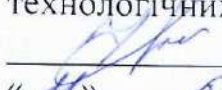


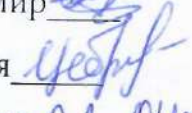
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
БІЛОЦЕРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

БІОЛОГО-ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ
Спеціальність 162 «Біотехнології та біоінженерія»

Допускається до захисту
Зав. кафедри безпечності та якості
харчових продуктів, сировини і
технологічних процесів
 доцент ЧЕРНЮК Сергій
«11» 05 2026 року

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА БАКАЛАВРА

БІОТЕХНОЛОГІЯ КУЛЬТИВУВАННЯ *SPIRULINA PLATENSIS*

Виконав: СМОЛЯРЕНКО Володимир 
Керівник: доцент ЦЕБРО Анастасія 
Рецензент професор Цехмістренко О.С. Оцхмист

Я, СМОЛЯРЕНКО Володимир, засвідчую, що кваліфікаційну роботу виконано з дотриманням принципів академічної доброчесності.

Біла Церква – 2026

ЗМІСТ

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

АНОТАЦІЯ

ANNOTATION

ВІДГУК КЕРІВНИКА

РЕЦЕНЗІЯ

ВСТУП

РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

- 1.1. Характеристика мікроводорості *Spirulina platensis*
- 1.2. Перспективи використання біомаси *Spirulina platensis* та способи її виробництва

РОЗДІЛ 2. МАТЕРІАЛ ТА МЕТОДИКА ВИКНАННЯ РОБОТИ

РОЗДІЛ 3. ВЛАСНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

- 3.1. Розрахунок кількості стадій підготовки посівного матеріалу та поживного середовища за біотехнології культивування *Spirulina platensis*
- 3.2. Розрахунок кількості виробничих циклів для отримання біомаси та об'єму фотобіореактора
- 3.3. Апаратурно-технологічна схема біотехнології культивування *Spirulina platensis*
- 3.4. Контроль якості готового продукту

РОЗДІЛ 4. ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ

ВИСНОВКИ

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

АНОТАЦІЯ

Смоляренко В. Біотехнологія культивування *Spirulina platensis*

Кваліфікаційна робота складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаної літератури.

У роботі обґрунтовано вибір біологічного продуцента та наведено його характеристику, проаналізовано технологію культивування *Spirulina platensis* визначено оптимальні параметри та склад поживного середовища, умови його приготування й стерилізації. Проведено розрахунок кількості виробничих циклів для отримання біомаси та об'єму фотобіореактора.

Наведено апаратурно-технологічну схему культивування спіруліни з метою одержання біомаси культури з описом основних етапів та представлено основні показники якості, поживного середовища та готової продукції, а також методи контролю параметрів за культивування. Встановлено оптимальні параметри, вимоги до технології виробництва біомаси *Spirulina platensis*.

Визначено економічну ефективність виробництва біомаси *Spirulina platensis* та зроблено висновки щодо доцільності та перспективи подальшого використання. Кваліфікаційна робота бакалавра містить 40 сторінок, 6 таблиць, 3 рисунки. Список використаної літератури складається із 31 джерела, у яких описано сучасні дослідження у даній галузі.

Ключові слова: культивування, *Spirulina platensis*, біосинтез, фотореактор, поживне середовище.

ANNOTATION

Smolyarenko V. Biotechnology of cultivation of *Spirulina platensis*

The qualification work consists of an introduction, four chapters, conclusions, and a list of references.

The paper justifies the choice of a biological producer and provides its characteristics, analyzes the technology of cultivation of *Spirulina platensis*, determines the optimal parameters and composition of the nutrient medium, conditions for its preparation and sterilization. The number of production cycles for obtaining biomass and the volume of the photobioreactor are calculated.

The apparatus and technological scheme of spirulina cultivation for the purpose of obtaining culture biomass is presented with a description of the main stages and the main indicators of quality, nutrient medium and finished products, as well as methods of controlling cultivation parameters are presented. The optimal parameters and requirements for the technology of producing *Spirulina platensis* biomass are established.

The economic efficiency of *Spirulina platensis* biomass production was determined and conclusions were drawn regarding the feasibility and prospects of further use. The bachelor's qualification work contains 40 pages, 6 tables, 3 figures. The list of used literature consists of 31 sources, which describe modern research in this field.

Keywords: cultivation, *Spirulina platensis*, biosynthesis, photoreactor, nutrient medium.

ВСТУП

Мікроводорості є перспективними об'єктами для проведення наукових досліджень в галузі фізіології, біохімії, біофізики, генетики тощо. Крім того їх використовують для підвищення продуктивності водойм і родючості ґрунтів, отримання біологічно активних речовин, різних харчових і кормових добавок, в якості індикаторних організмів при вивченні стану ґрунтів і водойм. Завдяки унікальному складу та властивостям, синьо-зелена мікроводорість *Spirulina platensis* є об'єктом підвищеного наукового інтересу. Висока концентрація протеїнів (у межах 60,0–70,0 %), а також багатий вміст вітамінів, мікроелементів та антиоксидантів зумовлюють її широке використання у виробництві функціональних продуктів та дієтичних добавок [1]. Біоактивні компоненти спіруліни забезпечують протизапальну, антиоксидантну та противірусну дію. Сьогодні синьо-зелені мікроводорості культивують у спеціальних умовах, у системах відкритого або закритого типу, у різних країнах світу. Це дозволяє отримувати високоякісну біомасу, яку використовують як харчову добавку, компонент косметичних засобів або основу для фармацевтичних препаратів [3]. Спіруліна стійка до умов вирощування, що дозволяє одержати біомасу за обмежених ресурсів, включаючи використання різноманітних відходів. Це робить її перспективною для забезпечення харчової безпеки у майбутньому.

Мета роботи – проаналізувати біотехнологію культивування *Spirulina platensis* для одержання біомаси.

Для виконання мети були поставлені наступні завдання:

- обґрунтувати вибір біологічного об'єкта;
- обґрунтувати технологічну схему одержання біомаси спіруліни, проаналізувати способи та особливості культивування;
- провести аналіз оптимальних параметрів за культивування *Spirulina platensis* та вибір поживного середовища;
- провести аналіз, вибір та розрахунок необхідного технологічного обладнання для запланованої технології;

- провести розрахунок витрат сировини та матеріалів для запланованого виробництва;
- розрахувати економічну ефективність виробництва.

РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

1.1. Характеристика мікроводорості *Spirulina platensis*

Spirulina platensis (спіруліна) один із видів ціанобактерій – синьо-зелена водорість. За будовою клітин спіруліна – це прокаріот, тобто вона є одноклітинним бактеріальним організмом, який не має сформованого ядра. Зазвичай у прокаріотів відсутні справжні хлоропласти, проте у спіруліні є спеціалізовані мембранні структури, де відбувається процес фотосинтезу. Вона належить до типу *Cyanobacteria* (синьо-зелені водорості, або ціанобактерії). З наукової точки зору, спіруліна належить до ціанобактерій, але за своїми екологічними властивостями її класифікують як мікроводорість. Вона має спіральну ниткоподібну структуру, що складається з багатьох клітин, з'єднаних між собою. Кожна нитка (трихома) довжиною від декількох мікрометрів до кількох міліметрів, та складається з циліндричних клітин, що утворюють спіралеподібні завитки, звідки й походить назва. Трихоми здатні до скорочення та рухатись. Вони скупчуються в пучки або переплітаються з іншими видами водоростей. Спіруліна зелено-блакитного кольору, що зумовлено наявністю фотосинтетичних пігментів (хлорофіл а та фікоціанін). В природних умовах спіруліна розповсюджена у солоних та лужних водоймах [1]

Водорості є досить ефективними з точки зору використання ресурсів. Їх можна культивувати в різних середовищах, включаючи прісноводні, солоні та навіть стічні води, що зменшує потребу в орних землях та прісноводних ресурсах. Ця адаптивність робить водорості чудовим кандидатом для сталого виробництва продуктів харчування, особливо в регіонах, які стикаються з дефіцитом землі та води. Крім того, водорості мають відносно низький екологічний слід, виробляючи менше викидів парникових газів порівняно з тваринництвом. З точки зору масштабованості, культивування водоростей можна оптимізувати для великомасштабного виробництва з використанням біореакторів та систем відкритих ставків, що ще більше підвищить їхній потенціал як глобального джерела білка.

Категорія мікроводоростей досить різноманітна, налічує понад 200 000 видів. Сьогодні значну кількість цих видів використовують для широкого

спектру біотехнологічних застосувань, включаючи виробництво біопалива, жирних кислот, альгінатів, кормів для тварин, очищення стічних вод тощо.

Біомаса – це певна кількість живої або висушеної клітинної маси синьо-зеленої мікроводорості *Spirulina*, яку одержують шляхом культивування культури в промислових масштабах, наприклад, у спеціальних штучних установках, фотобіореакторах [1, 2]. Вона може бути у вигляді концентрованої суспензії, пасти або сухого порошку, який отримують на завершальному етапі культивування, шляхом фільтрування та висушування. Біомасу культури використовують у якості біологічно активних харчових добавок, а також для отримання лікарських та біохімічних препаратів [3]. Найбільш поширеною є *Spirulina platensis* (Nordst.), *Geiti* (*Arthrospira platensis*), рідше за культивування використовують *S. maxima*, *S. tenuissima* тощо. Різні види спіруліни відрізняються один від одного довжиною ниток і їх формою. Під час виробництва біомаси спіруліни застосовують теплиці, фотореактори, каскадні установки тощо. У таблиці 1.1. наведено амінокислотний склад різних видів мікроводоростей (*Chlorella*, *Spirulina*) дріжджів та порівняння наведених показників з показником «ідеального протеїну».

Таблиця 1.1.

Амінокислотний склад сухої біомаси мікроорганізмів та «ідеального протеїну»

Амінокислоти	“Ідеальний протеїн”	Міститься в протеїні, %			
		спіруліни	хлорели	дріжджів	інфузорій рубця ВРХ
Лізин	7,0	5,15	7,20	6,8	10,2
Лейцин	7,0	8,96	8,88	6,3	7,8
Валін	4,9	7,68	6,44	5,5	4,8
Треонін	4,2	5,63	5,04	5,0	5,2
Ізолейцин	3,8	5,78	3,73	5,2	6,3
Фенілаланін	3,8	5,20	5,29	4,3	5,3
Тирозин	2,9	4,64	3,10	4,2	4,4
Гістидин	2,3	1,50	1,60	1,7	1,8
Метіонін	1,9	2,54	1,59	1,8	2,1
Цистин	1,6	0,90	0,70	0,9	1,3
Триптофан	1,0	1,53	1,59	1,3	1,4

«Ідеальний протеїн» (або ідеальний білок) – це концепція в нутриціології та біотехнології, яка описує білок із абсолютно збалансованим амінокислотним складом, що на 100% відповідає фізіологічним потребам організму (людини або конкретного виду тварини).

У такому білку всі незамінні амінокислоти (ті, які організм не може синтезувати сам) перебувають у точному математичному співвідношенні між собою та до загального Нітрогену.

Концепція базується на принципі: організм засвоює білок настільки, наскільки дозволяє вміст лімітуючої амінокислоти (найбільш дефіцитної).

Швидкий ріст і розвиток спіруліни можливий при достатній освітленості та за відповідних температурних режимів. Розмноження мікроводорості відбувається вегетативним шляхом – фрагментами трихоми. Окремі форми зберігають свою цілісність навіть за несприятливих умов, при цьому перебувають у стані анабіозу, навіть за повного випаровування водних мас у водоймах і за температури ґрунту до + 65 °C [4, 5].

До складу біомаси *Spirulina* входять такі основні компоненти, як білки, ліпіди, вуглеводи, мінеральні речовини та вітаміни. У таблиці 1.2. наведено хімічний склад та масову частку речовин у біомасі спіруліни.

Таблиця 1.2.

Хімічний склад біомаси спіруліни

Компонент	Відсоток (%)
Білки	60
Ліпіди	8
Вуглеводи	15
Мінерали	10
Вітаміни	7

Спіруліна (*Arthrospira platensis*) відома високим вмістом білка (від 55,0 % до 70,0 % від маси сухої речовини), що дозволяє її використовувати у якості харчових добавок у раціонах людей та тварин. Білок багатий на незамінні амінокислоти, що робить її повноцінним джерелом протеїну.

Вміст білка може варіювати залежно від умов культивування, часу збору врожаю та інтенсивності освітлення за культивування, він легко засвоюється організмом завдяки відсутності клітковини у її клітинних стінках [6]. Коефіцієнт засвоюваності білка в межах 85,0-95,0 %.

Спіруліна містить широкий спектр вітамінів, а саме вітаміни у 100 г сухої біомаси: А (0,57 мг), В1 (Тіамін 2,38 мг), В2 (Рибофлавін 3,67 мг), В3 (Ніацин 12,82 мг), В6 (Піридоксин 0,65 мг), В12 (Кобаламін 0,0004 мг), С (10,1 мг), D (0,001 мг), Е (5,0 мг), К (0,025 мг) [7].

Крім того до основних мінеральних речовин, що входять до складу, у 100 г: Кальцій (120 мг), Залізо (28.5 мг), Магній (195 мг), Фосфор (118 мг), Калій (1363 мг), Натрій (1048 мг), Цинк (2 мг), Мідь (6.1 мг), Марганець (1.9 мг) та Селен (0.004 мг) [8].

Також до хімічного складу біомаси спіруліни відносять біологічно активні речовини, серед яких фікобіліпротеїни, сполуки які не тільки виконують важливі функції у фотосинтезі, але їх також широко використовують у фармацевтичній, косметичній та харчовій промисловостях. Вони є водорозчинними білками, саме у спіруліни є два основні види: С-фікоціанін і алофікоціанін, причому С-фікоціанін є основним пігментом (до 20,0 %), колір якого є інтенсивно синім з флуоресценцією.

До інших важливих біологічно активних речовин належать: каротиноїди – є джерелом β -каротину, який відноситься до антиоксидантів і є попередником вітаміну А; полісахариди – сполуки, які мають імуномодуючі властивості; фенольні сполуки – володіють антиоксидантними властивостями; гамма-ліноленова кислота – належить до поліненасичених жирних кислот [9].

1.2. Перспективи використання біомаси *Spirulina platensis* та способи її виробництва

Постійне зростання населення світу призводить до підвищення попиту на харчові білки, що робить сучасну систему харчових продуктів тваринного походження нестійкою. Тому необхідно шукати альтернативні, екологічно чисті та стійкі джерела білка. Біомасу мікрроводоростей можливо

використовувати як джерело білків та поживних речовин за технологічного процесу у харчовій промисловості, тому виробництво їх є доцільним, що спонукає до підвищення інтересу до харчових продуктів на основі водоростей та харчових інгредієнтів, отриманих з водоростей [10].

Біомасу спіруліни використовують у харчовій промисловості як функціональний інгредієнт, природний харчовий барвник та харчову добавку до складу таких продуктів, як соки, смузі, енергетичних батончиків, хлібобулочних виробів та молочних продуктів, наприклад, за технології морозива, сиру. Завдяки значній кількості білка у складі, біомасу використовують як компонент для підвищення харчової цінності продуктів, для створення функціональних продуктів. Наприклад, спіруліна містить антиоксиданти, які впливають на зниження рівня холестерину. Завдяки своїм природним пігментам, таким як фікоціанін, її використовують у якості природного харчового барвника, що дозволяє отримати готовий продукт синього або блакитного кольору. Його використовують з метою забарвлення напоїв, кондитерських виробів, молочних продуктів тощо. Це робить спіруліну привабливою альтернативою синтетичним барвникам, які можуть мати негативні побічні ефекти [11].

Таблиця 1.3.

Жирні кислоти у складі біомаси *Spirulina platensis*

Жирні кислоти	Довжина радикалу вуглецю	Міститься в 1 кг сухої речовини
Пальмітинова	C ₁₆	16–20 г
Пальмітиноолеїнова	C ₁₆	1,5–2,0 г
Лінолева	C ₁₈	12–14 г
Олеїнова	C ₁₈	2–3 г
Гамма-лінолева	C ₁₈	11–14 г
Інші жирні кислоти	—	700–7000 мг
Лауринова	C ₁₂	200 мг
Меристинова	C ₁₄	600 мг
Гектадієнова	C ₁₇	120 мг
Стеаринова	C ₁₈	150 мг
Дельта-ліноленова	C ₁₈	300 мг

Відомі біотехнології одержання нанопродуктів, до яких відносять також продукти харчування та харчові інгредієнти, отримані з мікроводоростей (наприклад наноферменти). Основні етапи виробничого процесу наночастинок включають культивування (виращування клітин), збір (наприклад, шляхом фільтрації, центрифугування), сушіння, екстракцію, подрібнення, упаковку та зберігання [12].

Біомасу синьо-зеленої мікроводорості *Spirulina platensis* використовують як високобілкову та вітамінну добавку до складу раціонів для годівлі сільськогосподарських тварин, птиці та риб. За її згодовування відмічено підвищення резистентності та стійкості організму до стресових факторів, несучість птиці та збільшуються прирости маси тіла.

Наявність у складі біомаси цінних білків, вуглеводів, макро- та мікроелементів, вітамінів сприяє проведенню різних досліджень, спрямованих на пошук шляхів удосконалення технологій культивування, коригування хімічного складу та підвищення біологічної цінності [13].

Пластичність метаболізму синьо-зелених мікроводоростей дозволяє керувати якістю біомаси шляхом зміни умов культивування [14].

Біологічно активні компоненти, що входять до складу біомаси *Spirulina platensis* не лише впливають на стимуляцію імунної системи, а також підвищують здатність організму до синтезу нових клітин крові [15].

Наявність пігментів у складі біомаси синьо-зеленої мікроводорості *Spirulina platensis* дозволяє підвищити інтенсивність забарвлення яєчного жовтка, що дає змогу не використовувати дорогі хімічно синтезовані сполуки

Крім того, дослідженнями вчених доведено, що використання біомаси мікроводорості як кормової добавки у складі кормів для птиці впливає на стимуляцію відтворної здатності та сперматогенез. Найбільш помітний ефект було відмічено за додавання біомаси спіруліни у кількості від 2,0 до 3,0 %.

З екологічної точки зору, спіруліна є цінною та стійкою за зміни умов виращування культурою, яку можливо одержувати за обмежених ресурсів і використовувати для біоремедіації. Вона відіграє важливу роль в екосистемах, забезпечує поживними речовинами різні види водних організмів і бере участь у

циклі Нітрогену. Спіруліна є джерелом есенціальних речовин, саме тому її використовують у сільському господарстві в годівлі тварин, особливо в аквакультурі, як джерело білка для риби та креветок, а також як органічне добриво [16].

Відкриті басейни є найбільш поширеними за промислового культивування завдяки своїй конструкційній простоті та фінансовій доступності. Вони забезпечують можливість культивування за використання природного освітлення та атмосферного вуглекислого газу [16]. До переваг використання такого способу належать: низька собівартість – використання природних факторів (зокрема, сонячного випромінювання) мінімізує операційні витрати, масштабність та екологічність – за рахунок абсорбції CO₂ безпосередньо з повітря, технологічна простота – легкість в експлуатації та догляді мінімізує витрати на технічне обслуговування [17].

Проте існують і недоліки: контамінація – вразливість культури до забруднення сторонніми мікроорганізмами через використання відкритих резервуарів; метеозалежність – коливання температурного режиму, рівня освітлення та погодних умов, що впливає на продуктивність культури; втрата вологи, через інтенсивне випаровування з поверхні води [18].

Етапи біотехнології культивування спіруліни у відкритих басейнах:

1. Перший етап – це підготовка басейнів або ставків для культивування, що передбачає очищення та дезінфікацію перед заповненням водою. Зазвичай використовуються неглибокі кругові або прямокутні басейни, відомі які забезпечують ефективне перемішування культурального середовища.

2. Заповнення водою та додавання поживних речовин, необхідних мікроелементів та макроелементів. Одним з поширених середовищ для вирощування спіруліни є модифіковане середовище Заррука,

3. Після підготовки середовища в басейни вносять стартову культуру спіруліни, концентрація якої зазвичай 10,0-20,0 % від загального об'єму поживного середовища у басейні. Культуру рівномірно розподіляють.

4. Контроль умов культивування. Протягом усього періоду вирощування необхідно постійно контролювати основні параметри середовища: температуру,

pH, інтенсивність світла та концентрацію поживних речовин, а саме: температуру: оптимальна 30,0-37,0 °C (Температура нижче 20 °C або вище 40 °C може негативно впливати на ріст та продуктивність мікроводорості); показник рівня pH середовища 9,0-11,0. Для забезпечення оптимального рівня використовують розчини карбонатів та бікарбонатів. Рівень освітлення – природне сонячне світло є джерелом енергії для забезпечення процесу фотосинтезу.

5. Перемішування культурального середовища забезпечують механічні системи перемішування, такі як лопатеві колеса. Це допомагає підтримувати стабільні умови для росту культури.

6. Збирання біомаси, за рівня концентрації клітин у культуральному середовищі (зазвичай через 5-10 днів після посіву). Для цього використовують фільтри або центрифуги, які дозволяють відокремити біомасу від поживного середовища. Одержану таким чином біомасу промивають чистою водою для видалення залишків поживних речовин.

7. Сушіння для зниження вмісту води та обробка, що відбуваються після збору врожаю. Найбільш поширеними методами сушіння є розпилювальне сушіння, після чого напівфабрикат подрібнюють та пакують для подальшого використання або переробки [19].

Найбільш ефективним способом вирощування спіруліни є використання за культивування неглибоких прямокутних басейнів з системою циркуляції води, де вона переміщується за допомогою лопатевого колеса або іншого механічного пристрою та дозволяє підтримувати оптимальні умови для росту спіруліни.

Технологія культивування спіруліни у закритих фотореакторах є досить поширеною та популярною завдяки можливості забезпечення високого контролю умов вирощування, що дозволяє досягати високої продуктивності та якості біомаси. Завдяки використанню закритих фотореакторів можливо забезпечити ідеальні умови для росту культури, адже це дозволяє контролювати фактори навколишнього середовища, зокрема, температуру, освітлення, pH, концентрацію поживних речовин та процес аерації.

Використання таких систем дає змогу уникнути недоліки, які розповсюджені за використання відкритих систем, наприклад, контамінації мікроорганізмами та вплив несприятливих умов [20].

До фотореакторів закритого типу належать: трубчаті (складаються з системи прозорих труб, через які проходить культуральний розчин), панельні (використовують плоскі прозорі панелі для культурального розчину) та колонні (складаються з вертикальних колон, які забезпечують високу площу освітлення на одиницю об'єму). Вибір типу залежить від умов вирощування, масштабів виробництва та ресурсів, що дозволяє забезпечувати високий рівень контролю умов культивування та досягати максимальної продуктивності та якості готового продукту. Також використання таких реакторів дозволяє ефективніше використовувати вуглекислий газ.

На рисунку 1.1. зображено фото реактори закритого типу.

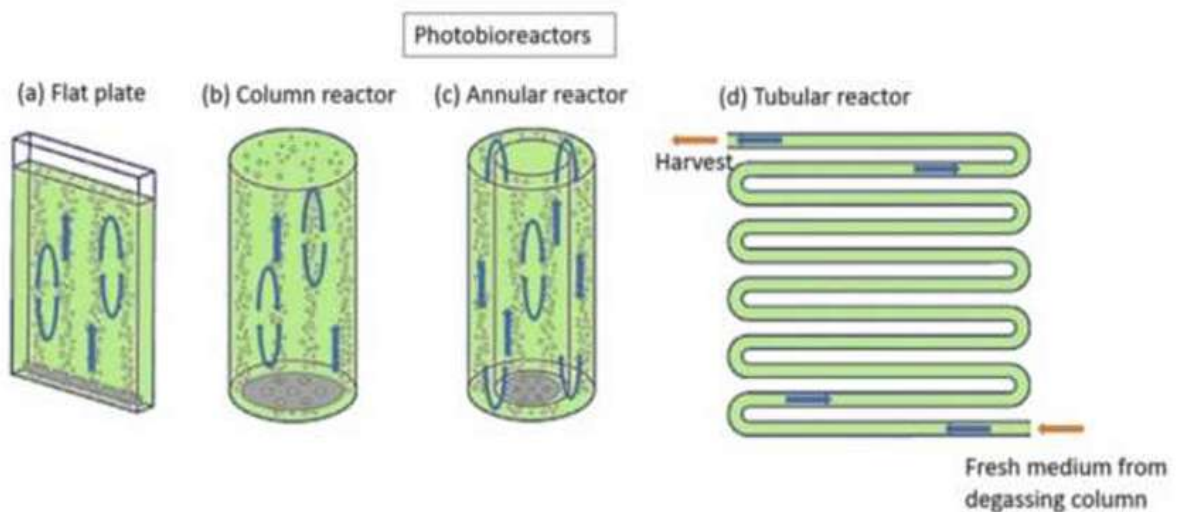


Рис. 1.1. - Види закритих фотореакторів для культивування *Spirulina platensis*

Використання CO₂ з промислових відходів, наприклад, відпрацьовані гази від теплових електростанцій, є одним із способів зменшення викидів у навколишнє середовище та сприяє розвитку сталого виробництва. На рисунку 1.2. схематично зображено біотехнологію культивування мікроводоростей.

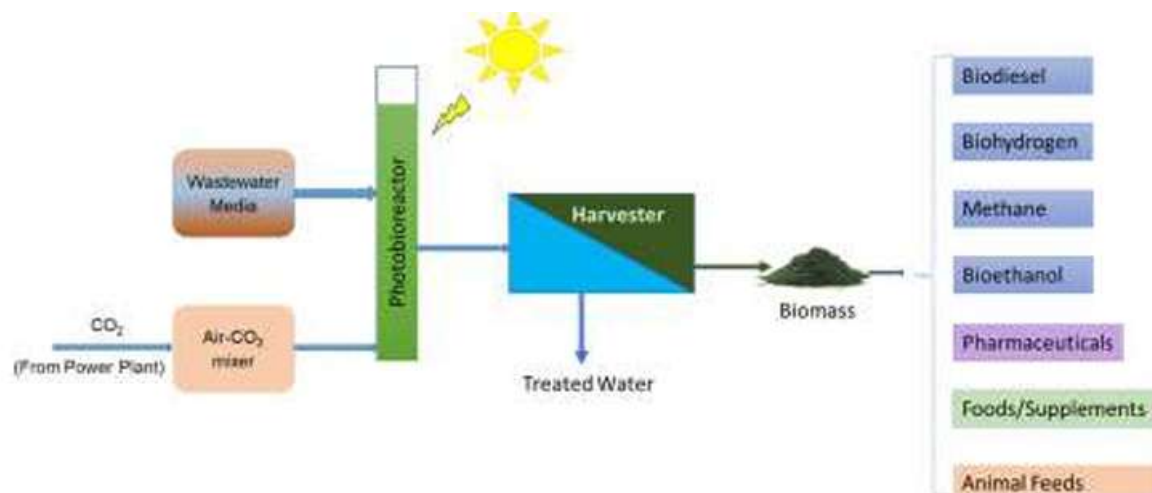


Рис. 1.2. – Схема біотехнології культивування мікроводоростей

Біотехнологія культивування спіруліни у закритих фотореакторах складається із таких етапів:

1. Підготовка фотобіореактора – дезінфекція та заповнення поживним середовищем, до складу якого входять всі есенціальні речовини для оптимального росту мікроводорості.
2. Посів спіруліни – до поживного середовища додають стартову культуру у кількості 10,0-20,0 % від загального об'єму.
3. Власне процес культивування – здійснюють до одержання відповідної концентрації культури у поживному середовищі.
4. Збирання врожаю та промивання біомаси. Використовуються центрифуги або фільтри для відокремлення біомаси від поживного середовища.
5. Сушіння, обробка та розфасовування під час якого концентровану біомасу подрібнюють та пакують [21].

РОЗДІЛ 2. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИКА ВИКОНАННЯ РОБОТИ

Виконання поставленої мети досягнуто шляхом проведено аналізу вітчизняної та зарубіжної наукової літератури, щодо дослідження способів культивування мікроводоростей, одержання їх біомаси та використання. Оброблення зібраної інформації забезпечено за використання методів для якісного та кількісного аналізу а також систематизовано. Ефективність підходів щодо виробництва біомаси спіруліни оцінювали шляхом порівняння класичних та сучасних методів за такими показниками: тривалість процесу культивування, основні технологічні параметри за вирощування та способи контролю [23].

За результатами аналізу літературних даних було обрано найбільш продуктивну та поширену культуру – синьо-зелену мікроводорість *Spirulina platensis* та поживне середовище для культивування Заррука, досліджено вплив його компонентів на ріст та розвиток клітин культури, визначено основні параметри під час культивування спіруліни та підібрано фотореактори.

Об'єкт досліджень – культура *Spirulina platensis*.

Для культивування культури використовують склянні фотобіореактори. Інтенсивність освітлення в яких необхідно забезпечувати на рівні 2000–3000 люкс. Для перемішування та забезпечення аерації поживного середовища з клітинами використовують спеціальні компресори з барботажними наконечниками. Температура поживних середовищ повинна бути на рівні 24,0–25,0 °C впродовж усього періоду нарощування біомаси.

За технології виробництва сухої біомаси спіруліни спочатку одержують культуральну рідину (суміш поживного середовища з клітинами мікроводорості, певної оптичної густини), суспензію (відфільтровані клітини спіруліни).

Вивчення технологічних параметрів під час культивування *Spirulina platensis* проводять шляхом визначення оптимальних показників інтенсивності освітлення та температурного режиму для культури.

Готовий продукт – суха біомаса синьо-зеленої мікроводорості *Spirulina platensis*.

Під час культивування клітин спіруліни найбільш поширеним є поживне середовище Заррука, склад якого наведено у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1.

Склад поживного середовища Заррука для культивування *Spirulina platensis*

Назва компонента	Хімічна формула	Кількість речовини (г/л)	Функція у середовищі
Натрій гідрокарбонат	NaHCO ₃	16.8	Джерело Карбону та підтримання лужного рН
Натрій нітрат	NaNO ₃	2.5	Джерело Нітрогену для синтезу білків
Калій гідрофосфат	K ₂ HPO ₄	1.0	Джерело Фосфору та Калію
Калій сульфат	K ₂ SO ₄	1.0	Джерело Калію та Сірки
Натрій хлорид	NaCl	1.0	Забезпечення осмотичного тиску
Магній сульфат гептагідрат	MgSO ₄ · 7H ₂ O	0.2	Джерело Магнію для синтезу хлорофілу
Кальцій хлорид	CaCl ₂	0.04	Джерело Кальцію для життєдіяльності клітин
Заліза сульфат гептагідрат	FeSO ₄ · 7H ₂ O	0.01	Джерело Феруму для фотосинтезу
ЕДТА динатрієва сіль	EDTA-Na ₂	0.08	Хелатор для утримання металів
Розчин мікроелементів	—	1.0 мл/л	Постачання металів

Поживне середовище Заррука готують відповідно до рекомендацій щодо приготування: рекомендовано готувати за використання готових розчинів, які повинні бути стерильними, змішувати їх необхідно в стерильних умовах у ламінарі. Розчини 1 і 2 повинні бути простерилізовані автоклавуванням, мікроелементи та розчин Fe+EDTA стерелізують шляхом фільтрації через спеціальний фільтр з діаметром пор 0,22 мкм.

На 1,0 л поживного середовища необхідно приготувати наступні розчини: № 1 – об'єм 200 мл, № 2 – об'єм 800 мл, Fe+EDTA – 1,0 мл, Розчини мікроелементів № 1 – 1,0 мл та № 2 – 1,0 мл. Розчин 1 готують з розрахунку визначеної кількості г на 200 мл води: NaHCO₃ – 16, 8 та

$\text{K}_2\text{HPO}_4 \times 3\text{H}_2\text{O}$ - 1,0. Розчин 2 готують із розрахунку необхідної кількості г на 800 мл води: NaNO_3 - 2,5 ; K_2SO_4 - 1,0; NaCl - 1,0; $\text{MgSO}_4 \times 7\text{H}_2\text{O}$ - 0,2; $\text{CaCl}_2 \times 2\text{H}_2\text{O}$ - 0,04.

Приготування спеціального розчину FeSO_4 та EDTA: у 134 мл децинормального розчину KOH необхідно розчинити 30,2 г EDTA. Розчин необхідно розбавити водою та додати 24,9 г $\text{FeSO}_4 \times 7\text{H}_2\text{O}$ та долити води до 1,0 літра. Приготований таким чином розчин необхідно аерувати повітрям без CO_2 у темряві протягом 12 годин. Щоб видалити CO_2 , повітря має проходити через розчин KOH .

РОЗДІЛ 3. ВЛАСНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

3.1. Розрахунок кількості стадій підготовки посівного матеріалу та поживного середовища за біотехнології культивування *Spirulina platensis*

Виробництво спіруліни вимагає ретельної підготовки посівного матеріалу та поживного середовища. Цей процес включає кілька стадій підготовки, кожна з яких має певні параметри та вимоги щодо проведення. Підготовка посівного матеріалу включає такі етапи: підтримання колекційної культури, одержання робочої культури, вирощування культури в колбах та вирощування в інокуляторах.

Етап підготовки поживного середовища. Метаболізм мікроводорості може бути у вигляді трьох різних типів живлення: автотрофний, гетеротрофний та міксотрофний. За умов високої інтенсивності освітлення та дотримання оптимальних температурних режимів зазвичай переважає автотрофний тип, коли фотосинтетичні процеси відбуваються із залученням мінеральних компонентів та розчиненого вуглекислого газу (CO_2), які клітини поглинають із рідкого середовища [22].

За гетеротрофного типу живлення енергетичні потреби забезпечують завдяки окисненню та засвоєнню вуглеводів й інших органічних речовин, цей механізм активізується у темний період. Міксотрофний тип живлення є комбінованим, тобто поєднує ознаки гетеротрофного і автотрофного метаболізму. Промислова біотехнологія передбачає зазвичай використання автотрофного типу живлення, тобто культура забезпечується поживними речовинами для синтезу власних шляхом застосування спеціально приготованого мінерального середовища. Якщо до складу живильного середовища додають промислові відходи, наприклад, спиртового, цукрового молокопереробного та інших виробництв, культивування відбувається за гетеротрофного живлення. Як джерело Карбону будуть використовуватися органічні сполуки – органічні речовини та кислоти. Гетеротрофне живлення відбувається також за умови зміни періодів освітлення та темряви [23].

За біотехнології культивування мікроводоростей, які культивують в умовах повного забезпечення поживними речовинами, співвідношення трьох

основних біогенних елементів C:N:P повинно відповідати співвідношенню 106:16:1, яке називають закономірністю Редфілда.

Потреба спіруліни у мінеральних речовинах задовольняється за рахунок солей макро- та мікроелементів, що входять до складу поживного середовища. Для вирощування спіруліни у штучних умовах зазвичай використовують стандартного складу середовища: Тамія, Заррука або Громова [24].

3.2. Розрахунок кількості виробничих циклів для отримання біомаси та об'єму ферментера

Заплановано виробництво біомаси спіруліни 9 тон у рік. З метою розрахунку потужностей біотехнологічного виробництва біомаси спіруліни необхідно врахувати кілька ключових параметрів: об'єм фотореактора, продуктивність мікрооводоростей, час культивування, витрати, пов'язані з виготовленням поживного середовища, а також на обладнання для очищення та відділення біомаси.

Перший етап – це проведення розрахунку кількості виробничих циклів та об'єму фотореактора. Якщо кількість робочих днів у рік 330, то 1 цикл – 7 днів, отже, можемо розрахувати загальну кількість виробничих циклів за рік:

$$N_{\text{ц}} = 330/7 = 47 \text{ циклів};$$

Далі можливо дізнатися кількість культуральної рідини, що одержуємо за один цикл:

$$9000/47 = 191,5 \text{ кг/цикл};$$

Урожайність спіруліни становить до 20,0 г сухої біомаси з 1,0 м² за день.

Площа для виробництва у відкритих ставках становитиме:

$$191500/20,0 * 1,0 = 9275,1 \text{ м}^2;$$

Продуктивність закритих фотореакторів в 10 разів вище, ніж в басейнах, тому об'єм фотореактора для отримання препарату за один цикл становитиме – 927,51 л.

Кількість культуральної рідини за використання коефіцієнту заповнення 0,8 становитиме:

$$V_{\Gamma} = V_{\text{крц}}/K_{\text{зап}} = 927,51 \text{ л}/0,80 \approx 1158,75 \text{ л} = 1,20 \text{ м}^3$$

Отже, для запланованого виробництва необхідно фотореактор ємністю 1200 л, або декілька, пороте, меншої ємності. Наприклад: 2 фотореактори, ємністю кожний 600 л.

Завдяки проведеним розрахункам можливо планувати необхідні ресурси для забезпечення бажаного рівня продуктивності, а також оцінити економічну ефективність виробництва за умови використання біореакторів об'ємом 1200 л.

3.3. Апаратурно-технологічна схема біотехнології культивування *Spirulina platensis*

Сучасне промислове культивування фотоавтотрофних мікродоростей, зокрема ціанобактерії *Spirulina platensis*, є складною багатоетапною біотехнологічною системою. Ефективність функціонування апаратурно-технологічної схеми виробництва безпосередньо залежить від точного її оформлення, яке має забезпечувати підтримання специфічних фізико-хімічних та біологічних параметрів на кожній стадії біотехнологічного процесу.

Проектування даної схеми базується на забезпеченні замкненого, стерильного та безперервного циклу вирощування біомаси. Весь біотехнологічний процес виробництва біомаси спіруліни складається із допоміжних (підготовчих) робіт, власне процесу культивування, пакування, маркування й реалізації готового продукту та знешкодження відходів. Допоміжні роботи – це початковий етап, до складу якого входять усі підготовчі операції, необхідні для нормального функціонування технологічних процесів та виключення ризиків, пов'язаних з виробництвом. До допоміжних робіт належить:

1. Санітарна підготовка виробництва (підготовка персоналу, а саме: інструктаж, медичний огляд та підготовка робочого одягу; підготовка дезінфікуючих та мийних засобів: мийних засобів, дезінфікуючих засобів для працівників, а також призначених для обладнання; підготовка біореактора (огляд, миття та ополіскування апарату, перевірка на герметичність, стерилізація); підготовка приміщень (щоденне прибирання).

2. Підготовка та стерилізація аераційного повітря, що включає наступні етапи: забір атмосферного повітря, очищення повітря від пилу та механічних частинок, стиснення повітря, охолодження повітря та видалення вологи, нагрівання повітря та очищення за допомогою фільтрів).
3. Підготовка титрувальних розчинів для поживного середовища (приготування 6,0 % розчину HCl, приготування і стерилізація розчину титрувального агента (6,0 % розчин NaOH).
4. Приготування та стерилізація поживних середовищ, а саме: приготування та стерилізація середовища для вирощування інокуляту в колбах. Для вирощування інокуляту необхідно приготувати 1000 мл поживного середовища, приготування і стерилізація розчину № 1 та приготування і стерилізація розчину № 2, приготування поживного середовища для вирощування посівного матеріалу в інокуляторі об'ємом 10,0 л). Під час виконання даного етапу для отримання посівного матеріалу готують 10,0 л поживного середовища. Оскільки для цього необхідно внести 1,0 л рідкої культури, розрахункова кількість води для розчину становить 9,0 л. При цьому враховують 10,0 % конденсату, що утворюється під час процесу стерилізації в апараті.
5. Підготовка посівного матеріалу (підтримання колекційної культури, одержання робочої культури, робочу культуру продуцента отримують шляхом посіву колекційної культури на чашки Петрі із середовищем в асептичних умовах. культуру на чашці Петрі вирощують при температурі 28,0 °C протягом 4 діб, вирощування посівного матеріалу в колбах, культивування здійснюється у колбах з постійним перемішуванням (інтенсивність 220 об/хв) при 28,0 °C упродовж 48 год. Під час культивування контролюють температуру, по завершенню процесу відбирають пробу для мікробіологічного контролю та визначення концентрації біомаси).

Важливими також є завершальні етапи знешкодження відходів та утилізація відходів виробництва. Знешкодження рідких відходів (наприклад, залишків титрування) та промивних вод, які утилізують на очисних спорудах.

Знешкодження твердих відходів відбувається після фільтрації, а культуральне середовище, що залишилося, відправляють на утилізацію. Відпрацьоване повітря з інокуляторів, біореакторів, випарників фільтрату та розпилювальних сушарок спрямовують до установки для очищення відпрацьованого повітря.

Весь технологічний цикл одержання готового продукту умовно можливо розділити на чотири основні блоки, для кожного з яких необхідно використовувати відповідне обладнання:

1. Етап підготовки та стерилізації включає системи водопідготовки, приготування концентрованих розчинів мінеральних солей (середовище Заррука або його модифікації), а також системи стерилізації поживного середовища та технологічного аераційного повітря.
2. Етап культивування – охоплює етапи послідовного збільшення інокуляту від лабораторних умов до промислових біореакторів (фотобіореакторів закритого типу). За допомогою засобів автоматизації безперервно контролюють температуру (30,0-35,0 °C), рівень рН (8,5-11,0), інтенсивність освітлення та надходження CO₂.
3. Етап відділення та первинної переробки – базується на процесах сепарації суспензії, концентрування біомаси за допомогою вібросит або центрифуг, промивання осаду підготовленою водою для видалення залишків солей середовища та подальшого зневоднення.
4. Етап обробки та пакування включає процес висушування біомаси (найчастіше розпилювальне або сублімаційне) за помірних температурних режимів для збереження білків, фікоціаніну та вітамінів, а також подрібнення, стандартизацію, фасування та вакуумне пакування готового порошку.

Апаратурно-технологічну схему біотехнології виробництва біомаси *Spirulina* необхідно розробляти з урахуванням вимог міжнародних стандартів щодо забезпечення якості, що гарантує високу продуктивність штаму-продуцента, екологічну безпеку виробництва та отримання кінцевого продукту високої якості для потреб нутрицевтичної та фармацевтичної індустрії.

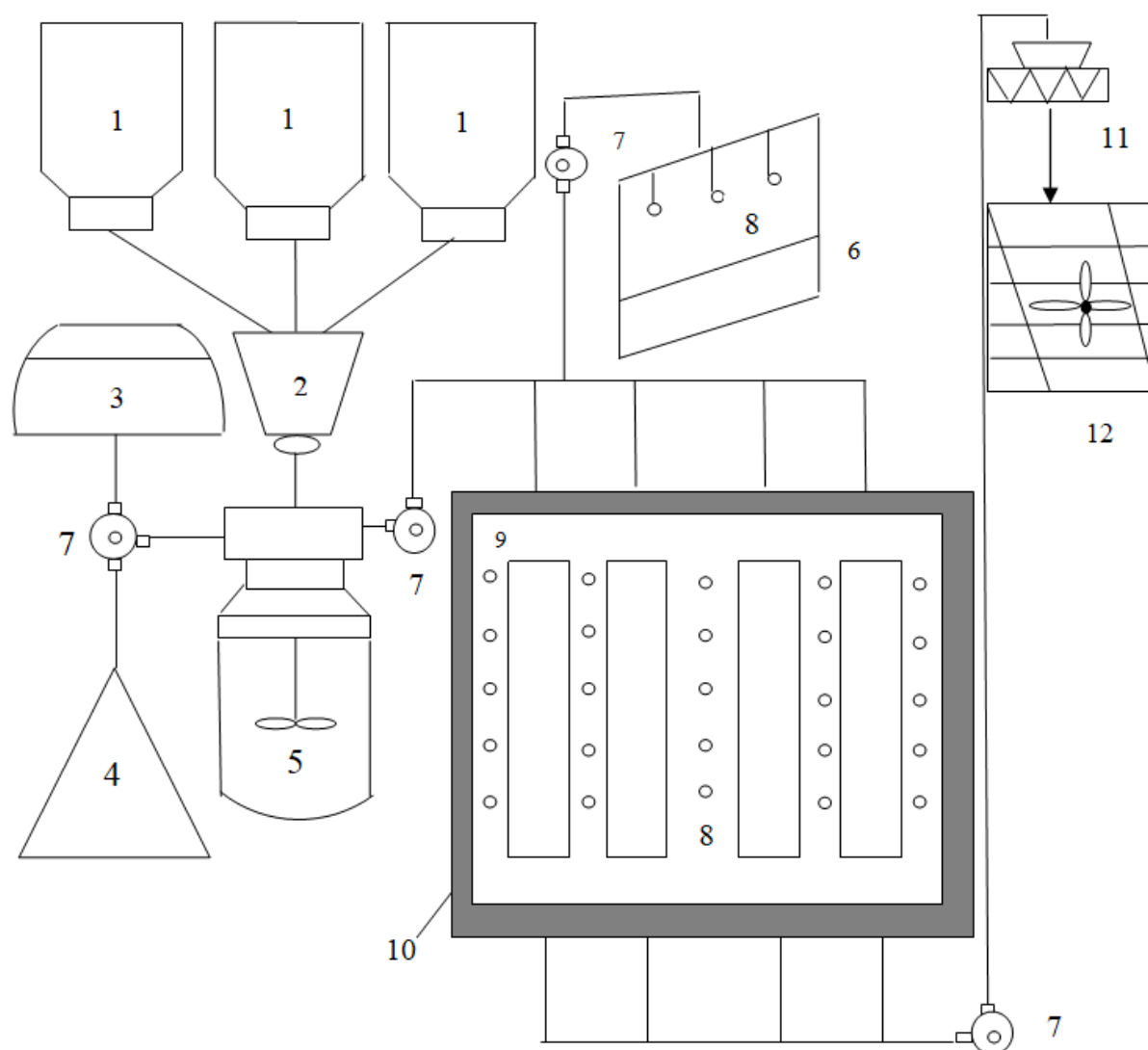


Рис. 3.1. Апаратурно-технологічна схема культивування *Spirulina platensis*

1 – ємність для солей; 2 – ваговий дозатор для солей; 3 – ємність для води; 4 – ємність для додаткових інгредієнтів; 5 – реактор для поживного середовища; 6 – фотобіореактор з маточною культурою; 7 – помпи; 8 – фотобіореактор для культивування *Spirulina platensis*; 9 – джерело світла; 10 – термоізоляційний пристрій; 11 – блок для фільтрування *Spirulina platensis*; 12 – пристрій для висушування.

Відповідно до технології, поживне середовище виготовляють з використанням солей макро- і мікроелементів, а також підготовлену воду. Солі мікроелементів із ємностей (1) за допомогою вагового дозатора (2) відважуювajúть та переміщують у реактор (5) для виготовлення поживного середовища. У реакторі розчин постійно перемішується.

До реактору за допомогою помпи (7) вносять додатково воду із ємності (3). Об'єм завантаження реактора має становити не більше ніж на 80,0 %.

Готове поживне середовище перевіряють на випадання осаду і помпою (7) перекачують до фотобіореактора (8). Після підігрівання поживного середовища до температури 27,0–29,0 °C до складу додають маточну культуру *Spirulina platensis*. Заселення відбувається за допомогою помпи (7) із фотореактора для маточної культури (6). Інтенсивність освітлення у фотобіореакторах регулюють за допомогою ламп (9).

По завершенню процесу нарощування біомаси *Spirulina platensis* поживне середовище із культурою за допомогою помпи (7) перекачують до фільтрувального пристрою (11). За використання пристрою для фільтрування біомасу відділяють від поживного середовища. Далі суспензію біомаси висушують за допомогою сушильного обладнання (12). Висушену до вологості 8,0–10,0 % біомасу *Spirulina platensis* пакують у паперові мішки із поліетиленовою вкладкою.

3.4. Контроль якості готового продукту

Контроль якості на стадії біосинтезу є важливим для забезпечення стабільності та ефективності виробничого процесу. Використовують такі методи контролю: мікробіологічний та технохімічний. Контроль мікробіологічної чистоти простерилізованого поживного середовища полягає в забезпеченні відсутності контамінації після стерилізації. Для цього проби поживного середовища відбирають після стерилізації, інокують на у рідке середовище, інкубують за температури 28,0–30,0 °C протягом 24–48 годин [25]. Наявність росту мікроорганізмів оцінюють після завершення інкубаційного періоду: поява колоній є прямим свідченням контамінації. Критичними контрольними точками для поживного середовища є етапи безпосередньо після його стерилізації та перед інокуляцією. Водночас для забезпечення мікробіологічної чистоти технологічного повітря, що надходить у ферментатори, здійснюють систематичний моніторинг. Зразки повітря відбирають за допомогою спеціалізованих аеросамплерів одразу після його очищення та висівають на агарові пластини. Культивування проводять за

температури 28–30 °C упродовж 24–48 годин, після чого візуально перевіряють посіви на наявність сторонньої мікрофлори. Головними контрольними точками для цього етапу визначено моменти після стерилізації повітря та безпосередньо перед його подачею в біореактор. Мікробіологічний моніторинг базується на регулярному відборі зразків інокуляту та культурального середовища на різних етапах біосинтезу [26]. Отримані проби висівають на диференційно-діагностичні живильні середовища для аналізу морфології клітин (зокрема, їхньої форми), перевірки чистоти культури та оцінки її фізіологічного стану. Критичні точки контролю зазвичай – ключові переходи між стадіями культивування. Паралельно здійснюється технохімічний контроль: аналіз компонентного складу поживного середовища та динаміки нарощування біомаси, що дозволяє оперативно корегувати параметри процесу для забезпечення максимального виходу рибофлавіну [27]. Аналітичний контроль поживного середовища здійснюють до та після стерилізації: методи високоефективної рідинної хроматографії та спектрофотометрії дозволяють точно визначити концентрацію ключових компонентів. Систематичний моніторинг складу поживного середовища впродовж усього біосинтезу гарантує стабільність процесу. Ключовими контрольними точками є початковий етап, безпосередньо фаза ферментації, а також етап перед збором біомаси.

Контроль фізико-хімічних показників:

- Температурний режим: безперервно відстежується за допомогою термометрів та термопар; для забезпечення оптимальної швидкості росту температуру підтримують у межах 30–35 °C.

- Водневий показник (pH): вимірюється стаціонарними pH-метрами. Оптимальний діапазон для культивування спіруліни становить 8,5–11. Корекцію та стабілізацію pH здійснюють за допомогою буферних систем або дозованого введення лужних агентів.

- Інтенсивність освітлення контролюють за допомогою люксометрів. Оптимальну інтенсивність світла забезпечують за рахунок використання світлодіодних ламп або інших джерел освітлення.

- Вміст вуглекислого газу в середовищі контролюють за допомогою газових аналізаторів. У промислових умовах додають CO₂ до середовища з метою стимулювання росту [28].

- З метою визначення показника оптичної густини використовують спектрофотометр за довжини хвилі 680-750 нм. Це дозволяє оцінити концентрацію клітин у суспензії.

- Кількість сухої біомаси. Для визначення кількості біомаси здійснюють центрифугування зразка, висушують отриманий осад і зважують його на аналітичних вагах.

- Кількісний підрахунок клітин здійснюють шляхом мікроскопіювання та лічильника клітин. Використання спеціальних методик дозволяє забезпечити оптимальні умови за культивування спіруліни, підвищити ефективність процесу біосинтезу та забезпечити стабільну якість готової біомаси. Комплексний підхід до системи контролю та моніторингу включає використання традиційних методів та сучасних технологій, що дозволяє максимально автоматизувати та оптимізувати процес [29].

Оцінювання якості готової продукції — це критично важливий етап, який гарантує її відповідність стандартам безпеки та високої якості. Комплексна система контролю охоплює вхідний моніторинг сировинної бази, суворе відстеження параметрів культивування, а також фінальне тестування цільового продукту. Кінцевий аналіз передбачає перевірку на мікробіологічну чистоту, автентичність та відсутність токсичних чи сторонніх домішок [30].

До основних етапів цього процесу належать:

1. Контроль сировини на початкових етапах культивування, при цьому важливо перевіряти якість сировини, зокрема води та макро- та мікроелементів, які використовують для культивування спіруліни. Вода повинна бути чистою, без важких металів та шкідливих домішок. Використання чистих та безпечних хімічних сполук дозволяє забезпечити оптимальні умови для росту та розвитку культури.

2. Моніторинг параметрів культивування. У процесі біосинтезу біомаси спіруліни принципово важливим є безперервне відстеження базових

факторів середовища: температурного режиму, водневого показника (pH), рівня інсоляції (освітлення) та залишкової концентрації нутрієнтів. Інтеграція автоматизованих систем керування процесом дає змогу підтримувати гомеостаз системи на оптимальному рівні, мінімізуючи ризики розвитку сторонньої мікрофлори чи випадкової контамінації.

3. Вихідний контроль готової продукції. Очищена та висушена біомаса спіруліни підлягає обов'язковому комплексному лабораторному аналізу для підтвердження її відповідності стандартам якості. Програма вихідного тестування охоплює такі критерії:

- Чистота: визначення залишків важких металів (кадмію, ртуті, свинцю та арсену). Застосування високочутливих методів спектрофотометрії дає змогу детектувати ці елементи навіть у ультрамікроконцентраціях.
- Мікробіологічна та біологічна безпека: перевірка наявності патогенних мікроорганізмів (зокрема *Salmonella spp.* та бактерій групи кишкової палички), а також контроль відсутності небезпечних ціанотоксинів — мікроцистинів.
- Хімічний склад: кількісне визначення протеїнів, вітамінно-мінеральних комплексів та антиоксидантів для верифікації біологічної цінності продукту.
- Органолептичні показники: експертна оцінка забарвлення, текстури, специфічного смаку та запаху кінцевого продукту.

4. Сертифікація та супровідна документація. Для підтвердження прозорості бізнес-процесів і дотримання технологічної дисципліни підприємства інтегрують міжнародні стандарти керування (наприклад, ISO 9001:2015). Отримання такого сертифіката вимагає регулярного незалежного аудиту та перевірки умов виробництва. Комплексний контроль є стрижнем усього циклу отримання спіруліни, оскільки саме він гарантує безпечність кінцевої форми. Ретельний нагляд на кожному етапі – від вхідної сировини до відвантаження споживачу – забезпечує високу якість продукту, відкриваючи доступ до ринку харчової, медичної та косметичної промисловості [31].

РОЗДІЛ 4. ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ

Показник економічної ефективності залежить від співвідношення одержаного прибутку до витрат на реалізацію запланованого виробництва. На прибутковість впливають показники собівартості продукції, яка формує комплексний рівень використання всіх існуючих ресурсів, запровадження та рівень технічного забезпечення, рівень підготовки працівників тощо. Саме тому вона відображає рівень загальних витрат на виробництво продукції.

Розраховано вартість компонентів для приготування поживного середовища Заррука для культивування *Spirulina platensis*, одержані результати наведено у таблиці 4.1.

Таблиця 4.1.

Вартість компонентів поживного середовища Заррука для культивування

Компоненти	Кількість компонента у поживному середовищі, г/л	Вартість компонента, грн./кг	Вартість компонента із розрахунку на 1 л поживного середовища, грн.
NaHCO ₃	16,8	480,0	8,064
K ₂ HPO ₄ ×3H ₂ O	1,0	160,0	6,25
NaNO ₃	2,5	150,0	16,6
K ₂ SO ₄	1,0	860,0	1,16
NaCl	1,0	130,0	7,69
MgSO ₄ ×7H ₂ O	0,2	180,0	1,11
CaCl ₂ ×2H ₂ O	0,04	60,0	0,66
Fe+EDTA	1,0	198,0	5,05
Розчин мікроелементів № 1 (1,0 мл):			1,60
Розчин мікроелементів № 2 (1,0 мл):			1,80
Всього			49,98

Отже, за результатами проведених розрахунків встановлено, що вартість приготування 1 л поживного середовища становить 49,98 грн. Враховуючи, що

для запланованого виробництва біомаси спіруліни необхідно приготувати 1200 л поживного середовища, його вартість становитиме 59, 980 тис. грн.

У таблиці 4.2. наведено основні витрати під час виробництва біомаси спіруліни та розраховано собівартість готового продукту.

Таблиця 4.2.

Витрати на виробництво сухої біомаси *Spirulina platensis*

Стаття витрат	Вартість, тис. грн.
Вартість поживного середовища Заррука	59,980
Амортизація основних засобів	80,0
Електроенергія та вода	25,94
Оплата праці	90,0
Фізико-хімічні та мікробіологічні дослідження якості поживного середовища, біомаси	15,0
Пакувальні матеріали	24,45
Витрати на реалізацію	40,0
Інші витрати	20,0
Витрати всього	355,37
Собівартість 1 кг готового продукту, грн.	39,48

Отже, собівартість виробництва 1 кг сухої біомаси спіруліни становить 39,48 грн.

Розраховували собівартість одержаної продукції враховуючи показники загальних витрат на підприємстві: вирощування маточної культури, витрати на амортизацію основних засобів, кількості витрачених хімічних сполук для приготування поживного середовища для культивування, витрат на електроенергію та водопостачання, оплату праці 4 робітникам (гідробіолог, технолог, охоронець, вантажник), проведення досліджень в умовах лабораторії). Враховуючи одержані дані та результати розрахунків, встановлено, що прибуток від реалізації продукції, а саме сухої біомаси *Spirulina platensis* може складати 509,062 тис.грн.

Вартість виробництва 1,0 кг сухої спіруліни становить 411,0 грн.
Показник рентабельності за запланованої технології культивування спіруліни – 43,70 %.

ВИСНОВКИ

1. Здійснено вибір біологічного агента, описано будову, особливості синьо-зеленої мікроводорості *Spirulina platensis*, хімічний склад біомаси та біологічну цінність.
2. Проаналізовано біотехнологію культивування *Spirulina platensis*, основні параметри під час вирощування та перспективи використання біомаси.
3. Встановлено, що прибуток від реалізації продукції, а саме сухої біомаси *Spirulina platensis* може складати 509,062 тис.грн.
4. Собівартість виробництва 1,0 кг сухої спіруліни становить 39,48 грн. Показник рентабельності за запланованої технології культивування спіруліни – 43,70 %.
5. Наведено апаратно-технологічну схему біотехнології культивування *Spirulina platensis*, також описано способи контролю етапів виробництва, якості поживного середовища та готового продукту – сухої біомаси.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Somchit M.N., Mohamed N.A., Ahmad Z., Zakaria Z.A., Shamsuddin L. et al. Anti-inflammatory and anti-pyretic properties of *Spirulina platensis* and *Spirulina lonar*: a comparative study. *Pakistan journal of pharmaceutical sciences*. 2014. 27(5). P. 1277-1280.
2. Turpin P.J.F. *Spirulina oscillarioide* [*Spirulina oscillation*]. In F.G. Levrault (Ed.) *Dictionnaire des Sciences Naturelles*. Vol. 50. P. 309-310. Paris: Le Normant. DOI:10.5962/bhl.title.30799.
3. Ayala F. Guía sobre el cultivo de Spirulina. *Bioteología de Microorganismos Fotoautótrofos*. Motril, Granada, España. 1998. P. 3-20.
4. Wu Q., Liu L., Miron A., Klímova B., Wan D. & Kuča K. The antioxidant, immunomodulatory, and anti-inflammatory activities of Spirulina: an overview. *Archives of toxicology*. 2016. 90(8). P. 1817–1840. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00204-016-1744-5>.
5. Hoseini S.M., Khosravi-Darani K., Mozafari M.R. Nutritional and medical applications of spirulina microalgae. *Mini Rev Med Chem*. 2013. 13(8). P. 1231-1237.
6. Chen W., Xu J., Yu Q., Yuan Z., Kong X., Sun Y. et al. Structural insights reveal the effective *Spirulina platensis* cell wall dissociation methods for multi-output recovery. *Bioresource technology*. 2020. Vol. 300. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122628>
7. Genene T., Hailu D., Tsegaye Z. Importance of *Arthrospira* [*Spirulina*] in Sustainable Development. 2016. 60-68.
8. Lafarga T., Fernández-Sevilla J.M., González-López C., Acien Fernández, F.G. *Spirulina* for the food and functional food industries. *Food research international (Ottawa, Ont.)* 2020. № 137. P. 109356. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109356>
9. Котинський А. В., Салюк А. І., Нікулін О. Ф. Культивування мікроводоростей роду *Spirulina*. Харчова промисловість. 2000. 45. С. 34–43.
10. Котинський А. В., Салюк А. І., Нікулін О. Ф. Площинний аерліфтний фотобіореактор закритого типу для культивування фототрофної мікроводорості *Spirulina platensis* // Харчова промисловість. 2000. 46. С. 67–79.

11. Irene Nuin Garciarena , Reinhard Ackerl, Esther García Ruiz, Maria Glymenaki, Vânia Mendes, Alejandra Muñoz-González et al. The safety assessment of microalgae-derived products as novel foods by the European Food Safety Authority. *Future Foods*. Vol. 11. 2025. <https://doi.org/10.1016/j.fufo.2025.100661>

12. Abd El-Baky H. Over production of phycocyanin pigment in blue-green algae *Spirulina* sp. and its inhibitory effect on growth of Ehrlich ascites carcinoma cells. *J. Med. Sci.* 2003. 4, N 3. P. 314–324.

13. Ayala A., Manetti G., Burgos R., Ayala F. Industrial and semi industrial production of *Spirulina*, third world potential (modular systems) In Charpy et al. (ed.) International Symposium on Cyanobacteria for Health. *Science and Development*. 2006. P. 77-81.

14. Belay A. The potential application of *Spirulina* (*Arthrospira*) as a nutritional and therapeutic supplement in health management. *J. Amer. Nutr. Assoc.* 2002. 5, N 2. P. 27–48.

15. Bradford M.A. Rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. *Anal. Biochem.* 1976. 72. № 1. P. 248–254.

16. Campanella L., Crescentini G, Avino P. Chemical composition and nutritional evaluation of some natural and commercial food products based on *Spirulina* II *Analysis*. 1999. 27, N 6. P. 533–540.

17. Chaiklahan R., Khonsara N., Chirasuwan N. Response of *Spirulina platensis* C1 to temperature and high light intensity. *Kasetsart J. (Nat. Sci.)*. 2007. 41. № 1. P. 123–129.

18. Ciferri O. *Spirulina*, the edible Microorganism. *Microbiol. Rev.* 1983. Vol. 47. N 4. P. 551–578.

19. Dumartrait E., Moyse A. Caractéristiques biologues des Spirulines II *Ann. nutr. et alim.* 1975. 29, N 6. P. 489–496.

20. Jung J.-Y., Yang J.-W., Kim K., Hwang K.-T., Jung S. M., Kwon J. H. Cost-efficient cultivation of *Spirulina platensis* by chemical absorption of CO₂ into

medium containing NaOH. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 2015, vol. 32, P. 2285–2289.

21. Pumas P., Pumas C. Cultivation of *Arthrospira (Spirulina) platensis* using low cost medium supplemented with lac wastewater. *Chiang Mai Journal of Science*. 2016. Vol. 43. № 5. P. 1037–1047.

22. Rowan K.S. Photosynthetic pigments of algae / *Cambridge: Cambridge Univ. Press*. 1989. 334 p.

23. Henrikson R. Earth food spirulina. *Californi Ronore Enterprises. Inc.* 1989. P. 25–42.

24. Sarada R., Pillai M.G., Ravishankar G.A. Phycocyanin from *Spirulina* spp.: influence of processing of biomass on phycocyanin yield, analysis of efficacy of extraction methods and stability studies on phycocyanin. *Process Biochem.* 1999. Vol. 34. P. 795–801.

25. Sasaki K., Marquez F., Nishio N., Nagai S. Promotive Effect of 5-aminolevulinic acid on the growth and photosynthesis of *Spirulina platensis*. *J. Ferment. Bioeng.* 1995. Vol. 79. № 5. P. 453–457.

26. Vonshak A. *Spirulina platensis (Arthrospira): Physiology, Cell-biology and Biotechnology*. London: *Taylor & Francis*. 1997. P. 643-652.

27. Iravani, S., Khatami, M., & Varma, R. S. New nutrients evaluation in *Spirulina maxima* growth for phycocyanin, carbohydrate, and biochar production. *Journal of Biomass and Bioenergy*. 2020. Vol. 146. 105795. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105795>

28. Bumandalai O., Bayliss K., Moheimani N. Innovative processes for combating contaminants in fresh *Spirulina*. *Algal Research*. 2024. Vol. 78. 103397. DOI: [10.1016/j.algal.2024.103397](https://doi.org/10.1016/j.algal.2024.103397).

29. Benedetti, S., Benvenuti, F., & Pagliarani, S. (2018). Nutritional quality and safety of the *Spirulina* dietary supplements. *Food Supplements*. Vol. 7(5). P. 61. DOI: <https://doi.org/10.3390/fds7050061>

30. Papapostolou H., Kachrimanidou V., Alexandri M., Plessas S., Papadaki A., Kopsahelis N. Natural Carotenoids: Recent Advances on Separation from

Microbial Biomass and Methods of Analysis. *Antioxidants*. 2023. Vol.12(5). P. 1030.
DOI: <https://doi.org/10.3390/antiox12051030>

31. Anvar Amir Ali, Nowruzi Bahareh. Bioactive Properties of Spirulina: A Review. *Microbial Bioactives*. 2021. Vol. 4. P. 134-142. DOI: 10.25163/microbbioacts.412117B0719110521.