

**МІНІСТЕРСТВО ОХОРОНИ ЗДОРОВ'Я УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ФАРМАЦЕВТИЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

Факультет медико-фармацевтичних технологій

Кафедра біотехнології

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

**на тему: «ОРГАНІЗАЦІЯ ВИРОБНИЦТВА БІЛКОВИХ
ГІДРОЛІЗАТІВ НА ОСНОВІ ВОДРОСТІ *ANKISTODESMUS
FALCATUS*»**

Виконав : здобувач вищої освіти групи БТ621(3,10д)-01

спеціальності 162 Біотехнології та біоінженерія

освітньої програми Біотехнологія

Валерій ПРИСТУПА

Керівник: Доцент закладу вищої освіти кафедри біотехнології,

к.фарм.н, доц. Ольга КАЛЮЖНАЯ

Рецензент: Провідний науковий співробітник лабораторії

імунітету, біотехнології та якості Інституту рослинництва імені

В.Я. Юр'єва НААН України, к. б. н., с.н.с. Олена БІЛИНСЬКА

Харків – 2025 рік

АНОТАЦІЯ

У роботі досліджено біотехнологічний процес виробництва білкового гідролізату з мікроводорості *Ankistrodesmus falcatus*. Проаналізовано фізіолого-біохімічні властивості водорості, її потенціал для отримання білкових продуктів та умови культивування. Описано біооб'єкт із акцентом на біосинтез білків і придатність до промислового масштабу. Обґрунтовано технологічний підхід виробництва. Підібрано обладнання (фотобіореактори, фільтр-прес, сушарка), складено технологічну та апаратурну схему. Визначено критичні точки контролю якості з заходами моніторингу. Проаналізовано екологічні аспекти і запропоновано заходи для зменшення впливу. Оцінено можливості впровадження на вітчизняному підприємстві на прикладі ТОВ Агрофірма «Геліантус».

Ключові слова: білкові гідролізати, системи культивування водорості, фотобіореактор.

ANNOTATION

The work investigates the biotechnological process of protein hydrolysate production from microalgae *Ankistrodesmus falcatus*. The physiological and biochemical properties of the algae, its potential for obtaining protein products, and cultivation conditions are analyzed. The bioobject is described with an emphasis on protein biosynthesis and suitability for industrial scale. The technological approach is substantiated. The equipment (photobioreactors, filter press, dryer) is selected, and a technological and instrumental scheme is drawn up. Critical quality control points with monitoring measures are identified. Environmental aspects are analyzed and measures to reduce the impact are proposed. The possibilities of implementation at a domestic enterprise are assessed using the example of Agrofirma Helianthus LLC, taking into account technical and organizational conditions.

Keywords: protein hydrolysates, algae cultivation systems, photobioreactor.

ЗМІСТ

Вступ.....	3
1 Аналітичний огляд.....	6
1.1 Обґрунтування використання мікроводоростей для виробництва білкових гідролізатів	6
1.2 Характеристика водоростей як джерел білку	7
1.3 Характеристика білкових продуктів, що отримують з мікроводоростей	11
2 Характеристика готового продукту, сировини, матеріалів, напівпродуктів.....	15
2.1 Характеристика готового продукту.....	15
2.2 Характеристика сировини.....	18
2.3 Характеристика біологічного об'єкту.....	21
2.4 Біосинтез цільового продукту.....	25
3 Технологічна частина.....	34
3.1 Розрахунок витрат компонентів.....	34
3.2 Обґрунтування та вибір обладнання	35
3.3 Опис технологічного процесу.....	46
3.4 Схеми виробництва.....	55
3.5 Контроль виробництва.....	57
3.6 Екологічні аспекти виробництва.....	60
Висновок.....	65
Список використаної літератури.....	68
Додатки.....	73

					162.01.14.00 000 ПЗ			
Змн..	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розробив	Приступа				Організація виробництва білкових гідролізатів на основі водорості <i>Ankistodesmus falcatus</i> Пояснювальна записка	Лім.	Арк.	Аркушів
Перевірив	Калюжная						2	68
.						НФаУ Кафедра біотехнології		
Н. контр.								
Затвердив	Хохленкова							

ВСТУП

Актуальність теми. Зростаючий глобальний попит на білкові продукти, спричинений збільшенням населення та зміною харчових уподобань, спонукає до пошуку альтернативних джерел білка, які є стійкими та екологічно безпечними. Традиційні джерела, такі як м'ясо, соя чи молочні продукти, стикаються з проблемами, пов'язаними з високим споживанням ресурсів, деградацією земель та викидами парникових газів. У сучасних умовах розвитку агропромислового комплексу особливого значення набуває пошук альтернативних джерел білка.

Мікроводорості, зокрема *Ankistrodesmus falcatus*, є перспективною альтернативою завдяки високому вмісту білка (43–46%), швидкому росту та здатності до культивування в контрольованих умовах. Білкові гідролізати, отримані шляхом ферментативного розщеплення білків, мають високу розчинність, засвоюваність і потенційні біоактивні властивості, такі як антиоксидантна, антигіпертензивна та імуномодулювальна активність. Вони знаходять застосування в харчовій промисловості, нутрицевтиках, косметичці та фармацевтиці, кормовій промисловості.

Застосування водоростей як біооб'єкта дає змогу не лише підвищити ефективність виробництва, а й забезпечити його екологічну безпеку, що відповідає сучасним вимогам сталого розвитку. Актуальність теми посилюється необхідністю впровадження новітніх біотехнологій на вітчизняних агропідприємствах, таких як ТОВ Агрофірма «Геліантус» 2, що сприятиме підвищенню їхньої конкурентоспроможності.

Мета роботи. Розробити та обґрунтувати біотехнологічний процес виробництва білкових гідролізатів на основі мікроводорості *Ankistrodesmus falcatus*, адаптований до умов функціонування вітчизняного агропідприємства.

					162.01.14.00 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		3

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

1 Проаналізувати сучасні наукові джерела щодо фізіолого-біохімічних властивостей *Ankistrodesmus falcatus*, її потенціалу для отримання білкових продуктів та умов культивування.

2. Описати біооб'єкт дослідження з акцентом на особливості біосинтезу білків і придатність до використання у промислових масштабах.

3. Обґрунтувати вибір технологічного підходу до отримання білкових гідролізатів, включаючи етапи культивування, біомасової обробки, гідролізу, очищення та сушіння.

4. Підібрати та розрахувати необхідне технологічне обладнання відповідно до умов виробництва, особливостей сировини та технологічного процесу.

5. Скласти технологічну та апаратурну схеми виробництва, що відображають послідовність та умови реалізації біотехнологічного процесу.

6. Визначити точки контролю якості на кожному етапі технологічного процесу, розробити відповідні заходи моніторингу та регулювання параметрів.

7. Проаналізувати екологічні аспекти виробництва та запропонувати рішення щодо зменшення впливу на довкілля.

8. Оцінити можливості впровадження розробленої технології на прикладі ТОВ Агрофірма «Геліантус» 2, враховуючи організаційно-технічні умови підприємства.

Об'єкт роботи - мікроводорість *Ankistrodesmus falcatus* як біооб'єкт для виробництва білкових гідролізатів.

Предметом роботи є біотехнологічний процес культивування, гідролізу та очищення білкових гідролізатів, технологічні схеми та обладнання, що використовуються на підприємстві.

Методи. У процесі дослідження застосовувалися аналітичні методи (аналіз літературних джерел і нормативної документації), розрахункові

					162.01.14.00 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		4

методи для підбору обладнанн. Для побудови апаратурної та технологічної схем використано принципи системного підходу до проєктування виробничих біотехнологічних процесів.

Практичне значення отриманих результатів. Запропонована технологія виробництва білкових гідролізатів може бути впроваджена у виробничі потужності вітчизняного агропідприємства, що забезпечить раціональне використання водоростевої сировини, зниження енергозатрат і підвищення екологічної безпеки виробництва. Представлені розрахунки обладнання, контрольні точки процесу, а також розроблені схеми є цінним матеріалом для практичної реалізації проєкту на українських підприємствах.

					162.01.14.00 000 ПЗ	Арк.
						5
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД

1.1 Обґрунтування використання мікробіодоростей для виробництва білкових гідролізатів

Білки - макромолекули, присутні у всіх живих організмах, що є важливою поживною складовою раціону людини. За сучасної чисельності населення світу, що становить 7,3 мільярда осіб, щорічна потреба в білку досягає 202 млн т. і, за прогнозами, може зрости до 360–1250 млн т. до 2050 року [21]. Очікувати, що зростаючий попит на білок буде повністю задоволений лише за рахунок збільшення виробництва білка з тваринних і рослинних джерел, є малоймовірним через зростаючу ціну на корми та складнощі використання орних земель. Отже, для задоволення майбутніх потреб у харчуванні необхідно впроваджувати альтернативні джерела харчового білка. До таких альтернатив належать бактерії, комахи та мікробіодорості. Високий вміст білка (близько 50%), корисний поживний склад і низька алергенність білкових продуктів з мікробіодоростей забезпечують їм конкурентні переваги порівняно з традиційними джерелами білка, такими як соя (37% білка в сухій масі), молоко (26%), м'ясо (43%) і дріжджі (39%) [2, 15, 21]. Сучасні тенденції в стилі життя, включаючи зростаючий попит на веганські, екологічно чисті продукти та нутрицевтики з користю для здоров'я, висувують мікробіодорості на перший план серед альтернатив тваринному білку.

Біомаса водоростей є перспективною альтернативою, що має численні переваги над наземною біомасою: вищі темпи росту, мінімальне споживання прісної води, відсутність конкуренції за орні землі, вуглецево-нейтральні викиди та здатність продукувати широкий спектр біологічно активних речовин [23]. Наразі близько 30% земної поверхні використовується для тваринництва, що спричиняє численні екологічні проблеми, зокрема

					162.01.14.00 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		6

деградацію ґрунтів, забруднення води, надмірний випас і опустелювання. Тваринні білки, зокрема м'ясо і молочні продукти, залишаються основними за поживною цінністю, проте їх подальше широкомасштабне виробництво є екологічно та економічно невиправданим через низьку ефективність перетворення ресурсів та значне екологічне навантаження. У зв'язку з цим пошук альтернатив є не лише необхідним, але й невідворотним. При цьому питання продовольчої безпеки не можуть розглядатися у відриві від принципів сталого розвитку. З цієї причини активно досліджуються білкові альтернативи тваринного походження. Біомаса водоростей є однією з найперспективніших альтернатив: її переваги охоплюють швидке зростання, можливість культивування в морській воді, незалежність від орних земель, вуглецеву нейтральність, біоремедіацію та здатність продукувати низку цінних біоактивних сполук.

1.2 Характеристика водоростей як джерел білку

Термін «водорості» охоплює функціональну групу автотрофних фотосинтезуючих організмів, які мешкають у морських та прісноводних водоймах. Ця група включає як бактеріальні (ціанобактерії), так і еукаріотичні форми з простою репродуктивною структурою. Вони можуть бути одноклітинними, колоніальними, нитчастими або мати просту тканинну будову. Мікроводорості є одноклітинними організмами з глобальним поширенням. Завдяки високій адаптивності вони зустрічаються в усіх природних середовищах - від пустель до полярних морів [2, 12].

Мікроводорості нині вважаються перспективним і сталим джерелом харчових білків. Найпоширенішими групами мікроводоростей є *Chlorophyta* (зелені водорості), *Chrysophyta* (золотисті водорості), *Bacillariophyta* (діатомові) та *Cyanophyta* (синьо-зелені водорості). Загалом описано понад 200000 видів мікроводоростей, що свідчить про їх надзвичайне біологічне

					162.01.14.00 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		7

різноманіття [27].

Мікроводорості легко вирощуються у лабораторних умовах, однак забезпечити високу продуктивність у промислових масштабах є складним завданням. Системи культивування мікроводоростей умовно поділяють на два типи: відкриті водойми (ставки) та фотобіореактори. Відкрите культивування часто використовується в промисловості завдяки низьким витратам на будівництво, обслуговування та експлуатацію. Натомість фотобіореактор — це замкнута система, що забезпечує ізоляцію культури від зовнішнього середовища та контрольовані параметри вирощування [28].

Продуктивність вирощування мікроводоростей значно відрізняється залежно від методу. Наприклад, річний вихід *Chlorella vulgaris* у відкритих ставках становить 5–7 кг/м², тоді як у фотобіореакторах — приблизно 15 кг/м² [32].

Збір мікроводоростей становить близько 20–30% загальних витрат на їх виробництво через високе енергоспоживання та потребу в капіталовкладеннях. Основними методами збору є фільтрація, центрифугування, флокуляція та флотація [34].

Продукти харчування, збагачені мікроводоростями, класифікуються як нові харчові продукти. Серед основних макронутрієнтів мікроводоростей — білки (40–70%), вуглеводи (12–30%) і ліпіди (4–20%). Водночас вони багаті на мікронутрієнти: містять 8–14% каротину, а також значні кількості вітамінів В1, В2, В3, В6, В12, Е, К і D [14, 26, 31]. Вміст білка в мікроводоростях залежить від виду, фази росту та умов освітлення, і може бути оптимізований за допомогою регуляції живлення та умов середовища.

Якість білка визначається його амінокислотним складом, насамперед вмістом незамінних амінокислот та засвоюваністю. Традиційно вважається, що білки тваринного походження є повноцінними, оскільки містять усі незамінні амінокислоти, які не синтезуються людським організмом. Водночас мікроводорості також можуть слугувати повноцінним джерелом білка, що

					162.01.14.00 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		8

відповідає вимогам FAO, і за цим показником є не гіршими за інші основні джерела, такі як соя чи яйця [14, 21].

Перш ніж бути визнаними безпечними для споживання людиною, усі нові харчові продукти проходять токсикологічні випробування, щоб підтвердити їхню нешкідливість. Мікроводорості, як нетрадиційне джерело білка, також підлягають таким перевіркам. Відомі на сьогодні токсикологічні дослідження не виявили жодного негативного впливу жодного з протестованих видів водоростей [22].

Серед видів, дозволених для споживання людиною, найбільш поширеними є представники родин *Arthrospira*, *Chlorella*, *Aphanizomenon*, *Dunaliella* та *Haematococcus*, хоча не всі вони схвалені до використання як продукти харчування Європейським агентством з безпеки харчових продуктів (EFSA), що обмежує їх застосування в країнах Європейського Союзу [31]. Дозволеними до споживання у Європі є *Arthrospira platensis*, *Chlorella luteoviridis*, *Chlorella pyrenoidosa*, *Chlorella vulgaris*, *Chlamydomonas reinhardtii* та *Spirulina sp.*, в США FDA безпечними (GRAS) визначені *Arthrospira platensis*, *Chlorella protothecoides*, *Crypteiconidium cohnii*, *Dunaliella bardawil*, *Haematococcus pluvialis*, а наступні водорості визначені як ті, що не містять токсинів: *Synechococcus sp.*, *Tetraselmis sp.*, *Chlamydomonas reinhardtii*, *Haematococcus pluvialis*, *Chlororocccum sp.*, *Scenedesmus*, *Desmodesmus sp.*, *Parietochlors incisa*, *Navicula sp.*, *Nitzschia dissipata*, *Phaeodactylum tricornutum*, *Thalassiosira pseudonana*, *Odonrella aurita*, *Skeletonema sp.*, *Monodus subterraneus*, *Nannochloropsis sp.*, *Isochrysis sp.*, *Pavlova sp.* [31]. У табл. 1.1 наведено загальний склад макронутрієнтів різних видів мікроводоростей [21-23, 25-27, 31].

					162.01.14.00 000 ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 1.1

Макронутрієнтний склад різних мікроводоростей
(% сухої речовини)

Водорість	Білки	Вуглеводи	Ліпіди
<i>Anabaena cylindrica</i>	43–56	25–30	4–7
<i>Aphanizomenon flos-aquae</i>	62	23	3
<i>Arthrospira maxima</i>	60–71	13–16	6–7
<i>Chlamydomonas reinhardtii</i>	48	17	21
<i>Chlorella pyrenoidosa</i>	57	26	2
<i>Chlorella vulgaris</i>	51–58	12–17	14–22
<i>Dunaliella salina</i>	57	32	6
<i>Euglena gracilis</i>	39–61	14–18	14–20
<i>Porphyridium cruentum</i>	28–39	40–57	9–14
<i>Scenedesmus obliquus</i>	50–56	10–17	12–14
<i>Spirogyra</i> sp.	6–20	33–64	11–21
<i>Spirulina platensis</i>	46–63	8–14	4–9
<i>Synechococcus</i> sp.	63	15	11

Для комерційного виробництва використовують такі види, як *Arthrospira* sp., *Chlorella* sp., *Scenedesmus obliquus* та *Spirulina* sp. Вид *Chlorella* згадується в літературі як один із найбільш широко використаних завдяки високому вмісту білка (51–58% сухої речовини) та наявності незамінних амінокислот. Також завдяки високому вмісту білка *Spirulina platensis* широко використовується як харчова добавка: містить 43–63% білка (у сухій речовині) з високим вмістом таких амінокислот, як лейцин, валін, ізолейцин, фенілаланін, тирозин, метіонін, цистеїн і тирозин [2, 10, 11, 31].

Розширення переліку видів водоростей, що будуть використовуватись у технологіях отримання білкових продуктів, є перспективною для цієї галузі.

Перспективною ми вважаємо застосування водорості *Ankistrodesmus falcatus*, яка є широкопоширеною у водоймах по всьому світу та яка володіє високим вмістом макронутрієнтів: білка – 44,4-46,4 %, ліпідів – 21,6-23,2 %, вуглеводи 29,8-33 % та широким амінокислотним профілем [14, 34].

1.3 Характеристика білкових продуктів, що отримують з мікроводоростей

Сучасні білкові продукти з мікроводоростей класифікують відповідно до вмісту білка та ступеня очищення на цільноклітинний білок, білкові концентрати, ізоляти, гідролізати та біоактивні пептиди. Цільноклітинний білок характеризується збереженою клітинною та тканинною структурою, має високу білкову щільність і здебільшого вживається без попередньої обробки (наприклад, насіння рослин, цілі клітини мікроводоростей) [22, 25]. У мікроводоростях цільноклітинний білок становить приблизно 40–50%, хоча цей показник варіюється залежно від виду та умов культивування [27]. Для отримання білкових концентратів, ізолятів, гідролізатів та біоактивних пептидів (60–89% білка в сухій масі), білок необхідно вилучити з клітин мікроводоростей і піддати концентрації.

Залежно від передбачуваного використання, білкові інгредієнти також класифікують на основі їхньої нутрицевтичної цінності та функціональних характеристик. Нутрицевтична цінність пов'язана з користю для здоров'я та харчування - такими як засвоюваність, вміст незамінних амінокислот і біоактивність. Ці характеристики особливо цінуються в продуктах харчування, що збагачуються, поживних коктейлях і спортивному харчуванні.

Функціональні властивості білків, у свою чергу, впливають на фізичні властивості продуктів харчування. Основні з них включають здатність до емульгування, утворення піни та її стабільність. Ці властивості залежать від структури білка, взаємодії між білками та взаємодії з іншими молекулами в

					162.01.14.00 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

середовищі. Емульгування означає здатність білка стабілізувати емульсії типу «олія у воді». Висока емульгувальна здатність і стабільність необхідні у продуктах на зразок супів і соусів. Здатність до піноутворення пов'язана з гнучкістю білкової молекули, яка дозволяє знижувати поверхневий натяг і утримувати повітряні бульбашки. Ця властивість актуальна для кремів, спредів і збитих продуктів [31].

Методи та інтенсивність обробки білка впливають на його засвоюваність, біоактивність, емульгувальні та піноутворюючі властивості [28]. Вибір технології виробництва білкових продуктів з мікроводоростей повинен враховувати кінцеве призначення продукту.

Мікроводорості вважаються перспективною альтернативою традиційним джерелам білка, оскільки, окрім білкових компонентів, вони містять також корисні ліпіди, мікронутрієнти й харчові волокна. Найбільш поширеним видом білкової продукції з мікроводоростей, яку вживають у їжу, є цільноклітинний білок, завдяки високому вмісту білка. У порівнянні з екстрагованими білками, цільноклітинні білки, захищені клітинними оболонками, краще зберігають функціональні властивості за зміни рН. Водночас залишається невизначеність щодо засвоюваності білка в лізованій та висушеній біомасі мікроводоростей порівняно з традиційними джерелами. Міцна клітинна стінка й внутрішні мембрани значно ускладнюють засвоєння білка з мікроводоростей [28, 31]. Наприклад, засвоюваність білка *Chlorella vulgaris* нижча, ніж у традиційних білкових джерел, що пояснюється інгібуючим ефектом клітинних полісахаридів. Водорості з високим вмістом целюлози (наприклад *C. vulgaris*) демонструють нижчу засвоюваність порівняно з тими, що мають тонші клітинні стінки (*Spirulina platensis*) [27]. Крім того, білки, що залишаються всередині клітини, можуть не проявляти повний функціональний потенціал. Отже, руйнування клітинної стінки - ефективний спосіб підвищення доступності білка [25].

Білкові концентрати та ізоляти водоростей отримують шляхом

					162.01.14.00 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

концентрування або часткового очищення білка, екстрагованого з клітин-господарів. Такий процес підвищує індекс амінокислотної консистентності з поправкою на засвоюваність. Концентрати білка було отримано з водоростей *Arthrospira sp.*, *Chlorella sp.*, *Scenedesmus sp.* та *Nannochloropsis sp.* Концентрати з *C. vulgaris* і *C. pyrenoidosa* показали схожі емульгувальні характеристики, як і комерційні білки (казеїнат натрію) [27]. Продукти, екстраговані в м'яких умовах (нейтральний рН і температура до 40 °С), мали кращі функціональні властивості, ніж ті, які оброблялися за жорстких умов. Оскільки білки краще розчиняються в лужному середовищі, відзначено зростання піноутворюючої здатності при рН 10–11.

Гідролізати отримують шляхом ферментативного розщеплення цілих клітин або екстрагованого білка, що утворює коротші пептиди. Такі продукти мають вищу біологічну цінність та біоактивність, ніж цільноклітинний білок і концентрати. Їх можна випускати як суміші пептидів різної молекулярної маси або очищені фракції з певною біоактивністю. Засвоюваність білка *C. vulgaris in vitro* зростає з 70% для цільноклітинного білка до 90–97% після гідролізу. Також гідроліз зменшує зелений пігмент білка, що покращує сприйняття продукту споживачами [26].

Частковий гідроліз покращує емульгувальні та піноутворюючі властивості білка, однак надмірне розщеплення (до пептидів <5 кДа) знижує їх ефективність. Для високих функціональних властивостей варто орієнтуватися на пептиди >10–20 кДа, тоді як пептиди 2–5 кДа мають переважно біоактивні властивості й можуть бути очищені та представлені як нутрицевтики [28]. Для спеціального харчування (протеїнові напої, добавки) доцільно використовувати гідролізати з високою розчинністю та амінокислотою цінністю. Більшість гідролізатів з мікрowodоростей з гідролізом 15–25% цінуються саме за біологічну активність [25].

Біоактивні пептиди - це короткі амінокислотні ланцюги (приблизно 3–40 залишків), що позитивно впливають на фізіологічні функції організму. Їх

					162.01.14.00 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

біоактивність виявляється після вивільнення з білкової матриці шляхом гідролізу. Після надходження в організм ці пептиди потрапляють у кровотік, де проявляють свою дію. Відомі ефекти водоростевих пептидів: антиоксидантна, антигіпертензивна, імуномодуюча, протиракова, гепатопротекторна та антикоагулянтна активність [23].

Таким чином, огляд літератури свідчить про високу актуальність використання мікроводоростей, зокрема *Ankistrodesmus falcatus*, як перспективного джерела білкових гідролізатів у контексті сучасних викликів продовольчої безпеки та сталого розвитку. Зростання глобального попиту на білок, прогнозоване до 360–1250 млн тонн до 2050 року, та екологічні обмеження традиційного виробництва тваринних і рослинних білків обґрунтовують необхідність альтернативних джерел. Мікроводорості вирізняються високим вмістом білка (40–70%, для *A. falcatus* – 44,4–59,6%), багатим амінокислотним складом, включаючи незамінні амінокислоти, та додатковими нутрицевтично цінними компонентами (ліпіди, вуглеводи, вітаміни). Їх переваги, такі як швидке зростання, мінімальне використання прісної води, вуглецева нейтральність і здатність до біоремедіації, роблять їх ідеальними для сталого виробництва.

A. falcatus вирізняється високим потенціалом завдяки широкому поширенню, адаптивності та вмісту білка до 46,29%. Білкові гідролізати, отримані шляхом ферментативного розщеплення, мають вищу біодоступність (до 97–99%), покращені функціональні властивості (емульгування, піноутворення) та біоактивність порівняно з цілюноклітинним білком, що робить їх цінними для нутрицевтиків і спеціального харчування. Водночас виробництво стикається з викликами, зокрема високими витратами на культивування, руйнування клітинних стінок і регуляторними обмеженнями в ЄС. Огляд підтверджує доцільність вибору *A. falcatus* для розробки білкових гідролізатів, підкреслюючи її біотехнологічний потенціал і необхідність оптимізації технологій для масштабного виробництва.

					162.01.14.00 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

2 ХАРАКТЕРИСТИКА ГОТОВОГО ПРОДУКТУ, СИРОВИНИ, МАТЕРІАЛІВ, НАПІВПРОДУКТІВ

2.1 Характеристика готового продукту

Білковий гідролізат, отриманий із мікродорості *Ankistrodesmus falcatus*, є високоякісним продуктом, призначеним для використання як джерело легкозасвоюваних амінокислот, пептидів та інших біоактивних сполук.

Білковий гідролізат планується випускати як дієтичну добавку, а не як харчовий продукт, з огляду на високу концентрацію біоактивних компонентів (пептиди, амінокислоти) та призначення для цільового вживання (спорт, здоров'я, спеціальні дієти). Для вітчизняної агрофірми виробництво дієтичної добавки буде економічно вигідно: вища додана вартість порівняно з харчовими продуктами, менш суворі вимоги до смакових якостей, ніж у харчових продуктів, можливість позиціонування на ринку нутрицевтиків і спортивного харчування.

Фізичні та хімічні властивості:

Зовнішній вигляд: Сухий порошок світло-зеленого або бежевого кольору (залежить від ступеня очищення), однорідний, без сторонніх включень.

Смак і запах: Нейтральний або слабкий рослинний смак, без різких запахів.

Розчинність: Висока у воді (90–100%), що забезпечує легке використання у напоях і харчових продуктах.

Вміст білка: 60–80% (залежить від технології гідролізу), з яких 70–80% у вигляді пептидів і вільних амінокислот.

					162.01.14.00 000 ПЗ	Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Амінокислотний профіль:

Високий вміст незамінних амінокислот: лейцин (8–12%), валін (5–7%), ізолейцин (4–6%), фенілаланін (4–5%), метіонін (1–2%). Збалансоване співвідношення незамінних і замінних амінокислот, що відповідає рекомендаціям FAO/WHO.

Біоактивні компоненти:

Пептиди з антиоксидантною, антигіпертензивною або імуномодулюючою активністю.

Мікроелементи (залізо, магній, цинк) у біодоступній формі.

Вітаміни (В-група).

Вологість: $\leq 5\%$ (для забезпечення стабільності при зберіганні).

Зольність: $\leq 10\%$ (залежить від очищення від мінеральних солей).

Жири: $< 5\%$ (залишки ліпідів водорості після екстракції).

Вуглеводи: $< 10\%$ (залишки полісахаридів клітинної стінки).

Функціональні властивості:

Емульгування: Висока здатність утворювати стабільні емульсії (емульгуюча здатність $\sim 50\text{--}70$ мл олії/г продукту), що корисно для харчової промисловості.

Піноутворення: Помірна пінна стабільність ($\sim 100\text{--}150\%$ об'єму піни), придатна для напоїв і кондитерських виробів.

Біодоступність: До 97–99% завдяки низькомолекулярним пептидам (< 10 кДа), що забезпечує швидке засвоєння.

Антиоксидантна активність: Здатність нейтралізувати вільні радикали (DPPH-активність $\sim 20\text{--}40\%$ залежно від гідролізу).

Мікробіологічна чистота:

Загальна кількість мікроорганізмів: $< 10^4$ КУО/г.

Відсутність патогенів (*Salmonella*, *E. coli*, *Staphylococcus aureus*).

Відсутність токсинів (мікотоксини, ціанобактеріальні токсини).

					162.01.14.00 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

Призначення:

Білковий гідролізат позиціонується як дієтична добавка для: збагачення раціону амінокислотами, особливо для спортсменів, веганів, людей похилого віку; підтримки імунної системи та антиоксидантного захисту; спеціального харчування (наприклад, для осіб із дефіцитом білка).

Товарна форма:

Порошок: Найзручніша форма для дієтичної добавки, оскільки забезпечує тривалий термін зберігання, легке дозування та універсальність використання. Можливість додавання до напоїв (смузі, протеїнові коктейлі), каш, супів або капсулювання.

Фасування:

Для роздрібного продажу - пластикові банки: 100 г, 250 г, 500 г з герметичною кришкою та мірною ложкою (5 г) для дозування; саше: 5 г або 10 г (одноразові порції для зручності в дорозі).

Для оптового продажу - вакуумні пакети: 1 кг, 5 кг (для постачання в харчову промисловість або фітнес-індустрію).

Упаковка:

Матеріали: Харчовий пластик (HDPE), скло або фольговані пакети, що захищають від вологи та світла.

Етикетка: Містить назву продукту, склад, поживну цінність, рекомендації щодо дозування, термін придатності, умови зберігання та сертифікаційні позначки.

Рекомендації щодо дозування:

5–10 г порошку на добу (1–2 чайні ложки), розчинені у воді, соку або додані до їжі.

Умови зберігання:

Температура: 5–25°C, у сухому, захищеному від світла місці.

Термін придатності: 12–18 місяців у герметичній упаковці.

					162.01.14.00 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

2.2 Характеристика сировини

Як середовища для вирощування *Ankistrodesmus falcatus* рекомендовано використовувати модифіковане середовище COMBO, базальне середовище Болда (BBM) та середовище Bristol [36]. Також у дослідженнях із культивування водоростей використовуються середовища BRSP (Bicarbonate-Rich Synthetic Pondwater) та NPK [29]. Склад поживного середовища BRSP для культивування мікрowodоростей, таких як *A. falcatus*, не є універсально стандартизованим у літературі, але базується на синтетичних середовищах, адаптованих для бікарбонатних систем (наприклад, BICCAPS). Термін «NPK» зазвичай асоціюється з добривами, що містять азот (N), фосфор (P) і калій (K), але в контексті культивування мікрowodоростей це синтетичне середовище, адаптоване для забезпечення цих макроелементів. Склад типових середовищ COMBO, BBM та Bristol наведено у табл. 2.1.

Таблиця 2.1

Склад середовищ COMBO, BBM та Bristol

Речовини	Маточний розчин, мг/л			Кількість, мл/л		
	BBM	Bristol	COMBO	BBM	Bristol	COMBO
KH_2PO_4	17,5	17,5	-	10,0	10,0	-
$\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	2,5	2,5	36,76	10,0	10,0	1,0
$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	7,5	7,5	36,76	10,0	10,0	1,0
NaNO_3	25,0	25,0	85,01	10,0	10,0	1,0
K_2HPO_4	7,5	7,5	8,71	10,0	10,0	1,0
NaCl	2,5	2,5	-	10,0	10,0	-
$\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$	-	-	2,842	-	-	1,0
NaHCO_3	-	-	12,60	-	-	1,0
KCL	-	-	7,45	-	-	1,0
$\text{Na}_2\text{EDTA} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	10,0	-	-	1,0	-	-
KOH	6,2	-	-	1,0	-	-
$\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	4,98	-	-	1,0	-	-
H_2SO_4 (конц.)	1 мл/л	-	-	1,0	-	-
H_3BO_3	11,5	-	1,0	0,7	-	1,0

Склад середовищ BRSP та NPK модифікується під певні дослідження, типові складові та концентрації наступні (також наводимо характеристику цих компонентів для вирощування водоростей) [29, 30, 33]:

1. Джерело вуглецю. Натрій бікарбонат (NaHCO_3) 10–30 г/л (залежно від умов BICCAPS, зазвичай 10 г/л для *A. falcatus*). Забезпечує неорганічний вуглець для фотосинтезу та підтримує лужне рН (7,5–9).

2. Джерела азоту. Нітрат натрію (NaNO_3) 0,25 г/л (250 мг/л). Основне джерело азоту для синтезу амінокислот і білків. Амоній хлорид (NH_4Cl): 0,025 г/л (25 мг/л, опціонально, залежно від адаптації *A. falcatus* до амонію).

3. Джерела фосфору. Дикалій фосфат (K_2HPO_4) 0,075 г/л (75 мг/л). Забезпечує фосфор для синтезу нуклеїнових кислот і АТФ.

4. Макроелементи:

Хлорид магнію ($\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) 0,075 г/л (75 мг/л). Необхідний для хлорофілу та ферментативних реакцій.

Хлорид кальцію ($\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) 0,025 г/л (25 мг/л). Підтримує цілісність клітинної стінки.

Сульфат натрію (Na_2SO_4) 0,05 г/л (50 мг/л). Джерело сірки для синтезу цистеїну та метіоніну.

5. Мікроелементи:

Залізо ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$): 0,009 г/л (9 мг/л). Компонент ферментів фотосинтезу та азотного метаболізму.

Борна кислота (H_3BO_3): 0,00286 г/л (2,86 мг/л).

Сульфат марганцю ($\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$): 0,00169 г/л (1,69 мг/л).

Сульфат цинку ($\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$): 0,00022 г/л (0,22 мг/л).

Молібдат натрію ($\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$): 0,00039 г/л (0,39 мг/л).

Сульфат міді ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$): 0,00008 г/л (0,08 мг/л).

Мікроелементи необхідні для кофакторів ферментів і метаболічних шляхів, потрібні для росту клітини.

6. Вітаміни (опціонально, залежно від вимог штаму):

Тіамін (вітамін B_1): 0,0001 г/л (0,1 мг/л).

Біотин (вітамін B_7): 0,0000005 г/л (0,5 мкг/л).

Ціанокобаламін (вітамін B_{12}): 0,0000005 г/л (0,5 мкг/л).

					162.01.14.00 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

7. Буферна система:

Бікарбонат натрію (NaHCO_3) також діє як буфер, підтримуючи рН у межах 7,5–9, оптимальних для алкалофільної *A. falcatus*.

8. Розчинник:

Дистильована або деіонізована вода: до 1 л.

Початковий рН 7,5–8,0 (регулюється додаванням NaHCO_3 або HCl/NaOH). Під час культивування рН може зростати до 9–10 через поглинання бікарбонату та виділення гідроксид-іонів.

Швидкості росту водоростей та накопичення ними макро- та мікронутрієнтів суттєво залежить від умов вирощування, зокрема складу живильних середовищ. За даними літератури накопичення клітин та білка у обраного виду водоростей найбільше спостерігається на середовищі BBM (табл. 2.2, 2.3 [36]). Важливим фактором для промислового виробництва є те, що ці показники майже не зменшуються при використанні 50 % середовища, що є дуже важливим для зниження вартості виробництва мікроводоростей. Зважаючи на це у роботі зупинились на середовищі 50% BBM.

Табл. 2.2

Показники культури *Ankistrodesmus falcatus* при вирощуванні на різних середовищах

Середовище	Показники культури при різних концентрації середовища	
	100 %	50 %
Кількість клітин, кл./мл ($\times 10^6$)		
BBM	$39,00 \pm 0,58$	$37,00 \pm 0,58$
COMBO	$37,67 \pm 1,45$	$35,00 \pm 1,73$
Bristol	$31,33 \pm 0,88$	$30,00 \pm 0,58$
Оптична густина (680 нм)		
BBM	$0,26 \pm 0,002$	$0,26 \pm 0,002$
COMBO	$0,25 \pm 0,017$	$0,24 \pm 0,008$
Bristol	$0,22 \pm 0,004$	$0,23 \pm 0,002$
Суха вага біомаси (г/л)		
BBM	$2,33 \pm 0,06$	$2,20 \pm 0,01$
COMBO	$2,13 \pm 0,06$	$1,87 \pm 0,06$
Bristol	$1,73 \pm 0,06$	$1,70 \pm 0,01$

Табл. 2.3

Накопичення макронутрієнтів у *Ankistrodesmus falcatus* при вирощуванні на різних середовищах

Середовище	Показники культури при різних концентрації середовища	
	100 %	50 %
Білки (%)		
BBM	46,41 ± 0,57	44,25 ± 0,26
COMBO	45,99 ± 0,15	43,45 ± 0,26
Bristol	44,37 ± 0,65	43,48 ± 0,51
Ліпіди (%)		
BBM	23,22 ± 0,56	22,93 ± 0,58
COMBO	21,70 ± 0,63	22,29 ± 0,57
Bristol	21,64 ± 0,21	21,28 ± 0,52
Вуглеводи (%)		
BBM	32,99 ± 0,26	32,11 ± 0,07
COMBO	31,23 ± 0,05	30,79 ± 0,02
Bristol	29,76 ± 0,62	28,93 ± 0,24

2.3 Характеристика біологічного об'єкту

Ankistrodesmus falcatus - це одноклітинна зелена водорість із родини *Selenastraceae*, яка є поширеним видом фітопланктону в прісноводних екосистемах по всьому світу [24, 36]. Вона має значний потенціал для біотехнологічних застосувань, зокрема у виробництві біопалива, очищенні стічних вод, як кормовий та харчовий продукт.

Клітини *A. falcatus* мають голкоподібну, серпоподібну або сигмоїдну форму, звужену до гострих кінців, утворюють пухкі пучки або скупчення. Розміри клітин варіюють: ширина 2–4 мкм, довжина 25–45 мкм, що робить їх одними з найменших серед мікрowodоростей [36, 38]. Під скануючим електронним мікроскопом клітини виглядають як тонкі, видовжені структури з чіткими кінцями (рис. 2.1, 2.2).

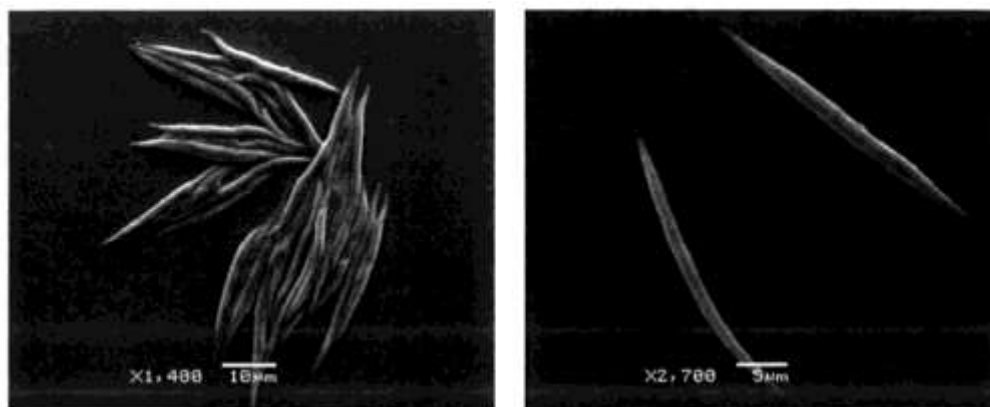


Рис. 2.1 - Чиста культура *Ankistrodesmus falcatus* (скануюча електронна мікроскопія) [36]

Клітини водорості містять один або кілька хлоропластів із піреноїдами, розташовані по довжині клітини. Один паріетальний хлоропласт розташований уздовж клітинної стінки, містить хлорофіли а і b, що забезпечують фотосинтез. Хлоропласт містить один піреноїд, але в деяких штаммах піреноїди можуть бути відсутніми або їх може бути кілька. Піреноїди слугують для накопичення крохмалю. Клітинна стінка - тонка, гладка, без слизової оболонки, складається з целюлози та інших полісахаридів, не містить альгаенану, що робить її проникною для малих молекул [24, 38].

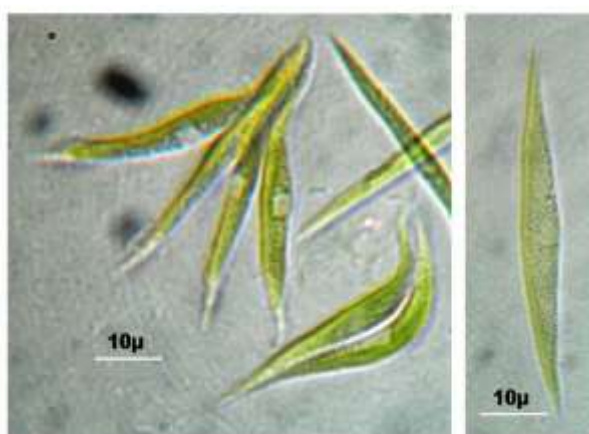


Рис. 2.2 - Клітини *A. falcatus* (оптична мікроскопія, збільшення 400х) [38]

Зазвичай клітини формують пухкі пучки або скупчення з 2–8 клітин, іноді переплітаються між собою [24] (рис. 2.3).



Рис. 2.3 – Скупчення та переплетіння клітин *A. falcatus* [24]

Розмножуються безстатево шляхом утворення 4–8 автоспор [27] (рис. 2.4).

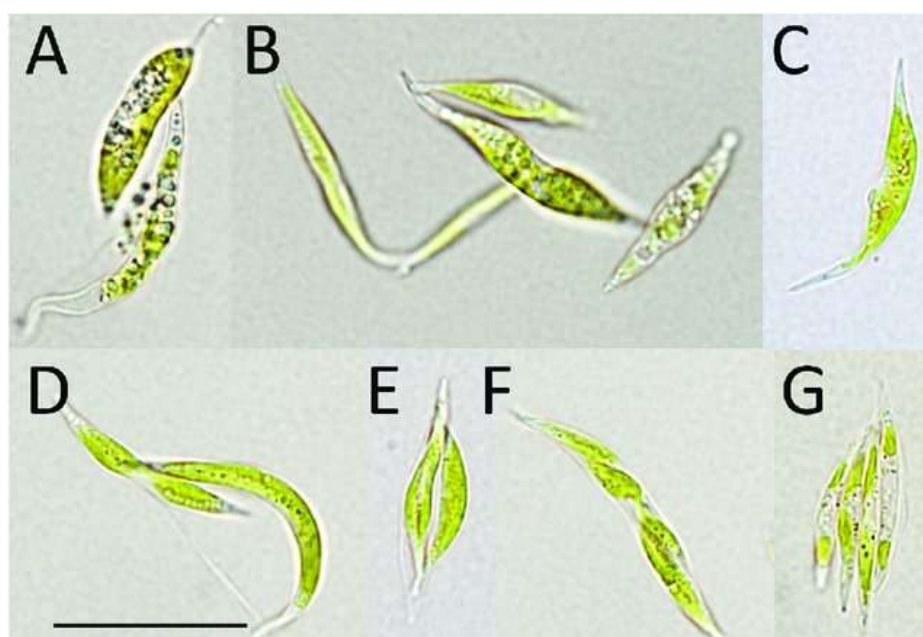


Рис. 2.4 – Морфологія *A. falcatus* та етапи розмноження:
Чорна смуга позначає 10 мкм. А) Дві клітини, що накопичують численні олійні тільця в цитозолі. В) Зображення кількох клітин, що ілюструють пластичність клітинної морфології. С) Одна клітина. D) Дві клітини на ранній стадії поділу. Е) Дві клітини, що вивільняються з автоспорангію. F) Чотири дочірні клітини, що все ще знаходяться в автоспорангії. G) Чотири клітини, що вивільняються з автоспорангії [27]

A. falcatus є космополітичним видом, поширеним у прісноводних водоймах (озера, ставки, річки) по всьому світу. Основна екологічна роль як первинний продуцент, *A. falcatus* відіграє ключову роль у водних екосистемах, забезпечуючи їжу для зоопланктону, наприклад, *Daphnia*. Водорість сприяє кругообігу вуглецю та поживних речовин [38].

Добре адаптується до різних умов, включаючи стічні води та високі концентрації вуглекислого газу. Може рости в умовах поживного стресу (низький вміст азоту чи фосфору), що сприяє накопиченню ліпідів. Чутлива до низьких концентрацій нікелю (IC₅₀ 17 мкг/л), що викликає зниження вмісту пігментів, макромолекул і ферментативної активності [36].

Умови вирощування:

Середовища - найкращі результати демонструють середовища Bold's Basal Medium (BBM) і Modified COMBO Medium (COMBO), де щільність клітин досягає $>3,5 \times 10^7$ клітин/мл, а біомаса - $>2,20$ г/л. Bristol є менш ефективним (біомаса 1,70–1,73 г/л). Ефективне зростання спостерігається навіть при 50% концентрації середовища, що знижує витрати [36].

Світло - оптимальна інтенсивність 60–180 мкмоль фотонів/м²/с, фотоперіод 12:12 або 16:8 (світло:темрява). Збільшення інтенсивності світла до 180 мкмоль/м²/с підвищує швидкість росту до 0,61/день [33, 38].

Температура - оптимальна 25 °С. Зниження температури до 4 °С не зупиняє ріст, але уповільнює його [33].

Поживні речовини - азот (750 мг/л), фосфор (0 мг/л) і залізо (9 мг/л) оптимізують накопичення ліпідів до 59,6%. Дефіцит фосфору сприяє накопиченню ліпідів (до 45,94%) і вуглеводів. Високі концентрації NaHCO₃ (10 г/л) у системі BICCAPS (англ. Biofilm-based Integrated Cultivation and Capture System, Інтегрована система культивування та захоплення на основі біоплівки) забезпечують продуктивність 3,55 мг/л/день [29].

pH - зростає з 7,0 до 10,2 під час культивування, що сприяє видаленню поживних речовин зі стічних вод [36].

					162.01.14.00 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

A. falcatus ефективно росте в стічних водах, видаляючи 86,45–98,21% аміаку, 75,76–80,85% нітратів і 98,52–100% фосфатів [38]. Генетична пластичність дозволяє *A. falcatus* адаптуватися до стресових умов, таких як дефіцит поживних речовин або забруднення металами.

A. falcatus є автотрофним організмом, що використовує світло для синтезу органічних сполук. Залізо відіграє роль каталізатора в реакціях електронного транспорту, а магній є складовою хлорофілу [31].

Розглянемо основні особливості метаболізму цього виду, що є важливими при промисловому вирощуванні.

Накопичення ліпідів. При дефіциті фосфору ліпідний вміст зростає до 45,94–59,6%, з високим вмістом жирних кислот C16:0, C18:1, C18:2, C18:3, що робить *A. falcatus* перспективною для отримання біопалива. Найвища продуктивність ліпідів (74,07 мг/л/день) досягається при комбінації 750 мг/л азоту, 0 мг/л фосфору та 9 мг/л заліза [33, 38].

Вуглеводи та білки. Дефіцит азоту підвищує вміст вуглеводів (0,3–0,5 мкг/мкм³), але знижує вміст білків. При високих концентраціях NaCl (0,34 М) вміст вуглеводів і білків зростає, але хлорофіл зменшується [36].

Детоксикація металів. Накопичує метали (наприклад, олово) у полісахаридній (85%) і білковій (15%) фракціях, а також у поліфосфатних тілах для детоксикації [38].

Екзополісахариди. Виробляє значну кількість екзополісахаридів, що містять глюкозу, галактозу, манозу та інші моносахариди, для захисту від стресу [14, 24].

2.4 Біосинтез цільового продукту

Цільовим продуктом у даній роботі є гідролізат білків, які отримують із водорості *Ankistrodesmus falcatus*.

Біосинтез амінокислот і білків у мікрководоростях, таких як *A. falcatus*, є

					162.01.14.00 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		25

складним процесом, що включає метаболічні шляхи, пов'язані з фотосинтезом, циклом Кальвіна, гліколізом, циклом трикарбонових кислот (ТЦК) і азотним метаболізмом. Вуглецеві скелети для амінокислот походять із фотосинтезу та проміжних продуктів ТЦК, азот – із нітратів або амонію через асиміляцію, а енергія (АТФ, NADPH) забезпечується фотосинтезом [1]. Білки синтезуються на рибосомах шляхом транскрипції та трансляції, залежно від умов середовища (освітлення, азот, температура) [7, 9]. Розглянемо етапи біосинтезу амінокислот [16].

1. Асиміляція азоту. Амінокислоти містять аміногрупу ($-\text{NH}_2$), що надходить із неорганічного азоту через відновлення нітратів або поглинання амонію.

Нітрат $\rightarrow$ Нітрит:

Реакція: $\text{NO}_3^- + 2\text{e}^- + 2\text{H}^+ \rightarrow \text{NO}_2^- + \text{H}_2\text{O}$

Фермент: Нітратредуктаза (NR), NAD(P)H-залежна.

Нітрит $\rightarrow$ Амоній:

Реакція: $\text{NO}_2^- + 6\text{e}^- + 8\text{H}^+ \rightarrow \text{NH}_4^+ + 2\text{H}_2\text{O}$

Фермент: Нітритредуктаза (NiR), ферредоксин-залежна.

Синтез глутаміну:

Реакція: Глутамат + NH_4^+ + АТФ $\rightarrow$ Глутамін + ADP + P_i

Фермент: Глутамінсинтетаза (GS).

Синтез глутамату:

Реакція: Глутамін + 2-Оксиглутар + $2\text{e}^- \rightarrow 2$ Глутамат

Фермент: Глутаматсинтаза (GOGAT), NADH- або ферредоксин-залежна.

Глутамат і глутамін є донорами аміногруп для інших амінокислот через трансамінування.

2. Синтез ароматичних амінокислот (фенілаланін, тирозин, триптофан) - шлях шикімату. Синтез ароматичних амінокислот із еритрозо-4-фосфату (цикл Кальвіна) та фосфоенолпірувату (гліколіз).

Утворення 3-дегідрохінату:

					162.01.14.00 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

Реакція: Еритрозо-4-фосфат + Фосфоенолпіруват $\rightarrow$ 3-Дегідрохінат + P_i
Фермент: ДАНР-синтаза.

Утворення шикімату:

Ферменти: Дегідрохінатдегідратаза, Шикіматдегідрогеназа.

Утворення хоризмата:

Реакція: Шикімат + Фосфоенолпіруват $\rightarrow$ Хоризмат

Фермент: Хоризматсинтаза.

Фенілаланін/Тирозин:

Хоризмат $\rightarrow$ Префенат (Хоризматмутаза) $\rightarrow$ Фенілпіруват/4-Гідроксифенілпіруват (Префенатдегідратаза/Дегідрогеназа) $\rightarrow$ Фенілаланін/Тирозин (Ароматична аміотрансфераза).

Триптофан:

Хоризмат + Глутамін $\rightarrow$ Антранілат (Антранілатсинтаза) $\rightarrow$ Індо-3-гліцерофосфат $\rightarrow$ Триптофан (Триптофансинтаза).

3. Синтез сімейства аспартату (аспартат, лізин, метіонін, треонін)

Аспартат:

Реакція: Оксалоацетат + Глутамат $\rightarrow$ Аспартат + 2-Оксиглутар

Фермент: Аспартатаміотрансфераза (AST).

Лізин (шлях діамінопімелату): Аспартат $\rightarrow$ Аспартил-4-фосфат (Аспартаткіназа) $\rightarrow$ Дигідропіколінат $\rightarrow$ Діамінопімелат (Дигідропіколінатсинтаза) $\rightarrow$ Лізин (Лізіндекарбоксилаза).

Метіонін: Аспартат $\rightarrow$ Гомосерин (Гомосериндегідрогеназа) $\rightarrow$ Цистатіонін (Цистатіонін- γ -синтаза) $\rightarrow$ Гомоцистеїн $\rightarrow$ Метіонін (Метіонінсинтаза).

Треонін: Гомосерин $\rightarrow$ Фосфогомосерин (Гомосеринкіназа) $\rightarrow$ Треонін (Треонінсинтаза).

4. Синтез сімейства глутамату (глутамат, глутамін, пролін, аргінін)

Пролін: Глутамат $\rightarrow$ Глутаміл-5-фосфат (Глутамілкіназа) $\rightarrow$ Δ^1 -Піролін-5-карбоксилат $\rightarrow$ Пролін (Піролін-5-карбоксилатредуктаза).

					162.01.14.00 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		27

Аргінін: Глутамат → N-Ацетилглутамат (N-Ацетилглутаматкиназа) → Орнітин (Орнітинтранскарбамоїлаза) → Цитрулін → Аргінін (Аргиносукцинатсинтаза, Аргиносукцинатліаза).

5. Синтез сімейства пірувату (аланін, валін, лейцин, ізолейцин)

Аланін: Реакція: Піруват + Глутамат → Аланін + 2-Оксиглутар
Фермент: Аланінтрансфераза (ALT).

Валін/Ізолейцин: Піруват/Треонін → 2-Ацетолактат (Ацетолактатсинтаза) → Валін/Ізолейцин (Ізомераза, Дегідратаза, Валін/Ізолейцинамінотрансфераза).

Лейцин: Валін-попередник → 2-Ізопропілмалат (Ізопропілмалатсинтаза) → Лейцин (Ізопропілмалатдегідрогеназа, Лейцинамінотрансфераза).

6. Синтез серину, гліцину, цистеїну

Серин: Реакція: 3-Фосфогліцерат → Фосфосерин → Серин

Ферменти: Фосфогліцератдегідрогеназа, Фосфосеринтрансфераза.

Гліцин: Реакція: Серин + Тетрагідрофолат → Гліцин + Метилентетрагідрофолат

Фермент: Серингідроксиметилтрансфераза.

Цистеїн: Серин + Ацетил-КоА → О-Ацетилсерин (Серин-ацетилтрансфераза) → Цистеїн (О-Ацетилсеринсульфгідрилаза).

7. Синтез гістидину

Рибозо-5-фосфат → Імідазолгліцерофосфат (Гістидинолфосфатсинтаза, Імідазолгліцерофосфатдегідратаза) → Гістидин (Гістидинолдегідрогеназа).

Білки синтезуються на рибосомах шляхом транскрипції та трансляції.

Транскрипція. Реакція: ДНК + NTPs → мРНК + PPi

Фермент: РНК-полімераза II (ядро) або хлоропластна/мітохондріальна РНК-полімераза.

Трансляція складається із етапів ініціації, елонгації, термінації.

Ініціація: мРНК + Met-тРНК + рибосома (Фактори: eIF2, eIF4E, eIF4G).

Елонгація: Реакція: Аміноацил-тРНК + Поліпептид → Поліпептид+1 + тРНК
Ферменти: EF-Tu, EF-G, Аміноацил-тРНК-синтетаза.

Термінація: Стоп-кодон (UAA, UAG, UGA) + eRF1, eRF3.

Енергетика: 4 АТФ/ГТФ на амінокислоту, джерело – фотосинтез.

Наступним етапом є посттрансляційна модифікація (ПТМ) поліпептидного ланцюга. ПТМ поліпептидного ланцюга у водоростях, зокрема у мікроводоростях, таких як *Ankistrodesmus falcatus*, відбувається в різних компартментах клітини залежно від типу модифікації та локалізації білка. Оскільки водорості є еукаріотичними організмами, їхня клітинна організація включає ядро, цитоплазму, ендоплазматичний ретикулум (ЕПР), апарат Гольджі, хлоропласти, мітохондрії та інші органели, які беруть участь у ПТМ [8, 12, 16].

Ендоплазматичний ретикулум (ЕПР) є основним компартментом для початкових етапів ПТМ, зокрема глікозилювання та формування дисульфідних зв'язків для білків, призначених для секреції, мембранної локалізації або транспорту до інших органел.

Типи модифікацій:

Н-глікозилювання - додавання олігосахаридів до азоту залишків аспарагіну. Відбувається в грубому ЕПР за участю ферменту олігосахарилтрансфери.

Формування дисульфідних зв'язків - окислення цистеїнових залишків для стабілізації структури білка, каталізоване ферментом протеїндисульфідізомеразою.

Складання білка - шаперони (наприклад, BiP, калнексин) у ЕПР допомагають у правильному фолдингу.

Білки, призначені для клітинної мембрани або хлоропластів, часто проходять попереднє глікозилювання в ЕПР. У зелених водоростей, таких як *A. falcatus*, ЕПР відіграє ключову роль у модифікації білків фотосинтетичного апарату, які потім транспортуються до хлоропластів.

					162.01.14.00 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		29

Апарат Гольджі відповідає за подальшу обробку та сортування глікопротеїнів, що надійшли з ЕПР, а також за специфічні модифікації вуглеводних ланцюгів.

Типи модифікацій:

О-глікозилювання - додавання цукрів до гідроксильних груп серину або треоніну.

Модифікація N-глікозидів - редагування олігосахаридів (видалення манози, додавання глюкози) за участю глікозилтрансфераз.

Сульфатування або фосфорилювання вуглеводів - зустрічається в деяких водоростевих глікопротеїнах, що беруть участь у клітинній сигналізації.

Глікопротеїни клітинної стінки водоростей (наприклад, гідроксипролін-вмісні білки) модифікуються в апараті Гольджі перед секрецією. У *A. falcatus* апарат Гольджі відіграє важливу роль у синтезі компонентів клітинної стінки, які включають глікопротеїни та полісахариди.

У *цитоплазмі* відбуваються модифікації, що не потребують мембранних компартментів, зокрема фосфорилювання, ацетилювання та убіквітинування.

Типи модифікацій:

Фосфорилювання - додавання фосфатних груп до серину, треоніну або тирозину за участю протеїнкіназ. Регулює активність ферментів і сигнальні шляхи.

Ацетилювання - додавання ацетильних груп до лізину (гістонові та негістонові білки) за участю ацетилтрансфераз. Впливає на стабільність і функцію білка.

Убіквітинування - приєднання убіквітину до білків для їх деградації в протеасомах, каталізоване убіквітинлігазами.

Метилювання - додавання метильних груп до лізину або аргініну, часто для регуляції транскрипції (гістони).

У водоростях фосфорилювання регулює активність ферментів фотосинтезу, таких як рибулозо-1,5-бісфосфаткарбоксилаза/оксигеназа

					162.01.14.00 000 ПЗ	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

(Рубіско). У *A. falcatus* цитоплазматичні модифікації важливі для регуляції метаболізму під впливом стресових умов (наприклад, дефіциту азоту).

Хлоропласти є місцем синтезу та модифікації білків, пов'язаних із фотосинтезом, які кодуються як ядерним, так і хлоропластним геномом.

Типи модифікацій:

Протеолітичне процесування - видалення сигнальних пептидів із ядерно-кодованих білків, що імпортуються до хлоропластів через ТІС/ТОС-комплекси, за участю стромальних пептидаз.

Складання білкових комплексів - шаперони (Hsp70, Cpn60) у стромі допомагають у фолдингу фотосинтетичних білків (наприклад, підоддиниць Рубіско).

Фосфорилування - модифікація білків фотосистеми II (PSII) для регуляції світлового захоплення.

Тіол-дисульфідна регуляція - окислення/відновлення дисульфідних зв'язків у ферментах циклу Кальвіна (наприклад, фруктозо-1,6-бісфосфатаза) за участю тіоредоксинів.

Хлоропласти водоростей мають власну ДНК і рибосоми, тому деякі білки синтезуються та модифікуються безпосередньо в стромі. У *A. falcatus* хлоропластні білки, такі як D1-протеїн PSII, зазнають протеолітичного процесування та фосфорилування для підтримки фотосинтетичної активності.

Мітохондрії модифікують білки, пов'язані з диханням і енергетичним метаболізмом, переважно ядерно-кодовані, що імпортуються через ТОМ/ТІМ-комплекси.

Типи модифікацій:

Протеолітичне процесування - видалення мітохондріальних сигнальних пептидів за участю мітохондріальних пептидаз.

Фолдинг - шаперони (mtHsp70) забезпечують складання білків.

Фосфорилування - регуляція ферментів ТЦК (наприклад, піруватдегідрогенази).

					162.01.14.00 000 ПЗ	Арк.
						31
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Мітохондрії водоростей менш активні в модифікаціях порівняно з ЕПР і хлоропластами, але важливі для енергетичних білків. Білки цитохромного комплексу в *A. falcatus* зазнають процесування для інтеграції в мітохондріальну мембрану.

У ядрі модифікуються білки, пов'язані з регуляцією транскрипції, зокрема гістони.

Типи модифікацій:

Ацетилювання та метилювання - модифікація гістонів (лізин, аргінін) для регуляції експресії генів за участю гістонацетилтрансфераз і метилтрансфераз.

Фосфорилювання - регуляція транскрипційних факторів. У *A. falcatus* ацетилювання гістонів може впливати на експресію генів, пов'язаних із синтезом білків під час стресу.

Протеасоми та цитозоль. У цитозолі розташовані 26S-протеасоми, які деградують убіквітиновані білки, що є формою ПТМ для регуляції білкового пулу.

Типи модифікацій:

Убіквітинування - приєднання убіквітину до білків, позначених для деградації, за участю убіквітинлігаз. У водоростях деградація пошкоджених білків регулює адаптацію до світлового стресу.

Особливості посттрансляційної модифікації у *Ankistrodesmus falcatus*:

1. *Фотосинтетичні білки.* У *A. falcatus* значна частина ПТМ зосереджена в хлоропластах, де модифікуються білки фотосистем (PSII, PSI) і Рубіско. Фосфорилювання та тіоредоксин-залежна регуляція відіграють ключову роль у адаптації до змін освітлення.

2. *Білки клітинної стінки.* Глікопротеїни, модифіковані в ЕПР і апараті Гольджі, беруть участь у формуванні клітинної стінки, що важливо для захисту та росту.

3. *Регуляторні модифікації.* Фосфорилювання та ацетилювання в

					162.01.14.00 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

цитоплазмі та ядрі регулюють метаболічні шляхи, зокрема синтез білків (44,4–46,4% у сухій масі), що робить *A. falcatus* цінною для виробництва гідролізатів.

4. *Адаптивність*. ПТМ у *A. falcatus* залежить від умов культивування (світло, азот), що впливає на функціональність білків.

Таким чином, біосинтез амінокислот у *Ankistrodesmus falcatus* включає асиміляцію азоту, синтез вуглецевих скелетів і спеціалізовані шляхи. Білковий синтез забезпечується транскрипцією, трансляцією та модифікаціями. Посттрансляційна модифікація поліпептидного ланцюга у водоростях, зокрема *A. falcatus*, відбувається переважно в ендоплазматичному ретикулумі (глікозилювання, дисульфідні зв'язки), апараті Гольджі (обробка гліканів), хлоропластах (процесування фотосинтетичних білків), цитоплазмі (фосфорилювання, ацетилювання), мітохондріях (процесування дихальних білків) і ядрі (модифікація гістонів). Кожен компартмент забезпечує специфічні модифікації, що визначають функцію, стабільність і локалізацію білків, сприяючи адаптивності водоростей і їх біотехнологічному потенціалу. Високий вміст білка (46%, високий вміст лейцину, валіну, ізолейцину, фенілаланіну, метіоніну) робить вид перспективним для виробництва білкових гідролізатів, але потрібна оптимізація умов культивування (світло, азот).

					162.01.14.00 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		33

3 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

3.1 Розрахунок витрат компонентів

За 1 серію виробляється 100 кг продукту – білкового гідролізату з мікроводорості *Ankistrodesmus falcatus*. Враховуючи вміст білка 46,4 % у біомасі культури при вирощуванні на середовищі BBM [14] та приймаючи втрати білка 20 %, для отримання 100 кг гідролізату потрібно 250 кг сухої біомаси. Продуктивність *A. falcatus* на середовищі BBM: 2,2 г/л [36], тоді об'єм культури, що потрібно отримати у фотобіореакторі: $250 \text{ кг} \div 0,0022 \text{ кг/л} = 113\,636 \text{ л}$. Враховуючи втрати та коефіцієнт заповнення, середовища BBM потрібно 120000 л. Розрахуємо витрати компонентів на 1 серію продукту (табл. 3.1).

Таблиця 3.1

Витрати компонентів середовища BBM на 1 серію продукту

Компоненти середовища	Витрати компонентів,	
	г/л	на 1 серію, кг
NaNO ₃	0,25	30
K ₂ HPO ₄	0,075	9
KH ₂ PO ₄	0,175	21
MgSO ₄ ·7H ₂ O	0,075	9
CaCl ₂ ·2H ₂ O	0,025	3
NaCl	0,025	3
FeSO ₄ ·7H ₂ O	0,00498	0,598
H ₃ BO ₃	0,01142	1,370
ZnSO ₄ ·7H ₂ O	0,00882	1,058
MnCl ₂ ·4H ₂ O	0,00144	0,173
CuSO ₄ ·5H ₂ O	0,00157	0,188
Co(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O	0,00049	0,059
Na ₂ MoO ₄ ·2H ₂ O	0,00119	0,143
Na ₂ EDTA·2H ₂ O	0,05	6
KOH	0,031	3,72
Вода деіонізована	до 1 л	до 120000 л

3.2 Обґрунтування та вибір обладнання

Основним обладнанням в технології отримання білкових гідролізатів на основі культури мікроводорості є системи культивування. Мікроводорості легко вирощуються у лабораторних умовах, однак забезпечити високу продуктивність у промислових масштабах є складним завданням.

Системи культивування мікроводоростей поділяються на два основні типи: відкриті водойми (ставки) і фотобіореактори. Кожен тип має свої особливості, переваги та недоліки, які визначають їх придатність для виробництва біомаси, зокрема для отримання білкових гідролізатів [17, 28].

Відкриті системи (рис. 3.1) – це штучні басейни або ставки, зазвичай розташовані на відкритому повітрі, де мікроводорості культивуються в природних або контрольованих умовах. Найпоширеніші конструкції – це ставки водоканали, що мають овальну форму з каналами, обладнані лопатевими колесами для перемішування культури, або круглі ставки з центральним змішувачем.

Характеристики відкритих систем культивування водоростей наведені у табл. 3.1 [32, 35]. У промислових системах у Австралії та Індії водоканальні ставки використовуються для культивування *Spirulina* і *Chlorella*, досягаючи концентрації біомаси 0,5–1 г/л [27]. Відкриті ставки можуть бути використані для культивування *A. falcatus* у регіонах із теплим кліматом (наприклад, південь України), але ризик контамінації та нестабільна продуктивність обмежують їх придатність для виробництва високоякісних білкових гідролізатів.

					162.01.14.00 000 ПЗ	Арк.
						35
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

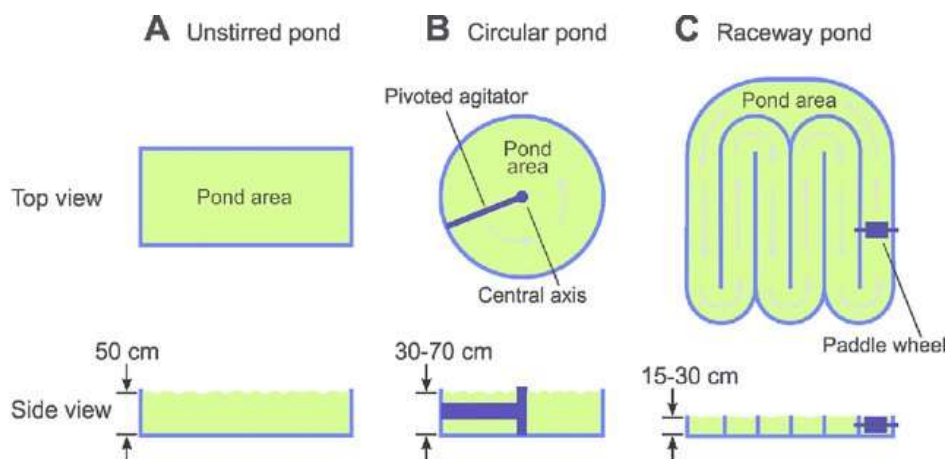


Рис. 3.1 - Приклади різних типів відкритих ставкових систем [32]:

А) Ставок без перемішування В) Круговий ставок С) Водоканал

Таблиця 3.1

Характеристика відкритих систем культивування водоростей [28, 32, 35]

Показник	Характеристика
Конструкція:	Прості відкриті резервуари глибиною 15–50 см, виготовлені з бетону, пластику або землі, покритої полімерною плівкою. Перемішування забезпечує циркуляцію поживного середовища та запобігає седиментації клітин.
Освітлення:	Залежить від природного сонячного світла, що обмежує продуктивність у регіонах із низькою інсоляцією або в зимовий період.
Температура:	Неконтрольована, залежить від клімату, що може спричиняти коливання продуктивності.
Поживне середовище:	Використовуються нітрати, фосфати, мікроелементи; рН регулюється додаванням CO ₂ .
Контамінація:	Високий ризик забруднення іншими мікроорганізмами (бактерії, гриби, зоопланктон) через відкриту систему.
Продуктивність:	Для <i>Chlorella vulgaris</i> (аналог <i>A. falcatus</i>) річний вихід становить 5–7 кг/м ² сухої біомаси. Продуктивність залежить від виду водорості, клімату та управління.
Економічні аспекти:	Низькі капітальні витрати: будівництво та обслуговування дешевші порівняно з фотобіореакторами. Низькі операційні витрати: мінімальне енергоспоживання (перемішування, подача CO ₂). Високі витрати на збір: фільтрація чи центрифугування становить 20–30% загальних витрат через низьку концентрацію біомаси (0,5–1 г/л).
Переваги:	Простота конструкції та експлуатації. Економічно вигідні для великомасштабного виробництва низькоцінної біомаси (біопаливо, корми). Можливість використання відпрацьованих вод для

	культивування, що знижує витрати.
Недоліки:	Високий ризик контамінації, що знижує якість біомаси для харчових продуктів, таких як білкові гідролізати. Низька контрольованість умов (світло, температура, рН). Низька продуктивність порівняно з фотобіореакторами. Втрата води через випаровування, особливо в посушливих регіонах.

Фотобіореактори (ФБР) – це закриті системи, призначені для контрольованого культивування мікробіодоростей. Вони можуть мати різні конструкції: плоскі панелі, колонні або трубчасті (вертикальні або горизонтальні труби) (рис. 3.2). ФБР забезпечують ізоляцію культури від зовнішнього середовища та точний контроль умов. Характеристики фотобіореакторів наведено у табл. 3.2 [32, 35].

Фотобіореактори ідеально підходять для культивування водоростей для виробництва високоякісних білкових гідролізатів, оскільки забезпечують контрольовані умови, високу чистоту культури та максимальний вміст білка. Трубчасті або плоскі ФБР ефективні для лабораторного та напівпромислового масштабів, колонні та кільцеві – для промислового виробництва. У Європі (Німеччина, Нідерланди) трубчасті фотобіореактори використовуються для культивування *Chlorella* і *Spirulina* для нутрицевтиків, досягаючи продуктивності 20–30 г/м²/день.

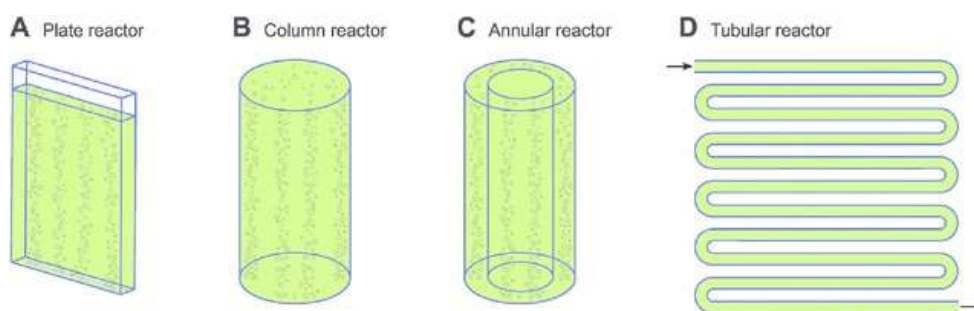


Рис. 3.2 - Приклади різних типів закритих систем - фотобіореакторів [32]:
А) Плоский реактор. В) Колонний реактор. С) Кільцевий реактор.
Д) Трубчастий реактор.

Від А до С: бульбашки, що піднімаються, створюють потік, а також забезпечують перемішування та аерацію. D: аерація та перемішування здійснюється за допомогою повітряного насоса або систем повітряного підйому

Характеристика закритих систем культивування водоростей [32, 35, 37]

Показник	Характеристика
Конструкція:	Виготовляються з прозорих матеріалів (скло, акрил, полікарбонат) для максимального проникнення світла. Обладнані системами перемішування (повітряні насоси, турбіни), датчиками рН, температури та освітлення.
Освітлення:	Використовується природне або штучне світло (LED-лампи), що дозволяє цілорічне культивування та оптимізацію фотосинтезу.
Температура:	Контролюється системами охолодження/нагрівання, оптимальна для <i>A. falcatus</i> – 20–30°C.
Поживне середовище:	Точно дозується, з можливістю рециркуляції для економії ресурсів.
Контамінація:	Мінімальний ризик завдяки закритій системі та стерильним умовам.
Продуктивність:	Для <i>Chlorella vulgaris</i> річний вихід становить до 15 кг/м ² сухої біомаси, що в 2–3 рази вище, ніж у відкритих ставках. Концентрація біомаси досягає 2–5 г/л.
Економічні аспекти:	Високі капітальні витрати: складна конструкція, дорогі матеріали та обладнання. Високі операційні витрати: енергоспоживання для освітлення, перемішування, охолодження. Знижені витрати на збір: вища концентрація біомаси полегшує фільтрацію чи центрифугування.
Переваги:	Висока продуктивність і стабільна якість біомаси. Контроль умов дозволяє оптимізувати ріст <i>A. falcatus</i> і вміст білка (44,4–46,4%). Низький ризик контамінації, що критично для виробництва харчових продуктів, таких як білкові гідролізати. Можливість культивування в будь-яких кліматичних умовах.
Недоліки:	Висока вартість будівництва та експлуатації, що обмежує масштабування. Складність очищення та стерилізації системи. Обмежена площа для світлопроникнення в великих ФБР (проблема самоекранування).

Таким чином, відкриті водойми є економічно вигідним рішенням для великомасштабного культивування мікрowodоростей, але їх низька продуктивність, високий ризик контамінації та залежність від клімату обмежують застосування для високоякісних продуктів, таких як білкові гідролізати. *A. falcatus* може культивуватися у відкритих ставках у регіонах із стабільним теплим кліматом, але потрібні заходи для зниження контамінації

(наприклад, селективні поживні середовища). Продуктивність буде нижчою, а якість біомаси може не відповідати вимогам для харчових гідролізатів через ризик забруднення. Закриті системи забезпечують високу чистоту культури *A. falcatus*, що критично для отримання білкових гідролізатів із високим вмістом білка. Контроль освітлення (12–16 год/день) і азоту оптимізує амінокислотний профіль, зокрема вміст лейцину, валіну та ізолейцину. Фотобіореактори, попри високу вартість, забезпечують контрольовані умови, високу продуктивність і чистоту біомаси, що робить їх ідеальними для виробництва нутрицевтиків і харчових добавок. Для *A. falcatus* фотобіореактори є кращим вибором, оскільки дозволяють максимізувати вміст білка та забезпечити відповідність стандартам безпеки (наприклад, EFSA, FDA) [34, 35].

Розглянемо ще такі перспективні технології культивування водоростей як BICCAPS та можливості її конфігурації у вигляді біоплівки. Останніми роками у галузі культивування водоростей досліджуються можливості системи BICCAPS (Bicarbonate-based Integrated Carbon Capture and Algae Production System) - інтегрована система, яка поєднує культивування мікроводоростей із захопленням вуглецю (рис. 3.3). У цій системі бікарбонат натрію (NaHCO_3) використовується як джерело неорганічного вуглецю для фотосинтезу мікроводоростей. Система спрямована на: захоплення CO_2 шляхом його конверсії в бікарбонат, виробництво біомаси мікроводоростей у контрольованих умовах; зменшення викидів вуглецю за рахунок використання бікарбонату замість прямого введення CO_2 [29].

					162.01.14.00 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		39

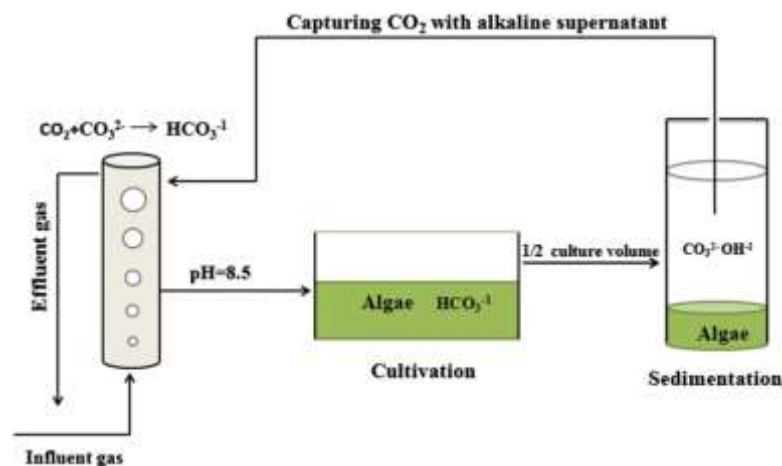


Рис. 3.3 – Загальна схема реалізації BICCAPS системи [29]

Система може бути реалізована як у закритих фотобіореакторах, так і в інших конфігураціях, включаючи біоплівкові системи, де мікрободорості ростуть у вигляді біоплівки на поверхні субстрату [30].

На основі аналізу літературних джерел *A. falcatus* є придатною для культивування в BICCAPS, зокрема в бікарбонатній системі:

1. *A. falcatus* є алкалофільною мікрободорою, яка добре адаптується до лужного середовища (pH 7–10), що ідеально відповідає умовам BICCAPS, де використання бікарбонату підвищує pH [29, 37]. Дослідження показали, що pH у системі з NaHCO_3 (10–30 г/л) зростає з часом, що не перешкоджає росту *A. falcatus* [29].

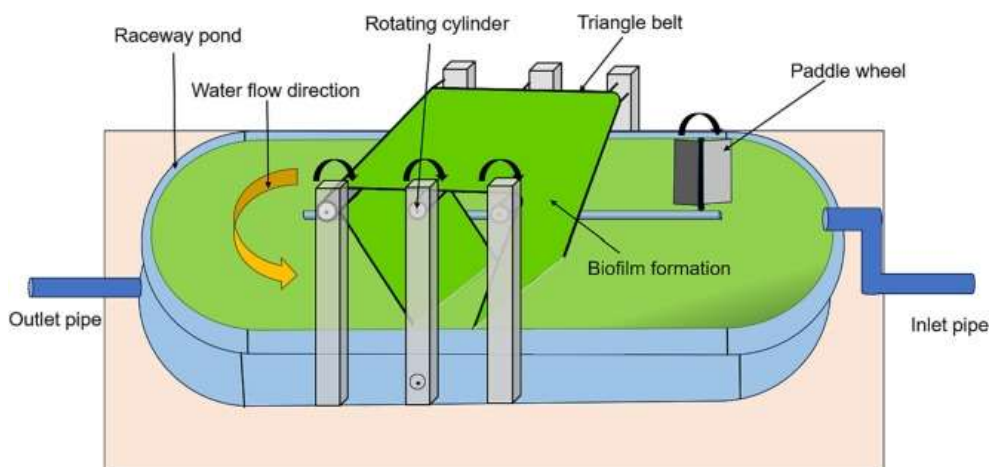
2. У дослідженні, проведеному Beltran et al. (2018), *A. falcatus* культивували в BICCAPS із різними концентраціями NaHCO_3 (10 г/л і 30 г/л) у комерційних поживних середовищах BRSP і NPK із додаванням добрив. Найвища продуктивність біомаси досягала 3,56 мг/л/день за концентрації 10 г/л NaHCO_3 у середовищі BRSP, хоча це на 30% нижче, ніж у контрольному експерименті з аерованим біореактором. Конверсія неорганічного вуглецю становила $1,17\text{--}1,51 \times 10^{-4}$ моль/л/день, що підтверджує ефективне використання бікарбонату *A. falcatus* для фотосинтезу [29].

3. *A. falcatus* демонструє високу адаптивність до різних поживних

середовищ (наприклад, BRSP, NPK, BBM, COMBO) [29, 36, 37], які можуть використовуватися в BICCAPS. Дослідження показали, що BBM і COMBO забезпечують кращі показники росту (щільність клітин $>3,5 \times 10^7$ клітин/мл, біомаса $>2,2$ г/л) порівняно з Bristol. У BICCAPS середовища BRSP і NPK з NaHCO_3 підтримували ріст *A. falcatus*, хоча продуктивність залежала від концентрації бікарбонату.

5. Можливість реалізації системи BICCAPS у біоплівковій конфігурації. Потенціал біоплівкового культивування для *A. falcatus* [30]. Так, *A. falcatus* (штам SAG202-9) демонструє здатність до самофлокуляції, що сприяє формуванню біоплівки та полегшує збір біомаси.

Біоплівкові системи, такі як Revolving Algal Biofilm (RAB), дозволяють ефективно вирощувати мікробіодорості, зменшуючи витрати на збір (скорочення етапів флокуляції чи центрифугування - у біоплівковій системі біомасу можна збирати шляхом механічного зішкрябування, що знижує витрати порівняно з центрифугуванням у суспензійних культурах) [30]. *A. falcatus* може бути адаптована до таких систем завдяки своїм морфологічним і фізіологічним характеристикам (дрібні клітини, швидке подвоєння). Приклади вирощування водоростей у відкритих та закритих системах у вигляді біоплівок на носіях, наприклад лігнінових матеріалах, наведено на рис. 3.4.



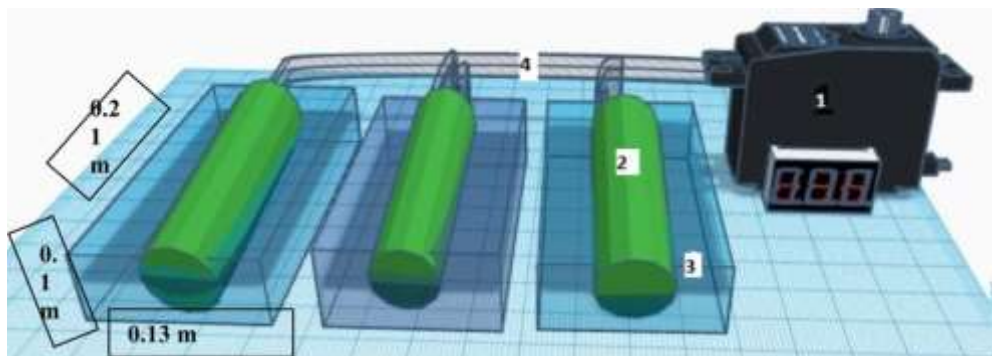


Рис. 3.4 – Вирощування водоростей у вигляді біоплівки у відкритій системі (циркуляційний ставок) та у закритій системі (обертовий біоплівковий фотобіореактор) [30]

A. falcatus має високий вміст білка (на рівні 45%), що робить її цінною для виробництва гідролізатів. BICCAPS, особливо в біоплівковій конфігурації, забезпечує чистоту культури, що критично для харчових продуктів, порівняно з відкритими системами, де ризик контамінації вищий. Але використання цієї системи має певні обмеження та виклики, що пов'язано із зниженням продуктивності, необхідністю проведення додаткових досліджень саме для культивування *A. falcatus* у системах BICCAPS, зокрема і у біоплівковій конфігурації, та вартістю організації.

Так, за даними літератури продуктивність *A. falcatus* у BICCAPS (3,56 мг/л/день) нижча, ніж у традиційних аерованих фотобіореакторах, через обмежену доступність вуглецю в бікарбонатній формі та можливе підвищення рН до алкалінових значень, що може частково пригнічувати ріст.

Хоча *A. falcatus* здатна до самофлокуляції, формування стабільної біоплівки може вимагати оптимізації субстрату (наприклад, текстури, гідрофільності) та умов (освітлення, потік поживного середовища). Дослідження біоплівкових систем для *A. falcatus* обмежені, але аналогічні види (*Chlorella*, *Scenedesmus*) успішно культивуються в RAB-системах.

BICCAPS, особливо в закритих фотобіореакторах або біоплівкових системах, має вищі капітальні та операційні витрати порівняно з відкритими

ставками. Для економічної доцільності потрібна оптимізація (наприклад, використання відпрацьованих вод як поживного середовища).

У бікарбонатній системі ризик контамінації нижчий, ніж у відкритих водоймах, але в біоплівковій конфігурації потрібно забезпечити стерильність субстрату, щоб уникнути росту небажаних мікроорганізмів.

Проаналізувавши переваги та недоліки різних систем культивування водоростей та враховуючи реалії вітчизняних підприємств, у роботі ми зупинились на використанні біореакторів. Але, враховуючи подальші перспективи організації комплексної переробки продуктів, що отримують з водорості (окрім білкових гідролізатів ще перспективним є виділення ліпідної фракції та отримання біодизеля), та можливості зниження витрат за рахунок переробки стічних вод при культивуванні водоростей, ми розробили ряд рекомендацій для агрофірми, які можна застосувати при модифікації закритої системи для застосування плівкової конфігурації. У випадку використання BICCAPS для культивування *A. falcatus* раціональними заходами будуть:

1. Для подолання недоліка нижчої продуктивності для її підвищення доцільним є використання концентрації NaHCO_3 10-30 г/л у середовищі BRSP. Для уникнення надмірного залуження необхідно контролювати рН на рівні 7,5–9.

2. Для оптимального росту доцільним є освітлення 1,5–2,0 klux і температуру 20–30°C.

3. Для забезпечення біоплівкових систем доцільно використовувати гідрофільні субстрати (наприклад, бавовняні або полімерні мембрани), які сприяють адгезії *A. falcatus*.

4. Для підтримки фотосинтезу доцільно застосовувати періодичне зволоження субстрату поживним середовищем із бікарбонатом.

5. Для забезпечення високої щільності біомаси та вмісту білка доцільно використовувати BBM або COMBO із підвищеним вмістом азоту (750 мг/л) і заліза (9 мг/л).

					162.01.14.00 000 ПЗ	Арк.
						43
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Отже, ми зупинились на використанні закритої системи із використанням фотобіореактора, серед яких ефективними для забезпечення високої продуктивності біомаси водорості є колонні апарати. Забезпечення подачі вуглекислого газу відбувається за рахунок барботажного пристрою або ерліфту (рис. 3.5). Ерліфтні реактори мають характерну перевагу створення циркуляційної схеми перемішування, в якій рідка культура безперервно проходить через темну та світлу фази, створюючи мерехтливий ефект на клітинах водоростей [37].

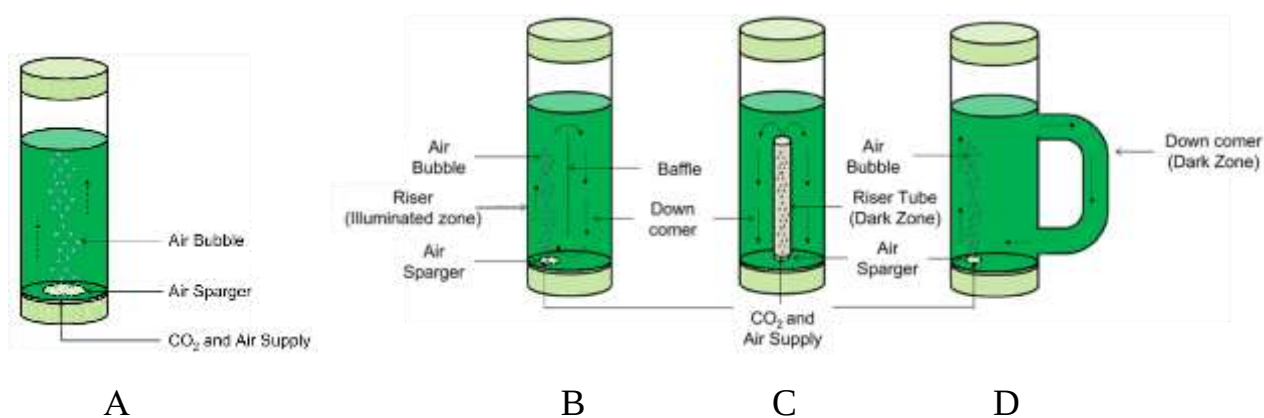


Рис. 3.5 – Схема роботи колонних фотобіореакторів:

A – з барботажною колоною, B, C, D – з ерліфтом (B – з внутрішнім циклом, C – концентричні з внутрішнім циклом, D – з зовнішнім циклом) [37]

Для забезпечення вирощування продуцента на підприємстві пропонується колонний ерліфтний фотобіореактор з розділеними пластинами, адаптована схема якого наведена на рис. 3.6 [37].

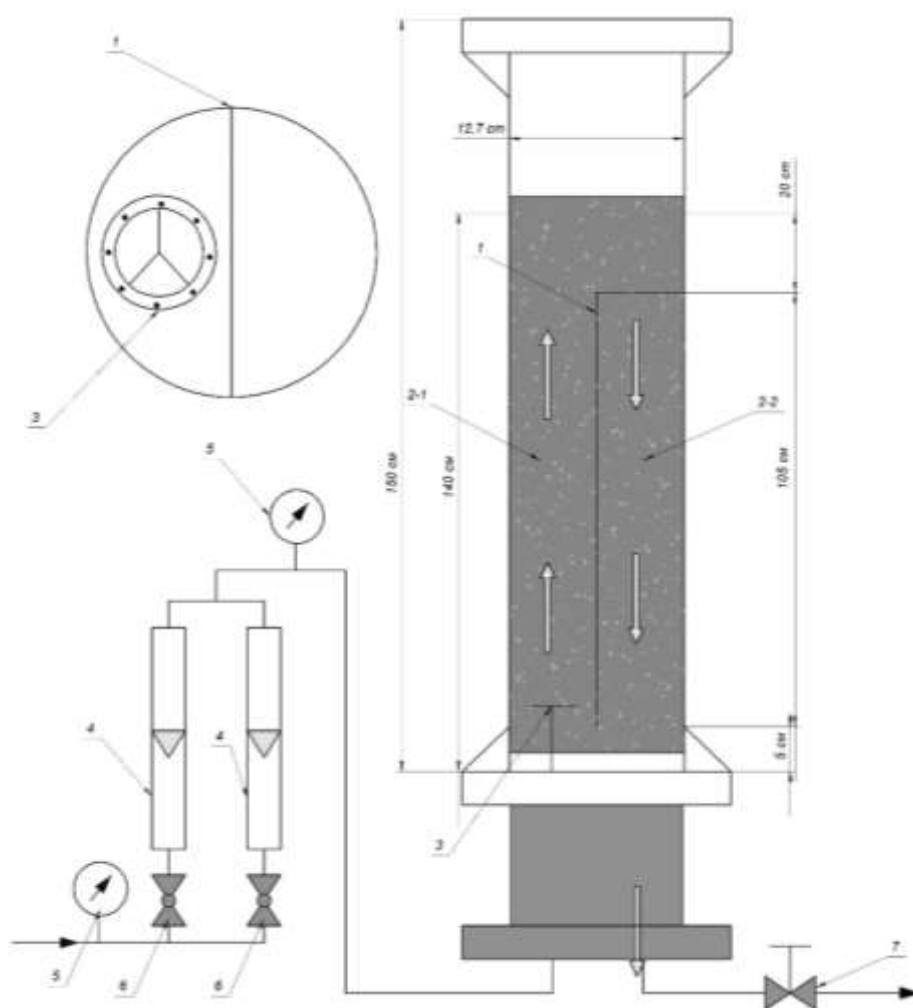


Рис. 3.6 – Ерліфтний фотобіореактор з розділеними пластинами:

1 – роздільна пластина, 2-1, 2-2 – робоча зона (підймальна та спускова), 3 – кільцевий розпилювач (барботер), 4 – витратомір повітря, 5 – манометр, 6 – клапан регулювання повітря, 7 – клапан спуску води

Реактор складається з циліндричної колони з плексигласу з роздільною пластиною, розташованою в центрі колони. Функція роздільної пластини поділ колони на дві рівні площі поперечного перерізу: підймальну і спускову. Висота колони становить 150 см, а внутрішній діаметр - 12,7 см. Подача повітря до реактора здійснюється за допомогою кільцевого розпилювача, розташованого в нижній частині підймальної зони. Повітряний барботер

виготовлений з нержавіючої сталі та містить 15 отворів розміром 1 мм, рівномірно розподілених на верхній поверхні барботера. Газ - стиснене повітря безперервно подається від промислового компресора продуктивністю до 1250 м³/год та тиском 200 Psig. Повітря, що подається, осушується та регулюється за допомогою осушувача повітря та регулятора тиску перед тим, як потрапити в систему регулювання потоку повітря. Система регулювання потоку повітря складається з двох каліброваних витратомірів повітря, двох манометрів та двох клапанів. Подача повітря до розділеного ерліфтного реактора вимірюється та контролюється за допомогою системи керування потоком повітря.

3.3 Опис технологічного процесу

3.3.1 Обґрунтування технології отримання білкового гідролізату

Окрім стадії культивування мікрободорості, розглянутою у попередньому розділі, важливою стадією у виробництві білкових гідролізатів є стадія їх вилучення, що зумовлено складною будовою клітинних стінок мікрободоростей. Тому технології, спрямовані на руйнування клітинної стінки, мають критичне значення для успішної екстракції білків [18]. Окрім цього, саме стадія вилучення або відновлення білка є вирішальною для збереження його якості, харчової цінності та біоактивних властивостей, а також для його подальшого застосування у харчових продуктах, добавках і промислових виробках. Процеси обробки можуть включати як базові етапи, наприклад збір та сушіння біомаси, так і спеціалізовані методики екстракції та очищення. Вибір оптимального методу обробки значною мірою визначається видом мікрободорості, властивостями білка та його призначенням, з метою збереження максимальної біоактивності впродовж усього процесу. Останні досягнення у сфері виділення біоактивних речовин орієнтуються на розробку

					162.01.14.00 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46

щадних технологій, які дозволяють мінімізувати ушкодження та водночас забезпечують високий рівень вилучення [18, 20]. Серед таких методів визнана ефективною ферментативна екстракція з використанням протеаз або карбогідраз завдяки здатності руйнувати міцні клітинні стінки без втрати функціональних властивостей білка. Подібним чином, ультразвукова екстракція здобула велику увагу через свою ефективність у руйнуванні клітинних структур за допомогою кавітаційних ефектів. Ще один інноваційний підхід передбачає поєднання механічної підготовки з ферментативним гідролізом для підвищення виходу білка при збереженні його біоактивних властивостей [34].

Механічне вилучення. Одним із найпоширеніших підходів до руйнування клітинних стінок є використання високотискової гомогенізації та подрібнення, які забезпечують ефективний лізис клітин. Проте, зазначені методи вимагають значних енергетичних витрат і можуть призвести до пошкодження білків під дією сил зсуву. До механічних способів руйнування клітин належать методи, що базуються на передачі енергії або механічному розрізанні; прикладом останніх є подрібнення кульковими млинами. Цей підхід передбачає подрібнення та диспергування частинок до мікро- або нанорозмірів шляхом ударів між клітинами та кульками в спеціальному обладнанні. Ефективність такого лізису значною мірою залежить від розміру кульок і їхнього завантаження. Як матеріал для кульок зазвичай застосовують цирконієвий діоксид або скло - як у середовищах із високою, так і низькою в'язкістю [3, 4, 18, 34].

Хімічна екстракція. Цей метод передбачає використання розчинників або поверхнево-активні речовини для руйнування клітинної мембрани. Незважаючи на ефективність, існує ризик денатурації білків та утворення токсичних залишків, що обмежує застосування таких білків у харчових продуктах.

Кожен тип розчинника має специфічне призначення. Наприклад,

					162.01.14.00 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		47

органічні розчинники, наприклад метанол, етанол чи ізопропанол, ефективно розчиняють жири та інші ліпіди, сприяючи вивільненню білків. У поєднанні гексан з етанолом використовують для селективного розділення ліпідів і білків. Серед поверхнево-активних речовин потужну здатність руйнувати стійкі клітинні стінки має лаурилсульфат натрію, однак він може бути агресивним до білкової структури. Triton X-100 є м'якшим варіантом і дозволяє зберігати функціональність чутливих білків. Сечовина у високих концентраціях (6–8 М) допомагає денатурувати білки, роблячи їх легше розчинними, хоча це може змінити їхні функціональні властивості [3, 4, 18, 34].

Екстракція за допомогою ультразвуку. Цей метод базується на впливі високочастотних ультразвукових хвиль, які створюють кавітацію і тим самим руйнують клітинні стінки без потреби застосування агресивних хімічних речовин. Сам ультразвук не завжди є достатнім для лізису, але в поєднанні з іншими методами (наприклад, мацерацією) може значно підвищити ефективність екстракції [3, 4, 18, 34].

Ензимна екстракція. У цьому методі застосовуються ферменти, які вибірково руйнують компоненти клітинної стінки, не впливаючи на білкову структуру. Такий підхід забезпечує збереження функціональних і біоактивних властивостей білків. Основним обмеженням є вартість ферментів. Серед переваг цього підходу - висока селективність дії, оскільки ферменти цілеспрямовано впливають на компоненти стінки клітини, як-от целюлоза чи геміцелюлоза. Це дозволяє мінімізувати денатурацію білків, а такі біоактивні властивості, як антиоксидантна, протимікробна й протизапальна дія, залишаються незмінними. Для підвищення ефективності екстракції доцільно застосовувати комбіновані методи, зокрема ферментативно-механічні стратегії, які показали кращі результати, ніж окремі методики [3, 4, 18, 34].

Наступною важливою стадією є стадія сушіння. Сушіння відіграє ключову роль у процесі екстракції біомаси мікродоростей з метою

отримання білка. Метод сушіння, який обирається, значною мірою впливає на якість та функціональні властивості білків, зокрема через термочутливість окремих білкових компонентів. До поширених методів сушіння належать розпилювальне, конвекційне та ліофільне сушіння [18].

3.3.2 Опис технологічного процесу отримання білкового гідролізату

Технологічний процес виробництва білкового гідролізату з мікроводорості *Ankistrodesmus falcatus* на вітчизняній агрофірмі розроблено для отримання 100 кг готового продукту (білкового гідролізату) за одну серію. Кількість сировини та вихід продукту розраховані з урахуванням типового вмісту білка в *A. falcatus* (46,4%) та ефективності гідролізу (80% білка в гідролізаті). Виробництво відповідає українським стандартам (ДСТУ ISO 22000:2019, ДСТУ 4636:2006, НАССР) та передбачає використання дієтичної добавки у формі порошку (фасування в банки 100–500 г, саше 5–10 г).

Для 100 кг гідролізату потрібно 250 кг сухої біомаси (втрати білка 20%, вміст білка 46,4%). Продуктивність *A. falcatus* у ВВМ: 2,2 г/л. Об'єм культури: $250 \text{ кг} \div 0,0022 \text{ кг/л} = 113\,636 \text{ л}$. З врахуванням втрат потрібно 120 000 л середовища ВВМ.

Стадія 1. Підготовка виробництва

Мета: Забезпечити готовність приміщень, обладнання та барботажного повітря для стерильного та безпечного виробництва.

Приміщення цеху (клас чистоти ISO 7–8) обробляються дезінфікуючими засобами (2% розчин хлоргексидину або 70% етанол). Проводять вологе прибирання з подальшою обробкою УФ-лампами (30 хв). Система вентиляції з НЕРА-фільтрами забезпечує чистоту повітря. Температура в цеху: 20–25°C, вологість: 40–60%.

Фотобіореактор, фільтр-прес, шнековий прес, реактор для гідролізу, сушарка та фасувальна лінія мийуть гарячою водою (80°C), дезінфікують 1% розчином NaOCl і промивають стерильною водою. Автоклавування дрібного

					162.01.14.00 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		49

обладнання (колби, піпетки) при 121°C, 1 атм, 20 хв.

Трубопроводи та клапани дезінфікуються 70% етанолом.

Проводять підготовку барботажного повітря. Стиснене повітря (1250 м³/год, 200 Psig) з промислового компресора проходить через осушувач повітря (точка роси –40°C) і фільтри (0,22 мкм) для видалення вологи та мікроорганізмів. Повітря подається через систему контролю потоку (два витратоміри, два манометри, два клапани) для регулювання швидкості барботажу (0,5–1,0 vvm, об'єм повітря/об'єм середовища/хвилина).

Проводять перевірку обладнання. Перевірка герметичності фотобіореактора, працездатності датчиків (рН, температура, освітлення), насосів і клапанів. Калібрування витратомірів і манометрів для точного контролю повітря.

Дотримання ДСТУ ISO 22000:2019 (НАССР) для запобігання контамінації. Час підготовки – 6 год.

Стадія 2. Підготовка поживного середовища BBM

Мета: Приготувати стерильне поживне середовище Bold's Basal Medium (BBM) для культивування *A. falcatus*.

У реакторі (нержавіюча сталь, 150 м³) розчиняють макроелементи (NaNO₃: 30 кг, K₂HPO₄: 9 кг, KH₂PO₄: 21 кг, MgSO₄·7H₂O: 9 кг, CaCl₂·2H₂O: 3 кг, NaCl: 3 кг) у 100 000 л води, перемішуючи (200 об/хв). Окремо готують розчин мікроелементів (FeSO₄·7H₂O: 0,598 кг, H₃BO₃: 1,370 кг, ZnSO₄·7H₂O: 1,058 кг, MnCl₂·4H₂O: 0,173 кг, CuSO₄·5H₂O: 0,188 кг, Co(NO₃)₂·6H₂O: 0,059 кг, Na₂MoO₄·2H₂O: 0,143 кг) у 100 л води, додають Na₂EDTA·2H₂O: 6 кг і КОН: 3,72 кг. Змішують обидва розчини, доводять об'єм до 120 000 л. Регулюють рН до 6,8–7,0 (1 М HCl/NaOH). Стерилізують середовище автоклавуванням (121°C, 1 атм, 30 хв). Час: 6 годин (розчинення, стерилізація, охолодження).

Стерильність середовища критична для запобігання контамінації. Зберігання середовища: не більше 24 годин при 4°C до використання.

Стадія 3. Підготовка посівного матеріалу

					162.01.14.00 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		50

Мета: Отримати достатню кількість культури *A. falcatus* для інокуляції фотобіореактора.

Музейну культуру *A. falcatus* (зберігається при -80°C у 15% гліцерині) розморожують у водяній бані при 30°C (30 хвилин). У асептичних умовах (ламінарий бокс) переносять 10 мл культури в 10 колб (1 л) із 900 мл стерильного ВВМ. Вирощують у термостаті при 25°C , освітленні 2 клух (12 год світло/12 год темрява), перемішуючи на орбітальному шейкері (100 об/хв) протягом 7–10 днів до концентрації 0,1 г/л ($\sim 1 \times 10^7$ клітин/мл). Об'єднують культуру (10 л) і переносять у фотобіореактор. Контролюють асептичність (відсутність контамінації) та щільність культури спектрофотометрично (OD_{680}) (0,1 г/л).

Стадія 4. Культивування водорості в фотобіореакторі

Мета: Вирощувати *A. falcatus* до високої концентрації біомаси 2,2 г/л.

Заповнюють реактор стерильним середовищем. Вносять посівну культуру (10 л, 0,1 г/л). Культивують при: температурі 25°C , освітленні 2 клух (LED, 12 год світло/12 год темрява), подачі повітря: 0,5 л/хв на реактор, тиск 0,5 атм, рН 6,8–7,5 (регулюють CO_2 або NaHCO_3 10 г/л). Тривалість: 14 днів (до 2,2 г/л). Вихід на стадії: біомаси $120\,000\text{ л} \times 2,2\text{ г/л} = 264\text{ кг}$ сухої біомаси. Контролюють контамінацію.

Стадія 5. Відділення біомаси від культурального середовища

Мета: Отримати концентровану біомасу на фільтр-пресі.

Культуральну рідину (120 000 л) подають на фільтр-прес (полотняний, 0,5 мкм, 100 м², продуктивність 500 л/хв). Фільтрують при тиску 5 бар, отримуючи біомасу ($\sim 20\%$ сухої речовини). Промивають біомасу стерильною водою (5000 л) для видалення солей. Збирають фільтрат (середовище) для рециркуляції (стадія 11). Тривалість процесу 24 год. Вихід на стадії: біомаса: 264 кг сухої речовини ($\sim 1320\text{ кг}$ вологої, 20% сухої речовини), фільтрат: $\sim 118\,000\text{ л}$ (для рециркуляції).

Стадія 6. Руйнування клітин та віджим олій

					162.01.14.00 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		51

Мета: Зруйнувати клітинні стінки водоростей та видалити ліпіди для отримання білкової фракції.

Вологу біомасу (1320 кг) подають у шнековий прес (тиск 10 бар, продуктивність 500 кг/год). Пресують при 50°C для руйнування клітин і віджиму олій. Збирають тверду фракцію - жмих (білкову біомасу) і рідку (олії) у резервуари. Вихід на стадії: тверда фракція: ~250 кг (втрати ~5%), олії: ~14 кг (5% від біомаси). Олійну фракцію можливо використовувати для отримання біопалива або направляти на переробку та отримання косметичної продукції. Тривалість процесу 12 год. Контролюють вміст ліпідів (<5%).

Стадія 7. Ферментативний гідроліз

Мета: Розщепити білки до пептидів і вільних амінокислот.

Як фермент використовуємо алкалазу (серійна протеаза з *Bacillus licheniformis*, Novozymes), яка є високо специфічною до гідрофобних амінокислот (лейцин, валін), що відповідає профілю *A. falcatus*; працює в лужному середовищі (рН 8–9), сумісному з алкалофільністю водорості; сертифікована для харчового використання (FDA, EFSA); забезпечує високу біодоступність пептидів (<10 кДа, до 80 %).

Тверду фракцію - жмих (250 кг) змішують із водою (1:5, 1250 л) у реакторі. Нагрівають до 50°C, регулюють рН до 8,0 (1 М NaOH). Додають алкалазу (активність 2,4 АУ/г, 2% від маси білка, $250 \text{ кг} \times 46,4\% \times 2\% = 2,32 \text{ кг}$). Гідролізують 4 год при 50°C, 200 об/хв. Інактивують фермент нагріванням до 90°C на 10 хв, охолоджують суміш до 25°C. Вихід на стадії: гідролізат: ~125 кг сухого продукту (80% білка).

Стадія 8. Відділення білкових гідролізатів

Мета: Виділити розчинну фракцію гідролізату від нерозчинних залишків.

Використовуємо метод ультрафільтрації, який ефективно відокремлює пептиди (<10 кДа) від залишків клітинної стінки та великих молекул, зберігає біоактивність пептидів, екологічний, не потребує хімічних реагентів.

					162.01.14.00 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		52

Охолоджений гідролізат (1500 л) подають на ультрафільтраційну установку (мембрана: поліетерсульфон, поріг 10 кДа, тиск 4 бар, продуктивність 500 л/год). Тривалість процесу 12 год. Збирають пермеат (гідролізат) і ретенат (залишки). Промивають ретенат деіонізованою водою (100 л) для максимального вилучення пептидів. Вихід на стадії: пермеат: ~125 кг сухого гідролізату, ретенат: ~25 кг (для переробки).

Стадія 9. Сушіння білкових гідролізатів

Мета: Отримати сухий порошок гідролізату.

Використовуємо метод розпилювального сушіння, який зберігає біоактивність пептидів, забезпечує однорідний порошок із низькою вологістю (<5%) та є промислова масштабованим.

Пермеат (1500 л) подають у розпилювальну сушарку (продуктивність 500 л/год). Сушать при вхідній температурі 150°C, вихідній 80°C, тиску 2 бар. Збирають порошок у циклоні. Тривалість процесу 8 год. Вихід на стадії: сухий гідролізат: 100 кг (втрати ~20%). Контролюють вологість <5%.

Стадія 10. Отримання товарної форми

Мета: Упакувати гідролізат у товарну форму - порошок у банках (250 г) і саше (10 г).

Сухий гідролізат (100 кг) подають на фасувальну лінію (продуктивність 10 кг/год). Фасують у банки: 300 банок (HDPE) по 250 г (75 кг) та саше (фольга): 2500 саше по 10 г (25 кг). Упаковують у картонні коробки, додають етикетки (назва, склад, дозування, термін придатності, сертифікати). Контролюють герметичність упаковки, правильність етикетування.

Маркування: відповідно до Закону України «Про інформацію для споживачів щодо харчових продуктів» (№2639-VIII):

Назва: «Білковий гідролізат із мікрowodорості *Ankistrodesmus falcatus*».

Склад: перелік компонентів (включно з ферментами гідролізу).

Поживна цінність: енергетична цінність (~350 ккал/100 г), білки, жири, вуглеводи.

					162.01.14.00 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		53

Рекомендації: «Дорослим 5–10 г на добу, розчинити у воді».

Застереження: «Не перевищувати рекомендовану дозу», «Не є лікарським засобом».

Виробник: назва агрофірми ТОВ «Геліантус», адреса, контактні дані.

Сертифікаційні позначки: ISO, HACCP.

Стадія 11. Переробка та знешкодження відходів

Мета: Утилізувати відходи виробництва.

Відходами, що утворилися протягом процесу: фільтрат (118 000 л) - залишки поживного середовища, ретенат (25 кг) - нерозчинні залишки, олії (14 кг) - ліпідна фракція.

Фільтрат - рециркулюють 80% (94 400 л) після фільтрації (0,22 мкм) і корекції складу, решту (23 600 л) нейтралізують (рН 7,0, 1 М HCl) і скидають у каналізацію (при отриманні позитивних результатів).

Ретенат - компостують для виробництва біодобрив (змішують із соломою, аерують 30 днів).

Олії - використовують для виробництва біопалива або косметичних засобів (передають партнерам).

					162.01.14.00 000 ПЗ	Арк.
						54
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3.4 Схеми виробництва

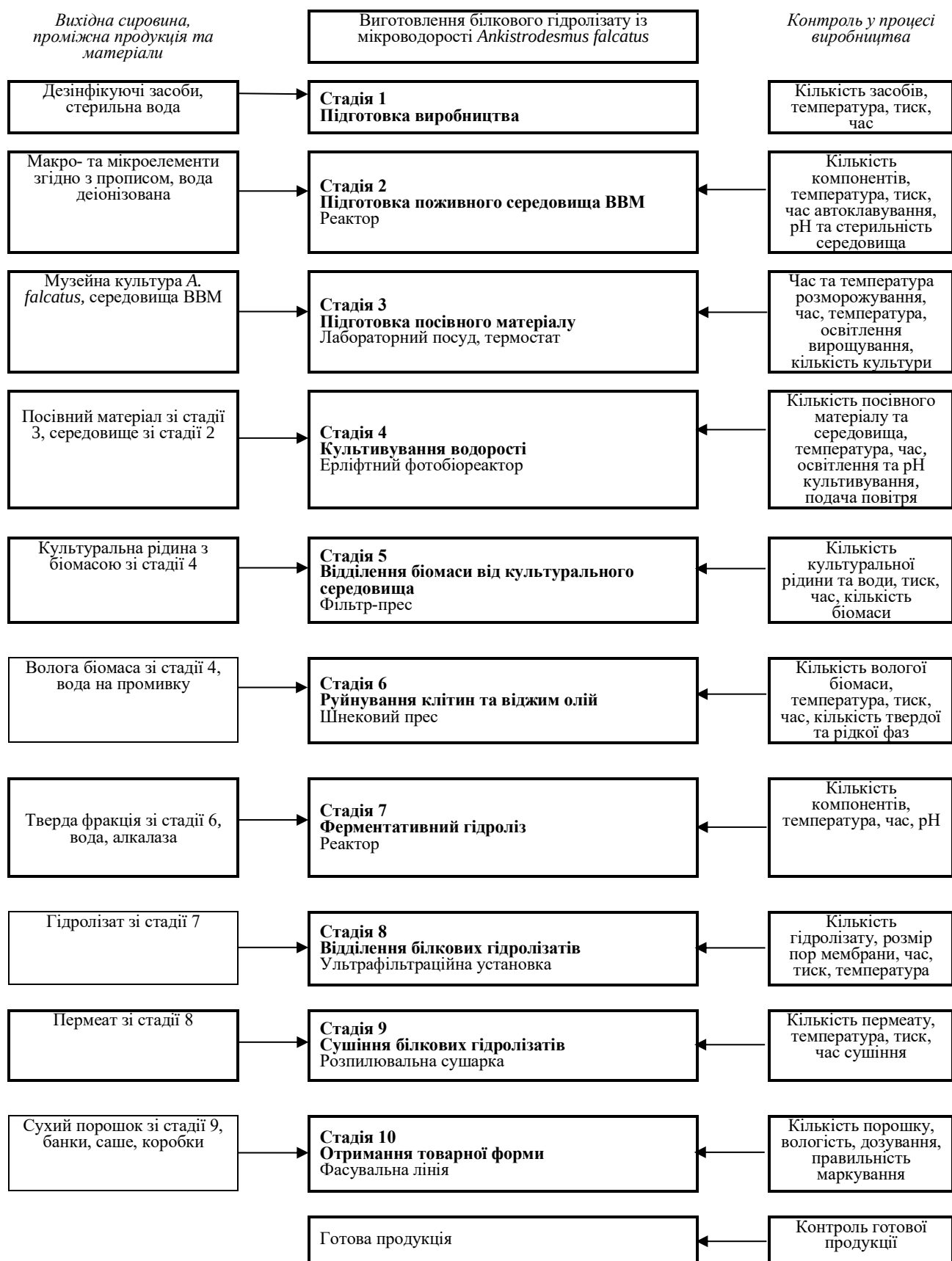


Рис. 3.2 – Технологічна схема виробництва білкового гідролізату

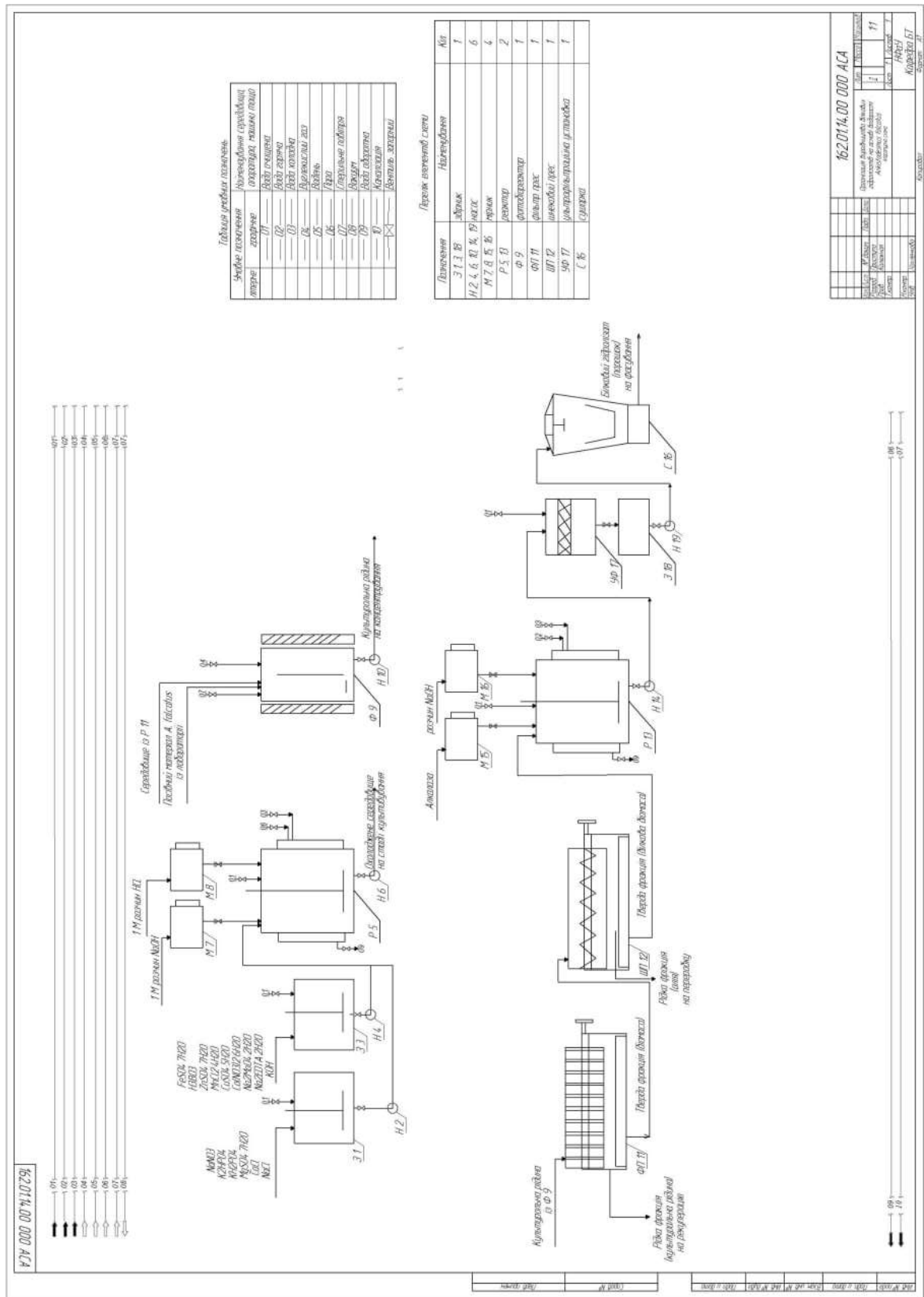


Рис. 3.6 – Апаратурна схема виробництва білкового гідролізату

3.5 Контроль виробництва

Кожна стадія виробництва включає основні контрольовані параметри, їх значення, критичні точки (КТ) та дії для їх контролю, щоб забезпечити безпеку та якість продукту відповідно до принципів НАССР (ДСТУ ISO 22000:2019). У табл. 3.3. наведені умови виробництва та контрольовані параметри (включають основні змінні, які впливають на якість і безпеку процесу (температура, рН, тиск, час, мікробіологічні показники тощо), критичні точки ((КТ) ідентифіковані ризики, які можуть вплинути на безпеку або якість продукту (наприклад, контамінація, низький вихід, втрата біоактивності)) та дії для контролю КТ - заходи для запобігання або усунення ризиків, включаючи моніторинг, аналізи та корекційні дії.

Таблиця 3.3

Контроль критичних стадій і проміжної продукції

Стадія	Умови виробництва та контрольовані параметри	Значення	Критична точка (КТ)	Дії для контролю КТ
Стадія 1. Підготовка виробництва	Температура у приміщенні Вологість у приміщенні Стерильність обладнання Мікробіологічна чистота повітря Тиск повітря для барботажу	20–25°C 50–60% <10 ² КУО/см ² <10 КУО/м ³ 0,5–1 атм	КТ1: Забруднення обладнання (бактерії, гриби) КТ2: Контамінація повітря	Проводити дезінфекцію (70% етанол, 1% NaOCl), УФ-обробку (30 хв). Використовувати НЕРА-фільтри (0,22 мкм) для повітря, контроль змивів (<10 ² КУО/см ²).
Стадія 2. Підготовка поживного середовища ВВМ	Температура змішування рН середовища Стерильність середовища Час стерилізації	20–25°C 6,8–7,0 <10 КУО/мл	КТ3: Контамінація середовища КТ4: Неправильний рН	Стерилізація автоклавуванням (121°C, 1 атм, 30 хв), контроль зразків (<10 КУО/мл).

		30 хвилин (121°C)		Регулювати рН (1 М НСІ/NaOH), перевіряти рН-метром.
Стадія 3. Підготовка посівного матеріалу	Температура розморожування Температура вирощування Освітлення рН середовища Концентрація клітин Час вирощування	30°C 25°C 2 klux 6,8–7,0 0,1 г/л 7–10 днів	КТ5: Контамінація культури КТ6: Недостатній ріст клітин	Працювати в ламінарному боксі, контроль контамінації (мікроскопія, посіви). Контролювати щільність (спектрофотометр, 0,1 г/л), регулювати освітлення (2 klux).
Стадія 4. Культивування водорості в ерліфтному фотобіореакторі	Температура Освітлення рН Подача повітря Концентрація біомаси Час культивування	25°C 2 klux (12 год/день) 6,8–7,5 0,5 л/хв 2,2 г/л 14 днів	КТ7: Контамінація культури КТ8: Низька продуктивність	Регулярний моніторинг (мікроскопія, посіви, <10 ² КУО/мл). Контролювати рН (CO ₂ , NaHCO ₃), освітлення (2 klux), концентрацію (спектрофотометр).
Стадія 5. Відділення біомаси від культурального середовища	Температура Тиск на фільтр-пресі Час фільтрації Мікробіологічна чистота біомаси	20–25°C 5 бар 24 години <10 ³ КУО/г	КТ9: Залишки солей у біомасі КТ10: Мікробіологічне забруднення	Промивати біомасу стерильною водою (5000 л), контроль зольності (<10%). Контроль чистоти (посіви, <10 ³ КУО/г), стерильність фільтр-пресу.
Стадія 6. Руйнування клітин та віджим олій	Температура Тиск у шнековому пресі Час пресування Вміст ліпідів у твердій фракції	50°C 10 бар 12 годин <5%	КТ11: Недостатнє руйнування клітин КТ12: Залишки ліпідів	Контролювати ступінь руйнування (мікроскопія, >90% зруйнованих клітин). Аналіз ліпідів (екстракція, <5%), регулювати тиск (10 бар).

Стадія 7. Ферментативний гідроліз	Температура гідролізу Температура інактивації рН Дозування ферменту (алкалаза) Час гідролізу Ступінь гідролізу	50°C 90°C 8,0 2% (2,32 кг) 4 години 70–80%	КТ13: Низький ступінь гідролізу КТ14: Залишки активного ферменту	Контролювати ступінь гідролізу (ВЕРХ, 70–80%), регулювати температуру (50°C), рН (8,0). Перевіряти інактивацію (90°C, 10 хв), тест на активність ферменту.
Стадія 8. Відділення білкових гідролізатів	Температура Тиск на ультрафільтрації Розмір пор мембрани Час фільтрації Чистота гідролізату	20°C 4 бар 10 кДа 12 годин >90% пептидів	КТ15: Залишки великих молекул КТ16: Втрата пептидів	Контролювати розмір молекул у пермеаті (ВЕРХ, >90% <10 кДа). Оптимізувати тиск (4 бар), перевіряти об'єм пермеату (1500 л).
Стадія 9. Сушіння білкових гідролізатів	Температура вхідна/вихідна Тиск у сушарці Час сушіння Вологість продукту	150°C/80°C 2 бар 8 годин <5%	КТ17: Втрата біоактивності КТ18: Висока вологість	Контролювати температуру (150°C/80°C), тест на антиоксидантну активність (DPPH, >20%). Перевіряти вологість (аналізатор вологи, <5%).
Стадія 10. Отримання товарної форми	Температура Вологість Час фасування Герметичність упаковки	20–25°C <50% 8 годин 100%	КТ19: Контамінація продукту КТ20: Негерметичність упаковки	Працювати в чистій зоні (ISO 8), контроль чистоти (<10 ⁴ КУО/г). Перевіряти герметичність (тест вакуумом), контроль етикеток.
Стадія 11. Переробка та знешкодження відходів	Температура рН фільтрату Час нейтралізації Час компостування	20–25°C 7,0 48 годин 30 днів	КТ21: Неправильний рН скидів КТ22: Недостатнє компостування	Регулювати рН (1 М НСl, 7,0), контроль скидів (ДСанПіН 2.2.7.029-99). Контролювати вологість компосту (50–60%), температуру (50–60°C).

Загальними вимогами до контролю є постійний моніторинг, відповідні аналізи, ведення документації та проведення корекційних дій. Моніторинг - регулярний контроль параметрів (рН-метри, термометри, спектрофотометри, мікробіологічні посіви); аналізи - використання стандартизованих методик (ВЕРХ для амінокислот, DPPH для антиоксидантної активності, ISO 4833 для мікробіології); документація - ведення журналів контролю параметрів і результатів аналізів відповідно до ДСТУ ISO 22000:2019; корекційні дії - у разі відхилень (наприклад, контамінація $>10^2$ КУО/мл) зупиняють процес, проводять додаткову стерилізацію, повторюють аналізи.

3.6 Екологічні аспекти виробництва

Виробництво білкового гідролізату з мікроводорості *Ankistrodesmus falcatus* на вітчизняній агрофірмі має як позитивні, так і потенційно негативні екологічні аспекти. Охарактеризуємо вплив кожної стадії виробництва на довкілля, оцінку ресурсозбереження, управління відходами, викидів, а також рекомендації щодо мінімізації екологічного сліду [5, 6, 19, 25, 28, 32, 34, 35].

До позитивних екологічних аспектів відносяться:

1. Захоплення вуглецю (CO_2) на стадії 4 (культивування у фотобіореакторі). *A. falcatus* активно поглинає CO_2 під час фотосинтезу. За продуктивності 2,2 г/л і об'ємі 120 000 л, отримуємо 264 кг біомаси. Мікроводорості фіксують $\sim 1,8$ кг CO_2 на 1 кг сухої біомаси (з урахуванням стехіометрії фотосинтезу: $6\text{CO}_2 + 6\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6\text{O}_2$). Таким чином, загальна фіксація CO_2 : $264 \text{ кг} \times 1,8 = 475,2 \text{ кг } \text{CO}_2$ за серію.

Екологічна користь - зменшення викидів парникових газів. Якщо CO_2 для культивування постачається з промислових джерел (наприклад, від ферментаційних процесів агрофірми), це сприяє замкненому циклу вуглецю.

2. Використання відновлюваних ресурсів:

На стадії 2 (підготовка поживного середовища ВВМ) використовується бікарбонат (NaHCO_3) як джерело вуглецю, що є більш екологічним, ніж пряме

					162.01.14.00 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		60

введення CO₂, оскільки зменшує потребу в енергії для компресії газу. На стадії 11 (переробка відходів) отриманий фільтрат (94 400 л із 118 000 л) рециркулюється після фільтрації та корекції складу, що зменшує споживання води на 80%.

3. Виробництво побічних продуктів

На стадії 6 (віджим олій) отримана ліпідна фракція (14 кг) може бути використана для виробництва біопалива або косметичних засобів, зменшуючи потребу у викопному паливі. На стадії 11 (переробка відходів) отриманий ретенат (25 кг) компостується з соломою (50 кг) для виробництва біодобрив, що підтримує циркулярну економіку та зменшує потребу у хімічних добривах.

4. Низький земельний слід

Використання фотобіореакторів займає значно меншу площу, ніж традиційні сільськогосподарські культури для виробництва білка (наприклад, соя потребує ~0,5 га для 250 кг білка). Це зменшує вирубку лісів і деградацію земель.

5. Відсутність пестицидів

Культивування *A. falcatus* у контрольованих умовах (фотобіореактори, рН 6,8–7,5) не потребує пестицидів, що знижує хімічне забруднення ґрунтів і водойм.

До негативних екологічних аспектів відносяться:

1. Споживання енергії

На стадії 4 (культивування) необхідне освітлення (2 klux, 12 год/день, 14 днів) для фотобіореакторів (LED-лампи, ~50 Вт/м²). На стадії 9 (сушіння) використовується розпилювальне сушіння (150°C/80°C, 8 годин), сушарка споживає ~500 кВт·год для 1500 л пермеату. Загальна енергія: ~2200 кВт·год за серію. Якщо енергія постачається з вугільних електростанцій (0,9 кг CO₂/кВт·год), це призводить до викидів: $2200 \times 0,9 = 1980$ кг CO₂ за серію. Екологічний вплив - високі викиди CO₂, якщо енергія не з відновлюваних джерел.

					162.01.14.00 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		61

2. Споживання води

На стадії 2 (приготування ВВМ) витрачається 120 000 л деіонізованої води, на стадії 5 (фільтрація) - 5000 л для промивки біомаси, на стадії 7 (гідроліз) - 1250 л для розведення біомаси. Загальна потреба: 126 250 л за серію. Незважаючи на рециркуляцію 94 400 л, 31 850 л скидається після нейтралізації, що створює навантаження на водні ресурси.

3. Хімічні реагенти

На стадіях 2 і 4 - використання NaHCO_3 (1200 кг) і регулювання рН (HCl/NaOH , ~5 л) може призводити до утворення солей у фільтраті, які скидаються у каналізацію. На стадії 1 проводиться дезінфекція (10 л 70% етанолу, 20 л 1% NaOCl), що утворює стоки з хімічними залишками. Екологічний вплив - потенційне забруднення водойм хлоридами та органічними сполуками.

4. Викиди та стоки

На стадії 11 (переробка відходів) відбувається скид 23 600 л фільтрату після нейтралізації (рН 7,0). Можливий незначний ризик забруднення, якщо нейтралізація неповна.

5. Упаковка

На стадії 10 (фасування) використання пластикових банок (HDPE, 300 шт.) і фольгованих саше (2500 шт.) утворює відходи упаковки, які важко переробляються в Україні через низький рівень сортування (~5% пластику переробляється).

Після характеристики позитивних та негативних екологічних аспектів проведемо оцінку екологічного сліду.

1. Викиди CO_2 .

Позитивний внесок (захоплення) - 475,2 кг, негативний внесок (енергія) - 1980 кг. Чистий баланс: $1980 - 475,2 = 1504,8$ кг CO_2 за серію (еквівалент ~0,015 кг $\text{CO}_2/\text{г}$ гідролізату).

2. Споживання води. За процесом споживається 126 250 л, з них 31 850

					162.01.14.00 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		62

л – безповоротні втрати ($\sim 0,32$ л/г гідролізату).

3. Відходи. До твердих відходів відноситься ретенат) - 25 кг (переробляються в біодобриво), до рідких – фільтрат - 23 600 л (скидаються після нейтралізації). Також серед відходів – упаковка - 5 кг пластику та фольги.

Для мінімізації екологічного впливу можна рекомендувати наступні заходи:

1. Енергоефективність. Використання відновлюваних джерел енергії (сонячні панелі для освітлення фотобіореакторів), що може знизити викиди CO_2 до 500 кг за серію. Оптимізація сушіння - зниження температури ($130^\circ\text{C}/70^\circ\text{C}$) для зменшення енергоспоживання (~ 400 кВт·год).

2. Управління водними ресурсами. Повна рециркуляція фільтрату (118 000 л) після додаткової очистки (зворотний осмос), що знизить безповоротні втрати до 5000 л. Використання дощової води для промивки біомаси (5000 л).

3. Зменшення хімічного навантаження. Заміна NaOCl на озонування для дезінфекції (зменшує хлоридні стоки). Використання органічних буферів (наприклад, HEPES) замість HCl/NaOH для регулювання pH.

4. Управління відходами. Впровадження системи сортування упаковки: співпраця з переробними підприємствами для утилізації HDPE і фольги. Використання біорозкладної упаковки (PLA-пластик) для банок і саше.

5. Екологічна сертифікація. Впровадження системи екологічного менеджменту ISO 14001:2015 для контролю викидів, стоків і відходів. Органічна сертифікація (Закон України №2496-VIII): Якщо сировина (*A. falcatus*) вирощується без синтетичних пестицидів і добрив, продукт може бути сертифікований як органічний.

6. Проведення оцінки вуглецевого сліду для маркування продукту (наприклад, «Вуглецево-нейтральний продукт» після компенсації викидів).

Таким чином, виробництво білкового гідролізату з *A. falcatus* має значний позитивний екологічний потенціал завдяки захопленню CO_2 (475,2 кг за серію), рециркуляції води (80%) та переробці відходів (ретенат у

					162.01.14.00 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		63

біодобрива, олії у біопаливо). Проте високе енергоспоживання (2200 кВт·год, 1980 кг CO₂), водокористування (31 850 л безповоротних втрат) і використання пластикової упаковки створюють екологічне навантаження. Впровадження відновлюваних джерел енергії, повної рециркуляції води, біорозкладної упаковки та органічної сертифікації може зробити виробництво більш сталим, знизивши чистий вуглецевий слід.

					162.01.14.00 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		64

ВИСНОВОК

1. На основі аналізу сучасних наукових джерел встановлено, що *Ankistrodesmus falcatus* є перспективною мікроводоростю для виробництва білкових продуктів завдяки високому вмісту білка (до 46,4%), багатому амінокислотному профілю (з високим вмістом лейцину, валіну, ізолейцину) та наявності біоактивних пептидів. Фізіолого-біохімічні властивості, зокрема алкалофільність (оптимальний рН 7–10) і здатність ефективно використовувати бікарбонат (NaHCO_3) як джерело вуглецю, роблять її придатною для культивування в системах закритого типу ВІССАПС. В поживних середовищах ВВМ і COMBO біомаса досягає $>2,2$ г/л. Оптимальні умови культивування включають температуру 20–30°C, освітлення 1,5–2,0 klux і рН 7,5–9, що забезпечує високу щільність клітин ($>3,5 \times 10^7$ клітин/мл) і вміст білка, придатний для промислового виробництва гідролізатів.

2. *Ankistrodesmus falcatus* характеризується як одноклітинна зелена мікроводорість із високим потенціалом для промислового використання. Біосинтез білків у *A. falcatus* залежить від доступності азоту (NaNO_3 , 750 мг/л оптимально) і заліза (9 мг/л), що стимулюють синтез амінокислот і хлорофілу. Вміст білка (46,4%) включає незамінні амінокислоти, а самофлюкуляційні властивості полегшують збір біомаси, знижуючи витрати. Алкалофільність і адаптивність до поживних середовищ дозволяють культивувати її в закритих системах, де ризик контамінації низький.

3. Технологічний підхід передбачає використання ерліфтного фотобіореактора з роздільною пластиною для культивування *A. falcatus* у середовищі ВВМ з NaHCO_3 (10 г/л), що забезпечує продуктивність 2,2 г/л за 14 днів (25°C, 2 klux, рН 6,8–7,5). Вибір ВІССАПС обґрунтовано алкалофільністю водорості та ефективним захопленням CO_2 (475,2 кг за серію). Біомасу відокремлюють фільтр-пресом (5 бар, 20–25°C), руйнують клітини шнековим пресом (50°C, 10 бар), видаляючи ліпіди (14 кг).

					162.01.14.00 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		65

Ферментативний гідроліз проводять алкалазою (2%, 50°C, рН 8,0, 4 години), що забезпечує 70–80% пептидів (<10 кДа). Очищення ультрафільтрацією (10 кДа, 4 бар) гарантує чистоту (>90%), а сушіння розпиленням (150°C/80°C) – низьку вологість (<5%). Цей підхід оптимізує вихід (100 кг гідролізату), зберігає біоактивність і відповідає промисловим стандартам (ДСТУ 4636:2006).

4. Для виробництва 100 кг гідролізату за серію підібрано обладнання: ерліфтний фотобіореактор для культивування (25°C, 2 клух); фільтр-прес (100 м², 500 л/хв) для відокремлення біомаси (5 бар); шнековий прес (500 кг/год, 10 бар) для руйнування клітин; реактор (2 м³) для гідролізу (50°C, рН 8,0); ультрафільтраційна установка (10 кДа, 500 л/год) для очищення; розпилювальна сушарка (500 л/год, 150°C/80°C) для сушіння; фасувальна лінія (100 кг/год) для упаковки (банки 250 г, саше 10 г). Додатково: компресор (400 л/хв), термостат (10 л), автоклав (1000 л), ламінарний бокс. Обладнання відповідає вимогам стерильності (ISO 7–8), продуктивності (264 кг біомаси) і стандартам безпеки (ДСТУ ISO 22000:2019).

5. Технологічна схема включає 11 стадій: підготовка виробництва (дезінфекція, 20–25°C), підготовка ВВМ (120 000 л, рН 6,8–7,0), підготовка посівного матеріалу (25°C, 2 клух, 7–10 днів), культивування у фотобіореакторі (14 днів, 25°C, рН 6,8–7,5), фільтрація (5 бар), руйнування клітин (50°C, 10 бар), гідроліз (алкалаза, 50°C, рН 8,0), ультрафільтрація (10 кДа, 4 бар), сушіння (150°C/80°C), фасування (банки/саше), переробка відходів (рециркуляція 94 400 л). Апаратурна схема охоплює фотобіореактори (800 шт.), фільтр-прес, шнековий прес, реактор для гідролізу, ультрафільтраційну установку, сушарку, фасувальну лінію, компостер. Схеми забезпечують послідовність і контроль умов (температура, рН, тиск), відповідаючи ДСТУ ISO 22000:2019.

6. Визначено 22 критичні точки (КТ) на всіх стадіях. Наприклад: КТ1 (стадія 1) – забруднення обладнання (<10² КУО/см², контроль змивами, УФ-

					162.01.14.00 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		66

обробка); КТ7 (стадія 4) – контамінація культури ($<10^2$ КУО/мл, мікроскопія); КТ13 (стадія 7) – низький ступінь гідролізу (70–80%, ВЕРХ); КТ19 (стадія 10) – контамінація продукту ($<10^4$ КУО/г, ISO 8). Заходи моніторингу включають рН-метрію (6,8–8,0), спектрофотометрію (концентрація клітин), мікробіологічні посіви, аналіз амінокислот (ВЕРХ), тест на вологість ($<5\%$). Регулювання: корекція рН (HCl/NaOH, CO₂), стерилізація (121°C), контроль температури (50°C гідроліз, 150°C сушіння). Це забезпечує якість гідролізату (ДСТУ 4636:2006) і безпеку (НАССР).

7. Виробництво захоплює 475,2 кг CO₂ за серію (фотосинтез), але споживає 2200 кВт·год енергії (викиди 1980 кг CO₂), що дає чистий вуглецевий слід 1504,8 кг CO₂. Споживається 126 250 л води, з яких 31 850 л – безповоротні втрати. Відходи (ретенат 25 кг, олії 14 кг) переробляються в біодобрива та біопаливо, а 94 400 л фільтрату рециркулюється. Негативні аспекти: енергоспоживання, пластикова упаковка (5 кг), хімічні стоки (NaOCl, HCl). Запропоновано рішення: використання сонячних панелей (зниження викидів до 500 кг CO₂), повна рециркуляція води (зменшення втрат до 5000 л), біорозкладна упаковка (PLA), озонування замість NaOCl. Це підвищує екологічну сталість виробництва.

8. ТОВ Агрофірма «Геліантус» 2 має потенціал для впровадження технології завдяки наявності виробничих площ (~200 м² для фотобіореакторів), доступу до води (126 250 л/серія) та енергії (2200 кВт·год). Організаційні умови: потреба у навчанні персоналу (НАССР, біотехнології), сертифікації (ISO 22000, GMP), реєстрації добавки в МОЗ. Технічні умови: необхідно закупити фотобіореактори, фільтр-прес, ультрафільтраційну установку, сушарку. Виробництво 100 кг гідролізату за серію (20 днів) забезпечить -1500 кг/рік, що економічно вигідно. Впровадження можливе за умови інвестування в обладнання, сертифікацію та екологічні заходи (сонячні панелі, рециркуляція води).

					162.01.14.00 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		67

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Біотехнологія : підручник / В. Г. Герасименко та ін. Київ : Фірма «ІНКОС», 2006. 647 с.
2. Боднар О. І. Біотехнологічні перспективи використання мікроводоростей: основні напрями (огляд). *Наукові записки Тернопільського національного педагогічного університету імені Володимира Гнатюка. Серія : Біологія*. 2017. № 1(68). С. 138–146.
3. Глибін В. І. Процеси і апарати біотехнологічних виробництв. Курсове проектування : посібник. Київ : НАУ, 2018. 84 с.
4. Горупа В. В. Конструкція обладнання біотехнологічних виробництв : практикум для студентів. Київ : НАУ, 2017. 64 с.
5. Екологічна біотехнологія : навч. посіб. : у 2 кн. / О. В. Швед та ін. Львів : Вид-во Львів. політехніка, 2018. Т. 1. 424 с.
6. Пляцук Л. Д., Черниш Є. Ю. Екологічна біотехнологія: принципи створення біотехнологічних виробництв : навч. посіб. Суми : Сумський держ. ун-т, 2018. 293 с.
7. Калиновська А. В. Особливості функціонування прісноводних водоростей за дії світла різної якості та інтенсивності : автореф. дис. ... канд. біолог. наук : 03.00.17. Київ, 2012. 24 с.
8. Капрельянц Л. В. Теоретичні основи біотехнології : навч. посіб. Харків : Факт, 2020. 296 с.
9. Кірпенко Н. І., Леонтєва Т. О., Мусій Т. О. Варіабельність розмірних характеристик зелених мікроводоростей в умовах культур. *Біологічні дослідження – 2020* : зб. наук. пр. Житомир, 2020. С. 166–168.
10. Кірпенко Н. І. Шляхи використання біополімерів мікроводоростей. *Наукові записки Тернопільського національного педагогічного університету ім. Володимира Гнатюка. Серія : Біологія*. 2004. № 3–4(24). С. 48–52.
11. Колекція культур мікроводоростей інституту гідробіології НАН

					162.01.14.00 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		68

України (HPDP). URL: <https://hydrobio.kiev.ua/ua/posluhy/kolektsiia-kultur-mikrovodorostei-hpdp> (дата звернення: 20.03.2025).

12. Леонтьєва Т. О. Адаптивний потенціал зелених мікроводоростей (Chlorophyta) при вирощуванні в штучних умовах : дис. ... д-ра філософії : 091 Біологія. Київ, 2022. 163 с.

13. Методичні рекомендації до виконання кваліфікаційної роботи бакалавра для здобувачів вищої освіти спеціальності 162 «Біотехнології та біоінженерія» ОП «Біотехнологія» / О. С. Калюжная та ін. Харків : НФаУ, 2024. 128 с.

14. Оцінка харчової цінності біомаси зелених водоростей, вирощених у фотобіореакторах / О. П. Ольхович та ін. *Гідробіологічний журнал*. 2023. Т. 59, № 3. С. 96-105.

15. Перспективи використання мікроводоростей у біотехнології / О. К. Золотарьова та ін. Київ : Альтерпрес, 2008. 234 с.

16. Пирог Т. П. Загальна мікробіологія : підручник. 2–ге вид., допов. і перероб. Київ : НУХТ, 2010. 632 с.

17. Сидоров Ю. І., Влязло Р. Й., Новіков В. П. Процеси і апарати мікробіологічної промисловості. Технологічні розрахунки. Приклади і задачі. Львів : Вид-во Львів. політехніка, 2004. Ч. 1 : Ферментація. 240 с.

18. Сидоров Ю. І., Влязло Р. Й., Новіков В. П. Процеси і апарати мікробіологічної промисловості. Технологічні розрахунки. Приклади і задачі. Львів : Вид-во Львів. політехніка, 2004. Ч. 2 : Обробка культуральних рідин. 296 с.

19. Сидоров Ю. І., Влязло Р. Й., Новіков В. П. Процеси і апарати мікробіологічної промисловості. Технологічні розрахунки. Приклади і задачі. Львів : Вид-во Львів. політехніка, 2004. Ч. 3 : Основи проектування мікробіологічних виробництв. 252 с.

20. Технологічне обладнання біотехнологічної і фармацевтичної промисловості : підруч. для вищ. навч. закл. / М. В. Стасевич та ін. Львів :

					162.01.14.00 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		69

Новий Світ–2000, 2018. 410 с.

21. Advancements and challenges in microalgal protein production: A sustainable alternative to conventional protein sources / S. S. Ali et al. *Microbial Cell Factories*. 2025. Vol. 61. DOI: 10.1186/s12934-025-02685-1.

22. Algae Biomass: Characteristics and Applications. Towards Algae-based Products / K. W. Chojnacka et al. Springer, 2018. 150 p. DOI:10.1007/978-3-319-74703-3.

23. Algal proteins: Production strategies and nutritional and functional properties / P. Geada et al. *Bioresource Technology*. 2021. Vol. 332. P. 125125. DOI: 10.1016/j.biortech.2021.125125.

24. *Ankistrodesmus falcatus* (Corda) Ralfs 1848. URL: https://www.algaebase.org/search/species/detail/?species_id=27653 (Date of access: 10.01.2025).

25. Bleakley S., Hayes M. Algal Proteins: Extraction, Application, and Challenges Concerning Production. *Foods*. 2017. Vol. 6(5). P. 33. DOI: 10.3390/foods6050033.

26. Caporgno M. P., Mathys A. Trends in Microalgae Incorporation into Innovative Food Products with Potential Health Benefits. *Front. Nutr.* 2018. Vol. 5. P. 58. DOI: 10.3389/fnut.2018.00058.

27. Characterization and classification of highly productive microalgae strains discovered for biofuel and bioproduct generation / Neofotis P. et al. *Algal Research*. 2016. Vol. 15(3). P. 164-178. DOI: 10.1016/j.algal.2016.01.007.

28. Emerging Technologies in Algal Biotechnology: Toward the Establishment of a Sustainable, Algae-Based Bioeconomy / M. Fabris et al. *Front. Plant Sci.* 2020. Vol. 11. DOI: 10.3389/fpls.2020.00279.

29. Evaluation of *Ankistrodesmus falcatus* for Bicarbonate-Based Integrated Carbon Capture System (BICCAPS) / Beltran A. et al. *MATEC Web of Conferences*. 2018. Vol. 156, 03016. DOI: 10.1051/mateconf/201815603016.

30. Gross M., Jarboe D., Wen Z. Biofilm-based algal cultivation systems.

					162.01.14.00 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		70

Appl. Microbiol. Biotechnol. 2015. Vol. 99(14). P. 5781–5789. DOI: 10.1007/s00253-015-6736-5.

31. Fernando R., Sun X., Rupasinghe H. P. V. Production of Bioactive Peptides from Microalgae and Their Biological Properties Related to Cardiovascular Disease. *Macromol.* 2024. Vol. 4(3). P. 582–596. DOI: 10.3390/macromol4030035.

32. Hallmann A. Algae Biotechnology – Green Cell-Factories on the Rise. *Current Biotechnology.* 2015. Vol. 4. P. 389-415. DOI: 10.2174/2211550105666151107001338.

33. Lipid Production of Microalga *Ankistrodesmus falcatus* Increased by Nutrient and Light Starvation in a Two-Stage Cultivation Process / P. D. Álvarez-Díaz et al. *Appl Biochem. Biotechnol.* 2014. Vol. 174(4). P. 1471–1483. DOI: 10.1007/s12010-014-1126-5.

34. Microalgae proteins: Production, separation, isolation, quantification, and application in food and feed / M. L. Amorim et al. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* 2021. Vol. 61. P. 1976–2002. DOI: 10.1080/10408398.2020.1768046.

35. Park C., Kim S., Jin E. Comparative analysis of the economic feasibility of open ponds and photobioreactors for large-scale microalgae cultivation. *Algal Research.* 2021. Vol. 57. P. 102468. DOI: 10.1016/j.algal.2021.102468.

36. Performance Characteristics of *Ankistrodesmus falcatus* in Different Culture Media and Concentration / V. T. Okomoda et al. *Plants.* 2021. Vol. 10(4). P. 755. DOI: 10.3390/plants1004075.

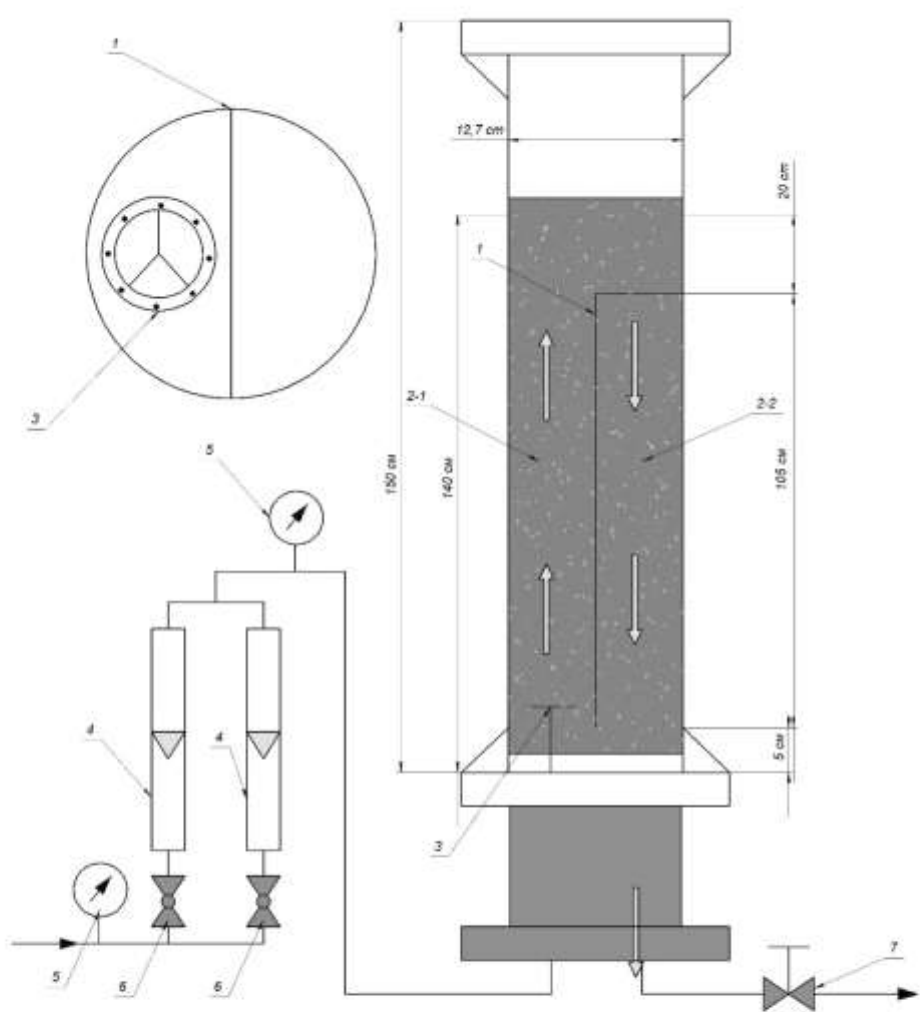
37. Sabri Laith S. A Detailed Hydrodynamic Study of the Split-Plate Airlift Reactor by Using Non-Invasive Gamma-Ray Techniques. *ChemEngineering.* 2022. Vol. 6(1). P. 18. DOI: <https://doi.org/10.3390/chemengineering6010018>.

38. Talukdar J., Kalita M. C., Chandra G. B. Growth, Total Lipid content and Fatty Acid Profile of a Native Strain of the Freshwater Oleaginous Microalgae *Ankistrodesmus falcatus* (Ralf) grown under Salt Stress Condition. *Int. Res. J. Biological Sci.* 2012. Vol. 1(18). P. 27-35. URL: https://www.researchgate.net/publication/233895090_Growth_Total_Lipid_conten

t_and_Fatty_Acid_Profile_of_a_Native_Strain_of_the_Freshwater_Oleaginous_M
icroalgae_Ankistrodesmus_falcatus_Ralf_grown_under_Salt_Stress_Condition
(Date of acces: 15.03.2025).

					162.01.14.00 000 ПЗ	Арк.
						72
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ДОДАТКИ



Біохімічний фотобіореактор з розділеною пластичною камерою висхідно-опускного типу.
матеріал стінок - поліетилен, шарування - шарування

Технічні характеристики
Площа поверхні - 10,0 кв.м (внутрішня) - 10,0 кв.м (зовнішня)
Висота стовпа - 1,5 м, висота реактора - 1,5 м
Площа поверхні розподілу - 10,0 кв.м (внутрішня)
Продуктивність 12000 л/год, тис. 200 Рад
Система розподілу повітря - 2 компресори повітря, 2 манометри, 2 клапани
Система контролю - РЕС (електронний блок) - 12 мВ / 12 мВ

Перелік складових частин обладнання

Код	Позначення	Найменування	Кільк.	Примітки
1		Розподільна пластинка	1	
2-1		Робоча зона (підйомна)	1	
2-2		Робоча зона (опускаюча)	1	
3		Кільцевий розподільник	1	
4		Витратомір повітря	2	
5		Манометр	2	
6		Клапан регулювання повітря	2	
7		Клапан спуску води	1	

162.01.14.00 000 3B				Експертний фотобіореактор		1.70
				НФБУ		1
				Кіфедра 57		1
				Виробник		Виробник