

УДК 574.583+574.34

**В. О. Бараннік**, канд. фіз.-мат. наук, ст. наук. співроб., доцент  
(Харківська національна академія міського господарства),

**В. С. Кресін**, канд. тех. наук  
(УкрНДІЕП)

## **МОДЕЛЮВАННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ ПОПУЛЯЦІЇ *M. MINUTUM* ЗА КЛІМАТИЧНИМИ УМОВАМИ ПІВДНЯ УКРАЇНИ**

*Запропоновано математичну модель продукції біомаси популяції фітопланктону *M. minutum* в штучних басейнах з примусовим перемішуванням. Параметри моделі, що визначають динамічні характеристики популяції, обрані за опублікованими даними натурних спостережень на дослідному басейні-бридері. Проведено моделювання продукції популяції фітопланктону на фітофермі за кліматичними умовами півдня України (45° пн. ш.). Показано, що очікувана продуктивність фітоферми за рослинною олією може у 6,5 разу перевищує найвищу очікувану продуктивність рапсу.*

**Ключові слова:** *M. minutum*, продуктивність за олією, південь України.

**Актуальність проблеми.** Вже тривалий час у світі проводяться дослідження у пошуку економічних консервантів енергії сонця з метою подальшого їх використання як поновлюваних джерел енергії, що не змінюють природний кругообіг речовин, зокрема вуглецю. Одним з перспективних напрямків цих досліджень є вивчення можливостей використання рослинних олій для часткової або повної заміни палив, що виробляються з обмежених викопних мінеральних ресурсів надр. Певною альтернативою наземним рослинам (соняшник, соя, рапс тощо), які потребують для їх культивування родючих земель, конкуруючи тим самим з потребами виробництва продуктів харчового споживання, є фітопланктон, який, з одного боку, для свого розвитку потребує лише відповідного водного середовища, а з іншого боку, може бути сировиною для виробництва рослинної олії та інших корисних речовин (ліки, барвники тощо).

У період 1988-1990 рр. поблизу м. Роузвел (33° пн. ш., штат Нью-Мексико, США) в натурних умовах, наближених до виробничих, були проведені експериментальні дослідження продуктивності популяції фітопланктону *Monoraphidium minutum* (*M. minutum*). Ця одноклітинна зелена водорість була обрана з 300 видів популяцій фіто-

планктону завдяки її стійкості до значних коливань температури (аж до температури замерзання води) і солоності, помітного вмісту олії (20% від сухої біомаси) і значної швидкості зростання біомаси. Опис штучного басейну-бридера з примусовим перемішуванням для вирощування фітопланктону, режимів і умов продукування біомаси, а також тривалості і результатів експериментальних досліджень наведений у роботі [1].

Отримані дані щодо продуктивності популяції *M. minutum* дозволили автору [1] порівняти, з огляду на вигоди і втрати, три ймовірні локації розташування на території США відповідної фітоферми у складі 64-х басейнів-бридерів, двох басейнів-відстійників, насосної і центрифугової станції, а також складу кінцевої продукції біомаси. Основним висновком цього дослідження стало те, що незважаючи на значно більшу продуктивність фітопланктону у порівнянні з наземними рослинами, його використання тільки для виробництва біодизельного палива у теперішній час не є економічно виправданим через великі поточні витрати електроенергії (зокрема, через використання центрифуг для кінцевої сепарації біомаси фітопланктону з водної суміші). Проте слід зазначити, що у перспективі цей напрямок консервації сонячної енергії може стати економічно виправданим через зростання цін на паливо, вартості родючих земель, харчових продуктів рослинного походження, а також внаслідок удосконалення технології виробництва біомаси фітопланктону та технології багатопільового комплексного використання її складових.

З огляду на невтішну перспективу використання мінеральних енергоресурсів, метою даної роботи було оцінити продуктивність популяції *M. minutum* за кліматичних умов південних районів України (на широтах близько 45° — Крим, південний захід Одеської області), які мають досить великий потенціал сонячного випромінювання й обмежені ресурси земель високої родючості. Інструментом такого оцінювання обрана математична модель продукції на фітофермі біомаси популяції *M. minutum*, кінетичні характеристики якої ідентифіковані нами за даними натурних спостережень [1].

**Матеріали і методи.** Вихідними слугують дані щодо параметрів експериментального басейну-бридера і режиму продукції біомаси фітопланктону, а саме:

- робочий об'єм басейну  $V = 200 \text{ м}^3$ ;

**1. Середня сонячна радіація та продуктивність популяції фітопланктону *M. minutum* за даними спостережень [1]**

Період спостережень	Середня сонячна радіація, $I_0$ (кВт·г/м <sup>2</sup> /доба)	Середня продуктивність у сухій вазі, $\Pi$ (г/м <sup>2</sup> /доба)
1.10.89 — 30.09.90	5,75	10,5
1.05.90 — 30.09.90	7,75	18

- площа водного дзеркала басейну  $A = 1000 \text{ м}^2$ ;
- продуктивна концентрація біомаси  $X_{\text{max}} = 1000 \text{ г/м}^3$ ;
- середня продуктивність басейну у сухій вазі біомаси фітопланктону для двох періодів спостережень, що наведені у табл. 1.

Режим роботи басейну-бридера порівняно простий. Спочатку його робочий об'єм завантажується водосольовим розчином, що містить біогени у достатній для вільного розвитку фітопланктону кількості, і початковою біомасою популяції *M. minutum* у концентрації  $X_0$  (г/м<sup>3</sup>). У світлий час доби у басейні створюється примусова циркуляція суміші для забезпечення рівномірного розподілу клітин фітопланктону і поживних речовин у робочому об'ємі. Процес зростання біомаси популяції фітопланктону від початкової до продуктивної концентрації  $X_{\text{max}}$  супроводжується компенсацією втрат води з басейну на випаровування і витрат біогенів на створення та розвиток біомаси.

Після досягнення продуктивної концентрації біомаси з басейну починається відбір водної суміші фітопланктону з витратою води  $Q$  (м<sup>3</sup>/доба) для подальшої сепарації біомаси. Ця витрата разом із втратами води на випаровування компенсується, частково, зворотною водою після сепарації біомаси і, частково, свіжою водою зі сторонніх джерел. Крім того, забезпечується постійне поповнення робочого об'єму біогенними речовинами. Величину витрати води  $Q$  регулюють таким чином, щоб вміст біомаси у басейні підтримувався на рівні продуктивної концентрації.

З огляду на вказані особливості режиму роботи басейну-бридера, для моделювання процесу продукції біомаси популяції фітопланктону доцільно прийняти такі спрощувальні припущення:

- у штучному водному середовищі басейну у фітопланктону відсутні хижаки;

- інтенсивне перемішування суміші забезпечує однорідний розподіл завислих і розчинених речовин у робочому об'ємі басейну;
- підживлення суміші біогенними речовинами достатньо для того, щоб вважати, що лише світло лімітує розвиток популяції фітопланктону;
- продуктивна концентрація  $X_{\max}$  достатньо велика, щоб забезпечити майже повне (на 99%) поглинання світлового потоку у робочому об'ємі;
- поглинанням світлового потоку водою можна знехтувати у порівнянні з поглинанням його фітопланктоном, яке є пропорційним концентрації біомаси  $X$  (г/м<sup>3</sup>).

Наведені припущення дозволяють подати математичну модель динаміки біомаси популяції фітопланктону у басейні-бридері у вигляді

$$\frac{dX}{dt} = \frac{\mu I_0 A}{kV} R(X) - rX - \frac{QX}{V}; \quad (1)$$

$$R(X) = 1 - \exp(-khX), \quad (2)$$

де  $t$  — час (доба);  $\mu$  — коефіцієнт швидкості фотосинтезу (м<sup>2</sup>/кВт·г);  $I_0$  — щільність світлового потоку на поверхні басейну (кВт·г/м<sup>2</sup>/доба);  $k$  — коефіцієнт послаблення світлового потоку в робочому об'ємі (м<sup>2</sup>/г);  $R(X)$  — коефіцієнт поглинання світлового потоку в робочому об'ємі (1);  $r$  — коефіцієнт швидкості дихання (респірації) фітопланктону (1/доба);  $h = V/A$  — глибина робочого об'єму (м);  $V$  — робочий об'єм басейну (м<sup>3</sup>);  $A$  — площа водного дзеркала басейну (м<sup>2</sup>).

Для моделювання стадії вирощування продуктивної біомаси в рівнянні (1) слід покласти  $Q = 0$  м<sup>3</sup>/доба і додати початкову умову

$$X(t = 0) = X_0. \quad (3)$$

Щодо моделювання стадії продукції біомаси, за якою концентрація фітопланктону у басейні підтримується на постійному рівні  $X_{\max}$ , то в рівнянні (1) треба покласти  $dX/dt = 0$ , що дозволяє визначити відповідну величину витрати водної суміші фітопланктону з басейну для подальшої сепарації у вигляді

$$Q = \frac{\mu I_0 A}{kX_{\max}} \left[ 1 - \exp(-khX_{\max}) \right] - rV, \quad (4)$$

а також визначити питому продукцію біомаси з басейну-бридера:

$$P = QX / A = \frac{\mu I_0}{k} [1 - \exp(-khX_{\max})] - rhX_{\max}. \quad (5)$$

Рівняння (4), (5) є лінійними за величиною світлового потоку  $I_0$ . Тому якщо прийняти величини  $\mu$ ,  $k$ ,  $r$ ,  $h$ ,  $X_{\max}$  постійними у часі, то ці рівняння зберігають свій вигляд відносно величин світлового потоку  $I_0$ , витрати води  $Q$  і питомої продукції біомаси  $P$ , усереднених за будь-який однаковий термін часу, а саме:

$$Q = \frac{\mu I_0 A}{kX_{\max}} [1 - \exp(-khX_{\max})] - rV; \quad (6)$$

$$P = P / A = \frac{\mu I_0}{k} [1 - \exp(-khX_{\max})] - rhX_{\max}. \quad (7)$$

Рівняння (7) може бути використане для оцінки величин  $\mu$ ,  $k$ ,  $r$  за даними натурних спостережень, якщо відомі середні величини світлового потоку і питомої продуктивності басейну-бридера за кілька різних термінів часу.

Після визначення величин параметрів, що характеризують динамічні властивості популяції *M. minutum*, можна оцінити очікувані середньомісячні питомі продуктивності басейну-бридера протягом року за відповідними очікуваними середньомісячними величинами світлового потоку, що розраховуються за формулами [2]:

$$I_0 = \Phi_0 [1 - (1 - k_1)n](1 - \alpha_p), \quad (8)$$

де  $\Phi_0$  — сумарна сонячна радіація за безхмарним небом (кВт·г/м<sup>2</sup>/доба);  $k_1 = 0,345$  — коефіцієнт, величина якого визначається за географічною широтою (45° пн. ш.) розташування басейну (1);  $n$  — загальна хмарність (у частках одиниці);  $\alpha_p$  — альbedo поверхні води (1).

Очікувані середньомісячні величини  $\Phi_0$ ,  $n$ ,  $\alpha_p$  можна визначити за відповідними таблицями [2]; їх значення для 45° північної широти наведені у табл. 2.

Наведені вище обмежені дані щодо залежності продуктивності басейну-бридера від сонячної радіації дозволяють отримати три рівняння для визначення коефіцієнтів моделі:

$$R(X_{\max}) = 1 - \exp(-khX_{\max}) = 0,99; \quad (9)$$

## 2. Характеристики умов освітлення басейну-бридера на півдні України

Місяць	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
$\Phi_{0^{\circ}}$ кВт·г/м <sup>2</sup> /доба	2,2	3,5	5,3	6,6	7,8	8,2	7,9	6,8	5,7	4,1	2,7	2
$n$	0,75	0,75	0,71	0,63	0,58	0,49	0,38	0,39	0,42	0,55	0,69	0,78
$\alpha_p$	0,135	0,105	0,085	0,07	0,065	0,06	0,065	0,065	0,075	0,095	0,125	0,14

$$10,5 = \frac{\mu}{k} \cdot R(X_{\max}) \cdot 5,75 - rhX_{\max}; \quad (10)$$

$$18 = \frac{\mu}{k} \cdot R(X_{\max}) \cdot 7,75 - rhX_{\max}. \quad (11)$$

З цих рівнянь легко знайти:

$$k = -\frac{1}{hX_{\max}} \ln(1 - 0,99) = 0,023 \text{ м}^2/\text{г}; \quad (12)$$

$$\mu = 0,087 \text{ м}^2/\text{кВт}\cdot\text{г}; \quad (13)$$

$$r = 0,055 \text{ 1/доба}. \quad (14)$$

Отримані величини коефіцієнтів є оцінками середніх (за терміни спостережень) динамічних властивостей популяції *M. minutum*. Проте вони узгоджуються з даними інших натурних спостережень. Так, наприклад, за дослідженнями [3] властивостей фітопланктонної спільноти екосистеми Каліфорнійської течії, проведеними у травні 2006 року, середня величина коефіцієнта послаблення світлового потоку  $k$  зависами фітопланктону оцінюється величиною 0,0249 м<sup>2</sup>/г. Крім того, максимальна питома швидкість росту  $\mu_{\max} = \mu I_0 - r$  біомаси фітопланктону у верхньому найбільш освітленому шарі води реєструвалася у межах 0,44...0,57 1/доба. Якщо взяти до уваги, що на широті досліджень [3] у травні місяці очікувана середня сонячна радіація складає  $I_0 = 8$  кВт·г/м<sup>2</sup>/доба, то відповідна максимальна швидкість росту для популяції *M. minutum* оцінюється близькою величиною 0,64 1/доба.

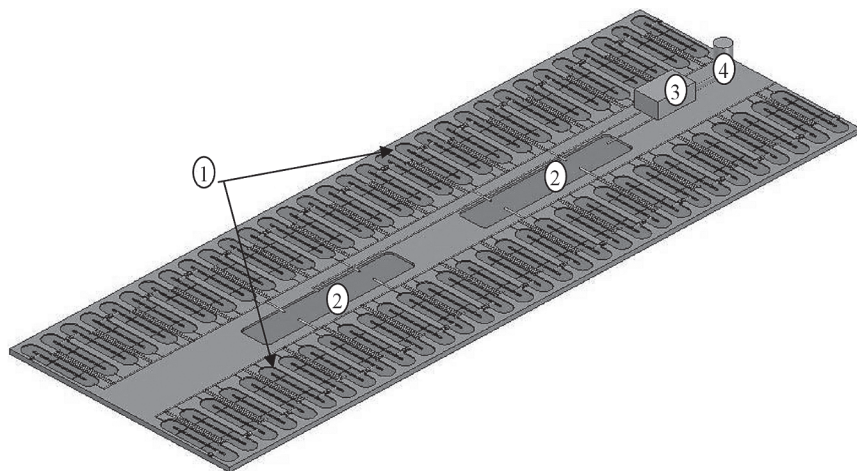
Оцінка продуктивності популяції *M. minutum* за кліматичних умов півдня України проведена з урахуванням того, що для отримання продукції з басейнів-бридерів вони мають експлуатуватися у комплексі з допоміжними елементами, який можна назвати фітофермою.

### 3. Очікувана освітленість і продукція біомаси популяції *M. minutum*

Місяць	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
$I_0$ , кВт·г/м <sup>2</sup> /доба	0,968	1,59	2,59	3,61	4,52	5,23	5,55	4,73	3,82	2,37	1,29	0,841
$P$ , г/м <sup>2</sup> /доба	-7,33	-4,98	-1,19	2,67	6,12	8,81	10,0	6,92	3,47	-2,02	-6,11	-7,81
Басейн-бридер, кг	—	—	—	80,1	190	264	310	215	104	—	—	—
Фітоферма, т	—	—	—	5,13	12,0	16,9	19,8	13,8	6,65	12,8	—	—

За основу нами прийнята структурна схема відповідної фітоферми, що наведена в роботі [1] і зображена на рис. 1.

За наведеною схемою фітоферма вміщує 64 басейни-бридери загальною площею водного дзеркала 64 000 м<sup>2</sup> і займає територію приблизно 10 га. Розрахункові дані щодо очікуваної продукції сухої біомаси популяції *M. minutum* наведені у табл. 3. Від'ємні величини питомої продукції біомаси популяції за період з жовтня по березень означають, що у ці місяці року очікувана освітленість фітоферми не є достатньою для підтримки концентрації фітопланктону на продуктивному рівні  $X_{\max} = 1000$  г/м<sup>3</sup>. Решта року, з квітня по вересень включно, визначається додатною продуктивністю.



**Рис. 1. Структурна схема фітоферми:** 1 — басейни-бридери (64 одиниці); 2 — басейни-відстійники (2 одиниці); 3 — насосна і центрифужна станції; 4 — склад готової продукції.

Загалом, очікувана річна продукція з одного басейну-бридера складає приблизно 1,16 т, а з фітоферми у цілому — 74 т, що означає очікувану урожайність біомаси на рівні 7,4 т/га із загальної площі фітоферми. Враховуючи те, що вміст рослинної олії у складі популяції *M. minutum* у перерахунку на суху вагу становить приблизно 20%, то загальна кількість рослинної олії, яка може бути отримана з урожаю *M. minutum* на фітофермі, дорівнює приблизно 15 т, що відповідає продуктивності 1,5 т/га загальної площі фітоферми.

Якщо врахувати також те, що до настання зимового періоду ймовірно доведеться випорожнити усі басейни фітоферми, то це додає ще  $64 \cdot 200 \text{ м}^3 \cdot 1000 \text{ г/м}^3 = 12,8$  т сухої біомаси за рік і, відповідно, 0,25 т/га додатково до продуктивності ферми за рослинною олією.

Таким чином, за кліматичних умов півдня України можна отримати приблизно 1,75 т рослинної олії з одного гектара фітоферми, де культивують популяцію *M. minutum*.

За продуктивністю популяцію *M. minutum* доцільно порівняти з рапсом — культурою, що в останні роки набуває все більшої популярності в Україні у зв'язку з подорожчанням дизпалива і посиленням попиту на світовому ринку. Вважається, що за правильних технологій і сприятливих погодних умов урожайність рапсу в Україні може досягати 2,4 т/га. За вмістом рослинної олії у рапсі приблизно у 33% ця урожайність відповідає продуктивності у 800 кг рослинної олії з одного гектара. Треба також врахувати те, що рапс не можна вирощувати на одному полі частіше одного разу на три роки через виснаження ґрунту. Тому реально максимальна середня продуктивність рапсу за олією на родючих ґрунтах може бути оцінена величиною 267 кг/га, що у 6,5 разу менше за очікувану продуктивність популяції *M. minutum*.

## Висновки

Вичерпаність світових нафтових ресурсів, негативний вплив транспортних викидів продуктів згоряння на природний обіг речовин, зокрема вуглецю, що провокує посилення парникового ефекту, стимулюють дослідження у напрямку пошуку ефективних біологічних консервантів сонячної енергії. Олія, яку отримують з наземних рослин, зокрема рапсу, набуває все більшого засто-



сування в якості сировини для вироблення транспортного палива. Проте можна очікувати, що її виробництво усе більше буде конкурувати з виробництвом продуктів харчування через зростаючу потребу у родючих землях.

Перспективною альтернативою наземним рослинам, як сировині для виробництва олії, вважається фітопланктон, який можна культивувати на спеціальних фітофермах, що не потребують родючих земель для їх розташування. Продуктивність таких фітоферм може значно перевищувати продуктивність рапсу, який в останні роки знаходить усе більше розповсюдження в Україні як технічна культура. Математична модель продукції біомаси популяції *M. minutum* на фітофермі певного складу дозволяє провести відповідні оцінки. Так, наприклад, за кліматичних умов півдня України продуктивність фітоферми з популяцією *M. minutum* очікувано складає 1,75 т рослинної олії з одного гектара загальної площі фітоферми, що у 6,5 разу перевищує максимально можливу продуктивність рапсу.

У подальшому для обґрунтування економічної доцільності використання фітоферм в Україні необхідно провести такі дослідження:

- відбір популяцій фітопланктону (можливо, із застосуванням методів генної інженерії), що мають більшу швидкість зростання біомаси і більший вміст олії у природних умовах району їх культивування;
- удосконалення інженерної структури і технологічних процесів фітоферми, особливо процесу сепарації біомаси з водної суміші;
- комплексна переробка біомаси з метою отримання разом з олією інших корисних речовин (наприклад, барвників, добрив, метанолу, ліків тощо).

1. Sazdanoff N. Modeling and Simulation of the Algae to Biodiesel Fuel Cycle : Undergraduate Thesis / Nick Sazdanoff // Department of Mechanical Engineering, The Ohio State University, 2006. — Режим доступу: [https://kb.osu.edu/dspace/bitstream/handle/1811/5981/Modeling\\_and\\_Simulation\\_of\\_the\\_Algae\\_to\\_Biodiesel\\_Fuel\\_Cycle-Sazdanoff\\_undergrad\\_thesis.pdf](https://kb.osu.edu/dspace/bitstream/handle/1811/5981/Modeling_and_Simulation_of_the_Algae_to_Biodiesel_Fuel_Cycle-Sazdanoff_undergrad_thesis.pdf).
2. РД153-34.2-21.144-2003. Методические указания по технологическим расчетам водоемов-охладителей / ОАО «ВНИИГ» им. Б. Е. Веденеева. — СПб., 2004.

- Li Q. P. Modeling phytoplankton growth rates and chlorophyll to carbon ratios in California coastal and pelagic ecosystems / Qian P. Li, Peter J. S. Franks, Michael R. Landry, Ralf Goericke, Andrew G. Taylor. — Journal of Geophysical Research, Vol. 115, G04003, doi:10. 1029/2009JG001111, 2010.

**Баранник В. О., Кресин В. С. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОДУКТИВНОСТИ ПОПУЛЯЦИИ *M. MINUTUM* В КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ ЮГА УКРАИНЫ**

*Предложена математическая модель продукции биомассы популяции фитопланктона *M. minutum* в искусственных бассейнах с принудительным перемешиванием. Параметры модели, определяющие динамические характеристики популяции, выбраны по опубликованным данным натурных наблюдений на опытном бассейне-бридере. Проведено моделирование продукции фитопланктона в климатических условиях юга Украины (45° с.ш.). Показано, что ожидаемая продуктивность фитофермы по растительно-му маслу может в 6,5 раз превышать наибольшую продуктивность рапса.*

**Ключевые слова:** *M. minutum*, продуктивность по маслу, юг Украины.

**Barannik V. O., Kresin V. S. SPECIES *M. MINUTUM* PRODUCTIVITY UNDER CLIMATE CONDITIONS OF UKRAINIAN SOUTH**

*Biomass phytoplankton *M. minutum* productivity at the artificial ponds with forced mixing is proposed under the climate conditions of the South of Ukraine. Model parameters, defining the dynamic properties of population, were chosen on the published data on researches at the experimental raceway pond. The modeling of phytoplankton production is carried out under the climate conditions of the South of Ukraine (45° of north latitude). It is shown that the potential phytoplankton-farm productivity can be 6,5 times greater than productivity of rapeseed.*

**Key words:** *M. minutum*, oil productivity, South of Ukraine.