

УДК 535.243.2

## **ОБГРУНТУВАННЯ ФОРМИ МІКРОВОДОРОСТЕВИХ УСТАНОВОК**

*І. М. Голодний, кандидат технічних наук, доцент*

*Національний університет біоресурсів і природокористування України*

*e-mail golodnyi@ukr.net*

**Анотація.** Нині в біологічних експериментах і промисловому вирощуванні широко вивчають високопоживні водорості, такі як хлорела і спіруліна. Їх використовують як кормову і харчову добавку. При створенні певних умов їх можна культивувати цілорічно, отримуючи біомасу культури.

Мета дослідження – підвищення ефективності вирощування водоростей.

При дослідженнях була використана теорія поглинання світлової енергії водоростевими суспензіями.

Встановлено, що ефективність мікроводоростевих установок визначається такими критеріями, як швидкість росту і енергетична ефективність фотосинтезуючої клітини культури, визначальними чинниками яких є освітленість, концентрація CO<sub>2</sub> і мінеральних речовин у живильному середовищі, температура і перемішування суспензії. Фотосинтез і ріст водоростей в основному обмежується світловою енергією і концентрацією вуглекислого газу в живильному середовищі. Поглинання світлової енергії суспензією хлорели підпорядковується закону Бугера-Лемберта-Беєра. Із цього випливає, що при одній і тій же освітленості продуктивність елементарної частини в формі кулі в 6 разів, а в формі циліндра в 4 рази більша, ніж елементарного шару. Реально ці співвідношення для плоскої, циліндричної і кулеподібної установки мають менші значення. Це пов'язано з експоненціальною залежністю поглинання світлової енергії.

Найближчим аналогом для установок з вирощування мікроводоростей зі сферичною поверхнею, яка є найефективнішою, можуть бути установки з розділенням суспензії на краплі, у вигляді дощу, при якому краплі у вільному падінні приймають вигляд маленьких кульок і одночасно освітлюються

**Ключові слова:** мікроводорості, суспензія, освітлення, установки для вирощування мікроводоростей, коефіцієнт корисної дії фотосинтезу

**Актуальність.** Нині в біологічних експериментах і промисловому вирощуванні широко вивчають високопоживні водорості, такі як хлорела і спіруліна. Хлорела вміщує 50...55 % (спіруліна до 70 %) білку, 30...35 % вуглеводів, 7...10 % жирів, унікальний набір амінокислот і вітамінів. Їх використовують як кормову і харчову добавку. При створенні необхідних умов їх можна культивувати цілорічно, отримуючи біомасу культури.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Для вирощування мікроводоростей існує два види установок – закриті і відкриті [1]. Відкриті установки поділяють на глибинні і неглибинні. Глибинні установки мають вигляд басейну або ванну будь якої форми. Глибина шару в них 25...30 см, режим перемішування суспензії барботажем, насосами, мішалкою. Неглибинні установки мають форму лотків, каскадів, неглибоких ванн. Глибина шару суспензії 5...25 см. Недоліками відкритих установок є порівняно більші площі під установками, мала густина суспензії, велика імовірність зараження культури, підвищені витрати вуглекислоти. Закриті культивацийні установки ізольовані від навколишнього середовища. Вони змонтовані з поліетиленових труб, розміщених горизонтально чи вертикально і замкнених в кільце, що дозволяє підвищити врожайність (в основному за рахунок більш ефективного використання  $CO_2$  на 20 %), зменшити забруднення культури на 30 % та втрат води на випаровування.

У цій роботі розглядається процес вирощування мікроводоростей за умов ефективного освітлення суспензії, на основі чого проводиться теоретичне обґрунтування найбільш прийнятної форми освітлювальної поверхні установки.

**Мета дослідження** – підвищення ефективності вирощування водоростей.

**Матеріали і методи дослідження.** При дослідженнях використана теорія поглинання світлової енергії водоростевими суспензіями.

**Результати досліджень.** Ефективність мікроводоростевих установок визначається такими важливими критеріями, як швидкість росту і енергетична ефективність фотосинтезуючої клітини культури, визначальними чинниками яких є освітленість, концентрація  $CO_2$  і мінеральних речовин в живильному середовищі, температура і режим перемішування суспензії. Фотосинтез і ріст водоростей в основному обмежується світловою енергією і концентрацією вуглекислого газу в живильному середовищі.

Приріст біомаси в об'ємі мікрководоростевої установки за час  $dt$  пропорційний інтенсивності освітлення з урахуванням процесу дихання визначається [2]:

$$dG = \gamma_P SE dt - \gamma_D G dt, \quad (1)$$

де  $\gamma_P$  – коефіцієнт пропорційності між кількістю поглинутої променевої енергії і приростом біомаси, який визначається експериментально, кг/(Вт·доба);  $S$  – поверхня суспензії, м<sup>2</sup>;  $E$  – поглинуте опромінення, Вт/м<sup>2</sup>;  $\gamma_D$  – коефіцієнт дихання, 1/доба;  $G$  – кількість біомаси, кг.

Поглинання світлової енергії суспензією хлорели підпорядковується закону Бугера-Лемберта-Беєра [2]:

$$E = E_0(1 - e^{-k_{II}zG/V}), \quad (2)$$

де  $E_0$  – світлова енергія на поверхні суспензії, Вт/м<sup>2</sup>;  $k_{II}$  – коефіцієнт поглинання суспензії, м<sup>2</sup>/кг;  $V$  – об'єм суспензії, м<sup>3</sup>;  $z$  – товщина шару суспензії, м.

Коефіцієнт поглинання суспензії світлової енергії залежить від питомого коефіцієнта поглинання білого світла хлорофілом  $l$  і відносного вмісту хлорофілу в клітинах хлорели  $\beta$  [2]:

$$k_{II} = l\beta. \quad (3)$$

Відносний вміст хлорофілу в клітинах хлорели залежить від середнього опромінення і визначається як аналітично, так і графічно [2].

Тоді швидкість росту біомаси може бути визначена:

$$\vartheta = \frac{dG}{dt} = \gamma_P SE_0(1 - e^{-lzG/V}) - \gamma_D G. \quad (4)$$

При цьому питома швидкість росту:

$$\mu = \frac{V}{G} = \frac{\gamma_P E_0}{\bar{x}} = \frac{\gamma_P E_0}{\bar{x}} (1 - e^{-l\beta\bar{x}}) - \gamma_D, \quad (5)$$

де  $\bar{x} = \frac{G}{V}$  – поверхнева концентрація біомаси, кг/м<sup>2</sup>.

З рівняння (5) видно, що при незмінному поверхневому освітленні збільшення швидкості росту досягається при зменшенні товщини шару.

Граничним випадком [3] є розділення суспензії на безкінечне число безкінечних тонких шарів.

$$\lim_{\bar{x} \rightarrow 0} \frac{E_i}{\bar{x}} (1 - e^{-l\beta\bar{x}}) = l\beta E_i, \quad (6)$$

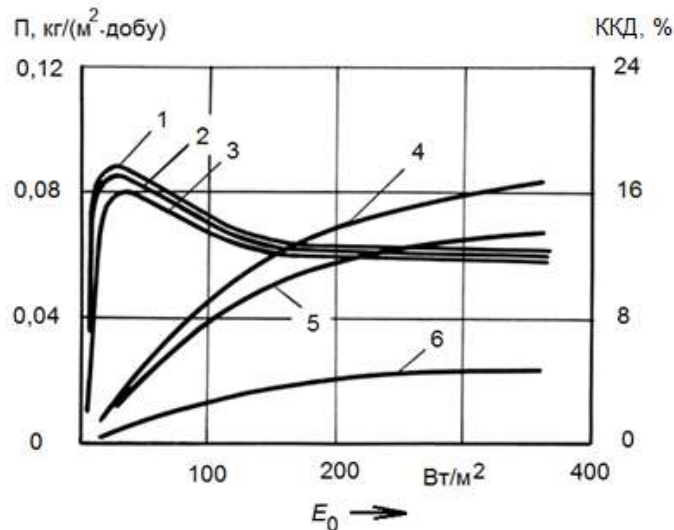
де  $E_i$  – світлова енергія  $i$ -го шару.

Аналогічно знаходимо для безкінечного числа безкінечно малих циліндрів і куль:

$$\lim_{\bar{x} \rightarrow 0} \frac{E_i}{\bar{x}} (1 - e^{-4l\beta\bar{x}}) = 4l\beta E_i;$$

$$\lim_{\bar{x} \rightarrow 0} \frac{E_i}{\bar{x}} (1 - e^{-6l\beta\bar{x}}) = 6l\beta E_i.$$

Із цього випливає, що при одній і тій же освітленості продуктивність елементарної частки в формі кулі в 6 разів, а в формі циліндра в 4 рази більша, ніж елементарного шару. Реально ці співвідношення для плоскої, циліндричної і кулеподібної установки мають менші значення (рисунок). Це пов'язано з експоненціальною залежністю поглинання світлової енергії.



**Рис. Залежність продуктивності  $P$  і коефіцієнта корисної дії фотосинтезу клітин хлорели від світлової енергії опромінення на поверхні суспензії при  $\bar{x} = 0,2 \cdot 10^{-2}$  кг/м<sup>2</sup>:**

1, 2, 3 – коефіцієнт корисної дії, відповідно, сферичної, циліндричної і плоскої установки, 4, 5, 6 – продуктивність, відповідно, сферичної, циліндричної і плоскої установки

На практиці створення таких установок пов'язане з технічними складнощами, найближчим аналогом для сферичної поверхні, самої ефективною, може бути розділення суспензії на краплі, у вигляді дощу, при якому краплі у вільному падінні приймають вигляд маленьких кульок і одночасно освітлюються.

### **Висновки і перспективи**

Теоретичними дослідженнями встановлено, що при одній і тій же освітленості продуктивність елементарної кулі в 6 разів, а циліндра в 4 рази більша, ніж елементарного шару.

Найближчим аналогом для установок по вирощуванню мікроводоростей зі сферичною поверхнею, яка є найефективнішою, можуть бути установки з розділенням суспензії на краплі, у вигляді дощу, при якому краплі у вільному падінні приймають вигляд маленьких кульок і одночасно освітлюються.

### **Список літератури**

1. Анисимов О.А. Промышленные установки для культивирования микроводорослей / О. А. Анисимов, Ю. А. Бернович, М. Д. Бородин и др. – М.: ОНТИТЭИмикробиопром, 1973. – 55 с.
2. Смирнов И. В. Математический анализ массового культивирования хлореллы в биологических культиваторах несимметричного профиля / И. В. Смирнов // Проблемы космической биологии. – 1966. – Вып. 1. – Т. 8. – С. 432-448.
3. Штоль А.А. Расчет и конструирование культиваторов для одноклеточных водорослей / А. А. Штоль, Е. Г. Мельников, Б. Г. Ковров. – Красноярск: Наука, 1976. – 212 с.

### **References**

1. Anisimov, O. A., Bernovich, Yu. A., Borodin, M. D. (1973) Promyshlennye ustanovky dlia kultyvyrovanyia mykrovodoroslei [Industrial plants for the cultivation of microalgae]. Moskow: ONTIEImikrobioprom, 55.
2. Smirnov, I.V. (1966)/ Matematycheskyi analiz massovoho kultyvyrovanyia khloreilly v byolohycheskykh kultyvatorakh nesymmetrychnoho profylya [Mathematical Analysis of Mass Cultivation of Chlorella in Biological Cultivators of an Unsymmetric Profile]. Problems of Space Biology, iss. 1, vol. 8, 432-448.

3. Shtol, A. A., Melnikov, E. G., Carpet, B. G. (1976). Raschet y konstruyrovanye kultyvatorov dlia odnokletochnykh vodoroslei [Calculation and design of cultivators for unicellular algae]. Krasnoyarsk: Nauka, 212.

## ОБОСНОВАНИЕ ФОРМЫ МИКРОВОДОРОСЛЕВЫХ УСТАНОВОК

*И. М. Голодный*

**Аннотация.** *В настоящее время в биологических экспериментах и промышленном выращивании широко изучается использование высокопитательных водорослей, таких как хлорелла и спирулина. Их используют как кормовую и пищевую добавку. При создании необходимых условий, их можно культивировать круглогодично, получая постоянно биомассу культуры.*

*Цель исследования - повышение эффективности выращивания водорослей.*

*При исследованиях использована теория поглощения световой энергии водорослевыми суспензиями.*

*Установлено, что эффективность микроводорослевых установок определяется такими важными критериями, как скорость роста и энергетическая эффективность фотосинтезирующей культуры клеток, определяющими факторами которых являются: освещенность, концентрация CO<sub>2</sub> и минеральных веществ в питательной среде, температура и перемешивание суспензии. Фотосинтез и рост водорослей в основном лимитируется световой энергией и концентрацией углекислого газа в питательной среде. Поглощение световой энергии суспензией водоросли подчиняется закону Бугера-Лемберта-Беера. Из этого следует, что при одной и той же освещенности производительность элементарного шара в 6 раз, а цилиндра в 4 раза больше, чем элементарного слоя. Реально эти соотношения для плоской, цилиндрической и шарообразной установки имеют меньшие значения. Это связано с экспоненциальной зависимости поглощения световой энергии.*

*Ближайшим аналогом для установок по выращиванию микроводорослей со сферической поверхностью, самой эффективной, может быть установка с разделением суспензии на капли, в виде дождя, при котором капли в свободном падении принимают вид маленьких шаров и одновременно освещаются.*

**Ключевые слова:** *микроводоросли, суспензия, освещение, установки по выращиванию микроводорослей, коэффициент полезного действия фотосинтеза*

## THE SUBSTANTIATION OF THE MICROWATER EQUIPMENT FORM

*I. Golodnyi*

**Abstract.** *Widely studied in biological experiments and industrial growing a highly algae such as spirulina and chlorella. They are used as feed and food additives. When you create the necessary conditions, they can be cultivated year-round, getting constantly biomass crops.*

*The purpose of research - efficiency cultivation of algae.*

*In studies used the theory of absorption of light energy algal suspensions.*

*The efficiency of installations determined microalgae important criteria such as growth rate and energy efficiency of photosynthetic cell culture, which are the determining factors: light, CO<sub>2</sub> concentration and minerals in a nutrient medium, temperature and stirring suspension. Photosynthesis and growth of algae is mainly limited by light energy and carbon dioxide concentration in the culture medium. The absorption of light energy chlorella suspension is subject to the laws of Bouguer-Lambert-Beyer. It follows that the same illumination performance of the unit ball is 6 times, and the cylinder is 4 times greater than the basic layer. In fact the value for a flat, cylindrical and spherical plants have lower values. This is due to the exponential dependence of the absorption of light energy.*

*The closest analogue to facilities for growing algae with a spherical surface, most effective, can be setup division suspension to drops in the form of rain, where drops in free fall take the form of small balls, while illuminated.*

**Key words:** *microalgae, suspension, lighting, plants for growing microalgae, the efficiency of photosynthesis*