

ТЕХНОЛОГІЯ ВИРОБНИЦТВА І ПЕРЕРОБКИ ПРОДУКЦІЇ ТВАРИННИЦТВА

УДК 606:628.3/4

Каскадна біотехнологія культивування спіруліни

Сенчук М.М. 

Білоцерківський національний аграрний університет



Сенчук М.М. E-mail: m.m.senchuk@gmail.com



Сенчук М.М. Каскадна біотехнологія культивування спіруліни. Збірник наукових праць «Технологія виробництва і переробки продукції тваринництва», 2026. № 1. С. 80–90.

Senchuk M.M. Cascade biotechnology for spirulina cultivation. «Animal Husbandry Products Production and Processing», 2026. № 1. PP. 80–90.

Рукопис отримано: 20.01.2026 р.

Прийнято: 02.02.2026 р.

Затверджено до друку: 19.05.2026 р.

doi: 10.33245/2310-9289-2026-202-1-80-90

ISSN 2310-9289

Спіруліна (*Spirulina platensis*) є кормовою і харчовою сировиною, в якій міститься 50-70% білка, до 8% жиру, 20% вуглеводів. Вона має збалансований амінокислотний склад, вітаміни А (29 мкг/100 г), Е (5 мг/100 г), К (25,5 мкг/100 г), В1 (2,4 мг/100 г), В2 (3,7 мг/100 г), а також залізо (28,5 мг/100 г), магній (195 мг/100 г), натрій (1048 мг/100 г), мідь (6,1 мг/100 г), марганець (1,9 мг/100 г).

Виробництво спіруліни є безвідходним і екологічно безпечним процесом. У ході культивування як єдиний побічний продукт утворюється кисень, що виділяється внаслідок фотосинтетичної активності.

В Україні вирощування спіруліни має обмежений характер через недосконалість технологічних підходів.

Визначено, що одним із основних технологічних параметрів роботи фотореактора для вирощування спіруліни є швидкість розведення, який впливає на продуктивність установки.

Тому вдосконалення технологічного регламенту біотехнології вирощування спіруліни з використанням установки каскадного типу є актуальним.

Розроблено фотореактор для вирощування спіруліни каскадного типу.

Установка складається з ємності, стічних поверхонь, фітоопроміновачів, насоса, компресора, змішувачів, барботажу, теплообмінника, патрубків для заповнення бака розчином і відбирання суспензії, трубка для відведення газоповітряної суміші, вуглекислотного балона.

Її основні параметри:

- температурний режим роботи установки – 20-30°C;
- об'ємна подача насоса, – до 12 м³/год;
- режим роботи – безперервний;
- кількість каскадів – 14;
- освітлювальна робоча поверхня фотореактора – 8,82 м²;
- загальна площа освітлювальної робочої поверхні фотореактора – 124 м²;
- об'єм суспензії в одному каскаді – 0,529 м³;
- об'єм суспензії в каскадах фотореактора – 7,42 м³;
- об'єм суспензії у фотореакторі – 8,52 м³;
- установлена потужність – 17,1 кВт;
- габаритні розміри: висота – 5,8 м, ширина – 2,1 м, довжина – 4,2 м.

Вирощування культури здійснювалося в безперервному режимі за швидкостями 0,02 год⁻¹ і 0,04 год⁻¹.

За швидкості розведення 0,02 год⁻¹ спостерігалось зростання концентрації абсолютно сухої біомаси з 1,4 до 2,9 г/л. Культура підтримувалась в стаціонарному стані. Підвищення швидкості розведення до 0,04 год⁻¹ призводить до зменшення концентрації абсолютно сухої біомаси спіруліни в культуральному середовищі з 2,6 до 1,1 г/л протягом періоду вирощування внаслідок вимивання клітин.

За швидкості розведення 0,02 год⁻¹ водневий показник рН був стабільним у межах 9,1. Стабільний рН – ознака оптимального режиму культивування. Повільне надходження свіжого поживного середовища забезпечує баланс між поглинанням CO₂ клітинами та буферною ємністю середовища, що призводить до входження системи в квазістаціонарний стан.

За швидкості розведення 0,04 год⁻¹ значення рН зросло з 9,1 до 10,2, що свідчить про порушення фізіолого-біохімічного балансу культури, оскільки у процесі росту вона зменшує концентрацію вугільної кислоти, внаслідок чого середовище стає більш лужним (рН зростає).

На основі проведених досліджень удосконалено технологічний регламент вирощування спіруліни у фотореакторі каскадного типу.

Ключові слова: спіруліна, фотореактор, біотехнологія, біомаса, водорості, живильне середовище.

Постановка проблеми та аналіз останніх досліджень. У сучасних умовах розвитку біотехнології зростає актуальність досліджень, спрямованих на створення ресурсоощадних та екологічно сталих систем біосинтезу біомаси з високою доданою вартістю. Зростання попиту на альтернативні джерела білка, біологічно активні сполуки та функціональні інгредієнти для харчової, фармацевтичної й кормової промисловостей зумовлює необхідність удосконалення наявних технологій культивування мікробіодоростей.

Спіруліна (*Spirulina (Arthrospira) platensis*) є однією з найперспективніших промислових мікробіодоростей завдяки високому вмісту білка, пігментів (зокрема фікоціаніну), вітамінів та антиоксидантів і характеризується високою харчовою цінністю [1, 2].

Основні біологічно активні компоненти спіруліни – білок, сульфатовані полісахариди та γ -ліноленова кислота – відіграють важливу роль у поліпшенні функціонального стану організму людини. Окрім того, експериментальні дані свідчать про її імуномодулювальні та протівірусні властивості. Встановлено також, що спіруліна є перспективною кормовою та харчовою сировиною, яка характеризується високим вмістом білка, збалансованим амінокислотним складом і значним вмістом вітамінів та мінеральних речовин [1, 3, 4].

Спіруліна виробляється у вигляді дрібнодисперсного розсипного порошку або пасти та характеризується прісним або ледве солоним смаком із типовим для водоростей запахом, а також зеленим або синьо-зеленим кольором. Вологість порошку спіруліни становить близько 10%, частка сухої речовини – 90%, а розмір твердих частинок – 6-8 мк [5].

Амінокислотний склад спіруліни є близьким до складу білків тваринного походження. Вміст білка у спіруліні становить 50-70% [1,

6], жиру – до 8%, вуглеводів – близько 20%). Вона містить незамінні амінокислоти [3,4,6], мінеральні речовини (зокрема залізо), незамінні жирні кислоти, вітаміни та пігменти.

Масова частка окремих компонентів у 100 г порошку спіруліни, мг: вітамін А – 0,029, вітамін Е – 5,0, вітамін К – 0,025, вітамін В1 – 2,4, вітамін В2 – 3,7, залізо – 28,5, магній – 195,0, натрій – 1048,0 мг, мідь – 6,1 мг, марганець – 1,9 [7, 8].

За вмістом каротину і вітамінів групи В спіруліна перевищує більшість інших культур. Вона містить вітамін F, який бере участь у регуляції обміну жирів, а також амінокислоти, що сприяють розвитку серцевого м'яза.

Білок спіруліни за біологічною цінністю не поступається протеїнам м'язової тканини, яєць або сої. За амінокислотним складом (лейцин, валін, треонін, ізолейцин, тирозин, метіонін і триптофан) білок спіруліни перевищує показники ідеального протеїну [9, 10].

Спіруліна росте в сильно лужному середовищі, яке є несприятливим для розвитку її антагоністів. Завдяки цьому культура спіруліни тривалий час залишається незабрудненою та характеризується високою продуктивністю [11, 12].

Стічні води біогазового виробництва та комунального господарства були досліджені як джерело поживних речовин для культивування мікробіодорості спіруліни порівняно зі стандартними живильними середовищами. Також проводилися експерименти з використанням збагаченої шахтної води для вирощування спіруліни. У результаті встановлено, що вихід біомаси є порівнянним, а суттєвих відмінностей за вмістом білка, амінокислотним складом і загальною концентрацією ліпідів не виявлено [13, 14, 15].

Спіруліна є чутливою до створення оптимальних умов в інженерних установках, при

цьому технологічний процес її культивування легко піддається механізації та автоматизації. У науковій літературі наведено результати застосування різних способів переробки спіруліни з метою досягнення максимального ефекту при використанні її як харчової добавки [4, 6, 7].

Суспензію спіруліни використовують як корм для тварин. У випадку застосування у вигляді пасти попередньо здійснюють відділення клітин спіруліни від живильного розчину шляхом центрифугування. Отриману спірулінову пасту спрямовують на кормові цілі, а живильний розчин після додавання необхідних компонентів (води, соди та спіруліни) повторно використовують у технологічному процесі.

Таким чином, виробництво спіруліни безвідходним і нешкідливим процесом, у ході якого утворюється лише кисень, що виділяється внаслідок фотосинтетичної діяльності.

В Україні вирощування спіруліни має обмежений характер через недосконалість технологічних підходів і знижену ефективність культивування внаслідок кліматичних умов. Традиційні технології її вирощування, як правило, базуються на лінійних схемах культивування, що характеризуються значними витратами поживних речовин, води та енергії, а також обмеженими можливостями повторного використання живильних середовищ і побічних продуктів. Це істотно підвищує собівартість біомаси та стримує масштабування виробництва [16].

У контексті концепції циркулярної біоекономіки особливий інтерес становлять каскадні біотехнологічні системи, які передбачають поетапне використання ресурсів і багаторазове залучення поживних середовищ у взаємопов'язаних біотехнологічних процесах. Для мікродоростей, зокрема спіруліни, такий підхід потенційно дає змогу підвищити ефективність використання азоту, фосфору та вуглецю, зменшити екологічне навантаження та збільшити вихід цільових продуктів.

Незважаючи на наявність окремих досліджень, присвячених оптимізації умов культивування спіруліни, питання її вирощування в каскадних біотехнологічних системах залишаються недостатньо вивченими. Зокрема, відсутні систематизовані дані щодо впливу каскадного використання поживних середовищ на кінетику росту культури, стабільність біосистеми, біохімічний склад біомаси та вихід цінних метаболітів. Недостатньо дослідженими також є режими розведення культури

та їхнє узгодження з динамічно змінним складом середовищ у багатостадійних схемах культивування.

Установлено, що одним із ключових технологічних параметрів роботи установок для вирощування спіруліни є швидкість розведення, яка істотно впливає на продуктивність системи. У зв'язку з цим визначення оптимальної швидкості розведення для установок каскадного типу є доцільним та актуальним.

З огляду на це постає науково-практичне завдання розроблення удосконаленого регламенту для установки каскадного типу, який забезпечував би підвищення ресурсної ефективності процесу, стабільність культури та збереження високої якості біомаси за рахунок оптимізації швидкості розведення.

Метою дослідження є вдосконалення технологічних параметрів біотехнології культивування спіруліни із застосуванням установки каскадного типу шляхом оптимізації швидкості розведення.

Матеріал і методи дослідження. Товщина шару суспензії на робочих стінках визначається залежно від рівномірності розподілу світлового потоку по висоті шару суспензії [17,18, 19]. На мінімальну товщину також впливають граничні техніко-економічні умови експлуатації установки.

Експериментально встановлено, що товщина шару суспензії на робочій поверхні становить $H = 0,06$ м.

Основні технологічні параметри установки каскадного типу для вирощування спіруліни (фотореактора) наведено в таблиці 1.

Вирощування культури проводилося в безперервному режимі за швидкостей розведення $0,02 \text{ год}^{-1}$, і $0,04 \text{ год}^{-1}$.

Швидкість розведення D (год^{-1}) визначається як:

$$D = \frac{F}{V},$$

де F – витрати поживного середовища (об'єм за одиницю часу);

V – робочий об'єм культури.

$0,02 \text{ год}^{-1}$ означає, що за 50 годин оновиться об'єм, еквівалентний усьому об'єму реактора:

$$t = \frac{1}{D} = \frac{1}{0,02} = 50 \text{ год},$$

аналогічно для $0,04 \text{ год}^{-1}$ означає, що за 25 годин оновиться об'єм, еквівалентний усьому об'єму реактора.

Таблиця 1 – Основні технологічні параметри фотореактора та склад живильного середовища

| Назва показника | Значення показника |
|--|-----------------------------|
| Місце проведення досліджень | УкрНДІПВТ ім. Л. Погорілого |
| Технічна характеристика фотореактора | |
| 1. Температурний режим роботи установки, °C [20, 21] | +20-30°C |
| 2. Верхнє значення відносної вологості повітря (при температурі 30°C), % | 98 |
| 3. Об'ємна подача насоса, м³/год | до 12 |
| 4. Режим роботи | безперервний |
| 5. Кількість каскадів | 14 |
| 6. Освітлювальна робоча поверхня фотореактора, м² | 8,82 |
| 7. Загальна площа освітлювальної робочої поверхні фотореактора, м² | 124 |
| 8. Освітленість робочої поверхні, клк [22] | 12 |
| 9. Об'єм суспензії в одному каскаді, м³ | 0,529 |
| 10. Об'єм суспензії в каскадах фотореактора, м³ | 7,42 |
| 11. Об'єм суспензії у фотореакторі, м³ | 8,52 |
| 12. Встановлена потужність, кВт | 17,1 |
| 13. Габаритні розміри: висота, м ширина, м довжина, м | 5,8 2,1 4,2 |
| 1.4. Базовий розчин для вирощування спіруліни (розчин Зарука [19]), г/л: | |
| Гідрогенкарбонат натрію (харчова сода) – NaHCO ₃ | 16,8 |
| Гідрогенфосфат калію – K ₂ HPO ₄ | 0,5 |
| нітрат натрію – NaNO ₃ | 2,5 |
| Сульфат калію – K ₂ SO ₄ | 1,0 |
| хлорид натрію (кухонна сіль) – NaCl | 1,0 |
| Сульфат магнію гептагідрат (англійська сіль) – MgSO ₄ ·7H ₂ O | 0,2 |
| Хлорид кальцію – CaCl ₂ | 0,04 |
| Сульфат заліза(II) гептагідрат (залізний купорос) – FeSO ₄ ·7H ₂ O | 0,01 |
| Етилендіамінтетраацетат – ЭДТА | 0,08 |
| Норма внесення CO ₂ (два рази на добу), г/л [23] | 0,7–1,2 |

Джерело: побудовано автором.

У процесі дослідження визначали динаміку вирощування спіруліни (концентрацію абсолютно сухої біомаси (АСБ) спіруліни в культуральному середовищі, г/л) та показник рН із використанням ДСТУ ISO 6496:2005 «Корми для тварин. Визначення вмісту вологи та інших летких речовин» (ISO 6496:1999, IDT).

Для вимірювання рН використовувався універсальний рН-метр.

Під час проведення експериментальних досліджень точність отриманих результатів забезпечувалася за допомогою загальноприйнятих методів статистичної оцінки, за яких числові значення:

\bar{Y} – середнє значення вимірюваної величини;

$$\bar{Y} = \frac{y_1 + y_2 + \dots + y_n}{n}$$

σ – середнє квадратичне відхилення величини;

$$\sigma = \sqrt{\frac{\Delta y_1^2 + \Delta y_2^2 + \dots + \Delta y_n^2}{n}}$$

де n – кількість вимірів;

$y_1 - y_2 - y_n$ – значення,

$$\Delta_i = y_i - \bar{Y}$$

Δ_{lim} – гранична похибка: $\Delta_{lim} = \pm 3\sigma$

Для дослідження концентрації АСБ спіруліни залежно від тривалості її вирощування з об'єму кожного каскаду відбирали проби по 1л 5 разів із періодичністю через 12, 24, 48, 72, 96 год за швидкостей розведення $0,02 \text{ год}^{-1}$ і $0,04 \text{ год}^{-1}$. За отриманими середніми значеннями побудовано графік залежності концентрації АСБ спіруліни від тривалості вирощування при зазначених швидкостях розведення (рис. 2).

З метою визначення рівня рН поживного середовища відбір проб об'ємом 1 л з кожного каскаду здійснювали через установлені проміжки часу: 12, 24, 48, 72 та 96 годин. За отриманими середніми значеннями побудовано графік зміни рН у процесі вирощування спіруліни за швидкостей розведення $0,02 \text{ год}^{-1}$ і $0,04 \text{ год}^{-1}$ (рис. 3).

Результати дослідження та обговорення. На основі аналізу існуючих і перспективних технологій отримання спіруліни розро-

блено установку – фотореактор каскадного типу для її культивування (рис. 1).

Культура спіруліни росте в поживному водному розчині. Насос подає суспензію (суміш клітин спіруліни та живильного розчину) з приймальної ємності у верхній стічний лоток, після чого вона переміщується вниз. Вся робоча ємність освітлюється джерелом світла 3. У процесі фотосинтезу відбувається приріст біомаси спіруліни із поглинанням вуглекислого газу та виділенням кисню.

Подачу вуглекислого газу до поживного середовища забезпечують компресор 5, змішувач 6 і барботажні трубки 7. Вуглекислий газ надходить із балона 12. За досягнення необхідної густини біомаси культура відбирається через патрубок 10. Вирощування спіруліни вимагає підтримання стабільної температури суспензії, яка регулюється теплообмінником 8 шляхом подачі теплої або холодної води.

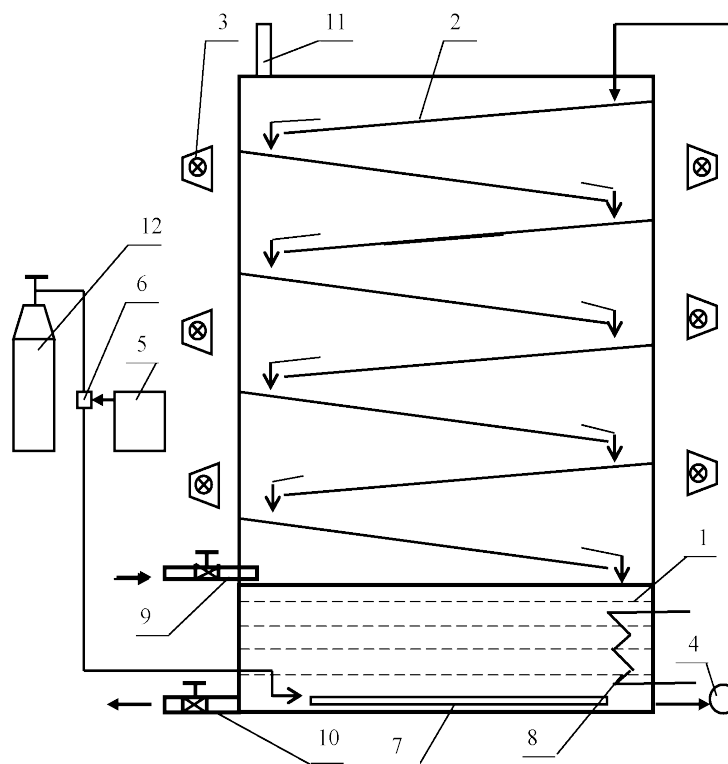


Рис. 1. Експериментальна установка для культивування спіруліни.

1 – ємність; 2 – стічні поверхні; 3 – фітоопромінювачі; 4 – насос; 5 – компресор; 6 – змішувач; 7 – барботаж; 8 – теплообмінник; 9,10 – патрубки для заповнення бака розчином і відбору суспензії; 11 – патрубок для відведення газоповітряної суміші; 12 – балон із вуглекислим газом.

Джерело: побудовано автором.

Динаміку росту спіруліни за різних швидкостей розведення середовища наведено в таблиці 2 та на рис. 2.

Зміна реакції середовища рН за різних швидкостей розведення наведено в таблиці 3 та на рис. 3.

На основі проведених досліджень удосконалено технологічний регламент вирощування спіруліни в установці каскадного типу (табл. 4).

Отримані результати дослідження свідчать, що швидкість розведення є одним із ключових регульовальних параметрів каскадної біотехнології вирощування спіруліни, який визначає як інтенсивність накопичення біомаси, так і стабільність фізіолого-біохімічного стану культури.

Так, за мінімальної швидкості розведення $0,02 \text{ год}^{-1}$ створюються умови, за яких темпи

росту спіруліни перевищують швидкість вимивання клітин із культурального середовища, що забезпечує поступове зростання концентрації абсолютно сухої біомаси з 1,4 до 2,9 г/л (табл. 2, рис. 2).

Підвищення швидкості розведення до $0,04 \text{ год}^{-1}$ призводило до зменшення концентрації абсолютно сухої біомаси спіруліни в культуральному середовищі з 2,6 до 1,1 г/л протягом періоду вирощування внаслідок вимивання клітин, що не дає змоги підтримувати культуру спіруліну в рівноважному стані.

В умовах каскадної установки процес зменшення концентрації абсолютно сухої біомаси спіруліни посилюється внаслідок поетапного переміщення культурального середовища між каскадами, що зменшує час перебування клітин у кожному з них.

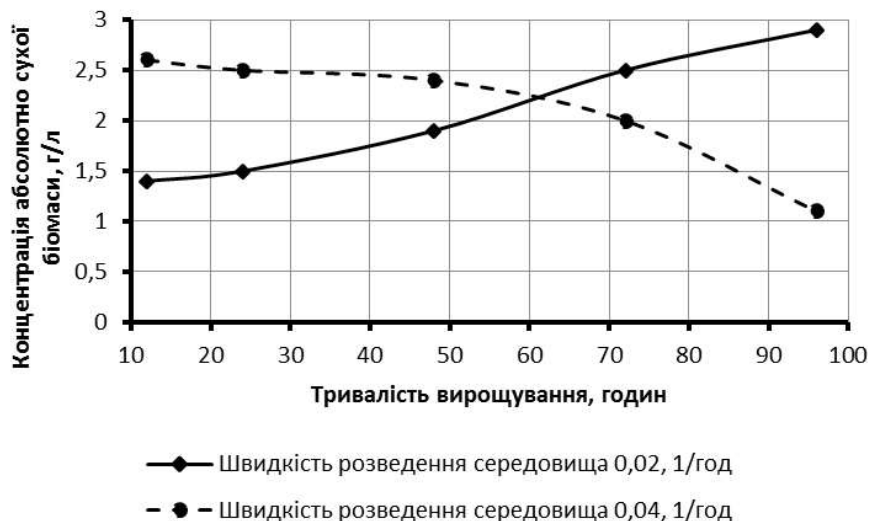


Рис. 2. Динаміка росту спіруліни за різних швидкостей розведення середовища.

Джерело: побудовано автором.

Таблиця 2 – Динаміка росту спіруліни за різних швидкостей розведення середовища

| Тривалість вирощування, годин | Концентрація абсолютно сухої біомаси спіруліни в культуральному середовищі, г/л. (Швидкість розведення $-0,02 \text{ год}^{-1}$) | | | Концентрація абсолютно сухої біомаси спіруліни в культуральному середовищі, г/л. (Швидкість розведення $-0,04 \text{ год}^{-1}$) | | |
|-------------------------------|---|----------|---------------|---|----------|---------------|
| | \bar{Y} | σ | $\pm 3\sigma$ | \bar{Y} | σ | $\pm 3\sigma$ |
| 12 | 1,4 | 0,01 | 0,03 | 2,6 | 0,08 | 0,16 |
| 24 | 1,5 | 0,05 | 0,15 | 2,5 | 0,03 | 0,09 |
| 48 | 1,9 | 0,06 | 0,18 | 2,4 | 0,06 | 0,18 |
| 72 | 2,5 | 0,04 | 0,16 | 2,0 | 0,03 | 0,09 |
| 96 | 2,9 | 0,02 | 0,06 | 1,1 | 0,05 | 0,15 |

Джерело: побудовано автором.

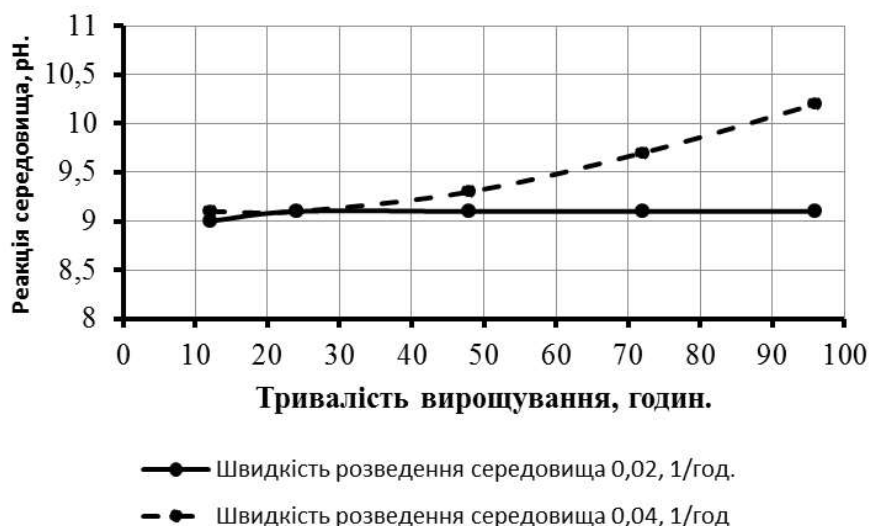


Рис. 3. Динаміка зміни реакції середовища при різних швидкостях розведення.

Джерело: побудовано автором.

Таблиця 3 – Зміна реакції середовища рН за різних швидкостей розведення

| Тривалість вирощування, годин | Реакція середовища рН за швидкості розведення 0,02 год ⁻¹ | | | Реакція середовища рН за швидкості розведення 0,04 год ⁻¹ | | |
|-------------------------------|--|----------|---------------|--|----------|---------------|
| | \bar{Y} | σ | $\pm 3\sigma$ | \bar{Y} | σ | $\pm 3\sigma$ |
| 12 | 9,0 | 0,04 | 0,12 | 9,1 | 0,02 | 0,06 |
| 24 | 9,1 | 0,03 | 0,09 | 9,1 | 0,05 | 0,15 |
| 48 | 9,1 | 0,05 | 0,15 | 9,3 | 0,03 | 0,09 |
| 72 | 9,1 | 0,06 | 0,18 | 9,7 | 0,02 | 0,06 |
| 96 | 9,0 | 0,02 | 0,06 | 10,2 | 0,04 | 0,12 |

Джерело: побудовано автором.

Таблиця 4 – Удосконалений технологічний регламент для культивування спіруліни в установці каскадного типу

| Назва показника | Значення показника |
|---|---|
| 1. Культура | <i>Spirulina platensis</i> |
| 2. Тип процесу | Безперервний, проточний із періодичним відбором біомаси і поновленням живильного розчину. |
| 3. Показники біотехнологічного процесу: | |
| 3.1. Температура живильного розчину, °С | 30-35 |
| 3.2. Температура повітря в зоні вегетативних місткостей, °С | 25-30 |
| 3.3. Відносна вологість повітря в зоні вегетативних місткостей, % | 96-98 |
| 3.4. Товщина шару суспензії у вегетативній місткості, мм | 50-60 |
| 3.5. Швидкість руху суспензії, м/с | 0,003-0,005 |
| 3.6. Швидкість розведення середовища, год ⁻¹ | 0,02 |
| 3.7. Водневий показник, рН | 9-10 |
| 3.8. Освітленість вегетативної поверхні, клк | 12 |
| 3.9. Концентрація біомаси в процесі вирощування, г АСР/л | 1,5-3 |
| 3.10. Концентрація біомаси при запуску фото-реактора, г АСР/л | 0,08-1,5 |
| 3.11. Тривалість штучного освітлення, год/добу | 24 |
| 4. Склад базового живильного розчину | Розчин Заррука |

Джерело: побудовано автором.

Також у процесі дослідження встановлено, що різні швидкості розведення зумовлюють зміну показника рН середовища. Зокрема, за швидкості розведення $0,02 \text{ год}^{-1}$ (табл. 3, рис. 3) значення рН залишалися стабільними на рівні близько 9,1. Повільне надходження свіжого поживного середовища забезпечує баланс між поглинанням CO_2 клітинами та буферною ємністю середовища, що сприяє переходу у квазістаціонарний стан. Відомо, що для вирощування спіруліни оптимальними є слабколужні умови, які забезпечують інтенсивний ріст і високу метаболічну активність, зокрема синтез білка та пігментів. Таким чином, підтримання стабільного значення рН у каскадній системі можна розглядати як індикатор фізіологічної стабільності культури.

Натомість за швидкості розведення $0,04 \text{ год}^{-1}$ значення рН протягом періоду вирощування зростало з 9,1 до 10,2. Прискорення надходження свіжого поживного середовища не забезпечує балансу між поглинанням CO_2 клітинами спіруліни та буферною ємністю середовища, оскільки спіруліна є фотосинтезуючим мікроорганізмом і в процесі росту зменшує концентрацію карбонатної кислоти. Унаслідок цього середовище стає більш лужним, що проявляється підвищенням значення рН.

Отримані результати дослідження узгоджуються з літературними даними щодо впливу режимів безперервного культивування на мікрородорості, однак доповнюють їх у контексті застосування установки каскадного типу для вирощування спіруліни (фотореактора). Показано, що навіть незначне підвищення швидкості розведення в каскадній системі може мати істотні наслідки для стабільності культури, що необхідно враховувати під час розроблення та вдосконалення технологічних регламентів культивування спіруліни.

З практичної точки зору встановлення оптимальної швидкості розведення на рівні $0,02 \text{ год}^{-1}$ є важливим технологічним рішенням, яке дає змогу забезпечити стабільне накопичення біомаси та підтримання сприятливих фізіолого-біохімічних умов для вирощування спіруліни в установці каскадного типу.

Виходячи з отриманих результатів, доцільно спрямовувати подальші дослідження на масштабування каскадної біотехнології з лабораторного та напівпромислового рівнів до промислового виробництва з подальшим аналізом техніко-економічної ефективності та енерговитрат.

Висновки. Результати проведених досліджень показали, що виробництво спіруліни є безвідходним і нешкідливим. В Україні її культивування має обмежений характер через недосконалість технологічних підходів і знижену ефективність отримання біомаси внаслідок кліматичних умов.

Експериментально встановлено, що швидкість розведення культури є визначальним технологічним параметром каскадної біотехнології вирощування спіруліни та істотно впливає на накопичення біомаси і стабільність процесу культивування.

Дослідженнями встановлено, що за мінімальної швидкості розведення $0,02 \text{ год}^{-1}$ у каскадній установці спостерігалось зростання концентрації абсолютно сухої біомаси з 1,4 до 2,9 г/л, що свідчить про сприятливі умови для росту та накопичення клітин. Підвищення швидкості розведення до $0,04 \text{ год}^{-1}$ призводить до зменшення концентрації абсолютно сухої біомаси спіруліни в культуральному середовищі з 2,6 до 1,1 г/л упродовж періоду вирощування внаслідок вимивання клітин із культурального середовища.

Виявлено, що за швидкості розведення $0,02 \text{ год}^{-1}$ реакція середовища залишалася стабільною на рівні рН $\approx 9,1$, що відповідає оптимальним умовам росту спіруліни в каскадній системі культивування. Підвищення швидкості розведення до $0,04 \text{ год}^{-1}$ не забезпечує балансу між поглинанням CO_2 клітинами спіруліни та буферною ємністю середовища, оскільки в процесі фотосинтезу зменшується концентрація карбонатної кислоти, внаслідок чого середовище стає більш лужним (рН зростає з 9,1 до 10,2).

Отримані результати підтверджують доцільність використання мінімальної швидкості розведення $0,02 \text{ год}^{-1}$ у вдосконаленому технологічному регламенті біотехнології вирощування спіруліни із застосуванням установки каскадного типу.

Запропоновані параметри технологічного регламенту для культивування спіруліни в установці каскадного типу можуть бути рекомендовані для практичного застосування з метою підвищення продуктивності та стабільності процесу промислового вирощування спіруліни.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Григораш Ю.В., Мерзлов С.В. Нарощування біомаси *Spirulina platensis* як кормової добавки за різних доз сульфору у поживному середовищі. НВ ЛНУ ветеринарної медицини та біотехнологій. Сільськогосподарські науки. 2024. 26 (101). С. 217–222. DOI:10.32718/nvlvet-a10134

2. Мерзлова Г.В. Вміст хлорофілу у біомасі спіруліни за дії різних доз мікроелементів у поживному середовищі. Біологія тварин. 2014. Т. 16. № 2. С. 71–76. URL: <https://aminbiol.com.ua/20142pdf/9.pdf>.
3. Бондаренко Л.В., Богатко Н.М., Гришко В.А., Рожченко В.М. Показники росту біомаси спіруліни за різних доз йоду у поживному середовищі. Науковий вісник Львівського національного університету ветеринарної медицини та біотехнологій імені С.З. Гжицького. Сільськогосподарські науки. 2025. № 101. Т. 26. С. 351–356. DOI:10.32718/nvlvet-a10152.
4. Застосування мікроводоростей у біотехнології / А.В. Лішук та ін. Проблеми екологічної біотехнології. 2024. № 1. С. 34–39. DOI:10.18372/2306-6407.1.6695.
5. Гончарова О.В., Миколенко С.Ю. Вплив плазмохімічно активованої води на функціональні характеристики спіруліни як кормового чинника. Таврійський державний агротехнологічний університет. Мелітополь: ТДАТУ, 2018. Вип. 18. Т. 1. С. 43–50. URL: <https://elar.tsatu.edu.ua/server/api/core/bitstreams/77b56da0-dce5-4ec4-ab43-64f3f59316c7/content>.
6. Офіленко Н.О. Аналіз показників якості функціонального йогурту з використанням біомаси спіруліни. Науковий вісник Полтавського університету економіки і торгівлі. Серія: Технічні науки. 2025. Вип. 1. С. 53–58. DOI:10.37734/2518-7171-2025-1-9.
7. Кошель О.Ю., Касьянова А.В. Перспективи застосування порошку водоростей спіруліни у виробництві хлібобулочних виробів. Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету: електронне наукове фахове видання ТДАТУ. Мелітополь: ТДАТУ, 2022. Вип. 12. Т. 2. С. 20–21. URL: file:///D:/Наука/Статті%201/Стаття%20в%20збірник%20БНАУ/Стаття%202026/Кошель%20О.Ю._авт.pdf
8. Hultberg M., Lind O., Birgersson G. Use of the effluent from biogas production for cultivation of *Spirulina*. Bioprocess and Biosystems Engineering. 2017. 40. С. 625–631. DOI:10.1007/s00449-016-1726-2.
9. A review on techno-economic assessment of *Spirulina* for sustainable nutraceutical, medicinal, environmental, and bioenergy / M.N. Musa et al. Bioresources and Bioprocessing. 2025. DOI:10.1186/s40643-025-00888-3.
10. Bioactive compounds from *Spirulina spp.* – nutritional value, extraction, and application in food industry / B. Marjanović et al. Separations. 2024. 11 (9). 257 p. DOI:10.3390/separations11090257.
11. Photoautotrophic Batch Cultivation of *Limnospira (Spirulina) platensis*: Optimizing Biomass Productivity and Bioactive Compound Synthesis Through Salinity and pH Modulation / G. Fais et al. Mar. Drugs. 2025. 23 (7). 281 p. DOI:10.3390/md23070281.
12. Singh N., Rathilal S. Cultivation of *Scenedesmus sp.*, *Chlorella vulgaris* and *Spirulina platensis* in sewage wastewater: Bench-Scale Optimization for Biofuel Production. Chemical Engineering Transactions. 2024. 113 p. DOI:10.3303/CET24113069.
13. Hultberg M., Lind O., Birgersson G. Use of the effluent from biogas production for cultivation of *Spirulina*. Bioprocess and Biosystems Engineering. 2017. 40. P. 625–631. DOI:10.1007/s00449-016-1726-2.
14. Unlocking the potential of *Spirulina* microalgae: Cultivating in wastewater treatment for sustainable biofuel production. Sustainable Chemistry and Pharmacy. 2024. 41. DOI:10.1016/j.scp.2024.101705.
15. Use of enriched mine water to grow the cyanobacterium *Arthrospira platensis* / M.A.E.-S. El-Sayed et al. Foods. 2025. 14 (10). 1665 p. DOI:10.3390/foods14101665.
16. Long-Term Cultivation of a Native *Arthrospira platensis (Spirulina)* Strain in Pozo Izquierdo: Technical Evidence for Viable Production of Food-Grade Biomass / F. Guidi et al. Processes. 2021. 9 (8). 1333 p. DOI:10.3390/pr9081333.
17. Cultivation strategy optimization and pilot-scale production of *Spirulina subsalsa* grown in seawater and monosodium glutamate wastewater / M. Liu et al. Bioresources and Bioprocessing. 2025. 12. 83 p. DOI:10.1186/s40643-025-00926-0.
18. Novel Thin-Layer Fountain Photobioreactors for the High-Density Cultivation of *Spirulina sp.* ACS Sustainable Chemistry & Engineering. 2023. 11 (47). P. 16818–16827. DOI:10.1021/acssuschemeng.3c05509.
19. Cultivation strategy optimization and pilot-scale production of *Spirulina subsalsa* grown in seawater and monosodium glutamate wastewater. Bioresources and Bioprocessing. 2025. 12. 83 p. DOI:10.1186/s40643-025-00926-0.
20. Cultivation of *Spirulina platensis* for biomass production and nutrient removal from synthetic human urine / Y. Chang et al. Applied Energy. 2013. 102. P. 427–435. DOI:10.1016/j.apenergy.2012.07.024
21. Long-Term Cultivation of a Native *Arthrospira platensis (Spirulina)* Strain in Pozo Izquierdo: Technical Evidence for Viable Production of Food-Grade Biomass / F. Guidi et al. Processes. 2021. 9 (8). 1333 p. DOI:10.3390/pr9081333.
22. Котинський А., Салюк А., Паливода К. Вплив освітлення на пігментний склад та продуктивність спіруліни. Харчова і переробна промисловість. 2019. № 4–5 (356–357). С. 23–25. URL: <https://ekmair.ukma.edu.ua/server/api/core/bitstreams/7fa0948e-7dd5-47e9-9137-b5f8a2e1e044/content>.
23. Example of cascade-related cultivation: Cultivation of *Arthrospira platensis* in non-conventional water resources: a comparative analysis of biomass productivity and chemical constituents. Biomass and Bioenergy. 2025. 202 p. DOI:10.1016/j.biombioe.2025.108163.

REFERENCES

1. Grigorash, Yu.V., Merzlov, S.V. (2024). Naro-shhuvannja biomasy *Spirulina platensis* jak kormovoi' dobavky za riznyh doz sul'furu u pozhyvnomu

- seredovyshhi [Increasing the biomass of *Spirulina platensis* as a feed additive at different doses of sulfur in the nutrient medium]. NV LNU veterinarynoi' medycyny ta biotekhnologij [NV LNU Veterinary Medicine and Biotechnology]. Sil's'kogospodars'ki nauky [Agricultural Sciences], 26 (101), pp. 217–222. DOI:10.32718/nvlvet-a10134 (In Ukrainian).
2. Merzlova, H.V. (2014). Vmist khlorofilu u biomasi spiruliny za diyi riznykh doz mikroelementiv u pozhyvnomu seredovyshchi [Chlorophyll content in *spirulina* biomass under the action of different doses of trace elements in the nutrient medium]. Bioloziya tvaryn [Bioloziya tvaryn]. Vol. 16, no. 2, pp. 71–76. Available at: <https://aminbiol.com.ua/20142pdf/9.pdf>. (In Ukrainian).
3. Bondvrenko, L.V., Bohatko, N.M., Hryshko, V.A., Rozhenko, V.M. (2025). Pokaznyky rostu biomasy spiruliny za riznykh doz yodu u pozhyvnomu seredovyshchi [Indicators of *spirulina* biomass growth at different doses of iodine in the nutrient medium]. Naukovyy visnyk L'vivs'koho natsional'noho universytetu veterinarynoi medycyny ta biotekhnolohiy imeni S.Z. Gzhyts'koho [Scientific Messenger of LNU of Veterinary Medicine and Biotechnologies]. Sil's'kohospodars'ki nauky [Agricultural Sciences], Vol. 26, no. 101, pp. 351–356. DOI:10.18372/2306-6407.1.6695. (In Ukrainian).
4. Lishchuk, A.V., Vasylenko, O.A., Minenko, A.B., Kasianiv's'ka, Ye.S., Kudas, V. Ye. (2014). Zastosuvannya mikrovodorostey u biotekhnolohiy [Microalgae biotechnological application]. Problemy ekolohichnoyi biotekhnolohiyi [Problems of Environmental Biotechnology], no. 1, pp. 34–39. DOI:10.18372/2306-6407.1.6695. (In Ukrainian).
5. Honcharova, O.V., Mykolenko, S.Yu. (2018). Vplyv plazmokhimichno aktyvovanoyi vody na funktsional'ni kharakterystyky spiruliny yak kormovoho chynnyka [The influence of plasma-chemically activated water on the functional characteristics of *spirulina* as a feed factor]. Tavriys'ky derzhavnyy ahrotekhnolohichnyy universytet [Tavrichesky State Agrotechnological University]. Melitopol: TDATU, Issue 18, T. 1, pp. 43–50. (In Ukrainian).
6. Ofilenko, N.O. (2025). Analiz pokaznykiv yakosti funktsional'noho yohurtu z vykorystannyam biomasy spirulina [Analysis of quality indicators of functional yoghurt with the use of *Spirulina* biomass]. Naukovyy visnyk Poltav's'koho universytetu ekonomiky i torhivli [Scientific Bulletin of Poltava University of Economics and Trade]. Tekhnichni nauky [Technical sciences], Issue 1, pp. 53–58. DOI:10.37734/2518-7171-2025-1-9 (In Ukrainian).
7. Koshel', O.Yu., Kas'yanova, A.V. (2022). Perspektyvy zastosuvannya poroshku vodorostey spirulina u vyrobnytstvi khlibobulochnykh vyrobiv [Prospects for the use of spirulina algae powder in the production of bakery products]. Naukovyy visnyk Tavriys'koho derzhavnoho ahrotekhnolohichnoho universytetu: elektronne naukove fakhove vydannya TDATU [Scientific Bulletin of the Tavria State Agrotechnological University: electronic scientific professional publication of the Tavria State Agrotechnological University]. Melitopol: TDATU, Issue 12, Vol. 2, pp. 20–21. Available at: <file:///D:/Наука/Статті%201/Стаття%20В%20Збірник%20БНАУ/Стаття%202026/Кошель%20О.Ю. авт.pdf>.
8. Hultberg, M., Lind, O., Birgersson, G. (2017). Use of the effluent from biogas production for cultivation of *Spirulina*. Bioprocess and Biosystems Engineering, 40, pp. 625–631. DOI:10.1007/s00449-016-1726-2
9. Musa, M.N. (2025). A review on techno-economic assessment of *Spirulina* for sustainable nutraceutical, medicinal, environmental, and bioenergy. Bioresources and Bioprocessing. DOI:10.1186/s40643-025-00888-3.
10. Marjanović B. (2024). Bioactive compounds from *Spirulina spp.* – nutritional value, extraction, and application in food industry. Separations. 11 (9), 257 p. DOI:10.3390/separations11090257.
11. Fais, G. (2025). Photoautotrophic Batch Cultivation of *Limnospira (Spirulina) platensis*: Optimizing Biomass Productivity and Bioactive Compound Synthesis Through Salinity and pH Modulation. Mar. Drugs, 23 (7), 281 p. DOI:10.3390/md23070281.
12. Singh, N., Rathilal S. (2024). Cultivation of *Scenedesmus sp.*, *Chlorella vulgaris* and *Spirulina platensis* in sewage wastewater: Bench-Scale Optimization for Biofuel Production. Chemical Engineering Transactions, 113 p. DOI:10.3303/CET24113069.
13. Hultberg, M., Lind, O., Birgersson, G. (2017). Use of the effluent from biogas production for cultivation of *Spirulina*. Bioprocess and Biosystems Engineering, 40, pp. 625–631. DOI:10.1007/s00449-016-1726-2.
14. Unlocking the potential of *Spirulina* microalgae: Cultivating in wastewater treatment for sustainable biofuel production. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 2024, 41. DOI:10.1016/j.scp.2024.101705.
15. El-Sayed, M.A.E.-S., Milia, M. (2025). Use of enriched mine water to grow the cyanobacterium *Arthrospira platensis*. *Foods*. 14 (10), 1665 p. DOI:10.3390/foods14101665.
16. Guidi, F., Gojkovic, Z., Venuleo, M., Assunção, P.A.C.J., Portillo, E. (2021). Long-Term Cultivation of a Native *Arthrospira platensis (Spirulina)* Strain in Pozo Izquierdo: Technical Evidence for Viable Production of Food-Grade Biomass. *Processes*, 9 (8), 1333 p. DOI:10.3390/pr9081333.
17. Liu, M. (2025). Cultivation strategy optimization and pilot-scale production of *Spirulina subsalsa* grown in seawater and monosodium glutamate wastewater. *Bioresources and Bioprocessing*. 12, 83 p. DOI:10.1186/s40643-025-00926-0.
18. Novel Thin-Layer Fountain Photobioreactors for the High-Density Cultivation of *Spirulina sp.* (2023). *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 11 (47), pp. 16818–16827. DOI:10.1021/acssuschemeng.3c05509.
19. Cultivation strategy optimization and pilot-scale production of *Spirulina subsalsa* grown in seawater and monosodium glutamate wastewater. (2025). *Bioresources and Bioprocessing*, 12, 83 p. DOI:10.1186/s40643-025-00926-0.

20. Chang, Y., Wu, Z., Bian, L., Feng, D., Leung, D.Y.C. (2013). Cultivation of *Spirulina platensis* for biomass production and nutrient removal from synthetic human urine. *Applied Energy*, 102, pp. 427-435. DOI:10.1016/j.apenergy.2012.07.024.

21. Guidi, F., Gojkovic, Z., Venuleo, M., Assunção, P.A.C.J., Portillo, E. (2021). Long-Term Cultivation of a Native *Arthrospira platensis* (*Spirulina*) Strain in Pozo Izquierdo: Technical Evidence for Viable Production of Food-Grade Biomass. *Processes*, 9 (8), 1333 p. DOI:10.3390/pr9081333.

22. Kotyn'skyi, A., Salyuk, A., Palyvoda, K. (2019). Vplyv osvvlennya na pihmentnyy sklad ta produktyvnist' spiruliny [The influence of lighting on the pigment composition and productivity of spirulina]. *Kharchova i pererobna promyslovist'* [Food and processing industry]. no. 4-5 (356-357), pp. 23-25. Available at: <https://ekmair.ukma.edu.ua/server/api/core/bitstreams/7fa0948e-7dd5-47e9-9137-b5f8a2e1e044/content> (In Ukrainian).

23. Example of cascade-related cultivation: Cultivation of *Arthrospira platensis* in non-conventional water resources: a comparative analysis of biomass productivity and chemical constituents. (2025). *Biomass and Bioenergy*, 202 p. DOI:10.1016/j.biombioe.2025.108163.

Cascade biotechnology for *spirulina* cultivation

Senchuk M.M.

Spirulina platensis is used as a feed and food source, which contains 50-70% of protein, up to 8% of fat, carbohydrates (20%), has a balanced amino acid composition, vitamins A – 29 mcg/100g, E – 5 mg/100g, K – 25.5 mcg/100g, B1 – 2.4 mg/100g, B2 – 3.7 mg/100g, as well as iron – 28.5 mg/100g, magnesium – 195 mg/100g, sodium – 1048 mg/100g, copper – 6.1 mg/100g, manganese – 1.9 mg/100g.

Spirulina production is a waste-free and environmentally friendly process. Only photosynthetic oxygen is released during the production process. In Ukraine, *spirulina* cultivation is limited due to the imperfection of technological approaches. It has been established that one of the main technological parameters of the operation of *spirulina* cultivation plants is the dilution rate, which affects the productivity of the plant.

Therefore, improving the process parameters of the biotechnology of *spirulina* cultivation using a cascade-type installation is relevant. A photoreactor for

growing *spirulina* of the cascade type was developed. The installation consists of a tank, cascade surfaces, phytoirradiators, a pump, a compressor, mixers, a bubbler, a heat exchanger, inlet and outlet pipes for medium and suspension, a pipe for removing the gas-air mixture, a carbon dioxide cylinder.

Its main parameters:

- temperature regime of the installation – 20-30°C;
- volumetric pump flow – up to 12 m³/h;
- operating mode – continuous;
- number of cascades – 14;
- illuminated working surface of the photoreactor – 8.82 m²;
- total area of the illuminated working surface of the photoreactor – 124 m²;
- volume of suspension in one cascade – 0.529 m³;
- volume of suspension in the cascades of the photoreactor – 7.42 m³;
- volume of suspension in the photo reactor – 8.52 m³;
- installed capacity – 17.1 kW;
- overall dimensions: height – 5.8 m, width – 2.1 m, length – 4.2 m.

The culture was grown in continuous mode at dilution rates of 0.02 h⁻¹ and 0.04 h⁻¹. At a dilution rate of 0.02 h⁻¹, an increase in the concentration of absolutely dry biomass was observed from 1.4 to 2.9 g/l. The culture remained in a steady state. Increasing the dilution rate to 0.04 h⁻¹ leads to a decrease in the concentration of absolutely dry *spirulina* biomass in the culture medium from 2.6 to 1.1 g/l during cultivation due to cell washout from the system.

At a dilution rate of 0.02 h⁻¹, the pH value was stable within 9.1. Stable pH is a sign of an optimal cultivation regime. The slow inflow of fresh nutrient medium ensures a balance between CO₂ uptake by cells and the buffering capacity of the medium, which leads to the system entering a quasi-steady state. At a dilution rate of 0.04 h⁻¹, the pH value increased from 9.1 to 10.2, which indicates a violation of the physiological and biochemical balance of the culture, since during the growth process it reduces the concentration of carbonic acid, as a result of which the medium becomes more alkaline (pH increases).

Based on the conducted research, the technical regulation for growing *spirulina* in a cascade-type photoreactor were improved.

Keywords: *spirulina*, photoreactor, biotechnology, biomass, algae, nutrient medium.



Copyright: Сенчук М.М. © This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.



ORCID iD:

Сенчук М.М.

<https://orcid.org/0000-0001-9455-583X>