

Каскадна біотехнологія культивування спіруліни

Постановка проблеми.

У сучасних умовах розвитку біотехнології дедалі більшої актуальності набувають дослідження, спрямовані на створення ресурсоефективних 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 промисловості зумовлює необхідність удосконалення існуючих технологій культивування мікроводоростей.

Спіруліна (*Spirulina (Arthrospira) platensis*) є однією з найбільш перспективних промислових мікроводоростей завдяки високому вмісту білка, пігментів (зокрема фікоціаніну), вітамінів та антиоксидантів, володіє рекордно високими харчовими якістьми [1, 2].

Такі основні біологічно активні компоненти спіруліни як білок, сульфатовані полісахариди та γ -ліноленова кислота, відіграють значну роль у покращенні функцій організму людини. Крім того, експериментальні дані підтверджують імуномодельючу та противірусну дію спіруліни. Відомо також, що спіруліна є перспективною кормовою і харчовою сировиною, яка багата на білок, має збалансований амінокислотний склад, містить вітаміни та мінеральні речовини [1, 3, 4].

Спіруліна виготовляється у вигляді дрібнодисперсного розсипного порошку, або пасти та має прісний або ледве солоний смак з характерним для водоростей запахом, а також зелений або синьо-зелений колір. Вологість порошку спіруліни - 10%, частка сухої речовини становить 90%, а розмір твердих частинок – 6...8 мк [5].

Амінокислотний її склад такий же, як і білків тваринного походження. В спіруліні 50-70% білка [1, 6], до 8% жиру, вуглеводи (20%), незамінні амінокислоти [3,4,6], мінерали (особливо залізо), незамінні жирні кислоти, вітаміни та пігменти. Масова частка у 100 г порошку спіруліни, мг: вітамін: А – 0,029, Е - 5,0, К – 0,025, В1- 2,4, В2 - 3,7, Ферум - 28,5, Магній - 195,0, Натрію - 1048,0 мг, Купрум - 6,1 мг, Марганець - 1,9 мг [7, 8].

За вмістом каротину, вітамінів групи В спіруліна переважає будь-яку іншу культуру. Вона має вітамін F, який відповідає за обмін жирів, та амінокислоти, що стимулюють розвиток серцевих м'язів.

Білок спіруліни за біологічною цінністю не поступається протеїну м'язової тканини, яєць або сої. За амінокислотним складом (лейцином, валіном, треоніном, ізолейцином, тирозином, метіоніном та триптофаном) білок спіруліни переважає показники ідеального протеїну [9, 10].

Спіруліна росте у сильно лужному середовищі, якого не витримують антагоністи. Тому культура спіруліни тривалий час не забруднюється та дає високий приріст [11, 12].

Стічні води з біогазового процесу та комунального господарства були протестовані як джерело поживних речовин для культивування мікродорості спіруліни в порівнянні зі звичайним середовищем для її вирощування. Проводились дослідження з використанням збагаченої шахтної води для вирощування спіруліни. Спостерігалось однакове отримання її біомаси, і водночас не було виявлено суттєвих відмінностей щодо кількості білка, амінокислотного складу та загальної концентрації ліпідів [13, 14, 15].

Спіруліна надзвичайно чутлива до сприятливих умов інженерних установок, а сам технологічний процес легко механізується та автоматизується.

У літературі є результати використання різних способів переробки спіруліни для досягнення максимального ефекту при використанні її у якості поживної добавки [4, 6, 7].

Суспензія спіруліни використовується на корм тваринам. При використанні у вигляді пасти – попередньо проводиться відділення на центрифuzі клітин спіруліни від живильного розчину. Далі спірулінова паста іде на корм, а живильний розчин після додавання компонентів (води, соди, спіруліни) використовується повторно.

Таким чином, виробництво спіруліни безвідходне і нешкідливе, в процесі якого виділяється тільки фотосинтетичний кисень.

В Україні вирощування спіруліни має обмежений характер через недосконалість технологічних підходів, знижену ефективність отримання водоростей із-за кліматичних умов.

Традиційні технології її вирощування спіруліни, як правило, базуються на лінійних схемах культивування, що характеризуються значними витратами поживних речовин, води та енергії, а також обмеженою можливістю повторного використання середовищ і побічних продуктів. Це суттєво 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 біопроесах. Для мікродоростей, зокрема спіруліни, такий підхід потенційно дозволяє підвищити ефективність використання азоту, фосфору та вуглецю, знизити 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, бракує систематизованих даних щодо впливу каскадного використання поживних середовищ на кінетику росту культури, стабільність біосистеми, біохімічний склад біомаси та вихід цінних метаболітів. Недостатньо дослідженими також залишаються режими розведення культури та їх

узгодження з динамічно змінним складом середовищ у багатостадійних схемах культивування.

Встановлено, що одним із основних технологічних параметрів роботи установок для вирощування спіруліни є швидкість розведення, який впливає на продуктивність установки. Тому визначення оптимальної швидкості розведення для установки каскадного типу є доцільним та актуальним.

У зв'язку з цим виникає науково-практичне завдання розробки удосконаленого регламенту установки каскадного типу, яка забезпечувала б підвищення ресурсної ефективності процесу, стабільність культури та збереження високої якості біомаси за рахунок оптимальної швидкості розведення.

Метою дослідження є удосконалення технологічних параметрів біотехнології культивування спіруліни з використанням установки каскадного типу при оптимізації швидкості розведення.

Матеріал і методи дослідження.

Товщина шару суспензії на робочих стічних поверхнях визначається залежно від рівномірності розподілу світлового потоку по висоті шару суспензії [17,18, 19]. На мінімальну товщину впливають також граничні умови техніко-економічного характеру експлуатації установки.

Дослідним шляхом було встановлено товщину шару суспензії на робочій поверхні $H = 0,06\text{м}$.

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

Таблиця 1 – Основні технологічні параметри фотореактора та склад поживного середовища.

Назва показника	Значення показника
Місце проведення досліджень	УкрНДІПВТ ім. Л. Погорілого
Технічна характеристика фотореактора	
1. Температурний режим роботи установки, °С [20, 21]	+20...30
2. Верхнє значення відносної вологості повітря (при температурі 30 °С), %	98
3. Об'ємна подача насоса, м ³ /год	до 12
4. Режим роботи	безперервний
5. Кількість каскадів	14
6. Освітлювальна робоча поверхня фотореактора, м ²	8,82
7. Загальна площа освітлювальної робочої поверхні фотореактора, м ²	124
8. Освітленість робочої поверхні, клк [22]	12
9. Об'єм суспензії в одному каскаді, м ³	0,529
10. Об'єм суспензії в каскадах фотореактора, м ³	7,42
11. Об'єм суспензії в фотореакторі, м ³	8,52
12. Встановлена потужність, кВт	17,1

13. Габаритні розміри:	
висота, м	5,8
ширина, м	2,1
довжина, м	4,2
1.4. Базовий розчин для вирощування спіруліни (розчин Зарука [19]), г/л:	
Гідрокарбонат натрію (харчова сода) - NaHCO_3	16,8
Гідрофосфат калію - K_2HPO_4	0,5
нітрат натрію - NaNO_3	2,5
Сульфат калію - K_2SO_4	1,0
хлорид натрію (кухонна сіль) - NaCl	1,0
Сульфат магнію гептагідрат (англійська сіль) - $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	0,2
Хлорид кальцію - CaCl_2	0,04
Сульфат заліза(II) гептагідрат (залізний купорос) - $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	0,01
Етилендіамінтетраацетат - ЕДТА	0,08
Норма внесення CO_2 (два рази на добу), г/л [23]	0,7-1,2

Джерело: побудовано автором

Вирощування культури проводилось в безперервному режимі при швидкостях 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 всьому 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 всьому об'єму реактора.

В процесі дослідження визначалася динаміка вирощування спіруліни (концентрація абсолютно сухої біомаси (АСБ) спіруліни в культуральному середовищі, г/л) та рН з використання 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 забезпечувалась за допомогою загальних методів статистичної оцінки, де 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 з періодичністю через 12, 24, 48, 72, 96 год при швидкостях розведення 0,02 год⁻¹, і 0,04 год⁻¹. В результаті за отриманими середніми значеннями було побудовано графік концентрації АСБ спіруліни залежно від тривалості вирощування при швидкостях розведення 0,02 год⁻¹, і 0,04 год⁻¹. (рис. 2).

З метою визначення рівня рН поживного середовища відбір проб проводили у кількості 1 л з кожного каскаду через певні проміжки часу: 12, 24, 48, 72 та 96 годин. За отриманими середнім значенням було побудовано графік зміни рН в процесі вирощування спіруліни при швидкостях розведення 0,02 год⁻¹, і 0,04 год⁻¹ (рис. 3).

Результати дослідження та обговорення.

Результати дослідження.

На основі аналізу існуючих і перспективних технологій отримання спіруліни розроблено установку - фотореактор каскадного типу для культивування спіруліни) (рис.1).

Культура росте в поживному водному розчині. Насос подає суспензію (суміш клітин спіруліни і живильного розчину) із вбираючої місткості у верхній стічний лоток. Суспензія стікає вниз. Вся робоча ємність освітлюється джерелом світла 3. В процесі фотосинтезу відбувається ріст спіруліни з поглинанням вуглекислого газу і виділенням кисню. Надходження вуглекислого газу до поживного середовища забезпечується за допомогою компресора 5, через змішувач 6 і барботажні трубки 7. Вуглекислота поступає із балона 12. При досягненні необхідної густини біомаси культури її відбирають через патрубок 10. Вирощування спіруліни вимагає постійної температури суспензії, яка стабілізується теплообмінником 8, шляхом подачі теплої або холодної води.

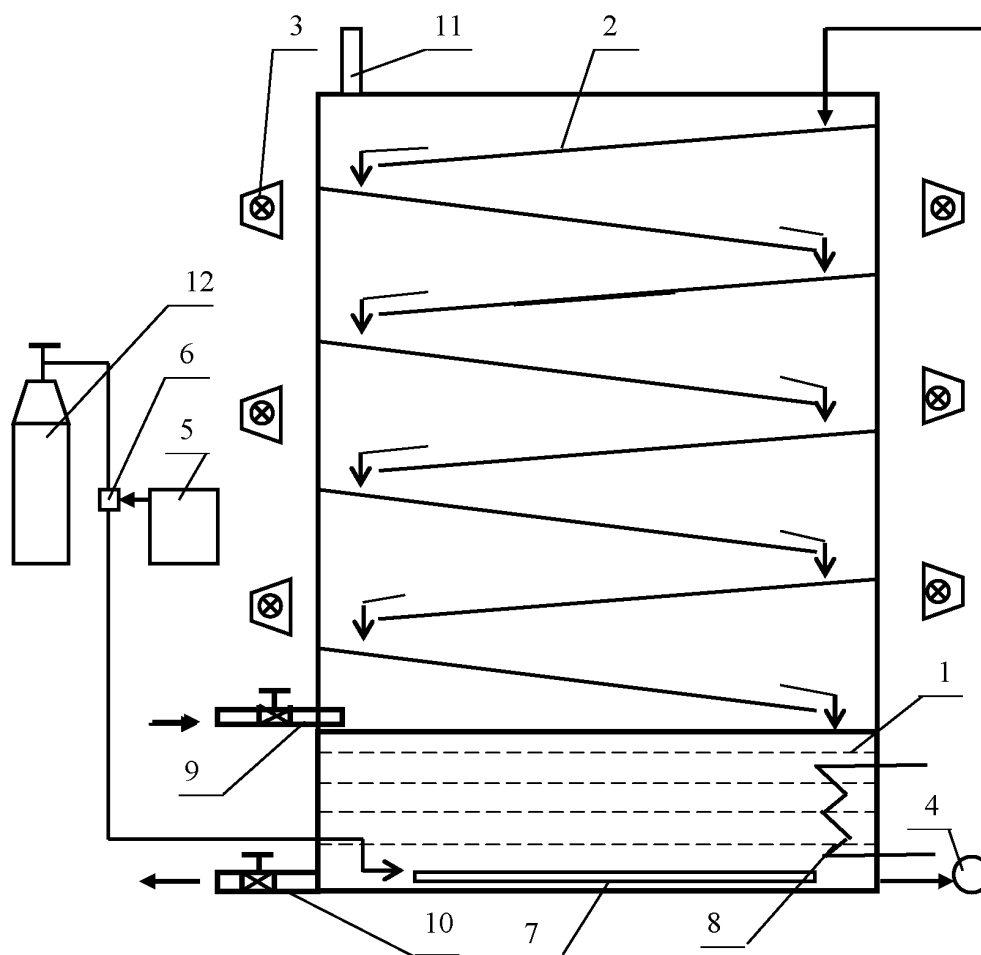


Рис. 1. Експериментальна установка для культивування спіруліни.

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 з вуглекислим газом.

Джерело: побудовано автором

Динаміку росту спіруліни при різних швидкостях розведення середовища наведено таблиці 2 та на рис. 2.

Таблиця 2 - Динаміка росту спіруліни при різних швидкостях розведення середовища.

ривалість вирощування, годин	Концентрація абсолютно сухої біомаси спіруліни в культуральному середовищі, г/л. (Швидкість розведення 0,02 год ⁻¹)			Концентрація абсолютно сухої біомаси спіруліни в культуральному середовищі, г/л. (Швидкість розведення 0,04 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

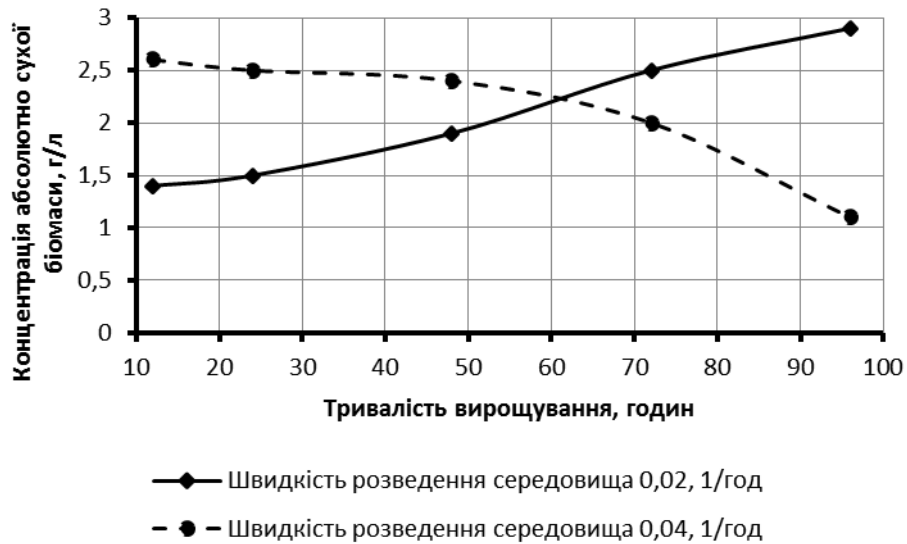


Рис. 2. Динаміка росту спіруліни при різних швидкостях розведення середовища.

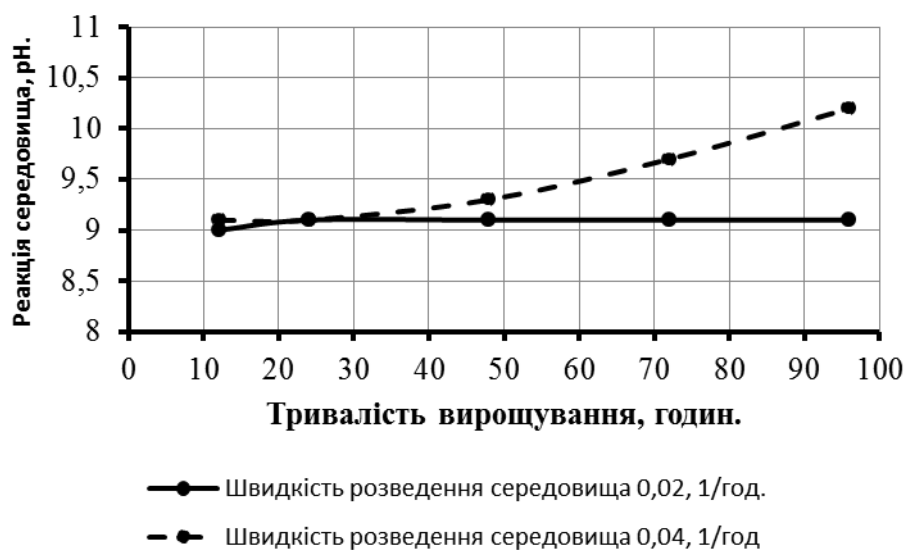
Джерело: побудовано автором

Зміна реакції середовища рН при різних швидкостях розведення наведено в таблиці 3 та на рис. 3.

Таблиця 3 - Зміна реакції середовища рН при різних швидкостях розведення.

Тривалість вирощування, годин	Реакція середовища рН при швидкості розведення 0,02 год ⁻¹			Реакція середовища рН при 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



Джерело: побудовано автором

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

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

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 з періодичним відбором біомаси і поновленням живильного розчину.
3. Показники біотехнологічного процесу:	
3.1. Температура живильного розчину, °C	30...35
3.2. Температура повітря в зоні вегетативних місткостей, °C	25...30
3.3. Відносна вологість повітря в зоні вегетативних місткостей, %	96...98
3.4. Товщина шару суспензії в 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 поживного розчину	Розчин Заррука

Джерело: побудовано автором

Обговорення.

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

Так, при мінімальній швидкості розведення 0,02 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 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, а отже не дозволяє підтримувати спіруліну в рівноважному стані.

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

Також в процесі дослідження було встановлено, що різні швидкості розведення призводять до зміни реакції середовища рН. Так, при швидкості розведення $0,02 \text{ год}^{-1}$ (табл. 3, рис. 3) реакція середовища рН була стабільною в межах 9,1. Повільне надходження свіжого поживного середовища забезпечує баланс між поглинанням CO_2 клітинами та буферною ємністю середовища, що призводить до входження системи в квазістаціонарний стан. Відомо, що для вирощування спіруліни саме слабколужні умови є оптимальними для росту та метаболічної активності, зокрема синтезу білка і пігментів. Таким чином, підтримання стабільного значення рН у каскадній системі можна розглядати як індикатор фізіологічної стабільності культури.

Натомість при швидкості розведення $0,04 \text{ год}^{-1}$ рН протягом періоду вирощування зростала з 9,1 до 10,2. Прискорення надходження свіжого поживного середовища не забезпечує баланс між поглинанням CO_2 клітинами спіруліни та буферною ємністю середовища, оскільки спіруліна - фотосинтезуючий мікроорганізм, то в процесі росту вона зменшує концентрацію карбонатної кислоти, внаслідок чого середовище стає більш лужним (рН зростає).

Отримані результати дослідження узгоджуються з літературними даними щодо впливу режимів безперервного культивування на мікрододорості, проте доповнюють їх з позицій застосування установки каскадного типу для вирощування спіруліни (фотореактора). Показано, що навіть помірне підвищення швидкості розведення в каскадній системі може мати критичні наслідки для стабільності культури, що необхідно враховувати при розробці та вдосконаленні технологічних регламентів вирощування спіруліни.

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

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

Висновки.

Результати проведених досліджень показали, що виробництво спіруліни безвідходне і нешкідливе. В Україні вирощування спіруліни має обмежений

характер через недосконалість технологічних підходів, знижену ефективність отримання водоростей через кліматичні умови.

Експериментальними дослідженнями 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 при мінімальній 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 нагромадження 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 при швидкості розведення $0,02 \text{ год}^{-1}$ реакція середовища залишалася стабільною на рівні $\text{pH} \approx 9,1$, що відповідає оптимальним умовам росту спіруліни у каскадній системі культивування. Підвищення швидкості розведення до $0,04 \text{ год}^{-1}$ не забезпечує баланс між поглинанням CO_2 клітинами спіруліни та буферною ємністю середовища, де в процесі росту із за фотосинтезу вона зменшує концентрацію карбонатної кислоти, внаслідок чого середовище стає більш лужним (pH 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 з використанням установки каскадного типу.

Запропоновані параметри технологічного регламента 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 сульфуру у поживному середовищі. НВ ЛНУ ветеринарної медицини та біотехнологій. Серія: Сільськогосподарські науки, 26(101), 2024. С. 217-222. DOI: <https://doi.org/10.32718/nvlvet-a10134>

2. Мерзлова Г. В. Вміст хлорофілу у біомасі спіруліни за дії різних доз мікроелементів у поживному середовищі. Біологія тварин. т. 16, № 2, 2014. С. 71-76. URL: <https://aminbiol.com.ua/20142pdf/9.pdf> .

3. Бондаренко Л.В., Богатко Н.М., Гришко В.А., Роженко ВМ. Показники росту біомаси спіруліни за різних доз йоду у поживному середовищі. Науковий вісник Львівського національного університету ветеринарної медицини та біотехнологій імені С.З. Ґжицького. Серія: Сільськогосподарські науки, 2025. № 101, том. 26, С. 351-356. DOI: <https://doi.org/10.32718/nvlvet-a10152>.

4. Ліщук А. В., Васильченко О. А., Міненко А. Б., Касіанівська Є. С., Кудас В. Є. Застосування мікроводоростей у біотехнології. Проблеми екологічної біотехнології, 2024. № 1, С. 34-39. DOI: <https://doi.org/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. Вип. 18. Т 1 – Мелітополь: ТДАТУ, 2018. С. 43- 50 с.
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. Випуск 1. С 53-58. DOI: <https://doi.org/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, том 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*, 40, 2017. С. 625–631. <https://doi.org/10.1007/s00449-016-1726-2>
9. Musa, M. N. et al. A review on techno-economic assessment of *Spirulina* for sustainable nutraceutical, medicinal, environmental, and bioenergy. *Bioresources and Bioprocessing*, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40643-025-00888-3>
10. Marjanović, B., et al. Bioactive compounds from *Spirulina* spp. - nutritional value, extraction, and application in food industry. *Separations*. **11(9)**, 2024. p. 257 DOI: <https://doi.org/10.3390/separations11090257>
11. Fais, G., et al. Photoautotrophic Batch Cultivation of *Limnospira* (*Spirulina*) *platensis*: Optimizing Biomass Productivity and Bioactive Compound Synthesis Through Salinity and pH Modulation. *Mar. Drugs*, 23(7), 2025. p. 281. DOI: <https://doi.org/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. p. 113. DOI: <https://doi.org/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*, 40, 2017. pp. 625–631. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00449-016-1726-2> .
14. Unlocking the potential of *Spirulina* microalgae: Cultivating in wastewater treatment for sustainable biofuel production. *Stainable Chemistry and Pharmacy*, 41 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scp.2024.101705> .

15. El-Sayed, M. A. E.-S., Milia, M., et al. Use of enriched mine water to grow the cyanobacterium *Arthrospira platensis*. *Foods*. 14(10), 2025. p. 1665. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods14101665> .
16. Guidi, F., Gojkovic, Z., Venuleo, M., Assunção, P. A. C. J., & Portillo, E. 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), 2021. p. 1333. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr9081333> .
17. Liu, M., et al. Cultivation strategy optimization and pilot-scale production of *Spirulina* subsalsa grown in seawater and monosodium glutamate wastewater. *Bioresources and Bioprocessing*. 12, 2025. p. 83. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40643-025-00926-0> .
18. Novel Thin-Layer Fountain Photobioreactors for the High-Density Cultivation of *Spirulina* sp. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 11(47), 2023. pp. 16818–16827. DOI: <https://doi.org/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*, 12, 2025. p. 83. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40643-025-00926-0> .
20. Chang, Y., Wu, Z., Bian, L., Feng, D., & Leung, D. Y. C. Cultivation of *Spirulina platensis* for biomass production and nutrient removal from synthetic human urine. *Applied Energy*, 102, 2013. pp. 427–435. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.07.024>
21. Guidi, F., Gojkovic, Z., Venuleo, M., Assunção, P. A. C. J., & Portillo, E. 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), 2021. p. 1333. DOI: <https://doi.org/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. p. 202. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2025.108163> .

REFERENCES

1. Hryhorash YU. V., Merzlov S.V. (2024). Naroshchuvannya biomasy *Spirulina platensis* yak kormovoyi dobavky za riznykh doz sul'furu u pozhyvnomu seredovyshchi [Increasing the biomass of *Spirulina platensis* as a feed additive at different doses of sulfur in the nutrient medium]. NV LNU veterynarnoyi medytsyny

ta biotekhnolohiy [Scientific Messenger of LNU of Veterinary Medicine and Biotechnologies]. Seriya: Sil's'kohospodars'ki nauky, 26(101), pp. 217-222.

DOI: <https://doi.org/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]. Biologiya tvaryn[Biologiya tvaryn]. t. 16, № 2, pp. 71-76. URL: <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 veterynarnoyi medytsyny ta biotekhnolohiy imeni S.Z. Gzhyts'koho. Seriya: Sil's'kohospodars'ki nauky [Scientific Messenger of LNU of Veterinary Medicine and Biotechnologies. Series: Agricultural Sciences]. Tom. 26 № 101, pp. 351 – 356. DOI: <https://doi.org/10.18372/2306-6407.1.6695> .(In Ukrainian).

4. Lishchuk A. V., Vasyl'chenko O. A., Minenko A. B., Kasianivs'ka YE. S., Kudas V. YE. (2014). zastosuvannya mikrovdorostey u Biotekhnolohiy [Microalgae biotechnological application]. Problemy ekolohichnoyi biotekhnolohiyi [Problems of Environmental Biotechnology]. № 1, С. 34-39. DOI: <https://doi.org/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'kyy derzhavnyy ahrotekhnolohichnyy universytet [Tavrishesky State Agrotechnological University]. Vyp. 18. T 1 – Melitopol': TDATU, 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 Poltavs'koho universytetu ekonomiky i torhivli [Scientific Bulletin of Poltava University of Economics and Trade]. Vypusk 1 Seriya: Tekhnichni nauky, pp. 53-58. DOI: <https://doi.org/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 Agro-Technological University: electronic scientific professional publication of the Tavria State Agro-Technological University]. Melitopol': TDATU, Vyp. 12, tom 2. p.p. 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. (2017). Use of the effluent from biogas production for cultivation of *Spirulina*. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, 40, pp.625–631. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00449-016-1726-2>
9. Musa, M. N. et al. (2025). A review on techno-economic assessment of *Spirulina* for sustainable nutraceutical, medicinal, environmental, and bioenergy. *Bioresources and Bioprocessing*. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40643-025-00888-3> .
10. Marjanović, B., et al. (2024). Bioactive compounds from *Spirulina* spp. - nutritional value, extraction, and application in food industry. *Separations*. 11(9), p. 257 DOI: <https://doi.org/10.3390/separations11090257> .
11. Fais, G., et al. (2025). Photoautotrophic Batch Cultivation of *Limnospira (Spirulina) platensis*: Optimizing Biomass Productivity and Bioactive Compound Synthesis Through Salinity and pH Modulation. *Mar. Drugs*, 23(7), p. 281. DOI: <https://doi.org/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*, p. 113. DOI: <https://doi.org/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: <https://doi.org/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*, 41 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scp.2024.101705> .
15. El-Sayed, M. A. E.-S., Milia, M., et al. (2025) Use of enriched mine water to grow the cyanobacterium *Arthrospira platensis*. *Foods*. 14(10), 1665. DOI: <https://doi.org/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. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr9081333> .
17. Liu, M., et al. (2025). Cultivation strategy optimization and pilot-scale production of *Spirulina* subsalsa grown in seawater and monosodium glutamate wastewater. *Bioresources and Bioprocessing*. 12, p. 83. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40643-025-00926-0> .
18. Novel Thin-Layer Fountain Photobioreactors for the High-Density Cultivation of *Spirulina* sp. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, **11(47)**, 16818–16827 (2023). DOI: <https://doi.org/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*, 12, (2025). p. 83. DOI: <https://doi.org/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: <https://doi.org/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), p. 1333. <https://doi.org/10.3390/pr9081333>

22. Kotyns'kyu A., Salyuk A., Palyvoda K. (2019) Vplyv osvittlenya 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]* . №4-5 (356-357), pp. 23-25. URL: <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. *Biomass and Bioenergy*, 2025 p. 202. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2025.108163> .

Анотація

Сенчук М.М.

Спіруліна (*Spirulina platensis*) є кормовою і харчовою сировиною, в якій 50-70% білка, до 8% жиру, вуглеводи (20%), має збалансований амінокислотний склад, вітаміни: А – 29 мкг/100г, Е – 5 мг/100г, К – 25,5 мкг/100г, В1 – 2,4 мг/100г, В2 – 3,7 мг/100г, а також Ферум – 28,5 мг/100г, Магній – 195 мг/100г, Натрій – 1048 мг/100г, Купрум – 6,1 мг/100г, Марганець – 1,9 мг/100г.

Виробництво спіруліни безвідходне і нешкідливе. В процесі виробництва виділяється тільки фотосинтетичний кисень.

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

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

Тому удосконалення 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, фітоопромінювачів, насоса, компресора, змішувачів, барботажу, теплообмінника, патрубків для заповнення бака розчином і відбирання суспензії, патрубка для відведення газоповітряної суміші, вуглекислотний балон.

Її основні параметри:

- температурний режим роботи установки – 20...30 °С;
- 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 в фотореакторі – 8,52 м³;
- встановлена потужність – 17,1 кВт;
- габаритні розміри: висота – 5,8 м, ширина – 2,1 м, довжина – 4,2 м.

Вирощування культури проводилось в безперервному режимі при швидкостях розведення 0,02 год⁻¹, і 0,04 год⁻¹.

При 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.

При швидкості розведення 0,02 год⁻¹ водневий показник рН був стабільним в межах 9,1. Стабільний рН - ознака оптимального режиму культивування. Повільне надходження свіжого поживного середовища забезпечує баланс між поглинанням СО₂ клітинами та буферною ємністю середовища, що призводить до входження системи в квазістаціонарний стан.

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

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

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

Annotation

Senchuk M.M.

Cascade biotechnology of spirulina cultivation

Spirulina (*Spirulina platensis*) is a feed and food raw material, which contains 50-70% protein, up to 8% 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 waste-free and harmless. 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 technological regulations 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, waste surfaces, phytoirradiators, a pump, a compressor, mixers, a bubbler, a heat exchanger, a pipe for filling the tank with a solution and taking out the 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 fluororeactor – 8.82 m²;
- total area of the illuminated working surface of the photo reactor – 124 m²;
- volume of suspension in one cascade – 0.529 m³;
- volume of suspension in the photo reactor cascades – 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 was maintained 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 over the period due to cell washout.

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 flow 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 technological regulations for growing spirulina in a cascade-type photoreactor were improved.

Key words: spirulina, photoreactor, biotechnology, biomass, algae, nutrient medium.