

ISSN 0554-2081. Харчова промисловість. 2000. Вип. 45  
УДК 581.1

**А.В. КОТИНСЬКИЙ**

**А.І. САЛЮК**, кандидат технічних наук

Український державний університет харчових технологій

**О.Ф. НІКУЛІН**, кандидат технічних наук

Міністерство промислової політики

#### **КУЛЬТИВУВАННЯ МІКРОВОДОРОСТЕЙ РОДУ SPIRULINA**

**(Перше повідомлення)**

---

*Стаття присвячена актуальній темі – методам культивування спіруліни. Проаналізовано існуючі методи промислового культивування мікробіодорості Spirulina: у відкритих системах та закритих. Розглянуто недоліки і переваги цих методів. Встановлено, що найперспективнішим є культивування у закритих системах з використанням площинних фотореакторів. Дано загальний опис розробленого нами площинного фотобіореактора закритого типу для вирощування спіруліни, а також його переваги перед звичайними трубчастими фотореакторами.*

Промислове культивування водоростей є одним із реальних методів їх раціонального використання і основним шляхом здійснення керованого фотобіосинтезу у виробничих масштабах. Вихід біомаси з одиниці освітленої поверхні значною мірою визначається добором високопродуктивних штамів водоростей, які можуть бути отримані як селекцією, так і внаслідок інтродукції нових форм, а також прогрес-

© Котинський А.В., Салюк А.І., Нікулін О.Ф., 2000

сивною технологією вирощування, що передбачає й тип промислової установки.

В останні роки помітно посилюється пошук видів водоростей, перспективних для інтенсивного вирощування. Особливою увагою дослідників користуються види роду *Spirulina Turp.* Ця синьо-зелена водорість з давніх часів використовується аборигенами ряду районів Центральної Африки (Республіка Чад), Південної Америки, Мексики (озеро Тексоко) та Азії в їжу. Одержання біомаси спіруліни в контрольованих умовах є економічно вигідним, якщо правильно підходити до справи. Однак в Україні розроблення та впровадження високоефективних технологій масового вирощування цієї культури ще не набули достатнього поширення. При організації промислового мікробіологічного виробництва велика увага приділяється вибору методу культивування. Промислове культивування спіруліни відбувається переважно у відкритих і закритих системах.

**1. Культивування у відкритих системах.** Умови культивування мікроводоростей у відкритих системах (водоймах, лагунах, басейнах тощо) близькі до природного середовища їх існування [4]. Облаштування таких водойм можна змінювати, але найчастіше масу перемішують гребними лопатами типу «мірошницьких» на глибині 15...20 см або ще глибше. Оскільки на такій глибині не вистачає світла, то природно, що клітини спіруліни освітлюються нерівномірно і, відповідно, їхня продуктивність є низькою. Крім того, культивування у відкритих системах пов'язане зі значними втратами води, що випаровується, із витоком в атмосферу відносно дорогого  $\text{CO}_2$ , а також із постійною небезпекою забруднення й інфікування. Культура характеризується низьким коефіцієнтом, для її виробництва потрібні великі площі. До недоліків такого способу вирощування продуцента можна віднести також низьку питому продуктивність процесу і нестандартність одержуваного продукту. Мінливі погодні умови є причиною того, що в системах відкритого типу неможливо тривалий час знімати стабільний врожай і досягти належної якості кінцевого продукту.

Застосування відкритих систем (відкриті басейни, установки лоткового типу, фотобіореактори різноманітних конструкцій) для великомасштабного виробництва спіруліни виправдане тоді, коли створено умови для негайного кормового і технічного використання одержаної біомаси. Експлуатація їх допускається в екологічно чистих регіонах традиційного масового розвитку спіруліни в природних умовах, де забезпечуються протягом року оптимальні умови вирощування (тип води, величина рН, фотоперіод, рівень сонячної інсоляції й інші чинники) і пристосованість штаму до середовища, що «захищає» культуру від контамінації іншими організмами-аборигенами. Технічне облашту-



тування таких установок може бути досить складним, але все-таки воно набагато простіше, ніж системи закритого типу для культивування мікроводоростей.

Культивування водоростей у лоткових системах в умовах закритого ґрунту (теплицях, оранжереях) зумовлене помірним кліматом середньої смуги. Це пов'язано з необхідністю підтримувати температуру, близьку до оптимальної, за допомогою максимально можливого ізолювання робочого об'єму установки від навколишнього середовища, тобто відносної її герметизації. При цьому з'явилася можливість використовувати як природне, так і штучне освітлення для створення потрібного світлового режиму.

Цей метод функціонує в тепличних комплексах. Процес вирощування здійснюється у спеціальних лотках, розміщених у теплиці. Оптимальною установкою у цьому випадку може бути лотковий фотореактор каскадного типу [2], що забезпечує порівняно сприятливі умови для вирощування спіруліни, можливість керування деякими параметрами культивування (температура, освітленість, вміст  $\text{CO}_2$  у середовищі та швидкість потоку, а також товщина прошарку суспензії). Проте конструкція цієї установки, як і подібних, не забезпечує потрібної стерильності культивування. При цьому випаровується вода, що призводить не тільки до зменшення рівня суспензії в лотках, а й до неконтрольованих втрат теплоти, збільшення вологості повітря, посилення контамінації культури грибами, водоростями та іншими організмами.

**2. Культивування водоростей у закритих системах.** В ареалах нетрадиційного поширення спіруліни в природі, у першу чергу для харчового, лікувально-профілактичного і нативного фармакологічного застосування, масове вирощування її біомаси має здійснюватись у закритих фотобіореакторах з точним дотриманням вимог мікробіологічного виробництва.

Технологія вирощування спіруліни, добре відпрацьована для культиваторів відкритого типу, не може бути адаптована до умов середньої смуги, де її цілорічне промислове вирощування можливе лише в закритих апаратах із штучною підтримкою температурного і світлового режимів на оптимальному рівні. У відкритих водоймах при мінливій інтенсивності освітлення продуктивність мікроводоростей нижча, ніж вона могла б бути при оптимальному освітленні, якого можна досягти у фотореакторах закритого типу.

Відомо декілька типів закритих фотобіореакторів, що набули найбільшого поширення [1], [3], [7], [9]. Це фотобіореактори у вигляді плоскопаралельних кювет (системи з плоских камер), трубчасті реактори (трубчасті системи) різноманітних конфігурацій, фотобіореакто-

ри на основі коаксіальних циліндрів, у яких культура міститься в кільцевому зазорі між циліндрами, великомісткі апарати із введеними в середину джерелами світла, купольні, а також фотобіореактори на основі звичайних ферментерів.

Закриті системи дають змогу надійно регулювати параметри культивування і в такий спосіб оптимізувати ріст водорості. Проте збільшення обсягу закритих контейнерів неминуче спричинює труднощі з адекватним освітленням (тобто рівномірним освітленням популяції клітин спіруліни в усьому об'ємі суспензії), що обмежує накопичення біомаси вже при об'ємах порядку 50...100 л [9]. Однак у сучасних умовах цей недолік усувається за допомогою подачі світла світловодами [3]. Принцип трубчастого реактора використовується при розробленні замкнутих або майже замкнутих контурів для культивування спіруліни у пластикових мішках або у скляних чи пластикових трубах.

У 80-ті роки почали інтенсивно конструювати фотобіореактори закритого типу, що дають можливість контролювати помітно більшу кількість параметрів вирощування. Вони мають такі переваги: зменшена небезпека контамінації; відтворювані умови культивування; контрольовані гідродинаміка і температура; зручна конструкція.

Використання трубчастих фотореакторів дає змогу здійснювати процес культивування без неконтрольованого лімітування чи інгібування, збільшувати масштабність за допомогою послідовного з'єднання трубчастих змійовикових елементів, максимальний розмір яких залежить від питомої швидкості росту культури [3]. До переваг такої конструкції реактора можна віднести також можливість очищення внутрішніх стінок змійовика від обростання культурою за допомогою поролонових пижів.

Незважаючи на названі переваги такого реактора, в його конструкції є й недоліки, зокрема утворення замкнутого повітряного простору в горизонтальних частинах трубок, у якому накопичується кисень, що виділяється спіруліною.

Приблизно з 1990 р. були розроблені і пройшли випробування різні закриті або майже закриті системи. Переважна більшість із них побудована за принципом трубчастих або компактних площинних фотобіореакторів.

Продуктивність у ферментерах із перемішуванням, що оснащені різноманітними освітлювальними системами або трубчастими лампами, в середньому становить 100...1000 мг/(л·добу). Очевидно, це верхня межа при відношенні робочої поверхні до об'єму реактора від 2 до 8 м<sup>-1</sup> [9]. Лабораторні установки з таким відношенням сприятливі для створення мініатюрних екосистем і для дослідження їх при варі-



юванні параметрів як за фізіологічними значеннями, так і за їх межами. Проте вони мало придатні для промислового культивування.

У фотобіореакторах трубчастого або площинного типу відношення поверхні до об'єму становить  $20 \dots 80 \text{ м}^{-1}$  [1]. Можна збільшити щільність клітин мікродоростей і концентрацію біомаси, зменшивши товщину шару суспензії до декількох сантиметрів або навіть міліметрів, що дасть можливість досягти продуктивності  $2 \dots 3 \text{ г сухої біомаси / л}$ .

Беручи до уваги той факт, що світло, яке є джерелом енергії для фотосинтезу, має бути постійно доступним його рецепторам у клітинах мікродоростей, доцільно конструювати плоску поверхню реактора зверненою до світла. Для цього зменшується діаметр труб біореакторів трубчастого типу [5] або створюються плоскі конфігурації [6], [8]. Порівняно з трубчастими фотобіореакторами реактори площинного типу компактніші і мають вище відношення поверхні до об'єму, що забезпечує краще використання світлової енергії. Вони також дають змогу досягти високої продуктивності біомаси і стерильності. Концепція використання плоских посудин для культивування фототрофних організмів досить стара, тому що цей принцип був реалізований при застосуванні простих кювет. Через невирішені проблеми швидкості витікання суспензії плоскі посудини з малою товщиною шару використовували в наукових дослідженнях, але не для промислового культивування. Рамос де Ортега був першим вченим, що застосував горизонтальні конструкції, організовані за принципом змійовика. Такі конструкції були потім удосконалені Х. Феллоуфілдом і О. Пульцом. Вертикальні плоскі конструкції, де потоки приводяться у рух аерліфтом, описані Ж. Бенеманном [5].

Ми розробили вертикальний площинний фотореактор закритого типу. Реактор влаштовано у вигляді змійовика, у якому середовище повністю рециркулює за допомогою аерліфта, постачання  $\text{CO}_2$  помірне і відбувається під час барботажу газоповітряною сумішшю. Установка пристосована для розміщення у закритих напівпідвальних термостатованих приміщеннях. У разі розміщенні на відкритому повітрі установка використовує сонячну радіацію. Реактор складається з трьох основних частин: плоскої структурованої порожнистої конструкції, товщина якої  $10 \dots 20 \text{ мм}$ , системи розподілення газоповітряної суміші для аерліфта та системи відведення повітря.

Кожна порожниста конструкція являє собою систему плоских посудин, що утворюють плоску стінку. Переріз кожної такої посудини, по можливості, має бути близьким до квадрата для створення кращих гідродинамічних показників. Змієподібний варіант потоку суспензії у стінках вважається найбільш придатним для масштабування фотобіореактора. Важливими технологічними моментами є спосіб

з'єднання стінок і підтримка потрібної освітленості. Від вибору взаємного розташування стінок залежить перемішування, перенасиченість киснем і щільність потоку квантів світла.

**Висновок.** Розроблений нами площинний фотобіореактор має такі значні переваги перед іншими закритими реакторами: зменшена небезпека контамінації, підтримка альгологічно чистих культур; відтворені умови культивування, контрольована гідродинаміка, зручна і проста конструкція; висока продуктивність; незначні витрати на споживання електроенергії (перемішування суспензії здійснюється аероліфтом); невелике відношення поверхні до об'єму; немає потреби створювати потужне освітлення; велика освітлена поверхня; можливість масштабування.