

СВІТЛОВИЙ СПЕКТР ПРИ ВИРОЩУВАННІ СПІРУЛІНИ

I. М. Голодний, кандидат технічних наук
e-mail: golodnyi@ukr.net

Анотація. Розглянуто енергетичну ефективність вибору світлового спектрального потоку при вирощуванні водорості спіруліни.

Ключові слова: водорості, вітаміни, спектр, світло, фотосинтез, енергетичний коефіцієнт корисної дії, довжина хвилі, фотосинтезно активна радіація

Фотосинтез і ріст мікрроводоростей залежать від таких основних факторів: освітлення, газове й мінеральне живлення, величина рН середовища та температура. Фотосинтезуючі мікроорганізми при культивуванні мають ряд важливих особливостей. Головна з них пов'язана зі специфікою поглинання клітинами фотосинтезноактивної радіації (ФАР), яка характеризується неоднорідністю як за інтенсивністю, так і за спектральним складом променевого потоку, що впливає на клітини суспензії, а також періодичними коливаннями цих параметрів у випадку перемішування освітлюваного шару суспензії.

Показник енергетичної ефективності процесу культивування мікрроводоростей визначають як енергетичний коефіцієнт корисної дії (ККД) фотобіосинтезу клітин, який є результатом відношення потенційної енергії ($Q_{орг.}$), накопиченої в органічних речовинах внаслідок росту клітин, і сумарної променевої енергії ($Q_{вик.}^{ФАР}$), використаної в процесах, які відбуваються після поглинання фотонів водоростями [1]. Згідно з цим визначенням, інтегральний ККД процесу фотобіосинтезу ($\eta_{фб}$) визначаємо відповідно до формули:

$$\eta_{фб} = Q_{орг.} / Q_{вик.}^{ФАР}$$

Умовно $\eta_{фб}$ можна розділити на ефективність, власне, фотосинтезу, тобто реакцій, які призводять в кінцевому результаті до накопичення енергії фотонів, та ефективність процесу біологічного окислення цих продуктів, тобто процесу дихання. Це можна записати у вигляді:

$$\eta_{фб} = Q_{фот.} / Q_{вик.}^{ФАР} - Q_{т.д.} / Q_{вик.}^{ФАР} = \eta_{фот.} - \eta_{т.д.},$$

де: $\eta_{фб}$ – енергетичний ККД фотосинтезу;

$Q_{фот.}$ – енергія накопичена первинними фотосинтетичними продуктами;

$\eta_{т.д.}$ – ККД процесу дихання;

$Q_{т.д.}$ – затрачена енергія при диханні в темноті.

Із літературних джерел відома методика теоретичної оцінки максимальних значень ККД фотосинтезу рослин, $\eta_{\text{фот.}}^{\text{max}}$. Згідно з дослідженнями, для відновлення однієї молекули вуглекислого газу до вуглецю необхідне поглинання двома фотосистемами рослин як мінімум 8 квантів ФАР (8Е радіації на 1 моль CO_2). Енергія 1Е ФАР радіації варіює від 75 (для опромінення з довжиною хвилі $\lambda = 380$ нм) до 40 ккал/моль (для $\lambda = 720$ нм). Для сонячного світла вона в середньому дорівнює 50 ккал/моль. Звідси, при 8-ми квантових витратах потрібно 400 ккал/моль енергії для відновлення вуглекислоти. Для глюкози – найбільш стійкого фотосинтетичного продукту – теплота спалювання в розрахунку на 1 моль відновлюваного CO_2 , рівна 112,5 ккал. Звідси, теоретичний ККД фотосинтезу

$$\eta_{\text{фот.}}^{\text{max}} = 112,5/400 = 0,28.$$

Цей розрахунок потрібно розглядати як наближений. Насправді, вуглеводи типу моносахаридів є основними, але не єдиними. Крім того, можуть утворюватися азотисті сполуки, які також акумулюють додаткову частину енергії. У більшості відомих дослідів з вищими і нижчими рослинами в керованих умовах $\eta_{\text{фб}}$, як правило, не перевищує 24...26 %. Сільськогосподарські рослини в середньому засвоюють 0,5...1,5 % енергії природного потоку ФАР, що падає на них [1].

Мета досліджень – підвищення ефективності вирощування водорості спіруліни.

Матеріали та методика досліджень. Дослідження спектра поглинання водоростевою суспензією проводили за допомогою колориметра КФК-2 та

комп'ютерного статистичного опрацювання експериментальних даних.

Результати досліджень. Завдання оптимізації світлотехнічних параметрів опромінюваних установок для зниження енерговитрат виробництва є актуальним для всіх світлолюбних культур. Наприклад, задля відпрацювання обґрунтованих вимог до спектра опромінення в межах ФАР для ценозу огірків і томатів у тепличних умовах проведені фотобіологічні експерименти з використанням серії селективних металогалогенних ламп. При цьому межа ФАР розділялася на три спектральні діапазони: 400...500 нм (синій), 500...600 нм (зелений) і 600...700 нм (червоний). Результати досліджень свідчать [2], що найкращий вихід продукції для промислової технології забезпечує спектральне співвідношення:

- при вирощуванні огірків

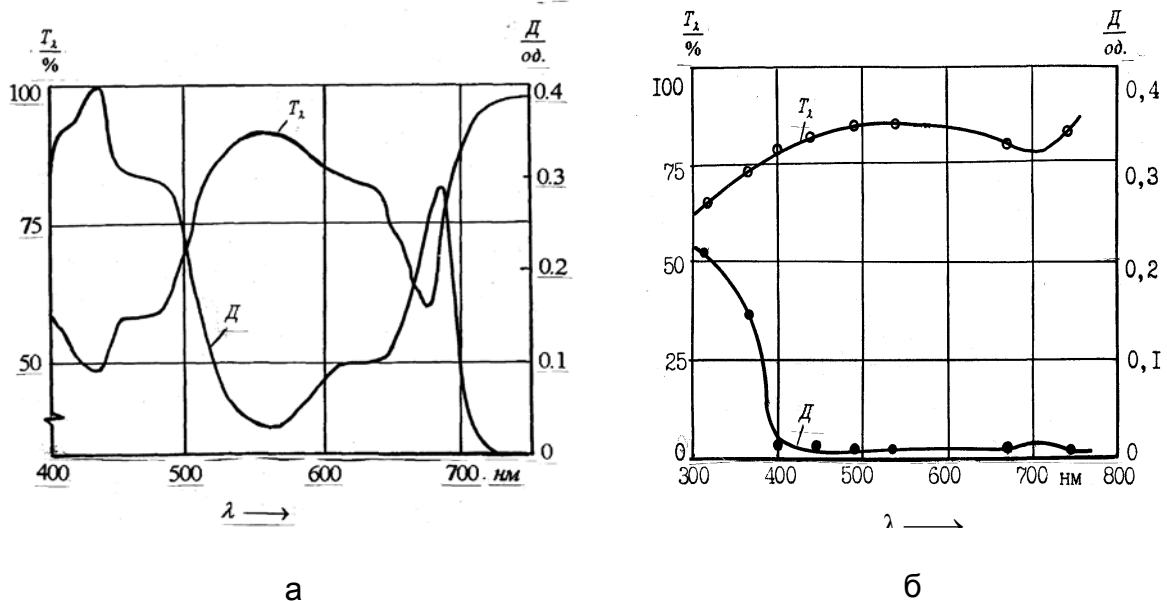
$$E_{\text{с}}:E_{\text{з}}:E_{\text{ч}} = (15...20)\% : (35...45)\% : (40...45)\%;$$

- при вирощуванні томатів

$$E_{\text{с}}:E_{\text{з}}:E_{\text{ч}} = (10...20)\% : (15...20)\% : (60...75)\%.$$

Під час розгляду світлових режимів, які складаються в суспензії мікроводоростей при їх опроміненні різними спектральними потоками, встановлено, що чітких меж фотосинтезноактивної радіації не визначено. Більшість вчених вважають межею ФАР спектральний діапазон 380...710 нм. Поглинальна властивість мікроводоростей визначається складом і концентрацією пігментів у клітинах. Спектри поглинання суспензією мікроводоростей мають чітко виражені полоси поглинання в синій і червоній межах. Тому послаблення світла, яке проникає в глибину суспензії, відбувається нерівномірно. Спектри поглинання та пропускання, на прикладі суспензії хлорели, подано на рис. а.

В умовах безперервного культивування водорості спіруліни за температури суспензії 32...36 °С; величині рН культурального середовища 8...10 одиниць максимальної швидкості росту клітин було досягнуто при освітленні $E_0 = 100...200 \text{ Вт/м}^2$ ФАР. При подальшому збільшенні E_0 швидкість росту зменшувалася [1]. Таким чином, світлова залежність швидкості росту для спіруліни має широку межу оптимальних значень E_0 , що дуже важливо для розробки нових фотореакторів мікроводоростей при розрахунках рівня освітлення суспензії.



а
б
Оптичні характеристики хлорели (а) [1] та спіруліни (б)

Дослідження оптичних характеристик суспензії спіруліни проводили за допомогою колориметра КФК-2. Колориметр фотоелектричний концентраційний призначений для вимірювання на окремих дільницях діапазону хвиль 315...580 нм, які виділені світлофільтрами, коефіцієнтів пропускання та поглинання (оптичної густини) рідких розчинів і твердих тіл, а також визначення концентрацій речовини в розчинах методом побудови градуированих графіків.

Границі виміру на КФК-2 (з похибкою $\pm 1\%$) коефіцієнтів пропускання від 100 до 1%, оптичної густини – від 0 до 2. Додаткова похибка приладу від відхилення напруги мережі на $\pm 22 \text{ В}$ від номінального значення 220 В становить не більше, ніж 0,3%.

Джерело випромінювання – лампа галогенна малогабаритна КГМН 6,3-15. Приймач випромінювання фотоелемент Ф-26 для роботи в спектральному діапазоні від 315 до 540 нм, фотодіод ФД-24 К від 590 до 980 нм. Реєструючий прилад – мікроамперметр типу М 1792 із шкалою, яка цифрована в коефіцієнтах пропускання T_λ і оптичної густини D .

Принцип виміру коефіцієнта полягає в тому, що на фотоприймач спрямовуються по черговому світлові потоки – повний $F_{\Sigma\lambda}$ та потік F_λ , що пройшов через досліджуване середовище і визначається співвідношенням цих потоків. Відношенням потоків є коефіцієнт пропускання T_λ досліджуваного розчину:

$$T_\lambda = \frac{F_\lambda}{F_{\Sigma\lambda}} \cdot 100\%$$

На спектрофотометрі це співвідношення визначали так. Спочатку в світловий потік встановлювали кювету з контрольним розчином, яким є джерельна вода. Зміною чутливості приладу добивалися, щоб відрахування за шкалою пропускання спектрофотометра було рівне 100. Таким чином, повний світловий потік $F_{\Sigma\lambda}$ умовно береться за 100 %. Потім у світловий потік встановлювали кювету з суспензією спіруліни. Отримане відрахування за шкалою коефіцієнтів пропускання приладу буде, відповідно, F_λ . Тобто, коефіцієнт пропускання суспензії спіруліни у відсотках буде дорівнювати другому відрахуванню за шкалою коефіцієнтів пропускання

$$T_\lambda = \frac{F_\lambda}{F_{\Sigma\lambda}} \cdot 100\% = \frac{F_\lambda}{100} \cdot 100\% = F_\lambda, \%$$

Оптичну густину D визначали за формулою:

$$D = -\lg \frac{F_\lambda}{F_{\Sigma\lambda}} = \lg \frac{T_\lambda}{100} = 2 - \lg T_\lambda.$$

Результати досліджень наведені на рис. 1, б. Як видно з графіка, спектри поглинання суспензією спіруліни, аналогічно суспензії хлорели, мають виражені полоси поглинання в синіх і червоних межах.

Висновки

При освітленні білим світлом спіруліни, а також інших мікродоростей, які знаходяться на глибині, клітини фотосинтезують практично при зеленому світлі, а на поверхні – синьому й червоному, що важливо знати при виборі ламп із певними спектральними характеристиками для опромінення суспензії.

Список літератури

1. Беянин В. Н. Энергетика фотосинтезирующей культуры микродоростей / В. Н. Беянин, Ф. Я. Сидько, А. П. Тренкеншу. – Новосибирск : Наука, 1980. – 136 с.

2. Прикупец Л. Б. Оптимизация спектра излучения при выращивании овощей в условиях интенсивной светокультуры / Л. Б. Прикупец, А. А. Тихомиров // Светотехника, 1992. – С. 5–7.

СВЕТОВОЙ СПЕКТР ПРИ ВЫРАЩИВАНИИ СПИРУЛИНЫ

И. М. Голодный

Аннотация. *Рассмотрена энергетическая эффективность выбора светового спектрального потока при выращивании водоросли спирулины.*

Ключевые слова: *водоросли, витамины, спектр, свет, фотосинтез, энергетический коэффициент полезного действия, длина волны, фотосинтезноактивная радиация*

COLOR SPECTRUM AT CULTIVATION SPIRULINA

I. Golodnyi

Annotation. *We consider the energy efficiency of the choice of the color spectral flux for growing spirulina algae.*

Key words: *algae, vitamins, spectrum, light, photosynthesis, energy efficiency, wavelength, photosynthesis active radiation*