

## ВПЛИВ СТУПЕНЯ МЕХАНІЧНОГО ПОШКОДЖЕННЯ НАСІННЯ САФЛОРУ ТА УМОВ ЗБЕРІГАННЯ НА ОКИСНЮВАЛЬНУ СТАБІЛЬНІСТЬ ОЛІЇ

**Л. М. КОНОНЕНКО**, кандидат сільськогосподарських наук  
**Н. М. ПОЛТОРЕЦЬКА**, кандидат сільськогосподарських наук  
Уманський національний університет

У результаті дослідження встановлено, що поєднання механічного травмування насіння сафлору (*Carthamus tinctorius* L.) та температурних режимів зберігання суттєво детермінує біохімічну стабільність ліпідного комплексу. Зі зростанням ступеня травмування та температури зберігання до +20°C активність ліпази зростала у 5,8–15,7 разів, що призводило до інтенсивного гідролізу тригліцеридів. Встановлено, що перекисне число олії у макротравмованому насінні через 12 місяців досягало критичних значень 20,85–28,94 ммоль/кг, що у 12–16 разів перевищує показники контролю. Вміст природних антиоксидантів при цьому стрімко знижувався: сума токоферолів зменшувалася на 57–74 %, а каротиноїдів – на 55–77 %. Кислотне число олії у варіантах із порушенням цілісності ядра при температурі +20°C зростало до 4,95–7,15 мг КОН/г, переводячи сировину в категорію технічної. Найвищу біохімічну резистентність до окиснювальних процесів проявив сорт Живчик, який зберіг на 28 % більше токоферолів порівняно із сортом Сонячний. Частка впливу фактора травмування на варіабельність показників становила 32–38 %. Коефіцієнт варіації показників не перевищував 7 %, що свідчить про високу достовірність отриманих результатів.

**Ключові слова:** сафлор красильний, ліпаза, токофероли, зберігання, сорти.

**Вступ.** Сафлор красильний (*Carthamus tinctorius* L.) є перспективною олійною культурою, адаптованою до посушливих умов вирощування. Його насіння містить до 50 % високоякісної олії, багатой на лінолеву кислоту та природні антиоксиданти (токофероли, каротиноїди) [1]. Однак широке впровадження механізованих технологій збирання та післязбиральної обробки призводить до високого рівня механічного травмування насіння. Порушення цілісності плодової оболонки ініціює незворотні біохімічні процеси, що критично знижують якість олійної сировини та терміни її зберігання.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У сучасних умовах аграрного виробництва сафлор красильний (*Carthamus tinctorius* L.) розглядається як одна з найбільш перспективних олійних культур, особливо для степових регіонів України, завдяки його високій адаптивності та посухостійкості [2, 3]. Дослідники зазначають, що формування високої продуктивності культури та якості насінневої сировини суттєво залежить від агротехнічних прийомів, таких як норми висіву, ширина міжрядь та умови водоспоживання [4, 5]. Автори

вказують, що на півдні України в умовах зрошення сафлор демонструє високий потенціал насінневої продуктивності, що підтверджує економічну доцільність його вирощування [6].

Важливим етапом у ланцюгу виробництва є вивчення фізико-хімічних та технологічних властивостей насіння вітчизняних сортів [7, 8]. Науковці підтверджують, що структурно-механічні та реологічні властивості насінневої маси безпосередньо впливають на ефективність процесів переробки, зокрема на вихід олії під час віджиму в гвинтових пресах [9].

Особлива увага в наукових працях приділяється питанню підготовки якісного посівного матеріалу та товарного насіння. Використання сучасних вібраційних машин, решітних та пневматичних сепараторів дозволяє значно підвищити посівні властивості насіння [10, 11]. Проте, механізована обробка насіння на етапах очищення та калібрування неминуче призводить до виникнення механічних пошкоджень [12].

Незважаючи на значну кількість робіт, присвячених продуктивності сортів у різних зонах України та технічному забезпеченню переробки рослинної сировини, питання впливу ступеня травмування насіння на подальшу лежкість та окиснювальну стабільність олії залишаються висвітленими недостатньо. Більшість існуючих досліджень фокусуються на польовій схожості травмованого насіння і зменшенні продуктивності [13].

Сучасні дослідження підтверджують, що травмоване насіння характеризується підвищеною інтенсивністю дихання та швидкою активацією ліполітичних ферментів. У працях вітчизняних та зарубіжних вчених зазначається, що доступ кисню до внутрішніх структур насінини через тріщини та сколи інтенсифікує окиснювальні процеси [14, 15]. Проте питання комплексного впливу генотипу, різних ступенів травмування та температурних режимів на динаміку антиоксидантного захисту сафлору залишаються недостатньо вивченими та і динаміка біохімічних показників (кислотного, перекисного чисел) та активності ліпази в пошкодженому насінні під час тривалого зберігання за різних температурних режимів потребує глибшого вивчення.

**Мета роботи** – дослідити закономірності зміни біохімічних показників якості олії сафлору залежно від рівня травмування насінневої оболонки та температурних режимів зберігання.

**Методика досліджень.** Дослідження проводили на базі УНУ з насінням сафлору красильного (*Carthamus tinctorius* L.) урожаю 2023–2025 рр. Експеримент закладено за чотирифакторною схемою у триразовій повторності згідно схеми досліджень.

Схема дослідю:

1. Фактор А (Сорт): Добриня (К), Живчик, Сонячний.
2. Фактор В (Ступінь механічного травмування):
  - Ціле насіння (ручне виділення) (К);
  - Мікротравми – наявність тріщин оплодня без оголення ядра;
  - Макротравми – пошкодження ядра (бите насіння).
3. Фактор С (Температурний режим зберігання):

- +5°C (стабільне охолодження) (К);
- +15°C (кондиціоноване середовище);
- +20°C (складські умови).
- 4. Фактор D (Тривалість зберігання):
  - Свіжозібране (0 міс.) (К);
  - 6 місяців;
  - 9 місяців;
  - 12 місяців (1 рік).

Виділення олії з насіння сафлору здійснювали методом холодного пресування на лабораторному гідравлічному пресі (для визначення КЧ та ПЧ) та методом вичерпної екстракції в апараті Сокслета згідно з ДСТУ 7571 : 2014 для повного аналізу вмісту ліпідів та супутніх речовин [16]. Кислотне число, що характеризує вміст вільних жирних кислот, визначали згідно з ДСТУ ISO 660:2009. Наважку олії розчиняли у суміші розчинників (етанол-ефір 1 : 1) та титрували 0,1 н. спиртовим розчином гідроксиду калію (KOH) у присутності індикатора фенолфталеїну до появи слабко-рожевого забарвлення, що не зникає протягом 30 секунд. Розрахунок: проводили за формулою  $X = m \cdot 5,61 \cdot V \cdot K$ , де V — об'єм KOH, використаного на титрування, мл; m — маса наважки олії, г [17].

Показник вмісту первинних продуктів окиснення визначали за ДСТУ ISO 3960 : 2001. Базується на реакції взаємодії продуктів окиснення (перекисів та гідроперекисів) з йодидом калію в оцтовокислому середовищі. До наважки олії додавали суміш крижаної оцтової кислоти та хлороформу, після чого вводили насичений розчин KI. Вільний йод, що виділився в результаті реакції, титрували 0,01 н. розчином тіосульфату натрію ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ) з використанням крохмалю як індикатора [18]. Активність ліпази визначали титриметричним методом відповідно до загальних вимог ДСТУ 4850 : 2007 щодо аналізу ферментативної активності насіння олійних культур.

Оцінка здатності ферменту розщеплювати тригліцериди з утворенням вільних жирних кислот за певний проміжок часу. Наважку подрібненого насіння (шрот) термостатували при оптимальній температурі (30°C) протягом 24 годин. Після екстракції вільних жирних кислот проводили їх нейтралізацію розчином лугу. Активність виражали в міліграмах KOH, необхідних для нейтралізації кислот, що утворилися в 1 г насіння за добу (ум. од.) [19]. Антиоксидантний потенціал олії оцінювали спектрофотометричними методами згідно з ДСТУ 4568 : 2006 (для токоферолів) та ISO 17932 : 2011 (для каротиноїдів).

Каротиноїди: визначали за оптичною густиною розчину олії в гексані на спектрофотометрі при довжині хвилі  $\lambda = 450$  нм. Розрахунок проводили з використанням коефіцієнта екстинкції для  $\beta$ -каротину. Токофероли (вітамін E): визначали колориметричним методом, що базується на здатності токоферолів відновлювати залізо (III) до заліза (II), яке утворює забарвлений комплекс з  $\alpha, \alpha'$ -дипіридиллом. Вимірювання проводили при  $\lambda = 520$  нм [21].

Для обробки результатів чотирифакторного дослідження використовували пакет прикладних програм Statistica 12.0. Розраховували середні значення, ліміти (min–max), середньоквадратичне відхилення та коефіцієнт варіації (V, %). Для встановлення вірогідності впливу факторів (сорт, травмування, температура,

час) та їхніх комбінацій проводили багатоваріантний дисперсійний аналіз з визначенням частки впливу фактора. Різницю вважали достовірною при рівні значущості  $p < 0,05$  за показником найменшої істотної різниці ( $HP_{05}$ ) [22].

**Результати досліджень.** Дослідження динаміки кислотного числа (КЧ) дозволило встановити глибину гідролітичного розпаду олії під впливом екзогенних та ендогенних чинників. За контроль у дослідженні прийнято показники цілого насіння сорту Добриня за стабільного охолодження ( $+5^{\circ}\text{C}$ ), де кислотне число (КЧ) протягом усього терміну зберігання залишалося мінімальним і не перевищувало  $0,82$  мг КОН/г. Вихідні значення КЧ у свіжозібраному насінні (0 міс.) коливалися в межах  $0,62$ – $0,92$  мг КОН/г, що свідчить про високу якість вихідної сировини та її відповідність нормативним вимогам до харчових олій. Порівняльний аналіз показав, що контрольні варіанти всіх трьох генотипів за температури  $+5^{\circ}\text{C}$  зберігали біохімічну стабільність протягом 12 місяців, тоді як будь-яке відхилення від контрольних параметрів (травмування або підвищення температури) призводило до вірогідного зростання кислотності олії.

Встановлено, що сорт Живчик володіє найвищою резистентністю до накопичення вільних жирних кислот. Дослідження дозволяють відзначити, що у максимально стресовому варіанті (макротравма,  $+20^{\circ}\text{C}$ ) значення КЧ у цього сорту на кінець року становило  $4,95$  мг КОН/г, що на  $30,7\%$  менше порівняно з сортом Сонячний ( $7,15$  мг КОН/г). Це вказує на меншу активність гідролітичних ферментів у насінні Живчика (табл. 1).

Результати вказують, що механічне пошкодження насіння виступає каталізатором гідролізу. Порушення цілісності оболонки призводить до активації ліпази, що чітко простежується вже через 6 місяців зберігання. У травмованих зразках при  $+20^{\circ}\text{C}$  кислотне число зростає у  $4,5$ – $7,7$  рази порівняно з початковим станом, тоді як у цілому насінні це зростання не перевищує  $1,5$ – $2,0$  рази. Варто вказати, що температура зберігання суттєво модифікує швидкість ферментативних реакцій. Так, за температурного режиму  $+5^{\circ}\text{C}$  вона дозволяє підтримувати кислотне число на рівні, близькому до нормативного (до  $2,2$ – $3,0$  мг КОН/г), навіть у варіантах з макротравмами. Натомість підвищення температури до  $+20^{\circ}\text{C}$  прискорює гідролітичне псування олії, переводячи її в категорію технічної (нехарчової) сировини.

Найбільш деструктивний вплив на якість олії чинить поєднання макротравмування та високої температури зберігання. За таких умов відбувається стрімке накопичення вільних жирних кислот, що корелює з раніше встановленим зростанням перекисного числа та активності ліпази. Представлені дані свідчать про високу достовірність отриманих результатів. Значення  $HP_{05}$  для взаємодії всіх чотирьох факторів ( $ABCD=0,14$ ) підтверджує, що будь-яка різниця між варіантами, яка перевищує це число, є статистично значущою і зумовленою саме умовами експерименту, а не випадковими чинниками.

Статистично підтверджено, що найбільший розмах варіації показника зафіксовано за фактором В (травмування). У сорту Сонячний при переході від цілого насіння до макротравмованого (при  $+20^{\circ}\text{C}$ ) кислотне число зросло з  $1,42$  до  $7,15$  мг КОН/г, що у багато разів перевищує похибку досліджу.

**Табл. 1. Динаміка кислотного числа олії сафлору залежно від генотипу, ступеня травмування та температурних режимів зберігання, мг КОН/г**

Сорт (А)	Ступінь травмування (В)	Температура зберігання (С)	Тривалість зберігання, місяців (D)			
			0 місяців	6 місяців	9 місяців	12 місяців
Добриня (К)	Ціле насіння (К)	+5°C(К)	0,65(К)	0,70	0,76	0,82
		+15°C	0,65	0,78	0,85	0,94
		+20°C	0,65	0,88	1,02	1,18
	Мікротравми	+5°C	0,72	0,85	0,98	1,15
		+15°C	0,72	1,12	1,45	1,82
		+20°C	0,72	1,56	2,15	2,84
	Макротравми	+5°C	0,84	1,42	1,88	2,45
		+15°C	0,84	1,95	2,86	3,92
		+20°C	0,84	2,65	4,12	5,85
Живчик	Ціле насіння	+5°C	0,62	0,66	0,71	0,78
		+15°C	0,62	0,72	0,80	0,88
		+20°C	0,62	0,82	0,94	1,05
	Мікротравми	+5°C	0,68	0,78	0,89	1,02
		+15°C	0,68	0,95	1,28	1,56
		+20°C	0,68	1,32	1,85	2,42
	Макротравми	+5°C	0,78	1,25	1,65	2,12
		+15°C	0,78	1,74	2,42	3,35
		+20°C	0,78	2,34	3,68	4,95
Сонячний	Ціле насіння	+5°C	0,68	0,75	0,82	0,90
		+15°C	0,68	0,85	0,98	1,12
		+20°C	0,68	0,95	1,18	1,42
	Мікротравми	+5°C	0,75	0,98	1,22	1,48
		+15°C	0,75	1,35	1,84	2,35
		+20°C	0,75	1,88	2,75	3,64
	Макротравми	+5°C	0,92	1,68	2,24	2,95
		+15°C	0,92	2,42	3,56	4,88
		+20°C	0,92	3,45	5,28	7,15

*НІР<sub>05</sub>: фактор А (сорт) – 0,04; фактор В (травмування) – 0,05; фактор С (температура) – 0,05; фактор D (тривалість) – 0,04; взаємодія ABCD – 0,14*

Порівняння результатів із залученням НІР показує, що зміна температури з +5°C на +15°C для цілого насіння сорту Живчик призводить до несуттєвих змін (0,78 проти 0,88 за 12 міс.), що перебуває на межі статистичної похибки. Проте для макротравмованого насіння ця ж зміна температури викликає різке зростання КЧ (2,12 проти 3,35), що є математично доведеним фактором псування (табл. 1).

Сортові відмінності (фактор А) також є достовірними. Різниця між КЧ сортів Живчик (4,95) та Сонячний (7,15) у критичних точках значно перевищує

$НІР_{05} = 0,04$ , що дозволяє офіційно рекомендувати сорт Живчик як найбільш придатний для тривалого зберігання в нерегульованих умовах (табл. 1).

Аналіз пероксидного окиснення ліпідів дозволив встановити критичні точки втрати стабільності олії сафлору за умови тривалого зберігання. Встановлено, що швидкість накопичення гідроперекисів перебуває у прямій експоненціальній залежності від ступеня механічного пошкодження насіння. При макротравмуванні значення ПЧ зростають у 15,2–23,7 разів відносно початкового стану. Статистична достовірність цього підтверджується значенням  $НІР_{05}$  за фактором В (0,15), що вказує на визначальну роль цілісності плодової оболонки як бар'єра для дифузії кисню.

Дослідженнями вказується, що підвищення температури зберігання до  $+20^{\circ}\text{C}$  виступає потужним ініціатором ланцюгових реакцій радикального окиснення. Так, зафіксовано, що у варіантах із травмами при  $+20^{\circ}\text{C}$  поріг харчової придатності олії (10 ммоль/кг) долається вже на 6-й місяць зберігання (у сорту Сонячний – 12,45 ммоль/кг). Натомість режим  $+5^{\circ}\text{C}$  забезпечує відносну стабільність ПЧ навіть у травмованому насінні протягом першого півріччя.

Виявлено статистично значущу перевагу сорту Живчик за показником окиснювальної стабільності. У критичній точці (макротравма,  $+20^{\circ}\text{C}$ , 12 міс.) ПЧ олії цього сорту становило 20,85 ммоль/кг, що на 27,9 % нижче порівняно із сортом Сонячний. Така різниця суттєво перевищує  $НІР_{05}$  за фактором А (0,12), що дозволяє класифікувати сорт Живчик як найбільш технологічно стійкий до стресових умов післязбиральної обробки.

Досліджено, що найбільш деструктивний вплив на ліпідний комплекс чинить поєднання макротравмування та температури  $+20^{\circ}\text{C}$ . Взаємодія факторів ABCD (0,38) демонструє синергізм дії механічного та температурного чинників: при одночасному накладанні цих стресорів швидкість псування олії зростає не сумарно, а прогресивно, призводячи до повної незворотної деградації олії наприкінці терміну зберігання.

За абсолютний контроль у досліді прийнято зразки цілого насіння сорту Добриня за умов стабільного охолодження ( $+5^{\circ}\text{C}$ ), де значення перекисного числа (ПЧ) протягом 12 місяців зберігання зростало мінімально – з 1,02 до 1,54  $\frac{1}{2}\text{O}$  ммоль/кг. Вихідний рівень ПЧ у свіжозібраному насінні всіх генотипів знаходився в межах 0,98–1,22  $\frac{1}{2}\text{O}$  ммоль/кг, що підтверджує первинну високу якість олії та низький ступінь окиснення ліпідів (табл. 2).

Встановлено, що контрольні варіанти за температури  $+5^{\circ}\text{C}$  забезпечували стабільність жирнокислотного комплексу, тоді як поєднання факторів макротравмування та підвищеної температури ( $+20^{\circ}\text{C}$ ) спричиняло критичне накопичення первинних продуктів окиснення, що у 15–20 разів перевищувало показники контролю (табл. 2).

Дані таблиці 3 вказують, що дослідження динаміки ліполітичної активності дозволило ідентифікувати механізми біохімічної деградації насіння сафлору як початкового етапу псування олійної сировини. Встановлено, що механічне пошкодження є первинним чинником активації ліпази.

**Табл. 2. Динаміка перекисного числа олії насіння сафлору залежно від генотипу та комплексного впливу чинників зберігання, 1/2O ммоль/кг**

Сорт (А)	Ступінь травмування (В)	Температура зберігання (С)	Тривалість зберігання, місяців (D)			
			0 місяців	6 місяців	9 місяців	12 місяців
Добриня(К)	Ціле насіння(К)	+5°C(К)	1,02(К)	1,18	1,32	1,54
		+15°C	1,02	1,45	1,82	2,20
		+20°C	1,02	1,98	2,84	3,95
	Мікротравми	+5°C	1,08	2,34	3,15	4,20
		+15°C	1,08	3,56	5,42	7,85
		+20°C	1,08	5,12	8,76	11,42
	Макротравми	+5°C	1,15	3,92	5,84	8,45
		+15°C	1,15	6,85	10,12	14,90
		+20°C	1,15	10,45	16,84	24,12
Живчик	Ціле насіння	+5°C	0,98	1,08	1,22	1,38
		+15°C	0,98	1,32	1,65	2,05
		+20°C	0,98	1,74	2,45	3,42
	Мікротравми	+5°C	1,04	2,12	2,94	3,82
		+15°C	1,04	3,24	4,85	6,95
		+20°C	1,04	4,65	7,92	10,15
	Макротравми	+5°C	1,10	3,54	5,12	7,65
		+15°C	1,10	6,12	9,24	13,42
		+20°C	1,10	9,25	14,12	20,85
Сонячний	Ціле насіння	+5°C	1,06	1,25	1,48	1,72
		+15°C	1,06	1,68	2,12	2,65
		+20°C	1,06	2,34	3,56	4,84
	Мікротравми	+5°C	1,14	2,58	3,85	5,12
		+15°C	1,14	4,12	6,45	8,95
		+20°C	1,14	6,15	10,24	13,85
	Макротравми	+5°C	1,22	4,45	7,12	10,25
		+15°C	1,22	8,15	12,54	17,65
		+20°C	1,22	12,18	19,56	28,42

*НІР<sub>05</sub>: фактор А (сорт) – 0,12; фактор В (травмування) – 0,15; фактор С (температура) – 0,14; фактор D (тривалість) – 0,10; взаємодія ABCD – 0,38*

Уже в початковий період (0 місяців) перехід від цілого насіння до макротравмованого супроводжується зростанням активності ферменту на 30,9–33,3 %. Це пояснюється порушенням цілісності мембранних структур та полегшенням контакту ферменту із субстратом (тригліцеридами). Отримані результати є статистично достовірними, оскільки різниця між варіантами суттєво перевищує  $НІР_{05} = 0,04$  за фактором В.

Результати вказують, що температурний режим виступає головним кінетичним регулятором процесу. При зберіганні насіння при  $+5^{\circ}\text{C}$  активність ліпази залишається на відносно низькому рівні навіть у травмованих зразках. Проте підвищення температури до  $+20^{\circ}\text{C}$  провокує «ферментативний вибух»: у макротравмованого насіння сорту Сонячний активність зростає з 0,60 до 9,45 ум. од. за 12 місяців, що вказує на глибоку гідролітичну деструкцію ліпідів. Виявлено, що сорт Живчик характеризується природно зниженим фоном ліполітичної активності. В усіх експериментальних точках показники цього сорту були на 18,5–35,2 % нижчими порівняно із сортом Сонячний. Це свідчить про вищу біохімічну стійкість генотипу Живчик до післязбиральних стресів, що

Найвищий рівень деградації зафіксовано за комплексної взаємодії факторів (макротравма + температура  $+20^{\circ}\text{C}$ ). Достовірність взаємодії  $ABCD = 0,12$  вказує на те, що за несприятливих умов зберігання кожен місяць експозиції призводить до прогресуючого зростання швидкості гідролізу, роблячи травмоване насіння непридатним для тривалого зберігання вже після першого півріччя (табл. 3). У контрольному варіанті активність ліпази залишалася мінімальною та стабільною протягом року, збільшившись лише з 0,42 до 0,52 ум. од. Початкова активність ферменту у свіжозібраному насінні (0 міс.) для всіх варіантів коливалася в межах 0,38–0,60 ум. од., що свідчить про стан глибокого спокою сировини до моменту впливу дестабілізуючих чинників. Аналіз даних підтверджує, що низькотемпературний режим ( $+5^{\circ}\text{C}$ ) ефективно інгібує ліполітичні процеси в цілому насінні, тоді як поєднання макротравмування та підвищеної температури ( $+20^{\circ}\text{C}$ ) призводить до стрімкої активації ліпази, яка наприкінці терміну зберігання перевищує контрольні значення у 14–18 разів (табл. 3).

Досліджено, що генетичний потенціал резистентності є визначальним у забезпеченні біохімічної стабільності сировини: найвищий вихідний рівень антиоксидантів зафіксовано у сорту Живчик (52,4 мг/100 г). Навіть за екстремальних умов зберігання (макротравми,  $+20^{\circ}\text{C}$ ) сумарні втрати токоферолів у цього сорту наприкінці терміну експозиції становили 57,2 %, тоді як у сорту Сонячний цей показник сягнув критичних 73,9 % ( $HP_{05} = 1,1$ ).

Варто вказати, що механічне пошкодження плодової оболонки виступає потужним ініціатором деградації токоферолів, які інтенсивно витрачаються на інактивацію вільних радикалів у місцях контакту ліпідів з атмосферним киснем. У макротравмованому насінні швидкість руйнування вітаміну Е у 3,5–4,8 рази вища, ніж у цілому, що свідчить про стрімке виснаження захисних систем для стримування пероксидного окиснення. Підвищення температури зберігання до  $+20^{\circ}\text{C}$  виступає каталізатором термоокиснювальної деструкції, що призводить до «обвального» зниження вмісту антиоксидантів у другій половині терміну (9–12 місяців). Натомість режим стабільного охолодження ( $+5^{\circ}\text{C}$ ) дозволяє зберегти до 47–60 % антиоксидантного ресурсу навіть у пошкоджених насінинах.

Статистично підтверджено наявність тісного кореляційного зв'язку між рівнем вітаміну Е та показниками гідролітичного й окиснювального псування ліпідів.

**Табл. 3. Динаміка активності ліпази в насінні сафлору залежно від генотипу, ступеня механічного травмування та температурних режимів зберігання, ум. од.**

Сорт (А)	Ступінь травмування (В)	Температура зберігання (С)	Тривалість зберігання, місяці (D)			
			(0 місяців)	6 місяців	9 місяців	12 місяців
Добриня (К)	Ціле насіння (К)	+5°C(К)	0,42(К)	0,45	0,48	0,52
		+15°C	0,42	0,54	0,62	0,74
		+20°C	0,42	0,68	0,85	1,12
	Мікротравми	+5°C	0,48	0,65	0,82	1,05
		+15°C	0,48	0,94	1,35	1,88
		+20°C	0,48	1,42	2,15	2,94
	Макротравми	+5°C	0,55	1,12	1,64	2,25
		+15°C	0,55	2,05	3,12	4,40
		+20°C	0,55	3,24	5,12	7,35
Живчик	Ціле насіння	+5°C	0,38	0,40	0,42	0,45
		+15°C	0,38	0,48	0,55	0,64
		+20°C	0,38	0,58	0,72	0,92
	Мікротравми	+5°C	0,44	0,58	0,72	0,90
		+15°C	0,44	0,82	1,15	1,56
		+20°C	0,44	1,22	1,84	2,45
	Макротравми	+5°C	0,50	0,98	1,42	1,94
		+15°C	0,50	1,75	2,65	3,75
		+20°C	0,50	2,85	4,34	6,12
Сонячний	Ціле насіння	+5°C	0,45	0,49	0,54	0,60
		+15°C	0,45	0,62	0,75	0,88
		+20°C	0,45	0,84	1,12	1,45
	Мікротравми	+5°C	0,52	0,78	1,05	1,34
		+15°C	0,52	1,18	1,72	2,35
		+20°C	0,52	1,82	2,75	3,84
	Макротравми	+5°C	0,60	1,35	2,12	2,95
		+15°C	0,60	2,64	4,05	5,82
		+20°C	0,60	4,15	6,82	9,45

*HP<sub>05</sub>: фактор А (сорт) – 0,03; фактор В (травмування) – 0,04; фактор С (температура) – 0,04; фактор D (тривалість) – 0,03; взаємодія ABCD – 0,12*

Встановлено специфічний «поріг стабільності» на рівні 20–25 мг/100 г: при зниженні вмісту токоферолів нижче цієї межі антиоксидантна система перестає стримувати ланцюгову реакцію, що призводить до критичного зростання перекисного числа та повної деградації ліпідного комплексу насіння.

Встановлено, що вихідний рівень антиоксидантів у свіжозібраному насінні (0 міс.) у контролі коливався в межах 45,2–52,4 мг/100 г, що визначає високий

стартовий адаптивний потенціал досліджуваних генотипів, а за 12 місяців зберігання характеризувався найвищою стабільністю і знизився лише на 8,2 % – з 48,5 до 44,5 мг/100 г (табл. 4).

**Табл. 4. Зміна вмісту суми токоферолів у насінні сафлору залежно від генотипу та умов зберігання, мг/100 г**

Сорт (А)	Ступінь травмування (В)	Температура зберігання (С)	Тривалість зберігання, місяці (D)			
			0 місяців	6 місяців	9 місяців	12 місяців
Добриня(К)	Ціле насіння(К)	+5°C(К)	48,5(К)	47,2	46,1	44,5
		+20°C	48,5	44,2	41,5	38,6
	Мікротравми	+5°C	48,5	44,5	41,2	37,8
		+20°C	48,5	38,4	29,6	21,4
	Макротравми	+5°C	48,5	40,2	32,5	25,4
		+20°C	48,5	32,1	22,4	15,8
Живчик	Ціле насіння	+5°C	52,4	51,5	50,2	49,1
		+20°C	52,4	49,2	46,8	43,5
	Мікротравми	+5°C	52,4	48,8	45,6	42,4
		+20°C	52,4	42,6	35,4	28,6
	Макротравми	+5°C	52,4	44,2	38,5	31,5
		+20°C	52,4	38,5	29,2	22,4
Сонячний	Ціле насіння	+5°C	45,2	43,8	42,5	41,0
		+20°C	45,2	41,2	38,4	35,4
	Мікротравми	+5°C	45,2	40,5	36,8	32,4
		+20°C	45,2	34,2	25,4	18,2
	Макротравми	+5°C	45,2	35,4	28,1	21,5
		+20°C	45,2	28,4	18,5	11,8
<i>НІР<sub>05</sub>: фактор А (сорт) – 1,1; фактор В (травмування) – 1,4; фактор С (температура) – 1,3; фактор D (тривалість) – 0,9; взаємодія ABCD – 2,8</i>						

Порівняльний аналіз свідчить, що контрольні варіанти за температури +5°C забезпечували надійне збереження вітаміну Е, тоді як у найбільш дестабілізованому варіанті (сорт Сонячний, макротравми, +20°C) його вміст наприкінці терміну експозиції був у 3,8 раза нижчим за контроль (табл. 4).

Експериментально підтверджено, що каротиноїди виявляють екстремальну чутливість до доступу атмосферного кисню: при макротравмуванні швидкість руйнування пігментів зростає у 2,8–4,5 раза порівняно з цілим насінням, що підтверджується статистично (НІР<sub>05</sub> = 0,03 за фактором В). Таку інтенсивну деградацію можна пояснити роллю каротиноїдів, що легко вступають у реакції приєднання кисню за подвійними зв'язками своєї структури для нейтралізації первинних радикалів (табл. 5).

**Табл. 5. Вплив генотипу, ступеня травмування та умов зберігання на вміст каротиноїдів у насінні сафлору, мг/100 г**

Сорт (А)	Ступінь травмування (В)	Температура зберігання (С)	Тривалість зберігання, місяці (D)			
			0 місяців	6 місяців	9 місяців	12 місяців
Добриня (К)	Ціле насіння(К)	+5°C(К)	0,82(К)	0,80	0,78	0,75
		+20°C	0,82	0,76	0,72	0,68
	Мікротравми	+5°C	0,82	0,75	0,70	0,64
		+20°C	0,82	0,65	0,54	0,42
	Макротравми	+5°C	0,82	0,68	0,58	0,48
		+20°C	0,82	0,52	0,38	0,24
Живчик	Ціле насіння	+5°C	0,94	0,92	0,90	0,88
		+20°C	0,94	0,89	0,85	0,82
	Мікротравми	+5°C	0,94	0,88	0,84	0,79
		+20°C	0,94	0,78	0,68	0,58
	Макротравми	+5°C	0,94	0,82	0,72	0,64
		+20°C	0,94	0,65	0,52	0,42
Сонячний	Ціле насіння	+5°C	0,78	0,75	0,72	0,69
		+20°C	0,78	0,71	0,65	0,60
	Мікротравми	+5°C	0,78	0,70	0,62	0,55
		+20°C	0,78	0,58	0,45	0,34
	Макротравми	+5°C	0,78	0,62	0,50	0,40
		+20°C	0,78	0,46	0,31	0,18

Встановлено, що температурний режим зберігання виступає критичним каталізатором термоокиснювального розпаду: поєднання фактору +20°C із механічним травмуванням призводить до втрати 70,7–76,9 % вихідного вмісту пігментів наприкінці терміну експозиції.

За умов холодного зберігання (+5°C) вдається зберегти понад 50 % антиоксидантного ресурсу навіть у пошкодженому насінні, що доводить ефективність низькотемпературної стабілізації. Генетична специфічність дослідних зразків виявилася у перевазі сорту Живчик, який продемонстрував не лише вищий стартовий рівень каротиноїдів (0,94 мг/100 г), а й кращу їх збереженість у часі порівняно із сортом Сонячний ( $HP_{05} = 0,02$ ).

Комплексний аналіз свідчить, що різке зниження вмісту пігментів нижче межі 0,40 мг/100 г чітко корелює із переходом олії в активну фазу пероксидного окиснення. Таким чином, збереженість каротиноїдів понад 60 % від початкового рівня може слугувати надійним експрес-індикатором загальної біохімічної стабільності насінневої маси та відсутності глибоких окиснювальних змін у ліпідному комплексі під час тривалого зберігання.

Досліджено, що вихідний рівень пігментів у контролі в свіжозібраному насінні (0 міс.) варіював залежно від генотипу в межах 0,78–0,94 мг/100 г, що свідчить про високу початкову біологічну цінність досліджуваних сортів. за умов

стабільного охолодження (+5°C), де вміст каротиноїдів протягом 12 місяців зберігання виявився найбільш стабільним і знизився лише на 8,5 % – з 0,82 до 0,75 мг/100 г. Встановлено, що низькотемпературний режим (+5°C) для цілого насіння забезпечує максимальну збереженість каротиноїдного комплексу, тоді як у найбільш дестабілізованому варіанті (сорт Сонячний, макротравми, +20°C) залишковий вміст пігментів наприкінці року був у 4,2 раза нижчим за показники контролю (табл. 5).

Математична обробка даних підтвердила, що вирішальне значення для збереження якості насіння має Фактор В (ступінь механічного травмування). Його частка впливу на активність ліпази становить 38,4 %, а на перекисне число – 35,6 %. Це доводить, що цілісність оболонки є головним бар'єром для ініціації деструктивних процесів. Досліджено, що фактор температури (С) має стабільно високу силу впливу (20,5–24,8 %) на всі показники. Це підтверджує, що температурний режим є основним інструментом керування швидкістю окиснювальних реакцій у вже травмованому насінні (табл. 6).

**Табл. 6. Частка впливу факторів на варіабельність біохімічних показників насіння сафлору (за даними чотирифакторного дисперсійного аналізу), %**

Фактор та їх взаємодії	Активність ліпази	Кислотне число	Перекисне число	Сума токоферолів
Фактор А (Сорт)	8,2	6,5	7,4	12,5
Фактор В (Травмування)	38,4*	32,1*	35,6*	28,4*
Фактор С (Температура)	20,5	24,8	22,1	18,6
Фактор D (Тривалість)	15,4	18,2	16,8	21,2
Взаємодія А × В (Сорт/Травма)	4,2	3,8	4,5	5,1
Взаємодія В × С (Травма/Темп.)	8,5	9,4	10,2	7,8
Взаємодія А × В × С × D	3,6	4,2	2,4	5,4
Помилка досліду та інші чинники	1,2	1,0	1,0	1,0
Усього	100,0	100,0	100,0	100,0

*Примітка.* \* – усі дані достовірні при рівні значущості  $p < 0,05$ .

Варто вказати, що фактор сорту (А) найбільш суттєво впливає на вміст токоферолів (12,5 %). Це свідчить про те, що антиоксидантний захист більшою мірою визначається генетичними особливостями генотипу, ніж умови зовнішнього середовища. Висока достовірність взаємодії В × С (Травма × Температура) вказує на те, що негативний ефект від механічного пошкодження посилюється підвищеною температурою не лінійно, а за принципом синергізму (табл. 6).

Встановлено, що значний діапазон між мінімальними та максимальними значеннями для перекисного числа – від 0,98 до 28,94 ммоль/кг свідчить про

високу чутливість ліпідного комплексу сафлору до умов зберігання. Це підтверджує ефективність обраних факторів (травмування та температури) як інструментів впливу на якість сировини.

Досліджено, що для всіх досліджуваних показників коефіцієнт варіації в межах паралельних дослідів та повторностей не перевищував 5,5–6,4 %. Згідно зі статистичними нормами, значення  $V < 10\%$  вказує на малу мінливість і високу однорідність вибірки. Визначено, що стабільність коефіцієнта варіації для таких різних показників, як активність ліпази (6,2 %) та вміст токоферолів (5,5 %), підкреслює системність біохімічних змін у насінні. Будь-які суттєві відхилення від середніх значень у таблицях є результатом саме впливу стрес-факторів (травм), а не випадкових похибок (табл. 7).

**Табл. 7. Варіаційні показники біохімічних параметрів насіння сафлору за весь період дослідження**

Показник	Одиниці виміру	Lim (min–max)	Середнє ( $\bar{X}$ )	V, %
Кислотне число	мг КОН/г	0,62–7,15	1,84	6,4
Перекисне число	ммоль/кг	0,98–28,94	5,42	5,8
Активність ліпази	ум. од.	0,38–9,45	1,92	6,2
Сума токоферолів	мг/100 г	11,8–52,4	38,1	5,5
Каротиноїди	мг/100 г	0,18–0,94	0,68	6,1

**Висновки.** За даними дисперсійного аналізу встановлено, що домінуючим чинником впливу на збереженість якості олії є ступінь механічного травмування насіння (32,1–38,4 %). Порушення цілісності оболонок змінює ферментативну активацію ліпази, що призводить до незворотного гідролізу тригліцеридів уже на початкових етапах зберігання. Найбільш інтенсивне псування насіння зафіксовано за поєднання макротравмування та температури зберігання  $+20^{\circ}\text{C}$ . У цьому варіанті перекисне число олії перевищує нормативний поріг харчової придатності (10ммоль/кг) уже через 6 місяців, а до кінця року сягає критичних значень (20,85–28,94 ммоль/кг), що супроводжується зростанням кислотного числа у 5,8–8,2 рази.

Встановлено зворотну залежність між стабільністю ліпідів та вмістом природних антиоксидантів. За умов критичного стресу (макротравма,  $+20^{\circ}\text{C}$ ) спостерігається зниження вмісту токоферолів (на 57,2–73,9 %) та каротиноїдів (на 55,3–76,9 %), що призводить до втрати біологічної цінності продукції та її повної непридатності для переробки на харчові цілі. Виявлено суттєву варіабельність сортів за ознакою біохімічної стабільності. Найвищу стійкість до окиснювальних процесів продемонстрував сорт Живчик, зберігає відносну стабільність олії на 25–30 % довше порівняно із сортом Сонячний.

Для забезпечення тривалого зберігання (до 12 місяців) насіння сафлору без втрати якості олії, обов'язковим є дотримання температурного режиму  $+5^{\circ}\text{C}$  та мінімізація частки травмованого насіння в партії (не більше 3–5 %). При наявності мікро- та макротравм понад 10% термін безпечного зберігання при нерегульованих температурах скорочується до 3 місяців.

## Література:

1. Каленська С. М., Гордина Н. Ю. Структура врожайності сортів сафлору красильного залежно від ширини міжрядь та норми висіву насіння. *Новітні агротехнології*. 2023. Т. 11, № 3. <https://doi.org/10.47414/na.11.3.2023.288678>
2. Криштоп Є. А., Ведмедова К. В. Сучасні наукові напрями вирощування культури сафлору красильного (*Carthamus tinctorius* L.). *Вісник ЦНЗ АПВ Харківської області*. Харків, 2017. Вип. 23. С. 23–37.
3. Філіпов Є. Г. Агротехнічні прийоми на економічну ефективність вирощування сафлору красильного в умовах зрошення півдня України. *Вісник аграрної науки Причорномор'я*. 2014. Вип. 2. С. 143–149.
4. Рожков А. О., Демков Д. В. Польова схожість насіння і виживаність рослин сафлору красильного (*Carthamus tinctorius* L.) залежно від ширини міжрядь та норми висіву. *Агробіологія*. 2021. № 1. С. 145–152.
5. Поляков О. І., Алієва О. Ю. Особливості водоспоживання сафлору під впливом прийомів догляду за посівами на безгербіцидному та гербіцидному фонах. *Науково-технічний бюлетень Інституту олійних культур НААН*. 2021. Т. 30. С. 77–83.
6. Коновалов В. О., Коновалова В. М., Усик Л. О. Насіннева продуктивність сортів сафлору красильного за різних умов вирощування на півдні України. *Зрошувальне землеробство*. 2019. Вип. 72. С. 102–106.
7. Мироненко Л., Криштоп Е., Тіщенко В. Дослідження та аналіз технологічних властивостей насіння сафлору вітчизняних сортів. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Інноваційні дослідження у наукових роботах студентів*. 2019. № 15. С. 61–65.
8. Єфімова В. Г. Дослідження органолептичних та фізико-хімічних властивостей біологічно активної добавки з насіння сафлору. *Модернізація та наукові дослідження: парадигма інноваційного розвитку суспільства і технологій : матеріали міжнар. наук.-практ. конф.* 2023. С. 38–40.
9. Дідур В. В., Петриченко Є. А., Лещенко І. А. Реологічні властивості мезги насіння сафлора та їх вплив на процес віджиму олії в гвинтовому пресі. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету*. 2023. Т. 13, № 2.
10. Козаченко О. В., Бакум М. В., Михайлов А. Д. та ін. Підвищення посівних властивостей насіння сафлору красильного на вібраційній насіннеочисній машині. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. Кропивницький : ЦНТУ, 2023. Вип. 7(38), ч. 2. С. 83–90.
11. Бакум М. В., Кречот М. М., Михайлов А. Д. Обґрунтування ефективності використання решетних сепараторів для підготовки посівного матеріалу сафлору. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. Технічні науки*. Харків, 2019. Вип. 198. С. 18–25.
12. Бакум М. В., Кречот М. М., Абдуєв М., Михайлов А. Д., та ін. Дослідження ефективності пневматичного сепаратора з нахиленим каналом на підготовці посівного матеріалу сафлору. *Вісник Львівського національного університету природокористування. Серія «Агроінженерні дослідження»*. 2021. № 25. С. 28–35. <https://doi.org/10.31734/agroengineering2021.25.028>

13. Безпалько В. В., Жукова Л. В., Рожков А. О. Продуктивність сортів сафлору красильного в умовах Східного Лісостепу України. Наукові засади підвищення ефективності сільськогосподарського виробництва: матеріали VI Міжнар. наук.-практ. конф., присв. ювілейним річницям проф. О. М. Можейка, В. В. Милого, Ю. В. Будьонного, І. І. Назаренка (29–30 листопада). Харків: Держ. біотехнологічний ун-т, 2022. С. 44–46.
14. Aliiev E., Aliieva O., Malegin R. Technical and technological provision of complex waste processing of plant raw oil cultures in food for organic animals. *Scientific Horizons*. 2020. № 7(92). С. 112–119.
15. Lech K., Nawała J., Popiel S. Mass spectrometry for investigation of natural dyes in historical textiles: unveiling the mystery behind safflower-dyed fibers. *Journal of the American Society for Mass Spectrometry*. 2021. Т. 32. №. 10. С. 2552–2566.
16. Насіння олійних культур. Методи визначання вмісту олії : ДСТУ 7571:2014. [Чинний від 2015-07-01]. Київ : Мінекономрозвитку України, 2015. 12 с. (Національний стандарт України).
17. Олії тваринні і рослинні та жири. Визначання кислотного числа та кислотності (ISO 660:2009, IDT) : ДСТУ ISO 660:2009. [Чинний від 2011-01-01]. Київ : Держспоживстандарт України, 2010. 15 с.
18. Жири та олії тваринні і рослинні. Визначання перекисного числа (ISO 3960:1998, IDT) : ДСТУ ISO 3960:2001. [Чинний від 2002-10-01]. Київ: Держстандарт України, 2002. 10 с.
19. Насіння олійних культур. Методи визначення активності ферментів : ДСТУ 4850:2007. [Чинний від 2009-01-01]. Київ: Держспоживстандарт України, 2008. 10 с.
20. Олії. Методи визначання вмісту токоферолів : ДСТУ 4568:2006. [Чинний від 2007-04-01]. Київ : Держспоживстандарт України, 2007. 14 с.
21. Animal and vegetable fats and oils. Determination of the iodine value and carotene content : ISO 17932:2011. [Revised 2021]. International Organization for Standardization, 2011. 18 p.
22. STATISTICA (Data Analysis Software System), Version 12 : software. StatSoft, Inc., 2014. URL: <http://www.statsoft.com>.

### References:

1. Kalencyka, S. M., Hordyna, N. Yu. (2023). Yield structure of safflower varieties depending on row spacing and seeding rate. *New Agritechnologies*, 11(3). <https://doi.org/10.47414/na.11.3.2023.288678>
2. Kryshtop, Ye. A., Vedmedova, K. V. (2017). Modern scientific directions of safflower (*Carthamus tinctorius* L.) cultivation. *Bulletin of the Center for Scientific Support of Agribusiness of Kharkiv Region*, 23, 23–37. [in Ukrainian]
3. Filipov, Ye. H. (2014). Agronomic practices and economic efficiency of safflower cultivation under irrigation in Southern Ukraine. *Bulletin of Agrarian Science of the Black Sea Region*, 2, 143–149. [in Ukrainian].
4. Rozhkov, A. O., Demkov, D. V. (2021). Field germination and plant survival of safflower (*Carthamus tinctorius* L.) depending on row spacing and seeding rate. *Agrobiology*, 1, 145–152. [in Ukrainian].
5. Polyakov, O. I., Aliieva, O. Yu. (2021). Peculiarities of water consumption of safflower under different crop management practices. *Scientific and Technical Bulletin of the Institute of Oil Crops NAAS*, 30, 77–83. [in Ukrainian].

6. Konovalov, V. O., Konovalova, V. M., Usyk, L. O. (2019). Seed productivity of safflower varieties under different growing conditions in Southern Ukraine. *Irrigated Agriculture*, 72, 102–106. [in Ukrainian].
7. Myronenko, L., Kryshchop, E., Tiichenko, V. (2019). Study and analysis of technological properties of safflower seeds. *Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Innovative Research in Student Works*, 15, 61–65. [in Ukrainian].
8. Yefimova, V. H. (2023). Study of physicochemical properties of a biologically active additive from safflower seeds. In *Modernization and Scientific Research: Paradigm of Innovative Development of Society and Technologies*, 38–40. [in Ukrainian].
9. Didur, V. V., Petrychenko, Ye. A., Leshchenko, I. A. (2023). Rheological properties of safflower seed mash and oil pressing efficiency. *Scientific Bulletin of Tavria State Agrotechnological University*, 13(2). [in Ukrainian].
10. Kozachenko, O. V., Bakum, M. V., Mykhailov, A. D., et al. (2023). Improving seed quality of safflower using vibration cleaning machine. *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*, 7(38, Part 2), 83–90. [in Ukrainian].
11. Bakum, M. V., Krekot, M. M., Mykhailov, A. D. (2019). Efficiency of sieve separators for safflower seed preparation. *Bulletin of Petro Vasylenko KhNTUA*, 198, 18–25. [in Ukrainian].
12. Bakum, M. V., Krekot, M. M., Abduiev, M., et al. (2021). Efficiency of pneumatic separator with inclined channel for safflower seed preparation. *Bulletin of Lviv National Environmental University. Agroengineering Research*, 25, 28–35. <https://doi.org/10.31734/agroengineering2021.25.028>
13. Bezpalko, V. V., Zhukova, L. V., Rozhkov, A. O. (2022). Productivity of safflower varieties in the Eastern Forest-Steppe of Ukraine. In *Scientific Foundations for Improving Agricultural Production Efficiency* (pp. 44–46). Kharkiv: State Biotechnological University. [in Ukrainian].
14. Aliiev, E., Aliieva, O., Malegin, R. (2020). Technical and technological processing of plant oil crop waste for organic feed. *Scientific Horizons*, 7(92), 112–119.
15. Lech, K., Nawala, J., Popiel, S. (2021). Mass spectrometry for investigation of safflower dyes in historical textiles. *Journal of the American Society for Mass Spectrometry*, 32(10), 2552–2566.
16. International Organization for Standardization. (2015). *Seeds of oil crops: Methods for determination of oil content (DSTU 7571:2014)*. Kyiv: Ministry of Economic Development of Ukraine. [in Ukrainian].
17. Derzhspozhyvstandart of Ukraine. (2010). *Animal and vegetable fats and oils: Determination of acid value and acidity (DSTU ISO 660:2009)*. Kyiv. [in Ukrainian].
18. Derzhstandart of Ukraine. (2002). *Animal and vegetable fats and oils: Determination of peroxide value (DSTU ISO 3960:2001)*. Kyiv. [in Ukrainian].
19. Derzhspozhyvstandart of Ukraine. (2008). *Oilseed crops: Methods for determination of enzyme activity (DSTU 4850:2007)*. Kyiv. [in Ukrainian].
20. Derzhspozhyvstandart of Ukraine. (2007). *Oils: Methods for determination of tocopherol content (DSTU 4568:2006)*. Kyiv. [in Ukrainian].
21. International Organization for Standardization. (2011). *Animal and vegetable fats and oils: Determination of iodine value and carotene content (ISO 17932:2011)*. Geneva.
22. StatSoft Inc. (2014). *STATISTICA (Data Analysis Software System), Version 12*. <http://www.statsoft.com>

## Annotation

**Kononenko L. M., Poltoretska N. M.**

### ***Effect of mechanical damage degree and storage conditions on the oxidative stability of safflower oil***

**Aims.** To investigate the regularities of changes in the biochemical quality parameters of safflower oil depending on the degree of seed coat damage and storage temperature regimes.

**Methods.** The study was conducted at the using safflower seeds (*Carthamus tinctorius* L.) harvested in 2023–2025. The experiment was designed as a four-factor model with three replications. The factors included: three safflower cultivars (Dobrynya, Zhyvchyk, Sonyachnyi), various degrees of mechanical seed damage (intact, micro-damage, and macro-damage), storage temperature regimes (+5°C, +15°C, +20°C), and exposure duration of up to 12 months.

**Results.** The study established that the combination of mechanical damage to safflower seeds (*Carthamus tinctorius* L.) and storage temperature regimes significantly determines the biochemical stability of the lipid complex. With an increase in the degree of damage and storage temperature to +20°C, lipase activity increased by 5.8–15.7 times, leading to intensive hydrolysis of triglycerides. It was found that the peroxide value of oil in macro-damaged seeds reached critical values of 20.85–28.94 mmol/kg after 12 months, which is 12–16 times higher than the control. The content of natural antioxidants decreased sharply: the total tocopherol content fell by 57–74%, and carotenoids by 55–77%. The acid value of the oil in variants with kernel integrity violation at +20°C increased to 4.95–7.15 mg KOH/g, reclassifying the raw material into the technical grade. The highest biochemical resistance to oxidative processes was demonstrated by the Zhyvchyk cultivar, which retained 28% more tocopherols compared to the Sonyachnyi cultivar. The factor of mechanical damage accounted for 32–38% of the variability in the studied parameters.

**Conclusions.** According to the analysis of variance (ANOVA), the degree of mechanical seed damage is the dominant factor influencing oil quality preservation (32.1–38.4%). Violation of the seed coat integrity triggers enzymatic lipase activation, leading to irreversible triglyceride hydrolysis even in the early stages of storage. The most intensive seed deterioration was recorded under the combination of macro-damage and a storage temperature of +20°C. In this variant, the peroxide value exceeded the regulatory threshold for food grade (10 mmol/kg) within 6 months, reaching critical levels (20.85–28.94 mmol/kg) by the end of the year, accompanied by a 5.8–8.2-fold increase in the acid value. An inverse relationship was established between lipid stability and natural antioxidant content. Under critical stress conditions (macro-damage, +20°C), a significant reduction in tocopherols (by 57.2–73.9%) and carotenoids (by 55.3–76.9%) was observed, resulting in the loss of biological value and complete unsuitability for food processing. Significant cultivar variability in biochemical stability was identified. The Zhyvchyk cultivar exhibited the highest resistance, maintaining oil stability 25–30% longer than the Sonyachnyi cultivar. To ensure long-term storage (up to 12 months) without loss of oil quality, it is essential to maintain a temperature regime of +5°C and minimize the proportion of damaged seeds in the batch (no more than 3–5%). If micro- and macro-damage exceeds 10%, the safe storage period under unregulated temperatures is reduced to 3 months.

**Key words:** safflower, lipase, tocopherols, storage, genotype, oxidative stability.