УДК 628.385

ОПТИМІЗАЦІЯ ЕНЕРГОВИТРАТ ПРОЦЕСУ КУЛЬТИВУВАННЯ МІКРОВОДОРОСТЕЙ

А. І. Чміль, доктор технічних наук, професор

Р.В. Білоус, студент магістратури

О.І. Возний, студент магістратури

Національний університет біоресурсів і природокористування України

e-mail: a.chmil@ukr.net

Анотація. *В останні роки в Україні, а також у багатьох країнах Європи, Азії і Америки широкого розвитку набуло масове культивування мікроводоростей з метою використання їх у народному господарстві. У цьому плані найбільший інтерес викликають хлорела і спіруліна.*

Велика кількість протеїнів, вітамінів і хлорофілу ставить хлорелу і спіруліну в один ряд з високопоживними кормами для тварин і птиці.

У природі мікроводорості дуже поширені, проте продуктивність їх низька. При створенні оптимальних умов вирощування вони можуть давати високі врожаї.

Дослідами встановлено, що основними параметрами, що обумовлюють інтенсивність вирощування водоростей, є: температура суспензії, режим опромінення, склад і концентрація живильного середовища, концентрація CO_2 в повітрі, що барботується.

Для оцінки енергетичної ефективності процесів культивування мікроводоростей на стічних водах, дослідження режимів температури і опромінення та їх оптимізації розроблений експериментальний культиватор глибинного типу. Характерною особливістю культиватора, що дає можливість підвищити його продуктивність, є застосування занурених рухомих джерел оптичного опромінення.

Проведені дослідження залежності швидкості росту мікроводоростей від температури суспензії.

Встановлено, що коливання температури суспензії біля оптимуму більше, ніж на $1^{\circ}C$, може призвести до значного зниження швидкості росту мікроводоростей. Так, при опроміненості 60 Вт/м^2 і температурі $36^{\circ}C$ швидкість росту зменшується на 8%, а при опроміненості 80 Вт/м^2 і температурі $37,5^{\circ}C$ - на 10% від свого максимального значення.

З метою дослідження системи термостабілізації були визначені: питомої потужності системи, необхідної для підтримання заданої температури суспензії; впливу добових витрат суспензії на потужність проточного водонагрівача; залежності тривалості нагрівання суспензії мікроводоростей від

потужності нагрівальних елементів проточного водонагрівача.

Експериментально встановлено, що при одних і тих самих значеннях опроміненості, частоти обертання джерел опромінення та густині біомаси, швидкість росту при використанні занурених ламп у 1,5-2,0 рази вище, ніж при опроміненні культури зовнішніми джерелами. Причому, чим вища частота обертання джерел, тим більша ця різниця.

Ключові слова: *культивування мікродоростей, енерговитрати, тваринницькі відходи*

Актуальність. Хлорела - одноклітинна зелена водорість шаровидної або еліпсоїдної форми розміром 0,005-0,010 мм. Живильний розчин, в якому розвиваються водорості, має вигляд зеленої зависі невидимих простим оком клітин.

Процес розмноження водоростей відбувається шляхом поділу мате-ринської клітини на 4, 8 і більше автоспор, які утворюють нові клітини і відразу ж починають активну життєдіяльність. Наприклад, деякі штами хлорели здатні подвоювати свою біомасу кожні три години.

Хлорела містить у сухій речовині понад 50% протеїну, 30% - вугле-воднів, 5 - жиру і 10% мінеральних солей. До складу клітин хлорели входять 23 амінокислоти, багато з яких є незамінними в живленні тварин. За вмістом каротину, якого в ній в 3 рази більше, ніж у трав'яній муці, хлорела перевищує всі рослинні корми. За вмістом вітаміну С вона не поступається лимону. Спіруліна багатша на протеїн (64-68%) при значно меншій кількості жирів(2-3%) і вуглеводнів (16-18%).

Дослідження показали, що добавка суспензії хлорели по 10 л на 1голову дійних корів на добу протягом 45-90 днів дала приріст живої маси за цей період в середньому 20 кг, вихід молока збільшився на 64 кг, жирність його підвищилась на 0,2% порівняно з контрольними тваринами.

У разі культивування протококових водоростей у мінеральних середовищах найбільш вживаними є розчини Тамія, Маєра, Прата, Кнопа та ін. Проте незалежно від використаного розчину основними його елементами повинні бути азот, фосфор, магній, сірка.

При вирощуванні водоростей у мінеральних розчинах застосовуються чисті хімічні реактиви, які збільшують собівартість продукції і є дефіцитними. Так, для виробництва 1 т сухої біомаси хлорели витрачається 1370-1750 кг мінеральних солей. Тому останнім часом ідуть пошуки природних джерел мінеральних розчинів, а також можливості використання відходів промисловості і сільського господарства.

Численні дослідження показали ефективність застосування стічних вод не тільки як живильного середовища, але і як засобу біологічного очищення самих стоків. За деякими даними, при вирощуванні хлорели і сценедесмуса в спеціальних установках на міських комунально-побутових стоках за 5-8 днів відбувається ріст водоростей до густоти 0,65-1,1 г/л сухої речовини, а БПК стоку при цьому знижується на 90-97%.

Таким чином, виділення людини, тварин і птахів мають всі необхідні елементи для культивування водоростей, не містять домішок, які сповільнюють їх ріст, є доступними та економічно вигідними. Проте досвід розведення водоростей із застосуванням органічних середовищ не знайшов широкого розповсюдження, що можна пояснити відсутністю науково обґрунтованих технологій культивування та культиваційних установок, які враховували б специфічні особливості застосованих живильних середовищ.

Інтенсивність процесу вирощування одноклітинних водоростей та його економічні показники залежать, перш за все, від виявлення всіх факторів, що впливають на ріст клітин водоростей, виділення з них головних і визначення допустимих меж їх змін. Проте завдання ускладнюється відсутністю точно сформульованих законів клітинної організації і величин, що характеризують стан клітини. Тому в подальшому будемо розглядати стан не окремої клітини, а популяції одноклітинних водоростей, яка складається з великої кількості клітин, для яких можна застосувати статистичні закономірності при слідкуванні за процесом росту біомаси.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Продуктивність

мікродоростей, які вирощуються в культиваторних установках з метою отримання додаткового білкового корму для тварин і очищення стічних вод, значною мірою залежить від технології культивування. Цьому питанню присвячені роботи багатьох вітчизняних і зарубіжних авторів. Особлива увага приділяється приготуванню живильного середовища, підготовці посівного матеріалу для культивування, вирощуванню водоростей у культиваторах, відділенню водоростей від живильного середовища та їх переробці.

Мета дослідження – оцінка енергетичної ефективності процесу культивування мікродоростей.

Матеріал та методи дослідження. У результаті аналізу наукових робіт вітчизняних і зарубіжних авторів встановлено, що найбільш прийнятними для вирощування мікродоростей на стічних водах в умовах тваринницьких комплексів є закриті культиватори глибинного типу, які дозволяють цілий рік отримувати суспензію водоростей як цінну білково-вітамінну добавку і надійний засіб біологічного очищення стічних вод від органічного забруднення навколишнього середовища.

Для оцінки енергетичної ефективності процесів культивування мікродоростей на стічних водах, дослідження режимів температури і опромінення та їх оптимізації розроблений експериментальний культиватор глибинного типу.

Культиватор (рис. 1) являє собою ємкість прямокутної форми з еліптичним днищем в якому відбувається нарощування біомаси. Для підтримання заданої температури суспензії в культиваторі застосовано теплообмінник 2 типу "водяна сорочка". Вода в теплообміннику підігрівається за допомогою проточного водонагрівача 3, через який прокачується вода насосом 4.

Характерною особливістю культиватора, що дає можливість підвищити його продуктивність, є застосування занурених рухомих джерел оптичного опромінення.

Джерела випромінювання 5 поміщені в скляні трубки 6, наглухо заварені з

одного боку і поміщені на рухому рамку 7, яка приводиться в дію від двигуна постійного струму 8. Це дозволяє змінювати частоту обертання джерел випромінювання в межах 0-150 об/хв.

Рис.1. Технологічна схема культиватора глибинного типу для вирощування мікробіодоростей:

1 - ємність, 2-теплообмінник; 3 - проточний водонагрівач; 4 -насос; 5 - джерело оптичного опромінення; 6 - скляні трубки; 7 - рухома рамка; 8 - електродвигун; 9,10 - щітки з щіткотримачами; 11 - контактні кільця; 12 - зовнішні джерела опромінення; 13 - балон з вуглекислим газом; 14 - компресор; 15 - перфоровані трубки; 16 - повітропровід; 17 - газовий редуктор; 18 - реометр; 19- вихідний патрубок; 20 - електроклапан; 21 - насос для подачі живильного розчину

Як джерела оптичного випромінювання були використані люмінесцентні лампи типу ЛД-20-4.

Застосування занурених рухомих джерел дає можливість рівномірно опромінювати весь об'єм суспензії як по глибині, так і по периметру, шляхом розміщення джерел на необхідній відстані один від одного. Кількість джерел на рухомій рамці залежить від об'єму суспензії і щільності біомаси. Крім того, за рахунок обертання джерел оптичного випромінювання культура інтенсивно переміщується, що запобігає осіданню клітин на дно культиватора, а також обростанню прозорих кожухів.

Для створення поверхневого оптичного опромінення застосовуються

зовнішні джерела 12 (лампи ДРЛФ-400).

У культиваторі передбачене підживлення культури сумішшю вуглекислого газу, що подається або з балона 13, або з першого ступеня БЕУ разом з повітрям, що нагнітається компресором 14. Для подачі цієї суміші до культури, на дні басейну розміщені перфоровані трубки 15, з'єднані з повітропроводом 16. Кількість вуглекислого газу регулюється за допомогою газового редуктора 17 і контролюється реометром 18. Вихід готової суспензії здійснюється через патрубок 19, на якому встановлено електроклапан 20.

Подача живильного розчину здійснюється насосом 21. Як живильний розчин можуть бути використані мінеральні розчини, а також стоки тваринницьких комплексів.

Результати досліджень та їх обговорення. Відомо, що життєві процеси в клітинах мікроводоростей протікають при певній температурі. Проведені дослідження залежності швидкості росту мікроводоростей від температури суспензії. Об'єктом досліджень *служив* термофільний штам суспензії одноклітинних водоростей *Chlorella vulgaris*.

Культивування проводяться в установці з рухомими джерелами оптичного випромінювання, зануреними в культуру. Об'єм суспензії - 1,2 м³. Густина культури визначається розробленим приладом і підтримується на рівні 100млн кл/мл (відхилення не перевищували 5 %). Температура суспензії підтримується за допомогою теплообмінника з точністю $\pm 0,5$ °C і змінювали ступінчасто в межах 22-41 °C. Оптична опроміненість культури створюється лампами ДРЛФ-400, встановленими над поверхнею суспензії, а також двома лампами ЛД-20, які поміщені всередину культури і обертаються із швидкістю 50 об/хв. Опроміненість підтримується на рівнях 40, 60, 80, 100 Вт/м². Живильним розчином були стоки тваринницького комплексу, розведені водою у співвідношенні 1:10, а також ефлюент біоенергетичної установки. Крім того, культура продувається газоповітряною сумішшю з 5%-м вмістом вуглекислого газу, а рН середовища підтримується на рівні $6,7 \pm 0,1$. Швидкість росту мікроводоростей визначається за

показами оптичної густини потенціометра КСП-4.

У ході експериментів було знято по 16 кривих при різних рівнях опромінення. Середньоквадратичне відхилення результатів вимірювань не перевищувало 2,2 %, коефіцієнт варіації - 4,8 %.

Рис. 2. Залежність швидкості росту культури *Chlorella vulgaris* від температури суспензії:

1 - $E = 40 \text{ Вт/м}^2$; 2 - $E = 60 \text{ Вт/м}^2$; 3 - $E = 80 \text{ Вт/м}^2$; 4 - $E = 100 \text{ Вт/м}^2$.

На рис. 2 наведено залежності швидкості росту культури мікроводоростей від температури та опроміненості культури. Аналізуючи ці залежності, бачимо, що із збільшенням температури суспензії швидкість росту збільшується, досягає свого максимального значення, а потім різко зменшується. При цьому, чим більша опроміненість, тим вищий температурний оптимум.

З аналізу приведених кривих видно, що температурний оптимум при різних рівнях опроміненості лежить у межах $35\text{--}39^\circ\text{C}$. Слід відзначити, що аналогічні v -подібні криві були отримані й іншими авторами, хоча умови експерименту та установки для вирощування мікроводоростей були іншими.

Важливо відмітити, що коливання температури суспензії біля оптимуму більше, ніж на 1°C , може призвести до значного зниження швидкості росту мікроводоростей. Так, при опроміненості 60 Вт/м^2 і температурі 36°C швидкість росту зменшується на 8%, а при опроміненості 80 Вт/м^2 і температурі $37,5^\circ\text{C}$ - на 10% від свого максимального значення.

Слід відзначити, що максимальна швидкість росту ще не означає, що має місце оптимальний режим вирощування мікроводоростей. Важливо, щоб при максимальній швидкості росту витрати енергоресурсів були мінімальними.

Також визначалась залежність питомих витрат електричної енергії на обігрів та опромінення суспензії мікроводоростей від температури суспензії. Представлені на рис. 2 криві показують, що при зміні температури витрати електроенергії на 1 тону суспензії за добу проходять через мінімальне значення, що відповідає максимальному значенню температури для даної оптичної опроміненості. Зміна опроміненості в межах 40-80 Вт/м² викликає відповідне зменшення питомих витрат електричної енергії. Однак, при опроміненості 100 Вт/м² питомі витрати електроенергії збільшуються. Це можна пояснити значним збільшенням витрат електричної енергії на опромінення культури при порівняно невеликому збільшенні продуктивності культури.

Оптимальні параметри системи термостабілізації установки для вирощування мікроводоростей можна визначити з рівняння теплового балансу, складеного для найбільш важких температурних умов у культиваційній споруді. Такі умови мають місце в зимовий період експлуатації установки.

Для складання рівняння теплового балансу приймемо такі допущення:

- ♦у культиваторі суспензія мікроводоростей добре перемішується і її можна розглядати як об'єкт із зосередженими параметрами;
- ♦система повітряного обігріву виконана таким чином, що джерело теплоти можна розглядати рівномірно розподіленим у всьому просторі культиваційної споруди;
- ♦динамічні властивості об'єкта залишаються незмінними в часі.

На основі вивчення теплових потоків, для випадку, коли температура суспензії вище температури повітря в культиваційній споруді, отримані такі рівняння теплового балансу:

а) для суспензії мікроводоростей

$$C_c m_c \frac{dt_c}{dt} = Q_T + Q_{\text{пи}} + Q_{\text{пер}} + Q_{\text{пс}} - Q_c - Q_{\text{ав}} - Q_{\text{ау}} - Q_{\text{ус}}, \quad (1)$$

де Q_T - теплопередача через стінки теплообмінника, Вт; $Q_{\text{ши}}$ - тепловий потік від занурених джерел випромінювання, Вт; $Q_{\text{пер}}$ - тепловий потік, обумовлений перемішуванням, Вт; $Q_{\text{пр}}$ - тепловий потік, що надходить в суспензію при добавленні живильного розчину, Вт; Q_r - тепловіддача від вільної поверхні суспензії, Вт; $Q_{\text{ав}}$ - теплові втрати від аерації культури повітрям, Вт; $Q_{\text{вв}}$ - теплові втрати від аерації культури вуглекислотою, Вт; $Q_{\text{вр}}$ - теплові втрати з суспензією, що йде до споживача, Вт; C_r - питома теплоємність суспензії мікрободоростей, Дж/кг °С; m_r - маса суспензії мікрободоростей, кг; t_r - температура суспензії, °С; τ - час, с.

б) для повітря культивацийної споруди

$$C_p m_p \frac{dt_p}{d\tau} = Q_{\text{об}} + Q_{\text{ши}} + Q_{\text{пр}} + Q_{\text{пр}} + Q_r + Q_{\text{ав}} + Q_{\text{вв}} + Q_{\text{вр}} + Q_{\text{вр}}; \quad (2)$$

або в розгорнутому вигляді

$$\begin{aligned} & P_{\text{об}} d\tau + P_{\text{ши}}(1 - \eta_r) d\tau + N_{\text{врт}} \eta_n k_1 k_2 k_3 d\tau + k_{\text{вр}} F_r (t_{\text{вр}} - t_p) d\tau + \alpha_r F_r (t_r + t_p) d\tau = \\ & (0,278 C_p \xi \zeta F (t_p - t_{\text{в}}) d\tau + 0,278 \sum a q C_p F_{\text{м}} (t_p + t_{\text{в}}) d\tau + \sum k_{\text{вр}} F_z (t_p - t_{\text{в}}) d\tau + k_{\text{оог}} F_{\text{оог}} (t_p - t_{\text{в}}) d\tau + C_p m_p dt_p \end{aligned} \quad (3)$$

де $P_{\text{об}} d\tau$ - елементарна енергія, що надходить у повітря від джерела теплоти, Дж; $P_{\text{ши}}(1 - \eta_r)$ елементарна енергія, що надходить від джерел випромінювання, Дж; $k_{\text{вр}} F_r (t_{\text{вр}} - t_p) d\tau$ - елементарна енергія, що надходить в культивацийну споруду від водяної сорочки культиватора, Дж; $\alpha_r F_r (t_r + t_p) d\tau$ елементарна енергія, що надходить в культивацийну споруду від вільної поверхні суспензії, Дж; $0,278 C_p \xi \zeta F (t_p - t_{\text{в}}) d\tau$ - елементарна енергія, що втрачається при вентиляції, Дж; $0,278 \sum a q C_p F_{\text{м}} (t_p + t_{\text{в}}) d\tau$ елементарна енергія, що втрачається при інфільтрації повітря з культивацийної споруди, Дж; $\sum k_{\text{вр}} F_z (t_p - t_{\text{в}}) d\tau$ елементарна енергія, що втрачається через підлогу, Дж; $k_{\text{оог}} F_{\text{оог}} (t_p - t_{\text{в}}) d\tau$ елементарна енергія, що втрачається через огорожу культивацийної споруди, Дж; $C_p m_p dt_p$ елементарна енергія, що йде на підвищення температури повітря в культивацийній споруді, Дж; $P_{\text{об}}$ - потужність нагрівальних елементів системи повітряного обігріву, Вт; $N_{\text{врт}}$ - установлена потужність електродвигунів, Вт; η_n - к.к.д. двигуна; k_1 - коефіцієнт завантаження двигуна; k_2 - коефіцієнт одночасної роботи; k_3 - коефіцієнт

переходу теплоти в приміщення; $k_{\text{зн}}$ - коефіцієнт теплопередачі від теплообмінника до повітря; ξ - кратність повітрообміну, 1/год; ζ - коефіцієнт об'єму; F - площа культивацийної споруди, м^2 ; $t_{\text{н}}$ - зовнішня температура повітря, $^{\circ}\text{C}$; a - інфільтрації повітря; g - кількість повітря, що інфільтрується через 1 м^2 площі щілин, кг/год. ; $F_{\text{щ}}$ - площа щілин, м^2 ; $k_{\text{огн}}$ - коефіцієнт тепловіддачі огорожі, $\text{Вт/м}^2 \text{ } ^{\circ}\text{C}$; $F_{\text{огн}}$ - площа огорожі, м^2 ; $C_{\text{н}}$ - питома теплоємність повітря, $\text{Дж/кг}^{\circ}\text{C}$; $m_{\text{н}}$ - маса повітря в культивацийній споруді, кг .

Якщо ліву і праву частини рівняння розділити на $d\tau$ і здійснити заміну

$$N_{\text{уст}} \eta_{\text{п}} k_1 k_2 k_3 = P_{\text{зн}}; \frac{1}{0,278 C_{\text{о}} \xi \zeta F + 0,278 C_{\text{с}} F_{\text{щ}} + \sum K_{\text{уст}} F_{\text{з}} + K_{\text{огр}} F_{\text{огр}}} = R_{\text{зн}}; P_{\text{пв}} + P_{\text{об}} + P_{\text{зн}} = P_{\text{об}}^*;$$

маємо

$$P_{\text{об}}^* + \frac{t_{\text{вп}} - t_{\text{с}}}{R_{\text{вп}}} + \frac{t_{\text{с}} - t_{\text{о}}}{R_{\text{с}}} = \frac{t_{\text{с}} - t_{\text{о}}}{R_{\text{сум}}} + C_{\text{в}} m_{\text{в}} \frac{dt}{d\tau} \quad (4)$$

в) для води в теплообміннику

$$C_{\text{вп}} m_{\text{вп}} \frac{dt_{\text{вп}}}{d\tau} = Q_{\text{пв}} - Q_{\text{т}} - Q_{\text{вп}} \quad (5)$$

або в розгорнутому вигляді

$$P_{\text{пв}} = \frac{t_{\text{вп}} - t_{\text{с}}}{R_{\text{т}}} + \frac{t_{\text{вп}} - t_{\text{о}}}{R_{\text{вп}}} + C_{\text{вп}} m_{\text{вп}} \frac{dt_{\text{вп}}}{d\tau} \quad (6)$$

Якщо скласти рівняння (5.25), (5.28) і (5.30), то отримаємо рівняння теплового балансу для культивацийної споруди в цілому:

$$P_{\text{пв}} + P_{\text{ов}}^* + P_{\text{пи}} + P_{\text{пер}} = P_{\text{пв}}^* + P_{\text{об}}^* = \frac{t_{\text{в}} - t_{\text{н}}}{R_{\text{сум}}} + \frac{t_{\text{сс}} - t_{\text{пс}}}{R_{\text{пс}}} + \frac{t_{\text{с}} - t_{\text{в}}}{R_{\text{в}}} + \frac{t_{\text{с}} - t_{\text{у}}}{R_{\text{у}}} + C_{\text{с}} m_{\text{с}} \frac{dt_{\text{с}}}{d\tau} + C_{\text{в}} m_{\text{в}} \frac{dt_{\text{в}}}{d\tau} + C_{\text{вп}} m_{\text{вп}} \frac{dt_{\text{вп}}}{d\tau} \quad (7)$$

Дослідження, проведені на експериментальній установці, а також розрахунки показують, що теплові втрати від аерації культури повітрям і вуглекислотою в багато разів менші, ніж сумарні теплові втрати, тому цими значеннями можна знехтувати. Тоді рівняння теплового балансу культивацийної споруди, записане для зимових умов експлуатації установки з вирощування мікроводоростей, буде мати вигляд

$$P_{\text{зн}} = P_{\text{пв}}^* + P_{\text{об}}^* = \frac{t_{\text{в}} - t_{\text{н}}}{R_{\text{сум}}} + \frac{t_{\text{с}} - t_{\text{пс}}}{R_{\text{пс}}} + C_{\text{с}} m_{\text{с}} \frac{dt_{\text{с}}}{d\tau} + C_{\text{в}} m_{\text{в}} \frac{dt_{\text{в}}}{d\tau} + C_{\text{вп}} m_{\text{вп}} \frac{dt_{\text{вп}}}{d\tau} \quad (8)$$

Метою дослідження системи термостабілізації є визначення: питомої потужності системи, необхідної для підтримання заданої температури суспензії; впливу добових витрат суспензії на потужність проточного водонагрівача; залежності тривалості нагрівання суспензії мікроводоростей від потужності нагрівальних елементів проточного водонагрівача.

Як було показано раніше, система термостабілізації в нашому випадку складається з повітряного обігріву та обігріву суспензії за допомогою теплообмінника.

Мінімальна потужність нагрівальних елементів проточного водо-нагрівача може бути визначена з рівнянь (1) і (7)

$$P_{пв} = \frac{t_{вп} - t_{в}}{R_{вп}} + \frac{t_c - t_{в}}{R_c} \quad (9)$$

Як бачимо, перша складова потужності йде на покриття втрат теплоти від теплообмінника до повітря культиватійної споруди, а друга - на покриття втрат теплоти від вільної поверхні суспензії.

Оскільки величини теплових опорів $R_{вп}$ і R_c залежать від площі культиватора, а значить і від об'єму суспензії, то величину потужності проточного водонагрівача зручніше привести до одиниці об'єму культиватора. Враховуючи, що для рівномірного опромінення суспензії за допомогою занурених джерел глибина культиватора повинна бути $H = 1$ м, рівняння (9) можна представити в такому вигляді:

$$P_{пв}/V = 1,5k_{вп}(t_{вп} - t_{в}) + \alpha_c(t_c + t_{в}). \quad (10)$$

Потужність нагрівальних елементів повітряного обігріву за відсутності теплообмінника в стаціонарному режимі може бути визначена з рівняння

$$P_{пв} = \frac{t_{вп} - t_{в}}{R_{вп}} + \frac{t_c - t_{в}}{R_c}, \quad (11)$$

З нього видно, що перша складова потужності йде на покриття втрат теплоти через огорожі культиватійної споруди і залежить від різниці температур всередині приміщення $t_{вп}$ і зовнішньої температури $t_{в}$, а також від опору теплопередачі. Друга складова потужності йде на підігрівання суспензіїв культиваторі.

Одним з можливих режимів культивування мікроводоростей є плотностатний режим, при якому використовується система дозованих зливань суспензії та еквівалентних доливань поживного розчину в точці оптимальної густини біомаси. У цьому випадку мінімальна потужність нагрівальних елементів проточного водонагрівача може бути обчислена із залежності

$$P_{\text{нв.мін}} = \frac{G_{\text{сп}} \cdot c_{\text{сп}} \cdot (t_{\text{сп}} - t_{\text{в}})}{\eta} + \frac{G_{\text{в}} \cdot c_{\text{в}} \cdot (t_{\text{в}} - t_{\text{нв}})}{\eta}, \quad (12)$$

Як бачимо, одна частина потужності йде на покриття втрат теплоти у зовнішнє середовище (втрати теплоти від теплообмінника до повітря культиваційної споруди і втрати теплоти від вільної поверхні суспензії), а друга частина потужності - на підігрів живильного розчину і залежить від різниці температур суспензії і живильного розчину, а також теплового опору $R_{\text{нв}}$, який можна визначити за формулою

$$R_{\text{нв}} = \frac{1}{K_{\text{нв}}}, \quad (13)$$

де $C_{\text{нв}}$ - теплоємність живильного розчину, Дж/кг°С; $m_{\text{нв}}$ - витрати живильного розчину, кг/с.

На рис. 3 приведено залежність потужності і к.к.д. проточного водонагрівача від витрат суспензії мікроводоростей.

При цьому використані такі дані:

$$t_{\text{вп}} = 42 \text{ }^{\circ}\text{C}; t_{\text{в}} = 18 \text{ }^{\circ}\text{C}; t_{\text{с}} = 39 \text{ }^{\circ}\text{C}; t_{\text{нв}} = 5 \text{ }^{\circ}\text{C}; V_{\text{с}} = 5 \text{ м}^3.$$

Взявши відношення потужності, що йде на нагрівання живильного розчину, що надходить, до всієї потужності проточного водонагрівача, отримаємо залежність к.к.д. водонагрівача від витрат суспензії мікроводоростей.

З аналізу теоретичних і експериментальних даних випливає: якщо добове зливання культури та еквівалентне доливання живильного розчину менше половини об'єму суспензії, то на підігрівання живильного розчину витрачається не більше 60% потужності проточного водонагрівача, інша частина йде на покриття втрат теплоти у зовнішнє середовище.

Рис. 3. Залежність потужності і к.к.д. проточного водонагрівача від витрат суспензії мікроводоростей.

З рівнянь (1) і (3) видно, що температура нагрівання суспензії мікроводоростей у часі буде змінюватись за законом експоненти

$$t_c - t_b = P_{пв} R_{екв} \left(1 - e^{-\frac{\tau}{T}}\right) + (t_{поч} - t_b) e^{-\frac{\tau}{T}} \quad (14)$$

де $R_{екв}$ - еквівалентний опір тепловіддачі,

$$R_{екв} = \frac{R_{вр} R_c}{R_{вр} + R_c}$$

T - постійна часу нагрівання, $T = CR_{екв}$; C - теплоємність системи, $C = C_{вр} + C_c$; τ - тривалість нагрівання, с; $t_{поч}$ - початкова температура суспензії, °C.

Тривалість нагрівання в цьому випадку дорівнює

$$\tau = T \cdot \ln \frac{t_c - t_b}{t_{поч} - t_b} \quad (15)$$

а витрати електричної енергії на нагрівання суспензії

$$A = P_{пв} \tau = P_{пв} T \ln \frac{t_c - t_b}{t_{поч} - t_b}, \quad (16)$$

З аналізу цих залежностей випливає, що при малих потужностях проточного водонагрівача мають місце тривалий процес нагрівання суспензії та великі витрати електричної енергії. Проте при збільшенні потужності до величини, при якій добуток PR перевищує $5t_c$, енергетичні показники водонагрівача стабілізуються.

Визначальною умовою підвищення продуктивності мікроводоростей є ефективність використання оптичного випромінювання, яке забезпечує

протікання в клітинах фізіологічних процесів і, перш за все, фотосинтезу. Тому не випадково цьому питанню приділяється велике значення.

Дослідження режимів оптичного опромінення та швидкості росту мікроводоростей проводилось в культиваторі глибинного типу об'ємом 1,2 м³. Як джерела оптичного опромінення використовувались люмінесцентні лампи типу ЛД-20-4. Лампи з прозорими кожухами встановлювались на рухомій рамці і закріплювались таким чином, щоб можна було змінювати як відстань між ними, так і їх кількість.

Для створення опроміненості на поверхні культури застосовувались лампи ДРЛФ-400 і ЛФ-40. Регулювання поверхневої опроміненості здійснювалось шляхом зміни кількості ламп та висоти їх підвішування над поверхнею культури.

Глибина шару суспензії в усіх дослідах дорівнювала 0,8 м, а температура підтримувалась на рівні 38°C.

Для вимірювання оптичної опроміненості використовувався люксметр Ю-117 із спеціальною насадкою. Поправочний коефіцієнт люксметра для переходу до опроміненості ФАР вибирався залежно від застосованих джерел випромінювання.

Експериментальні дослідження залежностей проводилось з багаторазовими повторностями. Оскільки в повторних експериментах мав місце розкид значень, було проведено їх усереднення та будувались усереднені залежності. Кількість повторностей має визначатись, виходячи із забезпечення довірчої ймовірності не менше 0,9.

Як відомо, суспензія хлорели являє собою завись світлорозсіюючих, селективно поглинаючих клітин. При цьому із збільшенням глибини культиватора відбувається значне падіння інтенсивності опромінення.

Поглинання оптичного випромінювання в суспензії мікроводоростей підпорядковується закону Бугера-Ламберта-Бера, який можна представити у вигляді

$$E_{\pi} = E_0 e^{-k_{\pi} N h_{\text{сл}}} \quad (17)$$

де E_0 - опроміненість на поверхні суспензії, Вт/м²; k_{π} - коефіцієнт поглинання суспензії; N - концентрація біомаси мікрободоростей, млн клітин/мл; $h_{\text{сл}}$ - товщина шару суспензії, м.

Для зменшення площі культиватора застосовуються занурені рухомі джерела опромінення. Для цього лампи поміщались у герметичні прозорі кожухи і у вертикальному положенні закріплювались на рухомій рамці.

Приводячи в рух джерела випромінювання, можна опромінювати весь об'єм культури порівняно невеликою кількістю ламп. Оптимальна кількість джерел та частота їх обертання визначались експериментально і оцінювались за швидкістю росту культури мікрободоростей.

Аналізуючи отримані залежності можна зробити такі висновки.

1. У культиваторах для вирощування мікрободоростей, де культура не перемішується і густина її дорівнює 50 млн клітин/мл, глибина шару суспензії не повинна перевищувати 10 см.

2. Вирощування мікрободоростей у культиваторах глибинного типу можливе при використанні занурених рухомих джерел опромінення, що дає можливість рівномірно опромінювати культуру по всьому об'єму.

3. Швидкість росту мікрободоростей у культиваторах із зануреними рухомими джерелами оптичного опромінення в 1,5-2,0 рази вище, ніж при опроміненні культури зовнішніми джерелами та інтенсивному її перемішуванні.

4. При опроміненні культури за допомогою занурених і зовнішніх джерел опромінення максимальна швидкість росту досягається при $E_{\pi}/E_{\text{кр}} = 3-5$.

Для дослідження енергетичної досконалості процесу очищення стічних вод та вирощування мікрободоростей складемо баланс енергії культиваційної установки:

$$E_{\text{заг}}^{\text{км}} = E_{\text{мк}} + E_{\text{пс}} + E_{\text{н}} + E_{\pi} + E_{\text{ін}}, \text{ ГДж.} \quad (18)$$

де $E_{\text{заг}}^{\text{км}}$ - загальні витрати матеріальних і енергетичних ресурсів культиватора мікрободоростей; $E_{\text{мк}}$ - енерговміст суспензії мікрободоростей; $E_{\text{пс}}$ - енерговміст

живильного середовища на виході з культиватора; $E_{\text{вх}}$ - витрати теплоти на нагрівання живильного середовища; $E_{\text{п}}$ - теплота, що втрачається поверхнею культиваційної установки; $E_{\text{іт}}$ - інші втрати енергії.

Загальні витрати матеріальних і енергетичних ресурсів складаються з таких складових:

$$E_{\text{заг}}^{\text{км}} = E_{\text{вх}} + E_{\text{т}} + E_{\text{а}} + E_{\text{об}} + E_{\text{ее}} + E_{\text{жп}} \text{ ГДж}, \quad (19)$$

де $E_{\text{вх}}$ - енерговміст живильного середовища на вході в культиваційну установку (рідка фракція ефлюента); $E_{\text{т}}$ витрати теплоти на нагрівання живильного середовища і компенсацію теплових втрат культиваційної установки; $E_{\text{а}}$ - енерговитрати на аерацію культури повітрям і вуглекислотою; $E_{\text{об}}$ - енерговитрати на обладнання; $E_{\text{ее}}$ - витрати електричної енергії на опромінення і привід електричних машин; $E_{\text{жп}}$ - енерговитрати живої праці

З врахуванням вищевикладеного проілюструємо застосування даної моделі на прикладі культиваційної установки для вирощування мікроводоростей на ефлюенті БЕУ. Витрати матеріальних та енергетичних ресурсів цієї установки представлено на діаграмі потоків енергетичного балансу культиваційної установки з розрахунку на 1 ц приросту живої маси молодняку ВРХ тваринницького комплексу на 12 тис. скотомісць (рис. 4). Для визначення коефіцієнта енергетичної ефективності, який дорівнює

$$\eta_{\text{км}} = E_{\text{МК}} / E_{\text{заг}}^{\text{км}}, \quad (20)$$

потрібно знати енерговміст суспензії мікроводоростей

$$E_{\text{МК}} = \Pi_{\text{МК}} C_{\text{МК}} \quad (21)$$

Приймаючи продуктивність 2,5 кг абсолютно сухої речовини на 1 т живильного середовища та питомий енерговміст $C_{\text{МК}} = 8,43 \text{ ГДж/т}$, маємо $\eta_{\text{км}} = 0,0649$, що свідчить про низьку енергетичну ефективність процесу.

Якщо ж представити культиваційну установку в сукупності з БЕУ, то складові потоки $E_{\text{т}}$, $E_{\text{вх}}$, та $E_{\text{а}}$ рівняння (19) належать до біогазової установки, а тому тут не враховуються. Тоді загальні витрати енергетичних ресурсів будуть дорівнювати

Рис. 4. Діаграма питомих потоків енергетичного балансу культивацийної установки

$$E_{\text{е}}^{\text{км}} = E_{\text{к}} + E_{\text{т}} + E_{\text{пл}} \quad (22)$$

де $\Pi_{\text{км}}$ - продуктивність культури мікробіодоростей, т/т; $S_{\text{км}}$ - питомий енерговміст суспензії мікробіодоростей, ГДж/т.

Це дозволило підвищити коефіцієнт енергетичної ефективності до значення $\eta_{\text{км}} = 0,477$, тобто більше ніж у 7 разів.

Таким чином, суттєвого підвищення ефективності культивацийної установки можна досягнути при спільній роботі з біоенергетичною установкою, звідки надходять живильне середовище, теплота і вуглекислий газ.

Висновки і перспективи.

1. Вирощування мікробіодоростей у культиваторах глибинного типу можливе при використанні занурених рухомих джерел опромінення, що дає можливість рівномірно опромінювати культуру по всьому об'єму.

2. Швидкість росту мікробіодоростей у культиваторах із зануреними рухомими джерелами оптичного опромінення в 1,5-2,0 рази вище, ніж при опроміненні культури зовнішніми джерелами та інтенсивному її перемішуванні.

3. При опроміненні культури за допомогою занурених і зовнішніх джерел опромінення максимальна швидкість росту досягається при $E_{\text{к}}/E_{\text{т}} = 3-5$.

Список літератури

1. Новітні технології біоенергоконверсії / Я.Б. Блюм, Г.Г. Гелетука, [та інш.]: монографія – К.: Аграр Медіа Груп, 2010. – 326 с.
2. Чміль А. І. Енергетична ефективність і екологічна безпека замкнутих еколого-біотехнічних систем в тваринництві / А.І. Чміль: монографія. – К.: ЦК «Компринт», 2015. – 163 с.
3. Чміль А. І. Дослідження енергетичної досконалості біотехнічних систем у тваринництві // Науковий вісник НУБіП України. - 2015. – Вип. 209, ч.2. - С.58-63.

References

1. Blium, I. B., Heletukha, H. H. (2010). Novitni tekhnolohii bioenerhokonversii. [The latest technologies of bioenergy conversion]. Kyiv: Agrar Media Hrup, 326.
2. Chmil, A.I. (2015). Enerhetychna efektyvnist i ekolohichna bezpeka zamknytykh ekoloho-biotekhnichnykh system v tvarynnytstvi [Energy efficiency and ecological safety of closed ecological and biotechnical systems in animal husbandry].. Kyiv, «Komprynt», 163.
3. Chmil A. I. (2015). Doslidzhennia enerhetychnoi doskonalosti biotekhnichnykh system u tvarynnytstvi [Research of energy perfection of biotechnical systems in animal husbandry]. Naukovyi visnyk NUBiP Ukrainy, 209 (2), 58-63.

ОПТИМИЗАЦИЯ ЭНЕРГОЗАТРАТ ПРОЦЕССА КУЛЬТИВИРОВАНИЯ МИКРОВОДОРОСЛЕЙ

А.И. Чміль, Р.В. Билоус, О.И. Возный

Аннотация. В последние годы в Украине, а также во многих странах Европы, Азии и Америки широкое развитие получило массовое культивирование микроводорослей с целью использования в народном хозяйстве. В этом плане наибольший интерес вызывают хлорелла и спирулина. Большое количество протеинов, витаминов и хлорофилла ставит хлореллу и спирулину в один ряд с высокопитательными кормами для животных и птицы. В природе микроводоросли очень распространены, однако производительность их низкая. При создании оптимальных условий выращивания они могут давать высокие урожаи. Опытами установлено, что основными параметрами, обуславливающими интенсивность выращивания водорослей, являются: температура суспензии, режим облучения, состав и концентрация питательной среды, концентрация CO₂ в барботируемом воздухе. Для оценки энергетической эффективности процесса культивирования микроводорослей на сточных водах, исследование режимов температуры и облучения и их оптимизации разработан экспериментальный культиватор глубинного типа. Характерной особенностью культиватора, что позволяет повысить его производительность, есть применение погруженных подвижных источников оптического излучения. Проведенные исследования зависимости скорости роста микроводорослей от температуры суспензии. Установлено, что колебания температуры суспензии у оптимума больше, чем на 1

° С, может привести к значительному снижению скорости роста микроводорослей. Так, при облученности $60 \text{ Вт} / \text{м}^2$ и температуре 36°C скорость роста уменьшается на 8%, а при облученности $80 \text{ Вт} / \text{м}^2$ и температуре $37,5^\circ \text{C}$ - на 10% от своего максимального значения.

С целью исследования системы термостабилизации были определены: удельная мощность системы, необходимой для поддержания заданной температуры суспензии; влияния суточных расходов суспензии на мощность проточного водонагревателя; зависимости продолжительности нагрева суспензии микроводорослей от мощности нагревательных элементов проточного водонагревателя.

Экспериментально установлено, что при одних и тех же значениях облученности, частоты вращения источников излучения и плотности биомассы, скорость роста при использовании погруженных ламп в 1,5-2,0 раза выше, чем при облучении культуры внешними источниками. Причем, чем выше частота вращения источников, тем больше эта разница.

Ключевые слова: *культивирование микроводорослей, энергопотери, животноводческие отходы*

OPTIMIZATION OF THE ENERGY SOURCE OF MICROWAVES CULTIVATION PROCESS

A. Chmil, R. Bilous, O. Vozniy

Abstract. In recent years, in Ukraine, as well as in many countries of Europe, Asia and America, mass cultivation of microalgae has been widely developed for use in the national economy. In this regard, chlorella and spirulina are of the greatest interest. A large number of proteins, vitamins and chlorophyll puts chlorella and spirulina in one row with highly nourishing animal and poultry feeds. In nature, microalgae are very common, but their performance is low. When creating optimal growing conditions, they can produce high yields. Experiments have established that the main parameters determining the intensity of algae growing are: temperature of the suspension, irradiation regime, composition and concentration of the nutrient medium, concentration of CO_2 in the bubbling air. To assess the energy efficiency of the process of cultivation of microalgae in wastewater, the study of temperature and irradiation regimes and their optimization has developed an experimental deep-type cultivator. A characteristic feature of the cultivator, which allows to increase its performance, is the use of immersed mobile sources of optical radiation. Conducted studies of the dependence of the growth rate of microalgae on the temperature of the suspension. It is established that fluctuations in the temperature of the suspension at the optimum of more than 1°C , can lead to a significant decrease in the growth rate of microalgae. Thus, with an irradiance of $60 \text{ W} / \text{м}^2$ and a temperature of 36°C , the growth rate decreases by 8%, and with an irradiance of $80 \text{ W} / \text{м}^2$ and a temperature of 37.5°C , by 10% of its maximum value.

For the purpose of studying the thermal stabilization system, the following were determined: the specific power of the system necessary to maintain the desired temperature of the suspension; the effect of daily suspension costs on the power of the

instantaneous water heater; dependences of the heating time of the microalgae suspension on the power of the heating elements of the instantaneous water heater.

It was established experimentally that with the same values of irradiance, the frequency of rotation of radiation sources and biomass density, the growth rate when using immersed lamps is 1.5-2.0 times higher than when the culture is irradiated with external sources. Moreover, the higher the frequency of rotation of the sources, the greater this difference.

Keywords: *cultivation of microalgae, energy losses, livestock waste*