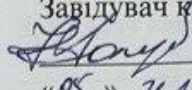


НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Факультет біотехнології і біотехніки
Кафедра біоенергетики, біоінформатики та екобіотехнології

До захисту допущено:

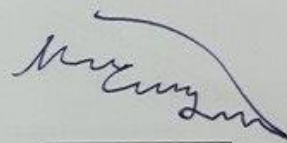
Завідувач кафедри

 Наталія ГОЛУБ
«05» червня 2023 р.

Дипломний проєкт
на здобуття ступеня бакалавра
за освітньо-професійною програмою «Біотехнології»
спеціальності 162 «Біотехнології та біоінженерія»
на тему: «Технологія біодизельного палива із зелених водоростей
Acutodesmus dimorphus»

Виконав:

студент IV курсу, групи БЕ-91
Степанчук Антон Валерійович



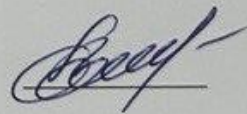
Керівник:

к.т.н., старший викладач
Левтун Ігор Ігорович



Консультант з проектування:

Професор., д.т.н., професор
Саблій Лариса Андріївна



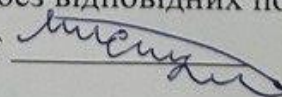
Рецензент:

доц. каф. промислової біотехнології та біофармації, к.б.н.
Ліновицька Віта Михайлівна



Засвідчую, що у цьому дипломному
проєкті немає запозичень з праць інших
авторів без відповідних посилань.

Студент



Київ – 2023 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Факультет біотехнології і біотехніки
Кафедра біоенергетики, біоінформатики та екобіотехнології

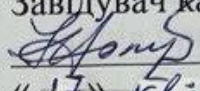
Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 162 «Біотехнології та біоінженерія»

Освітньо-професійна програма «Біотехнології»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

 Наталія ГОЛУБ
«17» квітня 2023р.

ЗАВДАННЯ

на дипломний проєкт студенту
Степанчуку Антону Валерійовичу

1. Тема проєкту «Технологія біодизельного палива із зелених водоростей *Acutodesmus dimorphus*»
керівник проєкту к.т.н., старший викладач Левтун Ігор Ігорович, затверджені
наказом по університету від «22» травня 2023 р. № 1888-с

2. Термін подання студентом проєкту 5 червня 2023р

3. Вихідні дані до проєкту:

4. Зміст пояснювальної записки:

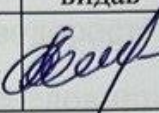
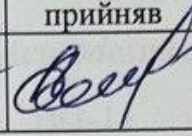
5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо):

6. Консультанти розділів проєкту

ДП БЕ91 17.000 ПЗ					Арк.
					2
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	

РЕФЕРАТ

Поміченої записки № 17 ст. 7 р.с. 3 табл. 84 виконання.

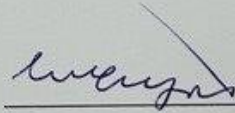
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Графічна частина дипломного проекту	д.т.н., проф. Саблій Л.А.		

7. Дата видачі задання 14 квітня 2023 р

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проекту	Термін виконання етапів проекту	Примітка
1	Вступ	20 квітня 2023	
2	Розділ 1	1 травня 2023	
3	Розділ 2	10 травня 2023	
4	Розділ 3	15 травня 2023	
5	Розділ 4	21 травня 2023	
	Розділ 5	25 травня 2023	
6	Висновки	28 травня 2023	
7	Креслення	5 червня 2023р	

Студент

 Степанчук А.В.

Керівник проекту

 Левтун І.І.

					ДП БЕ91 17.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		3

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 90 ст., 7 рис., 6 табл., 84 посилання.

В даній роботі обрано та обґрунтовано технологію отримання біодизеля з водоростей.

Для вирощування біодизеля вибрано зелені мікрроводорості *Acutodesmus dimorphus*, які культивують на стандартному середовищі BG-11 у фотобіореакторі. Для отримання ліпідів використовували технологію механічної екстракції за допомогою преса екструдера.

Розраховано матеріальний баланс, спроектовані та описані технологічна та апаратурна схеми виробництва, вибрано основне, обладнання, вказані точки і параметри контролю етапів процесу що є необхідними для забезпечення якості кінцевої продукції, охорони праці і довкілля. Запроектовано реактор об'ємом 50м³, проведено розрахунки, які підтверджують ефективність і працездатність конструкції.

БІОДИЗЕЛЬ, ПЕРЕЕСТЕРИФІКАЦІЯ, ФОТОБІОРЕАКТОР, ВОДРОСТІ, РЕАКТОР – ЗМІШУВАЧ.

					ДП БЕ91 17.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		4

ABSTRACT

Explanatory note: 90 pages, 7 figures, 6 tables, 84 references.

In this paper, the technology for producing biodiesel from algae is selected and substantiated.

For the production of biodiesel, green microalgae *Acutodesmus dimorphus* were chosen, which are cultivated on standard BG-11 medium in a photobioreactor. To obtain lipids, we used the technology of mechanical extraction using an extruder press.

The material balance is calculated, technological and equipment schemes of production are designed and described, the main equipment is chosen, points and parameters of control of stages of process which are necessary for quality assurance of final products, labor protection and environment are specified. A reactor with a volume of 50 m³ was designed, and calculations were performed to confirm the efficiency and operability of the structure.

BIODIESEL, TRANSESTERIFICATION, PHOTOBIOREACTOR, ALGAE, MIXER REACTOR.

					ДП БЕ91 17.000 ПЗ	Арк.
						5
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ.....	10
1.1 Загальна характеристика біодизеля як моторного палива	10
1.2 Класифікація біопалива.....	11
1.3 Характеристика біодизельної промисловості в світі та в Україні.....	12
1.4 Біодизель з водоростей.....	16
РОЗДІЛ 2. ХАРАКТЕРИСТИКА БІОЛОГІЧНОГО АГЕНТА ТА ТЕХНОЛОГІЧНИХ РІШЕНЬ	19
2.1.1 Характеристика водоростей як продуцентів ліпідів для виготовлення біопалива.....	18
2.1.2 Характеристика ліпідів водоростей.....	19
2.2 Вибір продуценту для виготовлення біодизеля.....	21
2.3 Висновок. Обґрунтування вибору продуцента для отримання біодизеля.....	26
2.4 Обґрунтування вибору поживного середовища.....	27
2.5 Обґрунтування вибору технології вилучення ліпідів мікроводоростей з подальшим виробництвом біодизеля.....	28
2.6 Переестерефікація.....	35
2.7 Опис та обґрунтування обраної конструкції реактора для проведення реакції переестерифікації.....	37
2.8.1 Обґрунтування вибору технології.....	40
2.8.2 Характеристика кінцевого продукту.....	40
РОЗДІЛ 3. ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА.....	42
3.1 Сировина та матеріали.....	42
3.2 Опис технологічної схеми виготовлення біодизеля з водоростей.....	45
3.3 Контроль виробництва.....	51
3.4 Матеріальний баланс.....	56
РОЗДІЛ 4. РОЗРАХУНОК ТА ВИБІР ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА БІОДИЗЕЛЯ З ВОДОРОСТЕЙ.....	59
4.1 Розрахунок виробничої потужності.....	59
4.2 Конструктивний розрахунок.....	60
РОЗДІЛ 5. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ОХОРОНА ДОВКІЛЛЯ.....	69
ВИСНОВКИ.....	73
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	74
ДОДАТКИ.....	87

					ДП БЕ91 17.000 ПЗ		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			
Розроб.	Степанчук А.В.				ЗМІСТ	Стадія	Арк.
Конс.							6
							90
Керів.	Левтун І.І.					«КП» ім. Ігоря Сікорського, ФБТ	
Затверд.							

Перелік умовних позначень та скорочень

ДСТУ - Державний стандарт України, є національним стандартом, затвердженим Державним комітетом України по стандартизації, метрології і сертифікації (Держстандарт України);

НАН України (IBASU-A) – Колекція культур мікрводоростей Національної академії наук України;

pH - водневий показник, є метрикою, яка вказує на концентрацію іонів водню (H^+) у розчині і відображає рівень кислотності або лужності даного розчину;

ТАГ - Тригліцериди, продукти естерифікації отримані шляхом реакції карбонових кислот з тріатомним спиртом гліцерином;

ПНЖК - поліненасичені жирні кислоти, жирні карбонові кислоти, що містять більше одного подвійного зв'язку між атомами вуглецю;

МЕЖК - метилові ефіри жирних кислот, Складні ефіри що формуються шляхом переестерифікації жирів з використанням спирту;

ЕПК - ейкозапентаєнова кислота;

ДПК - докозапентаєнова кислота;

ДГК - докозагексаєнова кислота;

ЕР – ендоплазматичний ретикулум, внутрішньоклітинна органела еукаріотичних клітин.

					<i>ДП БЕ91 17.000 ПЗ</i>		
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>			
<i>Розроб.</i>	<i>Степанчук А.В.</i>				ВСТУП	<i>Стадія</i>	<i>Арк.</i>
<i>Конс.</i>							7
<i>Керів.</i>	<i>Левтун І.І.</i>					<i>«КПІ» ім. Ігоря Сікорського, ФБТ</i>	
<i>Затверд.</i>							
						90	

ВСТУП

Сьогодні в Україні як ніколи є попит на дешеві енергоресурси, з одного боку, та одночасне постійне погіршення екологічного середовища, з іншого. Тому дуже важливою є проблема отримання нових, екологічно безпечних форм палива, зокрема з використанням доступних сировинних ресурсів. Біодизель – це біопаливо на основі жирів тваринного, рослинного і мікробного походження, а також продуктів їх естерифікації [1]. Як сировина для отримання біодизельного палива використовуються рослинні або тваринні жири. Це можуть бути рапсове, соєве, пальмове, кокосове масло або будь-яке інше масло-сировина, а також водорості. Високий вміст ліпідів у багатьох видів водоростей робить їх перспективним джерелом сировини для виробництва біодизелю. Вчені відзначають, що головна перевага використання водоростей полягає в їх простоті культивування порівняно з злаковими культурами, а також в тому, що для них не потрібно використовувати такі цінні природні ресурси, як прісна вода та вільна земельна площа. [2].

Хімічні молекули біодизеля складаються з довгого послідовного ланцюга моноалкільних ефірів. Біодизель може використовуватися безпосередньо в будь-яких дизельних двигунах без необхідності внесення змін. Технологія виробництва біопалива не є новою для людства. Виробництво біодизеля з водоростей є перспективним напрямком розвитку. Однак, викликом є ефективний збір врожаю водоростей, виділення олії з них та подальша переестерифікація на біодизель. Біодизель з водоростей має численні переваги, такі як біорозкладність, екологічна безпечність та відновлюваність. [3].

Таким чином, **метою** дипломного проекту є вибір та обґрунтування ефективної технології одержання біодизельного палива із зелених мікроводоростей *Acutodesmus dimorphus*.

Для досягнення поставленої мети були поставлені наступні **завдання**:

					ДП БЕ91 17.000 ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.	Степанчук А.В.				ВСТУП	Стадія	Арк.	Акрушів
Конс.							8	90
Керів.	Левтун І.І.					«КП» ім. Ігоря Сікорського, ФБТ		
Затверд.								

1. Провести літературний огляд стосовно перспектив біодизельного пального в світі та в Україні, використання водостей в якості продуцентів біодизеля, а також розглянути характеристики біодизеля.
2. Обґрунтувати вибір технології отримання біодизеля з водоростей *Acutodesmus dimorphus*. Охарактеризувати ліпіди водоростей та технологію виділення олії з них, обґрунтувати основні технологічні рішення для технології виготовлення біодизеля. Навести характеристику кінцевого продукту;
3. Розробити та описати технологічну та апаратурну схеми виробництва біодизеля з водоростей *Acutodesmus dimorphus*;
4. Розрахувати технічні показники обраного типу реактора для проведення реакції трансестерифікації та матеріальний баланс; розробити креслення обраного типу реактора;
5. Охарактеризувати пропозиції та заходи щодо забезпечення охорони праці, техніки безпеки, охорони довкілля.

					ДП БЕ91 17.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		9

РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

1.1 Загальна характеристика біодизеля як моторного палива

Біодизель – це екологічно чистий вид палива, альтернативний нафті, що отримують з рослинних масел і використовуваний для заміни дизельного палива [4]. Головна перевага біодизеля – це те, що його виробляють з ресурсів, які швидко відновлюються (запаси нафти, наприклад, практично невідновні).

Застосування біодизеля як моторного палива зменшує емісію практично всіх шкідливих речовин. Зокрема, для біодизеля викиди вуглеводнів порівняно з нафтовим аналогом скорочуються на 56 %, твердих частинок – на 55, оксидів вуглецю – на 43, оксидів азоту – на 5...10, сажі – на 60 % [5]. При цьому виділяється стільки ж вуглекислого газу, скільки було спожито з атмосфери рослиною, що є вихідною сировиною для виробництва олії.

Біодизельне паливо, натурального походження, містить менше 15 ppm сірки і не включає ароматичних сполук. Через свою природність, біодизель виявляє меншу токсичність порівняно з нафтовим паливом і не завдає шкоди рослинам і тваринам у разі його потрапляння в ґрунт чи воду. З іншого боку, біодизель віддає перевагу практично повному біологічному розкладу, оскільки мікроорганізми в ґрунті чи воді переробляють 99% біодизеля протягом 28 днів. Це свідчить про мінімальне забруднення довкілля та водних ресурсів. Крім того, ефіри рослинних олій, які містяться в біодизелі, легко змішуються з нафтовим дизельним паливом і не відшаровуються, навіть у присутності розчиненої води. [5].

Серед інших переваг біодизеля:

– хороші змащувальні властивості, які звичайне паливо втрачає при видаленні з нього сполук, які містять сірку. Біодизель, незважаючи на значно менший уміст сірки, завдячуючи своєму хімічному складу (наявності кисню) має кращі змащувальні властивості;

					ДП БЕ91 17.000 ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.	Степанчук А.В.				ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ	Стадія	Арк.	Акрушіє
Конс.							10	90
Керів.	Левтун І.І.					«КПП» ім. Ігоря Сікорського, ФБТ		
Затверд.								

- вище цетанове число (щонайменше 51) [6];
- висока температура спалаху (понад 150 °С), що робить біопаливо більш безпечним в порівнянні [6];
- повнота згоряння завдяки присутності до 10 % кисню [6];
- значне збільшення ресурсу двигуна (до 60 %). Так, до Книги рекордів Гіннеса 2005 р. занесена вантажівка, що проїхала на біодизелі без ремонту оригінального двигуна понад 1,25 млн км [5].

Таблиця 1.1.1 – Фізико-хімічні властивості біодизельного палива згідно ДСТУ 6081:2009

Показник	Одиниці	Значення
Вміст ефіру	%	96,5
Густина при 20 оС	кг/м ³	875-900
В'язкість	мм ² /с	3,5-5,0
Октанове число		20-25
Цетанове число		50-55
Теплоємність	кДж/(кг*град)	1,9
Коефіцієнт теплопровідності	Вт/(м*К)	0,3

1.2 Класифікація біопалива

Залежно від сировини та технології виробництва біопаливо поділяють на біопаливо першого покоління, біопаливо другого покоління та біопаливо третього покоління.

Біопаливо першого покоління виробляють переважно з харчових культур, таких як цукрова тростина, кукурудза, крохмаль, рослинна олія та тваринні жири. Біопалива першого покоління обмежені в досягненні цілей сталого

					ДП БЕ91 17.000 ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.	Степанчук А.В.					Стадія	Арк.	Акрушів
Конс.							11	90
Керів.	Левтун І.І.					«КПП» ім. Ігоря Сікорського, ФБТ		
Затверд.								

розвитку, таких як заміна нафтового дизельного палива, захист навколишнього середовища та економічне зростання, та економічного зростання через конкуренцію з альтернативними видами використання в якості продуктів харчування [7].

Біопаливо другого покоління зазвичай класифікується як паливо, вироблене з неїстівної сировини, такої як пшенична солома, деревина, тверді відходи і т.д. Біопаливо другого покоління уникає багатьох проблем, з якими зіткнулося перше покоління, виробляючи біопаливо з сільськогосподарських та лісових відходів, а не з харчових продуктів. Однак брак доступної сировини в багатьох країнах обмежує потенціал для широкомасштабного виробництва альтернативних видів палива [8].

Паливо нехарчового та не сільськогосподарського походження становить третє покоління біопалива. Водорості вважаються одним з найкращих варіантів для виробництва біодизеля завдяки високому виходу олії та можливості вирощування водоростей на неорних землях [8]

1.3 Характеристика біодизельної промисловості в світі та в Україні

Основною сировиною для біодизеля є жирні, рідше – ефірні олії таких культур: ріпак, соя, канола, кастор, ятрофа, пальма. В Європі основою культурою є ріпак. За допомогою ріпаку можна отримати до 1190 літрів олії з гектара. Ріпак є універсальною культурою, яка займає близько 10% загальної площі посівів олійних культур у світі. У Європі ріпак може конкурувати з соняшником. Він трохи вступається перед соняшником, але перевершує сою за вмістом олії. Ріпак регулярно дає стабільні врожаї, середньою врожайністю 20-25 ц/ге (у порівнянні з середньою врожайністю соняшника, яка становить 10-12 ц/ге). Ріпак також поліпшує структуру ґрунту та його фітосанітарний стан, збагачує його азотом та іншими мікроелементами, що сприяє значному збільшенню врожайності зернових, особливо пшениці, коли використовується як

					ДП БЕ91 17.000 ПЗ		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			
Розроб.	Степанчук А.В.					Стадія	Арк.
Конс.							12
Керів.	Левтун І.І.					«КПП» ім. Ігоря Сікорського, ФБТ	
Затверд.							
						Акрушіє	90

попередник [5, 9].

Таблиця 1.1.3.1 Характеристика виробництва біодизеля з основних олійних культур [9].

Культура	Країни	Виробництво біодизелю (л/га)
Соя	США, Аргентина	446
Канола	Канада	1000
Кастор	Бразилія	1410
Ятрофа	Індія	1900
Пальма	Індонезія, Філіппіни	до 5900

Потенційні можливості використання інших олійних культур для отримання біодизельного палива ще не повністю досліджені. Наприклад, в Нікарагуа розпочато застосування горіхових олій, а в Греції успішно проведено дослідження використання бавовняної олії. У Індії біопаливо виробляють з ядер горіха, який росте на незручних і не використовуваних землях. В помірних широтах можна отримати біодизельне паливо з олії соняшнику, рицини, конопель. Велика Британія використовує відпрацьовану олію, обсяги якої досягають 70 млн літрів на рік, окрім ріпаку [9]. Сировинною базою для виробництва біодизеля також можуть бути тваринні жири з м'ясокомбінатів, рибний жир, водорості та інші ресурси. В енергозалежних країнах особливу увагу приділяють розвитку технічного напрямку в сільському господарстві. Прогнозується, що в середньостроковій перспективі попит на олійне насіння в ЄС зростатиме швидше, ніж попит на продукцію кормового та продовольчого ринків, що призведе до збільшення інвестицій у сільське господарство. [9].

Донедавна сільськогосподарські підприємства мали обмежений доступ до коштів, які людство витрачає на продукти харчування. Однак цих доходів, за

					ДП БЕ91 17.000 ПЗ		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			
Розроб.	Степанчук А.В.					Стадія	Арк.
Конс.							13
Керів.	Левтун І.І.					«КПП» ім. Ігоря Сікорського, ФБТ	
Затверд.							
						Акрушіє	90

поміркованими цінами і попитом, було недостатньо, оскільки підтримка аграрного сектора вимагала значних фінансових вкладень з бюджету держави. Здатність постачати споживачам екологічно чисту енергію надає сільському господарству нові можливості розвитку. Виробництво біодизеля дозволяє використовувати сільськогосподарські землі, які раніше залишалися невикористаними, і створювати нові робочі місця. Для подальшого прогресу в галузі сільського господарства, аграріям необхідно уважно відстежувати сучасні ринкові тенденції, перерозподіляти посівні площі і не забувати про те, що зайнятість великих площ під вирощування сировини для біодизеля (з використанням підвищених доз засобів захисту рослин) може призвести до деградації ґрунтів та погіршення їх якості. [9].

В Україні головним сировинним матеріалом для виробництва біодизеля є ріпак (хоча лише 20% врожаю продається на внутрішньому ринку). За оцінками Мінагрополітики, Україна має потенціал вирощування цієї культури на площі близько 3 млн га при середній врожайності 15-30 ц/га. У масштабах країни переробка 75% врожаю ріпаку дозволить отримати до 2,7 млн тонн біодизеля. Ці обсяги еквівалентні енергетичній цінності 2,3 млн тонн звичайного дизельного палива і вимагають переробки 7,7 млн тонн нафти. У Вінницькій, Житомирській, Івано-Франківській, Київській, Львівській, Волинській та інших областях існують сприятливі умови для вирощування ріпаку. [9].

На даний момент, в більшості сільськогосподарських господарств, ріпак вирощують без належного врахування попередників, що негативно впливає на досягнення високих врожаїв (зазвичай вони не перевищують 9...12 ц/га). Крім того, урожайність даної культури можна суттєво підвищити (до 25...30 ц/га), якщо використовувати чотирирічну сівозміну з таким чергуванням:

– пар (чистий чи сидеральний, тобто коли до першої половини літа парове поле займають рослинами-сидератами, які потім заорюють у ґрунт як зелене

					ДП БЕ91 17.000 ПЗ		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			
Розроб.	Степанчук А.В.					Стадія	Арк.
Конс.							14
Керів.	Левтун І.І.					«КПП» ім. Ігоря Сікорського, ФБТ	
Затверд.							
						Акрушіє	90

добриво);

- ріпак (ярий та озимий);
- пшениця (ярова та озима);
- ярові зернові (ячмінь чи овес).

Насиченість наведених сівозмін ріпаком – відповідає 25 і 40 % [10].

Ріпак виносить з ґрунту в 1,5 рази більше поживних речовин, ніж зернові культури. Тому для досягнення врожайності в 20 ц/га олійного насіння рекомендується застосовувати 1,5 ц/га складних добрив (азот/фосфор/калій = 10:26:26) та 3 ц/га аміачної селітри після непарових попередників. Якщо є належний захист від шкідників, хвороб і бур'янів, то товарний ріпак можна вирощувати на тій же ділянці протягом 1...2 років [10]. Це дозволить значно скоротити площу та кількість господарств, що спеціалізуються на вирощуванні ріпаку. Зауважено, що одне господарство, що займається зерновими культурами й використовує чистий пар, може вирощувати ріпак на площі 200 га. Для цього воно повинно мати ланку механізаторів та парк техніки, що складається з шести тракторів МТЗ-1211, двох комбайнів Дон-1500, а також 18 одиниць сільськогосподарської техніки, включаючи сушильно-сортувальну установку. Щоб отримати 300 тис. т олійного насіння на площі 2000 га, при умові вирощування ріпаку не більше 200 га на одному господарстві, кількість таких господарств в Україні повинна становити 1250. Це означає, що спеціалізованих господарств, які вирощують ріпак, знадобиться вчетверо менше. [10].

Основні ризики та невизначеності, пов'язані з майбутнім розвитком біопаливного сектору, впливають з політичного середовища та цін на нафту. Невизначеність у політиці охоплює зміни в рівнях повноважень, механізмах правозастосування, інвестиціях у нетрадиційну біопаливну сировину, податкових пільгах та субсидіях для біопалива та викопних видів палива, а також в технології електромобілів та політиці їх просування. [3].

					ДП БЕ91 17.000 ПЗ		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			
Розроб.	Степанчук А.В.					Стадія	Арк.
Конс.							15
Керів.	Левтун І.І.					«КПП» ім. Ігоря Сікорського, ФБТ	
Затверд.							
						Акрушіє	90

Політичне середовище залишатиметься невизначеним, оскільки його напрямок залежить від розвитку сільського господарства та цін на нафту. Розвиток нафтового ринку впливає на політику через його вплив на конкурентоспроможність біопалива та субсидії, надані біопаливному сектору. Інша невизначеність пов'язана з пропозицією кормів; зазвичай країни намагаються використовувати свої надлишки товарів, щоб зберегти доступність продовольства. Оскільки біопаливо конкурує з продукцією харчів і може мати негативні наслідки для землекористування, країни обережно ставляться до швидкого розширення виробництва біопалива. Тим не менш, очікується, що обов'язкові квоти на змішування будуть продовжувати розвиватися позитивно протягом передбачуваного періоду для деяких країн з розвиваючоюся економікою. [3, 10].

Розвиток технологій і можливі зміни в нормативно-правовій базі транспортного сектору можуть призвести до значних змін у прогнозах розвитку ринку біопалива. Очікується, що країни впровадять політику, спрямовану на використання нових технологій з метою зменшення викидів парникових газів. Це може включати обов'язкові квоти на змішування, субсидії та зниження податків. Усі ці заходи перенесли невизначеність в енергетичному секторі на сільськогосподарські ринки. Тому рухливою силою майбутнього попиту на біопаливо буде реакція приватного сектору на ці заходи. Зараз автомобільна та інші галузі інвестують у електромобілі, що залежить від поширення цієї технології та політики, яка підтримує її впровадження. Це може сприяти потенційному зменшенню використання біопалива протягом наступного десятиліття і надалі. [3,10].

1.4 Біодизель з водоростей

Для виробництва біодизельного палива використовують жири рослинного

					ДП БЕ91 17.000 ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.	Степанчук А.В.					Стадія	Арк.	Акрушів
Конс.							16	90
						«КПП» ім. Ігоря Сікорського, ФБТ		
Керів.	Левтун І.І.							
Затверд.								

або тваринного походження. Це можуть бути масла, такі як рапсове, соєве, пальмове, кокосове масло, або будь-яке інше рослинне масло, а також водорості. Водорості мають високий вміст ліпідів, що робить їх перспективним джерелом сировини для виробництва біодизелю [11]. Вчені зазначають, що основною перевагою використання водоростей є їхнє просте культивування порівняно з злаковими культурами, а також відсутність необхідності витратити цінні природні ресурси, такі як прісна вода та вільна земельна площа. Водорості зростають і здійснюють процес фотосинтезу навіть в екстремальних умовах, де іншим організмам важко вижити. Дослідники з Рочестерського технологічного інституту запропонували вирощувати водорості у стічних водах, що дозволить одночасно очищувати ці води від хвороботворних мікроорганізмів та отримувати біодизель. Технології використання водоростей як джерела енергії займають центральне місце серед сучасних альтернативних енергетичних підходів. Цей підхід має вагомні переваги: по-перше, використання водоростей дозволить зберегти цінні сільськогосподарські землі для продовольчих потреб людства. По-друге, водорості є більш продуктивним джерелом рослинного масла в порівнянні з традиційними олійними культурами. [2, 12].

На сьогоднішній день водорості стають основним джерелом виробництва біопалива у світі. Вони вважаються найбільш безпечними, неконкурентними та швидкозростаючими організмами серед тих, що можуть бути використані для виробництва біодизеля. Вони здатні рости без особливого догляду на відходах поживних речовин [13]. і вважаються кращим джерелом для виробництва біодизеля, оскільки інші джерела можуть спричинити продовольчі проблеми, оскільки вони в основному включають ті рослини, які використовуються в їжу. Крім того, вміст біодизелю в сільськогосподарських культурах є менш стійким і меншим у порівнянні з водоростями[14]. Водорості містять близько 80% енергії від тієї, що міститься в нафті. Клітини водоростей містять до 30% ліпідів, що

					ДП БЕ91 17.000 ПЗ		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			
Розроб.	Степанчук А.В.					Стадія	Арк.
Конс.							17
Керів.	Левтун І.І.					«КПП» ім. Ігоря Сікорського, ФБТ	
Затверд.							
						Акрушіє	90

вище, ніж в інших джерелах, включаючи соєві боби та пальмову олію.

Мікрородості мають 30-40% ліпідів від сухої ваги [15].

Мікро- та макрородості можна вирощувати у великих масштабах за короткий період часу. Мікрородості є фотосинтезуючими та гетеротрофними і мають потенціал для вирощування в якості енергетичних культур. Вони здатні виробляти певні економічно важливі сполуки, включаючи жири та олії. Біопаливо з водоростей не містить шкідливих хімічних речовин, тому навколишнє середовище може залишатися чистим після спалювання. [12, 15].

Стає все більш очевидніше, що жоден з існуючих наземних видів рослин не може конкурувати з водоростями за ефективність фотосинтезу, який визначає врожайність і вміст олій, а отже, енергетичний потенціал. Показники виробництва олії з інших сільськогосподарських культур демонструють наступне: виробництво кукурудзи складає 172 літри на гектар в рік, пальмової олії - 5950 літрів на гектар, тоді як типові "енергетичні" водорості здатні до виробництва до 95000 літрів на гектар в рік при вирощуванні у відкритих водоймах [16]. Водорості в енергетичній галузі перетворюють проблему вуглекислого газу на фактор прибутку. При цьому вуглекислий газ перетворюється на цінний ресурс зв'язаного вуглецю, який можна використовувати на промисловій основі.

Підбиваючи підсумок, водорості мають декілька переваг порівняно з іншими джерелами виробництва біопалива. По-перше, вони виробляють в 15-100 разів більше олії з гектара, ніж ріпак, пальмова олія чи соя [17]. По-друге, водорості є непродовольчою біомасою, тому їх переробка на біопаливо не створює загрози для продовольчої безпеки країни. Крім того, вони ростуть в 20-30 разів швидше за наземні рослини, а деякі види можуть подвоїти свою масу кілька разів на добу [17]. Водорості також легше піддаються технологічній переробці на рідкі види палива, оскільки не мають твердої оболонки та

					ДП БЕ91 17.000 ПЗ		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			
Розроб.	Степанчук А.В.					Стадія	Арк.
Конс.							18
Керів.	Левтун І.І.					«КП» ім. Ігоря Сікорського, ФБТ	
Затверд.							
						Акрушіє	90

практично не містять лігніну. Це робить їх переробку більш технологічно простою та ефективною, ніж переробка будь-якої наземної біомаси [17].

Водорості можуть бути вирощувані в різних водоймах, включаючи прісні, солоні та промислові стічні води, які використовуються для очищення. Вони також можуть бути вирощені в промислових масштабах у біореакторах та фотобіореакторах, освітлюваних штучними джерелами світла, або у відкритих ставках на непридатних для вирощування сільськогосподарських культур землях, включаючи пустелі. Фотобіореактори можуть бути встановлені в технологічних лініях існуючих промислових підприємств, таких як теплоелектростанції, нафтохімічні заводи та цементні заводи [17].

Ще однією перевагою водоростей є їх здатність зменшувати емісію CO₂, оскільки вони можуть поглинати до 90% викидів CO₂ і виділяти кисень [17]. Виробництво біопалива з водоростей не вимагає змін українського законодавства, на відміну від виробництва біоетанолу. Водорості також є джерелами олій, протеїнів і вуглеводів [16, 17].

Технологічний процес виробництва моторного палива з водоростей майже повністю уникає утворення відходів. Після отримання дизельного палива, сухі відходи біомаси водоростей зберігають всі необхідні вітаміни і цінні речовини, тому їх можна використовувати як добавки до корму в рибних господарствах та тваринницьких фермах. Крім того, є можливість перетворення цих відходів на паливні брикети. З раціональним підходом до цього питання можна досягти практично повного використання всієї біомаси, що зробить виробництво екологічно безвідходним та економічно ефективним [18].

					ДП БЕ91 17.000 ПЗ		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			
Розроб.	Степанчук А.В.					Стадія	Арк.
Конс.							19
							90
Керів.	Левтун І.І.					«КПП» ім. Ігоря Сікорського, ФБТ	
Затверд.							

РОЗДІЛ 2. ХАРАКТЕРИСТИКА БІОЛОГІЧНОГО АГЕНТА ТА ТЕХНОЛОГІЧНИХ РІШЕНЬ

2.1.1 Загальна характеристика водоростей як продуцентів ліпідів для виготовлення біопалива.

При виробництві біодизеля одними з найважливіших критеріїв до сировини - можливість накопичувати в собі олії та жирні кислоти, а також швидкість вирощування культури. Серед водоростей за даними параметрами фаворитами, однозначно, є мікроводорості [19].

Накопичення олій та жирних кислот залежить від виду мікроводоростей та умов культивування, включаючи температуру, доступність світла та склад середовища [19]. Температура, світло та концентрація азоту є факторами вирощування, які безпосередньо впливають на вміст ліпідів та жирних кислот у мікроводоростях. Відомо, що серед поживних речовин концентрація азоту критично впливає на накопичення ліпідів, так що обмеження азоту збільшує вміст ліпідів у мікроводоростях [20]. Дефіцит поживних речовин перешкоджає росту клітин, але деякі види все ще синтезують жирні кислоти, які за таких умов не використовуються для утворення мембранних ліпідів, а накопичуються у вигляді тригліцеридів. Олії з мікроводоростей є чудовими джерелами для виробництва біоенергії та біоматеріалів. Залежно від виду та умов вирощування, виробництво олій з мікроводоростей може досягати 75% від їхньої біомаси. Цей показник можна ще більше підвищити за рахунок модифікації життєвого циклу мікроводоростей, параметрів культивування, а також методів вилучення та відновлення. Однак застосування таких модифікацій і вибір відповідних стратегій відновлення та вилучення може бути складним завданням для виконання в промислових масштабах через пов'язані з цим технічні та економічні перешкоди. Мікроводорості з найвищим вмістом ліпідів, від 10 до 67%, належать до видів *Chlorella*, та *Scenedesmus* [21].

					ДП БЕ91 17.000 ПЗ		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			
Розроб.	Степанчук А.В.					Стадія	Арк.
Конс.							20
Керів.	Левтун І.І.					«КПП» ім. Ігоря Сікорського, ФБТ	
Затверд.							
						Акрушіє	90

2.1.2 Характеристика ліпідів водоростей

Ліпіди, що виробляються мікроводоростями, можна розділити на дві основні групи: полярні ліпіди, такі як гліцерофосфоліпіди, які відіграють важливу роль у клітинній структурі; і неполярні ліпіди, такі як триацилгліцерини, що в основному відповідають за зберігання енергії [22]. Структурні ліпіди (полярні ліпіди) зазвичай мають довгі ланцюги жирних кислот, які можуть трансформуватися в поліненасичені жирні кислоти (ПНЖК), до цього типу жирних кислот належать ейкозапентаєнова кислота (ЕПК), докозапентаєнова кислота (ДПК) і докозагексаєнова кислота (ДГК). ПНЖК відіграють важливу роль у формуванні мітохондріальних суперкомплексів, вони мають потенціал для виробництва біопалива і застосовуються для лікування деяких захворювань, таких як атеросклероз, хвороба Паркінсона та Альцгеймера. Полярні ліпіди та деякі стерини забезпечують селективно проникний бар'єр, який захищає клітину ззовні та допомагає розділяти різні внутрішньоклітинні органели [23, 24, 25]. Ці ліпіди відіграють особливу роль в оптимальній підтримці плинності мембран для різноманітних метаболічних і біосинтетичних процесів і беруть безпосередню участь у різних внутрішньоклітинних мембранних злиттях. Крім того, ці структурні ліпіди відіграють важливу роль у клітинних сигнальних шляхах і відіграють ключову роль у реагуванні на зміни в клітинному середовищі [22, 25, 26].

З іншого боку, ТАГ відіграють фундаментальну роль у накопиченні енергії в клітині мікроводорості, де процес фотосинтезу генерує основну енергію шляхом перетворення сонячного світла в корисну для клітини молекулу. Для цього клітини використовують молекулу з вуглецевим скелетом (гліцерат-3Р), а потім перетворюють її на більш важливі молекули (такі як піруват, глюкоза, ксилоза, ацетат, амінокислоти, ліпіди тощо); цей дуже складний процес допомагає клітині генерувати біохімію, яка є частиною основного та складного метаболізму, росту, накопичення та підтримки енергії. Більше того, менше 10%

					ДП БЕ91 17.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

цих сполук можуть метаболізуватися з утворенням жирних кислот у хлоропласті [27, 28].

Останній продукт жирних кислот може бути використаний для виробництва фосфатидної кислоти і діацилгліцерину в ендоплазматичному ретикулумі (ЕР) і хлоропластах, участь яких, як відомо, діє на рівні клітинного метаболізму. На накопичення ТАГ (особливо в таких ситуаціях, як нестача поживних речовин або в стресових умовах) можуть впливати різноманітні умови та фактори, які можуть впливати на накопичення ТАГ [22]. Деякі діацилгліцерини, отримані з ЕР, можуть бути використані для накопичення ТАГ в ЕР [29]; ці ТАГ в основному утворюються в світлий період в ЕР і зберігаються там, вони можуть бути повторно використані для побудови полярних ліпідів у темний період [30].

Клітини мікроводоростей складаються з насичених і мононенасичених жирних кислот. Вважалося, що тільки червона водорість *Porphyridium cruentum* здатна накопичувати ПНЖК у ТАГ [30, 31], однак нещодавні дослідження виявили, що деякі види зелених мікроводоростей, такі як *Parietochloris incisa*, мають кращу здатність виробляти велику кількість омега-6, довголанцюгових ПНЖК. Інші види, такі як *Pavlova lutheri*, *Nannochloropsis oculata*, *Thalassiosira pseudonana* та *Phaeodactylum tricornutum* також можуть накопичувати ТАГ, але в менших кількостях [32, 33].

Різні дослідження показали, що ТАГ можуть бути використані для виконання інших функцій, окрім активації накопичення енергії. Наприклад, вони можуть відігравати опосередковану роль у реорганізації мембрани у відповідь на раптову зміну умов навколишнього середовища, ТАГ можуть сприяти виробленню полярних ліпідів шляхом перенесення спеціальної ацильної групи, що викликає швидку адаптивну перебудову мембрани [22, 34].

					ДП БЕ91 17.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

2.2 Вибір продуценту для виготовлення біодизеля

Пошук продуцентів з високою біомасою, що характеризуються значним вмістом ліпідів, високою швидкістю росту та продуктивністю, а також оптимізація умов їх культивування (стійкі поживні середовища, температура, рН, інтенсивність освітлення тощо) є пріоритетними завданнями для ефективного виробництва біопалива з мікроводоростей[35]. На жаль, культивовані види водоростей становлять лише незначну частину світової колекції альгофлори, яка налічує понад 45 000 видів (в Україні понад 5200). Всього близько 50 видів відомі як водорості з високим вмістом жиру (накопичують ліпіди в кількості понад 10% сухої маси). Це представники *Bacillariophyta*, *Chlorophyta* (джгутикові та коккові водорості), *Haptophyta*, *Eustigmatophyta*, *Euglenophyta*, *Rhodophyta*, *Streptophyta* та ін., наприклад, представники родів *Botryococcus*, *Chlorella*, *Nannochloris*, *Neochloris*, *Dunaliella*, *Nannochloropsis*, *Monallanthus*, *Isochrysis*, *Tetrasel*, *Cryptocodinium*, *Cylindrotheca*, *Phaeodactylum*, *Nitzschia* тощо. Важливими елементами є присутність олійних видів водоростей у різних водорослевих колекціях та їх активне зростання в умовах вирощування. Колекція культур мікроводоростей НАН України (IBASU-A) — одна з найбільших колекцій водоростей в Україні. Вона містить понад 500 штамів 86 видів, що належать до 40 родів, 9 порядків і 6 класів. Основну частину колекції складають зелені водорості (*Chlorophyta*), які є провідною таксономічною групою водоростевої флори України. IBASU-A вважається унікальним, оскільки включає більше 75% автентичних штамів, виділених з різних регіонів України [36].

На першому етапі дослідження було вивчено колекцію IBASU-A для виявлення деяких перспективних кандидатів для виробництва палива. Критеріями вибору були здатність виду накопичувати велику кількість ліпідів, активний ріст і толерантність до стресових факторів і біологічного забруднення. Всього виявлено 33 штамми 12 видів, що належать до родів *Acutodesmus* (7), *Botryococcus* (1), *Chlorella* (5), *Chloroidium* (2), *Desmodesmus* (8), *Euglena* (2),

					ДП БЕ91 17.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

Monoraphidium (2) і *Parachlorella* (6). скринінгували та визначали відповідні середовища та умови росту [36].

Уніалгальні або аксенові культури досліджуваних штамів вирощували в умовах інтенсивного культивування. Усі досліди проводили в колбах Ерленмейєра місткістю 1000 мл, що містили 200 мл рідкого мінерального середовища. Штами культивували з використанням мінеральних середовищ, придатних для кожного виду. РН кожного середовища регулювали перед автоклавуванням. Згідно з дослідженням проведеним Царенко та ін. [37], оптимальний рН становив 6,5-8,5 для більшості досліджуваних видів, за винятком оптимального рН 6,0-7,5 для видів *Monoraphidium*, рН 7-8 для видів *Euglena* та рН 8,5-9 для *Botryococcus braunii*. Усі колби рівномірно засівали суспензією 2-тижневих культур водоростей та інкубували протягом 7-10 днів

Табл.2.2.1 Порівняння штамів IBASU-A, обраних як перспективні продуценти високої біомаси [36].

Види	умови культивування		Продуктивність (г/л/день)
	рН	Температура (°C)	
<i>Acutodesmus dimorphus</i>	6.5–8.5	26–30	0.6±0.03–1.2±0.17
<i>A. obliquus</i>	6.5–8.5	26–30	0.34±0.02–0.85±0.04
<i>Botryococcus braunii</i>	8.5–9.0	26–30	1.3±0.19
<i>Chlorella vulgaris</i>	6.5–8.5	30–32	0.51±0.09–1.6±0,26
<i>Chloroidium saccharophilum</i>	6.5–8.5	30–32	0.48±0.06–0.86±0.04
<i>Desmodesmus armatus</i>	6.5–8.5	26–30	0.39±0.01
<i>D. curvatocornis</i>	6.5–8.5	26–30	0.38±0.01
<i>D. lunatus</i>	6.5–8.5	26–30	0.44±0.14
<i>D. magnus</i>	6.5–8.5	26–30	0.98±0.19–1.2±0.17

					ДП БЕ91 17.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

Продовження табл. 2.2.1

<i>Euglena sp.</i>	7.0–8.0	30–32	0.38±0.03
<i>Monoraphidium griffithii</i>	6.0–7.5	26–30	0.29±0.02
<i>Monoraphidium sp.</i>	6.0–7.5	26–30	0.31±0.04
<i>Parachlorella kessleri</i>	6.0–7.5	30–32	0.95±0.12

при температурі 26-32°C, постійному освітленні та при постійній аерації. Початкова щільність клітин у колбах становила 5×10^6 клітин/мл. Добовий приріст біомаси водоростей оцінювали мікроскопічним підрахунком концентрації клітин або визначенням концентрації сухої маси клітин гравіметрично [38]. Кінетичні характеристики росту водоростей, такі як питома швидкість росту (μ) і продуктивність (P), були визначені на основі попередньо отриманих вимірювань.

Порівняльне дослідження ростових характеристик 33 відібраних штамів показало, що більшість із них характеризується активним ростом, високою питомою швидкістю росту (μ) і продуктивністю (P). У культурах найбільш продуктивних штамів видів *Chlorella*, *Chloroidium* і *Parachlorella* максимальні концентрації клітин (Б) досягали $38\text{--}250 \times 10^6$ клітин/мл. Водночас питома швидкість росту та продуктивність становили 0,55–1,4 на добу і $9,5\text{--}72,5 \times 10^6$ клітин/мл/добу відповідно. У культурах *Acutodesmus* і *Desmodesmus* максимальна концентрація клітин досягала $26\text{--}84,5 \times 10^6$ клітин/мл, питома швидкість росту і продуктивність 0,35-1,2 на добу і $6,4\text{--}29 \times 10^6$ клітин/мл/добу, відповідно. За оптимальних умов культивування (стійке живильне середовище, постійне освітлення, температура 30-32°C, аерація тощо) ріст біомаси водоростей коливався в діапазоні від 0,34 г сухої речовини на літр до 1,6 г сухої речовини на літр на добу (табл. 1). Для більшості культур була характерна короткочасна лаг-фаза (1-2 доби), тобто мали короткий адаптаційний період, а найвищу швидкість – під час активного росту. Наявність бактерій-сателітів у

					ДП БЕ91 17.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		25

культурах водоростей досліджуваних штамів не впливала на їх ростові характеристики. Продуктивність штамів *Chlorella*, *Chloroidium* і *Parachlorella* була найвищою і досягала 0,51-1,6 г сухої ваги на л на добу. Продуктивність штамів *Acutodesmus* і *Desmodesmus* була дещо нижчою і становила в середньому 0,34-1,2 і 0,32-1,2 г сухої ваги на літр на добу відповідно [36, 38].

Найменш продуктивні штами водоростей належали до роду *Scenedesmus* (*S. obtusus*, *S. rasiborskii*) з приростом біомаси лише 0,11-0,24 г сухої ваги на літр на добу. Інші штами, що належать до видів *Monoraphidium* і *Euglena*, мали досить високий рівень продуктивності; тобто до 0,29-38 г сухої ваги на літр на добу. Загалом *Acutodesmus dimorphus* 251, 252, 254 (В – $35-39 \times 10^6$ клітин/мл, μ – 0,46-0,52 на добу, Р – $6,4-9,2 \times 10^6$ клітин/мл на добу), *Desmodesmus magnus* 401, 402 та *D. multivariabilis var. turskensis* 398 ($84,5 \times 10^6$ клітин/мл, μ – 0,94-1,2 добу, Р – $22,8-29 \times 10^6$ клітин/мл/добу), *Chlorella vulgaris* 189, 192 (250×10^6 клітин/мл, μ – 1,4 добу, Р – $72,5 \times 10^6$ клітин/мл/добу), *Parachlorella kessleri* 444 (В – $123,4 \times 10^6$ клітин/мл, μ – 0,68 добу, Р – $24,3 \times 10^6$ клітин/мл/день-) виявились найпродуктивнішими штамами зі збільшенням біомаси в діапазоні 0,58 г сухої маси на літр до 1,6 г сухої маси на літр на добу (табл. 1) [36, 38].

Ці дані можуть бути використані для подальшого широкомасштабного культивування та експлуатації відібраних штамів. Крім того, деякі дані показали, що активність росту водоростей може бути пов'язана з таксономічним положенням досліджуваного виду. Наприклад, середня продуктивність видів, що належать до *Trebouxiophyceae* (*Chlorella*, *Chloroidium*, *Parachlorella*), була вищою, ніж у представників *Chlorophyceae* (*Acutodesmus*, *Desmodesmus* і *Scenedesmus*). Отже, середня продуктивність видів *Acutodesmus* і *Desmodesmus* була вищою, ніж у *Scenedesmus*. Така інформація була б корисною для виділення та скринінгу нових перспективних штамів [36,39].

Згідно з літературними даними, деякі прісноводні види зелених водоростей та евгленових характеризуються найвищим вмістом ліпідів у своїй біомасі. Наприклад, представники *Scenedesmus* (включаючи *Acutodesmus* і *Desmodesmus*)

					ДП БЕ91 17.000 ПЗ	Арк.
						26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

здатні накопичувати ліпіди у своїй біомасі до 58,3% сухої маси, *Choricystis* – 59,3%, *Monoraphidium* – 52%, *Chlamydomonas reinhardtii* – 21% та *Euglena gracilis* – 14-20% [40]. Незалежно від високої кількості ліпідів, тобто одного з найважливіших критеріїв відбору, використання деяких штамів є проблемою через їхню вразливість до інвазії інших водоростей, бактерій або грибів. Види *Chlamydomonas* були виключені зі списку перспективних штамів через їх високу чутливість до забруднення дрібноклітинними зеленими та синьо-зеленими водоростями, які були очевидні при культивуванні. Крім того, численні повідомлення в літературі свідчать про те, що види *Botryococcus* містять найбільшу кількість ліпідів. Ці види вважаються найбільш перспективними об'єктами для виробництва палива, оскільки вони можуть накопичувати до 70% вуглеводнів за сухою вагою [40]. Вони зустрічаються в різних кліматичних зонах і мають широкий екологічний діапазон. В Україні *Botryococcus braunii* та інші види цього роду поширені в різних типах водойм, де активно розвиваються, викликаючи цвітіння водоростей [36, 40].

Як у природі, так і в культурних умовах *B. braunii* демонструє численні морфологічні та хімічні різновиди. Кількість і якість його ліпідів залежить від штамів, умов культивування та фази росту. Результати дослідження також показали високу продукцію біомаси штаму IBASU-A 504 (1,3 г сухої маси на літр на добу) і здатність накопичувати ліпіди до 46% сухої маси. Проте виявилось, що він дуже чутливий до біологічного забруднення та умов навколишнього середовища, що спричинило нестабільний ріст і значне зниження його продуктивності. Ці недоліки можуть пояснити, чому штами *Botryococcus* ще не знайшли широкого використання в промислових масштабах. Тим не менш, унікальна біохімічна здатність цих видів і перспективи генетичних модифікацій їхніх геномів можуть підтримувати їх використання як ефективних продуцентів ліпідів [41]. Слід також зазначити, що більшість вище- перераховані види та штами широко використовуються у важливих і прикладних дослідженнях та різних галузях народного господарства, харчової та фармацевтичної

					ДП БЕ91 17.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		27

промисловості. Наприклад, *A. dimorphus*, *A. obliquus*, *Ch. vulgaris*, *P. kessleri* є відомими продуцентами білків, вітамінів та інших біоактивних сполук. Застосування деяких штамів *A. dimorphus*, *Ch. vulgaris*, *Chloroidium saccharophilum*, *Euglena gracilis*, *Monorophidium (Ankistrodesmus) sp.* є високоефективним для розвитку замкнутого циклу використання води, а також очищення та доочищення різних типів стічних вод. Таким чином, прибутковість водоростей з недостатньою комерційною цінністю буде піднято через їх багатоцільове використання. Однак це вимагає додаткових досліджень специфіки культивування змішаних культур, міксотрофії зелених водоростей, взаємодії між водоростями та їх супутніми організмами тощо. [36, 42].

Результати підтвердили наявність 33 штамів з високою біомасою в колекції культур мікроводоростей НАН України (IBASU-A). Серед них *Acutodesmus dimorphus* (В – $35-39 \times 10^6$ клітин/мл, μ – 0,46-0,52 добу, Р – $6,4-9,2 \times 10^6$ клітин/мл/добу), *Desmodesmus magnus* і *D. multivariabilis*. (В– $84,5 \times 10^6$ клітин/мл, μ – 0,94-1,2 добу, Р – $22,8-29 \times 10^6$ клітин/мл/добу), *Chlorella vulgaris* (250×10^6 клітин/мл, μ – 1,4 добу, П – $72,5 \times 10^6$ клітин/мл/добу), *Parachlorella kessleri* ($123,4 \times 10^6$ клітин/мл, μ – 0,68 добу, Р – $24,3 \times 10^6$ клітин/мл/добу) є найбільш перспективними штамми з приростом біомаси в діапазоні від 0,58 г/л до 1,6 г/л/добу. Загалом, культивування цих штамів розглядається як потенційний біоресурс сировини для виробництва біодизеля та інших промислових потреб [36, 43].

2.3 Висновок. Обґрунтування вибору продуцента для отримання біодизеля

Підводячи підсумок, на основі аналізу мікроводоростей продуцентів найперспективнішими продуцентами біодизелю є мікроводорості *Chlorella vulgaris* з вмістом ліпідів у сухій речовині (14–22 %) та з продуктивністю приросту біомаси (0.51 ± 0.09 – $1.6 \pm 0,26$ г/л/день) та *Acutodesmus dimorphus*. з вмістом ліпідів у сухій речовині (22-27%) та з продуктивністю приросту біомаси

					ДП БЕ91 17.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28

(0.6 ± 0.03 – 1.2 ± 0.17 г/л/день). Також з проаналізованих джерел [44], [45] відомо що *Chlorella vulgaris* важко культивується, та має схильність до контамінації. Ріст і здатність до накопичення нутрієнтів *Chlorella* мають сильну залежність від температури [46], на відміну від *Acutodesmus dimorphus* які відзначається широким діапазоном толерантності до фізичних та хімічних умов, зокрема до температури [47], що забезпечує більшу стабільність вирощування мікроводоростей та зменшення ризику втрати врожаю, особливо в помірних широтах з частими перепадами температури. Таким чином, виходячи з наведених даних в якості продуценту для дипломного проекту було обрано *Acutodesmus dimorphus*.

2.4 Обґрунтування вибору поживного середовища

У дослідженні «Стандартизація середовища росту та дослідження термостійкості прісноводної мікроводорості *Acutodesmus dimorphus* — потенціал штаму для виробництва біопалива» проведеним Хімічним науково-дослідницьким інститутом, Бхавнагар, (Індія) *A. Dimorphus* культивували у 4 різних середовищах (BG-11, BBM, CHU-10 та ZM) для оцінки впливу різних компонентів середовища на ріст. Рис. 2.4.1 показує зміни маси сухої клітини та продуктивності приросту біомаси *A. dimorphus*, культивованих на різних середовищах. Найвища маса сухої клітини (241,27 мг/л) та продуктивності (13,94 мг/л/день) були знайдено в культурі, вирощеній на BG-11, потім Культура вирощена на ZM (210,53 мг/л і 11,90 мг L⁻¹ день⁻¹, відповідно). Зміни у фотосинтетичних пігментах вимірювали, щоб перевірити ефект різних поживних середовищ за пігментним складом *A. dimorphus*. Найбільший вміст Хлорофілу а (29,33 мг/г) і каротиноїдів (6,23 мг/г) знайдено в культурі вирощеній на BG-11; тоді як Хлорофіл b був максимальним (18,78 мг г) у культурі, вирощеній на BBM. [48].

					ДП БЕ91 17.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		29

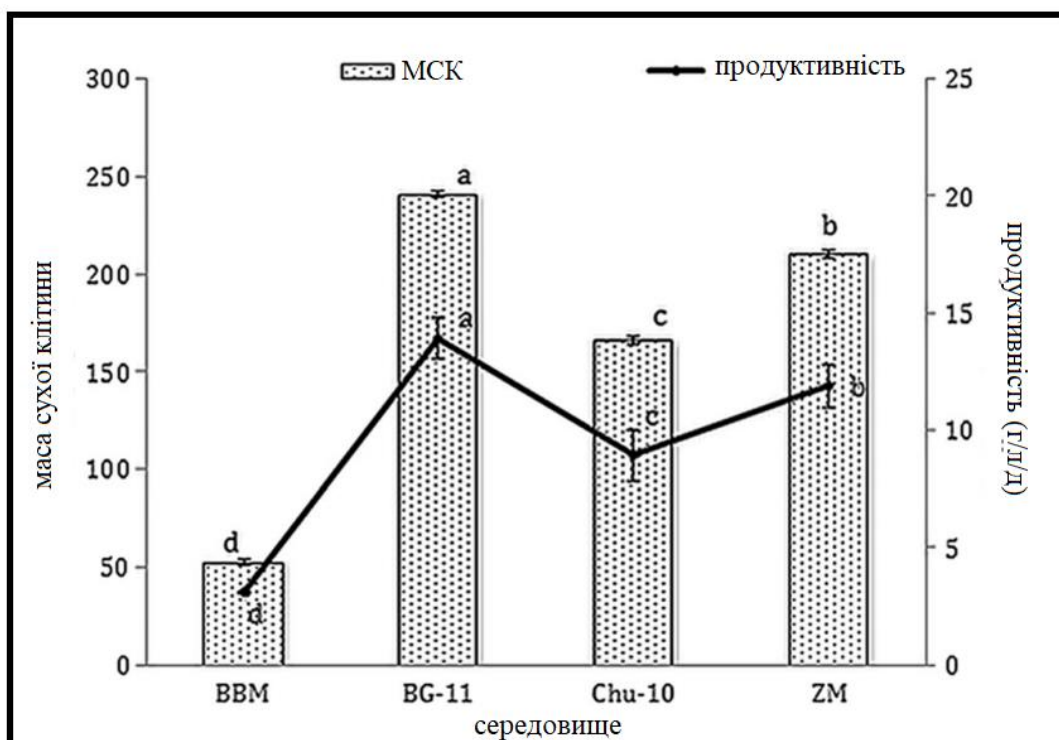


Рис 2.4.1. Вплив різних середовищ на масу сухої клітини (МСК) і продуктивність зростання біомаси *A. Dimorphus*.

Зміна вмісту ліпідів і вуглеводів *A. dimorphus* при культивуванні в різних середовищах наведено на рис. 3. Найвищий вміст ліпідів (31,95 %) був виявлений у ZM, а потім у BG-11-grown культури (24,60 %). Найвищий вміст вуглеводів (36,84 %) також було виявлено в ZM. на CHU-10- (28,20 %) та BG-11- (22,78 %) вирости культури. [48].

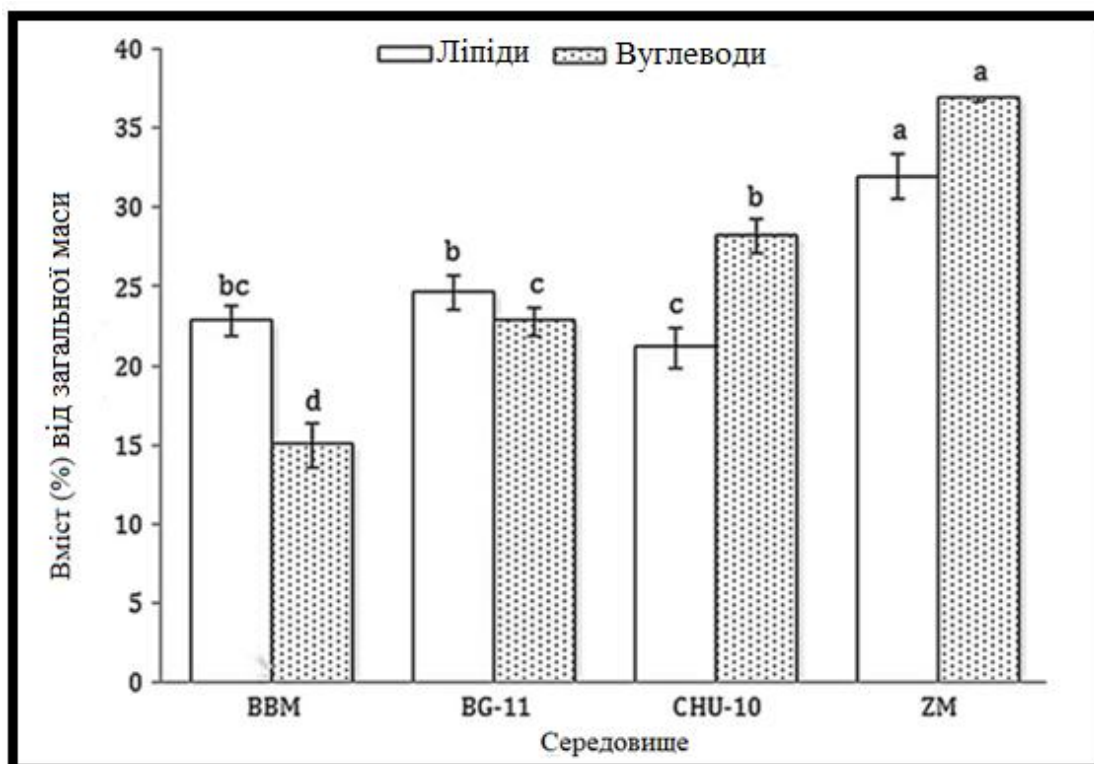


Рис 2.4.2. Вплив різних середовищ на вміст ліпідів та вуглеводів *A. Dimorphus*

Отже виходячи з даних дослідження, культивування *A. dimorphus* у середовищі BG-11 протягом 15 днів призвело до найвищої продуктивності біомаси з вмістом ліпідів 24,60 % і вуглеводів 22,78 %. Тому в якості середовища для культивування було вибрано середовище BG-11 [48].

2.5 Обґрунтування вибору технології вилучення ліпідів мікрводоростей з подальшим виробництвом біодизеля

Біомаса водоростей повинна бути зібрана і перероблена для отримання продуктів, таких як ТАГ, які потім можуть бути перестерифіковані для виробництва біодизеля. Складність полягає в тому, щоб вивільнити ліпіди з їх внутрішньоклітинного розташування в найбільш енергоефективний і економічний спосіб, уникаючи використання великої кількості розчинника і використовуючи якомога більше вуглецю в біомасі як рідке біопаливо, потенційно з вилученням другорядних цінних продуктів. Ключова вимога полягає в тому, щоб олія виділялася і вилучалася без значного забруднення

					ДП БЕ91 17.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		31

іншими клітинними компонентами, такими як ДНК або хлорофіл. Існує багато можливостей для підходів, заснованих на селективному розкладанні клітинної стінки, можливо, з використанням ферментів, а також нових підходів, що мінімізують використання розчинників [49].

Перетворення екстрагованого ТАГ на біодизель відбувається шляхом переестерифікації з метанолом для отримання метилових ефірів жирних кислот, що містяться в ньому. Зараз це стандартна промислова технологія, і не потрібно нічого додавати. Існують деякі докази того, що жирнокислотний склад ТАГ, виражений у деяких видах, може бути вищим у ненасичених кислотах, ніж зазначено в стандартах, що регулюють допустимий склад біопалива. Використання отриманого гліцерину робить важливий внесок в економіку [49].

Однією з головних перешкод для повного використання переваг ліпідуютьворюючих водоростей, у виробництві біодизеля є можливість успішного та ефективно видобувати олію з клітинної біомаси. Нижче наведено найбільш поширені методи екстракції та їхні особливості вилучення олії, зокрема, цінних жирних кислот [49].

Існує кілька добре задокументованих процедур вилучення олії з мікроводоростей: механічне пресування, гомогенізація, подрібнення, екстракція розчинником, екстракція надкритичною рідиною, ферментативна екстракція, екстракція за допомогою ультразвуку та осмотичний шок. Всі ці методи мають свої індивідуальні переваги та недоліки [49].

Механічний спосіб

Механічне руйнування, яке включає пресування, подрібнення та гомогенізацію, є підходом, який мінімізує забруднення із зовнішніх джерел, зберігаючи при цьому хімічну цілісність речовини (речовин), що початково містилася в клітинах [50]. Пресування передбачає піддавання наповнені дуже дрібними кульками, які перемішуються на високих швидкостях. Перемішування біомаси в подрібнювальному середовищі (кульки) призводить до пошкодження клітин, причому ступінь пошкодження в основному залежить від контакту між

					ДП БЕ91 17.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

біомасою і кулькою, а також від розміру, форми і складу кульки та міцності клітинних стінок мікроводоростей [51]. Подрібнення бісером зазвичай використовується в поєднанні з розчинниками для вилучення нафти і є найбільш ефективним і економічним, коли концентрація клітин значна і коли витягнуті продукти легко відокремлюються після руйнування. Як правило, цей тип руйнування клітин є найбільш ефективним та енергетично вигідним при концентрації біомаси від 100 до 200 г/л [50]. З точки зору пошуку ефективного та результативного способу руйнування клітин, існує багато варіантів, коли мова йде про використання цього виду технології. Деякі з них включають виявлення біологічних особливостей організму, які дозволяють послабити клітинну стінку перед механічним руйнуванням, наприклад, попередню обробку (наприклад, кислотну-лужну та ферментативну), що потенційно мінімізує використання розчинників. [52].

Метод екстракції розчинником

Органічні розчинники, такі як бензол, циклогексан, гексан, ацетон і хлороформ, виявилися ефективними при використанні на пасті з мікроводоростей; вони руйнують клітинні стінки мікроводоростей і витягують олію, оскільки олія має високу розчинність в органічних розчинниках [53]. Однак можливо видобувати олію з біомаси мікроводоростей, не пошкоджуючи клітинні стінки, якщо розчинник не є токсичним для клітин [54]. Це можливо, якщо вид мікроводоростей активно виділяє олію, яка потім вилучається нетоксичним, біосумісним розчинником, таким як декан [52].

Приклади такого вилучення компонентів з мікробних клітин (наприклад, каротиноїдів) за допомогою так званих біосумісних розчинників описані в роботі Nejazi та ін. [55] з використанням *Dunaliella salina*. Крім того, відповідний розчинник повинен бути нерозчинним у воді, переважно солюбілізувати сполуку, що цікавить, мати низьку температуру кипіння, щоб полегшити її видалення після екстракції, і мати значно іншу густину, ніж вода. Крім того, для економічної ефективності процесу він повинен бути легкодоступним, а також

					ДП БЕ91 17.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		33

недорогим і придатним для багаторазового використання [54]. Завдяки цим якостям гексан зазвичай є найкращим розчинником для великомасштабної екстракції. Ефективна екстракція вимагає, щоб розчинник повністю проникав у біомасу і відповідав полярності цільової сполуки (тобто неполярний розчинник, такий як гексан для екстракції неполярних ліпідів). Це, в поєднанні зі здатністю вступати в фізичний контакт з ліпідним матеріалом і розчиняти ліпід, робить розчинник для екстракції успішним. Один із способів полегшити це - механічно зруйнувати клітини перед тим, як піддавати їх впливу розчинника [56]. Шен та ін. [57] проілюстрували деякі відмінності між методами руйнування клітин і системами екстракції розчинником. У своїх експериментах вони виявили, що для *Scenedesmus dimorphus* (автотрофної водорості) найкраще вилучення відбувалося шляхом мокрого подрібнення з подальшою екстракцією гексаном - 25,3%, порівняно з 6,3% при екстракції сокслетом. Вони також показали, що для *Chlorella protothecoides* (гетеротрофні водорості) найбільш ефективним методом вилучення нафти було використання бісерного збивача з подальшою екстракцією гексаном - 18,8%, порівняно з 5,6% при екстракції сокслетом. Різниця в ефективності вилучення нафти може бути пов'язана з різницею у формі та структурі клітин цих двох видів. Крім того, екстракцію розчинником можна пришвидшити, використовуючи органічні розчинники при температурі і тиску вище точки кипіння; це називається прискореною екстракцією розчинником (ASE) і застосовується до твердих і напівтвердих матриць, що вимагає висушування зразків перед екстракцією [56]. Коли цю процедуру використовують з водою як розчинником, її називають екстракцією низькополярною водою під тиском. Підвищення тиску зменшує полярність води, таким чином змінюючи її розчинну здатність, що дозволяє екстрагувати сполуки, які зазвичай не розчиняються у воді [52].

Традиційно ліпіди екстрагували з біологічних матриць за допомогою комбінації хлороформу, метанолу та води [58]. Ця процедура, відома як метод Бліга і Дайєра, спочатку розроблена для екстракції ліпідів з риб'ячих тканин,

					ДП БЕ91 17.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		34

була використана як еталон для порівняння методів екстракції розчинниками. Недоліком використання цього методу є те, що у великих масштабах утворюється значна кількість відпрацьованого розчинника, що робить його утилізацію дороговартісною, а також викликає занепокоєння з приводу безпеки через роботу з великими кількостями органічних розчинників [59]. Хоча метод Блайта і Дайєра довів свою ефективність при використанні на вологому матеріалі, існує приклад, який йому суперечить. Чжу та ін. [60] витягли значно більше олії з висушеної мікробної біомаси порівняно з виходом олії з вологої біомаси (41,1 і 27,6% відповідно). Потенційне пояснення полягає в тому, що їхня робота була виконана з використанням *Mortierella alpina*, маслянистого гриба, що свідчить про те, що метод Блайта і Дайєра не може бути застосований до певних видів вологих біоматеріалів, таких як міцелій гриба. Крім того, органічні розчинники можуть призвести до забруднення у вигляді залишків розчинника в кінцевому продукті. Ось чому більшість органічних розчинників можуть мати обмежене застосування в харчовій промисловості. Як і в інших процедурах екстракції, волога може спричинити проблеми з розчинниками, обмежуючи доступ розчинника до клітин, діючи як бар'єр між розчинником і клітинами [52].

Деякі методи передбачають одночасну екстракцію та переетерифікацію біомаси мікроводоростей для відновлення жирних кислот [61]. Показано, що пряма переетерифікація біомаси мікроводоростей є більш ефективною (щонайменше на 15-20% порівняно з експериментами з екстракцією-переетерифікацією) і забезпечує кращий вихід олії, коли розчинники додають у порядку зростання полярності, а реакція протікає протягом оптимізованого часу. Наприклад, було показано, що концентрація насичених, мононенасичених і поліненасичених жирних кислот значно зростає від 15 до 120 хвилин реакції, але не більше 120 хвилин [62]. Крім того, жирні кислоти можуть бути відновлені шляхом одночасної екстракції розчинником і омилення. В експериментах GuilGuerrero та ін. [63], екстракція розчинником з використанням 96% етанолу та одночасне омилення КОН, жирнокислотний профіль екстрактів був подібним

					ДП БЕ91 17.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		35

до жирнокислотного профілю вихідної біомаси після прямого метилювання. Аналогічний експеримент було проведено з використанням механічного руйнування клітин за допомогою бісерного млина перед подальшим омиленням КОН та екстракцією гексаном [64]. Цей експеримент показав, що механічна деструкція клітин дійсно необхідна для досягнення прийнятного виходу олії, а також є масштабованим процесом з потенціалом для застосування на промисловому рівні [52].

Екстракція надкритичних рідин

Метод екстракції, який набув визнання в останні роки, - це використання надкритичних рідин для вилучення цінних продуктів з мікроводоростей. Це пов'язано з тим, що він дозволяє отримувати високоочищені екстракти, які не містять потенційно шкідливих залишків розчинників, екстракція та розділення відбуваються швидко, а також є безпечними для термочутливих продуктів [59, 65, 66]. Крім того, можливе фракціонування конкретних сполук, що може зменшити витрати на розділення, а також, можливо, протидіяти впливу парникових газів шляхом використання відходів CO₂ від промисловості [65, 67]. На основі роботи Сахена та ін., порівнюються традиційні методи екстракції розчинниками з екстракцією надкритичною рідиною [59].

Екстракція надкритичною рідиною використовує той факт, що деякі хімічні речовини поведуться як рідина і газ, і мають підвищену розчинну здатність, коли їх піднімають вище критичної температури і тиску. Вуглекислий газ є найкращим варіантом через його відносно низьку критичну температуру (31,18°C) і тиск (72,9 атм) [56]. На ефективність екстракції надкритичного CO₂ впливають чотири основні фактори: тиск, температура, швидкість потоку CO₂ і час екстракції [53, 59, 68]. Ці фактори, разом з використанням модифікаторів (найчастіше етанолу як співрозчинника), можна змінювати і регулювати для оптимізації екстракції. Коли етанол використовують як співрозчинник, полярність екстрагуючого розчинника (в даному випадку CO₂) збільшується, а в'язкість рідини відповідно змінюється. Результатом цього є збільшення

					ДП БЕ91 17.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

розчинної здатності CO₂, а екстракція потребує нижчих температури і тиску, що робить її більш ефективною [65, 67, 69]. Екстракція надкритичним CO₂ у поєднанні з невеликою концентрацією (зазвичай 10-15%) етанолу як співрозчинника показала, що при екстракції олії з *Arthrospira maxima*, а також *Spirulina platensis* вихід ліпідів можна порівняти з еталонною системою розчинників Bligh and Dyer, що складається з хлороформу, метанолу і води [58, 69, 70]. Крім того, екстракція надкритичною рідиною дозволила отримати профілі жирних кислот, еквівалентні профілям, отриманим при традиційній екстракції висушеної біомаси розчинником, як для *Spirulina platensis*, так і для *Hipporhae thamnoides* L. [52]

Оскільки CO₂ є газом при кімнатній температурі, він легко видаляється після завершення екстракції, таким чином, він безпечний для харчових продуктів [59, 69], і його можна безпечно переробляти, що є екологічною перевагою. Одним з обмежень для надкритичної екстракції CO₂ є рівень вологи в зразку. Високий вміст вологи може зменшити час контакту між розчинником і зразком. Це пов'язано з тим, що зразки мікрроводоростей мають тенденцію набувати густої консистенції, а волога діє як бар'єр проти дифузії CO₂ в зразок і дифузії ліпідів з клітин. Ось чому зразки висушують перед екстракцією надкритичною рідиною [59]. Подальша обробка або рафінування часто необхідна залежно від того, яким є кінцевий продукт і його призначення (наприклад, харчові олії, які потребують відбілювання та дезодорації) [52].

Екстракція ультразвуком

Завдяки кавітації, екстракція за допомогою ультразвуку може відновлювати олії з клітин мікрроводоростей. Кавітація виникає, коли бульбашки пари рідини утворюються в області, де тиск рідини нижчий, ніж тиск її пари. Ці бульбашки ростуть при від'ємному тиску і стискаються при позитивному тиску, що викликає сильний колапс бульбашок. Якщо бульбашки руйнуються поблизу клітинних стінок, може статися пошкодження і вміст клітини вивільняється. Одна компанія (OriginOil) скористалася цією властивістю ультразвуку,

					ДП БЕ91 17.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		37

розробивши процес, в якому комбінація ультразвуку та електромагнітних імпульсів використовується для руйнування клітинних стінок водоростей. Потім в отриману суспензію біомаси водоростей вводять вуглекислий газ, щоб знизити рівень рН, що полегшує розділення, оскільки залишки клітин опускаються на дно, а нафта піднімається у верхню частину водного шару [52].

Як ультразвукові, так і мікрохвильові (описані нижче) методи значно покращують екстракцію мікроводоростей, забезпечуючи вищу ефективність, скорочення часу екстракції та збільшення виходу, а також низьку або помірну вартість і незначну додаткову токсичність. Прикладом цього є експерименти, проведені з використанням *Cryptocodinium cohnii*, де ультразвук виявився найбільш ефективним для руйнування клітинних стінок, збільшуючи вихід олії до 25,9%, порівняно з 4,8%, отриманими за допомогою екстракції гексаном з сохлетом [72]. Варто зазначити, що на сьогоднішній день не визначено, чи можуть ультразвукові методи негативно вплинути на якість та/або стабільність олії з високим вмістом поліненасичених жирних кислот. Нарешті, цю технологію може бути важко масштабувати [52].

Зроблено висновок, що екстракція розчинниками є швидшою, та при ній досягається більший вихід ліпідів. Проте використання наприклад найпоширенішого гексану як розчинника не є ефективним, оскільки він погано проникає всередину клітини. Необхідно включати додаткові етапи, такі як обробка ультразвуком або механічна гомогенізація, які призводять до руйнування клітинної оболонки. Крім цього, екстракт неодмінно міститиме побічні продукти, такі як хлорофілові пігменти, білки та гідрофобні вуглеводи. Оскільки це підвищує дорожочінність процесу, було обрано механічний спосіб екстракції за допомогою преса екструдера. Також даний метод екстракції ліпідів в Україні є найпоширенішим, що спрощує методи реалізації даної технології.

					ДП БЕ91 17.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		38

2.6 Переестерефікація

У 1900 році компанія Otto, автовиробник з Франції, продемонструвала використання сирової рослинної олії з арахісу для роботи дизельних двигунів на Паризькій автовиставці [72]. Цей експеримент підтвердив, що рослинна олія може бути використана як паливо для дизельних двигунів без необхідності в модифікаціях. Проте, віргінська рослинна олія (ВВО) має свої недоліки, такі як висока в'язкість, яка може негативно впливати на ефективність роботи петродизельних двигунів. Наприклад, вона може призвести до забруднення фільтрів та зниження нормальної функціональності дизельного двигуна. Усі труднощі, пов'язані з використанням рослинної олії в дизельних двигунах, свідчать про необхідність здійснення хімічних або фізичних перетворень для пристосування рослинних олій до наявних дизельних двигунів. Потенційною стратегією для вирішення цих проблем є естерифікація рослинної олії в біодизель або метиловий ефір жирних кислот (МЕЖК).

Переестерифікація є найбільш поширеним методом перетворення рослинної олії в зручне транспортне паливо, яке може бути використане в дизельних двигунах без потреби в будь-яких змінах. Реакція трансестерифікації є процесом, де спирт, переважно метанол, реагує з триацилгліцеридами, що представляють рослинну олію, за наявності каталізатора. задля прискорення реакції переестерифікації можуть використовуватися лужні каталізатори, такі як метоксид, NaOH, KOH, або кислотні каталізатори, як наприклад, розбавлена соляна кислота HCl або сірчана кислота H₂SO₄. Реакцію переестерифікації можна побачити на рисунку 2.6.1 Результатом цієї реакції є утворення метилових ефірів жирних кислот, які відомі як біодизель, та гліцерин. Гліцерин є цінним побічним продуктом, який зазвичай відділяють від біодизеля недовзі після реакції. В комерційних процесах виготовлення біодизеля найчастіше використовуються процеси, що каталізуються лугами, хоча існують інші методи, які включають використання кислотних каталізаторів та ферментів [73].

					ДП БЕ91 17.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		39

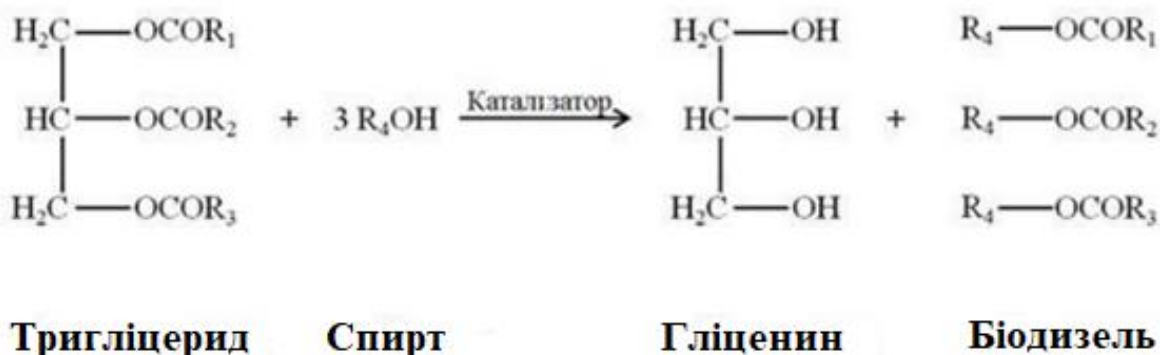
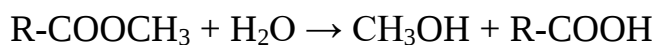


Рисунок 2.6.1 – Реакція переестерифікації [44]

Вибір спирту залежить від його доступності та вартості. Коротколанцюгові спирти (C1-C4) з густиною приблизно 0,8 г/см³ є відповідними для проведення реакції переестерифікації. Відповідно до Кнота та ін. [72], наявність вологості в спирті може спричинити гідроліз МЕЖК, що призводить до утворення вільних жирних кислот (ВЖК) та коротколанцюгових спиртів. Гідроліз МЕЖК з водою завершується протягом 4 годин при 32 °С у присутності лужного каталізатора, такого як КОН або NaOH.



Каталізатор займає значну роль у реакції переестерифікації, оскільки він дозволяє скоротити час реакції і збільшити виходи МЕЖК. Два найпоширеніші каталізатори, які часто використовуються у реакції переестерифікації, - це лужний NaOH і КОН.

Виходячи з проаналізованої інформації, для даної роботи, в якості каталізатора було обрано гідроксид натрію, обраний спирт – метанол

2.7 Опис та обґрунтування обраної конструкції реактора для проведення реакції переестерифікації

Для забезпечення повної гомогенізації речовин використовують реактори зперемішувачами пристроями. Залежно від типу перемішувача пристрою ферментатори можна розділити на:

- ферментери з пневматичним перемішувачем,

					ДП БЕ91 17.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		40

- ферментери з механічним перемішуючим пристроєм.

Ферментери з пневматичним перемішуванням не використовуються для середовищ через їх малий об'єм і схильність до піноутворення. Найчастіше використовують ферментери з механічним перемішуванням [74].

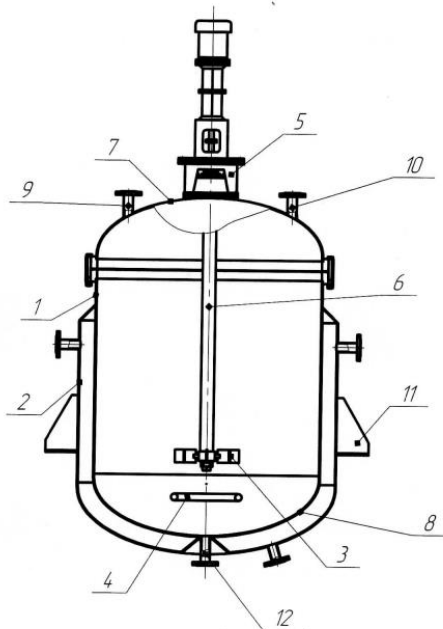


Рис 2.7.1. ферментер з механічним пристроєм для перемішування

1 – корпус, 2 – сорочка; 3 – мішалка; 4 – барботер; 5 – двигун з приводом; 6 – вал мішалки; 7 – кришка; 8 – днище; 9,10 – штуцери; 11 – опора; 12 – штуцер для зливу продукту.

До мішалок відносяться лопатеві, якірні, турбінні та трилопатеві (пропелерні) та інші. При виборі мішалки слід враховувати характеристики середовища та інтенсивність перемішування [74].

1. лопатева мішалка - це механізм, що складається з двох або більше прямокутних лопатей. До лопатевих мішалок спеціального призначення відносяться також рамні (якірні) мішалки і листові мішалки. Основними перевагами лопатевих мішалок є відносно низька собівартість виробництва, проста конструкція, висока зручність і простота в обслуговуванні. Швидкість обертання таких мішалок коливається в межах 18-80 об/хв, причому вища швидкість обертання призводить до різкого падіння ефективності

					ДП БЕ91 17.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		41

перемішування і збільшення енергоспоживання. Прості лопатеві мішалки найбільш ефективні при перемішуванні середовищ з низькою в'язкістю (до 100 сПз) [75].

2. Якірні мішалка. Якірні лопаті, призначені для вигинання відповідно до форми стінок і дна посудини, вважаються різновидом лопатевих мішалок і використовуються для перемішування високов'язких рідин і пастоподібних матеріалів. Вони вирізняються своєю міцністю і підходять для перемішування високов'язких і менш в'язких рідин в ємностях, що нагріваються за допомогою нагрівальних сорочок або змійовиків, де на стінках нагрітого обладнання може відбуватися осадження або налипання продукту, що змішується [76].

3. Турбінні мішалки. Робочі колеса турбінних мішалок за формою нагадують водяні колеса, з похилими, плоскими або спеціальної форми лопатями, встановленими на валу. Перевагами турбінних мішалок є висока швидкість змішування і розчинення, здатність ефективно перемішувати в'язкі рідини і придатність для безперервних процесів. Турбінні мішалки також можна використовувати для сумішей, які змінюють в'язкість під час перемішування. Недоліки турбінних мішалок полягають у тому, що вони складні і дорогі у виробництві [77].

4. Пропелерні мішалки. Робочими частинами пропелерної мішалки є Крильчатка, лопаті якої зігнуті у формі пропелера. Пропелерні мішалки підходять для безперервних процесів і для приготування суспензій і емульсій, але не можуть використовуватися для перемішування високов'язких рідин (>6000сПс) або рідин, що містять щільні тверді частинки [78].

На рисунку 1.4.3.2 показано номограму областей застосування кожного типу мішалок для рідин різної в'язкості. З діаграми видно, що турбінні та пропелерні мішалки широко використовуються для перемішування рідин широкого діапазону в'язкості. Видно, що інші мішалки мають вузький спектр застосування. З графіка видно, що лопатеві мішалки найкраще підходять для

					ДП БЕ91 17.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		42

перемішування рідин з дуже високою в'язкістю. Для перемішування рідин середньої в'язкості підходять кілька типів мішалок.

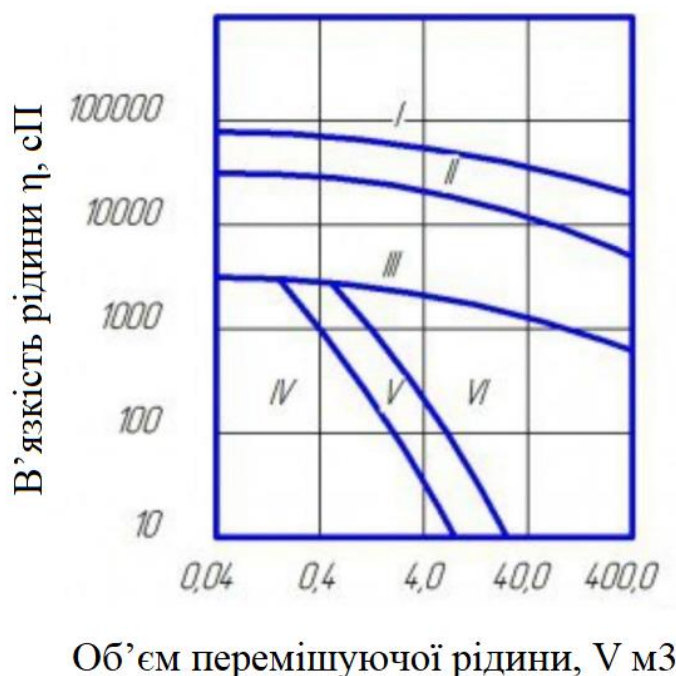


Рисунок 2.7.2 – Номограма для вибору типу мішалки в залежності від в'язкості та об'єму рідини: I – лопастна модифікована; II – лопастна; III – турбінна; IV – пропелерна; V – пропелерна; VI – пропелерна [79]

Біодизель є рідким середовищем і має середню густину 900 кг/м³. За обраною технологією об'єм реактора становить 50м³. З рисунку 1.4.3.2 можна зробити висновок, що найкращим рішенням буде обладнати реактор-змішувач пропелерною мішалкою, що має частототу обертання 680 об/хв.

2.8.1 Висновок: Обґрунтування вибору технології

Для вибору технологічних рішень для кожного з етапів враховувалися такі критерії як:

- Економічна доцільність

					ДП БЕ91 17.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		43

- Складність реалізації
- Вища ефективність
- Доступність

Отже виходячи з проаналізованої інформації, в даній роботі для реалізації технології виробництва біодизельного палива з водоростей, було обрано наступні рішення:

В якості продуценту для технології виготовлення біодизелю було обрано зелені мікроводорості *Acutodesmus dimorphus* через їх швидкий ріст та високі значення накопичування ліпідів, у порівнянні з іншими продуцентами.

В якості середовища для культивування було вибрано середовище BG-11, так при його використанні обраний вид водоростей показав найкращий приріст біомаси та вмісту нутрієнтів.

В якості технології вилучення олії з водоростей було обрано механічний метод, за його економічну доцільність та простоту реалізації.

Серед розглянутих каталізаторів та спиртів необхідних для реакції переестерефікації, відповідно, було обрано гідроксид натрію та метанол.

Для проведення безпосередньо реакції переестерефікації найбільш ефективнішим є реактор змішувач, обладнений пропелерною мішалкою

2.8.2 Характеристика кінцевого продукту

Кінцевим продуктом технологічного процесу є біодизель отриманий за періодичною технологією з зелених мікроводоростей *Acutodesmus dimorphus*, які культивують на стандартному середовищі BG-11 у фотобіореакторі. Олію виділяють способом механічної екстракції за допомогою преса екструдера.

Використовуючи мікроводорості *Acutodesmus dimorphus* отримуємо біодизель, що відповідає стандартам EN14214 та ДСТУ 6081:2009 «Паливо моторне. Ефіри метилові жирнихкислот олій і жирів для дизельних двигунів. Технічні вимоги»

					ДП БЕ91 17.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		44

РОЗДІЛ 3. ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

3.1 Сировина та матеріали

При виробництві біодизеля з водоростей використовується основна та допоміжна сировина та утворюються напівпродукти (табл.3.2).

Таблиця 3.1.1 – Характеристика сировини, матеріалів та напівпродуктів

Найменування	Категорія і номер НТД, згідно якого перевіряється сировина	Показники, що обов'язкові для перевірки, та їх нормативне значення	Примітка показник
1. Основна сировина:			
1	2	3	4
Вода із свердловин	ДСанПін2.2.4-171-10	Органолептичні, мікробіологічні, рівень рН, жорсткість	Для промивання на стадіях фільтрування, та приготування теплоносія
Натрій азотокислий	ДСТУ 33765-77 «Реактиви. Натрій азотокислий»	Усі показники згідно з ДСТУ	Для приготування основного поживного розчину
Кислота лимонна	ДСТУ ГОСТ 908:2006 Кислота лимонна моногідрат харчова. Технічні умови (ГОСТ 908-2004, IDT)	Усі показники згідно з ДСТУ	Для приготування основного поживного розчину та регуляції рН

					ДП БЕ91 17.000 ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.	Степанчук А.В.					Стадія	Арк.	Акрушів
Конс.							45	90
						«КПП» ім. Ігоря Сікорського, ФБТ		
Керів.	Левтун І.І.							
Затверд.								

Продовження таблиці 3.1.1

Сульфат заліза	ДСТУ 4148-78 «Залізо (II) сіркокисле 7-водне»	Усі показники згідно з ДСТУ	Для приготування основного поживного розчину
Калій фосфорнокислий двозаміщений	ISO 9001	Усі показники згідно до стандарту	Для приготування основного поживного розчину
Хлорид кальцію	ДСТУ 7274:2012 «Реактиви, розчини для аналізу та матеріали допоміжні»	Усі показники згідно з ДСТУ	Для приготування основного поживного розчину
Магнійний сульфат	ISO 9001	Усі показники згідно до стандарту	Для приготування основного поживного розчину
Карбонат натрію	ISO 9001	Усі показники згідно до стандарту	Для приготування основного поживного розчину та регуляції pH
Етилендіамінтетраоцтова кислота	ДСТУ 10398-76 «Реактиви та особливо кислі чисті речовини»	Усі показники згідно до стандарту	Для приготування основного поживного розчину

					ДП БЕ91 17.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46

Продовження таблиці 3.1.1

Вуглекислий газ	ISO 9001	Усі показники згідно до стандарту	Для аерації при культивуванні
2. Допоміжна сировина			
Кислота борна	ISO 9001	Усі показники згідно до стандарту	Для приготування розчину мікроелементів
Марганець хлористий	ДСТУ 7274:2012 «Реактиви, розчини для аналізу та матеріали допоміжні»	Усі показники згідно з ДСТУ	Для приготування розчину мікроелементів
Цинк сірчаноокислий	ISO 9001	Усі показники згідно до стандарту	Для приготування розчину мікроелементів
Мідь сірчаноокисла	ISO 9001	Усі показники згідно до стандарту	Для приготування розчину мікроелементів
Натрій молібденовоокислий	ISO 9001	Усі показники згідно до стандарту	Для приготування розчину мікроелементів

					ДП БЕ91 17.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		47

Продовження таблиці 3.1.1

Метанол	ДСТУ 3057-95 «Метанол технічний. Технічні умови»	Відповідність категорії сировини призначенню	Приготування розчину метоксиду для проведення естерифікації
Гідроксид натрію	ДСТУ ISO 979-2001 «Натрію гідроксид технічний»	Відповідність категорії сировини призначенню	Приготування розчину метоксиду для проведення естерифікації
Кислота нітратна	ДСТУ 7260:2012 «Хімічні реактиви»	Відповідність категорії сировини призначенню	Приготування розчину для промивання біодизеля

3. Напівпродукти

Олія	Згідно технологічного регламенту	Усі показники у відповідності до технологічного процесу	Після екстракції ліпідів
Біомаса мікродоростей	Згідно технологічного регламенту	Усі показники у відповідності до технологічного процесу	Після екстракції ліпідів

3.2 Опис технологічної схеми виготовлення біодизеля з водоростей.**ДР 1. Підготовка виробництва**

Технічне обладнання промивають розчином миючого засобу. Після цього фотобіореактор обробляють розчином каустичної соди. для кожної інкубації температура становить 20°C. Потім реактор заповнюють водою до необхідного

					ДП БЕ91 17.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		48

рівня. Розчин каустичної соди перемішують барботажним повітря протягом 15 хвилин.

Для усунення вірогідності контамінації біомаси, перед кожним завантаженням фотобіореактор оброблюють миючим засобом. Усю стічну воду після промивки направляють до ПВ14

ДР 2. Підготовка води

Залежно від місця розташування виробництва, якість води в системах водопостачання може варіюватись за складом: неорганічних та органічних речовин, показниками жорсткості та солонисті, за концентрацією мікроорганізмів тощо. Тому доцільним буде використовувати воду зі свердловини на глибині 90м.

Для очищення води пропонується Промислова система зворотного осмосу, ECOSOFT MO36 (MO36TP5) Ecosoft (Україна). з продуктивністю до 42 000 л/год (42 м³/год). Потужність насоса: 22 кВт. Споживання води: 50 – 60 м³/год. ефективність очищення: 99,9% домішок. Яка оснащена фльром грубої очистки Ф-1, осмотичним фільтром Ос-2 та мембранним фільтром Ф-4 Температурний контроль 10-30 °С. За її використання видаляються органічні та неорганічні забрудники, мікроорганізми та солі Ca(HCO₃)₂, Mg(HCO₃)₂, CaSO₄, MgSO₄, CaCl₂ і MgCl₂.

ДР 3. Підготовка повітря для барботування

За для аерації мікробіодоростей в процесі культивування, необхідна суміші з вуглекислим газом, для приготування якої використовується попередньо очищене повітря. Також окрім постачання вуглекислого газу до клітин водоростей, повітря виконує функцію ерліфтного перемішування.

ДР 3.1. Збір повітря з атмосфери

Процес збору повітря відбувається за допомогою повітрязбірника 3-5, розташованого зовні повітродувної станції, нагнітання повітря здійснюється за допомогою повітродувки Н-6 виду ROBOX EVOLUTION-DV (на базі RB-DV), «Robuschi» Німеччина, яка має понижену температуру газу, що дозволяє

					ДП БЕ91 17.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		49

досягнути більш глибокого вакууму (до 93%), аніж RB-DV. Продуктивність до 10500 м³/год. Точка входу повітря становить 4-6 м над землею. Температура від -20 °С до 45 °С

ДР 3.2. Попереднє очищення повітря

Повітря пропускають крізь волокнистий касетний фільтр Ф-7 виду ФПГ (Україна) (груба очистка), який затримує частинки пилу. Діаметр пор фільтрувальної тканини 18 мкм. Ефективність очищення – 80% (ДСТУ 3186- 95).

ДР 3.3. Очистка на індивідуальних фільтрах

Подальше більш ретельне очищення повітря від часток діаметр яких менше 0,3 мкм відбувається за допомогою фільтра тонкої очистки НЕРА, Ф-8, ефективність очищення якого складає 99,97% (Ф-3). Фільтр встановлено у фільтр Канал-ФПК типу F5.

ДР 3.4. Збагачення барботажного повітря вуглекислим газом

Для запеспечення мікроводоростей джерелом вуглицю, до суміші з повітрям, за допомогою дозатора Д-10, періодично подають вуглекислий газ із цистерни Ц-9, так як використання чистого СО₂ може призвести до закиснення поживного середовища. Тому на стадію культивування пропонується подавати барбатажне повітря.

ДР 4. Приготування теплоносія

Нагріта до температури 90 °С вода, використовується в якості теплоносія для подачі в сорочку змішувача, для підтримання необхідної температури для реакції переестерифікації на ТП 13.1 Нагрівання води здійснюється за допомогою електронагрівача К-11

Для приготування гарячого теплоносія використовується відпрацьований охолоджений теплоносій з ТП 13.1

ДР 5. Приготування розчину метоксиду для переестерифікації

При виготовленні біодизелю необхідні естери жирних кислот. для їх отримання проводять реакцію переестерифікації триацилгліцеролів.

					ДП БЕ91 17.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		50

Найбільш розповсюдженою технологією в Україні та світі є використання метанолу та гідроксиду натрію як каталізатора (для прискорення реакції метанолізу використовують частіше саме лужні каталізатори). Для підвищення виходу естерів метанол необхідно брати у надлишку (на 5% більше від стехіометричного розрахунку), каталізатор – 10% від маси метанолу. Для виготовлення 1 т біодизельного палива необхідно 111 кг метанолу і 12 кг NaOH. Метанол зі складу подається дозатор у змішувач Р-14 виду ТЕК-2БМ, який обладнано турбінною мішалкою з продуктивністю 150 об/хв. До метанолу з дозатора додається NaOH зі складу. Змішування речовин відбувається протягом 15 хв. до досягнення гомогенного стану розчину.

ДР 6. Приготування розчину для промивання біодизеля

Біодизельна фракція містить залишки лугу, метанолу, гліцеролу, мила та води, які впливають на якість біодизельного палива. Для очищення біодизеля від цих домішок використовують 10%-вий розчин нітратної кислоти, який готується шляхом розведення з концентрованої кислоти. Миючий розчин готується в змішувачі Р-17, обладнаному турбінною мішалкою, з продуктивністю 150 об/хв. У змішувач подається чиста вода зі стадії ДР2 і додається фіксована кількість 65% азотної кислоти через об'ємний дозатор при інтенсивному перемішуванні.

ДР 7. Приготування поживного середовища

При культивуванні мікроводоростей задля забезпечення необхідного приросту біомаси та максимального накопичення ліпідів у клітинах, необхідно збагачувати мікроорганізми поживними речовинами. Концентрація солей при цьому повинна відповідати раціональному рівню, так як надлишок та нестача негативно впливають на приріст біомаси та можуть змінювати метаболізм клітин. В якості поживного середовища для культивування мікроводоростей було запропоновано використовувати Середовище BG-11.

ДР 7.1. Підготовка розчину мікроелементів

Щоб приготувати розчини мікроелементів використовують очищену дистильовану воду та наступні речовини: ЕДТА, H_3BO_3 (2,860 г/л води), $\text{MnCl}_2 \cdot$

					<i>ДП БЕ91 17.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		51

4H₂O (1,810 г/л води), ZnSO₄ · 7H₂O (0,220 г/л води), CuSO₄ · 5H₂O (1 мл/100 мл води (концентрація вихідного розчину 79 г/100 мл води)), Na₂MoO₄ · 2H₂O (0,391 г/л води), Co(NO₃)₂ · 6H₂O (1 мл/100 мл води (концентрація вихідного розчину 49 г/100 мл води)).

Підготовка розчину мікроелементів проводиться у змішувачі Р-20, перемішування здійснюється за допомогою турбінних мішалок серії VMP680, Україна. Потужність мішалки - 1 кВт, частота обертів - 680 об/хв. Змішувачі обладнані шнековими дозаторами.

ДР 7.2. Підготовка компонентів середовища зі складу

Приготовану з ДР 2 воду змішують із солями в змішувачі Р-23 при постійному перемішуванні за допомогою турбінної мішалки VMP 680. Для приготування розчину до дистильованої води додають розчин цитрату заліза (0,001 мл/мл води), а потім решту компонентів (1 мл на л води): Лимонна кислота (розчин з концентрацією 6 г/ 100 мл дистильованої води), сульфат заліза (6 г/100 мл дист. H₂O), NaNO₃ (1,5 г), K₂HPO₄ · 3H₂O (40 г/100 мл дист. H₂O), MgSO₄ · 7H₂O (75 г/100 мл дист. H₂O), CaCl₂ · 2H₂O (36 г/100 мл дист. H₂O), Na₂CO₃ (20 г/100 мл дист. H₂O), MgNa₂EDTA · H₂O (1 г/100 мл дист. H₂O). Окрім того, на літр води додається 1,1 мл розчину мікроелементів.

Потім поживне середовище подають на стерилізацію до автоклаву. рН має становити 7,4.

ДР 7.3. Стерилізація поживного середовища в автоклаві

Процес стерилізації проводять протягом 25 хвилин, тиск - 0,2 МПа, при температурі - 130°С в автоклаві АВ-25, куди подаються розчини мікроелементів та основних компонентів поживного середовища після змішувачів Р-20 та Р-23.

ДР 8. Підготовка інокуляту

При періодичному процесі культивування у відділенні чистої культури готують посівну дозу клітин. Посівні дози вирощуються послідовно в колбах і в ємностях на 10 – 20 літрів, що знаходяться в термостатованому приміщенні, і далі в послідовності культиваторів об'ємом 10, 100, 500 або 1000 літрів, в яких

					ДП БЕ91 17.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		52

здійснюється перемішування (частотою 30-60 об/хв), аерація (швидкість потоку повітря 0,5-1 л/хв та концентрація CO₂ 0,5-1%) при температурі 25-30°C, протягом 2-3 діб.

Посів водоростей проводять альгологічно чистою культурою, яку вирощують у стерильних умовах. Культуру водоростей вносять до поживного середовища (BG-11) в кількості, що дає світло-зелене забарвлення (з початковою щільністю 0.1 – 0.15 одиниць оптичної щільності). Початкова концентрація становить близько 2 тис клітин/мл. На відміну від аксенічних культур, що містять тільки один біологічний вид (монокультура) альгологічно чиста культура водоростей не вільна від супутньої мікрофлори, але містить лише один вид водорості. Готовий посівний матеріал поміщають у біореактор для культивування, Всі рідкі відходи направляють до ПВ14.

ТП 9. Культивування мікрководоростей у фотобіореакторі

Підготовлене та простерилізоване поживне середовище з автоклаву АВ-25 надходить до фотобіореактора ФР-30, і змішується з інакулянтом. Суміш повітря та вуглекислого газу з ДР 3.4. подається періодично (протягом 10 хв раз на 4 год) через інжектор з витратою 60 дм³ /год. Паралельно відбувається перемішування культуральної рідини за рахунок ерліфтної системи.

Задля освітлення та підтримання необхідної температури в реакторі використовуються світлодіодні лампи Л-29, які генерують освітлення з довжинами хвиль в діапазонах 640 – 700 нм. Ефективність освітлення від 180 до 200 мкмоль/(м²·с) Режим освітлення 16 год. світло 4 год./темрява. Температура регулюється за допомогою датчика і системи контролю з декількома каналами управління.

ТП 10. Відділення біомаси мікрководоростей від поживного середовища

ТП 10.1. Обробка суспензії ультразвуком

Щоб відокремити біомасу від поживного середовища, біомасу спочатку обробляють ультразвуком, за допомогою випромінювача УЗ-34 протягом 5 хв, з частотою 45 кГц, потужністю 300 Вт. Для чого біомаса з фотобіореактора ФР-30

					ДП БЕ91 17.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		53

потрапляє у збірник 3б-33, де проходить обробка. Ультразвук вбиває живі клітин, що підвищує ступінь осадження.

ТП 10.2. Фільтрування на фільтр-пресі

Після обробки ультразвуком біомаса подається насосом Н-35 на фільтр прес Ф-36 Hbracol 200, (400), США. Площа фільтрації 1 пластини 400 см², кількість пластин 40 загальною площею від 3 до 12,5 м², робочий тиск до 8 бар, продуктивність 7 м³/хв.

Біомаса заповнює простір камер між пластинами фільтра. Під дією тиску тверді частинки починають осідати на поверхні фільтрувальної тканини, таким чином поступово збільшуючи щільність осаду. Після чого відфільтрована біомаса збирається у збірнику 3б-38, де відділяється від культуральної рідини. Відпрацьована культуральна рідина транспортується для подальшого продажу, в якості додаткового прибутку.

ТП 11. Виділення олії з біомаси мікроводоростей на пресі

Біомаса транспортується шнековим транспортером Н-37 до преса екструдера Е-40 (із продуктивністю до 100 кг/год; кількість залишку олії у жмиху на абсолютно сухий вхідний продукт становить до 7%), з біомаси мікроводоростей вилучають олію, Жмих, що залишається після виділення олії йде на продаж, для використання в якості добрива.

ТП 12. Очистка олії

За допомогою фільтру Ф-42 отриману з ТП 11 олію очищають, а також задля освітлення олії можливе додавання адсорбентів.

ТП 13. Приготування біодизеля

ТП 13.1. Проведення переестерифікації

Олія за допомогою насоса Н-42 потрапляє до реактора змішувача Р-46 з пропелерною мішалкою з частотою 680 об/хв, об'ємом 50 м³. Відбувається змішування олії з метоксидом, отриманим на ДР5. Змішування відбувається за температури 60 °С, що створюється за допомогою рубашки. Реакція проходить протягом 2 годин.

					ДП БЕ91 17.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		54

ТП 13.2. Відстоювання та фракційне розділення

Щоб розділити гліцерин та біодизель суміш подають у відстійник В-48. Цей процес триває 4 години. Далі гліцерин збирається та транспортується для продажу, а біодизель промивають через насос.

ТП 13.3. Промивання біодизеля та відстоювання

Відділений від гліцеролу біодизель потрапляє до відстійника В-50 оснащеного душем, разом з підкисленою водою. Де проходить промивання біодизеля, з подальшим відстоюванням протягом 40 хв. Відпрацьована вода йде на очисні споруди.

ТП 13.4. Сушіння біодизеля у збірнику

За допомогою насосу Н-51 біодизель з відстійника потрапляє до збірника 36-52, де залишки води відокремлюються від біодизеля (ступень осушення на рівні 0,1-0,5% вологості) протягом 2 діб та зливаються. Отриманий біодизель транспортується на продаж.

ПВ 14 Переробка та утилізація відходів

Гліцерол з ТП 13.2: збирається та транспортується на виробництва Фармацевтичного напрямку, задля отримання додаткового прибутку підприємства

2. Жмих з ТП 11: можна транспортувати для реалізації в якості добрив, задля отримання додаткового прибутку підприємства.

3. Уся відпрацьована вода подається на найближчі очисні споруди.

3.3 Контроль виробництва

Таблиця 3.3.1 - Точки і параметри контролю виробництва

Стадія процесу, місце заміру параметра або відбору проби	Параметр, що контролюється, одиниці вимірювання, вид контролю	Частота контролю	Норми технологічного режиму та допустимі	Метод контролю параметра, тип приладу
--	---	------------------	--	---------------------------------------

					ДП БЕ91 17.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		55

Продовження таблиці 3.3.1

ДР 1. Підготовка виробництва	Температурний режим	Під час миття	T = 110°C	Термометричний
	Час миття		t = 1.5 год	Годинник
	Тиск		P = 0,2 МПа	Манометр
ДР 3.1. Збір повітря з атмосфери	Температурний режим	Постійно	T = -20 °C - 45 °C	Термометричний
ДР 3.2. Попереднє очищення повітря	Чистота повітря	Після очистки повітря на головному фільтрі	E = 50%	Перевірка ступеню очищення
ДР 3.3. Очистка на індивідуальних фільтрах	Чистота повітря	Після очистки повітря на головному фільтрі	E = 99,97%	Перевірка ступеню очищення
ДР 3.4. Збагачення барботажного повітря вуглекислим газом	Масова частка CO ₂ у повітрі	Під час збагачення	W = 10%	Редуктор с росходомером
ДР 4. Приготування теплоносія	Температурний режим	Під час приготування	T = 90°C	Термометричний

					ДП БЕ91 17.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		56

Продовження таблиці 3.3.1

ДР 5. Приготування розчину метоксиду для переестерифікації	Співвідношення метанолу та натрія гідроксиду	При завантажен ні до апарату	За технічним регламент ом підприємс тва	Масове дозування
ДР 6. Приготування розчину для промивання біодизеля	Концентрація HNO_3	Після приготуван ня розчину	$\text{C} (\text{HNO}_3)$ = 30%	Хімічний метод, перевірка концентрації
	Час	Під час приготування	$t = 15 \text{ хв}$	Годинник
ДР 7.1. Підготовка розчину мікроелементів	Маса компонентів поживного середовища	При завантаженні до апарату	За технічним регламен- том підприємс- тва	Масове дозування
	Об'єм компонентів поживного середовища		За технічним регламен- том підприємс- тва	Об'ємне дозування
	Час		$t = 2 \text{ хв}$	Годинник

					ДП БЕ91 17.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		57

Продовження таблиці 3.3.1

ДР 7.2. Підготовка компонентів середовища зі складу	Маса компонентів поживного середовища	При завантаженні до апарату	За технічним регламен- том підприєм- ства	Масове дозування
	Об'єм компонентів поживного середовища		За технічним регламен- том підприєм- ства	Об'ємне дозування
	Час		t = 2 хв	Годинник
	pH		pH = 7,4	pH-метр
ДР 7.3. Стерилізація поживного середовища в автоклаві	Температурний режим	Під час процесу	T = 130 °C	Термометричний
	Час		t = 25 хв	Годинник
	Тиск		P = 0,2 МПа	Манометр
ДР 8. Підготовка інокуляту	Температурний режим	Під час процесу	T = 25- 30°C	Термометричний
	Час		t = 2-3 добы	Годинник
	концентрація CO ₂		W = 0,5- 1%	Редуктор с росходомером
ТП 9. Культивування мікроводоростей	Температурний режим	Під час процесу	T = 30±2°C	Термометричний
	Час		t = 6 год	Годинник
	pH		pH = 7,5	pH-метр

					ДП БЕ91 17.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		58

Продовження таблиці 3.3.1

ТП 10.1. Обробка суспензії ультразвуком	Час	Під час обробки	t = 5 хв	Годинник
	Частота хвиль		f = 45кГц	Ультразвуковий промінювач
ТП 10.2. Фільтрування на фільтр-пресі	Час фільтрування	Під час фільтрування	t = 18 хв	Годинник
	Тиск		P = 0,8 МПа	Манометр
ТП 11. Виділення олії з біомаси мікроводоростей на пресі	Тиск	Під час відділення	P = 0,1- 0,2 МПа	Манометр
	Температурний режим		T = 60°C	Термометричний
ТП 13.1. Проведення переестерифікації	Температурний режим	Під час переестерифікації	T = 60°C	Термометричний
	Час		t = 2 год	Годинник
ТП 13.2. Відстоювання фракційне розділення	Час	Під час відстоювання	t = 4 год	Годинник
ТП 13.3. Промивання біодизеля водою та відстоювання	Час	Під час відстоювання	t = 40 хв	Годинник

					ДП БЕ91 17.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		59

Продовження таблиці 3.3.1

ТП 13.4. Сушіння біодизеля у збірнику	Час	Під час сушіння	t = 2 доби	Годинник
--	-----	--------------------	---------------	----------

3.4 Матеріальний баланс

Таблиця 3.4.1. Матеріальний баланс процесу виробництва біодизеля з водоростей.

Використано			Отримано		
Стадія	Назва сировини, матеріалів та напівпродуктів	Кількість, кг	Стадія	Назва сировини, матеріалів та напівпродуктів	Маса, кг
ДР 7.1. Стадія приготування розчину мікроелементів	Вода	143	ДР 7.1. Стадія приготування розчину мікроелементів	Розчин мікроелементів	147
	H ₃ BO ₃ , (концентрація вихідного розчину 79 г/100 мл води)),	0,44			
	MnCl ₂ · 4H ₂ O	0,4			
	ZnSO ₄ · 7H ₂ O	0,07			
	CuSO ₄ · 5H ₂ O	1,5			
	Na ₂ MoO ₄ · 2H ₂ O	0,09			
	Co(NO ₃) ₂ · 6H ₂ O	1,5			

					ДП БЕ91 17.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		60

Продовження таблиці 3.4.1.

ДР 7.2. Стадія Підготовки компонетів середовища зі складу	Вода	130 000	ДР 7.2. Стадія Підготовки компонетів середовища зі складу	Поживне середовище BG-11	132 000
	Розчин мікроелеме- нтів	147			
	Цитрат заліза	132			
	Лимонна кислота (розчин з концентрацією 6 г/ 100 мл дистильованої води),	132			
	сульфат заліза (6 г/100 мл дист. H ₂ O),	132			
	NaNO ₃	197			
	K ₂ HPO ₄ · 3H ₂ O (40 г/100 мл дист. H ₂ O),	132			
	MgSO ₄ · 7H ₂ O (75 г/100 мл дист. H ₂ O),	132			
	CaCl ₂ · 2H ₂ O (36 г/100 мл дист. H ₂ O),	132			
	Na ₂ CO ₃ (20 г/100 мл дист. H ₂ O),	132			
	MgNa ₂ EDTA · H ₂ O (1 г/100 мл дист. H ₂ O)	132			

					ДП БЕ91 17.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		61

Продовження таблиці 3.4.1.

ДР 8. Стадія отримання інокуляту	Поживне середовище	22 000	ДР 8. Стадія отримання інокуляту	інокулят	23 000
	Культура водоростей <i>Acutodesmus dimorphus</i>	1 000			
ТП 9. Стадія культивування	Поживне середовище	110 000	ТП 9. Стадія культивування	Культуральна рідина	122 400
	Інокулянт	23 000		Втрати	600
ТП 11. Стадія Виділення олії з біомаси мікроводоростей на пресі	Суша біомаса	31 375	ТП 11. Стадія Виділення олії з біомаси мікроводоростей на пресі	Суміш ліпідів	25 100
				Жмих	6275
ТП 13.1. Стадія проведення переестерифікації	Суміш ліпідів	25 100	ТП 13.1. Стадія проведення переестерифікації	Ефір	30 600
	Метанол	5000		Гліцерин	4 400
	NaOH	500			
ТП 13.3. Стадія промивання біодизеля та відстоювання	Ефір	30 600	ТП 13.3. Стадія промивання біодизеля та відстоювання	Суміш	31 800
	Підкислена вода	1200			
ТП 13.4. Стадія осушування біодизеля у збірнику	Суміш	31 800	ТП 13.4. Стадія осушування біодизеля у збірнику	Біодизель	29 871
				Вода	729
				Інші речовини	1 200
ВСЬОГО	385 845		ВСЬОГО	385 845	

					ДП БЕ91 17.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		62

РОЗДІЛ 4. РОЗРАХУНОК ТА ВИБІР ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА БІОДИЗЕЛЯ З ВОДОРОСТЕЙ

4.1 Розрахунок виробничої потужності

Згідно даних [80] середня потужність біодизельного підприємства складає 10 000 т біодизеля на рік. Тому метою роботи є розробити технологічну схему для виробництва біодизеля з ліпідів мікроводоростей для виробництва 11 111 м³/рік біодизеля (в перерахунку на густину 900 кг/м³). Метою розрахунку є вибір доцільного реактора для змішування олії та реагентів для проведення процесу переестерифікації.

Оскільки лімітуючою по часу стадією є культивування мікроводоростей *Acutodesmus dimorphus*, яка триває 16 днів, то тривалість виготовлення партії біодизеля при безперервному режимі роботи підприємства, враховуючи 30 днів на зупинки, ремонти, очищення обладнання і т.д., проектна продуктивність підприємства становитиме [81]:

$$Q_{\text{Пр}} = \frac{V}{T} \cdot t = \frac{11111}{335} \cdot 16 = 531 (\text{м}^3 / \text{партію}) \quad (3.1.1)$$

де $Q_{\text{Пр}}$ – проектна продуктивність підприємства, м³/партію; V – загальна запланована потужність підприємства на рік, м³/рік; T – тривалість календарного року; t – час культивування, днів.

Продуктивність виробництва за 1 день [81]:

$$Q_1 = \frac{Q_{\text{Пр}}}{t} = \frac{531}{16} = 33,19 (\text{м}^3 / \text{день}) \quad (3.1.2)$$

В реакторі, окрім біодизеля буде знаходитись 16 % реагентів, які залишились після реакції переестерифікації. Тобто, проектна продуктивність реакторів для переестерифікації становить 616 м³/партію, або 38,5 м³/день.

Для реакторів номінальним об'ємом 50 м³, що використовуються на виробництві при обраному режимі роботи, партійна продуктивність складає 35 м³ завантаження на партію (при заповненості в 0,7). Щоб забезпечити

					ДП БЕ91 17.000 ПЗ		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			
Розроб.	Степанчук А.В.					Стадія	Арк.
Конс.							63
							90
Керів.	Левтун І.І.					«КІП» ім. Ігоря Сікорського, ФБТ	
Затверд.							

виробництво в 10 000 т біодизеля, реакторів для процесу переестерифікації знадобиться [81]:

$$N = \frac{V_z}{V_k} = \frac{531}{35} = 15,17 \sim 16 шт \quad (3.1.3)$$

де V_z – загальний об’єм продуктів переестерифікації, м³; V_k – номінальний об’єм реактора, м³.

Об’єм кришки і днища складає 30% об’єму реактора, їх об’ємом можна знехтувати оскільки 30% відповідає вимогам до коефіцієнта заповнення.

Для стандартної технології одержання біодизелю з ліпідів коефіцієнт перерахунку ліпідів на метилові естери жирних кислот складає 95%. Кількість ліпідів, що необхідна для виробництва такої кількості біодизеля [81]:

$$m_{lin} = \frac{m_{\delta\delta}}{\eta_{lin \rightarrow \delta\delta}} = \frac{33,17}{0,95} = 34,92(m) \quad (3.1.4)$$

де m_{lin} – маса ліпідної фракції, т; $m_{\delta\delta}$ – маса біодизелю яку необхідно одержати, т; $\eta_{lin \rightarrow \delta\delta}$ – відсоток переходу ліпідів до естерів.

За запропонованою технологією культивування вміст ліпідів складає 51%. Тому кількість біомаси, яку необхідно наростити складає [81]:

$$m_{\delta m} = \frac{m_{lin}}{\eta_{\delta m \rightarrow lin}} = \frac{35}{0,51} = 68,5(m) \quad (3.1.5)$$

де $m_{\delta m}$ – суха біомаса мікроводоростей, т; m_{lin} – маса ліпідів, яку необхідно одержати, т; $\eta_{\delta m \rightarrow lin}$ – вміст ліпідів у біомасі *Acutodesmus dimorphus*.

Концентрація біомаси становить 2 кг/м³, або 0,002 т/м³.

Загальний об’єм виробництва складає [81]:

$$V_{zag} = \frac{m_{\delta m}}{C_{\delta m}} = \frac{68,5}{0,002} = 34250(m^3) \quad (3.1.6)$$

4.2 Конструктивний розрахунок

Вихідні дані для розрахунку:

- Об’єм апарату, м³: $V = 50$.

					ДП БЕ91 17.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		64

- Тривалість процесу, год: $\tau = 384$ год
- Коефіцієнт заповнення: $\phi = 0,7$.

Робочий об'єм апарату обчислюється за формулою [82]:

$$V_H = \frac{V_p}{K_3} = 50 \text{ м}^3 \quad (3.2.1)$$

$$V_p = V_H * K_3 = 50 * 0.7 = 35 \text{ м}^3 \quad (3.2.2)$$

Відповідно до ГОСТ 6533-78 обираємо типовий реактор з еліптичним днищем і еліптичною знімною кришкою (тип 0), з наступними технічними даними:

- $V_H = 50 \text{ м}^3$
- $F_p = 69,7 \text{ м}^2$ – площа поверхні теплообміну рубашки.
- $d_B = 95, 110, 130 \text{ мм}$ – діаметр валу мішалки.
- $H_p(\phi=0,75) = 5,57 \text{ м}$, $H_p(\phi=0,5) = 3,79 \text{ м}$. – висота рівня рідини.

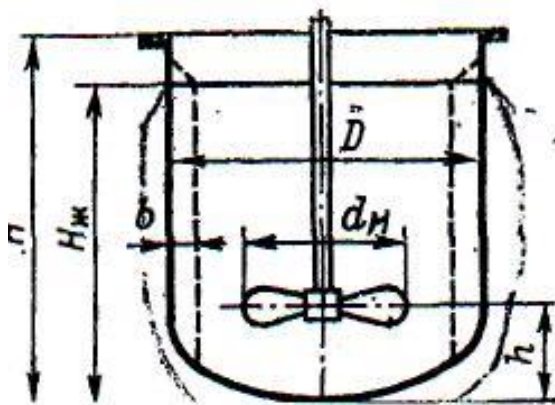


Рис.4.2.1 Основні співвідношення пропелерної мішалки [82]

4.2.1 Розрахунок днища апарату

Еліптичні днища за ГОСТ 6533-78 для апарата вказаного діаметра мають наступні характеристики [82]:

- $D_{BH} = 3000 \text{ мм}$ – внутрішній діаметр апарату (3200 разом з сорочкою)
- $h_1 = 0,08 \text{ м}$ - висота основи еліптичного днища.
- $h_B = 0,75 \text{ м}$ – висота еліптичної частини днища.
- $V_d = 4083,6 \text{ дм}^3$ – об'єм днища.
- $S = 28 \text{ мм}$ – товщина стінки еліптичного днища.

					ДП БЕ91 17.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		65

- $F = 10,51 \text{ м}^2$

Повна висота днища апарату [82]:

$$H_{\text{дн}} = h_1 + h_b = 0,08 + 0,75 = 0,83 \text{ м} \quad (3.2.1.1)$$

4.2.2 Розрахунок перемішуючого пристрою

Відповідно до обґрунтування, наведеного в минулому підрозділі, обираємо пропелерну мішалку.

Основні співвідношення для такого типу мішалки:

- $D/d_m = 3 \div 4$ (в розрахунках було прийнято 4)
- $h/d_m = 0,4 \div 1$ (в розрахунках було прийнято 0,7)
- $b/d_m = 0,1$
- $\varepsilon_m = 0,56$

На кожні 20 м^3 рідини рекомендовано встановлювати одну мішалку. Тож використаємо 3.

Діаметр мішалки [81]:

$$d_m = D/4 = 3/4 = 0,75 \text{ м} \quad (3.2.2.1)$$

де, D – внутрішній діаметр апарату, м.

Із стандартного ряду приймаємо $d_m = 800 \text{ мм}$.

Висота від днища до мішалки [81]:

$$h = 0,7 \cdot d_m = 0,7 \cdot 0,8 = 0,56 \text{ м} \quad (3.2.2.2)$$

Стандартне число обертів мішалки згідно з обраною технологією $n = 1150 \text{ об/хв}$
 $= 19,17 \text{ об/с}$.

4.2.3 Розрахунок висоти рівня рідини в апараті та висоти апарату

Повний об'єм реактора [81]:

$$V = V_{\text{ц}} + 2V_{\text{дн}} \quad (3.2.3.1)$$

Відповідно, об'єм циліндричної частини [81]:

$$V_{\text{ц}} = V_{\text{н}} - 2V_{\text{дн}} = 50 - 2 \cdot 4,0836 = 41,8328 \text{ м}^3 \quad (3.2.3.2)$$

					ДП БЕ91 17.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		66

Висота циліндричної частини [81]:

$$H_{ц} = \frac{V_{ц}}{F} = \frac{V_{ц} \cdot 4}{\pi \cdot D^2} = \frac{41,8328 \cdot 4}{\pi \cdot 3^2} = 5,92 \text{ м} \quad (3.2.3.3)$$

Висота рівня рідини в циліндричній частині [81]:

$$H_{цр} = \frac{V_{ц} \cdot 4}{\pi \cdot D^2} \cdot K_3 = \frac{41,8328 \cdot 4}{\pi \cdot 3^2} \cdot 0,7 = 4,14 \text{ м} \quad (3.2.3.4)$$

Висота стовпа рідини [81]:

$$H_p = H_{цр} + H_{дн} = 4,14 + 0,83 = 4,97 \text{ м} \quad (3.2.3.5)$$

Загальна висота реактора [81]:

$$H_{реакт} = H_{ц} + 2 \cdot H_{дн} = 5,92 + 2 \cdot 0,83 = 7,58 \text{ м} \quad (3.2.3.6)$$

4.2.4 Розрахунок глибини воронки

Параметр висоти завантаження апарату [81]:

$$(\Gamma)\gamma = 8 \frac{H_p}{D} + 1 = 8 \frac{4,97}{3} + 1 = 14,25 \quad (3.2.4.1)$$

Параметр гідравлічного опору мішалки E знаходять за формулою [81]:

$$E = \frac{\gamma}{\xi_m \cdot z_m \cdot Re_u^{0,25}} = \frac{14,25}{0,56 \cdot 3 \cdot (2,45 \cdot 10^6)^{0,25}} = 0,2 \quad (3.2.4.2)$$

$\Psi_1 = 0,4$ – значення параметру розподілення

За значенням параметру Ψ_1 знаходимо параметр глибини воронки В: $B = 8$.

Глибину воронки знаходять за формулою [81]:

$$h_{\epsilon} = \frac{B n^2 d_m^2}{2} = \frac{8 \cdot 19,17^2 \cdot 0,8^2}{2} = 940,77(\text{м}) \quad (3.2.4.3)$$

Гранично допустима глибина воронки [81]:

$$h_{\epsilon p} = H_p - h = 4,97 - 0,83 = 4,14(\text{м}) \quad (3.2.4.4)$$

Перевіряємо, чи виконується співвідношення [81]:

$$h_{\epsilon} > h_{\epsilon p} = 940,77 > 4,14 \quad (3.2.4.5)$$

Отже, в апараті встановлюються перегородки.

					ДП БЕ91 17.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		67

4.2.5 Розрахунок потужності, що витрачається на перемішування

Критерій Рейнольдса [81]:

$$Re_{\text{ц}} = \frac{n \cdot d_{\text{м}}^2 \cdot \rho}{\mu} = \frac{19,17 \cdot 0,8^2 \cdot 900}{4,5 \cdot 10^{-3}} = 2,45 \cdot 10^6 \quad (3.2.5.1)$$

де, n – число обертів мішалки, с^{-1} , μ – коефіцієнт динамічної в'язкості рідини, $\text{Па} \cdot \text{с}$.

За графіком нормалі з рисунку 4.1 знаходимо значення $K_N = f(Re_{\text{ц}})$: $K_N = 0,25$.

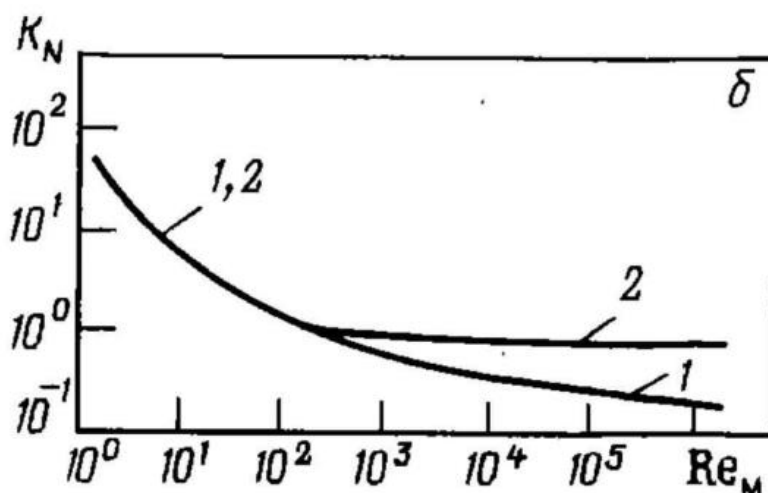


Рисунок 4.2.5.1 – $K_N = f(Re_{\text{ц}})$: 1 – без відбивних перегородок, 2 – з відбивними перегородками

Потужність, що витрачається на перемішування [81]:

$$N = K_N \cdot \rho \cdot n^3 \cdot d_{\text{м}}^5 = 0,25 \cdot 900 \cdot 19,17^3 \cdot 0,8^5 = 519 \text{ кВт} \quad (3.2.5.1)$$

Згідно з даними розрахунками візьмемо в якості приводу мішалки мотор-редуктор типу МПО-1 з потужністю електродвигуна 550 кВт.

4.2.6 Тепловий розрахунок змішувача

Теплофізичні властивості біодизеля (при $t = 60^\circ \text{C}$) [83]:

- Густина $\rho_6 = 900 \text{ кг/м}^3$
- Кінематична в'язкість $\nu_6 = 5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$
- Динамічна в'язкість $\mu_6 = 4,5 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}$

					ДП БЕ91 17.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		68

- Теплоємність

$$C_6 = 1,9 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{K)}$$

- Коефіцієнт теплопровідності

$$\lambda_6 = 0,3 \text{ Вт/(м}\cdot\text{K)}$$

Данні відповідають стандарту EN14214.

Метою розрахунку є визначення площі поверхні теплообміну.

Тепловий баланс змішувача [83]:

$$Q_T = Q_H + Q_{втр} - Q_{дис} \quad (3.2.6.1)$$

Необхідна кількість теплоти для нагрівання розчину [83]:

$$Q_H = m \cdot C_6 \cdot (t_k - t_n) = V_p \cdot \rho \cdot C_6 \cdot (t_k - t_n) = 35 \cdot 900 \cdot 1900 \cdot (60 - 20) = 2394 \text{ МДж} \quad (3.2.6.2)$$

Теплота, що виділяється в результаті дисипації механічної енергії від перемішувачів [83]:

$$Q_{дис} = N \cdot \tau_{пер} = 550000 \cdot 3600 = 1980 \text{ МДж} \quad (3.2.6.3)$$

Втрати теплоти в навколишнє середовище при нагріванні [83]:

$$Q_{втр} = 0,02 \cdot Q_H = 0,02 \cdot 2394 = 47,88 \text{ МДж} \quad (3.2.6.4)$$

¹ – втрати, приймаємо за 2% від загального Q_H .

Тоді рівняння теплового балансу запишемо у вигляді [84]:

$$Q_T = 2394 + 47,88 - 1980 = 461,88 \text{ МДж} \quad (3.2.6.5)$$

де Q_T – теплота, що відводиться теплоносієм;

Теплоносій – вода, визначаємо витрату води [83]:

$$G_B = \frac{Q_T}{C_B(t_1 - t_2)} = \frac{461880000}{4187 \cdot (90 - 75)} = 7354,2 \text{ кг/с} \quad (3.2.6.6)$$

де t_1 – температура теплоносія на вході в рубашку; t_2 – температура теплоносія на виході з рубашки.

де, C_B – 4,187 кДж/кг, питома теплоємність води при температурі 15 °С.

Визначаємо площу поверхні теплопередачі реактора [83]:

$$\begin{aligned} \Delta t_6 &= t_1 - t_n = 90 - 20 = 70^\circ\text{C} \\ \Delta t_m &= t_1 - t = 90 - 60 = 30^\circ\text{C} \end{aligned} \quad (3.2.6.7)$$

					ДП БЕ91 17.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		69

$$\frac{\Delta t_{\delta}}{\Delta t_{\text{м}}} = \frac{70}{30} = 2,3 > 2, \text{ тоді:} \quad (3.2.6.8)$$

$$\Delta t_{\text{ср}} = \frac{\Delta t_{\delta} - \Delta t_{\text{м}}}{\ln \frac{\Delta t_{\delta}}{\Delta t_{\text{м}}}} = \frac{70 - 30}{\ln \frac{70}{30}} = 47,2 \quad (3.2.6.9)$$

де $t_{\text{н}}$ – температура біодизеля до нагрівання.

Тепловіддача від рідини, що перемішується до стінки апарату, що знаходиться в рубачці.

Критерій Прандтля [83]:

$$\text{Pr} = \frac{C_{\delta} \cdot \mu_{\delta}}{\lambda} = \frac{1900 \cdot 4,5 \cdot 10^{-3}}{0,3} = 28,5 \quad (3.2.6.10)$$

Критерій Нусельта [83]:

$$\text{Nu} = 0,76 \cdot \text{Re}^{0,67} \cdot \text{Pr}^{0,33} = 0,76 \cdot (3,1 \cdot 10^6)^{0,67} \cdot 28,5^{0,33} = 51300,9 \quad (3.2.6.11)$$

$$\text{Nu} = \frac{\alpha_1 \cdot D_{\text{вн}}}{\lambda} \quad (3.2.6.12)$$

$$\alpha_1 = \frac{\lambda \cdot \text{Nu}}{D_{\text{вн}}} = \frac{0,3 \cdot 51300,9}{3} = 5130 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}} \quad (3.2.6.13)$$

Зазвичай, тепловіддача в рубачці відбувається в умовах вільної конвекції[83]:

$$t_{\text{ср}} = \frac{t_1 + t_2}{2} = \frac{90 + 75}{2} = 82,5^{\circ}\text{C} \quad (3.2.6.14)$$

$$t_{\text{см}} = \frac{t_1 + t_{\text{ср}}}{2} = \frac{60 + 82,5}{2} = 71,25^{\circ}\text{C}$$

$$\text{Gr} \cdot \text{Pr} = H_p^3 \cdot (t_{\text{ср}} - t_{\text{см}}) \cdot B = 4,97^3 \cdot (82,5 - 71,25) \cdot 34 \cdot 10^9 = 47 \cdot 10^{12} \quad (3.2.6.15)$$

Тоді, критерій Нусельта [83]:

$$\text{Nu} = C \cdot (\text{Gr} \cdot \text{Pr})^a = 0,15 \cdot (47 \cdot 10^{12})^{0,33} = 4874 \quad (3.2.6.16)$$

Коефіцієнт тепловіддачі від стінки апарату до води [83]:

$$\alpha_2 = \frac{\lambda \text{Nu}}{H_p} = \frac{0,638 \cdot 4874}{4,97} = 625,68 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}} \quad (3.2.6.17)$$

де, λ – теплопровідність води при $t_{\text{ср}}$.

Коефіцієнт теплопередачі становить [83]:

					ДП БЕ91 17.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		70

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_{ст}}{\lambda_{ст}} + \frac{1}{\alpha_2}} = \frac{1}{\frac{1}{5130} + \frac{0,028}{17,5} + \frac{1}{625,68}} = 294,71 \frac{Вт}{м^2 \cdot К} \quad (3.2.6.18)$$

де, $\lambda_{ст}$ – теплопровідність для нержавіючої сталі (17,5), $\delta_{ст}$ – товщина стінки апарата (0,04 м).

Необхідна поверхня теплообміну реактора [83]:

$$F = \frac{Q_T}{K \cdot t \cdot \Delta t_{cp}} = \frac{461880000}{294,71 \cdot 3600 \cdot 47,2} = 9,22(м^2) \quad (3.2.6.19)$$

За ДСТУ 6533-78 площа поверхні теплообміну сорочки для обраного апарату складає 10,51 м², яке є більшим значенням за вище розраховане, що свідчить про можливість експлуатації вибраного апарату.

4.2.7 Розрахунок штуцерів

Мета: Виконати розрахунок геометричних параметрів штуцерів.

Порядок розрахунку передбачає розрахунок діаметру штуцера.

Вихідні дані:

масові витрати води, кг/с, G_1	4488,2;
густина води, кг/м ³ , ρ_1	999,7;
масові витрати метоксиду, кг/с, G_2	0,064;
густина метоксиду, кг/м ³ , ρ_2	1280;
масові витрати олії, кг/с, G_3	0,291;
густина олії, кг/м ³ , ρ_3	910;
масові витрати біодизелю, кг/с, G_3	0,35;
густина біодизелю, кг/м ³ , ρ_3	900;

Порядок розрахунку:

Діаметр штуцерів визначається за формулою [81]:

					ДП БЕ91 17.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		71

$$d = \sqrt{\frac{4G}{\pi w \rho}} \quad (3.2.7.1)$$

де G – масова витрата теплоносія, ρ – густина теплоносія, w – швидкість руху теплоносія в штуцері.

Приймаємо швидкість руху води в штуцері $w = 20$ м/с, швидкість руху середовища та продукту в штуцері $w = 20$ м/с, швидкість руху повітря в штуцері $w = 14$ м/с.

Діаметр штуцера для подачі та відведення теплоносія (води) [81]:

$$d_1 = \sqrt{\frac{4G_1}{\pi w_1 \rho_1}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 7354,2}{\pi \cdot 1,5 \cdot 999,7}} = 0,1(м) \quad (3.2.7.2)$$

Вибираємо штуцер для подачі та відведення води [81]:

Діаметр штуцера: $d_T = 0,1$ м

Товщина стінки штуцера: $s_T = 0,03$ м

Діаметр штуцера для подачі метоксиду [81]:

$$d_2 = \sqrt{\frac{4G_2}{\pi w_2 \rho_2}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,064}{\pi \cdot 20 \cdot 1280}} = 0,15(м) \quad (3.2.7.3)$$

Вибираємо штуцер для подачі метоксиду:

Діаметр штуцера: $d_T = 0,15$ м

Товщина стінки штуцера: $s_T = 0,01$ м.

Діаметр штуцера для подачі олії [81]:

$$d_3 = \sqrt{\frac{4G_3}{\pi w_3 \rho_3}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,291}{\pi \cdot 20 \cdot 910}} = 0,15(м) \quad (3.2.7.4)$$

Вибираємо штуцер для подачі олії:

Діаметр штуцера: $d_T = 0,15$ м

Товщина стінки штуцера: $s_T = 0,01$ м.

Діаметр патрубку для виходу продукту [81]:

$$d_4 = \sqrt{\frac{4G_4}{\pi w_4 \rho_4}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,35}{\pi \cdot 20 \cdot 900}} = 0,005(м) \quad (3.2.7.5)$$

Вибираємо патрубок для виходу продукту:

					ДП БЕ91 17.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		72

Діаметр патрубку: $d_T = 0,2 \text{ м}$

Товщина стінки патрубку: $s_T = 0,01 \text{ м.}$

					ДП БЕ91 17.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		73

РОЗДІЛ 5. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ОХОРОНА ДОВКІЛЛЯ

Необхідно виявити потенційні загрози з охорони гігієни і праці, що виникають на цьому виробництві. Це можна зробити шляхом аналізу виробничої безпеки або комплексної оцінки ризиків і небезпек, застосовуючи визначені методики, такі як виявлення небезпечних ділянок аварійного характеру (HAZID), виявлення небезпек і працездатності обладнання (HAZOP) і кількісна оцінка ризику (QRA) [84]. При розробці загального плану охорони і гігієни праці слід застосовувати систематичний структурний підхід до вирішення питань, пов'язаних з усуненням та контролем джерел фізичних, хімічних, біологічних і радіологічних небезпек, які описані у Загальному керівництві з охорони санітарно-технічної безпеки праці. До питань охорони і гігієни праці, що потребує особливої уваги при виробництві продуктів переробки масел, відносяться:

- Технологічна безпека
- Джерела хімічної небезпеки
- Пожежі та вибухи
- Інші виробничі ризики

1) Технологічна безпека

Програми з промислової безпеки мають бути адаптовані до особливостей галузі, таких як складні хімічні реакції, використання небезпечних матеріалів (наприклад, токсичних, хімічно активних, легкозаймистих і вибухонебезпечних сполук) та багатостадійні реакції органічного синтезу [84].

Забезпечення технологічної безпеки включає наступні напрямки діяльності:

- випробування матеріалів і реакцій на наявність джерел фізичної небезпеки;

					ДП БЕ91 17.000 ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.	Степанчук А.В.				ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ОХОРОНА ДОВКІЛЛЯ	Стадія	Арк.	Акрушів
Конс.							74	90
						«КПП» ім. Ігоря Сікорського, ФБТ		
Керів.	Левтун І.І.							
Затверд.								

- аналіз експлуатаційної безпеки з метою вивчення хімії технологічних процесів і технічної підготовки, зокрема, в області термодинаміки і кінетики;
- проведення профілактичного технічного обслуговування і вивчення механічної цілісності технологічного обладнання та енергогосподарства;
- навчання працівників;
- Розробка посібників з експлуатації та дій у надзвичайних ситуаціях.

2) Джерела хімічної небезпеки

Роботи, пов'язані з виробництвом перероблених олійних продуктів, може бути пов'язана з ризиком впливу небезпечних хімікатів, таких як гексан, метанол та інші розчинники, що використовуються для екстракції та переестерефікації. Також може існувати ризик потрапляння токсичних хімікатів, включаючи кислоти і луги, у дихальні шляхи та на шкіру, а також пилу при транспортуванні сировини та від землі, фільтруючих добавок та каталізаторів. Заходи протидії хімічним небезпекам на робочому місці описані в загальних керівництвах з охорони праці та безпеки [84].

Для даної галузі пропонуються наступні додаткові рекомендації:

- навчання співробітників поводженню з хімічними речовинами, наприклад правильної інтерпретації специфікацій безпеки матеріалів і міжнародних карт хімічної безпеки, ознайомлення з властивостями токсичних речовин, (метанол та ін.) ризиками, пов'язаними з їх використанням, а також процедурам надання першої допомоги (сезонні та інші тимчасові працівники повинні бути навчені всьому до того, як вони приступлять до роботи з хімічними речовинами);
- забезпечення працівників необхідними засобами індивідуального захисту (ЗІЗ) і одягом, якщо вони вказані в результатах аналізу виробничої безпеки і в даних з безпеки;
- забезпечення достатньої циркуляції повітря на ділянках екстракції та переестерефікації олій, щоб зменшити концентрацію токсичних речовин;

					ДП БЕ91 17.000 ПЗ	Арк.
						75
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- забезпечення достатньої вентиляції, особливо на робочих місцях, де здійснюється переміщення і розмелювання сировини, готуються розчини токсичних речовин і використовуються розчинники;
- забезпечення контролю рівня метанолу в робочому середовищі на регулярній основі, для того щоб вчасно виявити можливі ризики і прийняти відповідні заходи безпеки.
- після екстракції олії необхідно забезпечити її правильну перегонку для ефективного видалення розчинників;
- здійснення профілактичного технічного обслуговування, щоб знизити ризик отримання опіків від труб з парою і від усіх гарячих поверхонь;
- для протирання слід по можливості користуватися гарячою водою, а не розчинниками.

3) Джерела фізичної небезпеки

Джерела фізичної небезпеки на підприємствах, що займаються виробництвом перероблених олійних продуктів, аналогічні тим, які існують в інших галузях. Вони включають: ризик падіння на підлогу або сходи, можливість зіткнення з внутрішньозаводським транспортом, наприклад вантажівками, і ненавмисний контакт з конвеєрними системами, які подібні до тих, що використовуються в дробильних установках. Оператори також піддаються шуму від внутрішньозаводського транспорту, конвеєрів, котлів, насосів, вентиляторів, витоків пари та повітря тощо. Інструкції щодо загальних умов на робочому місці містяться в загальних керівництвах з охорони праці та безпеки [84].

4) Охорона здоров'я та безпеку місцевого населення

Найсерйозніша загроза для здоров'я та безпеки місцевого населення, пов'язана з підприємствами, що виробляють продукти переробки олій, виникає під час експлуатації. Ця загроза може бути пов'язана з можливими пожежами, вибухами або випадковими викидами сировини або готової продукції під час транспортування поза технологічною лінією. Інструкції щодо вирішення цих проблем наведені нижче, а також відповідних розділах Загального керівництва

					ДП БЕ91 17.000 ПЗ	Арк.
						76
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

з охорони праці та безпеки (ОСЗТ), зокрема в розділах "Безпека дорожнього руху", "Транспортування небезпечних матеріалів" та "Готовність до надзвичайних ситуацій та аварійний реагування" [84].

Типовими залишками та вторинними продуктами виробництва продуктів переробки олій є тверді відходи і побічні речовини. Вони включають відкладення солей після нейтралізації гліцеринової фази використаного каталізатора, жирні кислоти та жирові мила, а також використані фільтраційні панелі після очищення низькоякісної сировини. Крім того, після процесу перегонки утворюються важкі і легкі фракції складних ефірів.

Рекомендуються наступні стратегії поводження з відходами:

- необхідно розглянути доцільність рециркуляції солей відпрацьованого каталізатора в якості добрив, якщо в якості каталізатора використовується гідроксид калію, а в якості нейтралізатора - фосфорна кислота;
- очистити і видалити відпрацьовану фільтраційну панель, як описано для тих же потоків відходів, що одержують при виробництві жирних кислот;

5) Контроль рівня шуму

Джерелами шуму зазвичай є компресори і турбіни, насоси, електродвигуни, повітроохолоджувачі, барабани, що обертаються, сферодайзери, конвеєрні стрічки, крани, полум'яні нагрівачі і аварійна розгерметизація. Інструкції з контролю шумів і зниження їх рівня містяться в Загальних керівництві по ОСЗТ [84].

					ДП БЕ91 17.000 ПЗ	Арк.
						77
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

1. Було проведено літературний огляд стосовно існуючих видів сировини, що використовується для виготовлення біодизеля, та умов їх вирощування. Встановлено що водорості є одною з найперспективніших продуцентів для отримання біодизеля, так як обсяги виробництва олії з них становлять близько 95000 л на гектар в рік за умови вирощування їх у відкритих водоймах, що в десятки разів вище в порівнянні з іншими видами сировини.

2. В якості продуценту для виробництва біодизеля обрано біомасу зелених мікроводоростей *Acutodesmus dimorphus*. З сухої речовини цих водоростей на 100 г виходить біля 28-80 г ліпідів, проти 14-60 г у найближчого конкурента – мікроводоростей роду *Chlorella*. На основі аналізу існуючих технологій виробництва біодизеля обрано циклічну технологію переестерифікації з метанолом за використання NaOH в якості лужного каталізатора.

3. Розроблено та описано технологічну і апаратурну схеми виробництва біодизельного палива з водоростей *Acutodesmus dimorphus*. Технологія виробництва біодизеля включає: культивування мікроводоростей для отримання олії, виділення олії з біомаси шляхом механічного пресування, приготування біодизеля, промивання та осушення біодизеля, знешкодження відходів.

4. Обрано та розраховано основні технологічні параметри обладнання для виробництва біодизеля - реактор об'ємом 50 м³, висотою 7,58 м, діаметром 3 м, 16 штук, з пропелерною мішалкою, 3 штуки. Розроблено креслення реактора.

5. Запропоновано пропозиції та заходи щодо забезпечення охорони праці, техніки безпеки, охорони довкілля, згідно до ДСТУ та ДБН.

					ДП БЕ91 17.000 ПЗ		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			
Розроб.	Степанчук А.В					Стадія	Арк.
Конс.							78
							90
Керів.	Левтун І. І.					«КПІ» ім. Ігоря Сікорського, ФБТ	
Затверд.							

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- 1) Талавирия М.П., Барановська О.Д., Добрівська М.В. та ін. Розвиток та застосування різних видів біоенергетики: [Монографія] / Талавирия М.П., Барановська О.Д., Добрівська М.В. та ін. – Ніжин: Видавець ПП Лисенко М.М., 2012. – 180 с.
- 2) Васькін Р.А., доцент, Мальована І.О., студент, Янченко І.О., студент, СумДУ, м. Суми. Перспективи отримання біодизеля з водоростей. [Електронний ресурс] / Васькін Р.А. - Режим доступу: https://essuir.sumdu.edu.ua/bitstreamdownload/123456789/25742/1/Vas'kin_Mal'ovana_Janchenko%20.pdf;jsessionid=28E04E52B8C550D7B18BB6F9AD3D5C77
- 3) *OECD-FAO Agricultural Outlook 2021-2030.* (2021). OECD. <https://doi.org/10.1787/19428846-en>
- 4) Поліщук, В. М. Тваринні та рослинні жири як сировина для виробництва біодизеля (узагальнення досвіду)/В. М. Поліщук // Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія "Техніка та енергетика АПК". – 2010. - Вип. 144. Ч. 3. - С.198-218
- 5) Колосов, О. Є. Високоєфективні засоби приготування біопалива / О. Є. Колосов, Г. Л. Рябцев, В. І. Сівецький, Д. Е. Сідоров, С. О. Пристайлов. – К. : Січкара, 2010. – 152 с. ISBN 966-622-289-9
- 6) В. І. Саранчук, М. О. Ільяшов, В. В. Ошовський, В. С. Білецький. Хімія і фізика горючих копалин. — Донецьк: Східний видавничий дім, 2008. — с. 600. ISBN 978-966-317-024-4
- 7) Escobar J. C., Lora E.S., Venturini O.J. et al. Bio fuels:Environment, technology and food security // Renew. Sust. Ener. Rev. — 2009. — Vol. 13. — №6-7. — P. 1275–1287.

					ДП БЕ91 17.000 ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.	Степанчук А.В					Стадія	Арк.	Акрушів
Конс.							79	90
						«КПІ» ім. Ігоря Сікорського, ФБТ		
Керів.	Левтун І. І.							
Затверд.								

- 8) Ponti L., Gutierrez A. P. Overview on Biofuels From a European Perspective // Bull. Sci. Tech. Soc. — 2009. — Vol. 29. — №6. — P. 493–504.
- 9) Рябцев Г.Л. Аналіз сучасних засобів виробництва біодизельного палива / Г. Л. Рябцев, О. Є. Колосов, Д. Е.Сідоров, О.О. Гладкова // Вісник НТУУ «КПІ», сер. «Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження». – 2009. – № 2. – С. 48-54.
- 10) Рябцев Г. Л. Біодизель від «А» до «Я» / Геннадій Рябцев // Термінал. – 2007. – № 48. – С.8-15.
- 11) Одноклітинні водорості як відновлюваний біологічний ресурс /[Мінюк Г. С., Дробецька І. В., Чубчикова І. Н. та ін] // Морський Екологічний журнал. - 2008. - Т. 7, № 2. - С. 5-23.
- 12) Khan, S., Siddique, R., Sajjad, W., Nabi, G., Hayat, K. M., Duan, P., & Yao, L. (2017a). Biodiesel Production From Algae to Overcome the Energy Crisis. HAYATI Journal of Biosciences, 24(4), 163–167. <https://doi.org/10.1016/j.hjb.2017.10.003>
- 13) G.W. Roberts, M.O.P. Fortier, B.S. Sturm, S.M. Stagg-Williams Promising pathway for algal biofuels through wastewater cultivation and hydrothermal conversion Energy & Fuels, 27 (2) (2013), pp. 857-867
- 14) M.B. Charles, R. Ryan, N. Ryan, R. Oloruntoba Public policy and biofuels: the way forward? Energy Policy, 35 (11) (2007), pp. 5737-5746
- 15) J.K. Pittman, A.P. Dean, O. Osundeko The potential of sustainable algal biofuel production using wastewater resources Bioresour Technol, 102 (1) (2011), pp. 17-25
- 16) Кобець М.І. Проблемні питання розвитку біодизельного виробництва в Україні.[Електронний ресурс] / М.І. Кобець. - Режим доступу: http://brc.undp.org.ua/img/publications/Problems_of_biodieseljproduction_u a.pdf
- 17) Новіков В., Сидоров Ю., Швед О. Тенденції розвитку комерційної біотехнології //Вісник НАН України. - 2008. - №2 - С. 25-39.

					ДП БЕ91 17.000 ПЗ	Арк.
						80
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- 18) A. Banerjee, R. Sharma, Y. Chisti, U.C. Banerjee Botryococcus braunii a renewable source of hydrocarbons and other chemicals Crit. Rev. Biotech, 22 (3) (2002), pp. 245-279
- 19) Gifuni I, Pollio A, Safi C et al (2019) Current bottlenecks and challenges of the microalgal biorefinery. Trends Biotechnol 37:242–252
- 20) Viegas CV, Hachemi I, Mäki-Arvela P et al (2015) Algal products beyond lipids: Comprehensive characterization of different products in direct saponification of green alga Chlorella sp. Algal Res. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2015.06.014>
- 21) Udayan, A., Pandey, A. K., Sirohi, R., Sreekumar, N., Sang, B.-I., Sim, S. J., Kim, S. H., & Pandey, A. (2022). Production of microalgae with high lipid content and their potential as sources of nutraceuticals. Phytochemistry Reviews. <https://doi.org/10.1007/s11101-021-09784-y>
- 22) Alishah Aratboni, H., Rafiei, N., Garcia-Granados, R., Alemzadeh, A., & Morones-Ramírez, J. R. (2019). Biomass and lipid induction strategies in microalgae for biofuel production and other applications. Microbial Cell Factories, 18(1). <https://doi.org/10.1186/s12934-019-1228-4>
- 23) Althoff T, et al. Arrangement of electron transport chain components in bovine mitochondrial supercomplex I 1 III 2 IV 1. EMBO J. 2011;30(22):4652–64.
- 24) Yates CM, Calder PC, Rainger GE. Pharmacology and therapeutics of omega-3 polyunsaturated fatty acids in chronic inflammatory disease. Pharmacol Ther. 2014;141(3):272–82.
- 25) Gopalakrishnan V, Ramamurthy D. Dyeing industry effluent system as lipid production medium of Nannochloris sp. for biodiesel feedstock preparation. BioMed Res Int. 2014;2014:7.
- 26) Mathieu-Rivet E, et al. Protein N-glycosylation in eukaryotic microalgae and its impact on the production of nuclear expressed biopharmaceuticals. Front Plant Sci. 2014;5:359.

					ДП БЕ91 17.000 ПЗ	Арк.
						81
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- 27) Fan J, Yu L, Xu C. A central role for triacylglycerol in membrane lipid breakdown, fatty acid β -oxidation, and plant survival under extended darkness. *Plant Physiol.* 2017;174(3):1517–30.
- 28) Murphy DJ, Leech RM. Photosynthesis of lipids from 14 CO₂ in *Spinacia oleracea*. *Plant Physiol.* 1981;68(3):762–5.
- 29) Liang M-H, Jiang J-G. Advancing oleaginous microorganisms to produce lipid via metabolic engineering technology. *Prog Lipid Res.* 2013;52(4):395–408.
- 30) Chen H-H, Jiang J-G. Lipid accumulation mechanisms in auto-and heterotrophic microalgae. *J Agric Food Chem.* 2017;65(37):8099–110.
- 31) Sharma KK, Schuhmann H, Schenk PM. High lipid induction in microalgae for biodiesel production. *Energies.* 2012;5(5):1532–53.
- 32) Berge J-P, et al. Reassessment of lipid composition of the diatom, *Skeletonema costatum*. *Phytochemistry.* 1995;39(5):1017–21.
- 33) Eizadora TY, et al. Triacylglycerol accumulation and profiling in the model diatoms *Thalassiosira pseudonana* and *Phaeodactylum tricornutum* (Baccilariophyceae) during starvation. *J Appl Phycol.* 2009;21(6):669.
- 34) Khozin-Goldberg I, Cohen Z. The effect of phosphate starvation on the lipid and fatty acid composition of the fresh water eustigmatophyte *Monodus subterraneus*. *Phytochemistry.* 2006;67(7):696–701.
- 35) Amin, S. (2009). Review on biofuel oil and gas production processes from microalgae. *Energy Convers. Management* 50: 1834-1840.
- 36) Царенко, Петро, Борисова, Елена и Блюме, Ярослав. "Продуценти с високим содержанием биомассы и перспективные кандидаты для производства биодизеля из коллекции микроводорослей ИБАСУ-А (Украина)" *Океанологические и гидробиологические исследования*, т.45, №1, 2016 г., стр.79-85. <https://doi.org/10.1515/ohs-2016-0008>
- 37) Tsarenko, P.M., Konischuk, M.O. Kyiv: Institute of Botany. Niehaus, T.D., Okada, S., Devarenne, T.P., Watt, D.S., Sviripa, V. et al. (2011).

					ДП БЕ91 17.000 ПЗ	Арк.
						82
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Identification of unique mechanisms for triterpene biosynthesis in *Botryococcus braunii*. Proc. Nat. Acad. Sci. USA 108: 12260–12265. DOI: 10.1073/pnas.1106222108
- 38) Niehaus, T.D., Okada, S., Devarenne, T.P., Watt, D.S., Sviripa, V. et al. (2011). Identification of unique mechanisms for triterpene biosynthesis in *Botryococcus braunii*. Proc. Nat. Acad. Sci. USA 108: 12260–12265. DOI: 10.1073/pnas.1106222108
- 39) Griffiths, M.J., Dicks, R.G. Advantages and challenges of microalgae as a source of oil for biodiesel. In: M. Stoytcheva, Montero, G. (Eds.), Biodiesel – feedstocks and processing technologies. (pp. 177-200). Intech: Rijeka. DOI: 10.5772/1094.
- 40) Chisti, Y. (2007). Biodiesel from microalgae. Biotechnol. Adv. 25: 294-306. doi:10.1016/j.biotechadv.2007.02.001
- 41) Radakovits, R., Jinkerson, R.E., Darzins, A., Posewitz, M.C. (2010). Genetic engineering of algae for enhanced biofuel production. Eukaryotic Cell 9: 486-501. DOI:10.1128/EC.00364-09
- 42) Sirenko, L.A. (1975). Methods of physiological and biochemical studied on algae in hydrobiological practice. Kiev: Nauk. Dumka Press
- 43) Soeder, S.J., Hegewald, E. (1988). Scenedesmus. In: Borowitzka, M.A., Borowitzka, L.J. (Eds.) Micro-algal biotechnology (pp. 59-84). Cambridge-New York-Sydney: Cambridge Univ. Press.
- 44) Liang Y. Biomass and lipid productivities of *Chlorella vulgaris* under autotrophic, heterotrophic and mixotrophic growth conditions/ Y. Liang, N. Sarkany, Y. Cui// Biotechnology Letters. – 2009. – Vol. 31(7) – P. 1043-1049.
- 45) Islam M.A. Microalgae: An alternative source of biodiesel for the compression ignition (CI) engine/ M.A. Islam// PhD by Publication. – 2014
- 46) Converti A. et al. Effect of temperature and nitrogen concentration on the growth and lipid content of *Nannochloropsis oculata* and *Chlorella vulgaris*

					ДП БЕ91 17.000 ПЗ	Арк.
						83
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

for biodiesel production/ A. Converti et al// Chem. Eng. Process. Process Intensif. – 2009. – Vol. 48(6). – P. 1146–1151.

- 47) Barinova, S.S., Bilous, O.P., Tsarenko, P.M. 2019. Algal indication of water bodies in Ukraine: methods and perspectives. Haifa, Kiev: University of Haifa Publisher
- 48) Перспективи використання мікрроводоростей у біотехнології / О.К. Золотарьова, Є.І. Шнюкова, О.О. Сиваш, Н.Ф. Михайленко; Під ред. О.К. Золотарьової. - К.: Альтерпрес, 2008. - 234 с
- 49) Scott, S. A., Davey, M. P., Dennis, J. S., Horst, I., Howe, C. J., Lea-Smith, D. J., & Smith, A. G. (2010b). Biodiesel from algae: challenges and prospects. Current Opinion in Biotechnology, 21(3), 277–286.
<https://doi.org/10.1016/j.copbio.2010.03.005>
- 50) Greenwell, H. C., Laurens, L. M. L., Shields, R. J., Lovitt, R. W., Flynn, K. J., Placing microalgae on the biofuels priority list: A review of the technological challenges. J. R. Soc. Interface. 2010, 7, 703–726.
- 51) Doucha, J., Li'vansky', K., Influence of processing parameters on disintegration of Chlorella cells in various types of homogenizers. Appl. Microbiol. Biot. 2008, 81, 431–440.
- 52) Mercer, P., & Armenta, R. E. (2011). Developments in oil extraction from microalgae. European Journal of Lipid Science and Technology, 113(5), 539–547. <https://doi.org/10.1002/ejlt.201000455>
- 53) Harun, R., Singh, M., Forde, G. M., Danquah, M. K., Bioprocess engineering of microalgae to produce a variety of consumer products. Renew. Sust. Energ. Rev. 2010, 14, 1037–1047.
- 54) Banerjee, A., Sharma, R., Chisti, Y., Banerjee, U. C., Botryococcus braunii: A renewable source of hydrocarbons and other chemicals. Crit. Rev. Biotechnol. 2002, 22, 245.
- 55) Hejazi, M. A., Wijffels, R. H., Milking of microalgae. Trends Biotechnol. 2004, 22, 189–194.

					ДП БЕ91 17.000 ПЗ	Арк.
						84
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- 56) Cooney, M., Young, G., Nagle, N., Extraction of bio-oils from microalgae. Sep. Purif. Rev. 2009, 38, 291–325.
- 57) Shen, Y., Pei, Z., Yuan, W., Mao, E., Effect of nitrogen and extraction method on algae lipid yield. Int. J. Agric. Biol. Eng. 2009, 2.
- 58) Bligh, E. G., Dyer, W. J., A rapid method of total lipid extraction and purification. Can. J. Biochem. Phys. 1959, 37, 7.
- 59) Sahena, F., Zaidul, I. S. M., Jinap, S., Karim, A. A., et al. Application of supercritical CO₂ in lipid extraction - A review. J. Food Eng. 2009, 95, 240–253.
- 60) Zhu, M., Zhou, P. P., Yu, L. J., Extraction of lipids from *Mortierella alpina* and enrichment of arachidonic acid from the fungal lipids. Bioresour. Technol. 2002, 84, 93–95.
- 61) Belarbi, E. H., Molina, E., Chisti, Y., A process for high yield and scaleable recovery of high purity eicosapentaenoic acid esters from microalgae and fish oil. Enzyme Microb. Technol. 2000, 26, 516–529.
- 62) Lewis, T., Nichols, P. D., McMeekin, T. A., Evaluation of extraction methods for recovery of fatty acids from lipidproducing microheterotrophs. J. Microbiol. Method 2000, 43, 107–116.
- 63) Guil-Guerrero, J. L., Belarbi, E. I. H., Rebollosa-Fuentes, M. M., Eicosapentaenoic and arachidonic acids purification from the red microalga *Porphyridium cruentum*. Bioseparation. 2000, 9, 299–306.
- 64) Cero'n, M. C., Campos, I., Sa'nchez, J. F., Acie'n, F. G., et al. Recovery of lutein from microalgae biomass: Development of a process for *Scenedesmus almeriensis* biomass. J. Agric. Food Chem. 2008, 56, 11761–11766.
- 65) Mendiola, J. A., Jaime, L., Santoyo, S., Reglero, G., et al. Screening of functional compounds in supercritical fluid extracts from *Spirulina platensis*. Food Chem. 2007, 102, 1357–1367

					ДП БЕ91 17.000 ПЗ	Арк.
						85
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- 66) Mendes, R. L., Nobre, B. P., Cardoso, M. T., Pereira, A. P., Palavra, A. F., Supercritical carbon dioxide extraction of compounds with pharmaceutical importance from microalgae. Inorg. Chim. Acta 2003, 356, 328–334.
- 67) Herrero, M., Cifuentes, A., Ibañez, E., Sub- and supercritical fluid extraction of functional ingredients from different natural sources: Plants, food-by-products, algae and microalgae: A review. Food Chem. 2006, 98, 136–148.
- 68) Andrich, G., Zinnai, A., Nesti, U., Venturi, F., Fiorentini, R., Supercritical fluid extraction of oil from microalga Spirulina (Arthrospira) platensis. Acta Aliment. Hung. 2006, 35, 195–203.
- 69) Mendes, R. L., Reis, A. D., Palavra, A. F., Supercritical CO₂ extraction of g-linolenic acid and other lipids from Arthrospira (Spirulina)maxima: Comparison with organic solvent extraction. Food Chem. 2006, 99, 57–63.
- 70) Sajilata, M. G., Singhal, R. S., Kamat, M. Y., Supercritical CO₂ extraction of g-linolenic acid (GLA) from Spirulina platensis ARM 740 using response surface methodology. J. Food Eng. 2008, 84, 321–326.
- 71) Chisti Y. Biodiesel from microalgae/ Y. Chisti// Biotechnology Advances. – 2007. – Vol. 25 – P. 294-306.
- 72) Knothe G. The Biodiesel Handbook/ G. Knothe, G.J. Van, J. Krah// Champaign. – Illinois: AOCS Press. – 2005.
- 73) Screening of Microalgae for Biodiesel Feedstock / X. Chen et al. Advances in Microbiology. 2014. Vol. 04, no. 07. P. 365–376. URL: <https://doi.org/10.4236/aim.2014.47044>
- 74) Demirbas A. Importance of algae oil as a source of biodiesel/ A. Demirbas, M. Fatih Demirbas// Energy conversion and management. – Vol. 52(1) – P. 163-170.
- 75) Мішалки лопатевого типу. [Електронний ресурс]: StudFiles - Режим доступу: <https://studfile.net/preview/7783035/page:11/>
- 76) Основні типи механічних мішалок. [Електронний ресурс]: StudFiles - Режим доступу: <https://studfile.net/preview/9469361/page:12/>

					ДП БЕ91 17.000 ПЗ	Арк.
						86
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- 77) Турбінні мішалки. [Електронний ресурс]: StudFiles - Режим доступу: <https://studfile.net/preview/7783035/page:12/>
- 78) Механічні перемішуючі пристрої. [Електронний ресурс]: StudFiles - Режим доступу: <https://studfile.net/preview/3763593/page:6/>
- 79) ДСТУ 20680:2002 «Апарати з механічними перемішуючими пристроями, Загальні технічні умови»
- 80) Оржель О., Зоркін А., Кикоть К., Нечитайло О., Регелюк С., Регулювання виробництва рідких моторних біопалив / Оржель О. та ін. – Київ:Офіс ефективного регулювання. – 2019. – 109 с.\
- 81) Ружинська Л.І. Проектування реакторів біотехнологічних та фармацевтичних виробництв. Навч. посібник/ Укладачі: Л.І. Ружинська, І А Буртна, В.М.Поводзинський, В.Ю. Шибецький – К.: НТУУ «КПІ», 2014 – 130 с.
- 82) ГОСТ 6533-78 «Днища эллиптические отбортованные стальные для сосудов, аппаратов и котлов, Основные размеры»
- 83) Еремеева А. М. Создание и исследование экологически чистого биотоплива для дизельных двигателей / А. М. Еремеева. – Санкт-Петербург: Национальный минерально-сырьевой университет «Горный». – 2014. – 4 с.
- 84) Посібник з охорони навколишнього середовища, здоров'я та праці виробництва продуктів переробки олій / Міжнародна фінансова корпорації. - 2007. - 23 с.

					ДП БЕ91 17.000 ПЗ	Арк.
						87
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ДОДАТОК А

Специфікація обладнання

Позиція	Позначення	Найменування	К-сть	Маса кг	Примітки
1	2	3	4	5	6
Ф-1		Фільтр грубої очистки	2		Нержавіюча сталь 12Х18Н10 Т
Ос-2		Осмотичний фільтр ECOSOFT МО36 (МО36ТР5)	2		Нержавіюча сталь 12Х18Н10 Т
Н-3 Н-12 Н-15 Н-18 Н-21 Н-24 Н-26 Н-35 Н-37 Н-39 Н-41 Н-43 Н-47 Н-49 Н-51 Н-53		Насос відцентровий	32		Потужність: 22 кВт
Ф-4		Мембранний фільтр	2		Збірний
3-5		Повітрозабірник	2		Нержавіюча сталь 12Х18Н10 Т
КП-5.1 КП-11.1 КП-25.2 КП-28.2 КП-30.2 КП-30.1	РЕ	Манометр	12		Нержавіюча сталь 12Х18Н10 Т
Н-6		Повітрорудка ROBOX EVOLUTION-DV	2		Нержавіюча сталь 12Х18Н10 Т

					ДП БЕ91 17.000 ПЗ	Арк.
						88
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Ф-7 Ф-31 Ф-32 Ф-42		Волокнистий касетний фільтр ФПГ	8		Збірний. Діаметр пор фільтрувальної тканини 18 мкм
Ф-8		Фільтр тонкої очистки НЕРА	2		Збірний.
КП-8.1 КП-25.1 КП-28.1 КП-30.1	TE	Термометр	8		Нержавіюча сталь 12X18H10 T
Ц-9		Цистерна	2		Нержавіюча сталь 12X18H10 T
Д-10		Дозатор об'ємний	2		Нержавіюча сталь 12X18H10 T
К-11		Електронагрівач	2		Збірний.
Д-13 Д-16 Д-19 Д-44 Д-45		Дозатор ваговий	10		Збірний.
Р-14 Р-17		Апарат з механічним перемішуючим пристроєм – турбінною мішалкою. ТЕК-2БМ	4		Продуктивність мішалки 150 об/хв.
КП-17.1 КП-20.1 КП-23.1 КП-28.3	QE	pH-метр	8		Збірний.
Р-20 Р-23		Апарат з механічним перемішуючим пристроєм – турбінною мішалкою VMP680	4		Продуктивність мішалки 1 кВт. Частота обертів 680 об/хв.
AB-25		Автоклав	2		Збірний.
К-27		Колби на 1 л	2		Скло
Тс-28		Термостат	2		Збірний

					ДП БЕ91 17.000 ПЗ	Арк.
						89
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Л-29	LE	Світлодіодна лампа	2		Довжини хвиль в діапазонах 640 – 700 нм
ФР-30		Фотобіореактор	2		Збірний.
КП-30.3		Датчик освітлення	2		Збірний.
Зб-33 Зб-38 Зб-52		Збірник	6		Нержавіюча сталь 12Х18Н10 Т
УЗ-34		Ультразвукова установка	2		Потужність 300 Вт, частота 45 кГц.
Ф-36		Фільтр-прес Hbracol 200	2		Нержавіюча сталь 12Х18Н10 Т
Е-40		Прес-екструдер	2		Продуктивність до 100 кг/год
Р-46		Реактор-змішувач з пропелерною мішалкою.	2		Частота обертів 680 об/хв, об'єм 50 м ³
В-48		Відстійник	2		Збірний.
В-50		Відстійник оснащений душем	2		Збірний.

					ДП БЕ91 17.000 ПЗ	Арк.
						90
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		