

УДК 573.6:574.68:631.95

ОНИЩЕНКО О. М., мол. наук. співробітник

ДВОРЕЦЬКИЙ А. І., д-р біол. наук

Дніпропетровський державний аграрно-економічний університет

onish@3g.ua

МОДЕЛЬ УПРАВЛІННЯ ПЕРВИННОЮ ПРОДУКТИВНІСТЮ ВОДОЙМ ТА СКЕРОВАНОГО КУЛЬТИВУВАННЯ МІКРОВОДОРОСТЕЙ ДЛЯ РАЦІОНАЛЬНОГО ВИКОРИСТАННЯ АКВАРЕСУРСУ

Висвітлено потенціал культивування зелених мікроводоростей для раціонального використання акваресурсу. Для ефективного впровадження технологій скерованого виробництва та для альголізації водойм необхідно розробити методи високопродуктивного культивування в умовах природного сонячного освітлення.

Представлена модель розрахунку квот для біомаси, що дозволяє підтримувати постійну високу продуктивність монокультури чи спільноти нижчих автотрофів за умов, що імітують природні умови чи умови ставкового культивування за використання природного сонячного освітлення, характерного для кліматометеорологічних умов України, яка підтверджена експериментально у лабораторних умовах.

Ключові слова: культура нижчих автотрофів, клітинна квота, часова модель культивування, хлорела, альголізація.

Постановка проблеми. Перспективи використання мікроводоростей як сировини у сільському господарстві практично безмежні. Вони є продуцентами вітамінів, антибіотиків, ферментів, гормонів та інших біологічно активних речовин. В останні роки в зв'язку з загостренням енергетичної кризи та стрімким негативним впливом так званого “парникового ефекту”, спостерігається лавиноподібне зростання у багатьох країнах, насамперед у США, досліджень з вивчення можливості використання мікроводоростей для промислового виробництва вуглеводів, ліпідів, амінокислот та як ефективного засобу для очистки стічних вод (Venemann, 2012).

Особливої уваги заслуговує напрям розвитку методів ефективною альголізації водойм, тобто формування структури альгоценозу й підвищення первинної продуктивності водойм за рахунок внесення біомаси певного виду мікроводоростей (Levich, 2000).

Хоча на сьогодні в світі запропонована значна кількість технологій одержання біомаси мікроводоростей, актуальними залишаються все наступні завдання:

- пошук високопродуктивних штамів мікроводоростей;
- пошук дешевих субстратів для вирощування біомаси мікроводоростей;
- вдосконалення техніки селективного культивування та підтримання максимальної продуктивності культури.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У водоймі через енергетичні та трофічні зв'язки біомаса нижчих рослин формує продуктивність, управління структурою фітопланктонної спільноти водойми є ключовим у системі заходів формування природної кормової бази та якості води (Davis, Dent, Parker, Reynolds, & Walsby, 2003).

За скерованого культивування біомаси, її приріст підпорядкований тим самим закономірностям, що і розвиток автотрофів у природних умовах (Ruiz-Marin, Mendoza-Espinosa, & Stephenson. T., 2010).

Окрім емпіричних параметрів процесу вирощування необхідно витримувати основну умову, а саме утримання культури на експоненційній фазі росту (Oglesby, 1977).

Для кожного проміжку часу коефіцієнт швидкості росту розраховується за формулою:

$$\mu' = \text{Ln} (X_2 / X_1) / (t_2 - t_1),$$

де X_1 та X_2 – біомаса у час (t_1) та час (t_2) відповідно (Ruiz-Marin, Mendoza-Espinosa, & Stephenson. T., 2010), (рис. 1).

Згідно з концепцією потреб Моно для підтримання стабільної продуктивності необхідна стабільна доступність факторів росту, математично процес приросту біомаси можна виразити наступним чином:

$$\frac{dX}{dt} = \mu X \left(1 - \frac{X}{K} \right),$$

де t – час; X – питома концентрація біомаси у певний проміжок часу; μ – коефіцієнт швидкості росту окремого виду мікроводоростей; K – максимально можлива концентрація біомаси (вище якої настають умови лімітування) (Oglesby, 1977).

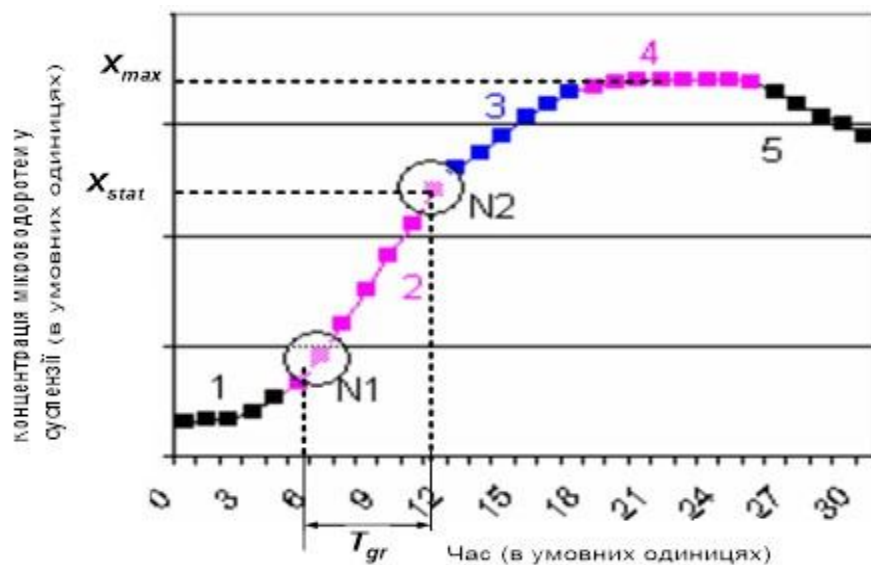


Рис.1. Стадії росту культури та позначення діапазону вирощування для утримання високої швидкості приросту культури.

Оскільки такі розрахунки базуються на використанні встановлених клітинних квот, необхідне їх визначення для виду фітопланктону чи угруповання, яке має бути домінуючим (Levich, 2000).

Потреба клітини, або “квота” – це фактично вміст конкретного елементу в одиниці біомаси або в одній клітині. Цю величину називають також внутрішньоклітинною концентрацією речовини, або кількістю субстрату, необхідної для нарощування одиниці клітинної біомаси.

Існують методики експериментального визначення квот, що запропоновані рядом дослідників, але вони є досить складними для прикладного використання (Levich, 2000).

У літературі також ряд дослідників вводить поняття специфічна швидкість поглинання для кожного елементу, адже інтенсивність поглинання елементів живлення клітинами залежить від декількох факторів, у першу чергу від інтенсивності фотосинтезу. Існують також розбіжності щодо терміну клітинна квота (Oglesby, 1977).

Для *Chlorella vulgaris* квоту за азотом наводять у діапазоні 51,5-56,1 мг/кл, для фосфору – 1,15-2,6 мг/кл (Levich, 2000).

Дослідники з МДУ, А. Левич та П. Фурсова наводять експериментально отримані значення за власною розробленою методикою – 1,5 мг/кл для азоту та 0,03 мг/кл за фосфором (Levich, 2000). Однак згідно з наведеними даними експерименти проводили на культурах з дуже низькою щільністю (від 100 кл/мл), крім цього на різних стадіях поділу вага клітини може суттєво змінюватись (Sunda, Price, & Morel, 2005).

З огляду на зазначене вище, для практичного завдання розрахунку схеми підтримання порівняно щільних культур в основу розробки покладене поняття клітинної квоти як вмісту елементу у сухій речовині клітини (Sunda, Price, & Morel, 2005).

Найпростішим шляхом визначення необхідних рівнів забезпечення культури основними структурними елементами живлення є розрахунок, що базується на усередненій молекулярній формулі біомаси зелених мікроводоростей: $CO_{0,48}H_{18,3}N_{0,11}P_{0,01}$, але необхідно враховувати рівень конверсії, що залежить від фізико-хімічних властивостей культурального середовища (Oglesby, 1977).

За умов активного поділу хлорела має білкову спрямованість біосинтезу, отже клітини поглинають велику кількість азоту. У культурах за умов експоненційного росту клітини здатні накопичувати до 10 % азоту за масою у перерахунку на суху речовину. Для синтезу 1 грама клітинної маси (у перерахунку на суху речовину), клітинами поглинається близько 0,1 грама азоту. За умов виснаження середовища, внутрішньоклітинних запасів зазвичай вистачає на 2–3 цикли поділу, після цього нарощування біомаси майже повністю припиняється (Levich, 2000).

Клітини *Chlorella spp.* поглинають краще карбамідну та аміачну форми азоту, ніж нітрат іон, однак форма у якій азот надходить у клітину майже не впливає на швидкість фіксації CO_2 . Є певна розбіжність у даних різних авторів щодо пріоритетної форми перебування азоту у се-

редовищі (Dandin, Jayaswal, & Giridhar, 2003). Зважаючи на незначну різницю у показниках росту на різних формах азоту, ці особливості можна не враховувати.

Існуючі моделі, що описують залежність нарощування біомаси від концентрації азоту у середовищі також є похідними від рівняння Моно для лімітованих умов, більшість було запропоновано для підрахунку цього параметра для різних видів, що потребує поправок, враховуючи здатність клітин до накопичення азоту шляхом, здебільшого, пасивного транспорту (Ruiz-Marin, Mendoza-Espinosa, & Stephenson. T., 2010).

Вагома частина досліджень з цього питання була спрямована на визначення впливу інших факторів на процеси поглинання та фіксації азоту, серед важливих у цьому аспекті факторів можна виділити рівень забезпеченості світловою енергією, температуру середовища та рН (Sunda, Price, & Morel, 2005).

Таким чином для формування стабільної продуктивності необхідна модель розрахунку потоків азоту та фосфору у водоймі чи біореакторі, адже їх контроль потрібний для забезпечення корегування за рахунок внесення добрив у певних випадках.

Мета дослідження полягала у підтвердженні прийнятності запропонованої моделі клітинних квот, що виконує основну умову – за достатнього забезпечення біогенними елементами, за умови відсутності лімітування за світлом, буде підтримуватися постійна висока швидкість поділу клітин, а приріст чисельності клітин буде керованим.

Матеріал і методика дослідження. Теоретичні методи включали аналіз літератури, моделювання загальних гіпотез, дослідження результатів і процесів їх досягнення, аналіз міжнародних документів, узагальнення, метод моделювання (Levich, 2000).

У лабораторних умовах для визначення основних параметрів культивування виконували поточний контроль якісних та кількісних характеристик росту культури у встановлених умовах, що імітували умови великомасштабного процесу (Venemann, 2012).

Для контролю використовували загальні гідрохімічні та гідробіологічні методики визначення концентрації вуглецю, окремих компонентів середовища, зокрема, концентрації основних розчинних форм біогенних компонентів, а також щільність клітин мікрowodоростей на одиницю обсягу та загальну біомасу, використовували також елементи методики визначення продуктивності нижчих автотрофів, що розроблена для визначення первинної продуктивності природних водойм (Arsan, Davydov, & Scherbak, 2006).

Для верифікації робочої моделі культивування параметри розраховані у таблиці 1, а саме, концентрація біогенів, обсяг доданого середовища за дотримання усіх інших умов були відтворені під час культивування у фотобіореакторі, запропонований режим культивування з щоденним розрахованим обсягом додавання культурального середовища.

Культуру *Chlorella ellipsoidea* у контрольних кюветах вирощували на модифікованому В3 середовищі наступного складу: 6,03 мМ NaNO₃; 0,53 мМ K₂HPO₄; 0,03 мМ MgSO₄×7H₂O; 0,2 мМ CaCl₂ ×2H₂O; 0,02 мМ залізоамонійного цитрату; 0,002 мМ Na₂EDTA×2H₂O; 0,18 мМ Na₂CO₃. Середовище було модифіковане таким чином, щоб кількість азоту та фосфору на об'єм живильного середовища, що додається, відповідала потребі біомаси на приріст згідно з наведеними розрахунками, оскільки концентрація біомаси утримується на стабільному рівні, а об'єм що додається кожної години відповідно росте, концентрація азоту і фосфору у живильному середовищі теж лишається стабільною.

Інші фактори росту, у першу чергу вуглець та основні макроелементи не лімітувалися, адже для перевірки правильності розрахунків достатній контроль лише двох факторів росту, що суттєво не впливає на достовірність результатів експерименту, в той час як значно спрощую систему контролю параметрів росту у ході експерименту.

За допомогою гелевих плівок Neutral spot density була встановлена щільність випромінювання 854 μмоль на метр квадратний на секунду (256 Ватт на метр квадратний), що відповідає умовам інсоляції для середніх широт України.

Насичення CO₂ забезпечувалося за допомогою диспенсерів, під'єднаних до балону. Значення рН підтримувалося на рівні 6,7–6,9, що відповідало рівню концентрацій вуглекислоти 12–25 мг/дм³. Сумарний світловий період росту впродовж експерименту складав 24 години, темновий період тривав 4 години, що чергувалися між світловими періодами по 12 годин, темнові періоди не враховувались як час експерименту.

Таблиця 1 – Схема експерименту для верифікації моделі нелімітованого росту для забезпечення умов нелімітованого культивування

Період, год	μ	Додавання вуглецю $qсX0 \times \epsilon\mu(t)$, г	Квота вуглецю $сX(t)$, г	Додавання азоту $qNX0 \times \epsilon\mu(t)$, г	Квота азоту $NX(t)$, г	Додавання фосфору $qPX0 \times \epsilon\mu(t)$, г	Квота фосфору $PX(t)$, г
1	0,048	$1,3 \cdot 10^{-2}$	$1,2 \cdot 10^{-2}$	$2,0 \cdot 10^{-3}$	$2,1 \cdot 10^{-3}$	$3,8 \cdot 10^{-4}$	$4,0 \cdot 10^{-4}$
2	0,048	$1,4 \cdot 10^{-2}$	$1,7 \cdot 10^{-2}$	$2,1 \cdot 10^{-3}$	$2,1 \cdot 10^{-3}$	$4,0 \cdot 10^{-4}$	$4,0 \cdot 10^{-4}$
3	0,048	$1,6 \cdot 10^{-2}$	$1,5 \cdot 10^{-2}$	$2,2 \cdot 10^{-3}$	$2,3 \cdot 10^{-3}$	$4,2 \cdot 10^{-4}$	$4,4 \cdot 10^{-4}$
4	0,048	$1,7 \cdot 10^{-2}$	$2,0 \cdot 10^{-2}$	$2,3 \cdot 10^{-3}$	$2,3 \cdot 10^{-3}$	$4,4 \cdot 10^{-4}$	$4,4 \cdot 10^{-4}$
5	0,048	$1,9 \cdot 10^{-2}$	$1,8 \cdot 10^{-2}$	$2,4 \cdot 10^{-3}$	$2,5 \cdot 10^{-3}$	$4,6 \cdot 10^{-4}$	$4,8 \cdot 10^{-4}$
6	0,048	$2,1 \cdot 10^{-2}$	$2,4 \cdot 10^{-2}$	$2,5 \cdot 10^{-3}$	$2,5 \cdot 10^{-3}$	$4,9 \cdot 10^{-4}$	$4,9 \cdot 10^{-4}$
7	0,048	$2,3 \cdot 10^{-2}$	$2,2 \cdot 10^{-2}$	$2,6 \cdot 10^{-3}$	$2,7 \cdot 10^{-3}$	$5,1 \cdot 10^{-4}$	$5,3 \cdot 10^{-4}$
8	0,048	$2,6 \cdot 10^{-2}$	$2,9 \cdot 10^{-2}$	$2,7 \cdot 10^{-3}$	$2,8 \cdot 10^{-3}$	$5,3 \cdot 10^{-4}$	$5,4 \cdot 10^{-4}$
9	0,048	$2,8 \cdot 10^{-2}$	$2,8 \cdot 10^{-2}$	$2,9 \cdot 10^{-3}$	$3,0 \cdot 10^{-3}$	$5,6 \cdot 10^{-4}$	$5,8 \cdot 10^{-4}$
10	0,048	$3,1 \cdot 10^{-2}$	$3,4 \cdot 10^{-2}$	$3,0 \cdot 10^{-3}$	$3,0 \cdot 10^{-3}$	$5,9 \cdot 10^{-4}$	$5,9 \cdot 10^{-4}$
11	0,048	$3,4 \cdot 10^{-2}$	$3,4 \cdot 10^{-2}$	$3,2 \cdot 10^{-3}$	$3,3 \cdot 10^{-3}$	$6,2 \cdot 10^{-4}$	$6,4 \cdot 10^{-4}$
12	0,048	$3,7 \cdot 10^{-2}$	$4,1 \cdot 10^{-2}$	$3,3 \cdot 10^{-3}$	$3,3 \cdot 10^{-3}$	$6,5 \cdot 10^{-4}$	$6,5 \cdot 10^{-4}$
13	0,048	$4,1 \cdot 10^{-2}$	$4,1 \cdot 10^{-2}$	$3,5 \cdot 10^{-3}$	$3,6 \cdot 10^{-3}$	$6,8 \cdot 10^{-4}$	$7,0 \cdot 10^{-4}$
14	0,048	$4,5 \cdot 10^{-2}$	$4,9 \cdot 10^{-2}$	$3,6 \cdot 10^{-3}$	$3,7 \cdot 10^{-3}$	$7,1 \cdot 10^{-4}$	$7,2 \cdot 10^{-4}$
15	0,048	$5,0 \cdot 10^{-2}$	$5,0 \cdot 10^{-2}$	$3,8 \cdot 10^{-3}$	$4,0 \cdot 10^{-3}$	$7,4 \cdot 10^{-4}$	$7,7 \cdot 10^{-4}$
16	0,048	$5,5 \cdot 10^{-2}$	$5,9 \cdot 10^{-2}$	$4,0 \cdot 10^{-3}$	$4,1 \cdot 10^{-3}$	$7,8 \cdot 10^{-4}$	$7,9 \cdot 10^{-4}$
17	0,048	$6,0 \cdot 10^{-2}$	$6,1 \cdot 10^{-2}$	$4,2 \cdot 10^{-3}$	$4,3 \cdot 10^{-3}$	$8,2 \cdot 10^{-4}$	$8,5 \cdot 10^{-4}$
18	0,048	$6,6 \cdot 10^{-2}$	$7,1 \cdot 10^{-2}$	$4,4 \cdot 10^{-3}$	$4,5 \cdot 10^{-3}$	$8,6 \cdot 10^{-4}$	$8,7 \cdot 10^{-4}$
19	0,048	$7,3 \cdot 10^{-2}$	$7,4 \cdot 10^{-2}$	$4,6 \cdot 10^{-3}$	$4,8 \cdot 10^{-3}$	$9,0 \cdot 10^{-4}$	$9,3 \cdot 10^{-4}$
20	0,048	$8,0 \cdot 10^{-2}$	$8,5 \cdot 10^{-2}$	$4,8 \cdot 10^{-3}$	$4,9 \cdot 10^{-3}$	$9,4 \cdot 10^{-4}$	$9,6 \cdot 10^{-4}$
21	0,048	$8,8 \cdot 10^{-2}$	$9,0 \cdot 10^{-2}$	$5,1 \cdot 10^{-3}$	$5,2 \cdot 10^{-3}$	$9,9 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-3}$
22	0,048	$9,7 \cdot 10^{-2}$	$1,0 \cdot 10^{-1}$	$5,3 \cdot 10^{-3}$	$5,4 \cdot 10^{-3}$	$1,0 \cdot 10^{-3}$	$1,1 \cdot 10^{-3}$
23	0,048	$1,1 \cdot 10^{-1}$	$1,1 \cdot 10^{-1}$	$5,6 \cdot 10^{-3}$	$5,8 \cdot 10^{-3}$	$1,1 \cdot 10^{-3}$	$1,1 \cdot 10^{-3}$
24	0,048	$1,2 \cdot 10^{-1}$	$1,2 \cdot 10^{-1}$	$5,9 \cdot 10^{-3}$	$6,0 \cdot 10^{-3}$	$1,1 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{-3}$

Було інокульовано 2 кювети (№ 1 та № 2) та 50 мл суспензії з концентрацією 5 г/л і розведено до 500 мл, тобто досягнута початкова концентрація (K_0) 0,5 г/л.

Доливання розрахованих аліквот підготованого живильного середовища виконували відповідно до даних таблиці 3. Наприкінці кожної години перед додаванням аліквоти поживного середовища проводили відбір проби суспензії для визначення біомаси та концентрації живих активно фотосинтезуючих клітин у суспензії. Значення для кожної години та помилку вимірювання, спираючись на результати вимірювань, визначали регресійним аналізом отриманих даних. Для спрощення контролю і прорахунків об'єми проби, що відбирали (20 мл), заміщували живильним середовищем, для підтримання швидкості розведення на запланованому рівні (Alekin, Semenov, & Skopintsev, 1973).

Основні результати дослідження. Враховуючи викладене вище, може бути запропонована спрощена модель розрахунку значень валової потреби клітин залежно від їх початкової біомаси у встановлений проміжок часу, що робить можливим підтримання факторів росту на рівні, який відповідає потребам фітопланктонного угруповання чи монокультури, а отже підтримання "передбачуваної" продуктивності.

Валова продукція біомаси через певний проміжок часу t може бути визначена наступним чином:

$$X(t) = X_0 \times e^{\mu t},$$

де t – час; X_0 – питома концентрація біомаси на початку культивування; μ – коефіцієнт швидкості росту культури.

Для вирішення прикладних завдань найбільш доцільною є система розрахунків, побудована на визначенні валової клітинної потреби, або квоти у певний проміжок часу виходячи зі значення наявної валової біомаси. Якщо за значення X приймається "абсолютна біомаса зелених водоростей" і змінними є "кількість внесених з добривами азоту і фосфору".

Згідно з концепцією потреб Моно, для підтримання максимальної швидкості приросту біомаси має бути наявна кількість субстрату, що мінімум удвічі вища за необхідну клітинам валову квоту.

Валова клітинна потреба азоту виражається наступним чином:

$$qNX(t) = 2 \times qNX_0 \times e^{\mu t},$$

де $qNX(t)$ – валова квота азоту для біомаси; qNX_0 – стартовий вміст азоту у наявній біомасі; μ – коефіцієнт швидкості приросту; t – загальний час на приріст.

Аналогічне рівняння може бути записане і для фосфору:

$$qPX(t) = 2 \times qPX_0 \times e^{\mu t},$$

де $qPX(t)$ – валова квота фосфору для біомаси; qPX_0 – стартовий вміст фосфору у біомасі; μ – коефіцієнт швидкості приросту; t – час.

Для окремого випадку, що розглядається, коли вирішується завдання підтримки приросту біомаси у заданому діапазоні, ця умова є другорядною, адже такі умови створюються, коли концентрація факторів росту підтримується на постійному рівні, а отже швидкість поглинання практично співпадає із клітинною потребою, або квотою.

Для спрощення розрахунків вирішення прикладних завдань доцільніше використовувати значення вмісту основних елементів живлення у біомасі та припустити, що це значення співпадає з клітинною квотою на приріст, але лише за умов забезпечення інших оптимальних умов середовища.

При цьому слід враховувати що реальний рівень поглинання або валова потреба у певний проміжок часу ($t_0 - t$) буде відповідати значенню однієї валової квоти для біомаси, тобто частина субстрату що надходить буде лишатися не засвоєною. Отже, щоб вирахувати кількість необхідного субстрату на наступний проміжок часу, тобто ту що потрібна лише на приріст біомаси, необхідно поповнити різницю між залишком та розрахованою потребою для кожного проміжку.

Адагтуючи вище зазначені рівняння, можуть бути запропоновані аналогічні рівняння, що будуть прийнятні для азоту та фосфору:

$$NX(t) = 2 \times qNX_0 \times e^{\mu(t)} - qNX_0 \times e^{\mu(t_0)},$$

де $qNX(t)$ – валова квота азоту для біомаси; qNX_0 – стартовий вміст азоту у наявній біомасі; μ – коефіцієнт швидкості приросту; t – загальний час на приріст;

$$PX(t) = 2 \times qPX_0 \times e^{\mu(t)} - qPX_0 \times e^{\mu(t_0)},$$

де $qPX(t)$ – валова квота фосфору для біомаси; qPX_0 – стартовий вміст фосфору у біомасі; μ – коефіцієнт швидкості приросту; t – час.

Враховуючи, що швидкість поглинання пропорційна коефіцієнту швидкості приросту біомаси, визначення коефіцієнта швидкості приросту за використання різних мінеральних та органічно-мінеральних за відсутності лімітування у широких межах не залежить від форми у якій знаходиться елемент, за умови що вона є розчинною.

Модель розрахована на утримання культури у діапазоні концентрації $1/2 K - K$, що реалізується шляхом періодичного розведення, тобто додавання культурального середовища, що водночас забезпечує стабільне надходження факторів росту у культуральний обсяг, а отже таким чином забезпечуються стабільні параметри культивування.

Отже значення, або основні характеристики культури (табл. 2), які були отримані експериментально, мають бути покладені в основу розрахунків схеми вирощування, зокрема основні його умови і параметри, інтенсивність освітлення, швидкість розведення, концентрація основних факторів росту у живильному середовищі, максимальна щільність культури, температурні умови.

Наявність основних характеристик культури дає можливість “передбачити” основні параметри культивування, яких необхідно дотримуватись протягом всього циклу культивування для утримання продуктивних характеристик на стабільно високому рівні (табл. 3).

На практиці умови мають бути реалізовані за рахунок застосування способу вирощування фед-бетч, тобто має виконуватись постійний долив живильного середовища та за умови, що питома освітленість на площу для культури буде залишатися постійною за постійної концентрації культури, а надходження біогенів із живильним середовищем буде розраховано виходячи із визначених клітинних квот, а швидкість розведення – враховуючи коефіцієнт швидкості росту.

Таблиця 2 – Основні характеристики культур *Chlorella spp.* наведені у наукових та науково-технічних звітах з аналогічними значеннями

Основна характеристика культури	Нааявні дані, що наводяться у науково-технічній літературі	Одиниця виміру
Рівень світлового насичення	400-2800	μмоль на метр квадратний на секунду
Коефіцієнт швидкості росту	0,025-0,055	годин-1
Оптимальна температура	20-23	°C
Оптимальна щільність культури	0,5-1	г/л
Клітинна квота вуглецю	0,47-0,56	г/г
Клітинна квота для азоту	0,062-0,092	г/г
Клітинна квота для фосфору	0,01-0,02	г/г

Таблиця 3 – Основні параметри культивування для *Chlorella spp.* в основі робочої моделі культивування

Параметр культивування	Основні параметри робочої моделі культивування	Одиниця виміру
Рівень світлового насичення	854	μмоль/м.кв/сек.
K	1	г/л
K ₀	0,5	г/л
μ	0,0475	
q _c X ₀	0,515	г/г
q _N X ₀	0,077	г/г
q _P X ₀	0,015	г/г

Отримані дані експерименту показали, що швидкість росту біомаси досягла заданих параметрів та враховуючи дані щодо кінцевої біомаси, кількість біогенних елементів введених у культуральне середовище повністю відповідала потребам культури (табл. 4).

Таблиця 4 – Параметри отримані у ході експерименту з керованого культивування шляхом забезпечення постійного надходження мінімальних квот для біомаси

Номер	Середнє значення K ₀ , г/л	Середнє значення (μ)	Загальне рівняння росту біомаси	Станд.від.	R ²
№ 1	0,503	0,0483	$Y(x) = 0.503 \times \exp(0,0483 \times x)$	0,006	0,99
№ 2	0,516	0,048	$Y(x) = 0.516 \times \exp(0,048 \times x)$	0,007	0,99

Модель процесу культивування, заснована на параметричних дослідженнях динаміки зміни концентрації клітин на одиницю корисного обсягу системи забезпечила підтримання стабільної продуктивності.

Висновки. Пропонована модель дає можливість розраховувати необхідні дози введення поживного середовища за культивування у фотобіореакторі чи внесення добрив за проведення альголізації водойм для контролю первинної продуктивності та забезпечення стійкого домінування хлорококових мікроводоростей.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Benemann J. Microalgae aquaculture feeds / J. Benemann // Journal of Applied Phycology. – 2012. – Vol. 3(4). – P. 233-245.
2. The annual cycle of growth rate and bio-mass change in *Planktothrix spp.* in Blelham Tarn / P. Davis, M. Dent, J. Parker et al. // English Lake District. Freshwater Biology. – 2003. – Vol. 48. – P. 852-867.
3. Levich A.P. Variational modelling theorems and algalocoenoses functioning principles / A.P. Levich // Ecological Modelling. – 2005. – Vol. 131. – P. 7-27.
4. Oglesby R. Relationships of Fish Yield to Lake Phytoplankton Standing Crop, Production, and Morphoedaphic Factors / R. Oglesby // Journal of the Fisheries Research Board of Canada. – 2017. – Vol. 34(12). – P. 2271-2279.
5. Gonzalez L. Efficiency of ammonia and phosphorus removal from a colombian agroindustrial wastewater by the microalgae *Chlorella vulgaris* and *Scenedesmus dimorphus* / L. Gonzalez, R. Canizares, S. Baena // Bioresource Technology. – 1997. – Vol. 60(3). – P. 259-262.
6. Ruiz-Marin A. Growth and nutrient removal in free and immobilized green algae in batch and semi-continuous cultures treating real wastewater / A. Ruiz-Marin, L. Mendoza-Espinosa, T. Stephenson // Bioresource Technology. – 2010. – Vol. 1(101). – P. 58-64.

7. Trace Metal Ion Buffers and Their Use in Culture Studies / W. Sunda, N. Price, F. Morel, R. Andersen // *Algal Culturing Techniques*. Elsevier Academic Press. – 2005. – P. 35-63.

8. Алекин О.А. Руководство по химическому анализу воды / О.А. Алекин, А.Д. Семенов, Б.А. Копинцев. – Л.: Наука, 1973. – 256 с.

9. Методи гідроекологічних досліджень поверхневих вод / О.М. Арсан, О.А. Давидов, В.І. Щербак та ін.; за ред. В.Д. Романенка. – К.: ЛОГОС, 2006. – 408 с

10. Dandin B. Handbook of sericulture technologies / B. Dandin, J. Jayaswal, K. Giridhar. – Bangalore: Central Silk Board, 2003.

REFERENCES

1. Benemann, J. Microalgae aquaculture feeds. *Journal of Applied Phycology*, 2012, Vol. 3(4), pp. 233-245.
2. Davis, P., Dent, M., Parker, J., Reynolds, C., Walsby, A. The annual cycle of growth rate and bio- mass change in *Planktothrix* spp. in Blelham Tarn, English Lake District. *Freshwater Biology*, 2003, Vol. 48, pp. 852-867.
3. Levich, A. Variational modelling theorems and algocoenoses functioning principles. *Ecological Modelling* , 2005, Vol. 131, pp. 7-27.
4. Oglesby, R. Relationships of Fish Yield to Lake Phytoplankton Standing Crop, Production, and Morphoedaphic Factors. *Journal of the Fisheries Research Board of Canada*, 2017, Vol. 34(12), pp. 2271-2279.
5. Gonzalez, L., Canizares, R., Baena, S. Efficiency of ammonia and phosphorus removal from a colombian agroindustrial wastewater by the microalgae *Chlorella vulgaris* and *Scenedesmus dimorphus*. *Bioresource Technology*, 1997, Vol. 60(3), pp. 259-262.
6. Ruiz-Marin, A., Mendoza-Espinosa, L., Stephenson, T. Growth and nutrient removal in free and immobilized green algae in batch and semi-continuous cultures treating real wastewater. *Bioresource Technology*, 2010, Vol. 1(101), pp. 58-64.
7. Sunda, W., Price, N., Morel, F., Andersen, R. Trace Metal Ion Buffers and Their Use in Culture Studies. *Algal Culturing Techniques*. Elsevier Academic Press, 2005, pp. 35-63.
8. Alekin, O., Semenov, A., Skopintsev, B. (1973). *Rukovodstvo po khimicheskomu analizu vod sushi* [Guidelines for chemical composition of inland waters]. Leningrad, Science, 256 p.
9. Arsan, O., Davydov, A., Scherbak, V. (2006). *Metody gidroekologichnyh doslidzhen' poverhnyeh vod* [Methods of hydroecological research of surface waters]. Kyiv, Logos, 408 p.
10. Dandin, B., Jayaswal, J., Giridhar, K. Handbook of sericulture technologies. Bangalore: Central Silk Board, 2003.

Модель управления первичной продуктивностью водоемов и управляемого культивирования микроводорослей для рационального использования акваресурса

Е. М. Онищенко, А. И. Дворецкий

Освещено потенциал культивирования зеленых микроводорослей для рационального использования акваресурса. Для эффективного внедрения технологий направленного производства и для альголизации водоемов необходимо разработать методы высокопроизводительного культивирования в условиях естественного солнечного освещения.

Представлена модель расчета квот для биомассы, которая позволяет поддерживать постоянную высокую производительность монокультуры или сообщества низших автотрофов в условиях, имитирующих природные условия или условия прудового культивирования при использовании естественного солнечного освещения, характерного для климатометеорологических условий Украины, которая подтверждена экспериментально в лабораторных условиях.

Ключевые слова: культура низших автотрофов, клеточная квота, временная модель культивирования, хлорелла, альголизация.

Model of primary production management and microalage controlled culturing for aquaresource raional use

O. Onyshchenko, A. Dvoretzky

The potential of green microalgae cultures for agriculture application is discussed in the article. Microalgae are cultured for high value products such as food additives, biologically active substances, pigments, unicellular protein, renewable energy, methane, biodiesel, ethanol or hydrogen, wastewater treatment, CO₂ fixation. Microalgae's natural metabolic process makes them feasible to use while along with water purification and providing a renewable feedstock supply. For implementation of high efficient production systems for biomass generation or algolization, the development of high productive cultivation in conditions of natural illumination is required. The use and understanding of controlled growth and nutrients supply for algocenosis in natural water bodies or raceway ponds it is particularly important from an operational stand point as far as it gives the sufficient information for scaling up the systems that can provide effective algolization in natural water body or pond culturing.

Growth systems are based mainly on the principle of concentration increase in the fixed volume. The developed model provides a different principle, i.e. volume increase under fixed concentration with close to maximal growth rate which allows to achieve constant concentration, controlled culturing and biomass stable yield. Since such calculations are based on the use of the established cell quotes, it is necessary to determine them for the type or species (Levich, 2000). The need for a cell, or "quota", is actually the content of a specific element in a biomass unit or in a single cell. This value is also called the intracellular concentration of the substance, or the amount of substrate required to increase the unit cell biomass. There are methods for experimental identifying quotas suggested by a number of researchers, but they are quite complicated to apply (Levich, 2000). Some researchers introduce the concept of a specific absorption rate for each element since the intensity of absorption of cell nutrients depends on several factors, primarily on photosynthesis intensity, there is also a number of discrepancies regarding the term of cellular quota (Oglesby, 1977).

The suggested model is aimed to define the conditions for each growth period and keeping the culture in this boundaries. The conducted tests series aimed to prove our concept that in most systems algae growth can be supported by stable input of nutrients equal to "cell quota" while light input is stable. The total conversion is higher if nutrient provision for each of basic

nutrients is equal to the "quota". The model can be applied for both quasi-continuous and storage culture mode at different culture depths and, in addition to incident sunlight and water temperature data, it requires the following experimentally determined strain-specific input parameters: growth rate as a function of light intensity and temperature, biomass loss rate in the dark as a function of temperature and light intensity during the preceding light period, and the scatter-corrected biomass light absorption coefficient. The model is also applicable to photobioreactor cultures. Solar energy is usually used in cultivation systems and thus concentration increase results in conversion level decrease as light energy amount is stable and the amount of culture consuming light is growing. Proceeding from the foregoing, a simplified model of calculation, values of the gross demand of cells depending on their initial biomass is suggested to calculate the total cell needs depending on the start biomass at a fixed interval of time, which makes it possible to maintain growth factors at a level that meets the needs of a phytoplankton group or monoculture, and hence maintaining "predictable" productivity.

Total cell requirement in nitrogen input can be expressed as following: $qNX(t) = 2 \times qNX0 \times e\mu t$, where $qNX(t)$ – total cell quota on nitrogen, $qNX0$ – initial nitrogen content in biomass, μ – growth rate coefficient, t – time required for biomass add. Similar equation can be proposed for the phosphorous: $qPX(t) = 2 \times qPX0 \times e\mu t$, where $qPX(t)$ – bulk quota on phosphorous for the biomass, $qPX0$ – initial phosphorous concentration in the biomass, μ – growth rate coefficient, t – time required for biomass growth.

The developed growth method allows to cultivate on constant parameters (concentration) with the volume increase which is very important when we use sunlight. For daytime conditions, it is important to determine the specific growth rate (μ) in each of the n culture volume layers using experimentally determined strain-specific growth rate data. Since cells in well mixed dense cultures exposed to high average light intensities at or near the surface of the pond, integral growth rate was assumed as integral constant meaning and experimentally determined for the case of high average light intensity during the late exponential growth phase. Obtaining these parameters for each strain is rather laborious, though labour costs can be minimized or the process can be automatized in the industrial production. This will significantly reduce the requirement for outdoor pond cultivation. Finally, the biomass growth model, allows for the generation of strain-specific biomass productivity for natural water bodies, which is a topic of currently ongoing research.

Key words: autotrophs culture, cell quota, time culturing model, chlorella, algolization.

Надійшла 27.10.2017 р.

УДК 635.21:631.5(292.485)(045)

М'ЯЛКОВСЬКИЙ Р. О., канд. с.-г. наук

Подільський державний аграрно-технічний університет
ruslanmialkovskui@i.ua

ВПЛИВ СОРТУ, СТРОКІВ, ГЛИБИНИ ЗАГОРТАННЯ НАСІННЄВИХ БУЛЬБ ЗА ГРЕБЕНЕВОГО СПОСОБУ НА ДРУЖНІСТЬ СХОДІВ РОСЛИН КАРТОПЛІ

Вивчено вплив застосування різних варіантів строків проведення сівби, глибини загортання насіннєвих бульб за гребеневого способу, сорту та їхньої взаємодії на дружність сходів рослин картоплі в умовах Правобережного Лісостепу України. Встановлено, що кращі показники дружності сходів насіння у більшості років досліджень були на варіантах другого строку сівби (03-05 травня). Так, дружність сходів середньоранніх сортів за фактором А (строк садіння) складала 92,1 %, середньостиглих – 93,7 %, середньопізніх сортів – 93,9 %. Більшою мірою дружність сходів картоплі залежала від ґрунтово-кліматичних умов, строків посіву, частка якої у зміні цього показника становила 22,2-57,1 %, глибини загортання насіннєвих бульб – 27,3-43,1 %, та сортових особливостей досліджуваних сортів – 4,6-17,7 %, відповідно.

Ключові слова: картопля, сорт, строки садіння, глибина загортання бульб, схожість, дисперсійний аналіз.

Постановка проблеми. Наукові установи держави забезпечують поширення у виробництво нових сортів картоплі різних груп стиглості, які мають специфічні екологічні особливості, що потребує проведення досліджень спрямованих на встановлення оптимальних елементів технології вирощування. Можливість максимальної реалізації потенціалу продуктивності бульб значною мірою залежить від дружності сходів. У зв'язку з цим важливо проводити дослідження, спрямовані на встановлення оптимальних технологічних елементів щодо підвищення дружності сходів насіння для конкретних умов вирощування та відповідного сорту.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дружність сходів – досить варіативний показник, який характеризується низкою ґрунтово-кліматичних і агротехнічних чинників. Значною мірою повнота сходів залежить від умов формування, дозрівання та зберігання насіннєвого матеріалу [9]. Важливе значення для процесу проростання має волога, достатня кількість якої визначає інтенсивність та рівномірність росту і розвитку посівів. Серед погодних факторів знач-