

ФОТОБІОРЕАКТОРИ

Ю. І. СИДОРОВ

Національний університет «Львівська політехніка», Львів

E-mail: sydorowy@rambler.ru



Розглянуто сучасний стан конструювання лабораторних, пілотних і промислових фотобіореакторів (ФБР). Показано еволюцію конструкцій лабораторних ФБР — від чашки Петрі, пробірки або колби, від плоских конструкцій, що освітлюються ззовні, до середовищ, що містять світлодіоди. Зазначено, що можливість штучного вирощування деяких видів водоростей з високим вмістом ліпідів, з яких можна одержувати так званий біодизель, надала поштовху розвитку промислових ФБР, які також пройшли еволюційний шлях від відкритих теплих водоймищ до закритих ємнісних і трубчастих конструкцій. Вважають, що масове виробництво водоростевого біодизеля може швидко вирішити енергетичні проблеми України, але досягнений на сьогодні світовий рівень продуктивності існуючої промислової апаратури й наведені у статті прості економічні розрахунки не дають підстави стверджувати, що в найближчому майбутньому водоростеве біодизельне паливо може кардинально вирішити енергетичні проблеми нашої країни.

Ключові слова: фотобіореактор, конструкція, водоростеве біодизельне паливо.

Сьогодні найважливішими галузями біотехнологічного застосування фотобіореакторів (ФБР) вважають культивування хлорели і спіруліни — цінне джерело протеїну; ставкової твані *Clamidomonas reinhardtii* і пурпурних бактерій *Rhododacter capsulatus*, що здатні продукувати ензим гідрогеназу, за допомогою якого можна одержати енергетичний водень; галобактерій — продуцентів бактеріородопсину, з яким пов'язують розвиток систем зберігання інформації нового типу, голографічних інтерферометрів, надшвидких детекторів світла, а також створення штучного ока; одержання надчисотого і дешевого кремнезему для мікроелектроніки, комплексу поліненасичених жирних кислот з діатомітових водоростей *Synedra acus* тощо.

Однак найактуальнішою біотехнологічною галуззю використання фотобіореакторів є одержання біодизельного палива із синьо-зелених водоростей. Особливістю деяких видів водоростей, що перебувають у певних стресових умовах, є здатність накопичувати велику кількість ліпідів (до 80% у перерахунку на суху масу). До того ж мікродорості — рослини, що найбільш швидко розмножуються. За належного догляду їхня маса збільшується вдвічі всього за 40 год.

Ці феномени і спонукали звернути особливу увагу на синьо-зелені водорості як джерела вуглеводнів, з яких можна виробляти

дизельне паливо. Крім ліпідів, сучасні генно-модифіковані водорості здатні продукувати гелеподібну субстанцію, багату на целюлозу, яку можна легко переробити на біопаливний етанол. Підраховано, що «врожайність» водоростей за паливом перевищує таку будь-яких рослинних культур: мінімум у 3 рази (пальмова олія), максимум у 100 разів (кукурудза).

З 50-х років минулого сторіччя біопаливний потенціал водоростей є об'єктом пильної уваги вчених Франції, Німеччини, Японії і США. У США з 1978 до 1996 р. діяла пошукова наукова програма Aquatic Species Program (ASP), що її реалізувала Національна лабораторія США з відновлюваної енергії — NREL (US National Renewable Energy Laboratory) [1]. 2006 р. декілька компаній повідомили про будівництво заводів з виробництва біодизеля з водоростей: Global Green Solutions (Канада) за технологією компанії Valcent Products (США) — потужність 4 млн. барелей біонафти на рік; Bio Fuel Systems (Іспанія); De Beers Fuel Limited (ЮАР) за технологією Greenfuel Technologies Corporation (США) — потужність виробництва 900 млн. галонів біодизеля на рік (водорості + соняшникова олія); Aquaflow Bionomic Corporation (Нова Зеландія) — потужність виробництва 1 млн. л біодизеля на рік. Інвестиційна фундація Cascade Investment, що існує за рахунок капіталу Білла Гейтса,

заснувала компанію Sapphire Energy, яка займатиметься переробленням морських водоростей на автомобільне паливо. Компанія вже одержала 100 млн. дол. на створення переробного заводу потужністю 10 тис. барелей біопалива за добу. На водоростевий біодизель звертають увагу авіакомпанії, які вбачають у новій технології можливість незалежності авіатранспорту від наявності нафти. Так, наприклад, напівпромисловими установками з виробництва нового біопалива обладнано аеропорт ім. Дж. Леннона в Лондоні, активно освоює водоростеву технологію й авіакомпанія KLM Airlines.

В Україні також виявляють неабиякий інтерес до водоростевих технологій. Зокрема, ГНПК «Київський інститут автоматики» вже робить кроки у напрямі налагодження виробництва біопалива зазначеного типу. Компанія ТОВ «БІОДИЗЕЛЬДНЕПР» також пропонує високотехнологічну автоматичну лінію із замкнутим циклом. У Національному університеті харчових технологій спільно з Інститутом біохімії ім. О. В. Палладіна НАН України розроблено власну установку на базі вертикального трубчастого ФБР, який дозволяє інтенсифікувати процеси біосинтезу водоростей. З Дніпропетровська в Донецький інноваційний центр вже надійшла заявка на впровадження нової технології одержання олії з водоростей [2].

Отже, є підстави вважати, що незабаром можна очікувати бурхливого впровадження новітньої енергетичної технології, яка деякою мірою сприятиме вирішенню енергетичних проблем України. Про наукові й технічні подробиці технології фотобіосинтезу можна довідатися з багатьох джерел інформації, зокрема з [1], але для реалізації усіх зазначених наукових і промислових програм потрібно мати обладнання, відомості про яке недостатні або малодоступні [3–7]. Саме тому інформація про існуючі ФБР є вкрай актуальною.

Лабораторні ФБР

Найпростіший ФБР — освітлювана чашка Петрі, пробірка або колба (рис. 1). Однак у такій системі існує так званий «ефект дози», який виникає за нерівномірного освітлення окремих об'єктів; отже, зіставлення одержаних результатів є неможливим.

Проблеми ставали дедалі гострішими з переходом на напівпромисловий і промисловий рівні отримання цільових продуктів у світлозалежних технологічних процесах.

Почалась ера розроблення апаратів для культивування фотосинтезуючих мікроорганізмів, що дістали назву фотобіореактори.

Традиційним методом конструктивного вирішення цих завдань є використання робочих емностей апаратів, виготовлених із прозорих матеріалів з розташуванням необхідної кількості джерел світла ззовні. У таких випадках перемішування і аерацію культури проводять традиційними способами (рис. 1, а). Дотепер використовують також різноманітні плоскі конструкції (рис. 1, б).



а



б

Рис. 1. Прості лабораторні ФБР ємнісного типу:
а — з традиційною колбою;
б — з плоскою ємністю

Серед нових комп'ютеризованих моделей ФБР слід відзначити ферментер BIOSTAT PBR 2 S (фірма Sartorius) (рис. 2). Його робочий об'єм — 1,9 дм³, площа фотосинтетичного модуля — 0,4 м². Фірма випускає також пілотні ФБР. Модельний ряд пілотних ФБР складається з біореакторів різних розмірів. Усі ферментери розроблено відповідно до GMP-вимог.

Загальний об'єм пілотного ФБР BIOSTAT PBR 100 AS становить 100 дм³. Для зменшення площі, яку займає реактор, його по-

будовано за вертикальною схемою. Рух рідини в цій моделі забезпечує система air-lift. У верхній частині потоки зі всіх труб змішуються, забезпечуючи насичення газом. Інтенсивність світла може змінюватися відповідно до вимірюваної оптичної густини культури. Площа модуля фотосинтезу — 4,6 м². Габарити (мм): 1120×1120×3600.



Рис. 2. ФБР BIOSTAT PBR 2 AS

Російська фірма «Проинтех» (м. Пуціно, РФ) також випускає лабораторні ФБР (рис. 3).

Розроблено багато конструкцій апаратів із джерелами світла, які розташовані безпосередньо усередині робочих ємностей. У цих ФБР вертикальні трубчасті лампи штучного світла встановлені в робочу ємність і додатково слугують відбивними перегородками. Як приклад конструкції, що її ефективно використовують, можна навести вітчизняний апарат, захищений авторським свідоцтвом SU 1570678 A1 (1979) [8]. Звичайні лопатеві мішалки забезпечують високу кратність оновлення освітленого шару суспензії за рахунок збільшення числа Рейнольдса в рідині, що переміщується, внаслідок чого режим течії з ламінарного стає турбулентним.



Рис. 3. Лабораторний ФБР фірми «Проинтех»

Наступний стрибок в еволюції ФБР пов'язаний з появою світлодіодів та їхніми широкими потенційними можливостями. Очевидно, що світлодіоди є реальною альтернативою традиційним джерелам світла, у тому числі й для перенесення світлової енергії до клітин мікроорганізмів у процесі їх культивування. Освітлювальні пристрої на базі світлодіодів мають унікальні технологічні переваги. Їхній розмір становить лише декілька міліметрів; типовий світлодіод споживає постійний струм силою 15–20 мА за робочої напруги близько декілька вольт.

За останні роки ефективність світлодіодів істотно зросла: у грудні 2006 р. фірма Nichia анонсувала нові світлодіоди білого свічення з ефективністю світловидатності 150 лм/Вт. У ламп розжарювання цей показник на порядок нижче і становить 10–15 лм/Вт, у люмінесцентних ламп — 90 лм/Вт. Навіть у кращих за ефективністю серед традиційних джерел світла натрієвих ламп високого тиску максимальна світловидатність — близько 130 лм/Вт.

Монохроматичне випромінювання світлодіодів сприяє високій насиченості кольору, коефіцієнт кольоропередачі Ra у білих світлодіодів перевищує 80 (в ідеального світильника, що повністю імітує сонячний спектр, Ra = 100, у галогенових і кращих зразків люмінесцентних ламп Ra > 90) [8].

Проривом у конструюванні ФБР стало також розроблення вітчизняного апарата — SU 1828660 A3 (1981) [8], призначеного для

вирощування водорості з ніжними клітинними стінками — спіруліни. Принципова відмінність апарата, розробленого під керівництвом В. А. Жаворонкова (МДУ, РФ), полягає у використанні гнучких мішалок, закріплених між двома горизонтально розташованими дисками (рис. 4).

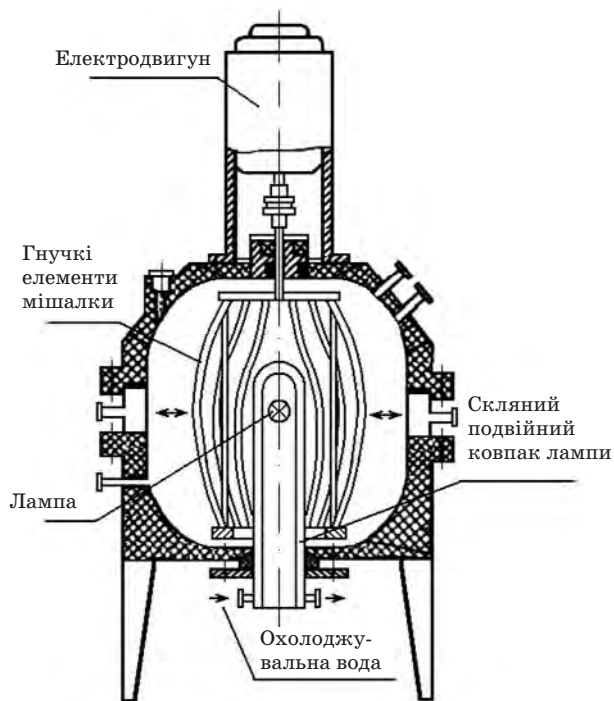


Рис. 4. Принципова схема і зовнішній вигляд ФБР Жаворонкова з гнучкими лопатями об'ємом 2,5 дм³

Обертання такого перемішувального пристрою забезпечує утворення повітряної порожнини в центрі ємності апарата за рахунок посилення відцентрового переміщення культуральної рідини. У цій порожнині розташовують електричні лампи, укладені в світлопрозорий двостінний кожух. У порожнині між подвійними стінками циркулює рідина, яка слугує холодоагентом для потужних натрієвих ламп. На сьогодні в МДУ створено серію ФБР цієї конструкції об'ємом до 100 дм³.

Пілотні ФБР

На рис. 5 показано пілотне обладнання, на якому навчались вирощувати спіруліну в Інституті біології південних морів ім. О. О. Ковалевського НАН України (ІБПМ).



Рис. 5. Пілотна установка ІБПМ

Промислові установки з виробництва біомаси з хлорели, яку використовують як корм для худоби, мають вигляд системи неглибоких і не дуже великих за площею басейнів під скляною покрівлею, а іноді — під відкритим небом (залежно від кліматичних умов).

Так, протягом 6 років водорості вирощували у ставках площею до 1 000 м². Ставок у Нью-Мехіко має високу ефективність в захопленні CO₂. Врожайність становила більше 50 г водоростей з 1 м² на добу. 200 тис. га ставків можуть продукувати паливо, достатнє для річного споживання 5% автомобілів США (рис. 6).

Однак відкриті басейни не забезпечують алголічної чистоти культури: в суспензії водоростей в значній кількості містяться не лише механічні (порох), але й біологічні (інфузорії, водорості інших родів тощо)

домішки. У зв'язку з цим було сформульовано першу основну вимогу до промислових установок з культивування водоростей — наявність культиватора закритого типу.



Рис. 6. Відкритий ставок для промислового вирощування водоростей

Другою основною умовою при розробленні установок для промислового культивування водоростей є забезпечення терморегулювання суспензії в межах, що є оптимальними для використовуваного штаму. Ця вимога зумовлена значними коливаннями температури повітря протягом року і доби та неможливістю у зв'язку з цим забезпечити достатньо високу й рівномірну продуктивність культури.

Саме такою була напівпромислова трубчаста установка закритого типу для виробництва «кремлівських таблеток» (рис. 7) з освітленням потужними натрієвими лампами (рис. 8).

Сьогодні провідною в Європі фірмою з виробництва фотобіореакторів є компанія AEN Engineering GmbH & Co (м. Диленбург, Німеччина). На рис. 9–11 показано зовнішній вигляд і схеми лабораторно-пілотного трубчастого ФБР цієї фірми PBR 25 G.

Зрозуміло, що джерелом світла для промислових багатотоннажних ФБР з виробництва водоростевого біодизеля має бути сонце, а не натрієві лампи чи світлодіоди.

З того часу, як виникли пілотні ФБР, дотепер використовують «мобільні ФБР», змонтовані на вантажівках і призначені для пересування з метою виявлення місць, що забезпечують якнайкращий режим інсоляції і, отже, максимальну біологічну продуктивність (рис. 12).

Напівпромислові пілотні установки із сонячним освітленням застосовує російське підприємство «Екологическая группа» (Калінінград) (рис. 13).



Рис. 7. Перший радянський напівпромисловий трубчастий ФБР для вирощування спіруліни, з якої виробляли «кремлівські таблетки»



Рис. 8. Трубчастий ФБР зі штучним освітленням потужними натрієвими лампами



Рис. 9. Зовнішній вигляд PBR 25 G

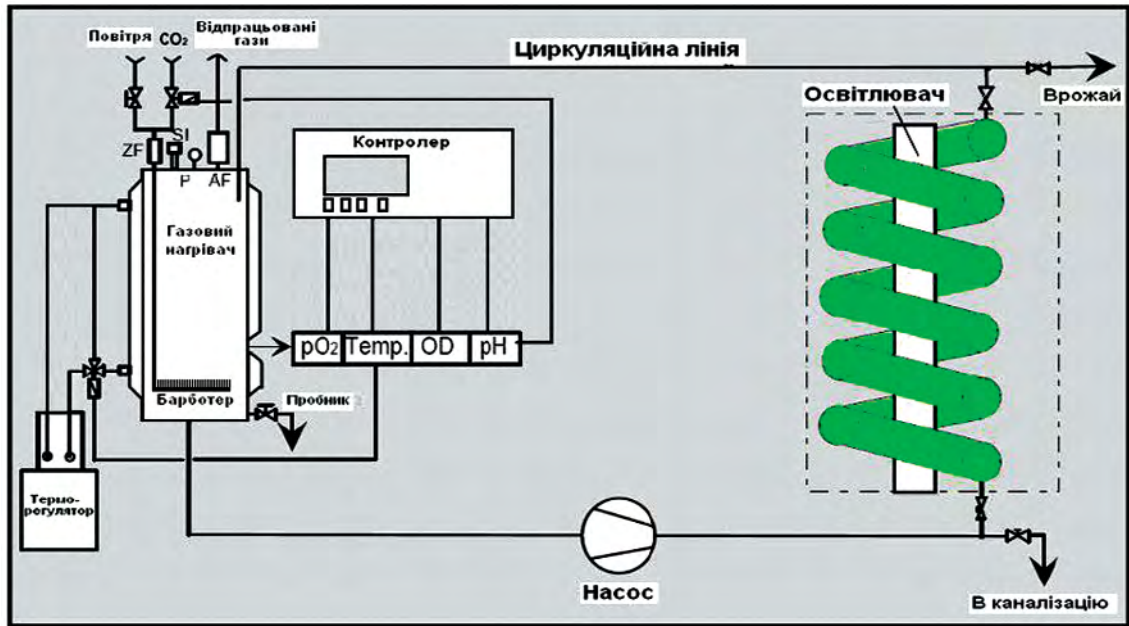


Рис. 10. Принципова схема PBR 25 G

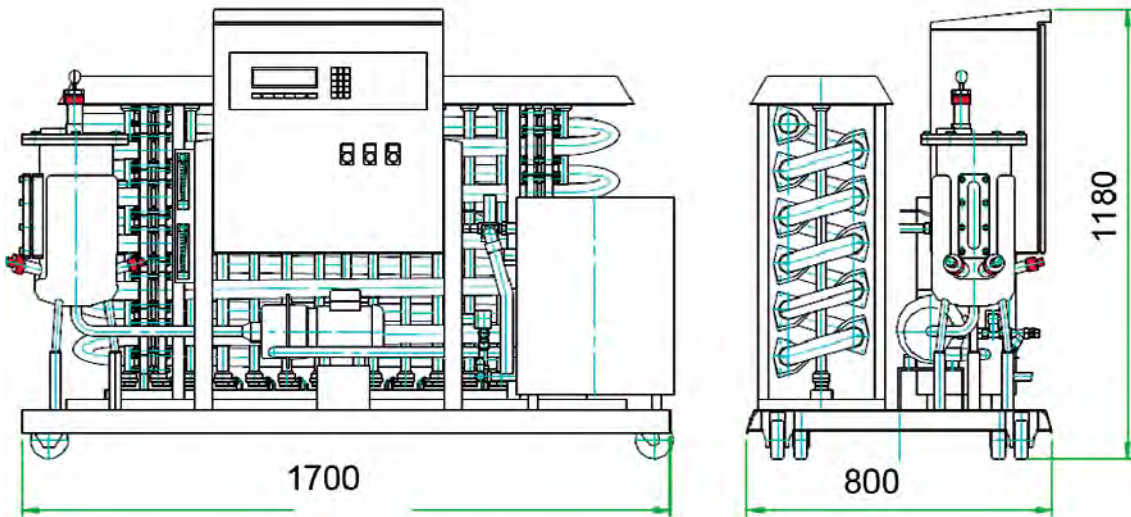


Рис. 11. Монтажна схема PBR 25 G



Рис. 12. Пілотно-промисловий ФБР колбового типу періодичної дії (Аризона, США)

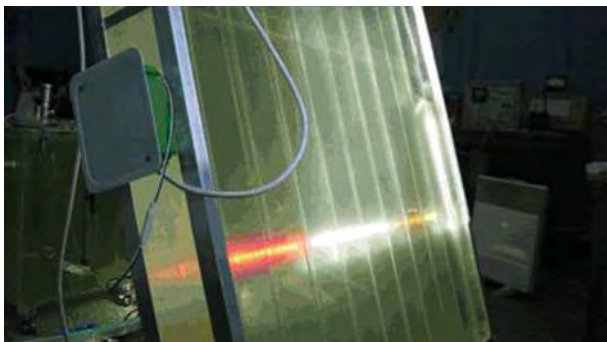


Рис. 13. Пілотна установка проточно-площинного типу об'ємом 210 дм³ підприємства «ЭГ». Установка розрахована на підгодівлю спіруліною 70 телят

За таким способом вирощують спіруліну і в київській компанії ЗАТ НВФ «Біоспіруліна».

Отже, світова промисловість випускає достатньо широку номенклатуру лабораторних і пілотних реакторів для дослідницьких цілей. Перевагу потрібно надавати сучасній апаратурі, яка йде в комплекті з комп'ютерами.

Промислові ФБР

При проектуванні промислового фотоавтотрофного культиватора за умов сонячного освітлення до уваги беруть такі технічні й біологічні умови: на початку і наприкінці світлового дня інтенсивність сонячної радіації різко падає, причому висота сонця над горизонтом у цей час мінімальна і освітленість горизонтальної поверхні значно менша, ніж вертикальної. Тому наявність у ФБР вертикально розташованої поверхні може значно збільшити продуктивність культиватора за рахунок більш ефективного використання світлової енергії сонця в ранкові та вечірні години.

З урахуванням зазначених чинників з'явилась велика кількість варіантів промислових ФБР закритого типу: плоскі вертикальні і нахилені з можливістю міняти кут нахилу залежно від положення сонця протягом доби, конусоподібні (рис. 14) і конусоподібні з додатковими вертикальними поверхнями (типу «юрти»), трубчасті, періодичного і безперервного типів тощо.

Безперервні ФБР мають системи терморегулювання і перемішування. Перемішування, як правило, є циркуляційного типу: суспензію відцентровим насосом або ерліфтом подавали наверх установки, звідки вона стікає робочими поверхнями і збирається внизу в збірнику.

На рис. 15 показано ФБР періодичної дії, яка по суті є водоймищем, але закритого типу.



Рис. 14. Конусоподібні ФБР



Рис. 15. Промисловий ФБР періодичної дії (США)

Окрім пілотних, компанія AEN Engineering GmbH & Co випускає також промислові ФБР трубчастого типу об'ємом 42 і 85 м³. На рис. 16–18 показано зовнішній вигляд, принципову і монтажну схему промислового ФБР моделі PBR 42000 G.



Рис. 16. Зовнішній вигляд промислового ФБР PBR 25 G

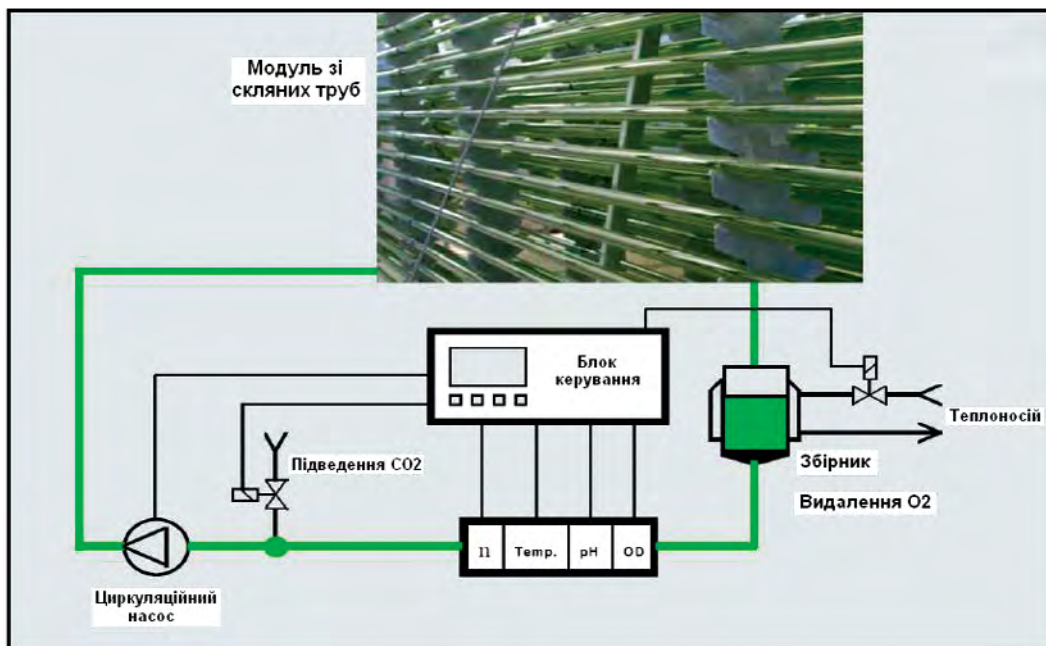


Рис. 17. Принципова схема PBR 42000 G

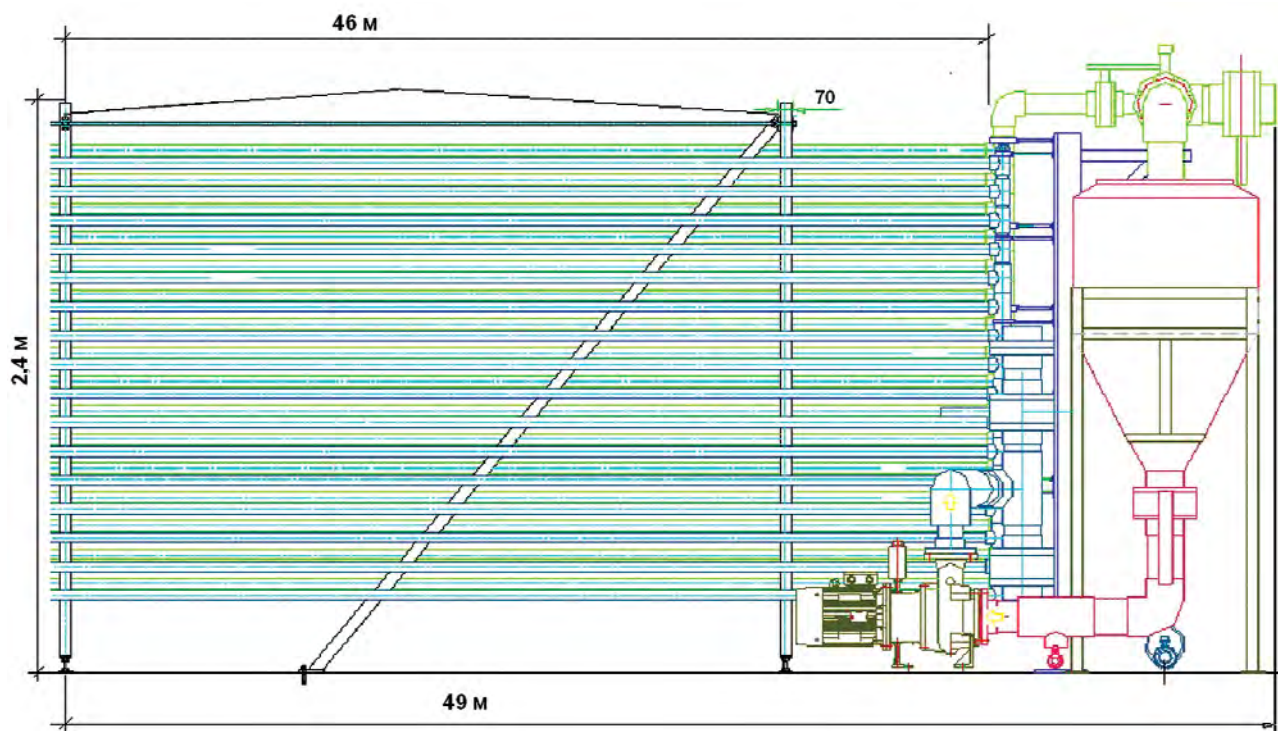


Рис. 18. Монтажна схема PBR 42000 G

Для одержання чистої водоростевої монокультури, яка необхідна для запуску робочого ФБР або для використання її у фармацевтичній, косметичній та харчовій промисловості фірма AEN застосовує так звану AlgaForce Technology. На рис. 19 показано приміщення і колбові ФБР для одержання чистої культури.

Цією самою фірмою розроблено також технологію під назвою DiaForce, яка імітує природні умови розвитку водоростевих полікультур, зокрема наявність водограїв, що забезпечують високі гідродинамічні характеристики системи та інтенсивне перемішування й насичення середовища повітрям і CO_2 , що міститься в ньому. В кінцевому підсумку це дає змогу прискорити ріст біомаси (рис. 20, 21).



Рис. 19. Установка для одержання водоростевої монокультури за AlgaForce Technology



Рис. 20. Установка для вирощування водоростевих полікультур за технологією DiaForce

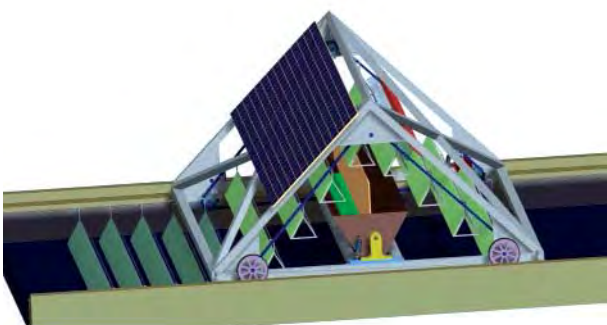


Рис. 21. Головний елемент системи DiaForce

Продукти, які одержують за технологією DiaForce, використовують як кормові добавки у тваринництві, для виготовлення косметичних засобів, біогазу, біопалива.

Слід зауважити, що технології DiaForce притаманні всі недоліки відкритих ФБР. Крім того, практика показала, що одноклітинні водорості, якщо застосовувати їх у сирому (живому) вигляді, руйнують систему травлення ссавців. На сьогодні в цивілізованих країнах заборонено годувати одноклітинними водоростями тварин і птиць, якщо їхнє м'ясо людина споживає в їжу [9].

Окрім світла, для росту фотоавтотрофних водоростей потрібен і CO_2 . Для більшості розроблених ФБР джерелом діоксиду вуглецю є повітря, яке містить цей газ у значній кількості. Утім, цим джерелом можуть бути й промислові газові викиди від електростанцій, металургійних заводів, спиртозаводів, біотехнологічних підприємств тощо.

Технологія корпорації GreenFuel Technologies з Массачусетського технологічного інституту Emissions-to-Biofuels унікальна за своєю здатністю знижувати викиди вуглекислого газу у вигляді нового палива. Тимчасом як багато передових заводів і електростанцій розробляють проекти поховання парникового газу, викиди якого в сучасному світі є предметом торгівлі і квотування, американська компанія пропонує перетворювати незручні відходи на доходи, зокрема на паливо. Винайшов цей метод і заснував компанію GreenFuel Technologies Ісаак Берзін (Isaac Berzin).

На дослідній промисловій установці, що працює в Аризоні, викид теплової електростанції перетворюється на біодизельне паливо (рис. 22). Крім того, тепло, що його скидає ТЕЦ, здатне покривати до 77 % потреб у теплі, яке необхідне для вирощування водоростей.

Схему технологічного циклу Emissions-to-Biofuels подано на рис. 23 [10].

Через колби ФБР, що містять, окрім водоростей і води, постійно додають поживні речовини (сільськогосподарські відходи), пропускають димовий газ — безпосередньо зі станційної труби. Далі цю суміш пропускають через первинну сушарку, яка відділяє воду і спрямовує її назад у ФБР. Одержана висококонцентрована суспензія водоростей (тут їх концентрація в 10–30 разів вища, ніж у ФБР) надходить у наступну секцію установки для одержання біодизеля, бензину, протеїнової біомаси.



Рис. 22. ФБР у комплексі з ТЕЦ

Зауважимо, що подібні схеми розроблені й з успіхом застосовуються і в Росії [11]. На рис. 24 наведено гібридну блок-схему використання тепла і CO_2 московської теплової електростанції «Біосоляр – ТЕЦ-26». Одержане паливе знову використовують як паливо для цієї самої ТЕЦ.

Принциповим у цій схемі є те, що після дезінтеграції і сепарації біомаси біогенні речовини — фосфор, калій, азот тощо — повертаються в культуральне середовище для повторного вирощування мікробіодоростей. Схема є замкненою за всіма біогенними елементами окрім вуглецю.

Хоча успіхи в розробленні промислових ФБР є очевидними, до появи цілої галузі енергетичних підприємств для заміни нафтових вуглеводнів далеко — потужні промислові ФБР ще не створено. За даними АЕН, сьогодні жодна фірма не випускає ФБР з продуктивністю 20, 50 або 100 т сухої біомаси за добу; максимальна продуктивність існуючих ФБР для виробництва водоростевого біодизеля становить 10–15 т/добу.

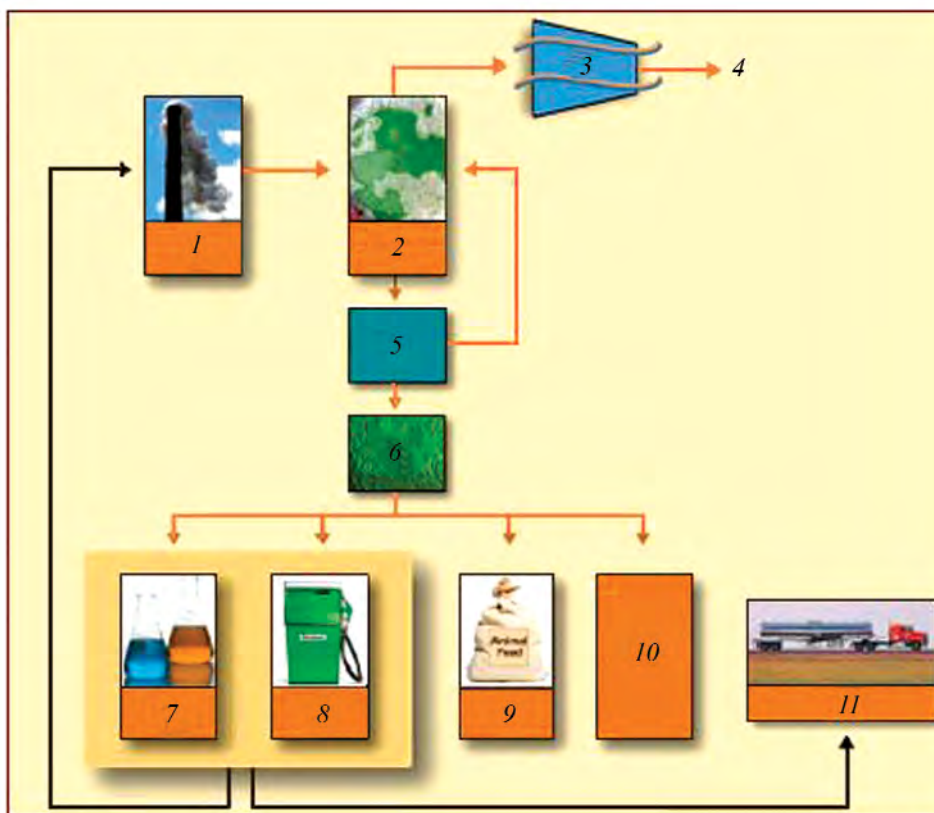


Рис. 23. Схема технологічного циклу Emissions-to-Biofuels:

1 — димові гази теплової електростанції; 2 — біореактор з водоростями; 3 — вентилятор; 4 — вихід кисню й азоту; 5 — первинне сушіння (стрілка в напрямі до реактора — рециклінг води); 6 — біомаса; 7 — етанол, метанол; 8 — біодизель; 9 — протеїновий концентрат; 10 — інші продукти; 11 — автомобільне паливо (стрілка в напрямі від спиртів і біодизеля до зображення теплової станції означає, що ці продукти можна не тільки продавати автомобілістам, але й використовувати для вироблення електрики на місці виробництва, ілюстрація GreenFuel Technologies)

Умовно приймемо, що в Україні всю імпортовану нафту (37,9–42,9 млн. т/рік) буде замінено водоростевим біодизелем протягом п'яти років. З добового «врожаю» сухої біомаси реально за добу з найпотужнішого на сьогодні ФБР можна одержати 6 т дизельного палива, а за рік — у середньому 2 200 т. Щорічно Україна імпортує 37,9–42,9 млн. т сирої нафти, з якої одержують приблизно 30 млн. т світлих нафтопродуктів. Отже, для покриття дефіциту водоростевим біодизелем потрібно закупити $30\,000\,000 / 2\,200 = 13\,636$ установок (!), вартість яких 0,53 млн. дол. за кожну. Отже, треба знайти 7,2 млрд. дол. на закупівлю установок і ще третину від цієї суми витратити на транспортування, монтаж і запуск обладнання, ще половину — на будівельні роботи і створення інфраструктури. Якщо ж врахувати інфляцію (6%), то за 5 років впровадження технології потрібно витратити ~15 млрд. дол. Насправді ж ця сума буде ще більшою, оскільки, за даними АЕН, ціна повномасштабної установки продуктивністю 100 т сухої біомаси за добу становитиме 10 млн. дол. Установки вітчизняної фірми «Біодизель-Днепр» за розрахунками розробників будуть значно дешевшими — 4,5 млн.

грн (0,56 млн. дол.) за продуктивності 38 т сухої біомаси за добу [12] (тобто в 10 разів менше, що викликає сумнів), але і в цьому разі капіталовкладення становитимуть мільярди доларів. Слід взяти до уваги, що для тризмінного обслуговування однієї установки потрібен штат не менше 15–20 працівників, тобто для обслуговування 5–13 тис. установок необхідно задіяти 75–260 тис. робітників та ІТР. Зауважимо також, що для обслуговування всіх шести нафтопереробних заводів України задіяно не більше 3–7 тис. працівників. Якщо ж є наміри замінити й імпортний природний газ, то всі цифри потрібно збільшити ще в 2,6 раза.

Найімовірніше, водоростевий біодизель буде становити невелику, хоча й важливу частку в українській енергетиці, а основним джерелом енергії на найближчі десятиріччя залишатимуться природний газ, нафтові вуглеводні, вугілля, гідроенергія та ядерне паливо.

Автор висловлює подяку представникові фірми АЕН в Україні і Росії Анатолію Юшину за надані фотоматеріали та допомогу в підготовці статті.

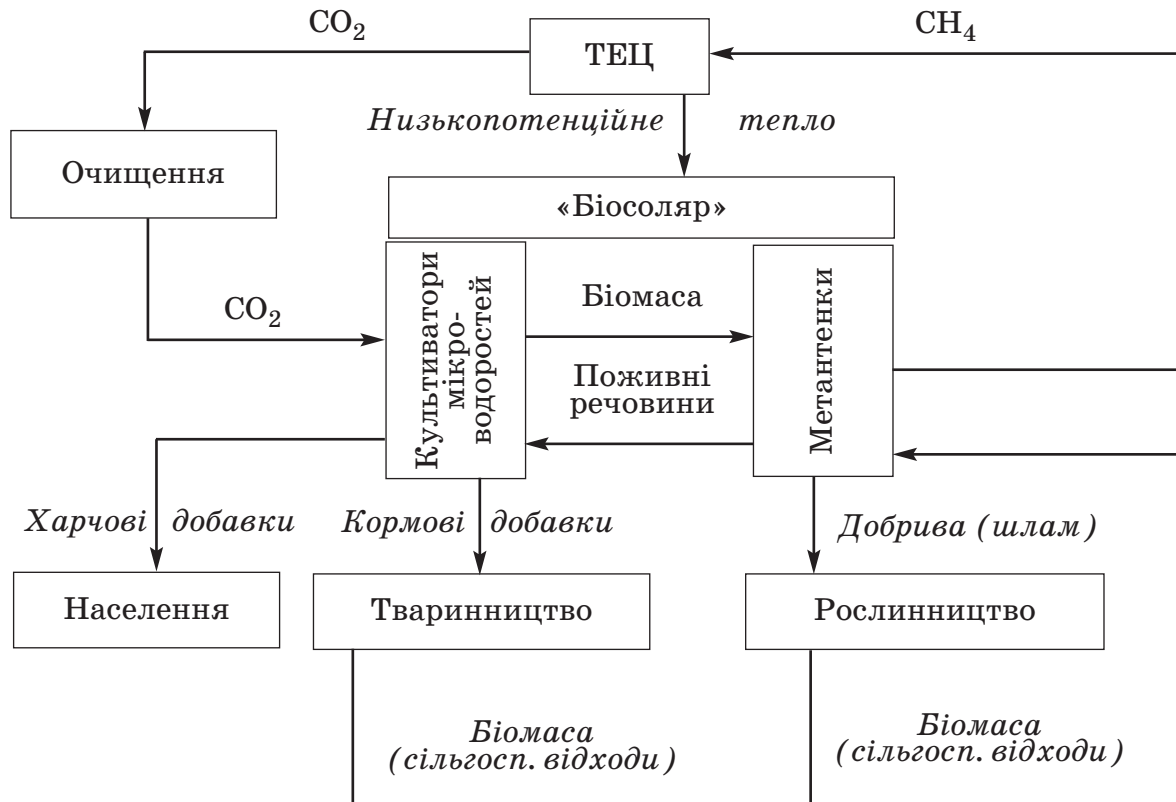


Рис. 24. Схема гібридної енергосистеми «Біосоляр — ТЕЦ-26»

ЛИТЕРАТУРА

1. *Донецкий* инновационный центр. Каталог проектов. — www.dic.ucoz.ua.
2. *Sheehan J., Dunahay T., Benemann J., Roessler P.* A Look Back at the U.S. Department of Energy's Aquatic Species Program — Biodiesel from Algae. — National Renewable Energy Laboratory, 1998. — 328 p.
3. *Tredici M. R.* Photobioreactors / Encyclopedia of bioprocess technology: fermentation, biocatalysis and bioseparation. — New York: Wiley-Interscience, 1999. — P. 395–419.
4. *Spolaore P. et al.* Commercial Applications of Microalgae // J. Biosci. Bioengineering. — 2006. — V. 102. — P. 87–96.
5. *Handbook of microalgal culture.* — New York: Wiley-Blackwell, 2003. — 584 p.
6. *Ugwu C. U. et al.* Photobioreactors for mass cultivation of algae // Bioresource Technology. — 2008. — V. 99. — P. 4021–4028.
7. *Pulz O.* Photobioreactors: production systems for phototrophic microorganisms // Appl. Microbiol. Biotechnol. — 2001. — V. 57. — P. 287–293.
8. *Складнев Д. А.* Очерк эволюции фотобиореакторов. — <http://www.cbio.ru/article.php?storyid=2880>.
9. *К вопросу* фундаментальной основы здоровья. — Академия Энергии Жизни Свет. — <http://www.a-svet.ru/articles/biocluster/k-voprosu-fundament>.
10. *Интернет-журнал «Коммерческая биотехнология».* — <http://www.cbio.ru/> (по материалам <http://www.membrana.ru/>).
11. *Рустамов Н. А.* Биомасса как источник энергии // Энергия: Экономика. Техника. Экология. — 2005. — № 6. — С. 20–28.
12. *Семенов В. Г.* Производство биодизельного топлива из масла микроводорослей. — <http://www.abercade.ru/research/analysis/2519.html>.

ФОТОБИОРЕАКТОРЫ

Ю. И. Сидоров

Национальный университет
«Львовская политехника», Львов

E-mail: sydorowy@rambler.ru

Рассмотрено современное состояние конструирования лабораторных, пилотных и промышленных фотобиореакторов (ФБР). Показана эволюция конструкций лабораторных ФБР — от чашки Петри, пробирки или колбы, от плоской конструкции, которые освещаются извне, к среде, содержащей светодиода. Отмечено, что возможность искусственного выращивания некоторых видов водорослей с высоким содержанием липидов, из которых можно получать так называемый биодизель, дала толчок развитию промышленных ФБР. Конструкции этих ФБР также прошли эволюционный путь от открытых теплых водоемов до закрытых емкостных и трубчатых аппаратов. Считают, что массовое производство водорослевого биодизеля может быстро решить энергетические проблемы Украины, однако достигнутый на сегодня мировой уровень производительности существующей промышленной аппаратуры и приведенные в статье простые экономические расчеты не дают основания утверждать, что в ближайшем будущем водорослевое биодизельное топливо может кардинально решить энергетические проблемы нашей страны.

Ключевые слова: фотобиореактор, конструкция, водорослевое биодизельное топливо.

PHOTOBIOREACTORS

Yu. I. Sidorov

«Lviv Polytechnica» National University, Lviv

E-mail: sydorowy@rambler.ru

The modern state of constructing laboratory, pilot and industrial photobioreactors (PBI) is considered. The evolution of constructions of laboratory PBI double-dish, test tube or retort, from a flat construction, that are lighted up from outside, to the environment that contains light-emitting diodes is shown. It is pointed out that possibility of the artificial growing of some types of water-plants with high content lipids from which it is possible to get the so-called biodiesel gave a shove to development of industrial PBI. The constructions of these PBI also passed an evolutionary way from the opened warm reservoirs to the closed capacity and tubular apparatus. It is considered, that the mass production of water-plant biodiesel can quickly work out the power problems of Ukraine, however the world level of the productivity of present industrial apparatus and simple business calculations resulted in the article does not allow to assert that in the near future a water-plant biodiesel fuel can cardinally work out the power problems of our country.

Key words: photobioreactor, construction, water-plant biodiesel fuel.