

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА**

Навчально-науковий інститут енергетичної, інформаційної
та транспортної інфраструктури
Кафедра альтернативної електроенергетики та електротехніки

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до дипломного проєкту
бакалавра
на тему:

**«Розробка концепції паротурбінної когенераційної установки потужністю 2 МВт
для енергозабезпечення виробництва біодизеля з утилізацією виробничих відходів»**

Виконав: студент 3 курсу
групи НВДЕ 2023-1у
спеціальності 141 – *Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка*
освітня програма – *Нетрадиційні та
відновлювальні джерела енергії*



(підпис)

Шабатура К.А.

Керівник: _____



(підпис)

Форкун Я. Б.

Рецензент: _____



(підпис)

Костенко І. О.

**Харків
ХНУМГ ім. О. М. Бекетова
2026**

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА

ННІ Енергетичної, інформаційної та транспортної інфраструктури

Кафедра Альтернативної електроенергетики та електротехніки

Освітньо-кваліфікаційний рівень Бакалавр

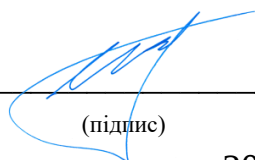
Спеціальність 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Освітня програма Нетрадиційні та відновлювальні джерела енергії

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Завідувач кафедри АЕЕ

канд. техн. наук, доц. **Єгоров О. Б.**


(підпис)

«___» _____ 2026 року.

ЗАВДАННЯ

НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЄКТ СТУДЕНТУ

Шабатурі Кирилу Андрійовичу

1. Тема проєкту: Розробка концепції паротурбінної когенераційної установки потужністю 2 МВт для енергозабезпечення виробництва біодизеля з утилізацією виробничих відходів»

керівник проєкту Форкун Яна Борисівна к.т.н., доц.

затверджена наказом вищого навчального закладу від «22» травня 2026р. № 440-03

2. Строк подання студентом дипломної роботи 15.06.2026 року

3. Вихідні дані до дипломного проєкту Енергетичні потреби заводу з переробки 30 тис. тонн ріпаку на рік у біодизель в електричній енергії та парі, визначені на основі технологічних потреб кожного етапу виробництва (приймання, зберігання, подрібнення, віджим, термічна обробка, трансестерифікація та очищення продукту), а також з урахуванням виходу олії, обсягів утворення шроту та гліцерину, їх теплотворної здатності та режиму роботи підприємства.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Розробка теплової схеми роботи автономної енергетичної установки, що працює на побічних продуктах виробництва біодизеля (шрот та гліцерин), для забезпечення усіх потреб технологічного процесу виробництва

біодизеля. Оцінка економічної ефективності проекту при використанні турбін високого та низького тиску. Охорона праці.

5. Графічний матеріал: Актуальність та передумови розвитку біодизельної енергетики. Мета і задачі дипломного проекту. Технологічна схема виробництва біодизеля з ріпаку. Теплова схема автономної енергетичної установки. Матеріальний баланс виробництва та енергетичні показники установки. Економічні показники проекту. Охорона праці.

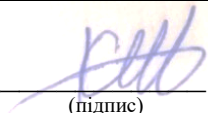
6. Консультанти розділів дипломної роботи

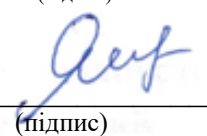
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розрахункова частина	Форкун Я. Б., доцент каф. АЕЕ	25.05.2026 	05.06.2026 
Охорона праці	Серіков Я. О., доцент каф. ОП та БЖД	07.06.2026	10.06.2026

7. Дата видачі завдання 25 травня 2026 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапу дипломного проекту	Строк виконання етапу дипломного проекту	Примітка
1	Аналіз технології виробництва біодизеля та вихідних даних	25.05.2026-30.05.2026	
2	Розрахунок та обґрунтування енергетичної установки (тепловий і енергетичний баланс, вибір обладнання, економіка)	31.05.2026–05.06.2026	
3	Розробка заходів з охорони праці	07.06.2026–10.06.2026	
4	Оформлення пояснювальної записки, підготовка та подання дипломного проекту до захисту	11.06.2026 –14.06.2026	

Студент  Шабатура К. А.
(підпис)

Керівник дипломного проекту  Форкун Я. Б.
(підпис)

РЕФЕРАТ

Дипломний проєкт містить 72 сторінки пояснювальної записки, 15 таблиць, 10 рисунків, перелік посилань з 23 джерел, додатки.

Мета дипломного проєкту – розробити концепцію енергетичної установки для автономного забезпечення електричною та тепловою енергією заводу з переробки 30 тисяч тонн ріпаку на рік у біодизель підприємства «Агроексперт Трейд», розташованого в м. Городище Черкаської області. Установка має бути повністю автономною та використовувати як паливо відновлювані джерела енергії (далі – ВДЕ) у вигляді відходів виробництва (шрот, гліцерин).

Актуальність розробки даної установки для промислового виробництва обумовлена необхідністю забезпечення енергонезалежності від централізованих джерел електропостачання, відсутністю стабільного теплопостачання, необхідного для технології виробництва біодизеля, а також ризиками перебоїв в енергоподачі, що можуть спричинити аварійні ситуації та порушення технологічного процесу.

У проєкті досліджено можливість використання автономної енергетичної установки, яка використовує побічні продукти виробництва біодизеля (шрот та гліцерин) для отримання електроенергії та пари, необхідних для забезпечення всіх етапів технологічного процесу отримання біодизелю. Показано, що надлишок електроенергії може подаватися в подальшому в загальну електромережу. Також відмічено, що додаткове тепло, отримане при теплообміні масла з водою в пластинчастому теплообміннику (вода температурою 30–40 °C), доцільно використовувати для підготовки технологічної води, або для господарсько-побутових потреб, що підвищує загальну енергоефективність підприємства.

Виконано підбір необхідного теплоенергетичного та теплообмінного обладнання з визначенням основних масогабаритних характеристик для виробництва біодизеля з 30 тисяч тонн ріпаку на рік та обладнання автономної енергетичної установки.

При проведенні інженерних розрахунків використовувалося сучасне комп'ютерне програмне забезпечення. Проєкт містить аналіз умов праці на підприємстві з виробництва біодизеля, небезпечних і шкідливих факторів, можливих ризиків для робітників, а також розглянуті надзвичайні ситуації (сценарії та алгоритм дій).

БИОМАСА. РІПАК. БИОДИЗЕЛЬ. ПАРОВА ЕНЕРГЕТИЧНА УСТАНОВКА. ТУРБИНА З ПРОМІЖНИМ ВІДБОРОМ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ПАРИ. ЖМИХ. ШРОТ. АВТОНОМНЕ ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ. ГЛІЦЕРИН. ПЛАСТИНЧАСТІ ТЕПЛООБМІННІ АПАРАТИ. ТРАНСЕСТЕРИФІКАЦІЯ. ТЕПЛОВИЙ БАЛАНС.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ.....	6
ВСТУП.....	7
1 ВИБІР СИРОВИННОЇ БАЗИ. ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ МЕТОДУ ОТРИМАННЯ РОСЛИННОГО МАСЛА	11
2 ОСНОВНІ ЕТАПИ ПЕРЕРОБКИ РІПАКУ В МАСЛО ТА ПІДБІР ОБЛАДНАННЯ.....	19
2.1 Вихідні дані для розрахунку	19
2.2 Підготовка, пресування та екстракція масла	19
3 ПЕРЕРОБКА МАСЛЯНОЇ СИРОВИНИ В БІОДИЗЕЛЬ.....	31
4 РОЗРАХУНОК ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ПОТУЖНОСТІ ДЛЯ ПЕРЕРОБКИ РІПАКА В БІОДИЗЕЛЬ	41
5 РОЗРАХУНОК ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ.....	48
6 ОХОРОНА ПРАЦІ.....	53
6.1 Загальні положення.....	53
6.2. Характеристика умов праці на підприємстві. Аналіз небезпечних і шкідливих факторів.....	53
6.3 Організаційні заходи та відповідальність персоналу.....	57
6.4 Вимоги до обладнання і технологічного процесу.....	59
6.5 Засоби індивідуального та колективного захисту.....	59
6.6 Пожежна безпека та електробезпека.....	60
6.7 Надзвичайні ситуації: сценарії та алгоритм дій.....	62
ВИСНОВКИ	65
СПИСОК ДЖЕРЕЛ.....	67
ДОДАТКИ.....	69

ПЕРЕЛІК СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

- ВДЕ** – відновлювані джерела енергії
- НАН** – Національна академія наук України
- WBA** – Всесвітня біоенергетична асоціація (World Bioenergy Association)
- НКРЕКП** – Національна комісія, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг.
- ЗІЗ** – засоби індивідуального захисту органів дихання
- СУОП** – система управління охороною праці
- ПЗВ** – пристрій захисного вимкнення
- ПЛАС** – плани локалізації та ліквідації аварійних ситуацій
- HEAR** – High Erucic Acid Rapeseed
- CANOLA** – харчовий тип ріпаку
- CFPP** – Cold Filter Plugging Point, температура закупорки холодного фільтра (гранична температура фільтрації)
- CN** – цетанове число (Cetane Number)
- FAME** – вміст метилових ефірів жирних кислот
- V – необхідний об'єм силосів
- M_p – маса ріпаку в одному силосі
- $M_{oil, total}$ – теоретичний вміст масла
- M_{gly} – річна кількість гліцерину, як побічний продукт під час виробництва біодизеля
- α_{HEAR} – вміст масла в HEAR
- α_{CANOLA} – вміст масла в Canola
- G_{Σ} – необхідна кількість пари для технологічних потреб
- D_{tot} – дохід від виробництва та реалізації продукції
- Z_{tot} – загальні річні витрати на виробництво
- P – загальний річний прибуток
- T_{ok} – термін окупності проєкту
- I – необхідні інвестиції для реалізації проєкту
- Π – чистий прибуток
- $N_{еп\Sigma}$ – повна необхідна теплова та електрична потужності
- P – валовий прибуток

ВСТУП

Сучасні тенденції розвитку агропромислового комплексу України зумовлюють необхідність переходу переробних і сільськогосподарських підприємств до енергетичного самозабезпечення та скорочення використання викопних видів палива як основного джерела енергії. За даними Національної комісії, яка здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг України (далі – НКРЕКП), за останні п'ять років тарифи на електроенергію для промислових споживачів збільшилися приблизно на 35%, а ціни на дизельне паливо – більш ніж на 50%. Таке подорожчання енергетичних ресурсів суттєво впливає на собівартість сільськогосподарської продукції та знижує конкурентоспроможність аграрного сектора [1].

За результатами аналізу, проведеного Інститутом відновлюваної енергетики Національної академії наук України (далі – ІВЕ НАН України), сукупний потенціал біомаси, придатної для переробки у рідкі біопалива, перевищує 4,2 млн тонн нафтового еквівалента на рік, що створює значні можливості для розширення виробництва біодизеля [2]. З 1 травня 2025 року в Україні набув чинності закон, який зобов'язує додавати щонайменше 5 % рідкого біопалива майже в кожен літр автомобільного бензину, що реалізується на внутрішньому ринку. Така зміна не тільки вплинула на ринок палива, а й має революційний потенціал для агросектору, який, власне, виробляє сировину для біопалива.

За даними громадської спілки «Біоенергетичної асоціація України» (UABIO), технологічно досяжний потенціал виробництва біодизеля з масла та відходів агропромислового виробництва становить до 600 тис. тонн на рік. Це може забезпечити заміщення близько 15 % імпортованого дизельного палива, що значно підвищить рівень енергетичної незалежності країни та стійкість сільського господарства [3]. При цьому основною культурою для виробництва є ріпак, який є однією з найцінніших і найперспективніших культур у загальносвітовому виробництві рослинних масел. Це культура з високою маслянистістю (до 45 %). Ріпаку відводять важливу роль як джерелу харчової олії, а також як сировини для отримання технічних продуктів, а саме – виробництва метилових та етилових ефірів ріпакового масла (або біодизеля).

Крім того, розвиток галузі біодизелю сприяє формуванню замкнутого

виробничого циклу в аграрному секторі: відходи переробки масляних культур можуть використовуватися для одержання палива, а побічні продукти (гліцерин, шрот) – у кормовиробництві та хімічній промисловості. Це робить біодизель не тільки екологічно чистим, а й економічно вигідним джерелом енергії, що забезпечує раціональне використання місцевих ресурсів.

Підприємство «Агроексперт Трейд» планує завод, який перероблятиме 30 тис. тонн ріпаку на рік. Вихід ріпакового масла становитиме близько 15 тис. тонн. Із цієї кількості буде отримано приблизно 15,6 тис. тонн біодизеля та 400 т гліцерину. Побічним продуктом переробки є близько 15 тис. тонн ріпакового жмиху. Наведені значення є орієнтовними; уточнений розрахунок матеріального балансу та виходів продукції наведено в розділі 3. Частина шроту буде використана як паливо для отримання електричної та теплової енергії, а частина піде на корм тварин.. Завод працюватиме цілий рік, зупиняючись приблизно на два тижні для технічного обслуговування. Для обслуговування виробництва передбачається мінімальна кількість обслуговуючого персоналу (орієнтовно 3-5 операторів), які працюватимуть позмінно, адже всі процеси будуть автоматизовані.



Рисунок 1 – Завод з переробки ріпаку на біодизель

Світовий досвід підтверджує високу ефективність та стратегічну значущість розвитку біодизельних технологій. Згідно з даними Всесвітньої біоенергетичної асоціації (World Bioenergy Association, далі – WBA), частка біодизеля у загальному обсязі відновлюваних джерел енергії у транспортному секторі постійно зростає, а сукупне виробництво перевищує 45 млрд літрів на рік [4]. Дослідження Міжнародного агентства з відновлюваних джерел енергії (International Renewable Energy Agency, IRENA) показують, що широке

впровадження біодизеля та синтетичних рідких біопалив дозволяє знизити вуглецевий слід транспортної галузі на 65–80% порівняно з викопними видами палива, а також зменшити залежність від імпорту нафти [5].

Крім того, практика провідних країн, а саме Індонезії, Бразилії, США та країн Європейського Союзу демонструє, що державна підтримка та обов'язкові мандати на використання біокомпонентів у дизельних сумішах (B10–B50, тобто B10 – це 10% біодизеля та 90% звичайного дизеля; B50 – 50% біодизеля та 50% звичайного дизеля) забезпечують сталий розвиток галузі та стимулюють інвестиції у переробку вторинних сировинних потоків (від жирів до відпрацьованих олій).

Таблиця 1 – Виробництво біодизеля по регіонах (2023-2025 рр.)

Країна / регіон	Обсяги (прибл., л) / період	Мандат / політика змішування	Ключові виробники / компанії
Індонезія	≈14 млрд л (2023, пальмовий біодизель)	B40 обов'язковий (2024–2025); планується B50 до 2026 р.	Pertamina, Wilmar, Musim Mas, AKR Corporindo
Євросоюз	≈13 млрд л (2023, ріпак, UCO та ін.)	RED III – цілі по ВДЕ, квоти варіюють за країнами	Neste, Verbio, Preem, Eni
Бразилія	≈8 млрд л (2023– 2024)	Обов'язкова частка 12–13% (2024 р.), програма PNPB	Bunge Brasil, GranBio, регіональні переробники сої
США	≈18,9 млрд л (2024)	RFS, податкові кредити, корпоративні ініціативи	Chevron (REG), ADM, Cargill
Малайзія	≈1,2 млрд л (2023–2024)	Програми змішу- вання B10–B20, експортний попит	Sime Darby, KLK, FGV

У Німеччині та Австрії поширена практика використання когенераційних енергетичних установок на заводах з виробництва біодизеля. Компанія ADM Hamburg (потужність – 550 тис. тонн біодизеля на рік) застосовує парові котли, що працюють на ріпаковому шроті, для виробництва технологічної пари та часткового енергозабезпечення підприємства. Завод Bunge Mannheim інтегрував ТЕЦ на біомасі потужністю 12 МВт_е, що працює на жмиху та лушпинні насіння і повністю забезпечує енергетичну автономність виробництва.

Подібні підходи впроваджуються й в інших країнах Європи. Зокрема, у Нідерландах компанія Neste на заводі в м. Роттердамі реалізувала проєкт зі спалювання сирого гліцерину в суміші з газом у співвідношенні 30 до 70 %. Це дозволило скоротити споживання викопного палива на 25 % та знизити викиди CO₂ на понад 15 тис. тонн на рік.

Застосування таких когенераційних установок забезпечує ефективне використання побічних продуктів переробки масляних культур (жмих, гліцерин, біогаз) для виробництва теплової та електричної енергії, сприяючи енергетичній незалежності підприємств і формуючи стійкий замкнутий цикл виробництва. Таким чином, впровадження когенераційних установок у поєднанні з біодизельними технологіями є перспективним напрямом енергозабезпечення переробних підприємств, що підвищує їхню конкурентоспроможність та сприяє досягненню цілей сталого розвитку.

Розвиток когенераційних енергетичних комплексів на базі біодизельного виробництва має високу інвестиційну привабливість завдяки поєднанню паливного та енергетичного циклів. Використання жмиху та гліцерину як палива дозволяє знизити енерговитрати до 40 % порівняно з використанням традиційного викопного палива, а продаж надлишкової електричної та теплової енергії може забезпечувати додатковий дохід. Для установок потужністю 1–2 МВт термін окупності може становити 2–3 роки, особливо за чинних тарифів на електро- та теплоенергію для промисловості.

Державні стимули розвитку ВДЕ, європейські програми фінансування (Horizon Europe, LIFE Clean Energy Transition) та можливість сертифікації продукції за стандартами ISCC EU роблять когенераційні системи на базі біодизельних підприємств одним із найбільш перспективних та рентабельних напрямів інвестицій в агроенергетиці України.

1 ВИБІР СИРОВИННОЇ БАЗИ. ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ МЕТОДУ ОТРИМАННЯ РОСЛИННОГО МАСЛА

Для виробництва біодизеля переважно використовують суміш технічних та харчових сортів ріпаку. Технічні сорти ріпаку – це сорти й гібриди, які спеціально виводяться не для харчової переробки (харчових олій), а для технічного застосування: виробництва біодизеля, отримання технічних олив і мастил як сировину для лакофарбової, хімічної та косметичної промисловості, виробництва біополімерів і поверхнево-активних речовин. HEAR сортові лінії були створені місцевими селекційними інститутами в Україні та Польщі саме для одержання технічних масел і біодизеля. High Erucic Acid Rapeseed (HEAR) – це сорти ріпаку з підвищеним вмістом ерукової кислоти, понад 45–50 %, які не використовують у харчуванні, але вони дуже цінні для технічних цілей, зокрема для виробництва:

- біодизельного палива;
- технічних мастил та олив;
- для хімічної та лакофарбової промисловості.

В Україні дослідження та селекція ведуться, зокрема, в Інституті олійних культур НААН (м. Запоріжжя) та в Інституті рослинництва ім. В. Я. Юр'єва Національної академії аграрних наук України (Харків).

Для всіх регіонів Європи (північної, центральної та південної) оптимальною вважається суміш, що містить близько 30 % HEAR (ріпак з високим вмістом ерукової кислоти) та 70 % CANOLA (харчовий тип ріпаку). Така комбінація застосовується для виробництва біодизеля з покращеними робочими характеристиками, зокрема підвищеним цетановим числом (показник здатності палива швидко самозайматися в дизельному двигуні, чим вище цетанове число, тим легше запускається двигун, менше шумів і диму, краща стабільність згоряння), а також оптимальними в'язкісними та низько-температурними властивостями – це температура фільтрації (температура закупорки холодного фільтра) та температура застигання, що є критичним фактором для надійної експлуатації палива в різних кліматичних умовах.

На рисунку 1.1 зображена залежність цетанового числа від частки HEAR у суміші.

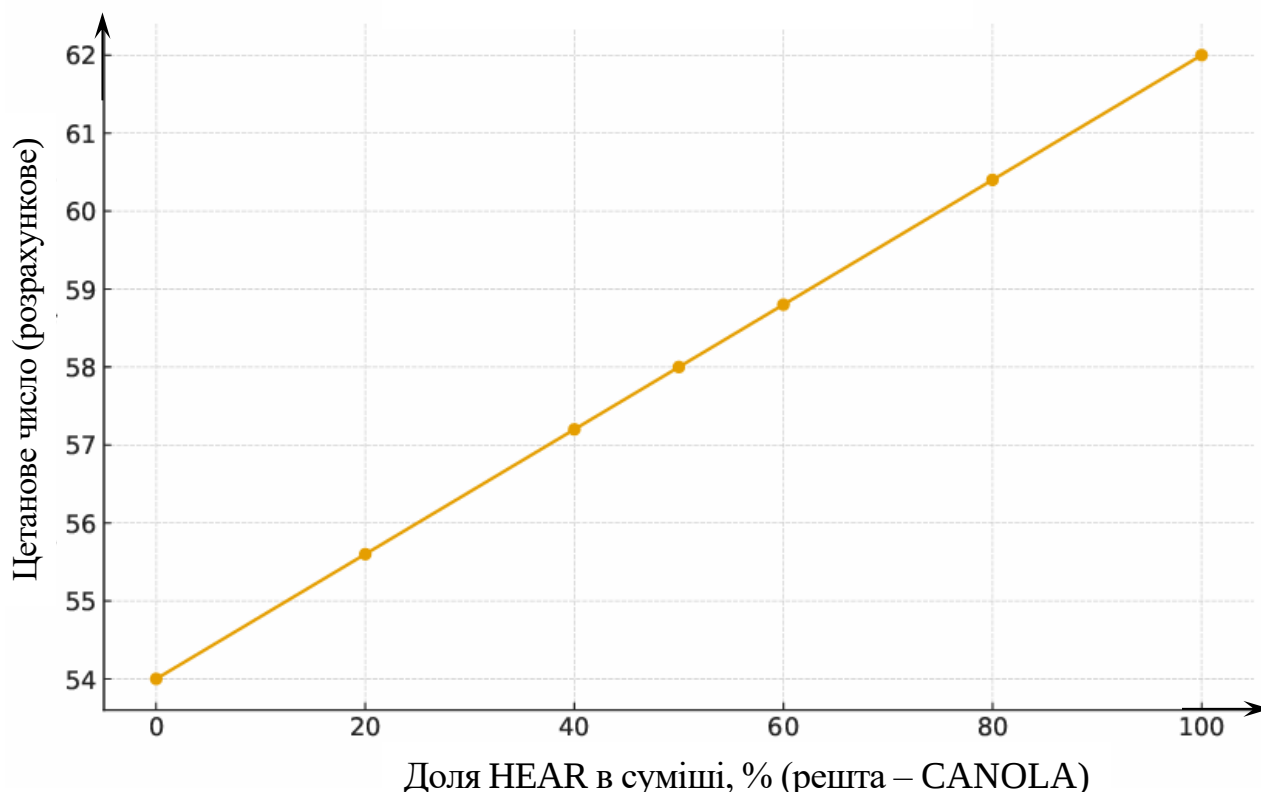


Рисунок 1.1 – Залежність цетанового числа від частки HEAR у суміші

CFPP (Cold Filter Plugging Point) – це температура, за якої паливо перестає проходити крізь паливний фільтр, що може призвести до його засмічення та зупинки паливної системи. Показник використовується як практичний критерій можливості запуску та роботи дизельного двигуна за низьких температур.

Точка застигання (Pour Point) – це температура, за якої паливо втрачає плинність і перестає текти. Зазвичай ця температура є нижчою, ніж CFPP, однак співвідношення значень може змінюватися залежно від складу суміші.

Обидва показники визначають придатність біодизеля до експлуатації в умовах низьких температур та враховуються під час підбору компонентів паливної суміші.

На рисунку 1.2 зображені температурні показники експлуатаційної придатності біодизельної суміші залежно від частки HEAR (CFPP і точка застигання).

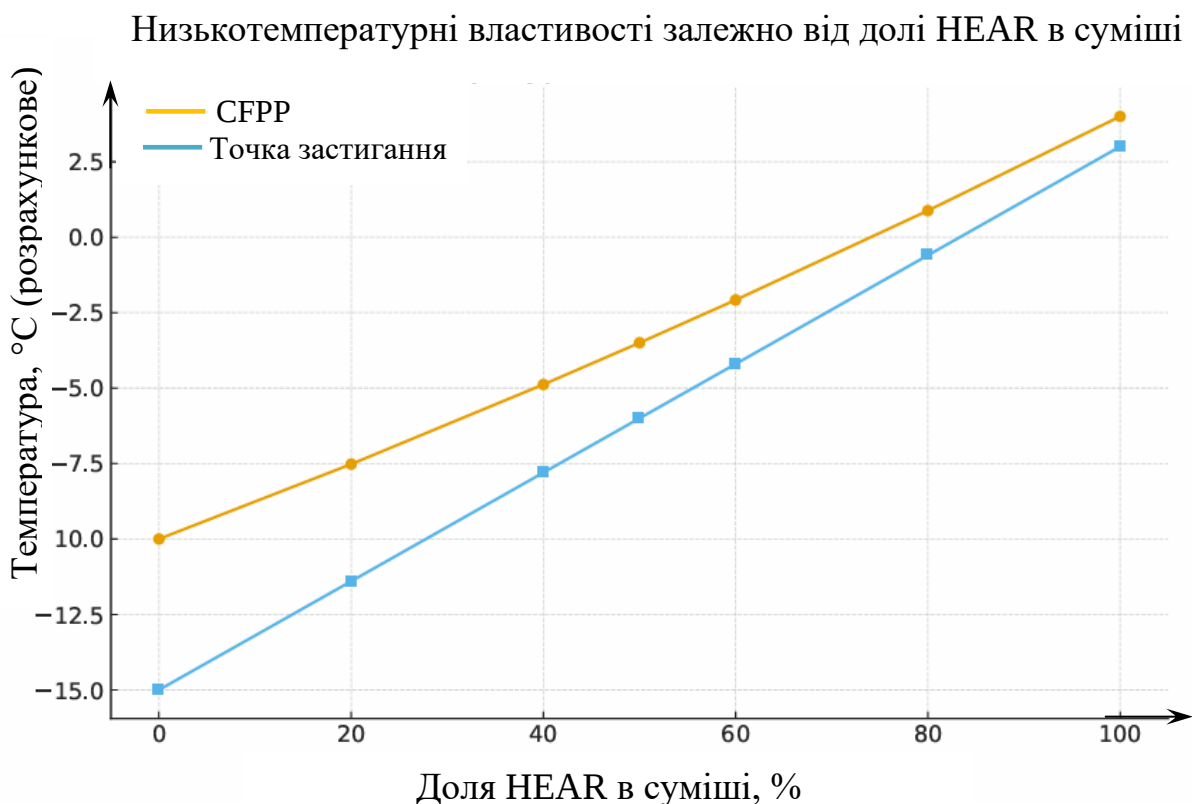


Рисунок 1.2 – Залежність температур CFPP та точки застигання біодизельної суміші від частки HEAR

Розрахунок в'язкості суміші визначається виразом:

$$\mu_{\text{mix}} = \exp (x \cdot \ln(\mu_{\text{HEAR}}) + (1-x) \cdot \ln(\mu_{\text{Canola}})),$$

де μ_{mix} – в'язкість суміші;

μ_{HEAR} – в'язкість HEAR, дорівнює 6,0 мм²/с при температурі 40 °С;

μ_{Canola} – в'язкість Canola, дорівнює 4,3 мм²/с при температурі 40 °С.

Таблиця 1.1 – Розрахункові властивості суміші (частка HEAR, решта – Canola)

Частка HEAR	Цетанове число	В'язкість при T 40 °С, мм ² /с	CFPP, °С	Точка застигання, °С
1	2	3	4	5
0 %	54,0	4,30	-10,0	-15,0
20 %	55,6	4,60	-7,5	-11,4
30 %	56,4	4,75	-6,2	-9,6

Продовження таблиці 1.1

1	2	3	4	5
40 %	57,2	4,91	-4,9	-7,8
50 %	58,0	5,08	-3,5	-6,0
60 %	58,8	5,25	-2,1	-4,2
80 %	60,4	5,61	0,9	-0,6
100 %	62,0	6,00	4,0	+3,0

Експлуатаційні властивості біодизеля визначаються комплексом паливно-фізико-хімічних показників, що регламентуються міжнародними стандартами (EN 14214 – у ЄС, ASTM D6751 – у США).

Основні показники якості біодизеля:

1. Цетанове число (CN – Cetane Number) відображає здатність палива до самозаймання у дизельному двигуні, чим вище цетанове число, тим плавніше і ефективніше проходить згоряння палива, норма ≥ 51 (за стандартом EN 14214).

2. В'язкість (при температурі 40 °C) впливає на процес розпилення палива форсунками. При занадто високій в'язкості – погане розпилення, утворення нагару. Якщо в'язкість занадто низька відбувається підвищений знос паливної апаратури. Норма складає 3,5–5,0 мм²/с.

3. Температури помутніння, застигання та гранична температура фільтрування (CFPP). Визначають придатність до використання в умовах низьких температур. Залежать від складу жирнокислотного профілю (наприклад, біодизель з високим вмістом насичених кислот має гіршу морозостійкість).

4. Кислотне число, яке показує вміст вільних жирних кислот і є важливим для оцінки стабільності палива при зберіганні та ризику корозії елементів двигуна.

5. Вміст метилових ефірів жирних кислот (FAME) відображає повноту реакції трансестерифікації. Трансестерифікація – це хімічний процес, під час якого жирні кислоти в складі рослинного або тваринного масла (тригліцериди)

реагують зі спиртом (найчастіше метанолом або етанолом) за наявності каталізатора. Мета процесу – перетворити масло на метилові (або етилові) ефіри жирних кислот (FAME / FAEE), які становлять основу біодизельного палива, та виділити гліцерин як побічний продукт. Норма складає не менше 96,5 %.

6. Окиснювальна стабільність характеризує стійкість біодизеля до окиснення під час зберігання. Її визначають за методом Rancimat. Це стандартизований лабораторний спосіб оцінки окиснювальної стабільності біодизеля, його полягає в тому, що паливо нагрівають (зазвичай до 110 °C) і пропускають через нього потік повітря. У процесі окиснення утворюються леткі органічні кислоти, які переносяться в дистильовану воду. При накопиченні цих продуктів фіксується різка зміна електропровідності води. Час до цієї зміни називають індукційним періодом, саме він виражається в годинах і показує, наскільки довго біодизель здатний протистояти окисненню. Норма окиснювальної стабільності складає не менше 8 годин (EN 14214).

7. Густина, вимірюється при температурі 15 °C з використанням ареометра або пікнометра, оскільки показник залежить від температури; впливає на точність дозування палива системою упорскування. Норма складає 860–900 кг/м³.

У дипломному проєкті розглядаються сучасні технологічні підходи до вилучення рослинного масла з насіння ріпаку. У промисловій практиці існує кілька методів, що відрізняються ефективністю, складністю реалізації та рівнем вилучення масла. Для повноти технологічного аналізу доцільно розглянути основні підходи, визначити їхні переваги та обмеження, а також обґрунтувати вибір технологічної схеми для даного проєкту.

Існують три основні підходи до вилучення рослинного масла з насіння у промисловості:

- метод пресування: підготовка → пресування → масло + жмих (із підвищеним вмістом залишкового масла);
- екстракційний метод: підготовка → екстракція → масло + шрот (із мінімальним вмістом залишкового масла);

– комбінований метод (пресування + екстракція): підготовка → пресування → екстракція → масло.

Комбінований підхід є найбільш поширеним у великотоннажних виробництвах, оскільки дозволяє поєднати простоту механічного вилучення з високою ефективністю екстракції та забезпечити максимальний вихід масла.

Екстракційний метод

Екстракція є сучасним і найефективнішим способом вилучення рослинного масла з масляних культур. Технологічний процес заснований на розчиненні масла в органічному розчиннику (гексані). Попередньо підготовлене насіння (очищене, подрібнене й кондиціоноване) подають до екстрактора, де відбувається контакт подрібненої сировини з гарячим розчинником. Масло переходить у розчин і утворюється міцела, тобто рідка суміш розчинника та розчиненого рослинного масла. Наступним етапом є регенерація розчинника. Міцелу нагрівають у випарниках та дистиляційних апаратах, де гексан випаровується, конденсується й повертається у замкнений цикл екстракції. На виході отримують екстракційне масло з дуже низьким вмістом домішок. Побічний продукт (шрот) містить лише 1–2 % залишкового масла, що робить його поживним та одночасно зручним у подальшому гранулюванні чи використанні у тваринництві.

Основні переваги екстракції:

- дуже високий вихід масла (до 98 % від потенційного);
- мінімальні втрати масла у шроті;
- можливість повної автоматизації та регенерації розчинника;
- економічна доцільність на великих виробництвах.

До обмежень належать:

- необхідність використання органічних розчинників,
- підвищені вимоги до вибухопожежної безпеки, складніше обладнання та більші капітальні витрати.

Пресування

Пресування – це традиційний механічний спосіб вилучення масла з насіння, який ґрунтується на прикладанні високого тиску. Насіння спочатку очищають та подрібнюють, а потім подають у шнековий прес, де під дією тиску та тертя з них виділяється масло. Процес зазвичай проходить у два етапи:

- холодне пресування;
- гаряче пресування.

Холодне пресування дає масло високої якості, але з невисоким виходом, що характерно для харчових олій преміум класу.

Гаряче пресування застосовують після теплової підготовки насіння (пропарювання, обсмажування), що збільшує вихід масла, проте продукт потребує подальшої рафінації.

Ефективність пресування складає близько 85–92 %, тобто значна частина масла (8–15 %) залишається у жмиху. Отриманий жмих містить більше залишкового масла, ніж шрот після екстракції, тому частіше використовується як кормова добавка з високою енергетичною цінністю.

Технологія пресування простіша, енергетично менш затратна та дешевша в реалізації, однак її ключовий недолік – нижчий відсоток вилучення масла. У промислових умовах пресування найчастіше застосовується як попередній етап перед екстракцією.

Комбінований підхід

Поєднання пресування та екстракції дозволяє реалізувати переваги обох методів. На першому етапі за допомогою пресування вилучається основна частина масла, що зменшує навантаження на екстракційне обладнання. На другому етапі залишкове масло, яке міститься у жмиху, вилучається за допомогою розчинника. Такий підхід дозволяє підвищити загальний ступінь вилучення масла до 97–98 %, зменшити втрати сировини та забезпечити стабільні технологічні показники процесу. Крім того, комбінована схема є економічно доцільною для великотоннажних виробництв, оскільки оптимізує

витрати енергії та розчинника.

Порівняльний висновок

Для потреб великотоннажного виробництва біодизеля найбільш ефективним та економічно обґрунтованим є комбінований метод, який поєднує попереднє пресування та подальшу екстракцію і забезпечує:

- максимальний вихід масла (до 98 %);
- мінімальні втрати у шроті;
- високу стабільність якості сировини для трансестерифікації;
- раціональне використання обладнання та енергетичних ресурсів.

Таким чином, у дипломному проєкті обираємо комбіновану технологічну схему вилучення рослинного масла, що повністю узгоджується з подальшими розрахунками та прийнятими технічними рішеннями.

2 ОСНОВНІ ЕТАПИ ПЕРЕРОБКИ РІПАКУ В МАСЛО ТА ПІДБІР ОБЛАДНАННЯ

2.1 Вихідні дані для розрахунку

Вихідні дані для розрахунку наступні:

- річний обсяг переробки ріпаку сумарно Canola та HEAR складає 30 000 т/рік;
- режим роботи – цілодобово (24/ 7);
- планова зупинка складає 2 дні на рік (363 робочих дні);
- добова потреба складає $30\,000/363 \approx 82,6$ т/добу;
- годинна продуктивність складає приблизно 3,45 т/год (при безперервній роботі);
- сировинна суміш має 30 % HEAR (ріпак із високим вмістом ерукової кислоти) та 70 % Canola (низькоеруковий ріпак);
- сировину зберігають окремо, що забезпечує контроль якості та гнучкість змішування;
- проєктний запас (втрати при зберіганні, логістика, усушка, порожнини силосів) складає 10 % до корисного об'єму;
- насипна густина ріпаку $\rho = 0,63\text{--}0,67$ т/м³ (приймаємо 0,65 т/м³).

2.2 Підготовка, пресування та екстракція масла

Підготовка насіння, пресування та подальша екстракція рослинного масла (процес, вилучення масла з сировинних матеріалів або насіння за допомогою розчинника) є початковими й критичними стадіями виробничого циклу з високими вимогами до якості сировини та надійності обладнання. Етап включає прийом і первинне очищення насіння, сушіння, кондиціонування, подрібнення (флейкування), екструзію та пресування (шнекові преси), а також первинну очистку віджатою масла (декантер, фільтрація) і підготовку жмиху для подальшого використання (наприклад, як паливо).

Прийом, очищення та зберігання насіння здійснюється в наступній послідовності:

1. Прийом насіння здійснюється автотранспортом у приймальну яму.
2. Включається прийомна норія (для партії Canola або HEAR залежно від надходження).
3. Матеріал подається в барабанний сепаратор для видалення грубих домішок – рисунок 2.1.
4. Після сепарації насіння надходить в аспіраційну систему (вентилятори + циклон/фільтр) для видалення легких фракцій і пилу.
5. Насіння направляється на сушіння та кондиціонування перед пресуванням або екстракцією. Мета сушіння – довести вологість насіння до 7–10 %, що оптимально для віджиму і екстракції. Кондиціонування (парова обробка) підвищує пластичність частинок, знижує в'язкість масла і покращує вихід при пресуванні. Типові параметри кондиціонування – нагрівання паром до 80–100 °С.



Рисунок 2.1 – Барабанний сепаратор

Розглянемо послідовність роботи обладнання на етапі віджиму.

Спочатку проводиться підготовка насіння, що включає:

1. Флейкер (плющик) подрібнює та розплющує насіння, формує хлоп'я для поліпшення доступу розчинника або механічного віджиму.
2. Кондиціонування (паровий обігрів), тобто підготовлені пластівці підігріваються до 80–100 °С парою для підвищення пластичності та ефективності віджиму.

3. Екструдер (рис. 2.2) механічно руйнує клітинну структуру жмиху, нагріває масу і створює значний тиск (типовими значеннями є 3–5 МПа, 120–140 °С). При виході через матрицю відбувається різке розширення («спучування»), що сприяє кращому віджиму масла і підвищенню загального виходу. Екструдер нагріває та додатково пресує жмих перед повторним віджиманням, що підвищує вихід масла (прикладом є екструдери типу Bronto), його використовують як підготовчий елемент перед пресом, особливо для технічних сортів ріпаку (HEAR).

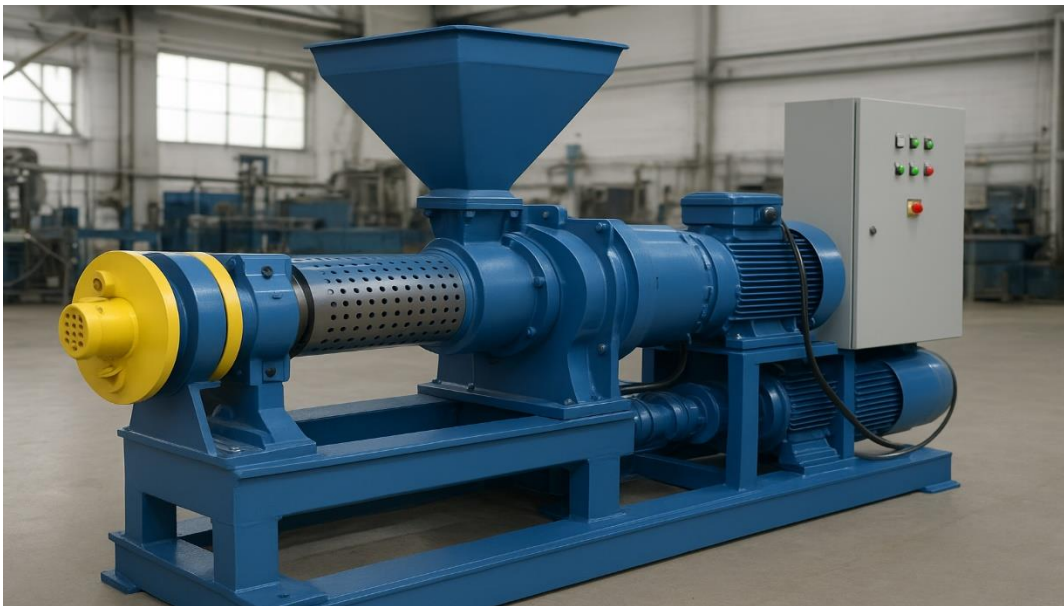


Рисунок 2.2 – Екструдер

Надалі підготовлена маса потрапляє на віджимання в шнекові преси. Для кожної сировинної лінії передбачено окремий прес. Шнекові преси застосовують в режимах холодного або гарячого віджиму. Для основного потоку (Canola) та технічного ріпаку (HEAR) в проєкті рекомендовано гарячий віджим (кондиціонування плюс прес), оскільки це забезпечує вищий вихід масла при прийнятній якості. Після пресування залишкова масова частка масла у жмиху може складати приблизно 9 %.

При річній переробці 30000 т добове навантаження становить 82,6 т/добу, а поділ за сортами наступний – 30 % HEAR (24,78 т/добу), 70 % Canola (57,82 т/добу).

Для забезпечення безперебійної роботи необхідно наступне обладнання з урахуванням запасу потужності (попередньо підібране для даного проєкту):

– прес Ölwerk FL 200 (Німеччина) для Canola, продуктивність якого складає приблизно 60–70 т/добу (для забезпечення продуктивності 57,8 т/добу), потужність приводу приблизно 50 кВт;

– прес GOYUM 600/2400 (Індія) для HEAR, продуктивність якого складає приблизно 25–30 т/добу (щоб забезпечити 24,8 т/добу), потужність приводу приблизно 25 кВт.

Пресування у даній технологічній схемі розглядається як попередній етап перед екстракцією, що дозволяє зменшити навантаження на екстракційне обладнання та підвищити загальний вихід масла.

Енергетичні ресурси та споживання на етапі підготовки і пресування надані в таблиці 2.1. Наведені значення є орієнтовними і призначені для базової оцінки потреб в електричній та тепловій енергії, а також воді.

Таблиця 2.1 – Енергоресурси, необхідні на етапі віджиму

Ресурс	Значення	Одиниці	Пояснення
1	2	3	4
Електрична встановлена потужність (разом)	780,5	кВт	Враховано додаткові преси/флейкери/декантери (без повторного рахунку норій)
Електрична потреба при повному навантаженні	18732	кВт·год /добу	24/7 повне навантаження
Річне споживання електроенергії	6837180	кВт·год/рік	Орієнтовно
Пар (типове споживання)	103,2	кг/год	~30 кг пари на тонну
Пар (добове)	2478	кг/добу	Сумарно для кондиціонування обох потоків

Продовження таблиці 2.1

1	2	3	4
Вода – make-up котла (20% повернення конденсату)	0,5	м³/добу	Тільки make-up; передбачається повернення 80 % конденсату
Вода санітарна та мийка	3	м³/доба	Орієнтир
Загальна вода (підсумок)	3,5	м³/доба	make-up та сервіс

Специфікація обладнання для фільтрації і охолодження масла надані в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Специфікація обладнання та споживана потужність для фільтрації та охолодження масла (Canola та HEAR)

Обладнання	Модель / тип	Призначення	Потужність, кВт	Примітки
Фільтр-прес пластинчастий	10–15 м², 6 бар	Фільтрація сирового масла	5	Alfa Laval / Dalex
Насос для подачі масла	Центробіжний, нержавіючий	Подача через фільтр-прес	3	з VFD приводом
Пластинчастий теплообмінник	5 м², AISI 316	Охолодження масла	–	Охолодження водою
Градирня (водяна)	25–30 кВт холоду	Охолодження масла через теплообмінник	12	Альтернатива – чиллер
Насос циркуляції води	2–3 м³/год	Циркуляція охолоджувальної води	2	Підключення до чиллера / градирні
Сумарне енергоспоживання $\approx$ 22 кВт				

Після пресування жмих відводиться шнеками в бункери та може використовуватися як паливо для котельної установки.

Після пресування з шнекового пресу отримують гаряче ($\approx 60\text{--}70\text{ }^{\circ}\text{C}$) сирове масло. У технологічному контексті «сирове» означає нерафіноване, необроблене; у біодизельній технології або при виробництві харчових олій – це масло, яке щойно віджали з насіння і воно ще не пройшло жодної термічної або хімічної обробки. Далі масло надходить у проміжний маслосбірник, звідки насос подає його на первинне очищення декантером та фільтром типу Alfa Laval для відділення механічних домішок і частини фосфоліпідів (гумових домішок). Декантер (центрифуга) здійснює розділення за густиною і є більш ефективним для видалення крупних частинок, тоді як фільтр-прес затримує дрібні механічні домішки (через сітку / мембрану). Як правило, обладнання використовують послідовно: спочатку декантер (грубе очищення), потім фільтр (тонке очищення).

Після цього здійснюється фільтрація під тиском через пластинчастий фільтр-прес, де додатково затримуються залишкові дрібнодисперсні частинки жмиху та механічні домішки. На виході отримують очищене масло з вмістом вологи та механічних домішок не більше 0,1 %.

Очищене масло надходить на охолодження у пластинчастий теплообмінник, де за допомогою циркуляційної води від градирні його температура знижується до $25\text{--}30\text{ }^{\circ}\text{C}$. Такий температурний режим є оптимальним для подальшого зберігання в резервуарах та наступної переробки (трансестерифікації або рафінації).

За необхідності може здійснюватися рафінація масла, яка включає комплекс процесів глибокого очищення від фосфоліпідів, вільних жирних кислот, барвників та інших домішок, що забезпечує стабільні якісні характеристики сировини для виробництва біодизеля.

Тепло, відведене від масла в пластинчастому теплообміннику (вода температурою приблизно $30\text{--}40\text{ }^{\circ}\text{C}$), доцільно використовувати для підготовки технологічної води, підігріву бойлерної води або для господарських потреб (санітарні потреби персоналу), що підвищує загальну енергоефективність підприємства.

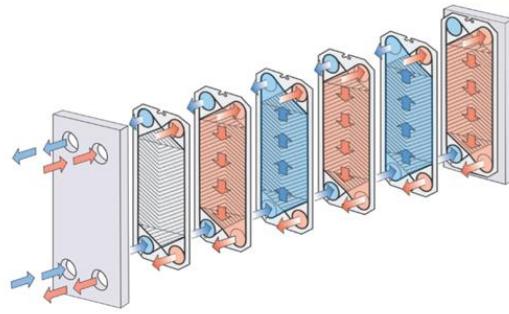


Рисунок 2.3 – Схема роботи пластинчастого теплообмінного апарату

Червоними стрілками на рисунку 2.3 показано рух гарячого масла, а синіми – рух підігрітої води.

Перспективним постачальником елеваторного обладнання (силосів, барабанних сепараторів, транспортерів) на території України є компанія KMZ Industries.

З огляду на сезонність збору врожаю ріпаку, підприємства зазвичай передбачають автономне зберігання на 6 місяців, особливо при роботі за довгостроковими контрактами або при постачанні поза сезоном. Далі наведено розрахунок необхідної корисної ємності (з урахуванням 10 % запасу).

Розрахунок необхідної маси зберігання (для подальшого визначення об'єму одного силоса):

$$M_{\text{заг}} = M \cdot N \cdot k,$$

де M – добова потреба, т/добу;

N – кількість днів автономії, діб ($6 \cdot 30$);

k – коефіцієнт запасу, дорівнює 1,1;

Підставимо значення та отримаємо – $M = 82,6 \cdot 180 \cdot 1,10 \approx 16\,364$ т.

Розподіл за видами ріпаку:

$$- M_{\text{HEAR}} = 16\,364 \cdot 0,3 \approx 4\,909 \text{ т};$$

$$- M_{\text{Canola}} = 16\,364 \cdot 0,7 \approx 11\,455 \text{ т}.$$

Підбір силосів

Типовий варіант для комплектування силосів (виробництво KMZ Industries) – це 7 силосів по 2500 т кожен, а саме:

- 2 силоси під HEAR;
- 5 силосів під ріпак Canola.

Геометричні параметри силоса (діаметр та висота) прийнято за типовими конструктивними характеристиками промислових зернових силосів місткістю близько 2500 т. Для таких силосів характерні діаметри в межах 12–16 м і висота циліндричної частини близько 20–30 м, тому прийняті значення $d = 14$ м і $H_{\text{ц}} = 25$ м відповідають реальному промислового діапазону.

Перевіряємо об'єм одного силоса:

$$V_{\text{с}} = H_{\text{ц}} \cdot S_{\text{ц}},$$

де $S_{\text{ц}}$ – площа перетину циліндра, м^2 ;

$H_{\text{ц}}$ – висота циліндру, м.

$$V_{\text{с}} = H_{\text{ц}} \cdot (\pi \cdot d^2) / 4;$$

$$V_{\text{с}} = 25 \cdot (\pi \cdot 14^2) / 4 \approx 3846 \text{ м}^3.$$

Маса ріпаку в одному силосі:

$$M_{\text{р}} = V_{\text{с}} \cdot \rho,$$

ρ – це насипна густина ріпаку в $\text{т}/\text{м}^3$, приймаємо $0,65 \text{ т}/\text{м}^3$ ($\rho = 0,63\text{--}0,67 \text{ т}/\text{м}^3$).

$$M_{\text{р}} = 3846 \cdot 0,65 \approx 2500 \text{ т}.$$

Сумарний об'єм зберігання:

$$7 \cdot 2500 = 17500 \text{ т}.$$

Цей об'єм є достатнім для потреб зберігання 16364 т сировини.

Технічні характеристики обладнання ділянки очищення та сушіння насіння наведено в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 – Потужності обладнання та рекомендації щодо пуску

№	Позиція	Кількість	Потужність на од. (кВт)	Сума (кВт)	Рекомендований пуск / примітка
1	2	3	4	5	6
А. Силоси (всього 7 од.)					

Продовження таблиці 2.3

1	2	3	4	5	6
1	Вентилятор аераційний (силос)	14	5,5	77,0	VFD (частотний привід)
2	Вивантажувальний центральний шнек (силос)	7	11,0	77,0	Пускач / soft-start (VFD опціонально)
3	Скребковий шнек (sweep-механізм)	7	7,5	52,5	Пускач / soft-start
В. Лінія Canola (70 % потоку)					
4	Норія 175 т/год (Canola)	4	30,0	120,0	VFD (бажано)
5	Горизонтальні конвеєри Canola (редукторні)	3	10,0	30,0	ДОЛ / плавний пуск
6	Барабанний сепаратор (200 т/год)	1	20,0	20,0	Пускач (плавний пуск)
7	Аспірація / пиловидання Canola	2	10,0	20,0	VFD
8	Вивантаження day-bin Canola шнек)	1	6,0	6,0	Пускач
С. Лінія HEAR (30 % потоку)					
9	Норія 100 т/год (HEAR)	4	15,0	60,0	VFD/плавний пуск

Продовження таблиці 2.3

1	2	3	4	5	6
10	Горизонтальні конвеєри HEAR	2	5,0	10,0	ДОЛ/пускач
11	Барабанний сепаратор (100 т/год)	1	10,0	10,0	Пускач
12	Аспірація HEAR	1	10,0	10,0	VFD
13	Вивантаження day-bin HEAR (шнек)	1	4,0	4,0	Пускач
D. Сушарка (електрична частина)					
14	Вентилятори сушарки	2	40,0	80,0	VFD
15	Транспортери/ механізми сушарки	2	10,0	20,0	Пускач / плавний пуск
E. Інше / автоматика					
16	SCADA , шафи керування, освітлення, малі приводи	1	5,0	5,0	UPS на SCADA (рекомендується)
F. Підсумки					
	Разом силоси			206,5	

Продовження таблиці 2.3

1	2	3	4	5	6
	Разом Canola			196,0	
	Разом HEAR			94,0	
	Разом сушарка			100,0	
	Разом інше			5,0	
	Разом встановлена потужність			601,5 кВт	

Пояснення складу обладнання, наведеного в таблиці 2.3

Обладнання, наведене в таблиці 2.3, забезпечує повний цикл приймання, транспортування, очищення та підготовки насіння ріпаку перед подальшою переробкою. Кількість і потужність обладнання визначені виходячи з продуктивності підприємства (82,6 т/добу), поділу потоків на Canola (70 %) та HEAR (30 %), а також вимог до безперервності технологічного процесу.

У групі силосного господарства передбачено аераційні вентилятори, які забезпечують підтримання якості насіння під час зберігання шляхом подачі повітря та запобігання самонагріванню. Їх кількість (14 од.) відповідає встановленню по два вентилятори на кожен із 7 силосів. Потужність 5,5 кВт є типовою для силосів даного об'єму. Вивантажувальні центральні шнеки (7 од.) забезпечують вивантаження насіння із силосів, по одному на кожен силос. Скребкові шнеки (sweeper-механізми) використовуються для повного очищення днища силоса від залишків зерна після основного вивантаження.

Для транспортування насіння застосовуються норії (ковшові елеватори) та горизонтальні конвеєри. Кількість норій (4 для Canola і 4 для HEAR) обумовлена необхідністю забезпечення безперервної подачі сировини між різними технологічними ділянками (приймання, очищення, сушіння, буферні ємності). Потужність норій (15–30 кВт) є типовою для обладнання продуктивністю 100–175 т/год. Горизонтальні конвеєри забезпечують переміщення сировини між

апаратами на одному рівні та мають відносно невелику потужність (5–10 кВт).

Барабанні сепаратори призначені для первинного очищення насіння від грубих домішок (каміння, рослинні залишки). Для основного потоку Canola встановлено більш продуктивний сепаратор (200 т/год), тоді як для HEAR достатньо меншої продуктивності (100 т/год), що відповідає співвідношенню потоків. Системи аспірації забезпечують видалення пилу та легких домішок, покращують санітарні умови та знижують вибухонебезпечність виробництва.

Вигрузні шнеки (day-bin) призначені для подачі насіння з буферних ємностей у наступні технологічні апарати. Їх кількість мінімальна (по одному на лінію), оскільки вони працюють у стабільному режимі подачі.

У складі сушарки основними споживачами електроенергії є вентилятори (2×40 кВт), які забезпечують подачу гарячого повітря для сушіння насіння. Допоміжні механізми сушарки (транспортери) мають потужність близько 10 кВт і забезпечують переміщення сировини всередині установки.

До допоміжного обладнання віднесено системи автоматизації (SCADA), електричні шафи, освітлення та малі приводи. Їх сумарна потужність є незначною (5 кВт), проте вони забезпечують контроль і керування технологічним процесом.

Рекомендовані способи пуску електроприводів обрані з урахуванням характеру навантаження: для вентиляторів та систем аспірації застосовуються частотні приводи (VFD), для норій переважно VFD або плавний пуск (soft-start) залежно від вимог до регулювання, для шнеків і конвеєрів – плавний пуск, а для малопотужних або малонавантажених допоміжних механізмів допускається прямий пуск (ДОЛ). Це забезпечує надійну та енергоефективну роботу обладнання.

Загалом встановлена потужність обладнання (601,5 кВт) відповідає масштабам виробництва та включає необхідний резерв для стабільної та безперебійної роботи підприємства.

Отримане після комбінованого вилучення та очищення рослинне масло використовується як сировина для подальшої переробки в біодизель, процес виробництва якого розглянуто в наступному розділі.

3 ПЕРЕРОБКА МАСЛЯНОЇ СИРОВИНИ В БІОДИЗЕЛЬ

Для розрахунку обсягів виробництва біодизеля, жмиху та гліцерину (який використовується як паливо) використані вихідні дані, наведені у таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Вихідні дані та припущення

Параметр	Значення / пояснення
Загальний маса насіння ріпаку $M_{\text{Canola+HEAR}}$	30 000,0 т/рік
Частка HEAR V_{HEAR} (30 %)	0,3
Частка Canola V_{CANOLA} (70 %)	0,7
Вміст масла в HEAR (прийнято 41 %), α_{HEAR}	0,41
Вміст масла в Canola (прийнято 44 %), α_{CANOLA}	0,44
ККД вилучення масла (прес + екстракція), $\eta_{\text{м}}$, %	98 % (типовий)
Вихід біодизеля з вилученого масла $\eta_{\text{д}}$, %	97 % (масово)
Вихід грубого гліцерину, $\eta_{\text{г}}$, %	9 % від маси вилученого масла (приблизно 90 кг/т масла)
Залишок (шрот)	Вважається як маса насіння – маса вилученого масла (т/рік)

Розглянемо розподіл сировини, теоретичний вміст масла, виробництво біодизеля та побічних продуктів, розрахунок метанолу, витрати каталізатора.

Розподіл сировини

Вихідну масу насіння розподілено за типами наступним чином:

$$M_{\text{HEAR}} = V_{\text{HEAR}} \cdot M_{\text{Canola+HEAR}};$$

$$M_{\text{CANOLA}} = V_{\text{CANOLA}} \cdot M_{\text{Canola+HEAR}};$$

Підставляючи значення з таблиці, отримуємо:

$$M_{\text{HEAR}} = 0,3 \cdot 30000 = 9000 \text{ т/рік},$$

$$M_{\text{CANOLA}} = 0,7 \cdot 30000 = 21000 \text{ т/рік.}$$

Теоретичний вміст масла

Теоретичний вміст масла – це кількість масла, яку можна отримати з сировини за умови 100 % вилучення, тобто потенційний вихід масла (не його хімічний склад).

Теоретичний вміст масла до врахування ефективності екстракції визначається за формулами:

$$M_{\text{oil, HEAR}} = M_{\text{HEAR}} \cdot \alpha_{\text{HEAR}},$$

$$M_{\text{oil, CANOLA}} = M_{\text{CANOLA}} \cdot \alpha_{\text{CANOLA}},$$

$$M_{\text{oil, total}} = M_{\text{oil, HEAR}} + M_{\text{oil, CANOLA}}.$$

Таким чином, отримуємо:

$$M_{\text{oil, HEAR}} = 9000 \cdot 0,41 = 3690 \text{ т/рік,}$$

$$M_{\text{oil, CANOLA}} = 21000 \cdot 0,44 = 9240 \text{ т/рік,}$$

$$M_{\text{oil, total}} = 3690 + 9240 = 12930 \text{ т/рік.}$$

Екстраговане масло з урахуванням ефективності процесу:

$$M_{\text{total}} = M_{\text{oil, total}} \cdot \eta_{\text{м}} = 12\,930 \cdot 0,98 = 12671,4 \text{ т/рік.}$$

Виробництво біодизеля та побічних продуктів

Вихід біодизеля після трансестерифікації визначається так:

$$M_{\text{FAME, real}} = M_{\text{total}} \cdot \eta_{\text{д}} = 12671,4 \cdot 0,97 = 12291,3 \text{ т/рік.}$$

Отримане значення є уточненим результатом розрахунку з урахуванням фактичного вмісту масла в сировині та ефективності його вилучення. На відміну від орієнтовної оцінки, наведеної у вступі, даний підхід дозволяє більш точно визначити реальні обсяги виробництва біодизеля.

Вихід сирого гліцерину як палива для енергетичної установки:

$$M_{\text{gly}} = M_{\text{total}} \cdot \eta_{\text{г}} = 12671,4 \cdot 0,09 = 1140,4 \text{ т/рік.}$$

Маса шроту, що залишається після вилучення масла:

$$M_{\text{cake, total}} = M_{\text{Canola+HEAR}} - M_{\text{total}} = 30000 - 12671,4 = 17328,6 \text{ т/рік.}$$

Шрот, як відомо – твердий залишок, що залишається після вилучення масла з ріпаку методом пресування або екстракції; в складі міститься клітковина, білки, та частково зв’язана олія. Шрот, зазвичай, використовують як корм для тварин або як сировину для палива чи добрив у технічних процесах.

Розрахунок метанолу

Стехіометричний розрахунок метанолу для реакції трансестерифікації, тобто обчислення точної кількості метанолу, потрібного для повної реакції з усім маслом, щоб утворився біодизель і гліцерин за хімічними співвідношеннями:

$$M_{\text{MeOH, stoich}} = M_{\text{oil, total}} \cdot 0,1086 = 12930 \cdot 0,1086 = 1404 \text{ т/рік,}$$

де 0,1086 – стехіометричне масове співвідношення, для тригліцеридів ріпакової олії.

Оскільки на практиці реакція трансестерифікації не протікає повністю, метанол використовують у надлишку для зсуву рівноваги у бік утворення ефірів (біодизеля). Типове значення надлишку складає 10 %:

$$M_{\text{MeOH}} = M_{\text{MeOH, stoich}} \cdot 1,1 = 1404 \cdot 1,1 = 1544 \text{ т/рік.}$$

Повернення метанола та make-up

Як сказано вище, під час трансестерифікації біодизеля метанол використовують з надлишком для забезпечення повного протікання реакції. Після реактора суміш надходить у сепаратор і ректифікаційну колону, де метанол відганяють та повертають у процес. З практики відомо, що коефіцієнт повернення метанолу складає 90–97 %, залежно від тиску, типу ректифікаційної колони, температури. Однак частина метанолу втрачається у вигляді випарів та технологічних втрат, а також переходить у гліцерин і частково залишається у біодизелі. Цю незворотну частину необхідно компенсувати за рахунок свіжого метанолу (make-up, підживлення). Make-up – інженерний термін у енергетичній, хімічній промисловості, що означає поповнення до потрібного рівня робочого середовища.

Якщо коефіцієнт повернення становить 95 %, потреба у свіжому метанолі (make-up) визначається так:

$$M_{\text{make-up}} = M_{\text{MeOH}} \cdot (1 - 0,95) = 1544 \cdot 0,05 \approx 77,2 \text{ т/рік.}$$

Витрати каталізатора

У процесі трансестерифікації рослинного масла застосовується лужний каталізатор (натрій гідроксид NaOH або калій гідроксид KOH). Його основна функція – формування метоксиду (розчин каталізатора в метанолі), який запускає та прискорює реакцію перетворення тригліцеридів на метилові ефіри (біодизель). Стандартна витрата каталізатора (NaOH або KOH) для промислових біодизельних установок залежить від технології і становить 0,5 % від теоретичної маси перероблюваного масла, тобто:

$$m_{\text{cat}} = M_{\text{oil, total}} \cdot 0,005 \approx 12930 \cdot 0,005 \approx 65 \text{ т/рік.}$$

Таблиця 3.2 – Підсумкова таблиця добового споживання та річних виходів

362	Річний вихід / споживання, т/рік	Добовий, т/добу	Добовий, кг/добу
1	2	3	4
Вилучене масло (з урахуванням ККД)	12 671,4	34,7162	34 716,2
Біодизель (після трансестерифікації)	12 291,3	33,6747	33 674,7
Гліцерин (сирий)	1 140,426	3,1245	3 124,5
Шрот (після екстракції)	17 328,6	47,4756	47 475,6
Метанол стехіометричний	1 404,00	3,8	3 800,0
Метанол з урахуванням надлишку (1,1)	1 544,00	4,2	4 200,7

Продовження таблиці 3.2

1	2	3	4
Метанол make-up при 95 % поверненні	77,2	0,21	210,2
Каталізатор (0,5 % від масла)	65,00	0,18	180,0

Добові значення наведені з розрахунку на календарний рік (365 діб).

Для отримання біодизеля пропонується використовувати модульну установку Lurgi/ Alfa Laval – рисунок 3.1.

Модульна установка Lurgi/Alfa Laval реалізує стадії переробки рослинного масла в біодизель, починаючи з процесу трансестерифікації, а саме: трансестерифікацію, відокремлення гліцерину, ректифікацію метанолу, очищення (промивання та сушіння) біодизеля та зберігання готового продукту.

Повна технологічна схема виробництва біодизеля включає також попередні стадії підготовки сировини та вилучення рослинного масла (пресування та екстракція), які детально розглянуті у розділі 2. Для цілісного уявлення про процес у даному розділі наведено узагальнену блок-схему виробництва біодизеля (рис. 3.2).

1. Приймання і зберігання насіння ріпаку.

На цьому етапі здійснюють контроль якості насіння: вологість, сміттєві домішки, ураження пліснявою та шкідниками. Сировину подають у силоси або склади з контрольованими умовами зберігання. Важливо забезпечити вентиляцію та стабільну вологість, щоб уникнути псування та самозігрівання насіння.

2. Підготовка сировини

Насіння очищають від домішок, подрібнюють і здійснюють термічну обробку для підвищення виходу масла. Іноді перед екстракцією проводять кондиціонування парою. Підготовка забезпечує ефективне пресування або екстракцію масла.

3. Екстракція масла.

Підготовлене насіння обробляють органічним розчинником (зазвичай гексаном), який вибірково розчиняє рослинне масло. Отриману місцелу (рідка суміш екстрагованого рослинного масла та розчинника-гексану) направляють на випаровування та десорбцію, де розчинник відокремлюють і повертають у цикл. На виході отримують екстраговане рослинне масло, придатне для транс-естерифікації, та шрот як побічний продукт.

4. Трансестерифікація.

Це основний хімічний процес виробництва біодизеля. Масло реагує зі спиртом (зазвичай метанолом) у присутності лужного каталізатора. У результаті утворюються метилові ефіри жирних кислот (біодизель) і побічний продукт – гліцерин.

5. Відокремлення гліцерину.

Після реакції суміш відстоюють або центрифугують. Гліцерин, маючи більшу густину, осідає у нижній шар і легко відділяється. Це обов'язковий етап, що забезпечує розділення фаз для подальшого очищення.



Рисунок 3.1 – Модульна установка переробки рапсового масла в біодизель Lurgi/Alfa Laval

6. Ректифікація (відновлення метанолу)

Метанол, який не прореагував, відганяють у ректифікаційній колоні. Після очищення його повертають у процес як вторинну сировину. Це зменшує витрати і підвищує економічну ефективність виробництва.

7. Промивання та сушіння біодизеля

Після стадії відокремлення гліцерину та рекуперації метанолу біодизель містить залишкові домішки: сліди каталізатора (NaOH або KOH), мила, мінеральні солі, нерозчинні частинки та невелику кількість метанолу. Для їх видалення біодизель промивають водою або «сухими» адсорбентами для видалення залишків каталізатора, метанолу та мила.

Водне промивання передбачає подавання контрольованої кількості теплої води у реакційну суміш та подальше інтенсивне перемішування. Вода зв'язує розчинні домішки, після чого фази відстоюються, і промивну воду відводять у систему очищення стічних вод. Процес може включати кілька циклів, доки вміст домішок не досягне норм стандарту EN 14214.

Сухе очищення відбувається без використання води: біодизель пропускають через фільтри з адсорбентами (магній-силікат, активовані глини або спеціальні полімерні сорбенти). Цей метод забезпечує стабільнішу якість, скорочує тривалість оброблення та зменшує утворення стічних вод.

Після промивання біодизель подають на сушіння, під час якого видаляють залишкову вологу та сліди летких компонентів. Сушіння проводять у вакуумних або атмосферних випарниках, а також у потокових сушарках. На виході отримують стабільний продукт із нормативною вологістю < 500 мг/кг, який повністю відповідає вимогам стандартів якості.

8. Зберігання готової продукції

Очищений біодизель надходить у герметичні резервуари, призначені для тривалого зберігання світлих нафтопродуктів або спеціально адаптовані під FAME-паливо. Такі резервуари повинні мати відсутність доступу повітря, мінімізований контакт з вологою та антикорозійне покриття. За потреби використовують інертне газове «подушки» (азот), щоб запобігти окисненню. Температурний режим зберігання контролюється: при зниженні температури

нижче точки помутніння біодизель може кристалізуватися. Тому резервуари часто обладнують підігрівом або теплоізоляцією, що забезпечує стабільність властивостей у холодний період. За умови дотримання вимог до температури, герметичності та захисту від світла біодизель зберігає свої експлуатаційні характеристики протягом тривалого часу, не утворює осаду та залишається повністю придатним для використання у паливних системах.

Блок-схема технологічного процесу виробництва біодизеля представлена на рисунку 3.2 з врахуванням комбінованої технології вилучення масла, що включає попереднє пресування з подальшою екстракцією.

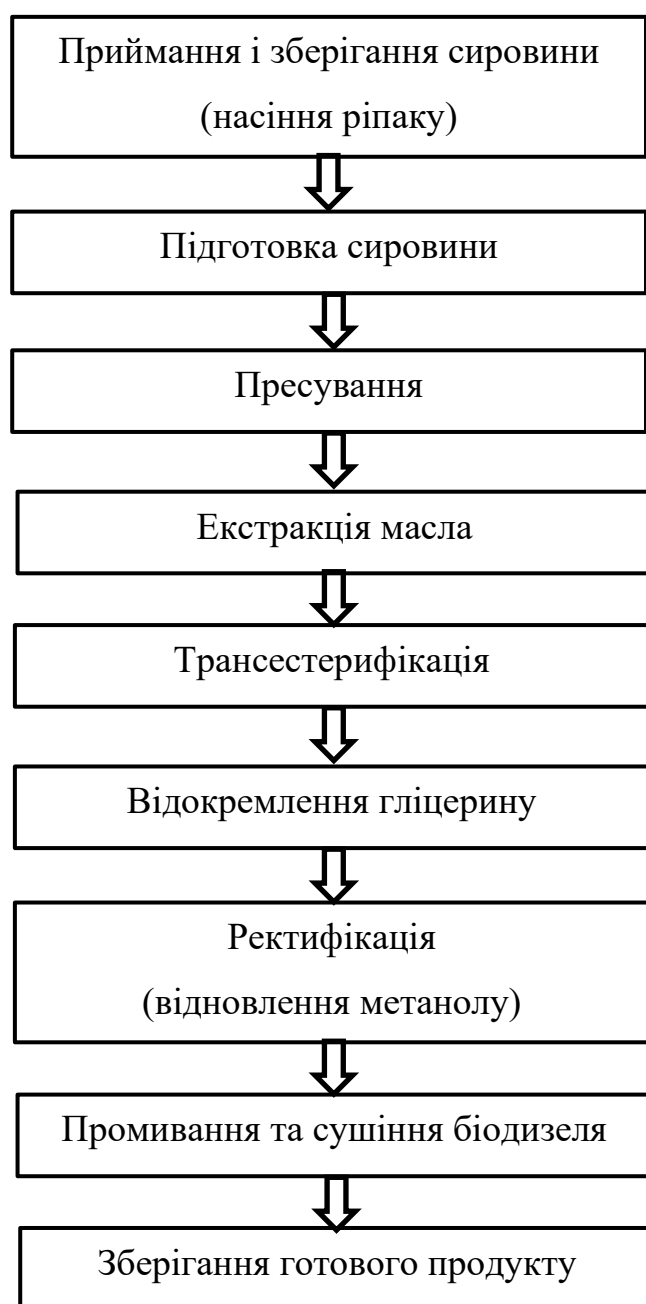


Рисунок 3.2 – Блок-схема технологічного процесу виробництва біодизеля

Для реалізації процесу необхідні енергетичні ресурси, які представлені в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Зведена таблиця енергоресурсів для модуля трансестерифікації Lurgi/Alfa Laval (продуктивність: 35,02 т/добу біодизеля, 351 день роботи з урахуванням 14 днів ремонту)

№	Найменування параметра	Питоме споживання на 1 т біодизеля	Добове споживання	Середня потужність
1	2	3	4	5
1	ЕЛЕКТРИЧНА ЕНЕРГІЯ			
1.1	Трансестерифікація	12 кВт·год/т	420,2 кВт·год/добу	17,5 кВт
1.2	Хімічне рафінування	13,5 кВт·год/т	472,7 кВт·год/добу	19,7 кВт
1.3	Допоміжне обладнання (15%)	3,8 кВт·год/т	133,1 кВт·год/добу	5,5 кВт
1.4	ПІДСУМОК електрична енергія	29,3 кВт·год/т	1026 кВт·год/добу	42,7 кВт
1.5	Встановлена електрична потужність (з коеф. 1,3)	—	—	55 кВт
2	ТЕПЛОВА ЕНЕРГІЯ (ПАРА)			
2.1	Трансестерифікація	340 кг/т	11906 кг/добу	275 кВт
2.2	Хімічне рафінування	60 кг/т	2 101 кг/добу	49 кВт
2.3	Дистиляція метанолу	85 кг/т	2 977 кг/добу	69 кВт

Продовження таблиці 3.3

1	2	3	4	5
2.4	Сушка біодизеля	45 кг/т	1 576 кг/добу	36 кВт
2.5	Підігрів та інше	70 кг/т	2 451 кг/добу	57 кВт
2.6	ПІДСУМОК	600 кг/т	21012 кг/добу	486 кВт
3	ОХОЛОДЖУВАЛЬНА ВОДА			
№	Найменування параметра	Питоме споживання на 1 т біодизеля	Добове споживання	Витрата, м³/год
3.1	Трансестерифікація	25 м³/т	875,4 м³/добу	36,5 м³/год
3.2	Рафінування	5 м³/т	175,1 м³/добу	7,3 м³/год
3.3	ПІДСУМОК	30 м³/т	1050,5 м³/добу	43,8 м³/год
4	ТЕХНОЛОГІЧНА ВОДА			
№	Найменування параметра	Питоме споживання на 1 т біодизеля	Добове споживання	Витрата, м³/год
4.1	Промивка	0,5 м³/т	17,5 м³/добу	0,73 м³/год
4.2	Процес	0,2 м³/т	7,0 м³/добу	0,29 м³/год
4.3	ПІДСУМОК	0,7 м³/т	24,5 м³/добу	1,02 м³/год

4 РОЗРАХУНОК ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ПОТУЖНОСТІ ДЛЯ ПЕРЕРОБКИ РІПАКА В БІОДИЗЕЛЬ

Повна необхідна теплова та електрична потужності є сумою всіх енерговитрат по виробничих ділянках.

Електрична потужність:

$$N_{\text{еп}\Sigma} = N_{\text{еп}} + N_{\text{ео}} + N_{\text{еф}} + N_{\text{ет}},$$

де $N_{\text{еп}}$ – електрична потужність необхідна для підготовки та зберігання сировини, дорівнює 601,5 кВт (див. табл. 2.3);

$N_{\text{ео}}$ – електрична потужність, необхідна для віджиму, дорівнює 780,5 кВт (див. табл. 2.1);

$N_{\text{еф}}$ – електрична потужність, необхідна для фільтрації, дорівнює 22 кВт (див. табл. 2.2);

$N_{\text{ет}}$ – електрична потужність, необхідна для трансестерифікації, дорівнює 42,3 кВт (див. табл. 3.3).

Отримуємо – $N_{\text{еп}\Sigma} = 601,5 + 780,5 + 22,0 + 42,3 = 1446,3$ кВт.

З урахуванням запасу за потужністю 20 % отримуємо необхідну електричну потужність:

$$N_{\text{е}\Sigma} = N_{\text{еп}\Sigma} \cdot 1,2 = 1446,3 \cdot 1,2 = 1735,5 \text{ кВт.}$$

Для забезпечення такої електричної потужності найбільше підходить парова двоступінчаста турбіна, що працює на генератор Mitsubishi Extraction/Back-pressure потужністю 2 МВт із проміжним відбором пари через редукційний клапан для технологічних потреб. Надлишок електроенергії може передаватися у загальну мережу.

Необхідна кількість пари для технологічних потреб:

$$G_{\Sigma} = G_o + G_{\text{т}},$$

де $G_o = 2478$ кг/добу – потреба у парі на ділянці віджиму (табл. 2.1);

$G_{\text{т}} = 21012$ кг/добу – сумарна потреба у парі для трансестерифікації, рафінування, дистиляції, сушіння тощо, таблиця 3.3.

$$G_{\Sigma} = 2478 + 21012 \approx 23490 \text{ кг/добу.}$$

Витрата пари на технологічні потреби на годину:

$$M_{\text{bleed}} = 23490/24 = 978,75 \text{ кг/год.}$$

Для забезпечення потужності генерації 2000 кВт необхідні параметри перегрітої пари на виході з котла 2,5 МПа та 520 °С. Тоді маємо ентальпію пари на виході котла відповідно до інженерних таблиць IAPWS IF97 Region 2 / Steam Tables [6] приблизно 3595–3610 кДж/кг. Приймаємо 3600 кДж/кг.

Ентальпія пари – це кількість теплової енергії, яку містить водяна пара (або інша пара) при певній температурі та тиску. Простіше кажучи – це тепло, яке потрібно подати, щоб перетворити воду на пару, плюс тепло, яке сама пара має завдяки своїй температурі.

Тоді формула для розрахунку необхідної пари для турбіни з урахуванням відбору пари на технологічні потреби має вигляд:

$$M_{\text{in}} = (P \cdot H_{\text{in}} / \eta_t + M_{\text{bleed}} \cdot (H_{\text{extr}} - H_{\text{cond}})) / (H_{\text{in}} - H_{\text{cond}}),$$

де $P = 2000$ кВт – необхідна потужність електрогенерації;

$H_{\text{in}} = 3600$ кДж/кг – ентальпія пари на виході з котла;

$\eta_t = 0,32$ – ККД турбіни;

$M_{\text{bleed}} = 23490/24 = 978,75$ кг/добу – витрата пари на технологічні потреби;

$H_{\text{extr}} = 2500$ кДж/кг – ентальпія відбору пари (для технологічної пари з параметрами 0,6 МПа і 160 °С) [6];

$H_{\text{cond}} = 191,0$ кДж/кг – ентальпія конденсату на виході з турбіни (типове інженерне наближення для конденсаторів, що працюють у вакуумі приблизно 10 кПа (див. рис. 4.1).

10 кПа (тобто $\approx 0,1$ атм) – це глибокий технічний вакуум у контексті роботи парових конденсаторів. Такий вакуум потрібен, щоб пара легше конденсувалася. при нижчій температурі (приблизно 45–50 °С), що збільшує ККД турбіни.

Після підстановки даних отримуємо:

$$M_{\text{in}} = (2000 \cdot 3600 / 0,32 + 978,75 \cdot (2500 - 191)) / (3600 - 191) =$$

$$= (22\,500\,000 + 2\,259\,999) / 3409 = 7264,8 \text{ кг/год.}$$

Для визначення необхідної теплової потужності парового котла використовуємо формулу:

$$\Delta H = H_{\text{in}} - H_{\text{fw}},$$

де $H_{\text{fw}}=504,0$ кДж/кг – ентальпія живильної води згідно з джерелом [6] для параметрів води у деаераторі 0,2 МПа та температурі 120 °С.

Після підстановки отримуємо:

$$\Delta H = 3600,0 - 504,0 = 3096 \text{ кДж/кг.}$$

Необхідна теоретична теплова потужність котла (кВт) визначається за формулою:

$$P_{\text{th}} = M_{\text{in}} \cdot \Delta H / 3600 ,$$

де 3600 – коефіцієнт для переведення години у секунди.

Після підстановки:

$$P_{\text{th}} = 7264,8 \cdot 3096 / 3600 = 6246,9 \text{ кВт.}$$

З урахуванням ККД котла $\eta_{\text{boiler}} = 0,8$ отримаємо:

$$P_{\text{fuel}} = P_{\text{th}} / \eta_{\text{boiler}} = 6246,9 / 0,8 = 7808,6 \text{ кВт.}$$

Для визначення необхідної кількості палива (гліцерин і шрот), що забезпечує роботу енергетичної установки, приймаємо теплотворні здатності гліцерину і шроту відповідно – $LHV_{\text{gly}}=13$ МДж/кг [7] та $LHV_{\text{cake}}=17,5$ МДж/кг [8].

Енергетична потужність від спалювання гліцерину (у кВт):

$$E_{\text{gly}} = (M_{\text{gly}} / (351 \cdot 24)) \cdot (1000 \cdot LHV_{\text{gly}} / 3,6)$$

де 351 дні – тривалість роботи установки з урахуванням ремонтів,
24 – кількість годин у добі;

$M_{\text{gly}} = 1140$ т/рік – це маса (або річна кількість) гліцерину, який утворюється як побічний продукт під час виробництва біодизеля (табл. 3.2).

Після підстановки маємо:

$$E_{gly} = \frac{1140}{351 \cdot 24} \cdot \frac{1000 \cdot 13}{3,6} = 488,7 \text{ кВт.}$$

Необхідну теплову потужність, яку має забезпечити спалювання шроту, визначають як різницю між загальною потребою енергетичної установки та потужністю, отриманою від спалювання гліцерину:

Необхідна потужність, яку має забезпечити спалювання шроту:

$$P_{\text{cake_needed}} = P_{\text{fuel}} - E_{\text{gly}} = 7808,6 - 488,7 = 7319,9 \text{ кВт.}$$

Годинна витрата жмиху:

$$M_{\text{cake,h}} = P_{\text{cake_needed}} \cdot 3600 / (\text{LHV}_{\text{cake}} \cdot 1000),$$

$$M_{\text{cake,h}} = 7319,9 \cdot 3600 / (17,5 \cdot 1000) = 1505,6 \text{ кг/год.}$$

$$M_{\text{cake,day}} = 1505,6 \cdot 24 = 36\,134 \text{ кг/добу.}$$

Тобто витрата шроту – 36134 кг/добу за добу. Отже, добове виробництво шроту (47 475 кг/добу, таблиця 3.2) та гліцерину (3124 кг/добу, таблиця 3.2) повністю покриває потребу енергетичної установки в паливі. Надлишок шроту після технологічної обробки може бути використаний для виробництва добрив – це буде враховано під час економічних розрахунків дипломного проекту.

Одночасно енергетична установка має резерв електричної потужності на рівні близько 200 кВт, що може бути використаний при аварійних ситуаціях, але при цьому вимагатиме додаткового спалювання шроту приблизно 3,5 т/добу.

Для забезпечення необхідного режиму роботи обирається котел – VYNCKE N.V. (Бельгія) з відповідним комплектом опцій (подача палива, форсунки для гліцерину, фільтрація, автоматика) та з параметрами: продуктивність 10 т/год; тиск 2,5 МПа, температура 520 °С.

Робота теплової схеми, наведеної на рисунку 4.1, базується на використанні побічних продуктів виробництва біодизеля – шроту та гліцерину як палива. Подача палива здійснюється роздільно: гліцерин подається через форсунки у рідкому вигляді, а шрот – за допомогою механічної системи подачі твердого палива.

Як робоче тіло в установці використовується хімічно підготовлена вода. У паровому котлі (1) відбувається її нагрівання, випаровування та перегрів до параметрів 2,5 МПа та 520 °С. Отримана перегріта пара надходить у турбіну високого тиску (2), де частина її енергії перетворюється на механічну роботу. Далі пара розширюється у турбіні низького тиску (3), забезпечуючи вироблення електричної енергії генератором (8) потужністю 2 МВт. Обидві турбіни виконані співвісно (за схемою «вал у валі») та працюють з однаковою частотою обертання.

Для забезпечення технологічних потреб виробництва та процесу деаерації живильної води частина пари відбирається після турбіни через редукційний клапан (4). Параметри цієї пари становлять 0,6 МПа та 160 °С, а витрата – приблизно $G \approx 979$ кг/год, що відповідає сумарній потребі всіх технологічних процесів установки.

Після проходження турбіни низького тиску основна частина енергії пари вже використана для генерації електроенергії, тому її параметри суттєво знижуються і становлять близько 0,01 МПа та 46 °С. За таких умов робоче тіло перебуває у вологому паровому (газорідинному) стані. За допомогою вакуумного насоса (5) воно подається в конденсатор (6), де охолоджується водою із зовнішнього джерела та конденсується при температурі близько 30 °С.

Конденсат після конденсатора надходить у деаератор (7), призначений для видалення розчинених у воді газів (кисню та вуглекислого газу), які можуть спричиняти корозію обладнання. Робота деаератора детальніше показана на рисунку 4.2.

У деаераторі вода подається через форсунки та розпилюється на дрібні краплі, що значно збільшує площу контакту з паром. Назустріч потоку води подається насичена пара, яка підігріває її до температури насичення при відповідному тиску. У процесі нагрівання розчинність газів у воді різко зменшується, внаслідок чого кисень і вуглекислий газ виділяються з рідини. Видалення газів здійснюється через газовідвідну трубу або сепараційний пристрій у верхній частині деаератора.

Деаерована вода накопичується у деаераційному баці та далі подається

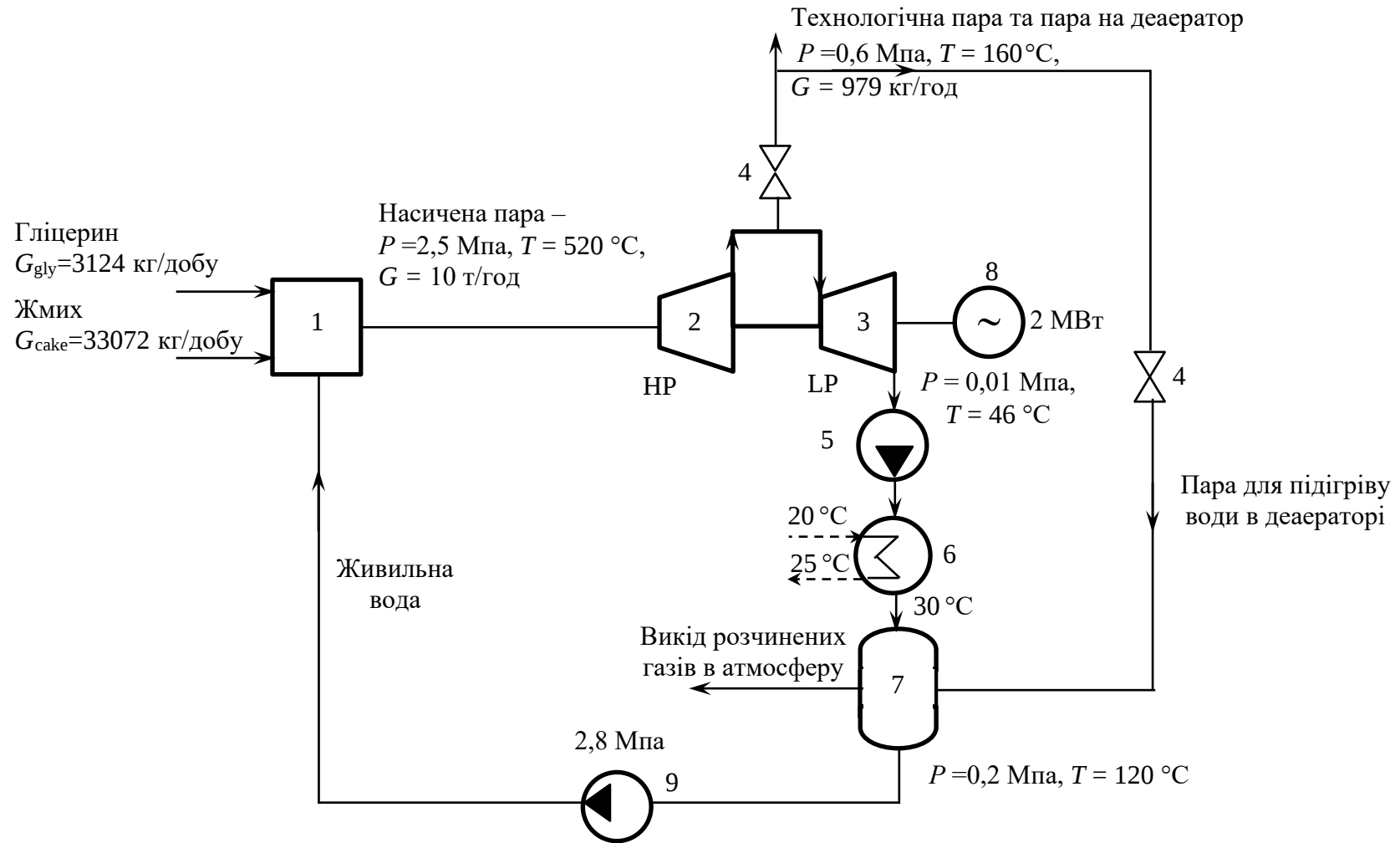


Рисунок 4.1 – Теплова схема роботи автономної енергетичної установки:

1 – котел; 2 – турбіна високого тиску; 3 – турбіна низького тиску; 4 – редукційний клапан;
5 – вакуумний насос; 6 – конденсатор; 7 – деаератор; 8 – генератор; 9 – живильний насос

живильним насосом (9) у паровий котел. Подача здійснюється під тиском близько 2,8 МПа, що забезпечує компенсацію гідравлічних втрат у трубопроводах та стабільну роботу котла.

Таким чином, у замкненому циклі забезпечується безперервна циркуляція робочого тіла, ефективне виробництво електричної та теплової енергії, а також покриття технологічних потреб підприємства.

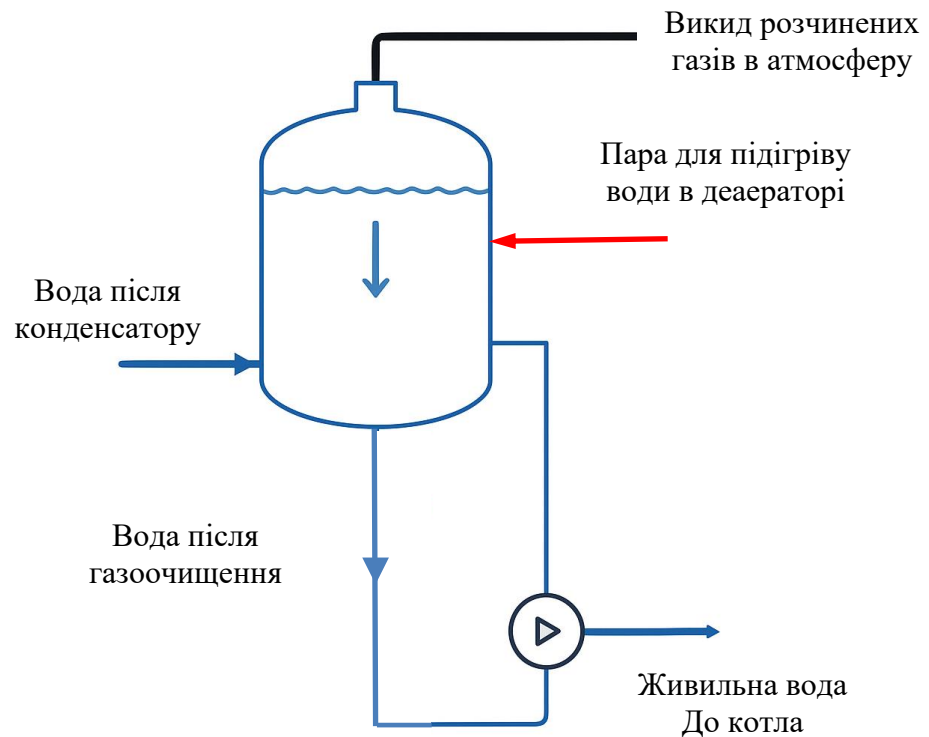


Рисунок 4.2 – Схема работы деаератора

У результаті виконаних розрахунків визначено необхідні параметри енергетичної установки для забезпечення процесу виробництва біодизеля. Встановлено сумарну потребу в електричній та тепловій енергії, обґрунтовано вибір паротурбінної установки та визначено витрати пари на технологічні потреби. Показано, що використання побічних продуктів виробництва – шроту та гліцерину – дозволяє повністю покрити енергетичні потреби підприємства та забезпечити його автономну роботу.

Отримані результати є основою для подальшої оцінки економічної ефективності проекту, зокрема визначення витрат, прибутку та строку окупності.

5 РОЗРАХУНОК ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ

Для проведення економічного розрахунку використовуємо наступні вихідні дані:

- проєкт: переробка ріпаку загальним об'ємом 30000 т/рік (70 % Canola та 30 % HEAR) у біодизель;
- комплексна модульна установка переробки рапсового масла в біодизель виробника Lurgi/Alfa Laval з модульною лінією GEA DP-300;
- електрична потужність технологічної частини складає 1735,5 кВт;
- парова турбіна з електричною потужністю 2,0 МВт (з резервом по електричній потужності на рівні 200 кВт);
- необхідні інвестиції (I) з врахуванням основного технологічного та теплового обладнання запропонованої енергетичної установки складають приблизно 700 млн грн;
- термін амортизації складає приблизно 20 років.

Основні технологічні параметри, необхідні для економічних та фінансових розрахунків представлено в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 – Основні технологічні параметри

№	Показник	Позначення	Значення	Одиниця вимірювання	Примітка
1	2	3	4	5	6
1	Річний обсяг екстрагованого масла	M_{total}	12671,4	т/рік	після екстракції з урахуванням ефективності процесу (0,98)
2	Річний випуск біодизеля	$M_{FAME, real} = 0,97 \cdot M_{total}$	12291	т/рік	вихід – 97%
3	Гліцерин (9% від масла)	$M_{gly} = 0,09 \cdot M_{total}$	1140	т/рік	використовується як паливо
4	Метанол	M_{MeOH}	1544	т/рік	з урахуванням надлишку для забезпечення повноти реакції

Продовження таблиці 5.1

1	2	3	4	5	6
5	Загальний вихід шроту	M_{cake}	47475	кг/добу	$\approx 17\,330$ т/рік
6	Шрот на паливо	M_{fuel}	36134	кг/добу	≈ 13188 т/рік
7	Шрот на добрива	$M_{\text{cake}} - M_{\text{fuel}}$	11341	кг/добу	$\approx 4\,139$ т/рік

У розрахунках використано приведену вартість сировини в перерахунку на масу отриманої олії, що дозволяє коректно узгодити матеріальні та енергетичні потоки в межах технологічної схеми

Для виробництва біодізеля потрібні енергетичні ресурси (електричні, теплові, вода, паливо), які представлено в таблиці 5.2.

Таблиця 5.2 – Енергетичні ресурси для виробництва біодізеля

№	Ресурс	Питоме споживання	Добове споживання	Річне споживання	Примітка
1	Електро-енергія	29,3 кВт·год/т	1016 кВт·год/добу	356,6 тис. кВт·год/рік	Технологічна частина, 351 день
2	Пар	600 кг/т	21012 кг/добу	7375 т/рік	351 день
3	Вода	—	3,5 м³/добу	1278 м³/рік	Включно з make-up водою, умовно
4	Паливо (шрот + гліцерин)	—	36134 кг/добу	13188 т/рік	Власне виробництво

Економічна частина розрахунку ефективності

Прибуткова частина формується за рахунок реалізації біодізеля та частини шроту, що не використовується як паливо (показана в таблиці 5.3).

Таблиця 5.3 – Прибуткова частина від виробництва

№	Стаття	Позначення, формула	Значення	Одиниця вимірювання	Примітка
1	Біодизель	$D_{\text{bio}} = M_{\text{bio}} \cdot P_{\text{bio}} =$ $= 12291 \cdot 38000$	467,1	млн грн/рік	За ціною 38000 грн/т
2	Шрот (добриво)	$D_{\text{cake}} = M_{\text{cake}} \cdot P_{\text{cake}} =$ $= 4139 \cdot 12700$	52,6	млн грн/рік	по 12700 грн/тонна
3	Разом дохід	$D_{\text{tot}} = D_{\text{bio}} + D_{\text{cake}}$	519,7	млн грн/рік	—

Витрати на виробництво показані в таблиці 5.4

Таблиця 5.4 – Необхідні для виробництва витрати

№	Стаття	Значення, млн грн/рік	Примітка
1	Сировина (ріпак)	304,1	Середня ціна 24 000 грн/т; вартість сировини з ураху- ванням виходу олії після екстракції – $M_{\text{total}} = 12671,4$ т/рік
2	Метанол	21,6	1544 т
3	Каталізатор, хімікати	4,0	оптимізовано
4	Енергія	9,0	з урахуванням автономії
5	Вода	0,2	
6	Заробітна плата	5,0	штат 15 осіб
7	Інші витрати ($\approx 3\%$)	10,3	Від $\sum Z_i$
8	$\sum Z_i$	354,2	—
9	Амортизація A_z	25,0	термін – 20 років; з урахуванням можливих податкових пільг та прискореної амортизації
10	Разом Z_{tot}	379,2 млн грн/рік	—

Для розрахунку економічної ефективності був використаний такий підхід.

1. Спочатку визначено дохід від виробництва та реалізації продукції (табл. 5.3):

$$D_{tot} = D_{bio} + D_{cake} = 519,7 \text{ млн грн/рік.}$$

2. Потім розраховані загальні річні витрати на виробництво (табл. 5.4):

$$Z_{tot} = \sum Z_i + A_z = 354,2 + 25,0 = 379,2 \text{ млн грн/рік.}$$

3. Наступним визначено загальний річний прибуток P (див. табл 5.5):

$$P = D_{tot} - Z_{tot} = 519,7 - 379,2 = 140,5 \text{ млн грн/рік.}$$

4. Чистий прибуток: $\Pi = 0,82 \cdot P = 0,82 \cdot 140,5 = 115,21 \text{ млн грн/рік.}$

5. Остаточо визначено термін окупності проєкту, як відношення інвестицій (I) до чистого прибутку (Π) після сплати податків:

$$T_{ok} = I/\Pi = 6 \text{ років.}$$

Основні фінансові показники проєкту представлено в таблиці 5.5

Таблиця 5.5 – Фінансові показники проєкту

№	Показник	Формула	Значення
1	Валовий прибуток P	$D_{tot} - Z_{tot}$	140,5 млн грн/рік
2	Рентабельність продукції	$(P/D_{tot}) \cdot 100\%$	27 %
3	Чистий прибуток після сплати податків (18%)	$0,82 \cdot P$	115,21 млн грн/рік
4	Термін окупності T_{ok}	I/Π	приблизно 6 років

Отримані результати показують, що проєкт виробництва біодизеля є економічно доцільним та характеризується стабільними фінансовими показниками. За прийнятих вихідних даних річний прибуток до оподаткування становить близько 141 млн грн, а чистий прибуток після сплати податків – приблизно 115 млн грн на рік. За умови обсягу початкових інвестицій 700 млн

грн строк окупності проєкту становить близько 6 років, що свідчить про його інвестиційну привабливість.

Особливістю даного проєкту є використання побічних продуктів виробництва (шроту та гліцерину) як палива для забезпечення власних енергетичних потреб підприємства. Такий підхід дозволяє досягти енергетичної автономності виробництва та суттєво знизити витрати на зовнішні енергоресурси.

Водночас використання шроту як палива призводить до зменшення обсягів його реалізації як товарної продукції, що певною мірою знижує потенційний дохід підприємства. Таким чином, у проєкті фактично реалізується компроміс між максимізацією прибутку та забезпеченням енергетичної незалежності.

Альтернативним підходом може бути повна реалізація шроту як добрива з одночасним покриттям енергетичних потреб за рахунок зовнішніх джерел енергії. Такий варіант дозволяє збільшити дохідну частину, однак робить підприємство залежним від ринку енергоресурсів та коливань їх вартості.

Отже, вибір між зазначеними підходами визначається стратегічними пріоритетами підприємства: орієнтацією на максимальний прибуток або забезпеченням енергетичної автономності та стабільності роботи.

6 ОХОРОНА ПРАЦІ

6.1 Загальні положення

Охорона праці є одним із ключових елементів організації будь-якого сучасного виробництва, зокрема у галузі біопалива та відновлюваної енергетики. Вона спрямована на створення безпечних і здорових умов праці, попередження виробничого травматизму, професійних захворювань та аварійних ситуацій. Це і є метою цього розділу.

Відповідно до Закону України «Про охорону праці» [9] роботодавець зобов'язаний забезпечити дотримання нормативно-правових актів у сфері безпеки, гігієни праці та виробничого середовища, а працівники зобов'язані виконувати вимоги інструкцій і використовувати засоби індивідуального захисту.

У рамках розробки когенераційної паротурбінної установки потужністю 2 МВт особливу увагу приділено створенню комплексної системи управління безпекою, яка враховує технологічні ризики, властиві роботі з паровими котлами, біомасою, гліцерином, жмихом та допоміжним обладнанням.

Відповідно до ДСТУ ISO 45001:2019 «Системи управління охороною праці та безпекою здоров'я» [10], у проєкті передбачено запровадження циклу «плануй–виконуй–перевіряй–вдосконалюй», який дозволяє системно оцінювати небезпеки, планувати заходи з мінімізації ризиків і постійно вдосконалювати рівень безпеки виробництва.

6.2. Характеристика умов праці на підприємстві.

Аналіз небезпечних і шкідливих факторів

Характер виробництва визначається наявністю паротурбінної когенераційної установки, що працює на відновлюваних джерелах енергії – зокрема на відходах біодизельного виробництва (шроту, гліцерині).

Процес експлуатації установки включає роботу з:

– парою високого тиску у парових системах (ризик різкого викиду пари);

- гарячими поверхнями (котли, паропроводи, теплообмінники);
- рухомими механізмами (турбіна, насоси, приводи, передачі), що створюють ризик травм;
- системами згоряння;
- електрообладнанням високої потужності, що викликає ризики ураження струмом;
- хімічними реагентами для очищення теплообмінних контурів, з технологічними рідинами і реагентами (метанол при трансестерифікації, реагенти для очищення тощо);
- вибухо- та пожежонебезпечними горючими твердими частинами жмиху, легкозаймистими рідинами (сирий гліцерин може спричиняти підвищений ризик у поєднанні з іншими факторами).

До потенційно небезпечних і шкідливих виробничих факторів належать:

- висока температура поверхонь та робочого середовища;
- підвищений рівень шуму й вібрацій;
- можливість контакту з парою та гарячими газами під тиском;
- рухомі частини механізмів (насоси, вентилятори, турбіна);
- запиленість та наявність парів гліцерину;
- електричний струм високої напруги;
- біологічні чинники під час зберігання сировини (цвіль, бактерії);
- пожежо- та вибухонебезпечність біомаси, пилу та гліцерину.

Ці фактори впливають на організацію робочих місць, режим роботи, систему допусків, необхідність вентиляції, рівні шуму та мікроклімату.

Оцінку небезпечних і шкідливих факторів (ризик-орієнтований підхід) проводять перед запуском устаткування та під час серійних інспекцій. Методика проста – ідентифікувати джерела ризику, оцінити ймовірність і тяжкість наслідків, визначити заходи контролю й відповідальних.

Стислі висновки оцінки для ключових ризиків наступні.

1. Розрив або витік пари:

- джерелом є паропроводи, запірна арматура, зміни тиску;
- наслідками є опіки, тимчасова недієздатність обладнання, загроза для

персоналу;

- заходами є регулярні випробування й огляди, автоматичні запобіжні клапани, маркування зон гарячих поверхонь, інструктажі з оперативних дій при витоках.

2. Пожежа / займання:

- джерелом є накопичення пилу жмиху, витік гліцерину, іскри від електродвигунів;

- наслідками є руйнування обладнання, отруєння продуктами горіння, травми;

- заходами є виділені зони з мінімальною концентрацією пилу, системи видалення пилу, контроль електроустановок, вимкнення і ізоляція джерел іскроутворення, автономні системи пожежогасіння.

Блок схема дій персоналу при пожежі надана в Додатку А.

3. Ураження електричним струмом:

- джерелом є генератор, силові щити, кабелі;

- наслідками є від легкої контузії до смертельного ураження;

- заходами є надійне заземлення, диференційні автомати, групові допуски (працівники з відповідною групою електробезпеки), чітка процедура робіт під напругою.

Блок схема дій персоналу при ураженні електричним струмом надана в Додатку Б.

4. Шум і вібрація:

- джерелом є турбіна, редуктори, насоси;

- наслідками є втома, зниження уваги, втрата слуху при тривалому впливі;

- заходами є акустичні огороження, графік чергувань, засоби індивідуальні захисту (далі – ЗІЗ) слуху, балансування рухомих частин.

5. Пил і біологічні фактори:

- джерелом є сировина (жмих), сепарація, транспортування.

- наслідками є респіраторні проблеми, алергічні реакції, ризик займистості.

- заходами є локальні витяжки, фільтрація, система збору пилу,

респіратори для працівників під час обслуговування.

6. Механічні травми:

–джерелом є непродуктивні огороження, відкриті ремінні передачі, валопроводи;

–заходами є фізичні огороження, блокування при відкритті, інструктаж і маркування зон небезпеки.

Тому, з огляду на наведене, проєкт передбачає комплекс заходів, спрямованих на мінімізацію ризиків шляхом технічних рішень, організаційних процедур, навчання персоналу і постійного моніторингу параметрів виробничого середовища. Усі заходи базуються на принципі ієрархії контролю, тобто усунення небезпеки, заміна менш ризикованими процесами, інженерні бар'єри, організаційні заходи і застосування засобів індивідуального захисту.

Відповідно до вимог НПАОП 0.00-4.12-05 «Типове положення про порядок проведення навчання і перевірки знань з питань охорони праці» [11] та ДБН В.2.5-20-2001 «Інженерне обладнання будівель і споруд» [12] , на підприємстві повинна бути проведена оцінка ризиків на робочих місцях.

Нижче наведено узагальнена таблиця ідентифікації основних небезпечних факторів та оцінки рівня ризику – таблиця 6.1.

Оцінка ризику проводиться за методикою ISO 31010:2019 [13], що дозволяє класифікувати небезпеки за ступенем ймовірності та тяжкості наслідків, а також визначати пріоритети у розробці профілактичних заходів.

Таблиця 6.1 – Узагальнена ідентифікація основних небезпечних факторів та оцінки рівня ризику

№	Небезпечний / шкідливий фактор	Джерело виникнення	Ймовірність	Наслідки	Рівень ризику	Заходи попередження
1	2	3	4	5	6	7
1	Висока температура, опіки	Парові котли, труби	Середня	Серйозні	Високий	Теплоізоляція, ЗІЗ, контроль температури

Продовження таблиці 6.1

1	2	3	4	5	6	7
2	Підвищений тиск	Система пари	Низька	Катастрофічні	Високий	Запобіжні клапани, техогляд
3	Електричний струм	Турбіна, насоси, панелі	Середня	Тяжкі травми	Середній	Заземлення, маркування, інструктаж
4	Вибух біомаси чи пилу	Склад сировини	Низька	Руйнування, пожежа	Високий	Вентиляція, іскрогасники, контроль вологості
5	Шум і вібрація	Турбіна, насоси	Висока	Хронічні хвороби слуху	Середній	Віброізоляція, навушники, ротація персоналу
6	Пил і газы	Спалювання біомаси	Середня	Захворювання дихальних шляхів	Середній	Вентиляція, фільтрація повітря
7	Пожежа	Горючі матеріали	Низька	Опіки, пошкодження майна	Високий	Системи пожежогасіння, сигналізація

6.3 Організаційні заходи та відповідальність персоналу

Відповідно до статті 13 Закону України «Про охорону праці», система управління охороною праці (далі – СУОП) створюється роботодавцем і охоплює всі рівні управління – від адміністрації до робочих місць.

У структурі підприємства передбачено призначення служби охорони праці, яка координує виконання заходів, проводить інструктажі, аналізує нещасні випадки, веде облік інцидентів та здійснює контроль за дотриманням нормативів.

Основні елементи СУОП:

– політика у сфері безпеки праці;

- планування заходів та ресурсів;
- аналіз небезпек і оцінка ризиків;
- проведення навчання персоналу;
- моніторинг показників безпеки;
- внутрішній аудит та звітність.

Рекомендована структура відповідальності:

- директор з виробництва / головний інженер здійснюють загальну відповідальність за безпечну експлуатацію, забезпечення ресурсами для охорони праці; затвердження інструкцій і графіків навчання;
- керівник котельні / енергомайстер здійснюють щоденний контроль технічного стану, допуск персоналу до робіт, контроль виконання нарядів-допусків;
- енергетик / електрик здійснюють обслуговування електрообладнання, проведення вимірів заземлення, контроль пристроїв захисного вимкнення (далі – ПЗВ) і автоматики;
- служба охорони праці (або відповідальна особа) здійснює організацію інструктажів, ведення журналів інструктажів та навчань, контроль виконання заходів;
- оператори / технічний персонал здійснюють виконання робіт відповідно до інструкцій, доповідають про інциденти, дотримання ППР (правила поведінки при роботі / реагування на інциденти).

Організаційні заходи включають:

- журнал інструктажів (вступні, первинні на робочому місці, повторні, позапланові);
- наряди-допуски на виконання робіт у небезпечних зонах (роботи на висоті, роботи під тиском, гарячі роботи, роботи з електроустановками);
- графіки технічних оглядів та планово-попереджувальних робіт (ППР) для котлів, турбіни, генератора;
- порядок ведення робочої документації (паспорти обладнання, акти випробувань, протоколи);
- систему повідомлення про інциденти та розслідування (короткі звіти, рішення щодо усунення причин).

6.4 Вимоги до обладнання і технологічного процесу

Виробниче обладнання когенераційної установки, а це – парові котли, теплообмінники, турбіни, насоси, резервуари, трубопроводи, повинно відповідати вимогам НПАОП 0.00-1.08-13 «Правила будови і безпечної експлуатації парових і водогрійних котлів» [14]. Кожен елемент системи підлягає технічному огляду, випробуванню на герметичність, перевірці запобіжних клапанів і манометрів.

Відповідно до вимог ДСТУ EN 13445, металева арматура котлів і трубопроводів має бути виготовлена з матеріалів, стійких до корозії, високої температури та тиску. Усі стикові з'єднання повинні проходити контроль неруйнівними методами (ультразвуковим або капілярним).

Технологічний процес передбачає:

- суворе дотримання температурних і тискових режимів;
- використання лише сертифікованого палива (жмих, гліцерин, біомаса);
- наявність автоматизованої системи контролю параметрів (тиск, температура, подача повітря);
- встановлення аварійних датчиків і клапанів надлишкового тиску;
- передбачення дистанційного аварійного вимкнення котлів і турбіни.

З метою зниження ризику вибухів і пожеж усі паливопроводи обладнуються іскрогасниками та системою контролю витoku газів. Крім того, згідно з ДБН В.2.5-56:2014 «Системи протипожежного захисту» [15], приміщення установки повинні бути обладнані автоматичною сигналізацією, вентиляцією та вогнестійкими перегородками.

6.5 Засоби індивідуального та колективного захисту

Забезпечення працівників засобами індивідуального захисту є обов'язком роботодавця згідно зі статтею 8 Закону України «Про охорону праці» [9]. Працівники, які виконують роботи на котельному, турбінному та паливному обладнанні, повинні бути забезпечені:

- спеціальним вогнестійким одягом із термостійкої тканини;
- захисними рукавицями, щитками та окулярами;

- касками, берушами або навушниками від шуму;
- респіраторами при роботі з пилом або парами гліцерину;
- діелектричним взуттям при контакті з електрообладнанням.

Засоби колективного захисту включають:

- аварійне освітлення та знаки евакуації;
- огороження небезпечних зон та рухомих частин;
- системи вентиляції, пилопригнічення та шумопоглинання;
- теплову ізоляцію гарячих поверхонь;
- дистанційне керування турбіною.

Усі ЗІЗ повинні зберігатися в спеціально обладнаному приміщенні, проходити регулярну перевірку та заміну після завершення терміну придатності. Контроль за їх видачею ведеться у журналі обліку засобів захисту.

6.6 Пожежна безпека та електробезпека

Враховуючи пожежо- та вибухонебезпечність біомаси, пилу та гліцерину, пожежна безпека на підприємстві має пріоритетне значення. Вимоги визначені Законом України «Про пожежну безпеку» [16], НПАОП 0.00-1.31-99 «Правила пожежної безпеки в Україні» [17], та ДБН В.1.1-7:2021 «Пожежна безпека об'єктів будівництва» [18].

Основні заходи пожежної безпеки:

- визначення категорії приміщень за рівнем вибухо- та пожежонебезпечності;
- розробка плану евакуації і його розміщення на видимих місцях;
- обладнання виробничих приміщень пожежною сигналізацією та автоматичними системами гасіння (порошковими або газовими);
- наявність первинних засобів гасіння (вогнегасників, піску, води, коштів);
- контроль температури й вологості на складах жмиху та гліцерину;
- регулярне очищення від пилу і сторонніх матеріалів;
- обов'язкове заземлення металевих ємностей для запобігання статичному розряду.

Персонал повинен бути ознайомлений із планом пожежогасіння і проходити навчання щодо користування вогнегасниками один раз на рік.

Електрообладнання когенераційної установки працює в умовах підвищеної небезпеки через наявність вологи, пари та металевих конструкцій. Відповідно до НПАОП 40.1-1.32-01 [19], перед початком робіт персонал повинен пройти перевірку знань і мати відповідну групу з електробезпеки.

Основні вимоги:

- усі корпуси машин і щитів мають бути заземлені;
- електрощити замкнені, з попереджувальними знаками;
- кабелі прокладаються у металевих трубах або коробах;
- ремонт дозволено лише за нарядом-допуском;
- категорично заборонено працювати під напругою без ізоляційних інструментів.

Для попередження уражень струмом проводиться періодичне вимірювання опору ізоляції та перевірка автоматичних вимикачів.

Надання першої допомоги постраждалим

Відповідно до НПАОП 0.00-4.33-99 [20], кожне робоче місце повинно бути забезпечене аптечкою та інструкцією з першої допомоги. На підприємстві призначається відповідальна особа, яка проходить спеціальне навчання.

Основні види допомоги:

- охолодження ділянки чистою водою, накладання стерильної пов'язки, звернення до медпункту при опіках;
- вимкнути напругу, забезпечити дихання, покласти потерпілого горизонтально при ураженні струмом;
- вивести на свіже повітря, розстібнути одяг, викликати швидку допомогу при отруєнні парами гліцерину або димових газів;
- накласти пов'язку або шину, фіксувати ушкоджену кінцівку при травмах.

Блок-схема дій персоналу при наданні першої допомоги постраждалим надана при ураженні електричним струмом в Додатку В.

6.7 Надзвичайні ситуації: сценарії та алгоритм дій

Надзвичайні ситуації (далі – НС) на когенераційній установці можуть бути пов’язані з розгерметизацією парових трубопроводів, займанням біомаси чи гліцерину, вибухом пилоповітряної суміші або аварією електрообладнання. Згідно із Законом України «Про цивільний захист населення» [21], та НПАОП 0.00-4.33-99 [22], підприємство зобов’язане мати розроблені плани локалізації та ліквідації аварійних ситуацій (далі – ПЛАС) із визначенням дій персоналу.

Таблиця 6.2 – Типові сценарії можливих аварій та алгоритм реагування

№	Тип події	Основні дії персоналу	Відповідальні служби	Документування
1	2	3	4	5
1	Витік пари / розрив трубопроводу	Негайно зупинити подачу пари, спрацювати аварійним відключенням, ізолювати ділянку, відвести працівників у безпечну зону, повідомити керівництво та службу охорони праці	Енергомайстер, черговий механік, охорона праці	Запис у журналі аварій, короткий звіт, аналіз причин
2	Пожежа в зоні зберігання жмиху чи гліцерину	Запустити систему пожежогасіння, застосувати порошкові або вуглекислі вогнегасники, викликати пожежну службу, евакуювати персонал	Черговий оператор, пожежна дружина, відповідальний за пожежну безпеку	Акт про пожежу, звіт у ДСНС
3	Електрична аварія або займання обладнання	Вимкнути живлення, повідомити електромайстра, за необхідності ліквідувати джерело займання, зафіксувати подію	Електромайстер, черговий персонал	Журнал обліку інцидентів

Продовження таблиці 6.2

1	2	3	4	5
4	Вибух або задимлення в котельному приміщенні	Увімкнути сигналізацію, зупинити обладнання, залишити приміщення за маршрутом евакуації, повідомити керівництво	Черговий оператор, інженер з безпеки	Протокол розслідування НС
5	Отруєння парами або газами	Евакуювати потерпілих, надати першу допомогу, повідомити медслужбу	Відповідальний за охорону праці	Медичний звіт, журнал травматизму

Для кожного з вищенаведених сценаріїв передбачені сигнали тривоги, визначені шляхи евакуації та точки збору персоналу. З метою відпрацювання практичних навичок щоквартально проводяться навчальні тренування, результати яких оформлюються актом. Усі випадки, навіть незначні інциденти, підлягають реєстрації та аналізу. Це відповідає вимогам ДСТУ ISO 45001:2019, який передбачає процедуру «Lessons Learned» – вивчення причин і запобігання повторенню аварійних ситуацій.

Приклади документів, що регламентують безпечне виконання робіт наведено в Додатках.

Додаток Г – це «Наряд-допуск на виконання робіт підвищеної небезпеки (зразок)». Наряд-допуск оформлюється відповідно до НПАОП 0.00-4.33-99 і є основним документом, який дозволяє виконання робіт із підвищеною небезпекою, зокрема ремонтних операцій у котельному, турбінному або паливному відділенні.

Додаток Д – це «Акт про виробничий інцидент (зразок)» Документ оформлюється згідно з вимогами НПАОП 0.00-6.02-04 «Порядок розслідування та ведення обліку нещасних випадків, професійних захворювань і аварій на виробництві» [23].

Зробимо висновки по розділу.

У системі експлуатації когенераційної паротурбінної установки питання охорони праці та безпеки персоналу мають першочергове значення. Комплексний підхід, що базується на сучасних нормативно-правових актах України та міжнародних стандартах, забезпечує високий рівень керованості ризиками.

У ході аналізу визначено, що основними потенційними небезпеками є дія високих температур і тиску, ризик вибуху біомаси, пожежі, електричні ураження, а також негативні фактори виробничого середовища – шум, вібрація, пил.

Передбачені технічні й організаційні заходи зводять ці ризики до прийняттого рівня (система автоматичного контролю, дистанційне керування, засоби колективного й індивідуального захисту, регулярне навчання працівників, аудит безпеки та профілактичні медичні огляди).

З метою сталого функціонування підприємства рекомендовано:

- підтримувати постійну дію системи управління охороною праці;
- проводити аналіз небезпек не рідше одного разу на рік;
- актуалізувати інструкції та ПЛАС у відповідності до технологічних змін;
- удосконалювати культуру безпеки шляхом мотивації персоналу;
- розвивати цифровий моніторинг безпеки (онлайн-диспетчеризація, відео аналіз аварійних ситуацій).

Таким чином, реалізація системи охорони праці на підприємстві забезпечує не лише дотримання законодавчих вимог, але й формує сучасну безпечну виробничу культуру, яка є невід’ємною складовою ефективного енергетичного менеджменту.

ВИСНОВКИ

В рамках виконання дипломного проєкту на прикладі підприємства «Агроексперт Трейд», яке планує будівництво заводу з виробництва біодизеля з ріпаку із забезпеченням повної автономії від зовнішніх джерел енергоресурсів, досягнуто основну мету – розроблено когенераційну паротурбінну енергетичну установку з проміжним відбором пари для технологічних потреб.

У дипломному проєкті розроблено комплексну технологічну схему виробництва біодизеля з насіння ріпаку сортів Canola та HEAR, що включає підготовку сировини, виділення масла, процес трансестерифікації, очищення продукту та утилізацію побічних продуктів. Особливу увагу приділено інтеграції енергетичного модуля, який працює на відходах виробництва (шрот та технічний гліцерин), із забезпеченням підприємства електричною та тепловою енергією.

Загальний обсяг переробки ріпаку становить 30 000 т/рік, при цьому річний обсяг екстрагованого масла становить 12 671,4 т/рік, а виробництво біодизеля – близько 12 291 т/рік.

Для зберігання та підготовки сировини обрано обладнання вітчизняного виробника KMZ Industries. Переробка масла в біодизель здійснюється на модульній установці виробництва Lurgi/Alfa Laval із використанням лінії GEA DP-300.

На основі технологічних та енергетичних розрахунків виконано економічну оцінку проєкту. Річний прибуток до оподаткування становить близько 141 млн грн, чистий прибуток – приблизно 115 млн грн/рік. За умови обсягу початкових інвестицій 700 млн грн строк окупності проєкту становить близько 6 років, що свідчить про його загальну економічну доцільність та інвестиційну привабливість.

Встановлено, що енергетичний потенціал побічних продуктів виробництва (шроту та гліцерину) є достатнім для забезпечення потреб підприємства в електричній та тепловій енергії. Використання паротурбінної установки потужністю 2 МВт забезпечує необхідний рівень надійності та резерву потужності.

Особливістю проєкту є використання побічних продуктів як палива, що дозволяє досягти енергетичної автономності підприємства та знизити залежність від зовнішніх енергоресурсів. Водночас це зменшує обсяги реалізації шроту як товарної продукції, що формує компроміс між максимізацією прибутку та енергетичною незалежністю.

Альтернативним підходом є повна реалізація шроту як добрива з покриттям енергетичних потреб за рахунок зовнішніх джерел енергії. Такий варіант дозволяє збільшити дохідну частину, однак підвищує залежність підприємства від ринку енергоресурсів.

У розділі «Охорона праці» проведено аналіз небезпечних і шкідливих виробничих факторів когенераційної установки потужністю 2 МВт. Визначено основні ризики та розроблено систему управління охороною праці відповідно до ДСТУ ISO 45001:2019. Передбачено заходи з пожежної та електробезпеки, а також план реагування на аварійні ситуації. Запропоновані рішення забезпечують безпечні умови праці та відповідність чинним нормативним вимогам.

Таким чином, проєкт біодизельного заводу з енергетичним модулем на шроті та гліцерині є технічно обґрунтованим, економічно доцільним та екологічно ефективним. Його реалізація дозволяє забезпечити енергетичну автономність підприємства, стабільність роботи та прийнятний строк окупності інвестицій.

СПИСОК ДЖЕРЕЛ

1. Национальная комиссия, осуществляющая государственное регулирование в сферах энергетики и коммунальных услуг Украины (НКРЭКУ). Динамика тарифов на электроэнергию и топливно-энергетические ресурсы за 2019–2024 гг. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.nerc.gov.ua>
2. Інститут відновлюваної енергетики НАН України. Оцінка енергетичного потенціалу біомаси в Україні. – Київ: ІВЕ НАНУ, 2023. – 48 с.
Режим доступу: <https://ive.org.ua>
3. Біоенергетична асоціація України (БАУ). Стан та перспективи розвитку біоенергетики в Україні: аналітичний звіт 2024 року. – Київ: БАУ, 2024. – 72 с.
Режим доступу: <https://uabio.org>
4. European Biogas Association (EBA). EBA Statistical Report 2024. Brussels, Belgium: European Biogas Association, 2024. 72 p.
Режим доступу: <https://www.europeanbiogas.eu>
5. International Renewable Energy Agency (IRENA). Renewable Power Generation Costs in 2024. Abu Dhabi: IRENA, 2024. 120 p.
Доступно на: <https://www.irena.org>
6. Международная ассоциация по свойствам воды и водяного пара (IAPWS). Промышленная формулировка 1997 года (IF97) для термодинамических свойств воды и водяного пара. IAPWS, Фредерикция (Дания), 2007. – 56 с. (Revised Release 2012).
7. Demirbas A. Топливные свойства глицерина, получаемого при производстве биодизеля // *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*. – 2007. – Т. 29, № 9. – С. 795–802.
8. Vassilev S.V., Vassileva C.G., Vassilev V.S. Состав и свойства биомассы в зависимости от её топливных характеристик // *Fuel*. – 2010. – Т. 89, № 4. – С. 913–933.
9. Закон України «Про охорону праці», №2694-XII.
10. ДСТУ ISO 45001:2019 «Системи управління охороною праці».

11. НПАОП 0.00-4.12-05 «Типове положення про порядок проведення навчання і перевірки знань з питань охорони праці»
12. ДБН В.2.5-20-2001 «Інженерне обладнання будівель і споруд»
13. ISO 31010:2019 «Risk Management – Risk Assessment Techniques».
14. НПАОП 0.00-1.08-13 «Правила будови і безпечної експлуатації парових і водогрійних котлів».
15. ДБН В.2.5-56:2014 «Системи протипожежного захисту».
16. Закон України «Про пожежну безпеку».
17. НПАОП 0.00-1.31-99 «Правила пожежної безпеки в Україні».
18. ДБН В.1.1-7:2021 «Пожежна безпека об'єктів будівництва».
19. НПАОП 40.1-1.32-01 «Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів»
20. НПАОП 0.00-4.33-99 «Положення про порядок надання домедичної допомоги на виробництві»
21. Закон України «Про цивільний захист населення».
22. НПАОП 0.00-4.33-99 «Положення про розслідування та облік нещасних випадків, професійних захворювань і аварій на виробництві».
23. НПАОП 0.00-6.02-04 «Порядок розслідування та ведення обліку нещасних випадків, професійних захворювань і аварій на виробництві».

ДОДАТОК А

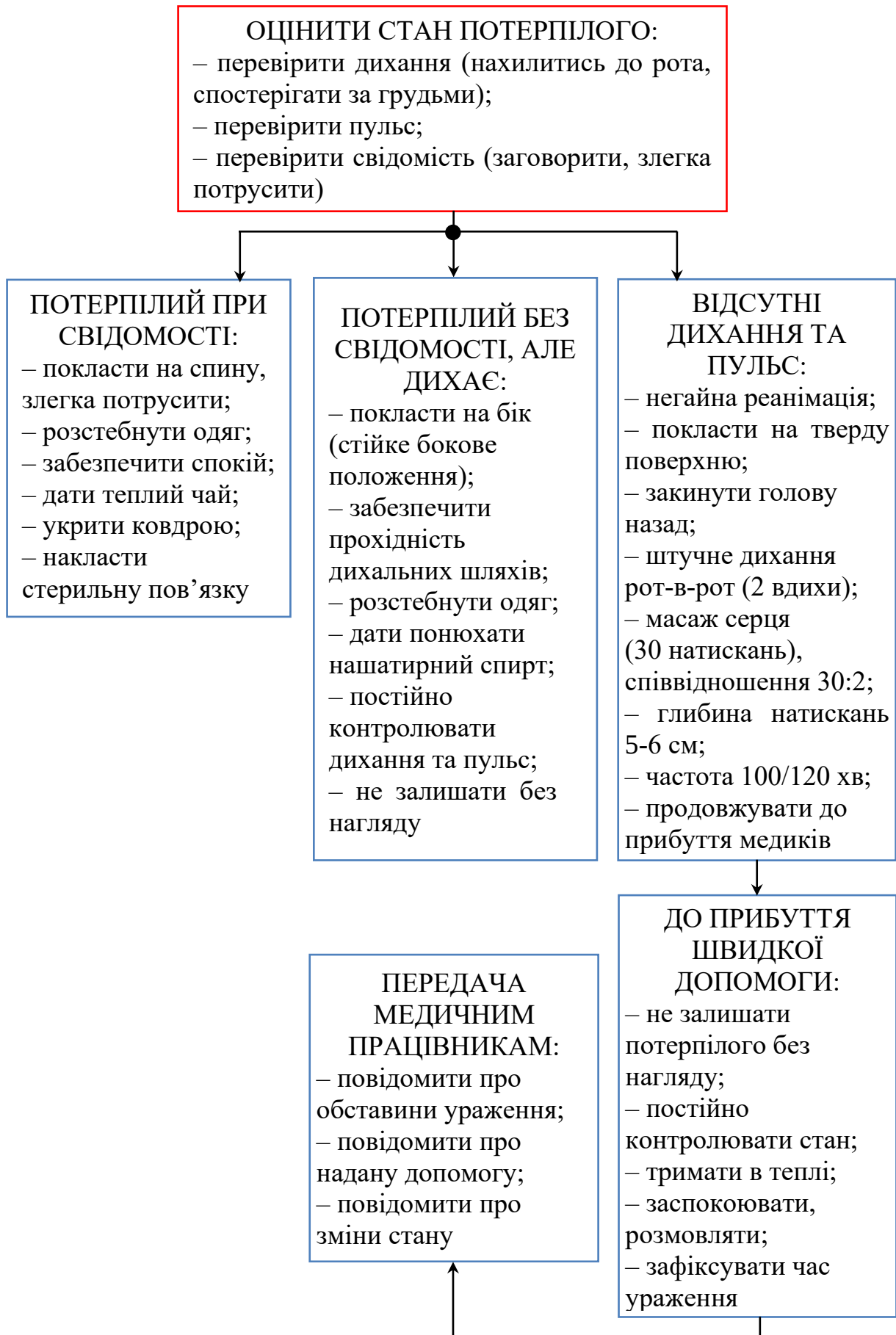
БЛОК- СХЕМА ДІЙ ПЕРСОНАЛУ ПРИ ПОЖЕЖІ



ДОДАТОК Б**БЛОК- СХЕМА ДІЙ ПРИ УРАЖЕННІ ЕЛЕКТРИЧНИМ СТРУМОМ**

ДОДАТОК В

БЛОК-СХЕМА ДІЙ ПЕРСОНАЛУ ПРИ НАДАННІ ПЕРШОЇ ДОПОМОГИ ПОСТРАЖДАЛИМ ВІД УРАЖЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНИМ СТРУМОМ



ДОДАТОК Г

Наряд-допуск на виконання робіт підвищеної небезпеки (зразок)

НАРЯД-ДОПУСК № _____

на виконання робіт підвищеної небезпеки

1. **Вид робіт:** ремонт трубопроводу пари високого тиску
 2. **Місце виконання:** котельне відділення
 3. **Дата, час початку:** _____
 4. **Дата, час закінчення:** _____
 5. **Виконавець робіт:** _____
 6. **Відповідальний керівник робіт:** _____
 7. **Перелік заходів безпеки:**
 - Відключити подачу пари, провести розгерметизацію;
 - Провести вентиляцію приміщення;
 - Перевірити відсутність тиску і температури;
 - Заземлити обладнання;
 - Забезпечити ЗІЗ та вогнегасники.
 8. **Особи, допущені до робіт:** _____
- Підпис керівника служби охорони праці:** _____

ДОДАТОК Д

Акт про виробничий інцидент (зразок)

АКТ № _____

про виробничий інцидент

1. **Дата і час події:** _____
 2. **Місце події:** _____
 3. **Постраждалі (П.І.Б., посада):** _____
 4. **Опис обставин події:** _____
 5. **Ймовірні причини:** _____
 6. **Негайні заходи, вжиті після події:** _____
 7. **Відповідальні особи:** _____
 8. **Пропозиції щодо запобігання подібним випадкам:** _____
- _____
9. **Підпис керівника підрозділу:** _____
- Підпис працівника служби охорони праці:** _____