УДК 628.385

ЕНЕРГЕТИЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ПРОЦЕСУ КУЛЬТИВУВАННЯ МІКРОВОДОРОСТЕЙ

А. І. Чміль, доктор технічних наук, професор

Національний університет біоресурсів і природокористування України

e-mail: a.chmil@ukr.net

Анотація. Нині широкого розвитку набуло масове культивування мікроводоростей з метою використання їх у народному господарстві. У цьому плані найбільший інтерес викликають хлорела і спіруліна.

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. Спіруліна - синьо-зелена водорість з розміром клітин 15х60 нм, в яких відсутня тверда оболонка.

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 CO₂ в повітрі, що барботується.

Оцінку енергетичної ефективності процесу культивування мікроводоростей на стічних водах, дослідження режимів температури і опромінення та їх оптимізації здійснювали в культиваторі глибинного типу, характерною особливістю якого використання занурених рухомих джерел оптичного опромінення.

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.

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

Актуальність. Процес розмноження водоростей відбувається шляхом поділу материнської 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 %).

Включення хлорели до складу зимових раціонів молодняку ВРХ м'ясних порід дозволяє підвищити добовий приріст бичків на 17 %.

Мікроводорості позитивно впливають на перетравність і використання живильних речовин раціону, що обумовлює зниження витрат кормів на одиницю продукції.

Приготування живильного середовища має важливе значення при культивуванні водоростей, від його складу і концентрації залежать приріст біомаси та хімічний склад водоростей. Так, при вирощуванні у середовищі, багатому на азот, хлорела може накопичувати до 88,2 % протеїну і 5,2 % жиру, а на збідненому азотному фоні вміст протеїну знижується до 7,3 %, а вміст жиру зростає до 13,2 %.

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 обгрунтованих технологій культивування та культиваційних установок, які враховували б специфічні особливості застосованих живильних середовищ.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Продуктивність мікроводоростей, які вирощуються в культивацийних 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 мікроводоростей.

Матеріали та методи дослідження. Вплив температури на ріст водоростей пов'язаний з дією на ферментні системи культури. З підвищенням температури швидкість ферментних реакцій зростає, що сприяє утворенню значної кількості продуктів фотосинтезу.

Залежно від оптимальної температури культивування штами мікроводоростей бувають кріофільні, мезофільні і термофільні. Найбільш продуктивними є термофільні штами.

Питанню регулювання температури в установках для вирощування водоростей присвячена незначна кількість робіт і всі вони, в основному, стосуються розробки конструкції теплообмінників невеликих об'ємів.

Основною причиною обмеженого застосування різних видів тепло- обмінників є недопустимість контакту суспензії з деталями, що нагріваються понад 42 °С.

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

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

Джерела випромінювання поміщені в скляні трубки, наглухо заварені з одного боку і поміщені на рухому рамку, яка приводиться в дію від двигуна постійного

струму. Це дозволяє змінювати частоту обертання джерел випромінювання в межах 0-150 об/хв.

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

Фотосинтетична продуктивність культури мікроводоростей тісно пов'язана з багатьма параметрами діючого і попереднього режиму опромінення.

Найважливішими факторами, що визначають величину опроміненості клітин та поглинання енергії в суспензії, є: сила і спектральний склад джерела опромінення, густина суспензії, поверхнева концентрація пігментів, безперервний і періодичний режими опромінення клітин у культурі.

Дослідами встановлено, що із збільшенням опроміненості продуктивність культури мікроводоростей зростає, а ефективність засвоєння ними енергії, починаючи з опроміненості, що насичує фотосинтез клітин, різко падає. Максимальна ефективність засвоєння променевої енергії густими суспензіями мікроводоростей досягає 21%, при середній опроміненості поверхні суспензії - близько 40 Вт/м² ФАР.

Результати досліджень та їх обговорення. Кількість клітин в одиниці об'єму визначається на основі вимірювання пропущеного суспензією променевого потоку. Поглинання світла в датчику оптичної густини можна записати на основі закона Бугера-Ламберта-Бера

$$E = E_0 10^{-kI}, \quad (1)$$

де E_0 , E - світловий потік відповідно падаючого і того, що пройшов через кювету, лм; I - товщина кювети, м; k - коефіцієнт поглинання світлового потоку.

Для мікроводоростей, розміри клітин яких у багато разів більші за довину світлової хвилі, коефіцієнт поглинання k можна визначити з виразу:

$$k = 2\pi R^2 N, \quad (2)$$

тут R - радіус клітини, м; N - кількість клітин в одиниці об'єму.

Залежність сили струму, що протікає через фоторезистор, від світлового потоку для лінійної ділянки виражається співвідношенням

$$I_0 = k_0 U \cdot E, \quad (3)$$

струму. Це дозволяє змінювати частоту обертання джерел випромінювання в межах 0-150 об/хв.

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

Фотосинтетична продуктивність культури мікроводоростей тісно пов'язана з багатьма параметрами діючого і попереднього режиму опромінення.

Найважливішими факторами, що визначають величину опроміненості клітин та поглинання енергії в суспензії, є: сила і спектральний склад джерела опромінення, густина суспензії, поверхнева концентрація пігментів, безперервний і періодичний режими опромінення клітин у культурі.

Дослідами встановлено, що із збільшенням опроміненості продуктивність культури мікроводоростей зростає, а ефективність засвоєння ними енергії, починаючи з опроміненості, що насичує фотосинтез клітин, різко падає. Максимальна ефективність засвоєння променевої енергії густими суспензіями мікроводоростей досягає 21%, при середній опроміненості поверхні суспензії - близько 40 Вт/м² ФАР.

Результати досліджень та їх обговорення. Кількість клітин в одиниці об'єму визначається на основі вимірювання пропущеного суспензією променевого потоку. Поглинання світла в датчику оптичної густини можна записати на основі закона Бугера-Ламберта-Бера

$$E = E_0 10^{-kx}, \quad (1)$$

де E_0 , E - світловий потік відповідно падаючого і того, що пройшов через кювету, лм; x - товщина кювети, м; k - коефіцієнт поглинання світлового потоку.

Для мікроводоростей, розміри клітин яких у багато разів більші за довину світлової хвилі, коефіцієнт поглинання k можна визначити з виразу:

$$k = 2\pi R^2 N, \quad (2)$$

тут R - радіус клітини, м; N - кількість клітин в одиниці об'єму.

Залежність сили струму, що протікає через фоторезистор, від світлового потоку для лінійної ділянки виражається співвідношенням

$$I_{\text{ф}} = k_{\text{ф}} U \cdot E, \quad (3)$$

де I_{ϕ} - сила струму фоторезистора, мкА; U - напруга, прикладена до фоторезистора, В; k - питома чутливість фоторезистора, мкА/лм- В.

Підставляючи значення E з рівняння (1) в рівняння (3), отримаємо

$$I_{\phi} = k_o U E_o 10^{-kI} \quad (4)$$

Позначаючи оптичну густину суспензії $D = -kI$, отримаємо

$$D = Ig \frac{I_{\phi}}{k_o U E_o} \quad (5)$$

Принципова електрична схема приладу (рис.1) складається з компен-саційного стабілізатора напруги, зібраного на трьох транзисторах VT1, VT2, VT3, датчика D1, поміщеного в ємкість з живильним розчином, датчика D2, розміщеного в культиваторі із суспензією, та мікроамперметра A1.

Рис. 1. Принципова електрична схема приладу для вимірювання оптичної густини біомаси мікробіологічних суспензій

Сила струму фоторезистора R10 залежить від мутності живильного розчину (із збільшенням останньої струм зменшується), а сила струму фоторезистора R13 - від мутності живильного розчину та кількості клітин у суспензії водоростей. Оскільки фоторезистори з'єднані за мостовою схемою, то на мікроамперметрі отримаємо значення різниці струмів, що протікають через ці фоторезистори, яка пропорційна кількості клітин у суспензії.

Оптимальні параметри системи термостабілізації установки для вирощування мікробіологічних суспензій 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 прийемо 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, представлених на рис. 2, для випадку, коли температура суспензії вище температури повітря в культиваційній споруді, отримані такі рівняння теплового балансу:

Рис. 2. Схема теплових потоків у культивацийній споруді для вирощування мікроводоростей

а) для суспензії мікроводоростей

$$C_c m_c \frac{dt_c}{dt} = Q_T + Q_{\text{ни}} + Q_{\text{пер}} + Q_{\text{нс}} - Q_c - Q_{\text{ав}} - Q_{\text{ay}} - Q_{\text{yc}}, \quad (6)$$

де $Q_{\text{ст}}$ - теплопередача через стінки теплообмінника, Вт; $Q_{\text{пр}}$ - 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; $Q_{\text{г}}$ - тепловіддача від вільної поверхні суспензії, Вт; $Q_{\text{ав}}$ - теплові втрати від аерації культури повітрям, Вт; $Q_{\text{ав}}$ - теплові втрати від аерації культури вуглекислотою, Вт; $Q_{\text{ув}}$ - теплові втрати з суспензією, що

йде до споживача, Вт; C_p - питома теплоємність суспензії мікроводоростей, Дж/кг °С; m_p - маса суспензії мікроводоростей, кг; t_p - температура суспензії, °С; τ - час, с.

Теплопередачу через стінки теплообмінника можна визначити з наступного виразу

$$Q_{\tau} = kF_{\tau}(t_{\text{вн}} - t_p), \quad (7)$$

Де k - коефіцієнт теплопередачі теплообмінника, Вт/м² °С; F_{τ} - площа теплообмінника м²; $t_{\text{вн}}$ - температура води в теплообміннику, °С.

Коефіцієнт теплопередачі теплообмінника дорівнює

$$k_{\tau} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\Lambda} + \frac{1}{\alpha_2}}. \quad (8)$$

Тут α_1 - коефіцієнт тепловіддачі від води теплообмінника до зовнішньої поверхні стінки культиватора, Вт/м² °С; α_2 - коефіцієнт тепловіддачі від внутрішньої поверхні стінок культиватора до суспензії, Вт/м² °С; δ - товщина стінки культиватора, м; Λ - коефіцієнт теплопровідності стінки культиватора, Вт/м °С.

Запишемо α_1 як

$$\alpha_1 = \varepsilon_n \alpha_n \quad (9)$$

де ε_n - поправочний коефіцієнт на кривизну каналу; α_n - коефіцієнт тепловіддачі при турбулентному русі рідини

$$\varepsilon_n = 1 + 1,77 \frac{R}{d}, \quad (10)$$

Тут R - радіус кривизни каналу, м; d -еквівалентний діаметр каналу, м. ε_n - з формули Міхеєва:

$$\alpha_n = 0,021 Re^{0,8} Pr^{0,43} (Pr/Pr_{\text{ст}})^{-0,25}, \quad (11)$$

Де Re - критерій Рейнольдса; Pr , $Pr_{\text{ст}}$ - критерій Прандтля відповідно при температурі суспензії і стінки культиватора.

Оскільки суспензія всередині культиватора переміщується з допомогою рухомих джерел оптичного опромінення, що мають складну конфігурацію, значення коефіцієнта тепловіддачі від внутрішньої поверхні стінок до суспензії можна визначити експериментально на основі рівняння (5.9)

$$\frac{1}{\alpha_2} = \frac{1}{k_m} + \left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\Lambda} \right). \quad (12)$$

Схему установки, на якій проводились дослідження залежності коефіцієнта теплопередачі до суспензії мікроводоростей від частоти обертання перемішуючого пристрою, наведено на рис. 3.

Рис. 3. Установка для дослідження коефіцієнта теплопередачі до суспензії мікроводоростей:

1 - культиватор; 2 - теплообмінник; 3 – змійовик

Для підігрівання суспензії культиватор 1 обладнаний теплообмінником 2 типу водяної сорочки, а для охолодження - змійовиком 3, розміщеним всередині по периметру культиватора.

Рис.4. Залежність коефіцієнта теплопередачі до нагрітої суспензії від частоти обертання перемішуючого пристрою ($t^{\circ}C = 37$).

На рис. 4 представлено залежність коефіцієнта теплопередачі від частоти обертання перемішуючого пристрою. З наведеної залежності видно, що при температурі суспензії 37 °С зміна швидкості обертання перемішувача в діапазоні 0-100 об/хв викликає збільшення коефіцієнта теплопередачі і має елінійну залежність.

Теплові втрати від аерації культури повітрям дорівнюють

$$Q_{\text{аер}} = G_{\text{аер}} C_{\text{аер}} \rho_{\text{а}} (t_{\text{р}} - t_{\text{а}}), \quad (13)$$

де $G_{\text{аер}}$ - кількість повітря, що розчинилось у суспензії, $\text{м}^3/\text{с}$; $C_{\text{аер}}$ - питома теплоємність повітря, $\text{Дж/кг}^\circ\text{C}$; $\rho_{\text{а}}$ - густина повітря, кг/м^3 ; $t_{\text{а}}$ - температура повітря, $^\circ\text{C}$.

Кількість повітря, що розчинилось у суспензії, можна визначити з рівняння

$$G_{\text{аер}} = 6,2 \cdot 10^{-5} H \cdot B \cdot V \quad (14)$$

Де H - висота шару суспензії, м ; B - витрати повітря, $\text{м}^3/\text{с}$; V - об'єм суспензії, м^3 .

Теплові втрати від аерації культури вуглекислотою розраховуємо за формулою

$$Q_{\text{ав}} = G_{\text{ав}} C_{\text{в}} \rho_{\text{в}} (t_{\text{р}} - t_{\text{в}}) \quad (15)$$

туз $G_{\text{ав}}$ - кількість вуглекислоти, що розчинилась у суспензії, $\text{м}^3/\text{с}$; $C_{\text{в}}$ - питома теплоємність вуглекислоти, $\text{Дж/кг}^\circ\text{C}$; $\rho_{\text{в}}$ - густина вуглекислоти, кг/м^3 ; $t_{\text{в}}$ - температура вуглекислоти, $^\circ\text{C}$.

$$G_{\text{ав}} = k_{\text{в}} V, \quad (16)$$

Де $k_{\text{в}}$ - швидкість поглинання вуглекислоти, яку можна визначити з рівняння

$$k_{\text{в}} = 1,72 \frac{H \cdot B_{\text{в}}}{d_{\text{н}}} We_{\text{п}}^{0,9} Re_{\text{д}}^{-0,5} k_{\text{тр}}^{-0,5} (C_{\text{о}} - C), \quad (17)$$

де $B_{\text{в}}$ - витрати вуглекислоти, $\text{м}^3/\text{с}$; $d_{\text{н}}$ - середній діаметр бульбашок, м ; $We_{\text{п}} = \rho_{\text{в}} d_{\text{н}} \omega_{\text{в}}^2 / \sigma$ - критерій Вебера; $Re_{\text{д}} = \omega_{\text{в}} d_{\text{н}} / D_{\text{д}}$ - дифузійний критерій Пекле; $k_{\text{тр}}$ - коефіцієнт тертя; $C_{\text{о}}$ - зрівноважена концентрація вуглекислого газу, $\text{м}^3/\text{м}^3$; C - середня концентрація вуглекислоти в суспензії, $\text{м}^3/\text{м}^3$; $\omega_{\text{в}}$ - швидкість спливання бульбашок, м/с ; σ - коефіцієнт поверхневого натягу, Дж/м^2 ; $D_{\text{д}}$ - коефіцієнт дифузії, $\text{м}^2/\text{с}$.

Тепловий потік від занурених джерел випромінювання дорівнює

$$Q_{\text{пир}} = P_{\text{пир}} (1 - \eta_{\text{р}}), \quad (18)$$

де $P_{\text{пир}}$ - потужність занурених джерел випромінювання, Вт ; $\eta_{\text{р}}$ - світловий к.к.д. джерел випромінювання.

Тепловий потік, обумовлений перемішуванням суспензії, обчислимо за формулою:

$$Q_{\text{пер}} = \frac{1}{2} \omega (R_{\text{п}} - R_{\text{я}})^2 - c \ln(R_{\text{п}}/R_{\text{я}})] \quad (19)$$

тут $H_{\text{д}}$ - висота занурених джерел, м; $N_{\text{п}}$ - кількість джерел; ω - кутова швидкість обертання занурених джерел, рад/с; $R_{\text{я}}$ - радіус ядра вихору, м; $R_{\text{п}}$ - радіус рамки із зануреними джерелами, м; C - інтенсивність циркуляції суспензії.

Тепловий потік, що надходить в суспензію при додаванні живильного розчину, становить

$$Q_{\text{пр}} = C_{\text{пр}} \frac{dm_{\text{пр}}}{dt_{\text{пр}}} dt_{\text{пр}}, \quad (20)$$

Де $C_{\text{пр}}$ - питома теплоємність добавленого живильного розчину, Дж/кг °С; $m_{\text{пр}}$ - маса добавленого живильного розчину, кг; $t_{\text{пр}}$ температура добавленого живильного розчину, °С.

Теплові втрати із суспензією, що йде до споживача:

$$Q_{\text{с}} = C_{\text{с}} \frac{dm_{\text{с}}}{dt_{\text{с}}} dt_{\text{с}}, \quad (21)$$

Тепловіддачу від вільної поверхні суспензії визначимо з рівняння

$$Q_{\text{с}} = \alpha F_{\text{с}} (t_{\text{с}} - t_{\text{в}}), \quad (22)$$

де α - коефіцієнт тепловіддачі від вільної поверхні суспензії, Вт/м² °С;

$F_{\text{с}}$ - площа вільної поверхні суспензії, м².

Підставляючи рівняння (7, 13, 15.16, 18-21) в рівняння (6), отримаємо

$$C_{\text{с}} m_{\text{с}} \frac{dt_{\text{с}}}{dt_{\text{с}}} = k_{\text{т}} F_{\text{т}} (t_{\text{вк}} - t_{\text{с}}) + P_{\text{пр}} (1 - \eta_{\text{с}}) + C_{\text{ам.ук}} \frac{dm_{\text{ук}}}{dt_{\text{ук}}} dt_{\text{ук}} - \alpha_{\text{с}} F_{\text{с}} (t_{\text{с}} - t_{\text{в}}) - G_{\text{вк}} C_{\text{вк}} \rho_{\text{в}} (t_{\text{с}} - t_{\text{в}}) - G_{\text{вн}} C_{\text{вн}} \rho_{\text{в}} (t_{\text{с}} + t_{\text{в}}) - \quad (23)$$

Враховуючи, що $C_{\text{пр}} = C_{\text{с}}$ і $m_{\text{пр}} = m_{\text{ус}}$ та здійснюючи заміну

$$\frac{dm_{\text{ук}}}{dt_{\text{ук}}} = R_{\text{т}}; P_{\text{пр}} (1 - \eta_{\text{с}}) = P_{\text{пр}}^*; \frac{dm_{\text{с}}}{dt_{\text{с}}} = R_{\text{с}}; \frac{dm_{\text{вк}}}{dt_{\text{вк}}} = R_{\text{вк}}; \frac{dm_{\text{вн}}}{dt_{\text{вн}}} = R_{\text{вн}}; \frac{dm_{\text{пр}}}{dt_{\text{пр}}} = R_{\text{пр}}$$

отримаємо

$$P_{\text{пр}} P_{\text{пер}} + \frac{t_{\text{вп}} - t_{\text{с}}}{R_{\text{т}}} = \frac{t_{\text{с}} - t_{\text{вк}}}{R_{\text{вк}}} + \frac{t_{\text{с}} - t_{\text{в}}}{R_{\text{с}}} + \frac{t_{\text{с}} - t_{\text{о}}}{R_{\text{о}}} + \frac{t_{\text{с}} - t_{\text{у}}}{R_{\text{у}}} + C_{\text{с}} m_{\text{с}} \frac{dt_{\text{с}}}{dt_{\text{с}}}; \quad (24)$$

Метою дослідження системи термостабілізації є визначення: питомої потужності системи, необхідної для підтримання заданої температури суспензії; впливу добових витрат суспензії на потужність проточного водонагрівача;

низкая. При создании оптимальных условий выращивания они могут давать высокие урожаи.

Опытами установлено, что основными параметрами, обуславливающих интенсивность выращивания водорослей, являются: температура суспензии, режим облучения, состав и концентрация питательной среды, концентрация CO_2 в воздухе барботуется.

Оценку энергетической эффективности процесса культивирования микроводорослей на сточных водах, исследование режимов температуры и облучения и их оптимизации осуществляли в культиваторе глубинного типа, характерной особенностью которого использование погруженных подвижных источников оптического излучения. С целью исследования системы термостабилизации были определены: удельной мощности 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.

Ключевые слова: культивирование микроводорослей, энергопотери, животноводческие отходы.

ENERGY EFFICIENCY OF MICROWAVE CULTIVATION PROCESS

A. Chmil

Abstract. *In recent times, massive cultivation of microalgae has been widespread for use in the national economy. In this plan, chlorella and spirulina are of greatest interest.*

Chlorella is a single-celled green algae, globular or elliptical in the size of 0.005-0.010 mm. The nutrient solution in which the seaweed develops has the form of a green slurry of cells that are invisible to the simple eye. Spirulina is a blue-green algae with a cell size of 15x60 nm, in which there is no solid shell. In nature, microalgae are very common, but their productivity is low. When creating optimal conditions for growing, they must produce high yields. Experiments have established that the main parameters that determine the intensity of growing algae are: the temperature of the suspension, the mode of irradiation, composition and concentration of the nutrient medium, the concentration of CO_2 in the air bubbles.

The estimation of the energy efficiency of the process of cultivation of microalgae on sewage, the study of temperature and irradiation regimes and their optimization was carried out in a cultivator of the deep type, the characteristic feature of which is the use of immersed mobile sources of optical radiation. For the purpose of studying the system of thermostabilization, the specific power of the system necessary to maintain a given slurry temperature was determined; the effect of the daily flow of suspension on the capacity of the flow water heater; the dependence of the duration of heating of the suspension of microalgae on the power of the heating elements of the flow water heater.

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