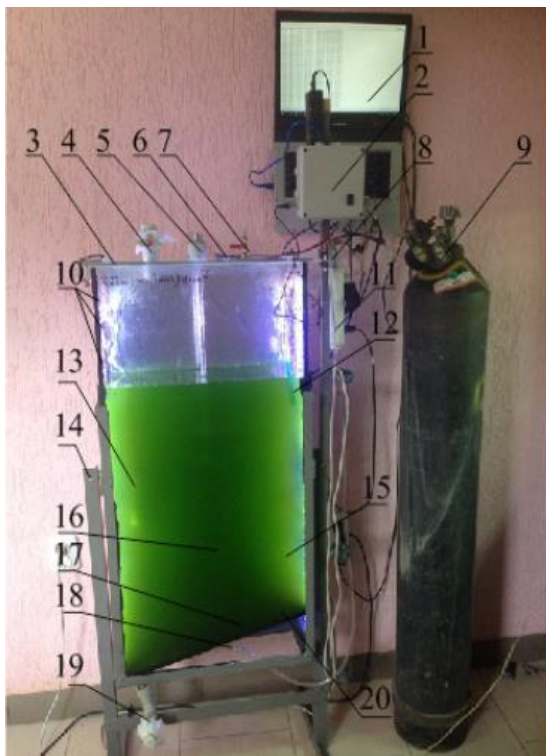


б

Рис. 3. Трубчастий фотобіореактор проточного типу:

а – 1 – датчик температури; 2 – датчик рівня рН; 3 – датчик освітленості; 4 – датчик концентрації мікробіодоростей; *б* – схема плоского вертикального фотореактора: Б, Ч, С – світлодіодні стрічки білого, червоного та синього кольорів; д t° – датчик температури середовища культивування; д λ – датчик рівня освітленості фотобіореактора; д m – датчик концентрації мікробіодоростей; д Ph – датчик рівня рН

Об'єктом дослідження була альгологічно чиста культура зеленої водорості *Chlorella vulgaris* Beij із колекції Інституту гідробіології НАН України, яку культивували на середовищі Фітцджеральда в модифікації Цендера і Горхема №11, що містив згідно пропису, крім інших катіонів, $0,058 \text{ мг/дм}^3 \text{ Mn}^{2+}$ і $0,023 \text{ мг/дм}^3 \text{ Zn}^{2+}$, і не містив іонів купруму, плюмбуму та інших неесенціальних металів, що вирощували при температурі $22\text{--}25^\circ\text{C}$ та освітленні лампами денного світла (інтенсивність 2500 лк) протягом 16 годин на добу [6].



а



б

Рис. 4. Фотобіореактор проточного типу:

а – загальний вигляд плоского вертикального фотореактора із робочим об'ємом 50 л: 1 – ноутбук; 2 – КВМ; 3 – скляна кришка; 4 – кран подачі харчового середовища; 5 – система перемішування; 6 – датчик освітленості; 7 – кран відведення газів; 8 – електромагнітний клапан 220 V; 9 – вуглекислотний балон; 10 – система додаткового освітлення LED стрічками; 11 – живлення системи; 12 – датчик рН; 13 – електродігрівач; 14 – рухомий залізний корпус ФТР; 15 – давач температури; 16 – давач концентрації мікроводоростей; 17 – аераційна трубка; 18 – кран подачі CO_2 в ФТР; 19 – кран зливу субстрату; 20 – корпус ФТР, виготовлений із скла; б – об'ємний фотореактор із внутрішньою підсвіткою

Досліджено основні типові схеми побудови закритих фотореакторів: трубчасту, вертикальну плоску (рис. 4а), об'ємну із внутрішньою підсвіткою (рис. 4б) та об'ємну із природною підсвіткою [7].

Показники приросту культури цих фотореакторів вдалося вивести на прогнозований рівень у 255 мільярдів клітин на літр робочого об'єму під час фази флуктуації (рис. 5).

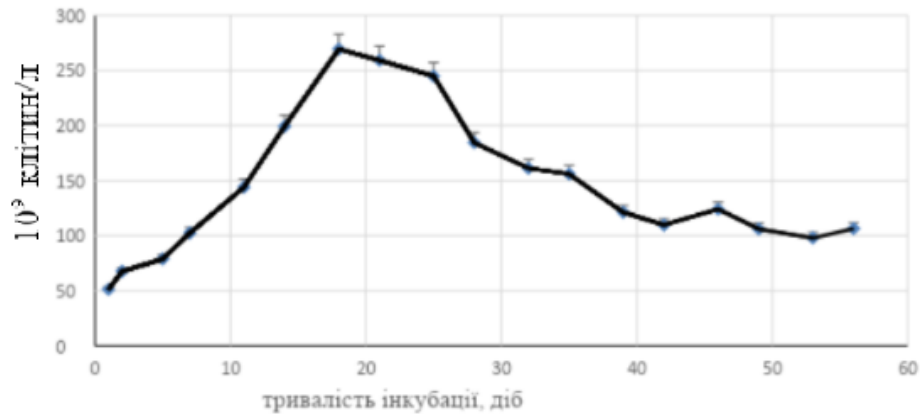


Рис. 5. Випробування фотореактора, динаміка приросту клітин

Серія експериментів показала, що при використанні природного освітлення є значні енерговитрати, спрямовані на охолодження реактора та утримання його температурних режимів, оскільки від них залежить виживання культури, в той час як культивування мікроорганізмів у приміщенні вимагає додаткового нагрівання культури (рис. 6) [8].

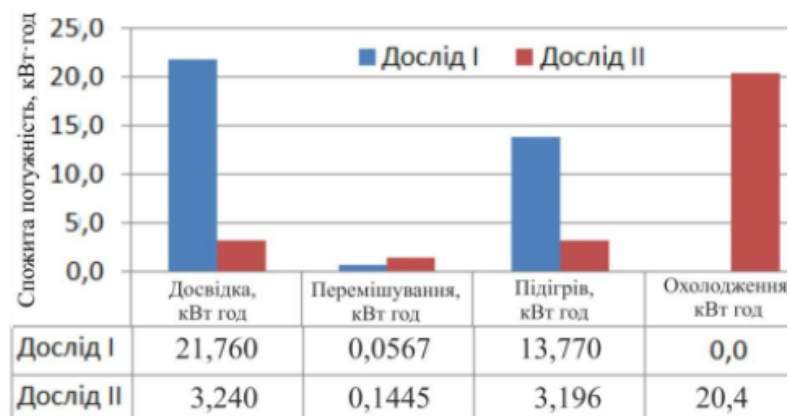


Рис.6. Порівняльна характеристика енергоспоживанням протягом 17 діб під час культивування мікрокультури в приміщенні (Дослід I) та під прямим сонячним освітленням (Дослід II)

Дослідження собівартості виготовлення одного літру об'єму фотореактора дали змогу стверджувати те, що найдешевшим є поєднанням ціни та об'єму фотореактора з використанням пластикової бочки; менш фінансово привабливим, проте більш технологічно ефективним вважається система на базі плоского скляного профілю, який економить енергію для додаткового освітлення та підігрівання культури. Інші розглядувані нами конструктивно-технологічні рішення на базі скляних та полімерних трубок показали високі капіталовкладення на їх виготовлення (рис. 7).

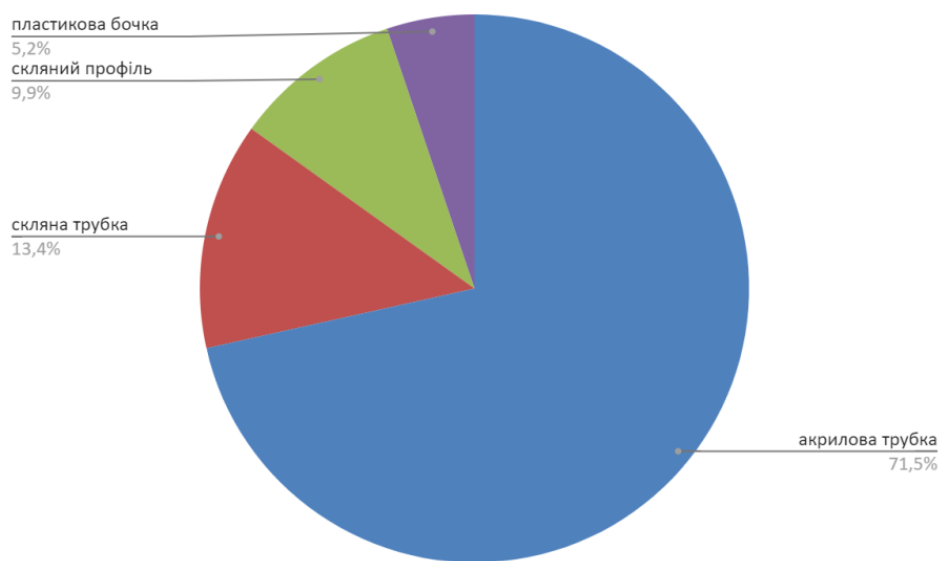


Рис. 7. Відносна собівартість одиниці об'єму фотореактора

Висновки і перспективи. У результаті проведення експериментів було досліджено енерговитрати систем контролю температури та перемішування, виявлено проблеми перегрівання трубчастих та плоских фотореакторів, що обумовило необхідність системи акумуляторів тепла із співвідношенням питомої теплоємності 1 літр реактора до 5 кДж/(кг·К) теплоакумулятора. При використанні природного освітлення значні енерговитрати спрямовані на утримання температурних режимів реактора, оскільки від них залежить виживання культури. Слід відзначити, що досліджувана нами модель реактора із об'ємом в 1 м³ в умовах штучного та природного освітлення продемонстрували можливість підтримки температурних режимів без їх виходу на критичні рівні лише за рахунок теплової

інертності самого реактора. Проте його вартість, темні зони та повільний вихід на заданий режим роботи не дозволяють його масове використання. Тому в подальших дослідженнях планується побудова плоских фотореакторів із інтегрованим термоакумулятором на основі полімерних плівок та вільною системою перемішування із використанням роботизованих систем.

Список використаних джерел

1. Костюк К. В., Грубінко В. В. Вплив йонів цинку, плюмбуму та дизельного палива на ліпідний склад мембран клітин водяних рослин. Вісник Львівського ун-ту. Серія : Біологія. 2010. Вип. 54. С. 257–264.
2. Голуб Н. Б., Бунча В. Ю. Вплив іонів лужних металів на приріст біомаси та накопичення ліпідів (метаболіз) у *Chlorella vulgaris*. Наукові вісті НТУУ «КПІ». 2012. № 3. С. 12–17.
3. Рослинництво. Олійні й ефіроолійні культури [Електронний ресурс]. Режим доступу до ресурсу: <http://subject.com.ua/agriculture/crop/41.html>.
4. Бешта О.С., Федорейко В. С., Пальчик А. О., Бурега Н. В. Автономне енергозабезпечення об'єктів господарювання на основі біотвертооксидних паливних систем. Науковий вісник Національного гірничого університету. Дніпропетровськ : НГУ, 2015. № 2. С. 67 – 73.
5. O. Beshta, V. Fedoreyko, A. Palchyk, N. Burega, R. Sipravskyu. Computer analysis of photobiological utilizer parameters of solid oxide fuel cells emissions. Power Engineering, control & information technologies in Technical Objects Control . CRC Press/Balkema, 2016. Taylor & Francis Group, London, UK. PP. 11 - 17.
6. Vodnar O. I., Burega N. V., Palchyk A. O., Viniarska H. B., Grubinko V. V. Optimization of *Chlorella vulgaris* Beij. cultivation in a bioreactor of continuous action. *Biotechnologia Acta*. 2016. V. 9. N. 4. P. 42 – 49.
7. Бурега Н. В. Методика вирощування мікроводоростей у фотореакторі при утилізації газів твердооксидних паливних елементів. Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природовикористання України. 2015. Вип. 224. С. 213–218.
8. Бурега Н. В., Рутило М. І., Пальчик А. О. Дослідження енергетичних параметрів утилізації вуглекислоти у плоскому фотореакторі під впливом штучного та природного освітлення. IV Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми та перспективи розвитку енергетики, електротехнологій та автоматики в АПК», 20-21 листопада 2016 р. м. Київ. С. 32-33.

References

1. Kostiuk, K. V., Hrubinko, V. V. (2010). Vplyv yoniv tsynku, pliumbumu ta dyzelnoho palyva na lipidnyi sklad membran klityn vodianykh roslyn [Influence of zinc, lead and diesel ions on the lipid composition of aquatic plant cell membranes]. *Visnyk Lvivskoho un-tu. Seriiia : Biolohiia*, 54, 257–264.
2. Holub, N. B., Buncha, V. Yu. (2012). Vplyv ioniv luzhnykh metaliv na pryrist biomasy ta nakopychennia lipidiv (metaboliz) u *Chlorella vulgaris* [Influence of alkali

metal ions on biomass growth and lipid accumulation (metabolism) in *Chlorella vulgaris*]. *Naukovi visti NTUU «KPI»*, 3, 12–17.

3. Roslynyntstvo. Oliini y efirooliini kultury [Plant growing. Oil and essential oil crops]. Available at: <http://subject.com.ua/agriculture/crop/41.html>.

4. Beshta, O. S., Fedoreiko, V. S., Palchyk, A. O., Bureha, N. V. (2015). Avtonomne enerhozabezpechennia ob'ektiv hospodariuvannia na osnovi biotvertooksydnykh palyvnykh system [Autonomous energy supply of facilities based on biovertoxide oxide fuel systems]. *Naukovyi visnyk Natsionalnoho hirnychoho universytetu. Dnipropetrovsk: NHU*, 2, 67 – 73.

5. Beshta, O., Fedoreyko, V., Palchyk, A., Burega, N., Sipravskyy, R. (2016). Computer analysis of photobiological utilizer parameters of solid oxide fuel cells emissions. *Power Engineering, control & information technologies in Technical Objects Control*. CRC Press/Balkema, Taylor & Francis Group, London, UK, 11 - 17.

6. Bodnar, O. I., Burega, N. V., Palchyk, A. O., Viniarska, H. B., Grubinko, V. V. (2016). Optimization of *Chlorella vulgaris* Beij. cultivation in a bioreactor of continuous action. *Biotechnologia Acta*, 9 (4), 42 – 49.

7. Bureha, N. V. (2015). Metodyka vyroshchuvannia mikrovdorostei u fotoreaktori pry utylizatsii haziv tverdooksydnykh palyvnykh elementiv [Method of growing microalgae in a photoreactor during utilization of gases of solid oxide fuel cells]. *Naukovyi visnyk Natsionalnoho universytetu bioresursiv i pryrodovikorystannia Ukrainy*, 224, 213–218.

8. Bureha, N. V., Rutylo, M. I., Palchyk, A. O. (2016). Doslidzhennia enerhetychnykh parametriv utylizatsii vuhlekysloty u ploskomu fotoreaktori pid vplyvom shtuchnoho ta pryrodnoho osviltennia [Investigation of energy parameters of carbon dioxide utilization in a flat photoreactor under the influence of artificial and natural lighting]. *IV Mizhnarodna naukovo-praktychna konferentsii «Problemy ta perspektyvy rozvytku enerhetyky, elektrotekhnolohii ta avtomatyky v APK»*, 20-21 lystopada 2016 r., Kyiv, 32-33.

ПРОБЛЕМЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МИКРОБИОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ В ПРОЦЕССЕ РЕМИССИИ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА С АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА

А. А. Пальчик, Я. П. Замора, Н. В. Бурега

Аннотация. *Инициативы Киотского протокола, Парижской конвенции об изменении климата 2015 года, премиальный фонд поддержки революционных инноваций X Prize и объявленный гранд И. Маска об изобретении лучшей технологии улавливания углекислоты с общим бюджетом в 100 млн долларов позволяют утверждать о высокой актуальности проблемы абсорбции углекислого газа из атмосферного воздуха.*

На наш взгляд, большой перспективой является использование биологических фотосинтезирующих культур и технологических решений на их основе, что обеспечивают абсорбцию углекислого газа, поскольку этот процесс в далеком прошлом уже изменил атмосферу Земли. Кроме того, использование растений позволит не только поглотить углекислый газ из атмосферы, но и получить

дополнительное сырье, богатое углеводородами и липидами, а также генерировать кислород. В данном технологическом решении проблемы наличия парниковых газов установлена целесообразность применения процесса выращивания одноклеточных микроводорослей в системах фотореакторов. Определены энергетические и технико-экономические показатели функционирования систем утилизации углекислоты на основе типовых подходов. Выявлена потребность в создании системы автоматического анализа состояния культуры на базе использования искусственного интеллекта и систем автоматического распознавания образов. Доказана необходимость интеграции теплоаккумулятора в конструкцию фотореактора для сглаживания суточных перепадов температур (что в свою очередь минимизировало энергозатраты) и систем дополнительного освещения и перемешивания. Предложен ряд собственных конструкций фотореакторов и дальнейшие пути их модернизации по использованию полимерных пленок для изоляции рабочего пространства фотореакторов во избежание заражения культуры.

Ключевые слова: парниковые газы, фотореактор, хлорелла, углекислота, адсорбция, SOFC

PROBLEMS OF USING MICROBIOLOGICAL SYSTEMS IN THE PROCESS OF REMISSION OF CARBON GAS FROM ATMOSPHERIC AIR

A. Palchik, Y. Zamora, N. Burega

Abstract. *The initiatives of the Kyoto Protocol, the Paris Convention on Climate Change 2015, the X Prize Prize Fund for Revolutionary Innovation and the announcement by Grand Elon Musk of the invention of the best carbon capture technology with a total budget of \$ 100 million suggest that air absorption from carbon.*

In our opinion, the use of biological photosynthetic crops and technological solutions based on them, which will ensure the absorption of carbon dioxide, is a great prospect, as this process has already changed the Earth's atmosphere in the distant past. In addition, the use of plants will not only absorb carbon dioxide from the atmosphere, but also obtain additional raw materials rich in hydrocarbons and lipids, as well as generate oxygen. This technological solution to the problem of the presence of greenhouse gases establishes the feasibility of using the process of growing unicellular microalgae in photoreactor systems. Energy and technical and economic indicators of functioning of carbon dioxide utilization systems on the basis of standard approaches are determined. The need to create a system of automatic analysis of the state of culture based on the use of artificial intelligence and systems of automatic pattern recognition has been identified. The necessity of integration of the heat accumulator into the structure of the photoreactor for smoothing of daily temperature differences (which in turn minimized energy consumption) and systems of additional lighting and mixing is proved. A number of own designs of photoreactors and further ways of their modernization on use of polymeric films for isolation of working space of photoreactors for the purpose of avoidance of infection of culture are offered.

Key words: *greenhouse gases, photoreactor, chlorella, carbon dioxide, adsorption, SOFC*