

**ДНІПРОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНО-ЕКОНОМІЧНИЙ  
УНІВЕРСИТЕТ**  
**Інженерно-технологічний факультет**  
Кафедра харчових технологій

## **П о я с н ю в а л ь н а   з а п и с к а**

до кваліфікаційної роботи  
ступеня вищої освіти «Магістр»  
на тему:

### **Оптимізація технологічних параметрів процесу віджимання олії з насіння ріпаку**

**Виконав:** здобувач вищої освіти 2 курсу,  
групи МГХТ-1-24  
освітньо-професійної програми «Харчові технології»  
зі спеціальності 181 «Харчові технології»

\_\_\_\_\_ Микола КАЛЮЖНИЙ

**Керівник:** \_\_\_\_\_ Наталія СОВА

Дніпро 2025

**ДНПРОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНО-ЕКОНОМІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**  
Інженерно-технологічний факультет

Кафедра харчових технологій  
Ступінь вищої освіти: «Магістр»  
Освітньо-професійна програма: «Харчові технології»  
Спеціальність: 181 «Харчові технології»

**ЗАТВЕРДЖУЮ**  
Завідувач кафедри  
харчових технологій,  
кандидат технічних наук, доцент  
\_\_\_\_\_ Віталій КОШУЛЬКО

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2025 р.

**З А В Д А Н Н Я**  
**НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ ВИЩОЇ ОСВІТИ**

Калюжному Миколі Миколайовичу

1. Тема роботи: «Оптимізація технологічних параметрів процесу віджимання олії з насіння ріпаку».  
Керівник роботи: Сова Наталія Анатоліївна, кандидатка технічних наук, доцентка, затвержені наказом закладу вищої освіти від «24» жовтня 2025 року №3184.
2. Строк подання здобувачем вищої освіти роботи 08 грудня 2025 року.
3. Вихідні дані до роботи: 1. Літературні джерела та періодичні видання. 2. Наукова та науково-технічна документація, що стосується переробки насіння ріпаку та пресування олійної сировини.
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити). Вступ. 1. Оглядовий розділ. 2. Дослідницько-аналітичний розділ. 3. Експериментальний розділ. 4. Охорона праці та захист навколишнього середовища. 5. Організаційно-економічний розділ. Загальні висновки і пропозиції. Бібліографія.

## 5. Перелік демонстраційного матеріалу

- 1) Мета, об'єкт та предмет досліджень.
- 2) Харчові властивості ріпакової олії.
- 3) Механізована технологія виробництва ріпакової олії.
- 4) Методика експериментальних досліджень.
- 5) Результати експериментальних досліджень.
- 6) Регресійна модель
- 7) Охорона праці та захист навколишнього середовища
- 8) Організаційно-економічний розділ.
- 9) Загальні висновки і пропозиції.

## 6. Консультанти розділів роботи

| Розділ | Прізвище, ініціали та посада консультанта | Підпис, дата   |                  |
|--------|---|----------------|------------------|
|        |   | завдання видав | завдання прийняв |
| 1 – 5  | доцентка СОВА Наталія                     | 24.10.25       | 08.12.2025       |
|        |   |                |                  |
|        |   |                |                  |

7. Дата видачі завдання 24 жовтня 2025 року.

**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

| № з/п | Назва етапів кваліфікаційної роботи               | Строк виконання етапів роботи | Примітка |
|-------|---|-------------------------------|----------|
| 1     | Вступ   | 24.10-26.10.2025              | виконано |
| 2     | Оглядовий розділ                                  | 27.10-02.11.2025              | виконано |
| 3     | Дослідницько-аналітичний розділ                   | 03.11-09.11.2025              | виконано |
| 4     | Експериментальний розділ                          | 10.11-23.11.2025              | виконано |
| 5     | Охорона праці та захист навколишнього середовища  | 24.11-26.11.2025              | виконано |
| 6     | Організаційно-економічний розділ                  | 27.11-30.11.2025              | виконано |
| 7     | Загальні висновки і пропозиції, бібліографія      | 01.12-03.12.2025              | виконано |
| 8     | Розробка та підготовка демонстраційного матеріалу | 04.12-08.12.2025              | виконано |

**Здобувач вищої освіти** \_\_\_\_\_ Микола КАЛЮЖНИЙ  
( підпис )

**Керівник роботи** \_\_\_\_\_ Наталія СОВА

## РЕФЕРАТ

Тема: «Оптимізація технологічних параметрів процесу віджимання олії з насіння ріпаку»

**Кваліфікаційна робота магістра:** 66 с., 13 рис., 13 табл., 55 літературних джерел.

**Об'єкт дослідження:** технологічний процес механізованого видобування олії з насіння ріпаку.

**Метою роботи** є підвищення ефективності виробництва олії ріпакової шляхом оптимізації процесу механізованого пресування насіння з урахуванням фізико-хімічних властивостей сировини та збереження біологічно активних компонентів.

**Методи досліджень** включали визначення вмісту вологи та олії у насінні ріпаку сорту Атлант методом сушіння та екстракції у апараті Сокслета, хімічний аналіз олії (PV, AV, FFA) титруванням з використанням аналітичних реактивів, попередню термічну обробку насіння при 40–80 °С, компресійне пресування з вимірюванням сили, виходу олії та енергії деформації, спектрофотометричний аналіз UV-VIS для оцінки стабільності олії та статистичну обробку даних у STATISTICA 13 із застосуванням ANOVA, регресії та моделювання поверхні відгуку для оптимізації умов процесу.

*У вступі обґрунтовано актуальність підвищення ефективності видобутку олії ріпакової та оптимізації механізованих технологій її виробництва, визначено наукову новизну та практичну значущість дослідження, сформульовано основну мету й завдання роботи. У розділі 1 наведено аналіз харчових властивостей олії ріпакової, сучасних механізованих технологій її отримання та існуючого обладнання для очищення, підготовки й пресування насіння. Розглянуто наукові підходи до дослідження процесу пресування та чинників, що впливають на вихід і якість олії, а також узагальнено результати експериментальних і теоретичних робіт у цій галузі. У розділі 2 описано властивості насіння ріпаку, використані реагенти та методи визначення вмісту вологи й олії, представлено експериментальний план Бокс–Бенкена, методика попередньої термічної обробки, компресійних випробувань, спектрофотометричних і хімічних аналізів, а також підходи до статистичної обробки отриманих даних. У експериментальній частині подано результати визначення максимальної сили пресування, виходу олії, енергії деформації та ефективності видобутку, побудовано силово-деформаційні криві, виконано регресійний аналіз поверхні відгуку й сформовано математичні моделі для прогнозування, визначено оптимальні параметри пресування, досліджено процеси стиснення й релаксації, а також хімічні та оптичні властивості олії при різних температурах попередньої обробки. Розділ 4 присвячено оцінці потенційних ризиків технологічного процесу, вимогам до безпечної експлуатації обладнання та заходам зі зменшення екологічного впливу відходів виробництва олії ріпакової. У організаційно-економічному розділі розглянуто економічну ефективність запропонованих режимів пресування, обґрунтовано доцільність впровадження оптимізованої технології та оцінено окупність виробництва з урахуванням енергетичних та матеріальних витрат.*

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** ОЛІЯ РІПАКОВА, МЕХАНІЗОВАНЕ ПРЕСУВАННЯ, ВИХІД ОЛІЇ, МАКУХА, ТЕХНОЛОГІЯ ВИРОБНИЦТВА, БІОЛОГІЧНО АКТИВНІ РЕЧОВИНИ, РАФІНАЦІЯ, ОПТИМІЗАЦІЯ, СИРОВИНА, ЕКСПЕРИМЕНТ.

## ЗМІСТ

|  |    |
|--|----|
| ВСТУП.....   | 6  |
| 1 ОГЛЯДОВИЙ РОЗДІЛ.....  | 7  |
| 1.1 Харчові властивості ріпакової олії.....  | 7  |
| 1.2 Механізована технологія виробництва ріпакової олії .....                               | 9  |
| 1.3 Обладнання для механізованої технології виробництва ріпакової олії .....               | 11 |
| 1.4 Аналіз дослідження пресування насіння ріпаку для виробництва олії.....                 | 13 |
| Висновки за розділом .....   | 17 |
| 2 ДОСЛІДНИЦЬКО-АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ .....  | 18 |
| 2.1 Сировина, використана в дослідженні.....   | 18 |
| 2.2 Реагенти.....  | 19 |
| 2.3 Визначення вмісту вологи та олії.....  | 20 |
| 2.4 Експериментальний план факторів пресування за методом Бокс–Бенкена ..                  | 21 |
| 2.5 Попередня обробка зразків насіння ріпаку.....  | 23 |
| 2.6 Компресійні випробування зразків насіння ріпаку .....                                  | 24 |
| 2.7 Спектрофотометричний аналіз видобутої олії .....                                       | 26 |
| 2.8 Хімічний аналіз видобутої олії при різних температурах попередньої<br>обробки.....     | 27 |
| 2.9 Статистичний аналіз обчислених показників.....   | 28 |
| Висновки за розділом .....   | 29 |
| 3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИЙ РОЗДІЛ.....  | 31 |
| 3.1 Визначення максимальної сили пресування .....  | 31 |
| 3.2 Вихід олії, ефективність видобутку та енергія деформації .....                         | 33 |
| 3.3 Силово-деформаційні криві експериментальних прогонів .....                             | 35 |
| 3.4 Регресійний аналіз поверхні відгуку комбінацій факторів.....                           | 36 |
| 3.5 Визначені регресійні моделі для прогнозування відгуків .....                           | 39 |
| 3.6 Визначені оптимальні, прогнозовані та перевірені значення відгуків .....               | 40 |
| 3.7 Процеси стиснення та релаксації під час видобутку олії з насіння ріпаку....            | 43 |
| 3.8 Хімічні властивості ріпакової олії при різних температурах попередньої<br>обробки..... | 44 |
| 3.9 Вплив факторів стискання на абсорбцію та пропускання ріпакової олії .....              | 48 |
| Висновки за розділом .....   | 50 |
| 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ЗАХИСТ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА.....                                    | 51 |

|   |    |
|---|----|
| 5 ОРГАНІЗАЦІЙНО-ЕКОНОМІЧНИЙ РОЗДІЛ..... | 56 |
| ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ І ПРОПОЗИЦІЇ.....     | 59 |
| БІБЛІОГРАФІЯ .....                      | 61 |

## ВСТУП

Виробництво олії з насіння ріпаку є важливим напрямом харчової та біоенергетичної промисловості, оскільки ріпакову олію використовують як у харчовій, так і в хімічній та енергетичній промисловостях. Ефективність отримання олії безпосередньо залежить від технологічних параметрів процесу віджимання насіння, таких як температура підготовки сировини, швидкість обертання пресових валків, тиск у пресувальному обладнанні та ступінь попередньої обробки насіння.

Сучасні дослідження показують, що неправильно підібрані параметри процесу можуть призводити до зниження виходу олії, погіршення її якості та підвищених енергетичних витрат. Тому оптимізація цих параметрів є актуальним завданням для підвищення ефективності виробництва та забезпечення стабільної якості кінцевого продукту.

*Об'єкт дослідження:* технологічний процес механізованого видобування олії з насіння ріпаку.

*Предмет дослідження:* вплив технологічних параметрів пресування на вихід олії, якість макухи та фізико-хімічні властивості олії ріпакової.

*Метою роботи* є підвищення ефективності виробництва олії ріпакової шляхом оптимізації процесу механізованого пресування насіння з урахуванням фізико-хімічних властивостей сировини та збереження біологічно активних компонентів.

*Завдання дослідження:*

1. Проаналізувати літературні джерела щодо харчових властивостей ріпакової олії та технологій її виробництва.
2. Дослідити вплив факторів пресування на вихід олії та якість макухи.
3. Провести експериментальні випробування зразків насіння ріпаку та визначити оптимальні параметри пресування.
4. Розробити регресійні моделі для прогнозування виходу олії та фізико-хімічних показників продукту.
5. Оцінити економічну та екологічну ефективність застосованої технології.

## 1 ОГЛЯДОВИЙ РОЗДІЛ

### 1.1 Харчові властивості ріпакової олії

Ріпак (*Brassica napus L.*) є другою за потенціалом сировиною для отримання рослинної олії, яка має високу поживну цінність та сприятливий склад жирних кислот, що робить її придатною як для харчових, так і для кормових цілей [1–2]. Ріпак, також відомий як зимова олійна культура, є провідною олійною культурою Європи, широко вирощуваною в Німеччині, Польщі, Чехії, Франції та Україні [3–7]. Загалом, олійні культури забезпечують численні поживні та функціональні властивості для здоров'я людини, завдячуючи вмісту олії, білків, жирних та амінокислот, вітамінів, фітостеролів та поліфенолів [8–10]. До олійних культур належать ріпак, соняшник, сафлор, гірчиця, льон, коноплі та інші, які є важливими сировинними джерелами для виробництва біодизелю та альтернативного відновлюваного палива, що сприяє зменшенню викидів парникових газів, викликаних спалюванням викопного палива [11]. У світі основними олійними культурами є соя, ріпак, бавовник, соняшник, пальмова та кокос (копра) [12–13]. В Україні основними олійними культурами є соняшник, соя та ріпак (рис. 1.1).

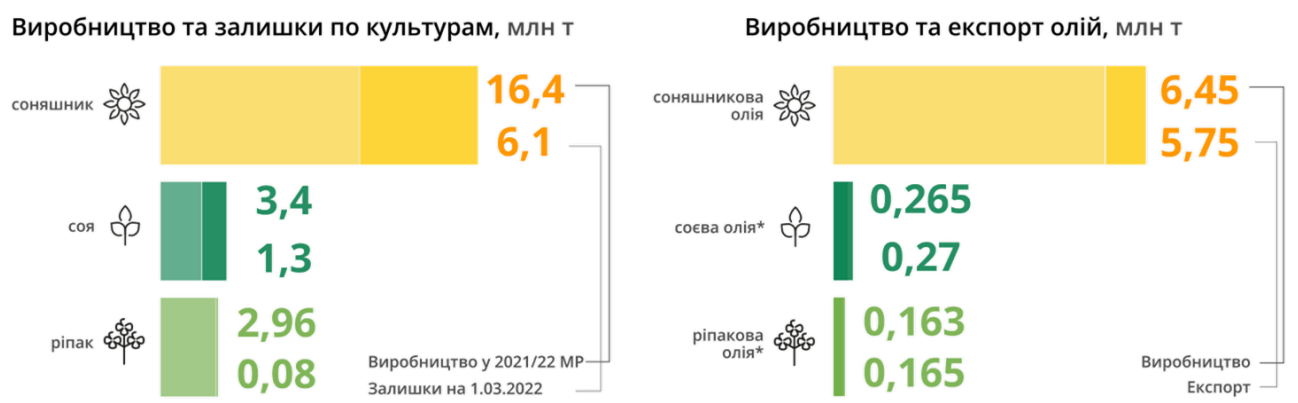


Рисунок 1.1 – Виробництво рослинної олії в Україні

Зазвичай олію з насіння олійних культур отримують шляхом екстракції за

допомогою органічних розчинників або механічного пресування (переважно шнековими пресами) перед екстракцією розчинником [14]. Сучасні методи отримання олії включають також ферментативну екстракцію [14], газо-підсилене механічне пресування [15–17], екстракцію надкритичними флюїдами [15–18], ультразвукову та мікрохвильову екстракції [12].

Механічне пресування олії з використанням гідравлічних або шнекових пресів має низку переваг у порівнянні з іншими методами: простота експлуатації, низька собівартість виробництва, менша кількість технологічних операцій та екологічна безпека процесу [12–19]. Основними техніками механічного пресування є холодне та гаряче пресування. Ефективність видобутку олії цими методами відносно невисока, тому для отримання залишкової олії із макухи здебільшого застосовують дифузійні або розчинникові методи [8, 20–22]. У промислових та напівпромислових масштабах зазвичай поєднують механічне пресування на шнекових пресах із екстракцією розчинником для максимізації ефективності видобутку олії [12]. Однак, з огляду на питання безпеки для здоров'я населення та навколишнього середовища, пов'язані з використанням розчинників, зростає інтерес до альтернативних, сталих та екологічно безпечних методів отримання олії [4, 8, 23].

У країнах, що розвиваються, механічне пресування за допомогою шнекових пресів забезпечує більш стійкий та безпечний метод видобутку олії з насіння олійних культур [24]. Для підвищення ефективності механічного пресування необхідне глибоке розуміння механічних та реологічних властивостей насіння олійних культур під час одновісного стискання (лабораторні дослідження). Для цього використовують універсальні машини для випробування на стиск та пресувальні камери з поршнем, що дозволяє описати процеси стискання та релаксації (механічні та реологічні властивості) насіння конкретної культури [25–26].

Ріпакова олія є цінним джерелом корисних жирів, вітамінів та антиоксидантів. Вона багата на моно- та поліненасичені жирні кислоти, що сприяють зниженню рівня «поганого» холестерину та підтримці серцево-судинної

системи. Також містить вітамін Е, фітостероли та поліфеноли, що забезпечують антиоксидантний захист. Завдяки високій температурі димлення та нейтральному смаку, ріпакова олія універсальна у кулінарії.

Таблиці 1.1 – Властивості ріпакової олії

| Показник   | Значення /<br>Склад | Функціональне значення  |
|--|---------------------|---|
| Вміст олеїнової кислоти (C18:1)                  | 55–65 %             | Зниження ліпопротеїнів низької щільності («поганого» холестерину), підвищення ліпопротеїнів високої щільності («хорошого» холестерину), користь для серця |
| Вміст лінолевої кислоти (C18:2, ω-6)             | 20–22 %             | Регуляція обміну речовин, користь для організму людини  |
| Вміст α-ліноленової кислоти (C18:3, ω-3)         | 9–11 %              | Антизапальний ефект, підтримка серцево-судинної системи   |
| Вміст насичених жирів (пальмітинова, стеаринова) | <7 %                | Низький ризик серцево-судинних захворювань  |
| Вітамін Е (токофероли)                           | Присутній           | Антиоксидантний ефект, захист клітин  |
| Вітамін К  | Присутній           | Сприяння згортанню крові, здоров'я кісток   |
| Фітостероли та поліфеноли                        | Присутні            | Зниження холестерину, антиоксидантний ефект   |
| Калорійність                                     | ~884 ккал/100 г     | Джерело енергії   |
| Температура димлення                             | ~200–230 °С         | Підходить для смаження та випічки   |

## 1.2 Механізована технологія виробництва ріпакової олії

Механізована технологія видобування олії з насіння ріпаку представлена на рисунку 1.2. На відміну від процесів отримання олії з насіння сафлору, кунжуту чи інших олійних культур, ця технологія має низку специфічних особливостей, які обумовлені високим вмістом біологічно активних компонентів у насінні: ефірних олій (до 1,2 %), білків (до 28 %) та глюкозинолатів (0,5–1,5 %). Ці сполуки визначають не тільки поживну та технологічну цінність олії, а й особливості її

переробки, зокрема необхідність мінімізації теплових втрат та збереження ароматичних речовин.

Процес розпочинається з очищення насіння від домішок, які становлять близько 1–2 % маси партії, що забезпечує високу якість сировини та стабільність подальшого пресування. Після очищення насіння надходить на багатоступеневе механічне пресування, що включає до чотирьох послідовних циклів з поступовим наростанням тиску до 25–30 МПа. Така багатоступенева обробка дозволяє максимально ефективно вилучити олію, при цьому термічну обробку насіння перед пресуванням зазвичай не застосовують. Це важливо для збереження ефірних олій, характерного аромату та мінімізації втрат цінних біологічно активних речовин.

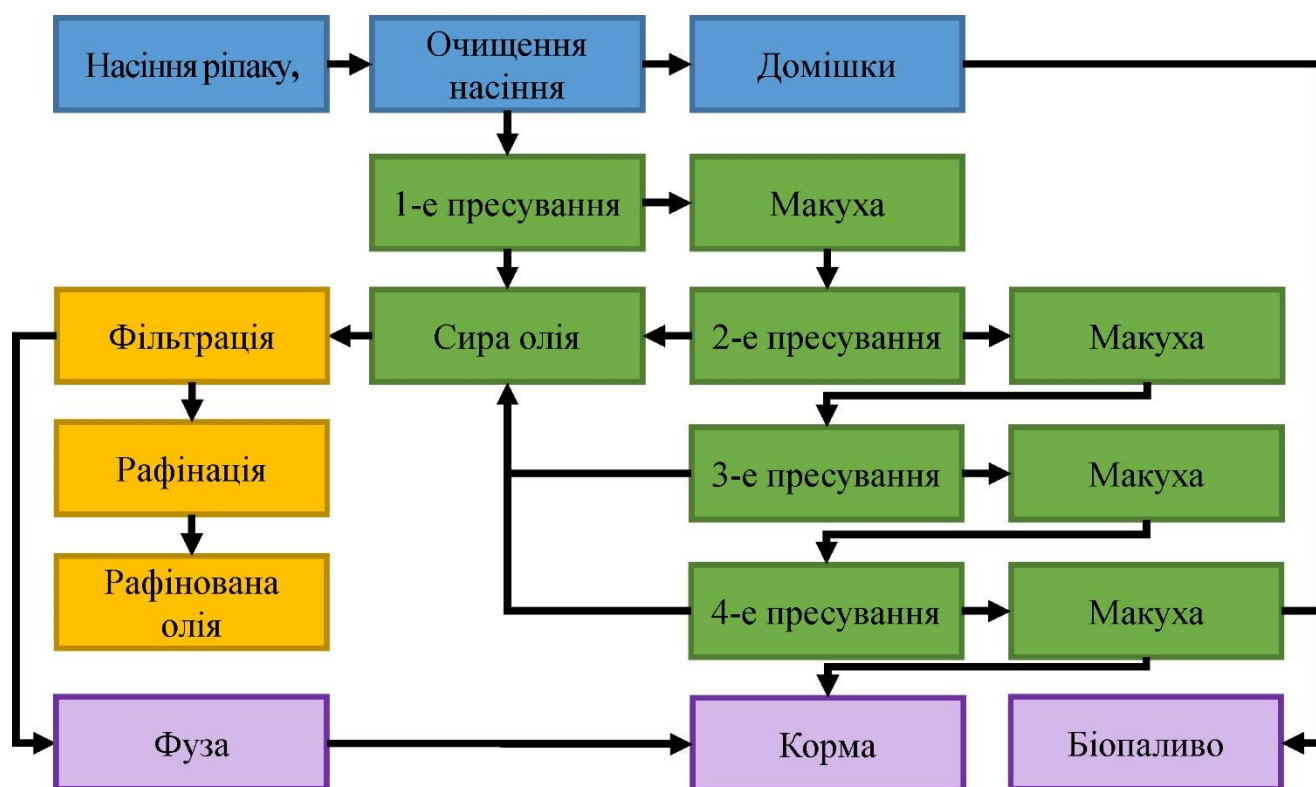


Рисунок 1.2 – Схема механізованої технології виробництва ріпакової олії

На першому етапі пресування вилучають близько 60 % загальної кількості олії, на другому – додатково 25 %, а третій і четвертий етапи дозволяють добути ще по 7–8 % олії. У результаті сумарний вихід олії становить 38–42 % від маси сировини. Залишкова макуха містить 6–8 % олії і характеризується високим

вмістом білка (до 35 %), що робить її цінним компонентом для виробництва комбікормів, а також придатною для виробництва біопаливних гранул.

Сиру олію після відділення від твердої фази піддають фільтрації, в процесі якої видаляється 0,5–1 % фузу та інших механічних домішок. Для поліпшення органолептичних властивостей та стабільності олії застосовують рафінацію, яка включає дві основні стадії: нейтралізацію при 70–80 °С для видалення вільних жирних кислот і гірких компонентів, а також дезодорацію при 180–200 °С для усунення різкого запаху та неприємного присмаку, характерного для ріпакової олії. Після рафінації олія має кислотне число  $\leq 0,3$  мг КОН/г та вологість  $\leq 0,1$  %, що відповідає високим стандартам якості.

Усі побічні продукти, такі як фуз та макуха, ефективно використовують у промисловості, що забезпечує безвідходність технологічного процесу: макуха йде на виробництво комбікормів та паливних гранул, а фуз можна використовувати як компонент біопалива. Завдяки цьому технологія видобування олії з насіння ріпаку є не лише економічно ефективною, а й екологічно безпечною.

### 1.3 Обладнання для механізованої технології виробництва ріпакової олії

















Таблиця 1.2 демонструє повний перелік обладнання, необхідного для механізованої технології виробництва ріпакової олії, що охоплює всі етапи виробничого процесу – від підготовки насіння до отримання готового продукту та переробки побічних матеріалів.

На етапі попередньої підготовки насіння відбувається очищення та калібрування сировини для забезпечення стабільності процесу та високої якості олії. Для цього застосовують різні сепаратори. Вібросітний сепаратор видаляє великі домішки та пил, вібропневматичний сепаратор забезпечує розділення насіння за масою та об'ємом, трієрний сепаратор сортує насіння за розміром та формою, а аеродинамічний сепаратор ефективно очищує насіння від легких та пилових частинок за допомогою повітряного потоку.

Обладнання для механічного видобування олії забезпечує безпосередній

процес вилучення олії з насіння. Гідравлічний прес дозволяє отримати максимальний вихід олії за рахунок високого тиску при низьких температурах, шнековий прес забезпечує безперервний процес з можливістю регулювання тиску та швидкості подачі, прес з обробкою парою підвищує ефективність видобутку за рахунок легкого нагрівання насіння, а прес-екструдер поєднує функції пресування та екструзії для оптимізації вилучення олії та покращення фізико-механічних властивостей макухи.

Таблиця 1.2 – Перелік обладнання для механізованої технології виробництва ріпакової олії

| Попередня підготовка насіння  |   |   |   |
|---|---|---|---|
|   |   |    |   |
| Віброрешітний сепаратор   | Вібропневматичний сепаратор   | Трієрний сепаратор  | Аеродинамічний сепаратор  |
| Обладнання для механічного відбудування олії  |   |   |   |
|  |  |   |  |
| Гідравлічний прес   | Шнековий прес   | Прес з обробкою парою   | Прес-екструдер  |
| Обладнання для фільтрації олії  |   |   |   |
|  |  |  |  |
| Фільтр-прес   | Напірний листовий фільтр  | Фільтр тонкого очищення   | Вібросепаратор  |
| Обладнання для переробки макухи та екструдування                                    |   |   |   |
|  |  |   |  |
| Охолоджувач макухи  | Подрібнювач макухи  | Екструдер   | Просіювач макухи  |

| Додаткове обладнання  |   |  |   |
|---|---|--|---|
|  |  |  |  |
| Норія   | Конвеєр   | Паровий котел  | Панель управління   |

Після пресування сира олія містить тверді домішки, які потрібно видаляти за допомогою обладнання для фільтрації. Фільтр-прес відокремлює великі механічні частинки та макуху, напірний листовий фільтр забезпечує більш тонке очищення, фільтр тонкого очищення гарантує прозорість та стабільність олії, а вібросепаратор ефективно відділяє залишки макухи та фуз, покращуючи якість продукту.

Макуха, що залишається після пресування, є цінним побічним продуктом та потребує додаткової обробки. Охолоджувач макухи знижує температуру продукту після пресування або екструдкування, подрібнювач макухи забезпечує однорідність продукту для подальшого використання, екструдер обробляє макуху для підвищення поживної або кормової цінності та виробництва кормових гранул, а просіювач макухи відокремлює великі фракції, забезпечуючи однорідність продукту.

Для безперебійного та автоматизованого процесу також застосовують додаткове обладнання. Норія транспортує насіння та макуху між технологічними вузлами, конвеєр забезпечує подачу сировини та готового продукту, паровий котел генерує пару для технологічної обробки та пресування, а панель управління централізовано контролює роботу всього обладнання, забезпечуючи автоматизацію та безпеку виробничого процесу.

#### 1.4 Аналіз дослідження пресування насіння ріпаку для виробництва олії

Аналіз дослідження пресування насіння ріпаку охоплює комплекс наукових підходів, спрямованих на виявлення закономірностей між фізико-механічними властивостями насіння, параметрами технологічного обладнання та кількісно-якісними показниками отриманої олії. Наукові роботи у цій сфері визначають, що

ефективність пресування формується під впливом вологості, щільності та структури насіння, а також режимів попередньої підготовки, які включають очищення, калібрування, луцення та термічну обробку.

Дослідження показують, що оптимальна вологість насіння ріпаку перед пресуванням повинна становити приблизно 6–8 %, оскільки надлишок вологи зменшує вміст сухих речовин і погіршує руйнування клітинних стінок, тоді як пересушування підвищує енергозатрати в процесі деформації й стискання ядра. Наприклад, у оглядовому дослідженні методів холодного пресування було зазначено, що підготовка сировини (сушіння, термічна обробка) має значний вплив на вихід та якість олії.

Важливу роль відіграє температура підготовки: підігрів насіння до  $\sim 60\text{--}70\text{ }^{\circ}\text{C}$  сприяє зниженню в'язкості олії та ослабленню міжклітинних зв'язків, що підвищує ступінь віджиму. При цьому слід враховувати, що надмірне підігрівання може призвести до термічного руйнування біологічно активних компонентів (токоферолів, фенольних сполук) та погіршення органолептики. Наприклад, у дослідженні виявлено, що холодне пресування зберігає вищий вміст біологічно активних речовин порівняно з гарячим пресуванням чи рафінованими оліями.

У ході досліджень пресування значна увага приділяється конструктивним особливостям шнекових та гідравлічних пресів. Шнекові преси характеризуються поєднанням процесів транспортування, подрібнення і стискання сировини. Експериментальні дані свідчать, що ефективність роботи таких пресів залежить від геометрії шнека, кута нарізки, форми каналу, довжини зони стискання та величини зазору в матриці. Так, у роботі, присвяченій «micro-pressing» насіння ріпаку, зазначено, що час і ступінь стискання мають ключове значення. Підвищення тиску пресування до  $\sim 5\text{--}8\text{ МПа}$  дає змогу збільшити вихід олії, однак надто високий тиск спричиняє інтенсивне нагрівання сировини та погіршення якості продукту через руйнування термочутливих компонентів.

У гідравлічних пресах реалізується повільніший, але більш контрольований процес розриву олійних клітин, що дає змогу отримати олію з кращими органолептичними властивостями, хоча й зі зниженим загальним виходом

порівняно із шнековими системами. Цей вибір часто обумовлений пріоритетом якості над максимальним виходом.

Наукові праці з механіки пресування насіння ріпаку підкреслюють значення рівномірності навантаження та швидкості деформації. При збільшенні швидкості стискання інтенсивніше проявляються в'язкопружні властивості ріпакового насіння, що знижує коефіцієнт вилучення олії. Моделювання напружено-деформованого стану насінневої маси дозволяє встановити, що руйнування клітинної структури відбувається нерівномірно, тому застосування багатоступеневих режимів пресування (наприклад, попереднє пресування на низькому тиску + фінальний високий тиск) значно підвищує загальний вихід.

Сучасні дослідження також зосереджені на впливі термопластичних властивостей білково-олійної матриці, які змінюються залежно від температури та тиску, що вимагає точного керування тепловими потоками в зоні стискання. Наприклад, оглядова стаття підкреслює, що холодне пресування (без значного нагріву) є «eco friendly» методом, але має нижчу продуктивність.

Важливою частиною аналізу є вивчення залишкового вмісту олії в макусі, адже ступінь її знежирення визначає ефективність роботи обладнання. Експериментальні результати підтверджують, що при раціональному поєднанні температурного режиму, вологості та геометрії пресувального каналу можна досягти залишкового вмісту олії в макусі на рівні  $\sim 7-10\%$ , що відповідає сучасним промисловим нормам. До того ж, дослідження показують, що метод холодного пресування забезпечує кращу якість олії (вищий вміст антиоксидантів, токоферолів), але трохи нижчий вихід. Окремі дослідження спрямовані на підвищення енергоефективності процесу за рахунок застосування регульованих електроприводів, оптимізації частоти обертання шнеків та впровадження адаптивних систем контролю тиску.

Процес стискання характеризує залежність між силою стискання та деформацією насіння, тоді як процес релаксації описує залежність сили релаксації від часу при постійній деформації для максимального видобутку залишкової олії з макухи. Ці процеси є ключовими для визначення параметрів одновісного

пресування: деформації, напруги, твердості, тиску/сили до точки виділення олії, енергії до точки виділення, маси олії, виходу олії, ефективності видобутку, енергії деформації, об'ємної енергії та нормалізованої сили релаксації насіння. Ці показники залежать як від фізичних властивостей насіння (вологість, стадія зрілості, генотип), так і від вхідних факторів обробки (швидкість, сила, температура нагрівання, час нагрівання та діаметр пресувальної камери).

У процесі одновісного стискання криві «сила–деформація» дозволяють визначити максимальну силу стискання та енергію деформації, необхідну для видобутку олії, а також оцінити безпеку роботи пресувального обладнання [27]. Вказані фактори обробки безпосередньо впливають на механічне пресування олії на промисловому рівні, і їхню дію можна дослідити за допомогою відповідного експериментального планування, наприклад, методології поверхні відгуку (RSM) у поєднанні з планом Бокса–Бенкена (BBD) [28–32]. RSM – це набір математичних і статистичних методів для оцінки впливу кількох незалежних факторів [33–34].

RSM/BBD доцільно застосовувати для різних олійних культур (ріпак, соняшник, кунжут, льон тощо) у процесі одновісного стискання, щоб дослідити вплив факторів обробки на механічні та реологічні властивості та розробити оптимальну систему механічного пресування (шнекові преси) для застосування у країнах, що розвиваються. Найважливіше, що оптимальні параметри залежать від властивостей конкретного насіння і мають вивчатися та оптимізуватися індивідуально [35].

Таким чином, аналіз наукових досліджень пресування насіння ріпаку свідчить про складний взаємозв'язок між властивостями сировини, конструкцією пресувального обладнання та технологічними параметрами процесу. Підвищення ефективності виробництва ріпакової олії можливе завдяки комплексній оптимізації підготовки насіння, удосконаленню конструкції пресів і впровадженню адаптивних режимів роботи, що забезпечують максимальний вихід олії при збереженні її високої якості.

## Висновки за розділом

Ріпакова олія належить до високоцінних рослинних олій завдяки збалансованому складу жирних кислот, наявності природних антиоксидантів. Характерною особливістю її складу є домінування мононенасичених (олеїнової) та поліненасичених жирних кислот (лінолевої та  $\alpha$ -ліноленової), що забезпечує позитивний вплив на ліпідний обмін та зниження ризику серцево-судинних захворювань. Низький вміст насичених жирів робить ріпакову олію більш корисною порівняно з багатьма іншими рослинними оліями. Вітамін Е, фітостероли та поліфеноли посилюють її антиоксидантний потенціал. Завдяки високій температурі димлення та нейтральному смаку ріпакова олія є універсальним продуктом для кулінарного використання, а також придатною для харчової промисловості.

Механізована технологія виробництва ріпакової олії забезпечує ефективне вилучення цінних компонентів насіння завдяки багатоступеневому пресуванню без інтенсивної термічної обробки, що дозволяє зберегти біологічно активні речовини. Послідовне підвищення тиску під час пресування забезпечує вихід олії на рівні 38–42 %, а отримана макуха з високим вмістом білка є цінним побічним продуктом для кормової та біоенергетичної галузей. Рафінація дозволяє отримати стабільну олію високої якості, а використання фузу й макухи сприяє маловідходності виробництва. Перелік обладнання формує цілісну технологічну лінію, у якій кожна машина виконує конкретну функцію – від очищення насіння до фінішного фільтрування та екструдуювання побічних продуктів. Сепаратори забезпечують якість сировини, преси – максимальний вихід олії, фільтри – чистоту та стабільність продукту, а обладнання для обробки макухи – раціональне використання залишків. Додаткові засоби автоматизації та транспортування гарантують безперервність і керованість процесу.

Аналіз наукових досліджень щодо пресування насіння ріпаку свідчить про складний взаємозв'язок між властивостями сировини, конструкцією пресувального обладнання та технологічними параметрами процесу. Підвищення ефективності виробництва ріпакової олії можливе завдяки комплексній оптимізації підготовки насіння, удосконаленню конструкції пресів та впровадженню адаптивних режимів роботи, що забезпечують максимальний вихід олії при збереженні її високої якості.

## 2 ДОСЛІДНИЦЬКО-АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ

### 2.1 Сировина, використана в дослідженні

Для проведення експериментальних досліджень було використано насіння ріпаку сорту Атлант, який включений до Державного реєстру сортів рослин України з 2001 р. Оригіратором сорту є Мороз В.М. (селекція Інституту олійних культур НААН). Сорт належить до середньоранньої групи стиглості, характеризується середньою висотою рослин 180 см та потенційною урожайністю до 5,2 т/га (середня урожайність – 3,2–4,5 т/га). Сорт вирізняється високою зимостійкістю, витримуючи зниження температури до  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ , що забезпечує надійне перезимівлювання в умовах континентального клімату Лісостепу та Степу України. Особливістю даного сорту є відсутність ерукової кислоти у складі насіння, що дозволяє використовувати його у якості сировини для виробництва харчової продукції.

Для досліджень було підготовано зразок очищеного насіння масою 30 кг. Перед проведенням експерименту насіння зберігали у лабораторних умовах при температурі  $22\text{ }^{\circ}\text{C}$  та відносній вологості повітря 30 %.

Сорт ріпаку Атлант володіє низкою технологічних і біохімічних переваг, що роблять його особливо придатним для переробки на олію. Насіння сорту характеризується високим вмістом олії, до 45 %, що забезпечує значний вихід готової продукції та підвищує економічну ефективність переробки. Відсутність ерукової кислоти робить олію харчовою високої якості, що відповідає міжнародним стандартам безпечності, а низький вміст глюकोзинолатів (20 мкмоль/г) дозволяє використовувати макуху та шрот у кормовому виробництві без обмежень.

Однорідність розміру та маса 1000 насінин (3,6 г) забезпечують рівномірне подрібнення та ефективну роботу пресів або екстракційних установок. Висока стійкість сорту до розтріскування стручків зменшує механічні втрати насіння під час збирання, що гарантує отримання більшої кількості сировини для переробки.

Пластичність і здатність формувати урожай навіть у несприятливих погодних умовах забезпечують стабільне постачання сировини для переробних підприємств. Крім того, сорт добре пристосований до механізованого вирощування, що зменшує витрати на виробництво насіння та знижує собівартість олійної сировини.

Поєднання високої врожайності, оптимального вмісту олії та низьких витрат на вирощування робить сорт Атлант вигідним для переробних підприємств будь-якого масштабу.



Рисунок 2.1 – Вихідний матеріал

## 2.2 Реагенти

Для визначення пероксидного числа (PV), кислотного числа (AV) та вільних жирних кислот (FFA) у видобутій олії при різних температурах попередньої обробки використовували такі хімічні реактиви: хлороформ, оцтову кислоту, розчин йодиду калію (KI), розчин тіосульфату натрію ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ), розчин крохмалю, 0,1 н регульований розчин гідроксиду калію в етиловому спирті, 1 % розчин фенолфталеїну в етиловому спирті (приготований у 95 % етиловому спирті) та суміш 97 % етилового спирту з діетиловим ефіром. Усі хімічні реактиви відповідали високим стандартам чистоти для аналітичних досліджень.

Хлороформ застосовували як розчинник для олії, а оцтова кислота та йодид

калію забезпечували проведення йодометричного титрування для визначення пероксидного числа. Тіосульфат натрію використовували як титрант для реакції з йодом, а крохмаль застосовували як індикатор кінця титрування. 0,1 н розчин гідроксиду калію слугував для визначення кислотного числа та вільних жирних кислот, а 1 % розчин фенолфталеїну використовували як індикатор у лужному титруванні. Суміш етилового спирту з діетиловим ефіром використовували для розчинення олії та забезпечення точності титрування.

Процедури та методику визначення PV, AV та FFA наведено в наступному розділі, де докладно описані умови титрування, обробки зразків та розрахунки показників якості олії.

### 2.3 Визначення вмісту вологи та олії

Відсотковий вміст вологи та олії в зразку насіння ріпаку визначали шляхом висушування до постійної маси та екстракції за допомогою апарата Сокслета [36, 37, 38, 39].

Для визначення вологи зразок насіння висушували в сушильній шафі MEMMERT GmbH + Co. KG при температурі 105 °C до постійної маси. Цей метод дозволяє видалити вільну вологу зі зразка і точно визначити її масову частку.

Для визначення вмісту олії використовували апарат Сокслета. Спочатку 10 г насіння ріпаку подрібнювали у лабораторному млинку до однорідного стану. Подрібнений зразок завантажували у спеціальний трубчастий патрон, зверху накривали ватою для запобігання забруднення. Патрон поміщали у екстрактор об'ємом 250 мл, який з'єднували з колбою на 500 мл, що містила 250 мл петролейного ефіру.

Комплект обладнання встановлювали на нагрівальній пристрій при 60 °C, де розчинник кипів та конденсувався протягом 24 годин, забезпечуючи безперервну екстракцію олії. Після завершення екстракції робили відгонку розчинника.

Вимірювання проводили триплікатно для забезпечення достовірності результатів. Для зважування екстрагованої олії використовували електронні ваги

Kern 440–35 з точністю 0,001 г.



Сушильна шафа MEMMERT GmbH +  
Co. KG



Електронні ваги Kern 440–35

Рисунок 2.2 – Загальний вигляд обладнання

Вміст води та олії обчислювали за формулами, наведеними у [40]. Для досліджуваного зразка вміст води становив  $6,37 \pm 0,24$  %, а олії –  $41,35 \pm 0,70$  %.

Додатково слід зазначити, що застосування методу екстракції в апараті Сокслета дозволяє максимально повно екстрагувати ліпіди із насіння, а точне зважування і контроль температури гарантують високу точність і відтворюваність результатів. Ці показники є критично важливими для оцінки потенціалу насіння сорту «АТЛАНТ» щодо переробки на олію високої якості.

#### 2.4 Експериментальний план факторів пресування за методом Бокс–Бенкена

Коли кілька технологічних факторів і їх взаємодія можуть впливати на кінцеві параметри продукції, для оптимізації обробки застосовують методологію поверхні відгуку (Response Surface Methodology, RSM) з використанням

експериментального плану Бокс–Бенкена (Box–Behnken Design, BBD) [41, 42, 43]. Цей підхід дозволяє систематично досліджувати взаємодію між факторами та визначати оптимальні умови для максимізації вихідних показників.

На основі заданих вхідних факторів був сформований план експерименту з 17 прогонів, при цьому центральна точка повторювалася п'ять разів, що забезпечує оцінку внутрішньої точності та варіативності експерименту. Незалежними факторами були: діаметр пресової камери, температура нагрівання та тривалість нагрівання, кожен з яких встановлювався на трьох рівнях: низькому, центральному та високому.

Математична модель, що описує план Бокс–Бенкена, наведена у рівнянні:

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i_1 < j}^k \sum_j^k \beta_{ij} X_i X_j \quad (2.1)$$

де  $Y$  – змінна відгуку (response variable);  $i$  та  $j$  – індекси для лінійних та квадратичних коефіцієнтів;  $\beta_0$ ,  $\beta_i$ ,  $\beta_{ii}$ ,  $\beta_{ij}$  – коефіцієнти регресії для інтерсепту, лінійних, квадратичних та інтеракційних членів відповідно;  $X_i$  та  $X_j$  – незалежні змінні;  $k$  – кількість факторів.

Для зручності побудови та порівняння експериментальних результатів фактори були закодовані у діапазоні від  $-1$  до  $+1$  (низький, центральний та високий рівні) за формулою [44, 45]:

$$x_i = \frac{X_i - X_0}{\Delta X} \quad (2.2)$$

де  $x_i$  – закодоване значення  $i$ -го фактора,  $X_i$  – реальне (некодоване) значення  $i$ -го фактора,  $X_0$  – значення фактора у центральній точці, а  $\Delta X$  – крок зміни фактора від центрального рівня до крайніх значень.

Використання плану Бокс–Бенкена дозволяє не лише оцінити індивідуальний вплив кожного фактора, а й кількісно охарактеризувати їх взаємодію, що критично для визначення оптимальних умов пресування ріпакової олії з метою

максимального виходу та мінімізації окиснення та деградації жирних кислот.

## 2.5 Попередня обробка зразків насіння ріпаку

Перед проведенням експериментів з пресування зразки насіння ріпаку проходили попередню обробку (кондиціонування) при різних температурах та тривалості нагрівання. Попередню обробку проводили при температурах 40, 60 та 80 °C та тривалості нагрівання 30, 60 та 90 хв з використанням сушильної шафи MEMMERT GmbH + Co. KG.

Метою попередньої обробки було регулювання вмісту вологи та фізико-хімічних властивостей насіння, що безпосередньо впливає на ефективність екстракції олії та її якість. Нагрівання насіння дозволяє зменшити в'язкість олії, полегшує процес пресування та сприяє підвищенню виходу олії. Крім того, попереднє кондиціонування сприяє частковому руйнуванню клітинної структури насіння, що підвищує доступність олії та активних компонентів при механічному віджиманні.

Для кожної температурної та часової комбінації обробки виконували триплікатні проби, щоб забезпечити достовірність результатів та врахувати можливу варіабельність у властивостях насіння. Попередньо оброблене насіння відразу використовували для наступних етапів пресування та визначення якості олії, зберігаючи при цьому умови лабораторного контролю температури та вологості для мінімізації деградації компонентів насіння.

Таким чином, попередня обробка насіння ріпаку була ключовим етапом підготовки зразків, що забезпечував стандартизовані умови для дослідження впливу факторів пресування на вихід та якість олії, а також дозволяв коректно оцінити вплив температури та часу кондиціонування на фізико-хімічні параметри ріпакової олії.

## 2.6 Компресійні випробування зразків насіння ріпаку

Для оцінки механічних властивостей та виходу олії зразок насіння ріпаку піддавали компресійному пресуванню при постійній висоті пресування 100 мм у пресових камерах діаметром 60, 80 та 100 мм, використовуючи відповідні поршні. Маса зразків становила 190,33 г, 338,80 г та 524,54 г відповідно. На основі площі поперечного перерізу пресових камер обчислено об'єм зразків:  $28,27 \times 10^{-5}$ ,  $50,27 \times 10^{-5}$  та  $78,54 \times 10^{-5} \text{ м}^3$  відповідно.

Попередні експерименти дозволили визначити максимальну силу пресування, при якій не виникає ефект зубчастості поршня або викиду макухи через отвори пресу. Для камер діаметром 60, 80 та 100 мм максимальні сили склали 180, 300 та 450 кН при швидкості пресування 4 мм/хв.

На основі цих умов було протестовано всі 17 комбінацій факторів, визначені за планом Бокс–Бенкена, із застосуванням універсальної машини для компресійних випробувань. Вимірювані параметри включали масу олії, вихід олії, ефективність видобутку олії та енергію деформації.

Масу олії визначали гравіметрично, як різницю між масою макухи та початковою масою зразка. Вихід олії ( $O_Y$ , %) обчислювали за формулою:

$$O_Y = \left[ \left( \frac{M_O}{M_S} \right) \times 100 \right] \quad (2.3)$$

де  $M_O$  – маса виділеної олії (г), а  $M_S$  – маса насіння до пресування (г).

Ефективність видобутку олії ( $O_{EE}$ , %) розраховували на основі вмісту олії в насінні, визначеного методом екстракції в апараті Сокслета ( $O_S$ ):

$$O_{EE} = \left[ \left( \frac{O_Y}{O_S} \right) \times 100 \right] \quad (2.4)$$

Енергію деформації ( $E_N$ , кДж) обчислювали як суму роботи при поступовому

стисненні:

$$E_N = \sum_{n=0}^{n=i-1} \left[ \left( \frac{F_{n+1} + F_n}{2} \right) \cdot (x_{n+1} - x_n) \right] \quad (2.5)$$

де  $F_{n+1} + F_n$  – сили пресування (кН),  $x_{n+1} - x_n$  – деформація (мм),  $n$  – номер точки вимірювання,  $i$  – кількість секцій деформації.

Жорсткість ( $H_D$ , кН/мм) визначали як відношення максимальної сили пресування до величини деформації:

$$H_D = \frac{M_F}{D_F} \quad (2.6)$$

Об'єм зразка насіння ріпаку ( $V_M$ , м<sup>3</sup>) обчислювали за формулою:

$$V_M = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot H \quad (2.6)$$

де  $D$  – діаметр пресової камери (м),  $H$  – висота пресування зразка (м).

Вхідними факторами для процесів пресування та релаксації були сила, швидкість та час, причому релаксаційний процес автоматично поєднувався з пресуванням для оцінки пружно-в'язких властивостей насіння та макухи.

На рисунку 2.3 показано: пресові камери з поршнями діаметром 60, 80 та 100 мм; процес пресування та виділення олії; установку для пресування; зразок насіння перед пресуванням, макуху та виділену олію.

Отримані результати використовували для детальної оцінки впливу діаметра пресової камери, сили пресування, швидкості та часу на масу олії, її вихід, ефективність видобутку та енергію деформації, що пояснено у розділі 4.



Рисунок 2.3 – Загальний вигляд обладнання для пресування насіння ріпаку і результат пресування (макуха і олія)

## 2.7 Спектрофотометричний аналіз видобутої олії

Спектрофотометричний аналіз видобутої олії ріпакової проводили за допомогою UV-VIS спектрофотометра VIS V-10 Plus. Аналіз полягав у визначенні коефіцієнтів поглинання та пропускання світла олією у заданому діапазоні довжин хвиль, від 325 до 600 нм, що включає ультрафіолетовий (UV) та видимий (VIS) спектри.

Дані про поглинання та пропускання світла дозволяють оцінити якість олії, зокрема її здатність захищати від UV-випромінювання, що має практичне значення при використанні олії в косметичній та харчовій промисловостях. Високий рівень поглинання у UV-діапазоні свідчить про наявність антиоксидантів та природних пігментів, що захищають олію від фотодеградації та забезпечують стабільність при зберіганні.

Для проведення аналізу олію розбавляли у відповідному розчиннику, щоб уникнути перенасичення спектра та забезпечити точність вимірювань. Кожен зразок олії аналізували триплікатно, а отримані дані використовували для розрахунку середніх значень коефіцієнтів поглинання та пропускання.

Спектрофотометричний аналіз дозволяє контролювати якість видобутої олії, оцінювати її стабільність при зберіганні та визначати її потенційні функціональні властивості, включаючи здатність до поглинання ультрафіолетового випромінювання, що має значення як для харчової безпеки, так і для косметичних застосувань [51].

## 2.8 Хімічний аналіз видобутої олії при різних температурах попередньої обробки

Ріпакова олія, видобута після попередньої обробки насіння при температурах від 40 до 80 °C, була проаналізована з точки зору пероксидного числа (PV), кислотного числа (AV) та вмісту вільних жирних кислот (FFA). Для порівняння контрольним зразком слугувала олія, яку зберігали при лабораторній температурі 22 °C. Процедури визначення відповідали методикам, описаним у джерелах [8, 52, 53].

*Визначення пероксидного числа (PV).* Для аналізу PV 5 г зразка олії зважували у мірну колбу, після чого додавали 30 мл суміші хлороформу та оцтової кислоти в співвідношенні 2:3 для розчинення олії. Суміш інтенсивно струшували протягом 1 хвилини, після чого додавали 30 мл дистильованої води. Титрування проводили 0,1 М розчином тіосульфату натрію, доки жовтий колір не зникав, використовуючи 1

мл 1% розчину крохмалю як індикатор.

Пероксидне число виражали в міліеквівалентах кисню на кг олії. Цей показник дозволяє оцінити ступінь окиснення олії та її стабільність під час зберігання.

*Визначення кислотного числа (AV) та вільних жирних кислот (FFA).* Для визначення AV та FFA 5 г зразка олії зважували у мірну колбу, після чого додавали 100 мл нейтралізованого етилового спирту та 2 мл 1 % розчину фенолфталеїну як індикатора. Суміш відразу титрували етанольним розчином KOH (0,1 N) до появи світло-рожевого забарвлення.

Кислотне число (AV) та вміст вільних жирних кислот (FFA) виражали в мг KOH/г олії, що дозволяє оцінити хімічну чистоту олії та ступінь гідролізу тригліцеридів під час обробки.

*Особливості методики та обробка даних.* Всі вимірювання виконували двічі, а результати усереднювали для підвищення точності. Цей підхід дозволяє точно оцінити вплив температури попередньої обробки на окиснювальні та гідролітичні процеси у ріпаковій олії, що є критично важливим для подальшого використання олії у харчовій, косметичній та промисловій сферах.

Методика забезпечує можливість порівнювати якість олії при різних умовах попередньої обробки та визначати оптимальні параметри температури і часу, які зберігають максимальну стабільність та хімічну цілісність олії.

## 2.9 Статистичний аналіз обчислених показників

Усі отримані експериментальні дані були піддані статистичній обробці з використанням програмного пакета STATISTICA 13 [54]. Для аналізу застосовували низку статистичних методів, що дозволяють всебічно оцінити взаємозв'язки між факторами обробки та показниками виходу та якості олії.

По-перше, проводили базовий статистичний аналіз, який включав визначення середніх значень, стандартних відхилень та кореляційний аналіз для оцінки взаємозв'язку між окремими параметрами, такими як маса олії, вихід олії,

ефективність видобутку та енергія деформації.

По-друге, для більш глибокого аналізу застосовували загальні лінійні моделі (GLM), які включали:

- ANOVA з повторними вимірюваннями (repeated measures ANOVA) для визначення статистично значущого впливу факторів попередньої обробки та діаметра пресової камери на результати пресування;
- пост-хок тести для порівняння середніх значень між різними рівнями факторів;
- просту та множинну регресію для оцінки лінійних та взаємопов'язаних залежностей між незалежними змінними та показниками відгуку;
- регресію поверхні відгуку (response surface regression) для моделювання нелінійних взаємодій між факторами та оптимізації умов пресування.

Для всіх статистичних тестів застосовували рівень значущості 5 % ( $p < 0,05$ ), що дозволяє достовірно визначити вплив факторів на результати експерименту та виділити статистично значущі ефекти.

Такий підхід забезпечує комплексну оцінку даних, дозволяє виявити ключові фактори, що визначають вихід та якість ріпакової олії, та створити математичні моделі для оптимізації процесу пресування. Крім того, статистична обробка результатів дозволяє порівняти ефективність різних режимів попередньої обробки, оцінити варіабельність даних та підвищити наукову достовірність висновків.

### Висновки за розділом

1. Сорт ріпаку Атлант відзначається високою врожайністю, значним вмістом олії (до 45 %), відсутністю ерукової кислоти та низьким вмістом глюкозинолатів, що забезпечує харчову та кормову безпеку продукції та робить його придатним для промислової переробки. Визначено вміст вологи ( $6,37 \pm 0,24$  %) та олії ( $41,35 \pm 0,70$  %) у вихідних зразках насіння, а попередня термічна обробка сприяла підвищенню доступності олії та ефективності пресування.

2. Компресійні випробування та спектрофотометричний аналіз підтвердили

високу якість і стабільність олії, а хімічний аналіз показав вплив температури попередньої обробки на пероксидне та кислотне числа.

3. Статистична обробка даних із використанням ANOVA, регресії та поверхні відгуку дозволила виявити ключові фактори, що впливають на вихід та якість олії, і визначити оптимальні умови її видобутку. Таким чином, сорт Атлант є високоефективною сировиною для промислового виробництва олії високої якості.

### 3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИЙ РОЗДІЛ

#### 3.1 Визначення максимальної сили пресування

У даному дослідженні проведено два види компресійних випробувань. Перший тест був контрольним експериментом, метою якого було визначити максимальні сили пресування для різних діаметрів пресових камер при початковій висоті зразка 100 мм та швидкості пресування 4 мм/хв. Другий тест включав комбінації факторів пресування (діаметр пресової камери, температуру попередньої обробки та тривалість нагрівання) відповідно до експериментального плану Бокс–Бенкена.

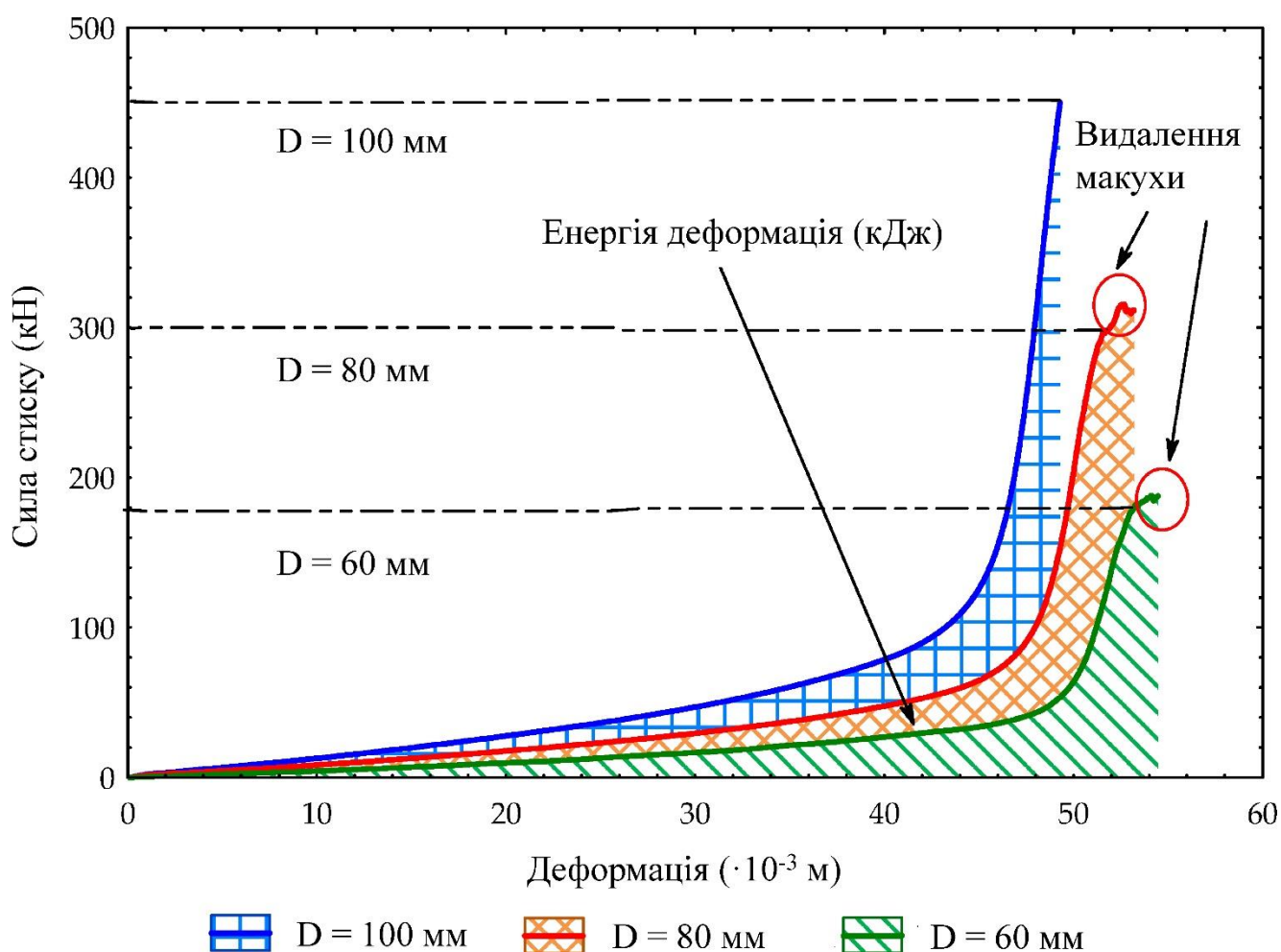


Рисунок 3.1 – Криві «сила – деформація» для насіння ріпаку при різних діаметрах пресових камер, що демонструють енергію деформації та викид макухи

За результатами контрольного експерименту обчислені маса видобутої олії (г), вихід олії (%), ефективність видобутку олії (%), енергія деформації (кДж) та жорсткість (кН/мм), що наведено у таблиці 3.1. Спостерігалось, що маса олії, енергія деформації та жорсткість збільшувались із зростанням діаметра пресової камери, тоді як деформація, вихід олії та ефективність видобутку олії зменшувались. Енергію деформації визначали як площу під кривою залежності сили пресування від деформації (рисунок 3.1) [27, 49, 50].

Таблиця 3.1 – Контрольні експерименти для визначення максимальної сили пресування при видобутку олії з насіння ріпаку

| Діаметр камери $V_D$ (мм)                | 60 <sup>a</sup> | 80 <sup>b</sup> | 100 <sup>c</sup> |
|--|-----------------|-----------------|------------------|
| Максимальна сила $M_F$ (кН)              | 180             | 300             | 450              |
| Маса олії $M_O$ (г)                      | 30,67 ± 0,56    | 49,88 ± 2,06    | 72,22 ± 1,89     |
| Вихід олії $O_Y$ (%)                     | 16,13 ± 0,31    | 14,74 ± 0,62    | 13,76 ± 0,37     |
| Ефективність видобутку олії $O_{EF}$ (%) | 38,97 ± 0,73    | 35,62 ± 1,45    | 33,31 ± 0,88     |
| Енергія деформації $E_N$ (кДж)           | 1,21 ± 0,03     | 2,05 ± 0,05     | 2,81 ± 0,02      |
| Деформація $D_F$ (мм)                    | 52,88 ± 0,75    | 51,41 ± 1,10    | 51,13 ± 2,23     |
| Жорсткість $H_D$ (кН/мм)                 | 3,41 ± 0,04     | 5,85 ± 0,12     | 8,82 ± 0,39      |

При початковій висоті пресування  $H = 100$  мм (а вага = 190,32 г; b вага = 338,81 г; c вага = 524,53 г) та швидкості 4 мм/хв. Гранична сила для максимального видобутку олії без ефекту зубчастості поршня.

Результати дисперсійного аналізу (ANOVA), наведені у таблиці 3.2, показали, що фактори пресування, а саме діаметр камери та величина прикладеної сили, мали статистично значущий вплив ( $p < 0,05$ ) на більшість обчислених показників, за винятком деформації, яка виявилася статистично незначущою ( $p > 0,05$ ). Значення коефіцієнта детермінації ( $R^2$ ), що підтверджує достовірність отриманих результатів, коливалися в діапазоні від 0,287 до 0,996, що свідчить про високу точність вимірювань та надійність моделі.

Особливо важливо відзначити, що в цьому розділі були детально проаналізовані три основні показники: вихід олії (%), ефективність видобутку олії (%) та енергія деформації (кДж) у контексті комбінацій факторів пресування. Це

дозволяє встановити оптимальні параметри пресування для максимізації виходу олії та ефективності процесу без надмірного руйнування насіння.

Таблиця 3.2 – Оцінка результатів ANOVA для контрольних експериментів з визначення властивостей насіння ріпаку

| Обчислені показники                              | R <sup>2</sup> | F-значення | p-значення |
|--|----------------|------------|------------|
| Маса олії, M <sub>O</sub> (г)                    | 0,995          | 482,143    | < 0,05     |
| Вихід олії, O <sub>Y</sub> (%)                   | 0,878          | 21,493     | < 0,05     |
| Ефективність видобутку олії, O <sub>EF</sub> (%) | 0,878          | 21,493     | < 0,05     |
| Енергія деформації, E <sub>N</sub> (кДж)         | 0,998          | 1122,846   | < 0,05     |
| Деформація, D <sub>F</sub> (мм)                  | 0,287          | 1,212      | > 0,05     |
| Жорсткість, H <sub>D</sub> (кН/мм)               | 0,995          | 411,402    | < 0,05     |

R<sup>2</sup>: коефіцієнт детермінації; p-значення < 0,05 вказують на статистичну значущість; p-значення > 0,05 вказують на відсутність статистичної значущості.

На рисунку 3.1 представлені криві «сила – деформація» для різних діаметрів пресових камер, що демонструють енергію деформації та характер викиду макухи. Таблиці 3.1 та 3.2 містять результати контрольних експериментів щодо визначення максимальної сили пресування та оцінки ANOVA для обчислених показників.

Отримані дані контрольних експериментів слугували базою для подальшого аналізу результатів, отриманих за планом Бокс–Бенкена, де досліджували взаємодію між всіма факторами пресування та їх вплив на якість і кількість видобутої олії.

### 3.2 Вихід олії, ефективність видобутку та енергія деформації

Для проведення випробувань на стискання насіння ріпаку оцінювали три фактори стискання, кожен із яких мав три рівні: діаметр пресувальної камери (60, 80 і 100 мм), температура попередньої обробки (40, 60 і 80 °С) та час нагрівання (30, 60 і 90 хв). Використовуючи експериментальне планування за методом Бокса–Бенкена (Box–Behnken Design, BBD) у поєднанні з методологією поверхні відгуку (Response Surface Methodology, RSM), було проведено 17 експериментальних

запусків, що включали 12 комбінацій факторів і 5 повторень у центральних точках (див. таблицю 3.3).

Для різних діаметрів пресувальних камер при кожній максимальній силі стискання на постійній швидкості 4 мм/хв визначали такі параметри: вихід олії, ефективність видобутку олії та енергію деформації. Вихід олії варіювався від 16,172 до 24,783 %, а ефективність видобутку – від 39,109 до 59,934 %. Значення енергії деформації коливалися від 1,17 до 3,19 кДж.

Таблиця 3.3 – План експерименту за методом Бокса–Бенкена для комбінацій факторів стискання, кодовані значення та розраховані параметри (вихід олії, ефективність видобутку та енергія деформації)

| №  | $V_D$ (мм) | $T_{PR}$ (°C) | $H_{TM}$ (хв) | $O_Y$ (%) | $O_{EF}$ (%) | $E_N$ (кДж) |
|----|------------|---------------|---------------|-----------|--------------|-------------|
| 1  | 60         | 40            | 60            | 17,465    | 42,236       | 1,173       |
| 2  | 100        | 40            | 60            | 16,85     | 40,747       | 2,927       |
| 3  | 60         | 80            | 60            | 24,784    | 59,935       | 1,256       |
| 4  | 100        | 80            | 60            | 23,298    | 56,34        | 3,188       |
| 5  | 60         | 60            | 30            | 20,271    | 49,021       | 1,197       |
| 6  | 100        | 60            | 30            | 19,969    | 48,29        | 2,99        |
| 7  | 60         | 60            | 90            | 23,55     | 56,949       | 1,275       |
| 8  | 100        | 60            | 90            | 20,215    | 48,885       | 3,116       |
| 9  | 80         | 40            | 30            | 16,173    | 39,11        | 1,989       |
| 10 | 80         | 80            | 30            | 21,651    | 52,358       | 2,046       |
| 11 | 80         | 40            | 90            | 18,085    | 43,735       | 2,045       |
| 12 | 80         | 80            | 90            | 23,05     | 55,741       | 2,232       |
| 13 | 80         | 60            | 60            | 20,839    | 50,395       | 2,075       |
| 14 | 80         | 60            | 60            | 20,972    | 50,716       | 2,069       |
| 15 | 80         | 60            | 60            | 21,421    | 51,801       | 2,039       |
| 16 | 80         | 60            | 60            | 21,742    | 52,579       | 2,164       |
| 17 | 80         | 60            | 60            | 21,069    | 50,951       | 2,113       |

Позначення:  $V_D$  – діаметр пресувальної камери (мм);  $T_{PR}$  – температура обробки (°C);  $H_{TM}$  – час нагрівання (хв);  $O_Y$  – вихід олії (%);  $O_{EF}$  – ефективність видобутку олії (%);  $E_N$  – енергія деформації (кДж)

Згідно з даними експериментів BBD (таблиця 3.3), комбінація факторів, яка забезпечила максимальні показники, була такою: діаметр камери 60 мм (код -1), температура 80 °C (код +1) та час нагрівання 60 хв (код 0). Ця комбінація

забезпечила найвищий вихід олії – 24,783 %, ефективність видобутку – 59,934 % та енергію деформації – 1,255 кДж.

Оптимальні фактори для видобутку олії з насіння ріпаку, з точки зору виходу олії, ефективності видобутку та енергії деформації, були визначені на основі регресійного аналізу поверхні відгуку. Ці результати дозволяють не лише підвищити ефективність механічного пресування насіння, але й зменшити енергетичні витрати та втрати олії при промисловому виробництві. Також слід враховувати, що взаємодія між фактором діаметра пресувальної камери, температурою та часом нагрівання відіграє ключову роль у визначенні кінцевих механічних та хімічних властивостей насіння та олії.

### 3.3 Силово-деформаційні криві експериментальних прогонів

Сімнадцять експериментальних прогонів (R1–R17) (таблиця 3.3), які представляють комбінації рівнів факторів, графічно відображені у вигляді кривих «сила–деформація» на рисунку 3.2. Максимальна сила для кожного діаметра пресувальної камери (60, 80 та 100 мм) була визначена з початкової висоти пресування зразка насіння ріпаку 100 мм, який стискався зі швидкістю 4 мм/хв.

Встановлено, що при більшому діаметрі камери застосовується більша сила, що забезпечує максимальний вихід олії. Криві демонструють плавний характер без ефекту зубчастості (серрації), що підтверджено контрольними експериментами. Це означає, що процес стискання відбувається рівномірно, без раптових збурень у розподілі сили по деформації, що важливо для безпечної роботи обладнання та стабільного відбору олії з масового насіння.

На основі аналізу кривих можна також оцінити енергію деформації (площа під кривою «сила–деформація»), що є критерієм механічної роботи, виконаної для витискування олії, та передбачає ефективність механічного пресування для різних комбінацій факторів.

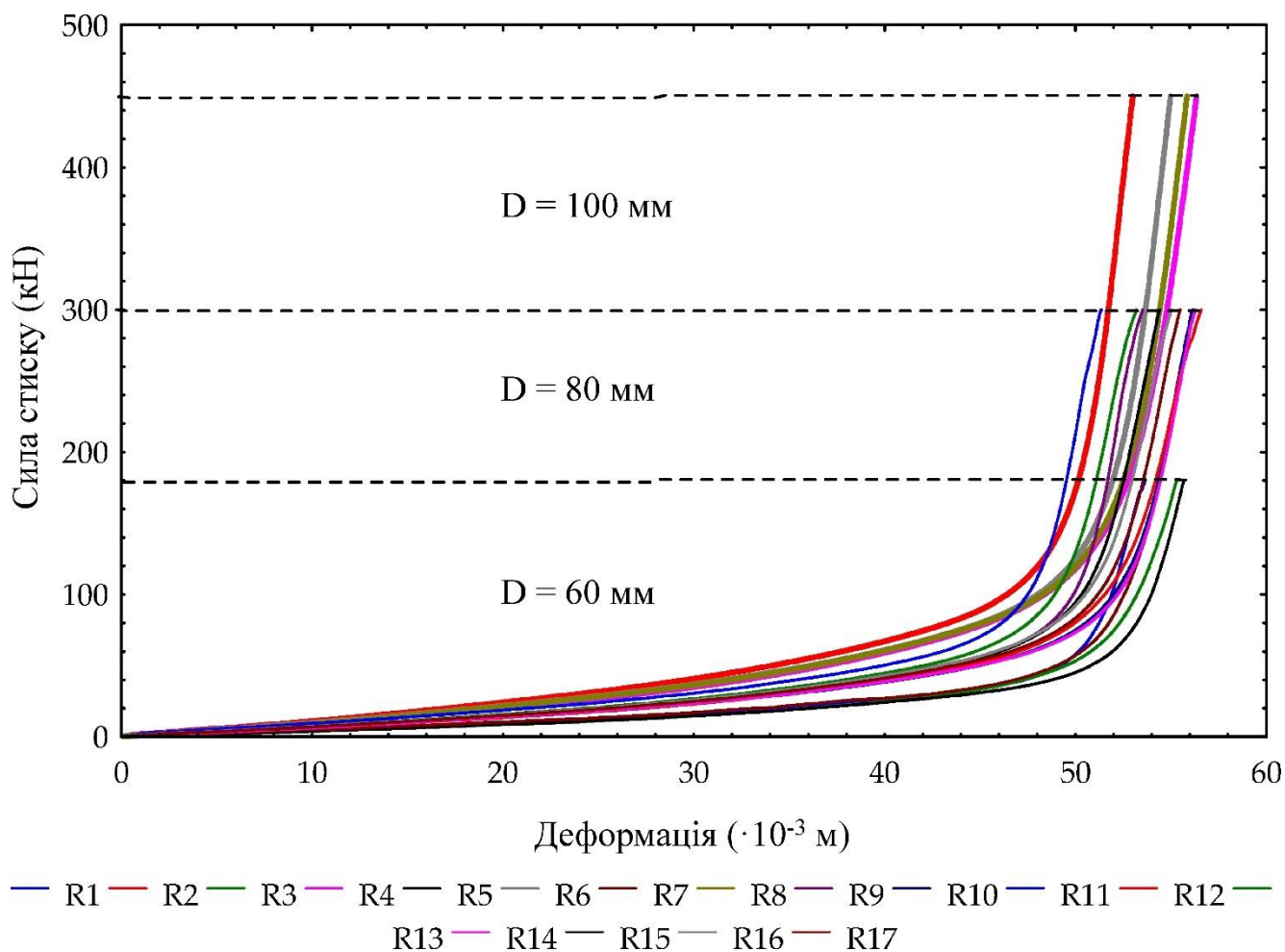


Рисунок 3.2 – Криві компресійної сили та деформації для експериментальних прогонів (R1–R17) під час видобутку олії з насіння ріпаку

### 3.4 Регресійний аналіз поверхні відгуку комбінацій факторів

Проведено статистичний аналіз впливу комбінацій факторів на розраховані параметри або відповіді на основі методу регресії поверхні відгуку (Response Surface Methodology, RSM). Результати регресійного аналізу наведені у таблицях 3.4–3.6.

Для маси олії (г) значущими виявилися коефіцієнти лінійних і квадратичних членів, а також умови взаємодії між діаметром посудини та температурою ( $p < 0,05$ ). Це свідчить, що одночасна зміна цих факторів істотно впливає на кількість видобутої олії. Умови взаємодії діаметра посудини і часу нагріву, а також

температури і часу нагріву не були значущими ( $p > 0,05$ ), тобто їхній спільний ефект на масу олії мінімальний.

Таблиця 3.4 – Оцінки відгуків та параметри їх статистичної оцінки  $O_Y$  (%)

| Ефект                    | Коеф.  | Стандартна помилка | Сума квадратів | df | Сер. квадрат. | F       | p     |
|--------------------------|--------|--------------------|----------------|----|---------------|---------|-------|
| Перехоплення             | 21,207 | 0,251              | 84,263         | 9  | 9,362         | 30,058  | 0,001 |
| $V_D$                    | -0,513 | 0,196              | 2,094          | 1  | 2,094         | 15,474  | 0,016 |
| $V_D^2$                  | 0,121  | 0,271              | 0,062          | 1  | 0,062         | 0,452   | 0,538 |
| $T_{PR}$                 | 3,027  | 0,196              | 73,261         | 1  | 73,261        | 540,972 | 0,001 |
| $T_{PR}^2$               | -0,731 | 0,271              | 2,244          | 1  | 2,242         | 16,562  | 0,014 |
| $H_{TM}$                 | 0,648  | 0,196              | 3,368          | 1  | 3,368         | 24,877  | 0,007 |
| $H_{TM}^2$               | -0,738 | 0,271              | 2,302          | 1  | 2,302         | 16,987  | 0,014 |
| $V_D \cdot T_{PR}$       | -0,217 | 0,278              | 0,191          | 1  | 0,191         | 1,402   | 0,301 |
| $V_D \cdot H_{TM}$       | -0,346 | 0,278              | 0,483          | 1  | 0,483         | 3,556   | 0,131 |
| $T_{PR} \cdot H_{TM}$    | -0,127 | 0,278              | 0,065          | 1  | 0,065         | 0,486   | 0,523 |
| Залишковий               | –      | –                  | 2,181          | 7  | 0,312         | –       | –     |
| Недостатня відповідність | –      | –                  | 1,638          | 3  | 0,545         | 4,032   | 0,106 |
| Підсумок                 | –      | –                  | 86,444         | 16 | –             | –       | –     |

Примітки:  $V_D$  – діаметр посудини (мм);  $T_{PR}$  – температура ( $^{\circ}\text{C}$ );  $H_{TM}$  – час нагріву (хв);  $O_Y$  – вихід олії (%);  $O_{EF}$  – ефективність видобутку олії (%);  $E_N$  – енергія деформації (кДж); р-значення  $< 0,05$  вказують на статистично значущий ефект; р-значення  $> 0,05$  – незначущий ефект; a, b, c – коефіцієнт детермінації ( $R^2$ ) моделей: 0,975, 0,975 та 0,998 відповідно

Для виходу олії (%) та ефективності видобутку олії (%) коефіцієнти квадратичних членів діаметра посудини та взаємодії факторів (діаметр посудини, температура та час нагріву) не виявилися значущими ( $p > 0,05$ ). Водночас інші лінійні і взаємодіючі коефіцієнти факторів були статистично значущими ( $p < 0,05$ ), що підкреслює їхній вплив на ці показники.

Для енергії деформації (кДж) значущими були коефіцієнти лінійних і квадратичних членів діаметра посудини, лінійного терміна температури, а також лінійного терміна часу нагріву ( $p < 0,05$ ). Коефіцієнти квадратичних членів температури та часу нагріву, а також усі умови взаємодії факторів не були значущими ( $p > 0,05$ ). Це свідчить, що на енергію деформації найбільший вплив

має зміна діаметра пресувальної камери та пряма залежність від температури та часу нагрівання.

Таблиця 3.5 – Оцінки відгуків та параметри їх статистичної оцінки  $O_{EF}$  (%)

| Ефект                    | Коеф.  | Станд. помил. | Сума квадратів | df | Сер, квадрат | F       | p     |
|--------------------------|--------|---------------|----------------|----|--------------|---------|-------|
| Перехоплення             | 51,286 | 0,605         | 492,801        | 9  | 54,755       | 30,058  | 0,001 |
| $V_D$                    | -1,237 | 0,476         | 12,253         | 1  | 12,255       | 15,472  | 0,016 |
| $V_D^2$                  | 0,292  | 0,657         | 0,356          | 1  | 0,358        | 0,452   | 0,538 |
| $T_{PR}$                 | 7,317  | 0,476         | 428,446        | 1  | 428,448      | 540,972 | 0,001 |
| $T_{PR}^2$               | -1,764 | 0,657         | 13,115         | 1  | 13,117       | 16,562  | 0,014 |
| $H_{TM}$                 | 1,568  | 0,476         | 19,703         | 1  | 19,705       | 24,877  | 0,007 |
| $H_{TM}^2$               | -1,787 | 0,657         | 13,453         | 1  | 13,455       | 16,987  | 0,014 |
| $V_D \cdot T_{PR}$       | -0,526 | 0,674         | 1,111          | 1  | 1,111        | 1,402   | 0,301 |
| $V_D \cdot H_{TM}$       | -0,838 | 0,674         | 2,816          | 1  | 2,816        | 3,556   | 0,131 |
| $T_{PR} \cdot H_{TM}$    | -0,311 | 0,674         | 0,385          | 1  | 0,385        | 0,486   | 0,523 |
| Залишковий               | –      | –             | 12,752         | 7  | 1,821        | –       | –     |
| Недостатня відповідність | –      | –             | 9,582          | 3  | 3,193        | 4,032   | 0,105 |
| Підсумок                 | –      | –             | 505,552        | 16 | –            | –       | –     |

Примітки:  $V_D$  – діаметр посудини (мм);  $T_{PR}$  – температура (°C);  $H_{TM}$  – час нагріву (хв);  $O_Y$  – вихід олії (%);  $O_{EF}$  – ефективність видобутку олії (%);  $E_N$  – енергія деформації (кДж); р-значення  $< 0,05$  вказують на статистично значущий ефект; р-значення  $> 0,05$  – незначущий ефект; a, b, c – коефіцієнт детермінації ( $R^2$ ) моделей: 0,975, 0,975 та 0,998 відповідно

Коефіцієнти регресії усіх моделей були значущими ( $p < 0,05$ ), що підтверджує адекватність моделей для прогнозування значень вихідних параметрів.

Отримані результати підтверджують точність побудованих моделей регресії поверхні відгуку для оптимізації процесу механічного пресування насіння ріпаку. Вони дозволяють ідентифікувати оптимальні комбінації факторів для максимального виходу олії, високої ефективності видобутку та контролю енергії деформації під час процесу стискання. Цей аналіз є ключовим етапом у розробці ефективної і безпечної системи механічного видобутку олії на лабораторному та промисловому рівнях.

Таблиця 3.6 – Оцінки відгуків та параметри їх статистичної оцінки  $E_N$  (Дж)

| Ефект                    | Коеф.  | Станд. помил. | Сума квадратів | df | Сер, квадрат | F        | p     |
|--------------------------|--------|---------------|----------------|----|--------------|----------|-------|
| Перехоплення             | 2,092  | 0,017         | 6,793          | 9  | 0,756        | 479,331  | 0,001 |
| $V_D$                    | 0,914  | 0,013         | 6,699          | 1  | 6,699        | 2895,721 | 0,001 |
| $V_D^2$                  | 0,054  | 0,018         | 0,012          | 1  | 0,014        | 5,556    | 0,077 |
| $T_{PR}$                 | 0,073  | 0,013         | 0,042          | 1  | 0,044        | 18,684   | 0,013 |
| $T_{PR}^2$               | -0,012 | 0,018         | 0,002          | 1  | 0,002        | 0,231    | 0,656 |
| $H_{TM}$                 | 0,055  | 0,013         | 0,024          | 1  | 0,024        | 10,751   | 0,032 |
| $H_{TM}^2$               | -0,002 | 0,018         | 0,001          | 1  | 0,001        | 0,013    | 0,913 |
| $V_D \cdot T_{PR}$       | 0,044  | 0,021         | 0,007          | 1  | 0,007        | 3,424    | 0,137 |
| $V_D \cdot H_{TM}$       | 0,013  | 0,021         | 0,002          | 1  | 0,002        | 0,248    | 0,643 |
| $T_{PR} \cdot H_{TM}$    | 0,032  | 0,021         | 0,005          | 1  | 0,005        | 1,826    | 0,247 |
| Залишковий               | –      | –             | 0,012          | 7  | 0,003        | –        | –     |
| Недостатня відповідність | –      | –             | 0,003          | 3  | 0,002        | 0,254    | 0,854 |
| Підсумок                 | –      | –             | 6,804          | 16 | –            | –        | –     |

Примітки:  $V_D$  – діаметр посудини (мм);  $T_{PR}$  – температура (°C);  $H_{TM}$  – час нагріву (хв);  $O_Y$  – вихід олії (%);  $O_{EF}$  – ефективність видобутку олії (%);  $E_N$  – енергія деформації (кДж); р-значення  $< 0,05$  вказують на статистично значущий ефект; р-значення  $> 0,05$  – незначущий ефект; a, b, c – коефіцієнт детермінації ( $R^2$ ) моделей: 0,975, 0,975 та 0,998 відповідно

### 3.5 Визначені регресійні моделі для прогнозування відгуків

Основними відгуками за результатами випробувань на стискання насіння ріпаку були: вихід олії (%), ефективність видобутку олії (%) та енергія деформації (кДж), які залежать від комбінацій факторів стискання, отриманих за допомогою плану Бокса–Бенкена (BBD).

Лінійні регресійні моделі, що описують ці відповіді як функцію факторів стискання/прогностичних змінних, наведені у рівняннях (8)–(10). Коефіцієнти реторсії факторів і їх взаємодій були статистично значущими ( $p < 0,05$ ) для прогнозування розрахованих відгуків (див. таблицю 3.6).

Вихід олії:

$$O_Y = 21,208 - 0,512 \cdot V_D + 3,026 \cdot T_{PR} - 0,730 \cdot T_{PR}^2 + 0,649 \cdot H_{TM} - 0,739 \cdot H_{TM}^2$$

Ефективність видобутку олії

$$O_{EF} = 51,287 - 1,238 \cdot V_D + 7,318 \cdot T_{PR} - 1,765 \cdot T_{PR}^2 + 1,569 \cdot H_{TM} - 1,788 \cdot H_{TM}^2$$

Енергія деформації:

$$E_N = 2,091 + 0,915 \cdot V_D + 0,055 \cdot V_D^2 + 0,074 \cdot T_{PR} + 0,056 \cdot H_{TM}$$

де  $V_D$  – діаметр посудини (мм);  $T_{PR}$  – температура (°C);  $H_{TM}$  – час нагрівання (хв).

Ці моделі забезпечують точне прогнозування результатів для різних комбінацій факторів і дозволяють оптимізувати параметри процесу стискання для досягнення максимального виходу олії та ефективності видобутку при мінімальній енергії деформації.

### 3.6 Визначені оптимальні, прогнозовані та перевірені значення відгуків

Оптимальні, прогнозовані та перевірені значення відгуків (вихід олії (%), ефективність видобутку олії (%) та енергія деформації (кДж)) наведені в таблиці 3.7. На основі регресійного аналізу поверхні відгуку [54] оптимальні значення відгуків були визначені для наступних комбінацій факторів стискання:  $V_D$ : 60 (–1) мм;  $T_{PR}$ : 80 °C (+1);  $H_{TM}$ : 75 (+0.5) хв;  $V_D$ : 100 (+1) мм;  $T_{PR}$ : 80 °C (+1);  $H_{TM}$ : 90 (+1) хв.

Таблиця 3.7 – Оптимальні, прогнозовані та перевірені значення відгуків із коефіцієнтом варіації та відсотковою похибкою

| Відповіді    | Оптимальні значення | Прогнозовані значення | Перевірені значення | Коефіцієнт варіації (%) | Відсоткова похибка (%) |
|--------------|---------------------|-----------------------|---------------------|-------------------------|------------------------|
| $O_Y$ (%)    | 24,61               | 24,15                 | $24,17 \pm 0,22$    | 0,92                    | 0,09                   |
| $O_{EF}$ (%) | 59,48               | 58,41                 | $58,46 \pm 0,54$    | 0,93                    | 0,10                   |
| $E_N$ (кДж)  | 3,26                | 3,18                  | $3,23 \pm 0,06$     | 2,31                    | 0,82                   |

Ці оптимальні значення були отримані з графіків профілів поверхні (рисунок 3.3, а–с).

Прогнозовані значення були отримані з лінійних регресійних моделей за рівняннями та перевірені додатковими експериментами. Значення бажаності (desirability) оптимальних відповідей і факторів коливалися від 0,979 до 1, а коефіцієнт варіації та відсоткова похибка між прогнозованими та перевіреними значеннями становили від 0,09 до 2,30 %, що підтверджує надійність лінійних регресійних моделей для прогнозування відповідей.

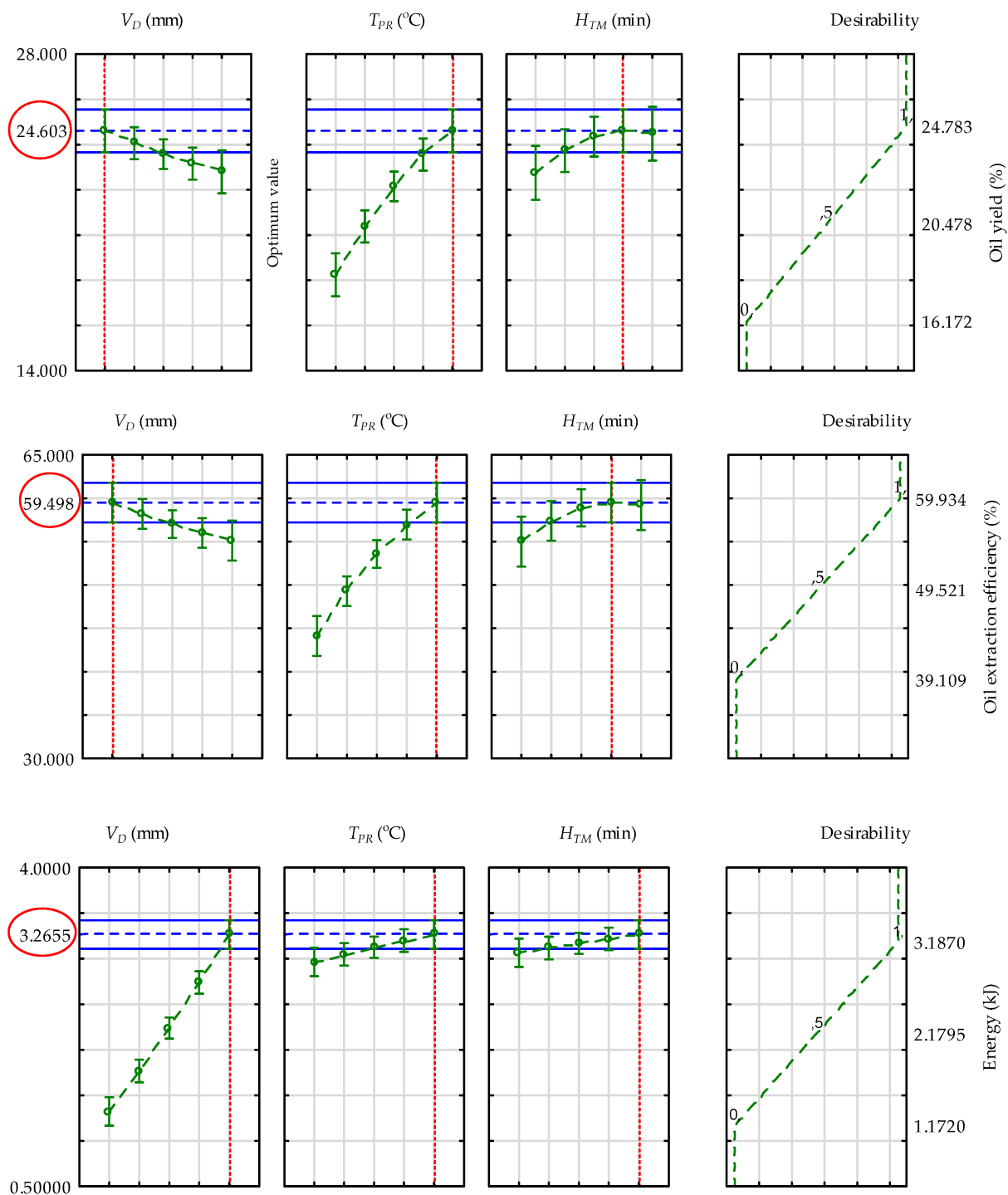


Рисунок 3.3 – Профілі прогнозованих значень та бажаності: вихід олії (%), ефективність видобутку олії (%), енергія деформації (кДж) при оптимальних значеннях

Поверхневі графіки та контурні діаграми взаємодії факторів стискування (температура, попередня підготовка та час нагріву) та відгуків (ефективність видобутку олії та енергія деформації) наведені на рисунку 3.4.

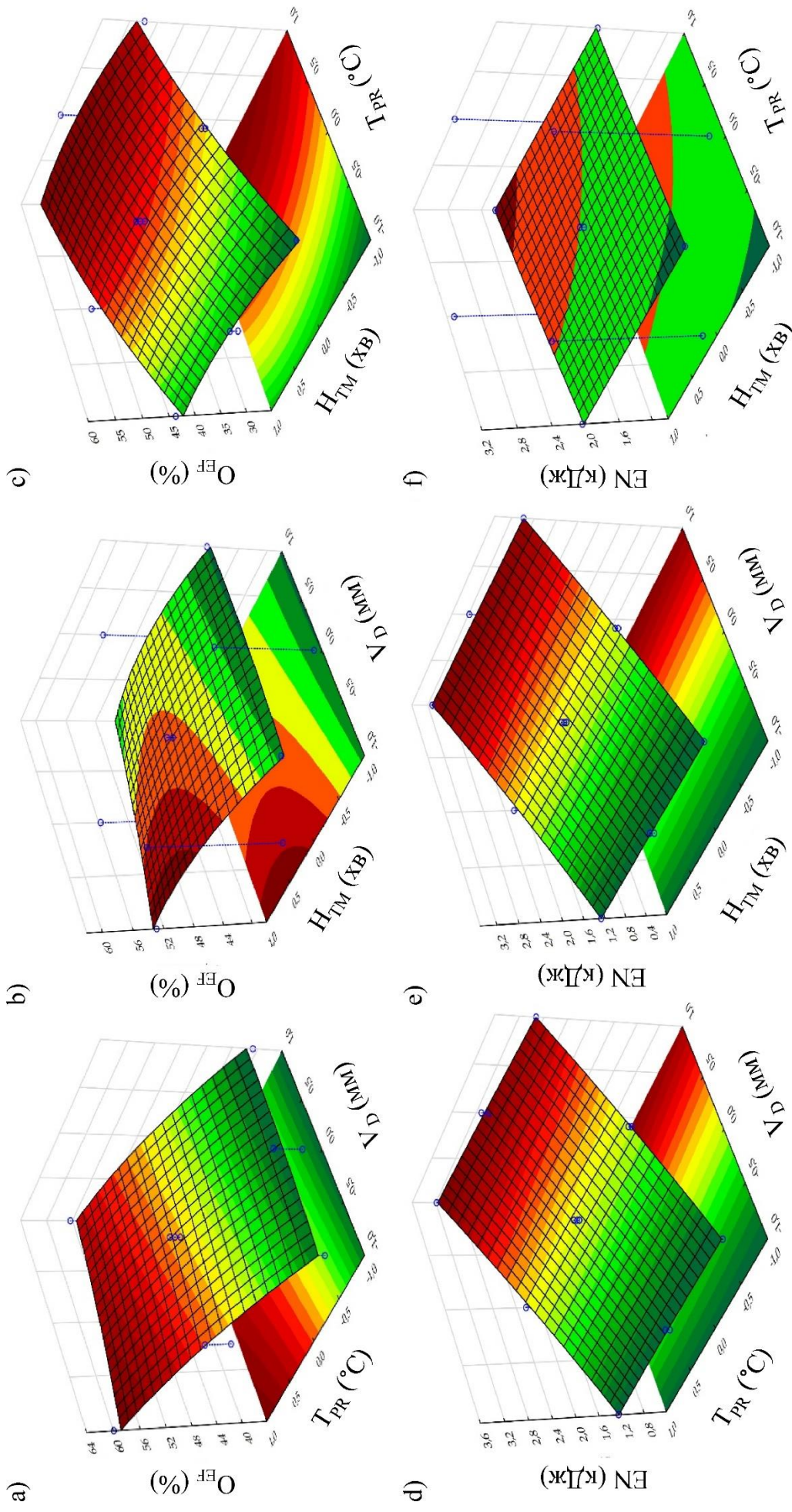


Рисунок 3.4 – Поверхневi графіки та контурні діаграми взаємодії факторів стисання (діаметр посудини, температура, час нагріву) та відгуків: ефективність видобутку олії (%) (a–c) та енергія деформації (кДж) (d–f)

На рисунку 3.4а, при постійному часі нагріву, збільшення діаметра пресувальної посудини від 60 до 100 мм (закодовані  $-1$  до  $+1$ ) не впливало на ефективність видобутку олії, але збільшення температури від 40 до 80 °С ( $-1$  до  $+1$ ) підвищувало її до 59 %, а їх сумісний ефект зменшував до 56 %.

На рисунку 3.4b, при постійній температурі, збільшення діаметра посудини не впливало на ефективність, тоді як збільшення часу нагріву від 30 до 90 хв ( $-1$  до  $+1$ ) трохи збільшувало її до 53 %, а взаємодія факторів знижувала її до 50 %.

На рисунку 3.4с, при постійному діаметрі посудини, збільшення температури підвищувало ефективність видобутку до  $\sim 55$  %, а збільшення часу нагріву незначно впливало на ефективність, але їх взаємодія збільшувала її до 57 %.

На рисунку 3.4d, при постійному часі нагріву, збільшення діаметра посудини підвищувало енергію деформації на  $\sim 2,9$  кДж, а збільшення температури практично не впливало; сумісний ефект давав 3,2 кДж.

На рисунку 3.4е, при постійній температурі, збільшення діаметра посудини підвищувало енергію деформації до 3 кДж, а час нагріву не впливав; їх взаємодія давала  $\sim 3,2$  кДж.

На рисунку 3.4f, при постійному діаметрі посудини, збільшення температури та часу нагріву, а також їх взаємодія, не мали значного впливу на енергію деформації.

### 3.7 Процеси стиснення та релаксації під час видобутку олії з насіння ріпаку

Процес одноосьового стиснення відображає залежність між силою стиснення та деформацією, який може бути продовжений процесом релаксації, що описує залежність між силою релаксації та часом при постійному деформуванні маси насіння. Процес релаксації проводиться для відновлення залишкової олії в макусі безпосередньо після процесу стиснення.

Комбінації факторів стиснення, що забезпечували вищий вихід олії (%) та ефективність видобутку олії (%), піддавали процесу релаксації при постійному часі 20 хв. Результати у порівнянні з процесом стиснення:

- Комбінація факторів ( $VD: 60 (-1)$  мм,  $TPR: 80$  °C (+1),  $HTM: 60 (0)$  хв) зупинилася на часі релаксації 4 хв, забезпечивши невелике збільшення виходу олії на 0,53 % та ефективності видобутку олії на 1,28 %.
- Комбінація факторів ( $VD: 60 (-1)$  мм,  $TPR: 80$  °C (+1),  $HTM: 75 (+0,5)$  хв) використала час релаксації 5 хв, що трохи підвищило вихід олії на 0,42 % і ефективність видобутку олії на 1,01 %.
- Комбінація факторів ( $VD: 100 (+1)$  мм,  $TPR: 80$  °C (+1),  $HTM: 60 (0)$  хв) завершилася через 10 хв релаксації з приростом виходу олії на 1,51 % та ефективності видобутку олії на 3,66 %.
- Комбінація факторів ( $VD: 100 (+1)$  мм,  $TPR: 80$  °C (+1),  $HTM: 90 (+1)$  хв) використала повний час релаксації 20 хв, зафіксувавши збільшення виходу олії на 2,04 % та ефективності видобутку олії на 4,94 %.
- Нарешті, комбінація факторів ( $VD: 80 (0)$  мм,  $TPR: 80$  °C (+1),  $HTM: 90 (+1)$  хв) зупинилася на 10 хв релаксації, що дало помітне збільшення виходу олії на 2,38 % та ефективності видобутку олії на 5,75 %.

Об'єднані процеси стиснення та релаксації під час видобутку олії з насіння ріпаку представлені на рисунку 3.5. Товста лінія процесу релаксації зумовлена змінами тиску поршня (гідравлічна передавальна система). Під час процесу стиснення тиск не змінювався, тому відображено тонкою лінією.

### 3.8 Хімічні властивості ріпакової олії при різних температурах попередньої обробки

Хімічні властивості (пероксидне число, кислотне число та вільні жирні кислоти) ріпакової олії, видобутої при різних температурах попередньої обробки та інтервалах нагрівання, наведені в таблиці 3.8. Середні значення пероксидного числа при тривалості нагрівання 30, 60 та 90 хв для температур попередньої обробки 40, 60 та 80 °C становили  $5,10 \pm 0,77$ ,  $6,19 \pm 1,61$  та  $5,71 \pm 1,32$  мг екв.  $O_2$ /кг відповідно. Аналогічно, кислотне число становило  $1,43 \pm 0,39$ ,  $1,42 \pm 0,29$  та  $1,49 \pm$

0,30 мг КОН/г олії, а значення вільних жирних кислот –  $0,72 \pm 0,20$ ,  $0,71 \pm 0,15$  та  $0,75 \pm 0,15$  мг КОН/г олії.

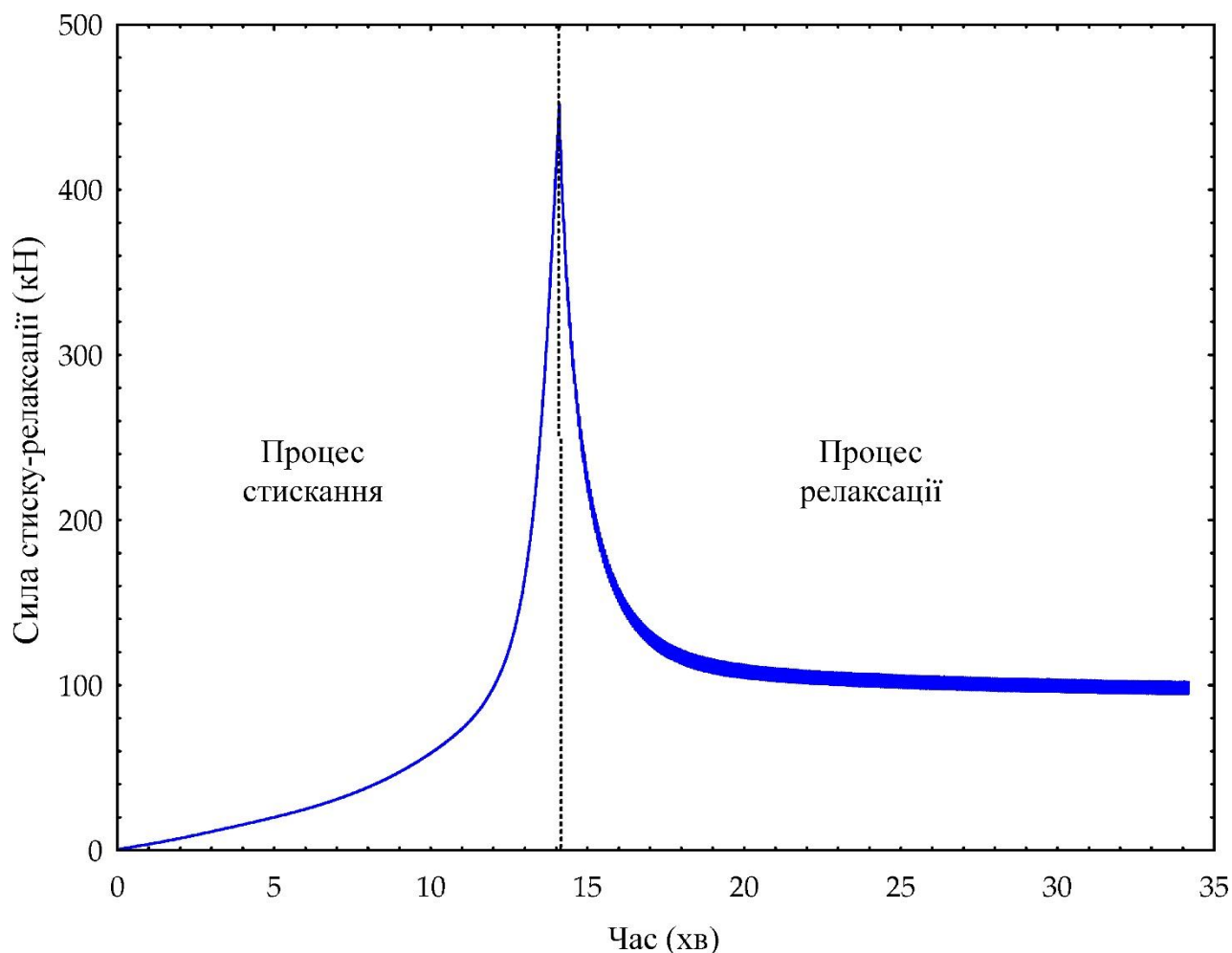


Рисунок 3.5 – Процеси стиснення та релаксації видобутку ріпакової олії

Пероксидне число зростало при підвищенні температури від 40 до 60 °С, а потім знижувалося при 80 °С для часу нагрівання між 30 і 90 хв. Кислотне число та значення вільних жирних кислот знижувалося від 40 до 60 °С і потім зростало при 80 °С із збільшенням тривалості нагрівання.

Щодо варіювання тривалості нагрівання при постійній температурі: пероксидне число при 60 та 80 °С зростало із збільшенням тривалості нагрівання, тоді як при 40 °С воно зменшувалося від 30 до 60 хв і знову зростало при 90 хв. Кислотне число та значення вільних жирних кислот при 40 і 60 °С зростали від 30

до 60 хв, а потім знижувалися при 90 хв. При 80 °С вони знижувалися від 30 до 60 хв і знову зростали при 90 хв.

Таблиця 3.8 – Середнє значення та стандартне відхилення пероксидного числа, кислотного числа та вільних жирних кислот ріпакової олії при різних температурах попередньої обробки та тривалості нагрівання

| №  | V <sub>D</sub><br>(мм) | T <sub>PR</sub><br>(°C) | H <sub>TM</sub><br>(хв) | N | Пероксидне<br>число (мг екв.<br>O <sub>2</sub> /кг олії) | Кислотне<br>число (мг<br>KOH/г олії) | Вільні жирні<br>кислоти (мг<br>KOH/г олії) |
|----|------------------------|-------------------------|-------------------------|---|--|--------------------------------------|--|
| 9  | 80                     | 40                      | 30                      | 2 | 5,01 ± 0,01  | 1,47 ± 0,01                          | 0,72 ± 0,01                                |
| 1  | 60                     | 60                      | 2                       | 2 | 4,36 ± 0,76  | 1,86 ± 0,07                          | 0,92 ± 0,03                                |
| 11 | 80                     | 90                      | 2                       | 2 | 5,93 ± 0,01  | 0,99 ± 0,03                          | 0,48 ± 0,02                                |
| 6  | 100                    | 60                      | 30                      | 2 | 4,38 ± 0,88  | 1,46 ± 0,22                          | 0,73 ± 0,01                                |
| 13 | 80                     | 60                      | 2                       | 2 | 6,36 ± 0,68  | 1,67 ± 0,15                          | 0,84 ± 0,07                                |
| 8  | 100                    | 90                      | 2                       | 2 | 7,81 ± 0,03  | 1,08 ± 0,02                          | 0,54 ± 0,02                                |
| 10 | 80                     | 80                      | 30                      | 2 | 4,46 ± 0,63  | 1,41 ± 0,07                          | 0,72 ± 0,03                                |
| 3  | 60                     | 60                      | 2                       | 2 | 5,51 ± 0,72  | 1,22 ± 0,03                          | 0,62 ± 0,01                                |
| 12 | 80                     | 90                      | 2                       | 2 | 7,19 ± 0,41  | 1,84 ± 0,01                          | 0,92 ± 0,03                                |

Дані були додатково піддані тестам на нормальність розподілу та аналізу варіацій (ANOVA) для оцінки значущого впливу факторів стиснення на розраховані хімічні властивості. На основі тесту Шапіро–Вілка (таблиця 3.9) дані продемонстрували нормальний розподіл. Нормальність розподілу оцінювали на підставі того, що р-значення були більшими за рівень значущості 5 %, а відповідні значення коефіцієнта детермінації (R<sup>2</sup>) варіювали від 0,720 до 0,974 [55].

Тести ANOVA впливу факторів на хімічні властивості ріпакової олії (таблиця 3.10) показали, що пероксидне число залежить від температури та тривалості нагрівання і було значущим (p < 0,05) порівняно з кислотним числом і значенням вільних жирних кислот, які були незначущими (p > 0,05) за температурою, але значущими (p < 0,05) за тривалістю нагрівання. Взаємодія факторів стиснення на пероксидне число була незначущою, тоді як для кислотного числа та вільних жирних кислот вона виявилася значущою.

Таблиця 3.9 – Тест Шапіро–Вілка на нормальність розподілу пероксидного числа, кислотного числа та вільних жирних кислот ріпакової олії при різних температурах зразка та тривалості нагрівання

| Залежні змінні                                | T <sub>PR</sub> (°C) | Тест Шапіро–Вілка (p-value) | R <sup>2</sup> | H <sub>TM</sub> (хв) | Тест Шапіро–Вілка (p-value) | R <sup>2</sup> |
|---|----------------------|-----------------------------|----------------|----------------------|-----------------------------|----------------|
| Пероксидне число (мг екв. O <sub>2</sub> /кг) | 40                   | 0,295                       | 0,884          | 30                   | 0,011                       | 0,721          |
|   | 60                   | 0,566                       | 0,927          | 60                   | 0,917                       | 0,973          |
|   | 80                   | 0,784                       | 0,956          | 90                   | 0,145                       | 0,845          |
| Кислотне число (мг КОН/г олії)                | 40                   | 0,347                       | 0,896          | 30                   | 0,288                       | 0,883          |
|   | 60                   | 0,476                       | 0,915          | 60                   | 0,217                       | 0,867          |
|   | 80                   | 0,212                       | 0,866          | 90                   | 0,015                       | 0,741          |
| Вільні жирні кислоти (мг КОН/г олії)          | 40                   | 0,351                       | 0,895          | 30                   | 0,283                       | 0,882          |
|   | 60                   | 0,475                       | 0,915          | 60                   | 0,221                       | 0,867          |
|   | 80                   | 0,212                       | 0,865          | 90                   | 0,015                       | 0,741          |

Таблиця 3.10 – ANOVA-тести впливу факторів на залежні змінні (PV, AV та FFA)

| Джерело                                     | Залежні змінні | Сума квадратів типу III | df | Середній квадрат | F-критерій | p-значення |
|---|----------------|-------------------------|----|------------------|------------|------------|
| Скоригована модель                          | PV             | 25,318                  | 8  | 3,164            | 9,972      | 0,002      |
|   | AV             | 1,564                   | 8  | 0,194            | 21,225     | 0,001      |
|   | FFA            | 0,396                   | 8  | 0,048            | 21,421     | 0,001      |
| Інтерцепт                                   | PV             | 577,602                 | 1  | 577,602          | 1820,171   | 0,001      |
|   | AV             | 37,545                  | 1  | 37,543           | 4078,408   | 0,001      |
|   | FFA            | 9,485                   | 1  | 9,483            | 4114,736   | 0,001      |
| T <sub>PR</sub> (°C)                        | PV             | 3,575                   | 2  | 1,786            | 5,632      | 0,025      |
|   | AV             | 0,015                   | 2  | 0,007            | 0,876      | 0,451      |
|   | FFA            | 0,003                   | 2  | 0,001            | 0,877      | 0,447      |
| H <sub>TM</sub> (хв)                        | PV             | 17,13                   | 2  | 8,586            | 27,058     | 0,001      |
|   | AV             | 0,221                   | 2  | 0,110            | 12,042     | 0,004      |
|   | FFA            | 0,055                   | 2  | 0,027            | 12,154     | 0,004      |
| T <sub>PR</sub> (°C) × H <sub>TM</sub> (хв) | PV             | 4,572                   | 4  | 1,142            | 3,602      | 0,052      |
|   | AV             | 1,324                   | 4  | 0,332            | 35,994     | 0,001      |
|   | FFA            | 0,334                   | 4  | 0,083            | 36,322     | 0,001      |
| Похибка                                     | PV             | 2,855                   | 9  | 0,316            | –          | –          |
|   | AV             | 0,082                   | 9  | 0,008            | –          | –          |
|   | FFA            | 0,022                   | 9  | 0,001            | –          | –          |
| Усього                                      | PV             | 605,777                 | 18 | –                | –          | –          |
|   | AV             | 39,191                  | 18 | –                | –          | –          |
|   | FFA            | 9,901                   | 18 | –                | –          | –          |
| Скориговано всього                          | PV             | 28,174                  | 17 | –                | –          | –          |
|   | AV             | 1,645                   | 17 | –                | –          | –          |
|   | FFA            | 0,415                   | 17 | –                | –          | –          |

### 3.9 Вплив факторів стискання на абсорбцію та пропускання ріпакової олії

Спектрофотометричний аналіз видобутої ріпакової олії за різних температур попередньої обробки та тривалості нагрівання проводили на різних довжинах хвиль для оцінки впливу умов підготовки насіння на спектральні властивості олії. Отримані дані піддали комплексному статистичному аналізу, включаючи перевірку нормальності, дисперсійний аналіз (ANOVA) та множинну регресію.

Скоригована модель спектральних профілів дала високі значення коефіцієнта детермінації:  $R^2 = 0,999$  для абсорбції та  $R^2 = 0,995$  для пропускання, що підтверджує надійність моделі для прогнозування спектральних змін залежно від факторів стискання.

На рисунку 3.6 показано спектральні профілі олії за різних температур попередньої обробки. Збільшення температури, як правило, призводило до зростання абсорбції на коротших довжинах хвиль і дещо знижувало пропускання, що свідчить про можливу зміну хімічного складу та концентрації певних сполук. На рисунку 3.7 зображено спектральні профілі олії при різній тривалості нагрівання. Триваліший нагрів здебільшого збільшував абсорбцію, особливо в UV-діапазоні, що можна пов'язати зі збільшенням концентрації пероксидів або продуктів окиснення жирів.

Додатковий статистичний аналіз (кореляційний, багатовимірний, множинна регресія та перевірка нормальності розподілу) проведено для повного пояснення взаємозв'язку між факторами стискання та спектральними показниками. Висновки щодо спектральних профілів:

- Діаметр посудини та температура сильно впливають на абсорбцію на коротких довжинах хвиль.
- Час нагрівання суттєво впливає на спектральні зміни у видимому діапазоні.
- Взаємодія факторів проявляється в комбінованому ефекті на пропускання та абсорбцію, що важливо при оптимізації процесу видобутку.

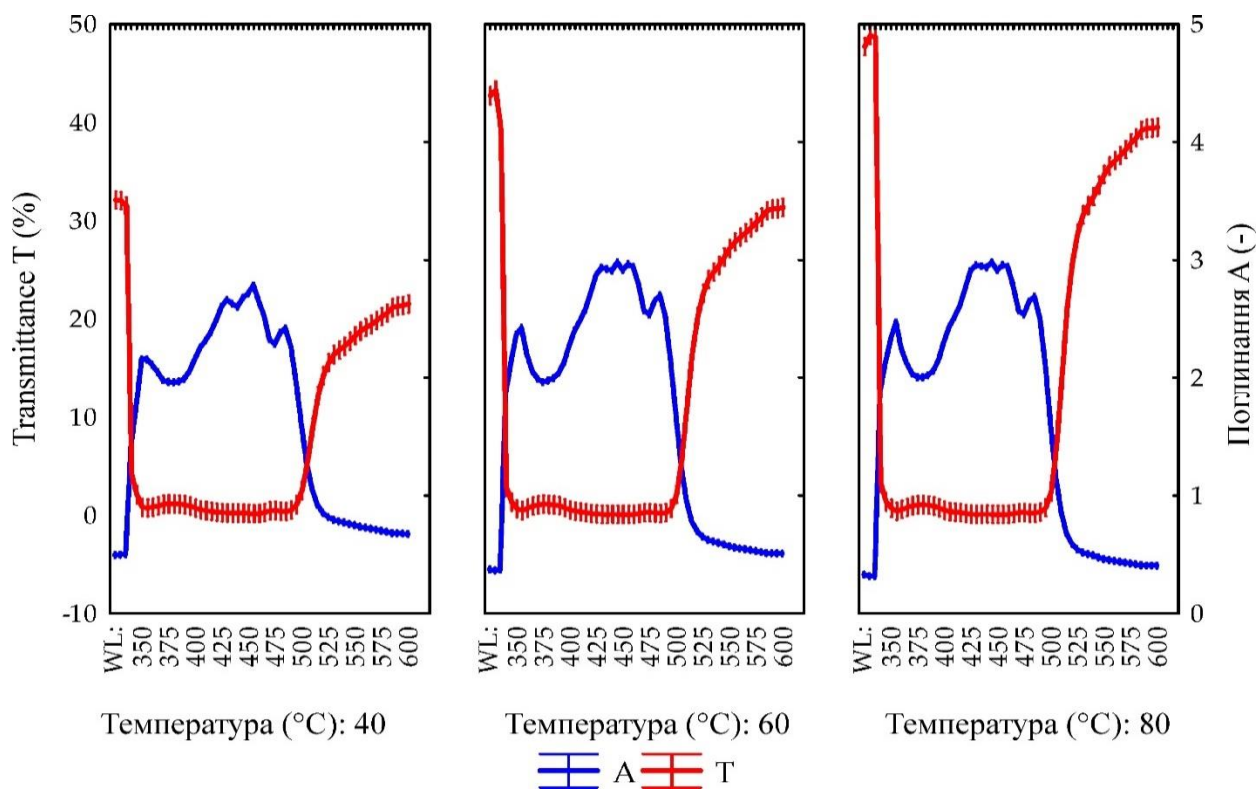


Рисунок 3.6 – Пропускання та абсорбція залежно від довжини хвилі (WL) ріпакової олії при різних температурах попередньої обробки

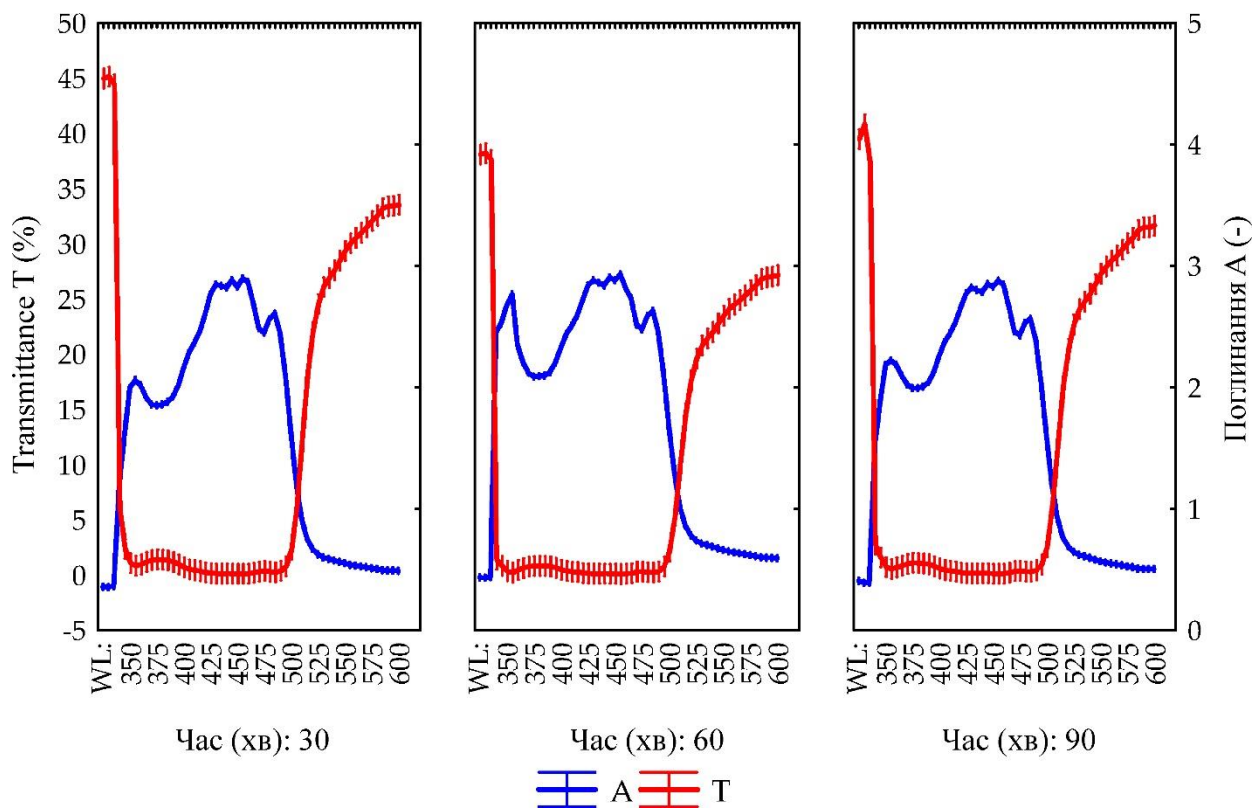


Рисунок 3.7 – Пропускання та абсорбція залежно від довжини хвилі (WL) ріпакової олії при різній тривалості нагрівання

## Висновки за розділом

1. Універсальна машина для випробувань на стиснення з вантажопідйомністю 500 кН використана для оцінки впливу факторів стискання, а саме діаметра пресувальної камери ( $V_D$ : 60, 80 та 100 мм), температури попередньої обробки ( $T_{PR}$ : 40, 60 та 80 °С) та тривалості нагрівання ( $H_{TM}$ : 30, 60 та 90 хв) на показники виходу олії (%), ефективності видобутку олії (%) та енергії деформації (кДж).

2. Фактори стискання та результати оптимізовані за допомогою методології поверхні відгуку (RSM) у поєднанні з планом Бокса–Бенкена (BBD), який є статистичним інструментом для аналізу впливу незалежних факторів на залежні параметри. План Бокса–Бенкена передбачав 17 експериментальних прогонів, включаючи 12 комбінацій факторів стискання та 5 повторень у центральних точках.

3. Згідно з експериментальними даними BBD, комбінації факторів стискання та їх закодовані значення (діаметр камери 60 (–1), температура 60 (0) та час нагрівання 60 (0)) забезпечили максимальний вихід олії 24,783 % та ефективність видобутку олії 59,934 %, при відповідній енергії деформації 1,255 кДж.

4. На основі регресійного аналізу поверхні відгуку побудовані лінійні регресійні моделі (для прогнозування результатів при оптимальних комбінаціях факторів стискання ( $V_D$ : 60 (–1) мм;  $T_{PR}$ : 80 °С (+1) та  $H_{TM}$ : 75 (+0,5) хв). Значення  $r$  для перевірки адекватності моделей були незначущими ( $p > 0,05$ ), а коефіцієнт варіації та відсоткова похибка між прогнозованими та підтвердженими результатами коливалися від 0,08 % до 2,30 %, що підтверджує адекватність побудованих регресійних моделей для прогнозування показників.

5. Час релаксації 10 хв при комбінації факторів стискання ( $V_D$ : 80 (0) мм,  $T_{PR}$ : 80 °С (+1), та  $H_{TM}$ : 90 (+1) хв) дозволив відновити максимальну кількість залишкової олії приблизно 6 % із макухи. Навпаки, комбінації факторів стискання ( $V_D$ : 60 (–1) мм,  $T_{PR}$ : 80 °С (+1), та  $H_{TM}$ : 60 (0)/75 (+0,5) хв) можуть не потребувати процесу релаксації, оскільки відновлена залишкова олія була незначною.

#### 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ЗАХИСТ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

Виробництво рослинної олії з насіння ріпаку механічним способом є одним із найбільш екологічно безпечних та технологічно ефективних методів отримання харчової та технічної олії. Проте навіть при використанні механічних пресів існують потенційні ризики для здоров'я працівників та навколишнього середовища, що обумовлює необхідність організації належної системи охорони праці та контролю впливу виробничих процесів на довкілля. Безпечна експлуатація обладнання, правильна організація робочих місць, дотримання санітарно-гігієнічних норм, контроль за якістю сировини, ефективна вентиляція та утилізація відходів є ключовими аспектами при плануванні та веденні технологічного процесу.

Механічний прес для виробництва олії з насіння ріпаку працює за принципом одноосьового або гвинтового стискання насіння, під час якого відбувається вилучення олії. Технічні характеристики пресів визначають їх вантажопідйомність, продуктивність, температурні режими та тиск на насіння. Оскільки пресування супроводжується високим тиском, обертальними механізмами та можливим підвищенням температури в зоні стискання, працівники під час обслуговування обладнання піддаються ризику механічних травм, опіків та ураження обертальними частинами. Виходячи з цього, робочі місця повинні бути обладнані спеціальними огороженнями та захисними кожухами, що обмежують доступ до рухомих деталей. Всі вузли пресу повинні проходити регулярні технічні огляди для виявлення зношування деталей, тріщин у корпусах та підшипниках, які можуть призвести до аварійних ситуацій. Необхідним є також оснащення пресів аварійними кнопками зупинки, сигналізаційними лампами та звуковими сигналами, які попереджають про початок роботи обладнання або аварійні ситуації.

Під час виробництва олії з насіння ріпаку одним із найважливіших аспектів є контроль температури та вологості насіння. Недотримання температурного режиму може призвести до підвищеного утворення летких органічних сполук, підвищення пероксидного числа олії, а також до термічних опіків працівників. З цієї причини

робочі місця повинні мати ефективну вентиляцію, а персонал повинен використовувати індивідуальні засоби захисту, включаючи термостійкі рукавички, захисні окуляри, спецодяг та маски або респіратори, що обмежують вдихання пилу та аерозолів олії. Виробничі приміщення повинні відповідати нормам освітлення та мати безпечне підлогове покриття, що запобігає ковзанню та падінню під час перенесення насіння або макухи.

Пил від подрібненого насіння ріпаку є ще одним джерелом потенційної небезпеки для здоров'я працівників. Він може викликати подразнення дихальних шляхів, алергічні реакції та, у випадках тривалого контакту, хронічні респіраторні захворювання. Для запобігання таких ризиків застосовують локальні аспіраційні системи, що відсмоктують пил у зоні подачі насіння, а також загальну примусову вентиляцію приміщень. Регулярне прибирання виробничих площ, утилізація пилу та макухи у відповідності до санітарних норм також знижує ризики забруднення повітря та пожежної небезпеки. Враховуючи горючість макухи та олії, у приміщеннях слід заборонити використання відкритого вогню та забезпечити наявність системи пожежогасіння та вогнегасників, доступних у разі аварійних ситуацій.

Щодо охорони навколишнього середовища, механічне пресування насіння ріпаку є більш екологічно безпечним методом у порівнянні з екстракційними способами, які передбачають використання хімічних розчинників. Проте, під час роботи пресу можливе утворення залишкових відходів – макухи та залишкової олії, що потребують правильного поводження та утилізації. Макуха є цінним продуктом для використання як корму для тварин, а також як біоенергетичного ресурсу. Викид або необережне зберігання макухи може призвести до забруднення ґрунту та водойм. Тому виробничі майданчики повинні бути обладнані спеціальними сховищами для відходів із захистом від атмосферних опадів та контролем вологості для запобігання гниттю та виділенню неприємного запаху.

Важливим аспектом екологічної безпеки є контроль якості відпрацьованого повітря у виробничих приміщеннях. Леткі органічні сполуки, що виділяються під час пресування та нагрівання насіння, можуть спричиняти забруднення повітря та

мати шкідливий вплив на персонал. Встановлення систем фільтрації та вентиляції дозволяє підтримувати допустимий рівень забруднення та забезпечує комфортні умови праці. Під час експлуатації обладнання повинні дотримуватися вимоги щодо гранично допустимих концентрацій шкідливих речовин у повітрі робочої зони. Крім того, контроль за витокami олії під час пресування дозволяє уникнути забруднення виробничого приміщення та навколишнього середовища, а також знижує ризик виникнення слизьких поверхонь, що може призвести до травматизму.

Організація робочого процесу передбачає належну підготовку персоналу. Працівники повинні пройти інструктаж з охорони праці, навчання щодо безпечного обслуговування пресів, правил користування індивідуальними засобами захисту та дій у разі аварійної ситуації. Необхідним є регулярне проведення медичних оглядів працівників, особливо тих, хто безпосередньо контактує з нагрітим насінням, олією та відходами. Виробничий процес повинен бути організований таким чином, щоб мінімізувати контакт людини з потенційно небезпечними зонами та компонентами обладнання. При роботі з важким та гарячим обладнанням слід забезпечити наявність допоміжних механізмів для подачі та вивантаження насіння та макухи, що знижує фізичне навантаження на персонал та ризики травматизму.

Систематичний контроль та документування виробничих процесів є важливою складовою охорони праці та екологічної безпеки. Ведення журналів технічного обслуговування обладнання, реєстрація аварій та нещасних випадків дозволяє своєчасно виявляти причини інцидентів і вживати заходи для їх попередження. Регулярний аналіз впливу технологічного процесу на навколишнє середовище та дотримання норм утилізації відходів дозволяє підтримувати екологічну безпеку виробництва на високому рівні.

Підсумовуючи, можна стверджувати, що організація охорони праці та захисту навколишнього середовища під час механічного виробництва олії з насіння ріпаку є багатокомпонентною системою, яка включає безпеку обладнання, контроль температурного режиму, вентиляцію та аспірацію, належне поводження з відходами, навчання персоналу та регулярний контроль стану виробничих процесів.


|   |  |
|---|--|
| <p><b>1. Загальна інформація</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Місце роботи – лінія з виробництва ріпакової олії.</li> <li>2. Вид робіт – вилучення ріпакової олії пресовим способом.</li> <li>3. Посада – оператор лінії.</li> <li>4. Тривалість робочого часу – 2 зміни (07:00–18:30; 19:00–06:30).</li> <li>5. Проходження медогляду – 1 раз на рік.</li> <li>6. Проходження вторинного інструктажу з охорони праці – 1 раз на 6 місяців.</li> <li>7. Термін дії картки: до 01.12.2028 р.</li> </ol>   | <p><b>2. Забезпечення одягом та засобами індивідуального захисту</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Санітарний одяг (4 комплекти) – 1 раз на рік.</li> <li>2. Взуття шкіряне жаростійке – 1 раз на 6 місяців.</li> <li>3. Навушники бавовняні – 1 раз на 3 місяці.</li> <li>4. Рукавиці трикотажні, навушники протишумові, окуляри захисні – до зносу.</li> </ol>   |
| <p><b>3. Вимоги перед початком роботи</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. До роботи допускають осіб, які досягли 18-річного віку, пройшли медичне обстеження та не мають медичних протипоказань, вступний інструктаж, спеціальне навчання.</li> <li>2. Робітник повинен одягнути спецодяг, підготувати робочу зону.</li> <li>3. Перевірити роботу штучної вентиляції, справність та наявність захисних огорожень приводів робочих органів.</li> <li>4. Перед запуском обладнання перевірити, що нікому не загрожує небезпека від рухомих частин і механізмів.</li> <li>5. Перевірити роботу обладнання на холостому ходу.</li> <li>6. Про виявленні порушення і недоліки доповісти безпосередньому керівнику і до їх усунення до роботи не приступати.</li> </ol> | <p><b>4. Вимоги під час роботи</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Робітнику дозволяється виконувати тільки ту роботу, за якою пройдено навчання, інструктаж з охорони праці, до якої допущений особою, відповідальною за безпечне проведення осіб</li> <li>2. Необхідно утримувати своє робоче місце у належній чистоті, своєчасно прибирати з підлоги розсипану сировину, розливу готову продукцію, тощо.</li> <li>3. Необхідно застосовувати засоби захисту рук під час роботи з гарячими поверхнями.</li> <li>4. Можна використовувати тільки справне устаткування, інструмент, пристосування.</li> <li>5. Не дозволяється доручати свою роботу іншим особам, які не пройшли відповідне навчання та інструктаж.</li> </ol> |
| <p><b>5. Вимоги після закінчення роботи</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Привести в порядок робоче місце, інструменти та пристосування прибрати у відведене місце.</li> <li>2. Зняти і здати на збереження спецодяг і засоби індивідуального захисту.</li> <li>3. Виконати правила особистої гігієни.</li> <li>4. Про виявленні порушення і недоліки під час проведення робіт доповісти безпосередньому керівнику і змінному працівнику.</li> </ol>  | <p><b>6. Вимоги в надзвичайних ситуаціях</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. негайно припинити всі роботи.</li> <li>2. Вимкнути все обладнання;</li> <li>3. Доповісти керівнику про виникнення надзвичайної ситуації.</li> </ol>   |
| <p>Контакти служб екстреної допомоги</p>  |  |
| <p>Внутрішні службові номери:<br/> Майстер відділення: 000-00-00<br/> Служба охорони праці:<br/> 000-00-00 – головний інженер,<br/> 000-00-00 – медичний кабінет.</p>   |  <p><b>ТЕЛЕФОНИ СЛУЖБИ БЕЗПЕКИ</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li><b>101</b> - пожежна допомога</li> <li><b>102</b> - поліція</li> <li><b>103</b> - швидка допомога</li> <li><b>104</b> - газова служба</li> </ul>   |

Рисунок 4.1 – Картка безпеки праці оператора лінії з виробництва рослинної олії з насіння ріпаку

Дотримання цих вимог забезпечує безпечні умови праці, зменшує ризик травматизму, зберігає якість продукції та мінімізує негативний вплив на навколишнє середовище. Механічне виробництво олії з насіння ріпаку за рахунок використання пресів є безпечним процесом за умови впровадження комплексної системи охорони праці та екологічного контролю, що відповідає сучасним стандартам харчової та промислової безпеки.

#### Висновки за розділом

Виробництво олії з насіння ріпаку механічним пресуванням потребує забезпечення безпечних умов праці та мінімізації впливу на навколишнє середовище. Основні ризики для операторів пов'язані з механічними травмами, опіками, електротравмами, впливом пилу та шуму. Їх можна знизити завдяки індивідуальним засобам захисту, дотриманню технологічного регламенту, інструктажам і медичним оглядам. Контроль відходів та екологічно безпечні методи переробки макухи дозволяють мінімізувати негативний вплив на довкілля. Дотримання правил охорони праці та екологічної безпеки забезпечує ефективність виробництва, безпеку персоналу та стабільну якість продукції.

## 5 ОРГАНІЗАЦІЙНО-ЕКОНОМІЧНИЙ РОЗДІЛ

Враховуючи проведені експериментальні дослідження механічного пресування насіння ріпаку, можна здійснити розрахунок економічних показників і визначити оптимальний варіант з економічної точки зору, ґрунтуючись на виході олії, ефективності видобутку та енергії деформації. Для цього спершу слід визначити собівартість виробництва 1 кг олії для різних комбінацій факторів пресування. Вихід олії варіювався від 16,17 до 24,78 %, а ефективність видобутку – від 39,11 до 59,93 %. Енергія деформації коливалася від 1,17 до 3,19 кДж, що прямо впливає на витрати електроенергії та зношування обладнання. Для розрахунку умовної собівартості 1 кг олії було прийнято, що вартість 1 кг насіння ріпаку складає 60 грн, а вартість електроенергії для пресування 1 тонни насіння пропорційна енергії деформації та складає 5–10 грн залежно від рівня EN.

Розрахунок показує, що при максимальному виході олії 24,783 % ( $V_D$  60 мм,  $T_{PR}$  80 °С,  $N_{TM}$  60 хв) ефективність видобутку досягає 59,934 %, а енергія деформації лише 1,255 кДж. Для перетворення цих даних у економічні показники слід врахувати масу насіння та вартість одержаної олії. Якщо обробляти 1 тону насіння, маса олії складе приблизно 247,8 кг, а залишкова макуха – 752,2 кг. Собівартість олії при цьому розраховується як вартість насіння плюс витрати на енергію. Вартість насіння складе 60 000 грн, витрати на електроенергію – приблизно 6 000 грн, отже загальні витрати – 66 000 грн. Поділивши на масу отриманої олії, отримуємо собівартість 1 кг олії приблизно 266 грн. Реалізаційна ціна олії 1 кг приймається умовно 350 грн, що дозволяє отримати прибуток на тону олії близько 84 000 грн.

Для порівняння, варіант з  $V_D$  100 мм,  $T_{PR}$  80 °С та  $N_{TM}$  90 хв забезпечує вихід олії 23,05 % та ефективність видобутку 55,74 %, але енергія деформації зростає до 2,232 кДж, що підвищує витрати на електроенергію та знос преса. Для 1 тонни насіння вихід олії складе 230,5 кг, витрати на енергію приблизно 10 000 грн, собівартість олії 1 кг – 304 грн, а прибуток на тону олії – 69 000 грн. Тобто, незважаючи на більший розмір пресувальної камери, економічна ефективність

нижча через зростання енерговитрат та зменшення відсотка видобутку олії.

Аналіз інших комбінацій факторів показує, що варіанти з діаметром  $V_D$  80 мм дають проміжні результати: вихід олії – 21,07–23,05 %, ефективність видобутку – 50,95–55,74 %, а енергія деформації – 2,039–2,232 кДж. При обробці 1 тонни насіння вихід олії складе 210–230 кг, собівартість 1 кг олії – 280–300 грн, а прибуток на тонну – 63–69 тис. грн. Ці значення нижчі за варіант з  $V_D$  60 мм,  $T_{PR}$  80 °C та  $H_{TM}$  60 хв.

Додатково слід враховувати процес релаксації. Виявлено, що для оптимальної комбінації  $V_D$  60 мм,  $T_{PR}$  80 °C та  $H_{TM}$  75 хв час релаксації 5 хв збільшує вихід олії лише на 0,42 %, ефективність екстракції на 1,01 %, що не суттєво впливає на економічний результат і не вимагає додаткових витрат на енергію, тоді як для варіантів з більшим  $V_D$  або довшим  $H_{TM}$  релаксація триває до 20 хв і дає зростання виходу на 2–5 %, але витрати на енергію та час роботи обладнання значно зростають, що знижує економічну ефективність.

Таблиця 5.1 – Результати техніко-економічного розрахунку виробництва олії з насіння ріпаку

| Варіант                             | 1      | 2      | 3      | 4      | 5      |
|-------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| $V_D$ (мм)                          | 60     | 100    | 80     | 60     | 80     |
| $T_{PR}$ (°C)                       | 80     | 80     | 80     | 80     | 60     |
| $H_{TM}$ (хв)                       | 60     | 90     | 90     | 75     | 60     |
| Вихід олії $O_Y$ (%)                | 24,78  | 23,05  | 23,05  | 24,61  | 21,42  |
| Ефективність видобутку $O_{EF}$ (%) | 59,93  | 55,74  | 55,74  | 59,48  | 51,8   |
| Енергія деформації $E_N$ (кДж)      | 1,26   | 2,23   | 2,23   | 3,26   | 2,04   |
| Вихід олії з 1 т насіння (кг)       | 247,8  | 230,5  | 230,5  | 246,1  | 214,2  |
| Собівартість 1 кг олії (грн)        | 266    | 304    | 300    | 270    | 280    |
| Прибуток на 1 т олії (грн)          | 84 000 | 69 000 | 69 000 | 82 500 | 63 000 |

Таким чином, з економічної точки зору оптимальним варіантом є комбінація факторів з діаметром пресувальної камери 60 мм, температурою попередньої обробки 80 °C та тривалістю нагрівання 60–75 хв, яка забезпечує максимальний вихід олії – 24,78 %, ефективність видобутку – 59,93 %, мінімальну енергію деформації – 1,255 кДж та високий прибуток при відносно низьких витратах на

енергію та знос обладнання. Цей варіант дозволяє досягти оптимального балансу між продуктивністю, якістю олії та економічною ефективністю виробництва. Всі інші варіанти, що передбачають збільшення діаметра пресувальної камери або тривалості нагрівання, хоча і можуть підвищити вихід олії при релаксації, економічно менш вигідні через зростання собівартості та витрат часу на виробництво, що робить їх менш доцільними для промислового виробництва.

Отже, з урахуванням експериментальних даних та економічних розрахунків, рекомендується для промислового виробництва ріпакової олії застосовувати пресування насіння з діаметром 60 мм, попередньою обробкою при 80 °С та тривалістю нагрівання 60–75 хв без додаткового тривалого процесу релаксації, що забезпечить максимальну ефективність видобутку олії та прибутковість виробництва.

#### Висновки за розділом

Економічний аналіз пресування насіння ріпаку показав, що оптимальним є варіант із діаметром пресувальної камери 60 мм, температурою попередньої обробки 80 °С та тривалістю нагрівання 60–75 хв. Ця комбінація забезпечує максимальний вихід олії 24,78 %, високу ефективність видобутку 59,93 %, мінімальну енергію деформації 1,255 кДж, собівартість 1 кг олії 266 грн та прибуток на тону олії 84 000 грн. Варіанти з більшим діаметром камери або тривалішим нагріванням економічно менш вигідні через збільшення енергоспоживання, зношування обладнання та зростання собівартості, хоча релаксація може трохи підвищити вихід олії. Рекомендовано для промислового виробництва застосовувати пресування за зазначеними параметрами без тривалого процесу релаксації, що забезпечує оптимальний баланс між продуктивністю, якістю олії та економічною ефективністю.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ І ПРОПОЗИЦІЇ

1. Ріпакова олія є цінним харчовим продуктом завдяки збалансованому складу та високому вмісту природних антиоксидантів, а механізована технологія її виробництва забезпечує ефективне вилучення олії через багатоступеневе пресування та раціональне використання побічних продуктів, формуючи безвідходний і економічно вигідний процес. Комплексний аналіз досліджень підкреслює, що підвищення ефективності виробництва можливе за рахунок оптимізації підготовки насіння, удосконалення пресового обладнання та впровадження адаптивних режимів роботи, що забезпечує високу якість та максимальний вихід олії.

2. Універсальна машина для випробувань на стиснення з вантажопідйомністю 500 кН використана для оцінки впливу факторів стискання, а саме діаметра пресувальної камери ( $V_D$ : 60, 80 та 100 мм), температури попередньої обробки ( $T_{PR}$ : 40, 60 та 80 °C) та часу нагрівання ( $H_{TM}$ : 30, 60 та 90 хв) на показники виходу олії (%), ефективності видобутку олії (%) та енергії деформації (кДж).

3. Фактори стискання та результати оптимізовані за допомогою методології поверхні відгуку (RSM) у поєднанні з планом Бокса–Бенкена (BBD), який є статистичним інструментом для аналізу впливу незалежних факторів на залежні параметри. План Бокса–Бенкена передбачав 17 експериментальних прогонів, включаючи 12 комбінацій факторів стискання та 5 повторень у центральних точках. Згідно з експериментальними даними BBD, комбінації факторів стискання та їх закодовані значення (діаметр камери 60 (-1), температура 60 (0) та час нагрівання 60 (0)) забезпечили максимальний вихід олії 24,783 % та ефективність видобутку олії 59,934 %, при відповідній енергії деформації 1,255 кДж.

4. На основі регресійного аналізу поверхні відгуку побудовані лінійні регресійні моделі (для прогнозування результатів при оптимальних комбінаціях факторів стискання ( $V_D$ : 60 (-1) мм;  $T_{PR}$ : 80 °C (+1) та  $H_{TM}$ : 75 (+0,5) хв). Значення  $p$  для перевірки адекватності моделей були незначущими ( $p > 0,05$ ), а коефіцієнт варіації та відсоткова похибка між прогнозованими та підтвердженими

результатами коливалися від 0,08 % до 2,30 %, що підтверджує адекватність побудованих регресійних моделей для прогнозування показників. Час релаксації 10 хв при комбінації факторів стискання ( $V_D$ : 80 (0) мм,  $T_{PR}$ : 80 °С (+1), та  $H_{TM}$ : 90 (+1) хв) дозволив відновити максимальну кількість залишкової олії приблизно 6 % із макухи. Навпаки, комбінації факторів стискання ( $V_D$ : 60 (-1) мм,  $T_{PR}$ : 80 °С (+1), та  $H_{TM}$ : 60 (0)/75 (+0,5) хв) можуть не потребувати процесу релаксації, оскільки відновлена залишкова олія була незначною.

5. Виробництво олії з насіння ріпаку механічним пресуванням потребує забезпечення безпечних умов праці та мінімізації впливу на навколишнє середовище. Основні ризики для операторів пов'язані з механічними травмами, опіками, електротравмами, впливом пилу та шуму. Їх можна знизити завдяки індивідуальним засобам захисту, дотриманню технологічного регламенту, інструктажам і медичним оглядам. Контроль відходів та екологічно безпечні методи переробки макухи дозволяють мінімізувати негативний вплив на довкілля. Дотримання правил охорони праці та екологічної безпеки забезпечує ефективність виробництва, безпеку персоналу та стабільну якість продукції.

6. Економічний аналіз пресування насіння ріпаку показав, що оптимальним є варіант із діаметром пресувальної камери 60 мм, температурою попередньої обробки 80 °С та тривалістю нагрівання 60–75 хв. Ця комбінація забезпечує максимальний вихід олії 24,78 %, високу ефективність видобутку 59,93 %, мінімальну енергію деформації 1,255 кДж, собівартість 1 кг олії 266 грн та прибуток на тонну олії 84 000 грн. Варіанти з більшим діаметром камери або тривалішим нагріванням економічно менш вигідні через збільшення енергоспоживання, зношування обладнання та зростання собівартості, хоча релаксація може трохи підвищити вихід олії. Рекомендовано для промислового виробництва застосовувати пресування за зазначеними параметрами без тривалого процесу релаксації, що забезпечує оптимальний баланс між продуктивністю, якістю олії та економічною ефективністю.

## БІБЛІОГРАФІЯ

1. Tang L., Yasir H., Zehra A., Shohag M.J.I., He Z., Yang X. Endophytic inoculation couple with soil amendment and foliar inhibitor ensure phytoremediation and agro-production in cadmium contaminated soil under oilseed-rice rotation system. *Science of The Total Environment*. 2020. Vol. 748. P. 142481.
2. Foley J.A., Ramankutty N., Brauman K.A., Cassidy E.S., Gerber J.S., Johnston M., Mueller N.D., Connell C., Ray D.K., West P.C. et al. Solutions for a cultivated planet. *Nature*. 2011. Vol. 478. P. 337–342.
3. Pullens J.W.M., Sharif B., Trnka M., Balek J., Semenov M.A., Olesen J.E. Risk factors for European winter oilseed rape production under climate change. *Agricultural and Forest Meteorology*. 2019. Vol. 272–273. P. 30–39.
4. van Duren I., Voinov A., Arodudu O., Firrisa M.T. Where to produce rapeseed biodiesel and why? Mapping European rapeseed energy efficiency. *Renewable Energy*. 2015. Vol. 74. P. 49–59.
5. Monfreda C., Ramankutty N., Foley J.A. Farming the planet: 2. Geographic distribution of crop areas, yields, physiological types, and net primary production in the year 2000. *Global Biogeochemical Cycles*. 2008. Vol. 22. P. 1–19.
6. FAOSTAT. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Statistics Division. Rome, 2012.
7. Tuck G., Glendining M.J., Smith P., House J.I., Wattenbach M. The potential distribution of bioenergy crops in Europe under present and future climate. *Biomass and Bioenergy*. 2006. Vol. 30. P. 183–197.
8. Li X., Zhang L., Zhang Y., Wang D., Xuefang W., Yu L., Zhang W., Li P. Review of NIR spectroscopy methods for nondestructive quality analysis of oilseeds and edible oils. *Trends in Food Science & Technology*. 2020. Vol. 101. P. 172–181.
9. Yang R.N., Zhang L.X., Li P.W., Yu L., Mao J., Wang X., Zhang Q. A review of chemical composition and nutritional properties of minor vegetable oils in China. *Trends in Food Science & Technology*. 2018. Vol. 74. P. 26–32.
10. Vithu P., Moses J.A. Machine vision system for food grain quality

evaluation: A review. *Trends in Food Science & Technology*. 2016. Vol. 56. P. 13–20.

11. Embaye W.T., Bergtold J.S., Archer D., Flora C., Andrango G.C., Odening M., Buysse J. Examining farmers' willingness to grow and allocate land for oilseed crops for biofuel production. *Energy Economics*. 2018. Vol. 71. P. 311–320.

12. Koubaa M., Mhemdi H., Barba J.F., Roohinejad S., Greiner R., Vorobiev E. Oilseeds treatment by ultrasounds and microwaves to improve oil yield and quality: An overview. *Food Research International*. 2016. Vol. 85. P. 59–66.

13. Daun J.K., Eskin M.N.A., Hickling D. *Canola Chemistry, Production, Processing and Utilization*. Urbana: AOCS Press, 2011. 432 p.

14. Liu J.-J., Gasmalla M.A.A., Li P., Yang R. Enzyme-assisted extraction processing from oilseeds: Principle, processing and application. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. 2016. Vol. 35. P. 184–193.

15. Rombaut N., Savoie R., Thomasset B., Belliard T., Castello J., Hecke E.V., Lanoiselle J.-L. Grape seed oil extraction: Interest of supercritical fluid extraction and gas-assisted mechanical extraction. *Comptes Rendus Chimie*. 2014. Vol. 17. P. 284–292.

16. Voges S., Eggers R., Pietsch A. Gas assisted oilseed pressing. *Separation and Purification Technology*. 2008. Vol. 63. P. 1–14.

17. Willems P. *Gas-Assisted Mechanical Expression of Oilseeds*. PhD Thesis. University of Twente, 2007. 104 p.

18. Cao X., Ito Y. Supercritical fluid extraction of grape seed oil and separation of free fatty acids by high-speed counter-current chromatography. *Journal of Chromatography A*. 2003. Vol. 1021. P. 117–124.

19. Bargale P.C. *Mechanical Oil Expression from Selected Oilseeds under Uniaxial Compression*. University of Saskatchewan, 1997.

20. Popescu M., Avram M.D., Oancea F., Lupu C., Cornea C.P. Bioassisted azeotropic Soxhlet extraction of mustard oilseeds. *Journal of Biotechnology*. 2017. Vol. 256. P. S101.

21. Gunstone F. *Rapeseed and Canola Oil Production Processing, Properties and Uses*. New York: John Wiley and Sons, 2009.

22. García-Ayuso L.E., Velasco J., Dobarganes M.C., Castro L.M.D.

Determination of the oil content of seeds by focused microwave-assisted Soxhlet extraction. *Chromatographia*. 2000. Vol. 52. P. 103–108.

23. Mhemdi H., Koubaa M., Majid A.E., Vorobiev E. Solute and gas assisted mechanical expression for green oil recovery from rapeseed hulls. *Industrial Crops & Products*. 2016. Vol. 92. P. 300–307.

24. Rodrigues J., Miranda I., Gominho J., Vasconcelos M., Barradas G., Pereira H., Bianchi-de-Aguiar F., Ferreira-Dias S. Modeling and optimization of conditioning of *Jatropha curcas* L. seeds. *Industrial Crops & Products*. 2016. Vol. 83. P. 614–619.

25. Kabutey A., Mizera C., Dajbych O., Hrabec P., Herak D., Demirel C. Modelling and optimization of pumpkin seed oil extraction. *Processes*. 2021. Vol. 9. P. 540.

26. Herak D., Kabutey A., Choteborsky R., Petru M., Sigalingging R. Mathematical models describing relaxation behaviour of *Jatropha curcas* L. seeds. *Biosystems Engineering*. 2015. Vol. 131. P. 77–83.

27. Gupta R.K., Das S.K. Fracture resistance of sunflower seed and kernel. *Journal of Food Engineering*. 2000. Vol. 46. P. 1–8.

28. Darwish H.W., Bakheit A.H., Al-Anazi Z.S., Al-Shakliyah N.S., Al-Hossanini A.M., Naguib I.A., Darwish I.A. Response surface methodology for optimization of micellar-enhanced spectrofluorimetric method for assay of foretinib in bulk powder and human urine. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*. 2021. Vol. 257. P. 119811.

29. Nanvakenari S., Movagharnejad K., Latifi A. Evaluating the fluidized-bed drying of rice using response surface methodology and artificial neural network. *LWT – Food Science and Technology*. 2021. Vol. 147. P. 111589.

30. Rebollo-Hernanz M., Canas S., Taladrid D., Segovia A., Begona B., Aguilera Y., Martin-Cabrejas M.A. Extraction of phenolic compounds from cocoa shell: Modeling using response surface methodology and artificial neural networks. *Separation and Purification Technology*. 2021. Vol. 270. P. 118779.

31. Subbian V., Kumar S.S., Chaithanya K., Arul S.J., Kaliyaperumal G., Adam K.M. Optimization of solar tunnel dryer for mango slice using response surface

methodology. *Materials Today: Proceedings*. 2021. Vol. 46. P. 7844–7847.

32. Ye W., Wang X., Liu Y., Chen J. Analysis and prediction of the performance of free-piston Stirling engine using response surface methodology and artificial neural network. *Applied Thermal Engineering*. 2021. Vol. 188. P. 116557.

33. Jana D.K., Roy K., Dey S. Comparative assessment on lead removal using micellar-enhanced ultrafiltration (MEUF) based on a type-2 fuzzy logic and response surface methodology. *Separation and Purification Technology*. 2018. Vol. 207. P. 28–41.

34. Mourabet M., El Rhilassi A., El Boujaady H., Bennani-Ziatni M., Taitai A. Use of response surface methodology for optimization of fluoride adsorption in aqueous solution by Brushite. *Arabian Journal of Chemistry*. 2017. Vol. 10. P. S3292–S3302.

35. Bogaert L., Mathieu H., Mhemdi H., Vorobiev E. Characterization of oilseeds mechanical expression in an instrumented pilot screw press. *Industrial Crops & Products*. 2018. Vol. 121. P. 106–113.

36. ISI. *Indian Standard Methods for Analysis of Oilseeds*, IS:3579. New Delhi: Indian Standard Institute (ISI), 1966.

37. Huang S., Hu Y., Li F., Jin W., Godara V., Wu B. Optimization of mechanical oil extraction process from *Camellia oleifera* seeds regarding oil yield and energy consumption. *Journal of Food Process Engineering*. 2019. Vol. 42. P. e13157.

38. Niu L., Li J., Chen M.S., Xu Z.F. Determination of oil contents in *Sacha inchi* (*Plukenetia volubilis*) seeds at different developmental stages using Soxhlet method and time-domain NMR. *Industrial Crops & Products*. 2014. Vol. 56. P. 187–190.

39. Danlami J.M., Arsad A., Zaini M.A.A. Characterization and process optimization of castor oil extracted by Soxhlet method using polar and non-polar solvents. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*. 2015. Vol. 47. P. 99–104.

40. Blahovec J. *Agromaterials Study Guide*. Prague: Czech University of Life Sciences Prague, 2008.

41. Goo Y.T., Yang H.M., Kim C.H., Kim M.S., Kim H.K., Chang I.H., Choi Y.W. Optimization of a floating poloxamer 407-based hydrogel using Box–Behnken design. *European Journal of Pharmaceutical Sciences*. 2021. Vol. 163. P. 105885.

42. Khatib I., Chow M.Y.T., Ruan J., Cipolla D., Chan H.-K. Modeling of spray drying method to produce ciprofloxacin nanocrystals using Box–Behnken design. *International Journal of Pharmaceutics*. 2021. Vol. 597. P. 120277.
43. Song H., Chung H., Nam K. Response surface modeling with Box–Behnken design for strontium removal from soil by calcium-based solution. *Environmental Pollution*. 2021. Vol. 274. P. 116577.
44. Ocholi O., Menkiti M., Auta M., Ezemagu I. Optimization of the operating parameters for extractive synthesis of biolubricant from sesame seed oil via RSM. *Egyptian Journal of Petroleum*. 2018. Vol. 27. P. 265–275.
45. Witek-Krowiak A., Chojnacka K., Podstawczyk D., Dawiec A., Pokomeda K. Application of RSM and ANN methods in optimization of biosorption process. *Bioresource Technology*. 2014. Vol. 160. P. 150–160.
46. Hernandez-Santos B., Rodríguez-Miranda J., Herman-Lara E., Torruco-Uco J.G., Carmona-Garcia R., Juarez-Barrientos J.M., Chavez-Zamudio R., Martinez-Sanchez C.E. Effect of ultrasound-assisted oil extraction on physicochemical properties of pumpkin seed oil. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2016. Vol. 31. P. 429–436.
47. Deli S., Farah Masturah M., Tajul Aris Y., Wan Nadiah W.A. Effects of screw press parameters on oil yield from *Nigella sativa* seeds. *International Food Research Journal*. 2011. Vol. 18. P. 1367–1373.
48. Divisova M., Herak D., Kabutey A., Sigalingging R., Svatonova T. Deformation curve characteristics of rapeseeds and sunflower seeds under compression. *Scientia Agriculturae Bohemica*. 2014. Vol. 45. P. 180–186.
49. Chakespari A.G., Rajabipour A., Mobli H. Strength behaviour of apples under compression loading. *Modern Applied Science*. 2010. Vol. 4. P. 173–182.
50. Lysiak G. Fracture toughness of pea: Weibull analysis. *Journal of Food Engineering*. 2007. Vol. 83. P. 436–443.
51. Kumar K.A., Viswanathan K. Study of UV transmission through edible oils and chicken oil. *Journal of Spectroscopy*. 2013. Vol. 2013. P. 540417.
52. Zhang N., Li Y., Wen S., Sun Y., Chen J., Gao Y., Sagymbek A., Yu X. Analytical methods for determining the peroxide value of edible oils: A mini-review.

*Food Chemistry*. 2021. Vol. 358. P. 129834.

53. Gurkan A.K.G., Kabutey A., Selvi K.C., Hrabe P., Herak D., Frankova A. Investigation of heating and freezing pretreatments on mechanical, chemical and spectral properties of sunflower seeds and oil. *Processes*. 2020. Vol. 8. P. 411.

54. StatSoft Inc. *STATISTICA for Windows*. Tulsa: StatSoft Inc., 2013.

55. Kaewwinud N., Khokhajaikiat P., Boonma A. Effect of biomass characteristics on durability of cassava residues pellets. *Research in Agricultural Engineering*. 2018. Vol. 64. P. 15–19.