

ДОСЛІДЖЕННЯ ФРИКЦІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПОВЕРХНІ НАСІННЯ СОНЯШНИКА

Е. Б. Алієв^{1,2}

¹ Інститут олійних культур Національної академії аграрних наук України

² Дніпровський державний аграрно-економічний університет

Фрикційні властивості насіння сільськогосподарських культур є важливим фактором при проєктуванні механічних вузлів у сільськогосподарських машинах, зокрема для їх конструктивно-технологічних параметрів під час збирання, очищення, сортування, зберігання та обробки насіння. Це дослідження було спрямоване на визначення коефіцієнтів тертя ковзання насіння соняшника з різними робочими поверхнями. В якості матеріалів для досліджень використовували насіння різних сортів соняшника та поверхні з нержавіючої, оцинкованої, пофарбованої сталі, алюмінію, фанери, поліетилену та гуми, а також шліфувальні папери з різною зернистістю (P500, P1000, P1500, P2000). Вимірювання здійснювали за допомогою профілометра SRT-6210, визначаючи шорсткість поверхонь, а також із застосуванням розробленого модуля для вимірювання коефіцієнтів тертя. Результати експериментів вказують на варіації фрикційних властивостей, зумовлені характером поверхні. Найменшу шорсткість мають пофарбована та оцинкована сталь, що робить їх придатними для застосувань з мінімальним тертям. Гума, навпаки, показала високі значення шорсткості, що підходить для антиковзких поверхонь. Шліфувальні папери мають найвищий рівень шорсткості, що вказує на їх придатність у випадках, коли потрібний значний опір ковзанню. Узагальнюючи отримані дані, запропонована методика групування зразків соняшника за фрикційними властивостями поверхні насіння: вимірювання коефіцієнта тертя ковзання для насіння на кількох контрольних поверхнях (шліфувальні папери P500, P1000, P1500, P2000) з відомими властивостями; створення класифікаційних груп насіння на основі діапазонів коефіцієнтів тертя для кожної поверхні; розробка алгоритму класифікації за допомогою машинного навчання та методів кластеризації даних.

Ключові слова: фрикційні властивості, насіння соняшника, коефіцієнт тертя, поверхнева шорсткість, групування, методика.

Вступ. Фрикційні властивості насіння сільськогосподарських культур, характеризуються процесом тертя, яке спостерігається в точці контакту між насінинами та іншими матеріалами. Воно призводить до втрати енергії між рухомими об'єктами та зносу поверхонь, які стикаються, що підвищує температуру поверхні і, навіть, може викликати акустичні ефекти (Kaliniewicz et al. 2015; Kovalyshyn et al. 2015). Знання про фрикційні властивості насіння є важливим для проєктування механічних вузлів у сільськогосподарських машинах та для вибору їх конструктивно-технологічних параметрів при зборі врожаю, очищенні, сортуванні, зберіганні та обробці (Altuntas et al. 2007; Horabik 2001; Jouki et al. 2012; Kabas et al. 2007; Riyahi et al. 2011; Sologubik et al. 2013). Процеси, що відбуваються між насінною і поверхнею тертя, називаються зовнішнім тертям, тоді як внутрішнє тертя відбувається між насінинами.



Copyright © The Author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License 4.0

*Corresponding author

(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Аналіз опублікованих джерел (Afzalnia et al. 2007; Altuntas et al. 2007; Horabik 2001; Izli et al. 2009; Kalkan et al. 2011; Sharobeem 2007; Tarighi et al. 2011) вказує, що фрикційні параметри насіння визначаються культурою, сортом (гібридом), ступенем стиглості, вологістю, швидкістю, орієнтацією щодо напрямку руху, матеріалом фрикційної поверхні, шорсткістю поверхні, нормальним тиском на частинки та варіаціями форми частинок. Умови зовнішнього тертя можуть бути виражені кутом і коефіцієнтом тертя спокою та ковзання. Різні методи та пристрої застосовуються для вимірювання цих параметрів. У найпростішому підході використовуються регульована похила площина і фрикційна пластина. Кут тертя спокою вимірюється шляхом розміщення аналізованого матеріалу на горизонтально налаштованій фрикційній пластині та повільного збільшення кута нахилу, поки насіння не почне рухатися. При цьому тангенс цього кута і визначає коефіцієнт тертя спокою (Jouki et al. 2012; Kabas et al. 2007; Riyahi et al. 2011).

Фрикційні властивості гранульованого матеріалу також можуть визначатися за допомогою апарату Желіговського, пристрою Jenike, пристрою з обертовим диском, пристрою з рухомим валиком всередині контейнера, заповненого гранульованим матеріалом, та багатьох інших (Afzalnia et al. 2007; Altuntas et al. 2007; Horabik 2001; Ibrahim 2008; Rusinek et al. 2007; Sharobeem 2007).

Тертя – це складний процес, тому значення кутів та коефіцієнтів тертя, надані дослідниками, значно відрізняються, включаючи ті ж самі культури та насіння різних сортів. Ці варіації можуть бути обумовлені неоднорідною природою гранульованого матеріалу, а також різними умовами дослідження (Horabik 2001). Доступна література з цієї теми, переглянута для мети цього дослідження, містить обмежену інформацію про коефіцієнти тертя насіння сояшника (Wang et al. 2022; Ortiz-Hernandez et al. 2020; Chavoshgoli et al. 2015; Khodabakhshian et al. 2010; Malik et al. 2016; Santalla et al. 2003). Взаємозв'язки, представлені в статті, і діапазони варіації фрикційних параметрів повинні бути визначені для допомоги в проектуванні та моделюванні процесів, які залежать від руху насіння. Метою цього дослідження було визначити коефіцієнти зовнішнього тертя насіння сояшника і виявити кореляції між цими параметрами та вибраними фізичними властивостями насіння.

Матеріали і методи досліджень. Властивості поверхні насіння визначаються головним чином шорсткістю та/або коефіцієнтом тертя.

Шорсткість поверхні насіння (вимірюється у мікрометрах) – сукупність нерівностей поверхні з відносно малими кроками на базовій довжині. Шорсткість відноситься до мікрогеометрії твердого тіла та визначає його найважливіші експлуатаційні властивості.

Для вимірювання шорсткості поверхні насіння використано прилад – профілометр SRT-6210 (рис. 1). Електродинамічний профілометр складається з алмазної голки, що переміщаючись по поверхні зазнає коливань перпендикулярно до контрольованої поверхні відслідковуючи нерівності на ній, і датчика на базі індуктивного, ємнісного чи п'єзоелектричного перетворювача, який перетворює коливання голки на відповідні значення електричного сигналу, що подається на електровимірювальний прилад. Типовий профілометр має шкалу, з якої і зчитуються значення шорсткості поверхні.

Для визначення коефіцієнта тертя насіння о поверхню використовувався

традиційний спосіб, який полягає у переміщенні навантаженого масою M насіння (маса якого M_s) по робочій поверхні (рис. 2). Зміна сили $F(t)$ яка протидіє переміщенню визначається резистивним тензодатчиком і фіксується динамічно. Коефіцієнт тертя спокою μ_r визначається, як відношення максимальної сили в початковий момент $F_{\max}$ до сумарної масу M_s насіння і вантажу M , помноженого на прискорення вільного падіння g . Коефіцієнт тертя ковзання μ_s визначається, як відношення середнього значення сили F_{mean} до сумарної масу M_s насіння і вантажу M , помноженого на прискорення вільного падіння g .

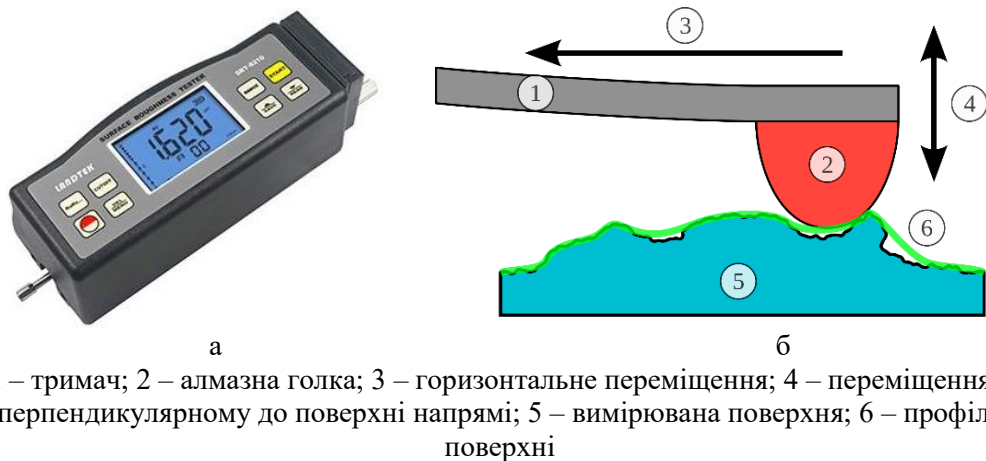


Рис. 1. Загальний вигляд (а) і принцип роботи профілометра SRT-6210 контактного типу (б)

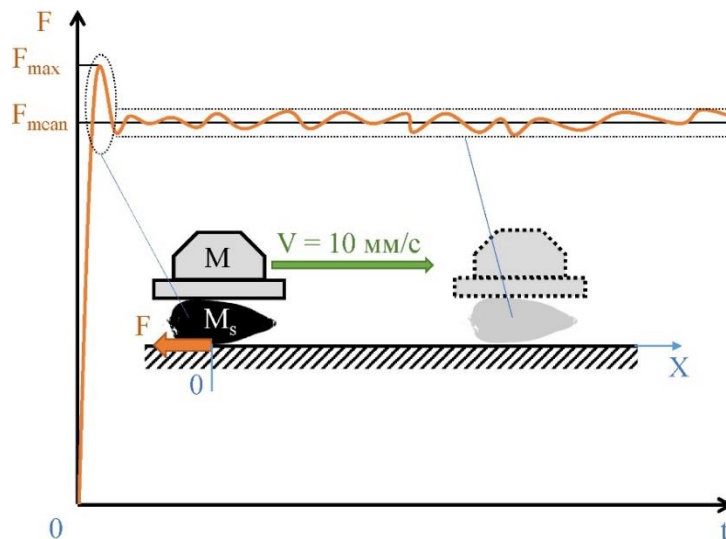
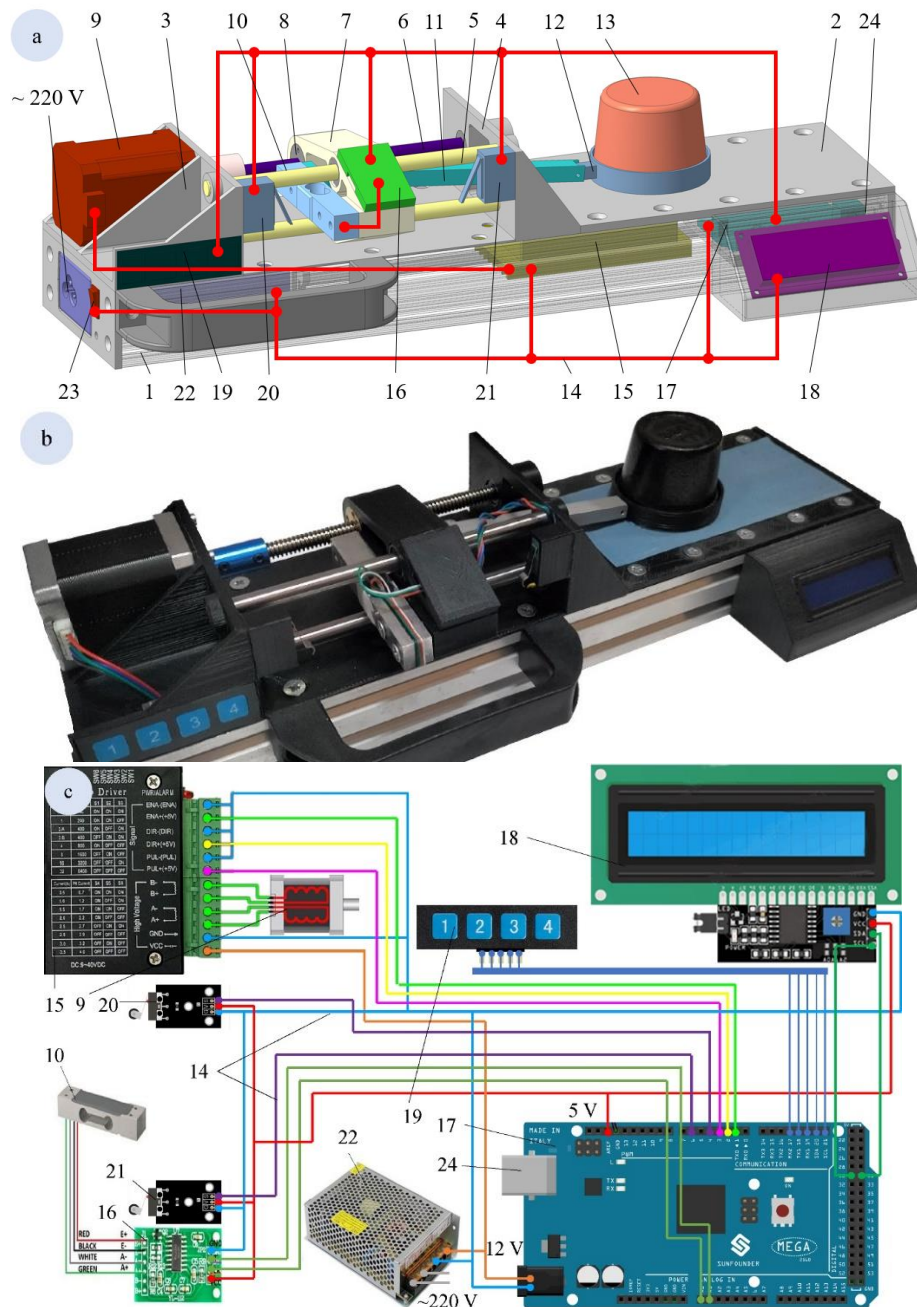


Рис. 2. Процес визначення властивостей поверхні насіння

Конструктивно-технологічна схема, загальний вигляд і електрична схема розробленого модуля визначення властивостей поверхні насіння представлені на рис. 3.



- 1 – станина; 2 – робочий стіл; 3, 4 – ліве і праве кріплення; 5 – дві направляючі;
 6 – гвинт; 7 – каретка; 8 – гайка; 9 – кроковий двигун; 10 – тензодатчик;
 11 – жорстке з'єднання; 12 – чаша; 13 – вантаж; 14 – електричні проводи;
 15 – контролер крокового двигуна; 16 – підсилювач (weight sensor HX711);
 17 – блок керування (Arduino MEGA 2560); 18 – дисплей (LCD 1602 I2C);
 19 – клавіатура; 20, 21 – лівий і правий кінцеві вимикачі; 22 – блок живлення;
 23 – кнопка вмикання; 24 – USB-вихід для з'єднання з особистим комп'ютером

Рис. 3. Конструктивно-технологічна схема (а), загальний вигляд (б) і електрична схема (с) модуля визначення властивостей поверхні насіння

© Е. Б. Алієв

Принцип роботи модуля визначення властивостей поверхні насіння наступний. Оператор встановлює насіння на поверхню робочого стола і запускає процес вимірювання. Блок керування передає сигнал до контролера крокового двигуна, який в свою чергу вмикає кроковий двигун. Вал крокового двигуна приводить в дію гвинт, який обертається в бік протилежний навивці різьби гвинта. Тим самим гайка починає викручуватися, переміщуючи каретку вправо вздовж направляючих. Після того як каретка досягне правого кінцевого вимикача, сигнал з останнього за допомогою електричних проводів передається до блоку керування. Блок керування передає сигнал до контролера крокового двигуна, який зупиняє кроковий двигун, – чаша із вантажем займає крайнє праве положення. Далі блок керування передає сигнал до контролера крокового двигуна, який своєю чергою вмикає кроковий двигун. Вал крокового двигуна приводить в дію гвинт, який обертається в бік навивки різьби гвинта. Тим самим гайка починає накручуватися, переміщуючи каретку із тензодатчиком, жорстким з'єднанням, чаші і вантажу вліво. Швидкість руху каретки є рівномірною і становить 10 мм/с. Під час руху каретки дані з тензодатчика передаються до блоку керування. Блок керування розраховує дані і визначає коефіцієнти тертя спокою і кочення. Отримані дані передаються на дисплей. При досягненні каретки лівого кінцевого вимикача, сигнал з останнього передається до блоку керування. Блок керування за допомогою електричних проводів передає сигнал до контролера крокового двигуна, який зупиняє кроковий двигун, – чаша із вантажем займає крайнє ліве положення. Усі отримані дані зберігаються в базі даних блоку керування і можуть передаватися через USB-вихід до персонального комп'ютера.

Зображення поверхні насіння соняшника фіксувалося з використанням фотокамери Eakins Video Microscope Camera із 300 кратним збільшенням.

В якості об'єктів досліджень виступали насіння соняшнику різних колекційних ліній: InK1124, BK419-2, L4095, InK630, InK85, BK636, InK433, InK1039, InK912, In18926, L4095, KP11 та сорту Запорізький кондитерський. Лінії було обрано найбільш контрастні за візуальним сприйняттям різноманітності поверхні насінини.

В якості робочої поверхні обрано: нержавіюча сталь, пофарбована сталь, оцинкована сталь, алюміній, фанера, поліетилен, гума, шліфувальні папери P500, P1000, P1500, P2000.

Повторність вимірювань – 10. Кількість насінин для досліджень – 20.

Результати досліджень та їхнє обговорення. В результаті досліджень визначена шорсткість (R_a) робочих поверхонь, яка зведена в таблицю 1. Аналіз таблиці 1 дозволяє оцінити їх відповідність до різних умов експлуатації при взаємодії насіння із робочими органами обладнання для сепарації і очищення. Пофарбована сталь (PS) має найнижчий рівень шорсткості $0,45 \pm 0,15$, що свідчить про її високу гладкість і придатність для застосування в ситуаціях, де потрібне мінімальне тертя, наприклад, щоб зменшити налипання матеріалу. Оцинкована сталь (GS) з показником $0,52 \pm 0,13$ також характеризується низькою шорсткістю, що сприяє її використанню в умовах, де важливі стійкість до корозії та гладка поверхня. Нержавіюча сталь (SS), алюміній (Al) і фанера (Pl) мають середні значення шорсткості ($0,79 \pm 0,24$, $1,47 \pm 0,16$ та $0,89 \pm 0,36$ відповідно), що робить їх універсальними для застосування в різноманітних ситуаціях, зокрема, де потрібне балансування між тертям і стійкістю. Поліетилен (Po) із шорсткістю $1,25 \pm 0,25$ забезпечує середній рівень тертя, що робить його зручним для

використання в побутових або промислових умовах, де він поєднує стійкість і гладкість. Гума (Ru), яка має значну шорсткість $2,61 \pm 0,65$, відрізняється високим рівнем тертя, що підходить для поверхонь, де важлива антиковзка функція. Шліфувальний папір різних зернистостей (P1-P4) має найвищі показники шорсткості: від $6,76 \pm 0,53$ для P500 до $3,08 \pm 0,44$ для P2000. Шліфувальний папір із грубішою зернистістю (P500 і P1000) більше підходить для початкових етапів обробки, тоді як дрібнозернистий (P1500 і P2000) дозволяє проводити більш тонке шліфування.

Таблиця 1

Шорсткість робочих поверхонь

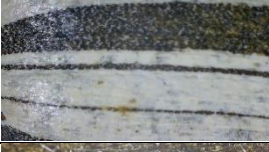
Шифр	Робоча поверхня	Шорсткість ($Ra \pm \Delta Ra$)
SS	Нержавіюча сталь	$0,79 \pm 0,24$
PS	Пофарбована сталь	$0,45 \pm 0,15$
GS	Оцинкована сталь	$0,52 \pm 0,13$
Al	Алюміній	$1,47 \pm 0,16$
Pl	Фанера	$0,89 \pm 0,36$
Po	Поліетилен	$1,25 \pm 0,25$
Ru	Гума	$2,61 \pm 0,65$
P1	Шліфувальний папір P500	$6,76 \pm 0,53$
P2	Шліфувальний папір P1000	$5,06 \pm 0,39$
P3	Шліфувальний папір P1500	$3,89 \pm 0,47$
P4	Шліфувальний папір P2000	$3,08 \pm 0,44$

В результаті досліджень визначена шорсткість (Ra) насіння різних зразків соняшнику, яка зведена в таблицю 2.

Таблиця 2

Шорсткість насіння різних зразків соняшнику

Шифр	Назва сортозразка	Фото поверхні	Візуальний опис	Шорсткість ($Ra \pm \Delta Ra$)
1	КП 11		Гладка поверхня, кількість трихом найменша	$3,58 \pm 0,87$
2	InK1124		Шорстка поверхня, кількість трихом найбільша	$10,65 \pm 1,23$
3	BK419-2		Рифлена поверхня, кількість трихом середня	$18,12 \pm 1,89$
4	Л4095		Рифлена поверхня, кількість трихом найменша	$17,24 \pm 1,67$

Шифр	Назва сортозразка	Фото поверхні	Візуальний опис	Шорсткість ($Ra \pm \Delta Ra$)
5	Запорізький кондитерський		Гладка поверхня, кількість трихом найменша	$4,62 \pm 0,92$
6	InK630		Шорстка поверхня, кількість трихом середня	$12,93 \pm 1,52$
7	InK85		Гладка поверхня, кількість трихом найменша	$4,89 \pm 0,79$
8	BK636		Рифлена поверхня, кількість трихом найменша	$18,22 \pm 2,05$
9	InK433		Гладка поверхня, кількість трихом найменша	$3,65 \pm 0,54$
10	InK1039		Гладка поверхня, кількість трихом найменша	$4,32 \pm 0,49$
11	InK912		Шорстка поверхня, кількість трихом найбільша	$11,43 \pm 1,03$
12	In18926		Гладка поверхня, кількість трихом найменша	$3,71 \pm 0,83$

Аналіз таблиці 2, що описує характеристики сортозразків за показником шорсткості, дозволяє оцінити взаємозв'язок між структурою поверхні, кількістю трихом і рівнем шорсткості. Сортозразки з гладкою поверхнею та найменшою кількістю трихом мають значно нижчі показники шорсткості. Наприклад, сортозразки 1, 5, 7, 9, 10 і 12 демонструють шорсткість від $3,58 \pm 0,87$ до $4,89 \pm 0,79$. Це вказує на те, що гладка поверхня та мінімальна кількість трихом сприяють зменшенню шорсткості. Зразки із шорсткою поверхнею, наприклад 2, 6 та 11, характеризуються вищими показниками шорсткості (від $10,65 \pm 1,23$ до $12,93 \pm 1,52$), а також найбільшою або середньою кількістю трихом. Це свідчить

про те, що шорстка структура та більша кількість трихом збільшують шорсткість. Зразки з рифленою поверхнею 3, 4 та 8, мають найвищі значення шорсткості, від $17,24 \pm 1,67$ до $18,22 \pm 2,05$, при цьому кількість трихом у цих зразків варіюється від середньої до найменшої. Високий рівень шорсткості у рифлених поверхнях може бути пов'язаний саме з рельєфом, а не лише з кількістю трихом.

В результаті досліджень визначений коефіцієнт тертя ковзання насіння різних зразків соняшнику об робочі поверхні, які зведені в таблицю 3.

Таблиця 3

**Коефіцієнт тертя ковзання насіння різних зразків соняшнику
об робочі поверхні**

		Сортозразок соняшника					
		1	2	3	4	5	6
		КП 11	InK1124	BK419-2	Л4095	Запорізький кондитерський	InK630
Робоча поверхня	SS	$0,185 \pm 0,051$	$0,249 \pm 0,044$	$0,284 \pm 0,075$	$0,3 \pm 0,049$	$0,198 \pm 0,044$	$0,261 \pm 0,051$
	PS	$0,196 \pm 0,032$	$0,237 \pm 0,047$	$0,307 \pm 0,044$	$0,265 \pm 0,077$	$0,182 \pm 0,055$	$0,258 \pm 0,046$
	GS	$0,203 \pm 0,024$	$0,235 \pm 0,051$	$0,284 \pm 0,07$	$0,308 \pm 0,034$	$0,209 \pm 0,03$	$0,254 \pm 0,05$
	Al	$0,194 \pm 0,058$	$0,262 \pm 0,046$	$0,328 \pm 0,048$	$0,286 \pm 0,081$	$0,222 \pm 0,038$	$0,263 \pm 0,067$
	Pl	$0,208 \pm 0,03$	$0,235 \pm 0,061$	$0,291 \pm 0,072$	$0,316 \pm 0,036$	$0,213 \pm 0,031$	$0,265 \pm 0,051$
	Po	$0,195 \pm 0,053$	$0,267 \pm 0,037$	$0,313 \pm 0,06$	$0,281 \pm 0,08$	$0,207 \pm 0,046$	$0,266 \pm 0,062$
	Ru	$0,244 \pm 0,037$	$0,273 \pm 0,064$	$0,361 \pm 0,04$	$0,336 \pm 0,06$	$0,239 \pm 0,047$	$0,299 \pm 0,063$
	P1	$0,325 \pm 0,053$	$0,366 \pm 0,072$	$0,405 \pm 0,095$	$0,421 \pm 0,072$	$0,319 \pm 0,068$	$0,386 \pm 0,075$
	P2	$0,267 \pm 0,072$	$0,321 \pm 0,078$	$0,382 \pm 0,08$	$0,378 \pm 0,074$	$0,293 \pm 0,052$	$0,363 \pm 0,055$
	P3	$0,277 \pm 0,033$	$0,308 \pm 0,064$	$0,359 \pm 0,075$	$0,358 \pm 0,065$	$0,265 \pm 0,052$	$0,333 \pm 0,055$
	P4	$0,238 \pm 0,052$	$0,308 \pm 0,044$	$0,366 \pm 0,046$	$0,333 \pm 0,071$	$0,231 \pm 0,07$	$0,31 \pm 0,056$
		7	8	9	10	11	12
		InK85	BK636	InK433	InK1039	InK912	In18926
Робоча поверхня	SS	$0,182 \pm 0,066$	$0,306 \pm 0,05$	$0,187 \pm 0,051$	$0,202 \pm 0,039$	$0,258 \pm 0,045$	$0,192 \pm 0,043$
	PS	$0,222 \pm 0,017$	$0,269 \pm 0,083$	$0,208 \pm 0,019$	$0,188 \pm 0,046$	$0,253 \pm 0,039$	$0,19 \pm 0,037$
	GS	$0,199 \pm 0,039$	$0,313 \pm 0,04$	$0,184 \pm 0,046$	$0,199 \pm 0,038$	$0,249 \pm 0,044$	$0,191 \pm 0,037$
	Al	$0,208 \pm 0,056$	$0,316 \pm 0,057$	$0,216 \pm 0,037$	$0,222 \pm 0,038$	$0,256 \pm 0,06$	$0,207 \pm 0,045$
	Pl	$0,221 \pm 0,027$	$0,289 \pm 0,072$	$0,189 \pm 0,051$	$0,212 \pm 0,031$	$0,261 \pm 0,041$	$0,2 \pm 0,039$
	Po	$0,218 \pm 0,038$	$0,325 \pm 0,043$	$0,224 \pm 0,023$	$0,196 \pm 0,058$	$0,244 \pm 0,068$	$0,203 \pm 0,044$
	Ru	$0,219 \pm 0,073$	$0,326 \pm 0,074$	$0,229 \pm 0,05$	$0,246 \pm 0,042$	$0,301 \pm 0,043$	$0,242 \pm 0,037$
	P1	$0,33 \pm 0,064$	$0,408 \pm 0,095$	$0,32 \pm 0,058$	$0,338 \pm 0,046$	$0,363 \pm 0,082$	$0,316 \pm 0,062$
	P2	$0,3 \pm 0,053$	$0,385 \pm 0,08$	$0,282 \pm 0,055$	$0,281 \pm 0,06$	$0,342 \pm 0,062$	$0,271 \pm 0,068$
	P3	$0,289 \pm 0,031$	$0,387 \pm 0,045$	$0,258 \pm 0,051$	$0,249 \pm 0,069$	$0,317 \pm 0,057$	$0,276 \pm 0,033$
	P4	$0,249 \pm 0,049$	$0,343 \pm 0,068$	$0,224 \pm 0,069$	$0,262 \pm 0,035$	$0,279 \pm 0,08$	$0,238 \pm 0,052$

Аналіз коефіцієнтів тертя ковзання для різних робочих поверхонь і сортозразків соняшника дозволяє оцінити взаємозв'язок між матеріалом поверхні та рівнем тертя при ковзанні насіння. Показники тертя для сталевих поверхонь – нержавіючої сталі (SS), пофарбованої сталі (PS) та оцинкованої сталі (GS) – є досить низькими в більшості випадків, з коефіцієнтами, що зазвичай не перевищують 0,3. Нержавіюча сталь демонструє найнижчі значення тертя для багатьох зразків, що може бути корисним у випадках, де потрібно мінімізувати зчеплення насіння з поверхнею. Наприклад, для зразків КП11 і InK433 коефіцієнт тертя для SS становить відповідно $0,185 \pm 0,051$ та $0,187 \pm 0,051$.

Алюміній (Al) показує дещо вищі значення коефіцієнта тертя порівняно з сталевими поверхнями, що робить його підходящим для процесів, де важливе помірне зчеплення. Наприклад, для зразків ВК419-2 і ВК636 коефіцієнти тертя на Al досягають $0,328 \pm 0,048$ і $0,316 \pm 0,057$ відповідно. Резинові поверхні (Ru) демонструють високі показники тертя, що свідчить про їх високу здатність до утримання насіння на поверхні. Наприклад, коефіцієнт тертя для зразка ВК419-2 становить $0,361 \pm 0,04$, а для зразка ВК636 – $0,326 \pm 0,074$. Ці високі значення роблять гуму ефективною в умовах, де важливе сильне зчеплення або запобігання ковзанню насіння. Шліфувальний папір різних зернистостей (P1–P4) має найбільші коефіцієнти тертя серед усіх досліджених матеріалів, особливо для зразків з грубою зернистістю (P1, P2), де значення перевищують 0,4. Це свідчить про те, що поверхні з шліфувальним папером краще використовувати для процесів, де потрібне максимальне зчеплення. Наприклад, для зразка Л4095 на P1 коефіцієнт тертя становить $0,421 \pm 0,072$, що є найвищим показником у таблиці 3.

Об'єднуючи дані таблиць 1–3 можна побудувати тривимірний графік залежності коефіцієнту тертя від шорсткості (R_a) насіння і робочої поверхні (рисунок 4).

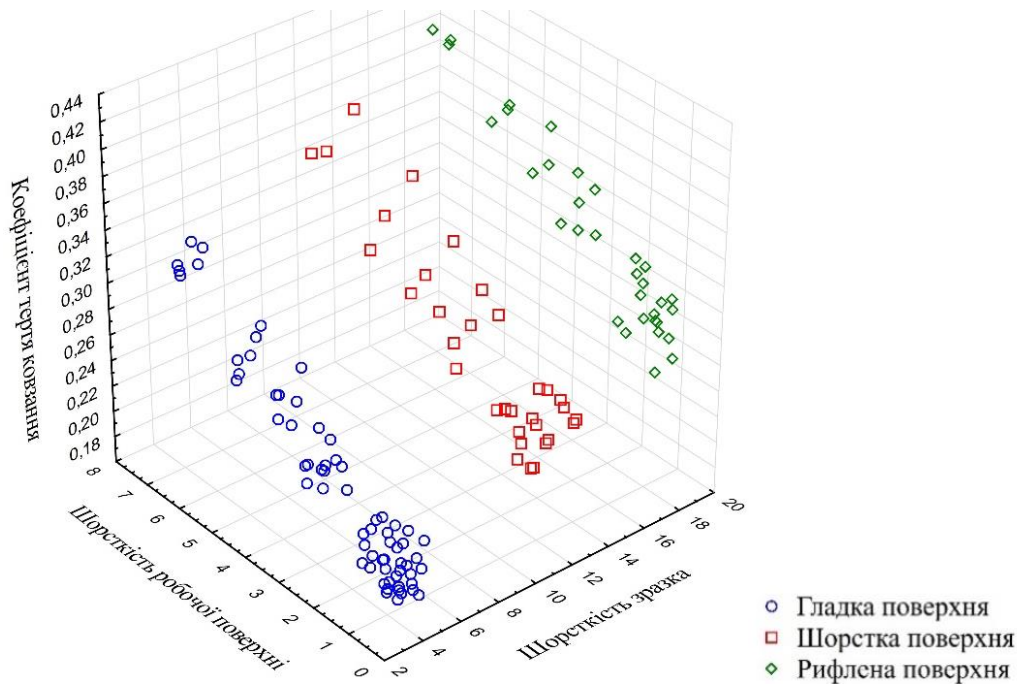


Рис. 4. Залежність коефіцієнту тертя від шорсткості (R_a) насіння і робочої поверхні

З рисунку 4 наочно виділяються три групи насіння, які можна було спостерігати і по фотографіям поверхні: гладка, шорстка і рифлена поверхні.

Узагальнюючи отримані дані запропонуємо методику групування зразків соняшника за фрикційними властивостями поверхні насіння:

1. Вимірювання коефіцієнта тертя ковзання для насіння на кількох контрольних поверхнях (шліфувальні папери P500, P1000, P1500, P2000) з

відомими властивостями.

2. Створення класифікаційних груп насіння на основі діапазонів коефіцієнтів тертя для кожної поверхні. Наприклад, насіння, що показує високі значення тертя може бути віднесено до групи з високим зчепленням, тоді як насіння з низьким коефіцієнтом тертя – до групи з низьким зчепленням.

3. Розробка алгоритму класифікації за допомогою машинного навчання та методів кластеризації даних, що дозволить автоматизувати процес віднесення насіння до певної групи на основі результатів тестування на контрольних робочих поверхнях.

Значення коефіцієнтів тертя можуть суттєво варіюватися в залежності від сортових особливостей, умов проведення експериментів, вологості, форми насіння, шорсткості його поверхні, а також матеріалу поверхні тертя, як зазначали попередні дослідники (Kaliniewicz et al. 2015; Kovalyshyn et al. 2015).

Результати досліджень показали, що для окремих ліній соняшника коефіцієнти тертя ковзання мають тенденцію до підвищення для насінин з більш шорсткою поверхнею, що збігається з дослідженнями, представленими Nogabik (2001) та Altuntas et al. (2007). Це може бути пов'язано із збільшенням площі контакту між поверхнями, що створює більшу силу зчеплення між насінною і робочою поверхнею.

Використання профілометра для визначення шорсткості поверхні підтвердило, що наявність мікронерівностей впливає на фрикційні властивості. Це узгоджується з висновками Kaliniewicz et al. (2015) та Jouki et al. (2012), які вказували, що мікрогеометрія поверхні відіграє ключову роль у формуванні фрикційних характеристик.

Висновки

Для дослідження фрикційних властивостей насіння соняшнику обґрунтовано конструктивно-технологічну і електричну схеми і виготовлено експериментальний зразок відповідного обладнання.

В результаті досліджень визначені шорсткість (Ra) робочих поверхонь і насіння соняшнику різних зразків, а також встановлено коефіцієнт тертя ковзання насіння різних зразків соняшнику об робочі поверхні. Визначено, що шліфувальний папір різних зернистостей (P1–P4) має найбільші коефіцієнти тертя серед усіх досліджених матеріалів, особливо для зразків з грубою зернистістю (P1, P2), де значення перевищують 0,4. Це свідчить про те, що поверхні з шліфувальним папером краще використовувати для порівняння різних зразків соняшнику.

Узагальнюючи отримані дані, запропонована методика групування зразків соняшника за фрикційними властивостями поверхні насіння: вимірювання коефіцієнта тертя ковзання для насіння на кількох контрольних поверхнях (шліфувальні папери P500, P1000, P1500, P2000) з відомими властивостями; створення класифікаційних груп насіння на основі діапазонів коефіцієнтів тертя для кожної поверхні; розробка алгоритму класифікації за допомогою машинного навчання та методів кластеризації даних.

References

Afzalnia S, Roberge M (2007) Physical and mechanical properties of selected forage materials. Can. Biosys. Eng. 49: 223–227

Altuntas E, Demirtola H (2007) Effect of moisture content on physical properties of some grain legume seeds. N. Z. J. Crop Hortic. Sci. 35: 423–433. DOI: 10.1080/01140670709510210

Chavoshgoli Es, Abdollahpour Sh, Abdi R, Babaie A (2015) Engineering properties of sunflower seeds and materials other grain as moisture content for equipment of separator. *Agric Eng Int: CIGR Journal*. 17(1): 10–21

Horabik J (2001) Charakterystyka właściwości fizycznych roślinnych materiałów sypkich istotnych w procesach składowania [Physical characteristics of loose plant material which are important during storage]. *Acta Agrophysica*, 54, monografia

Ibrahim MM (2008) Determination of Dynamic Coefficient of Friction for Some Materials for Feed Pellet Under Different Values of Pressure and Temperature. *Misr Journal of Agricultural Engineering*. 25(4): 1389–1409. DOI: 10.21608/mjae.2008.190274

Izli N, Unal H, Sincik M (2009) Physical and mechanical properties of rapeseed at different moisture content. *Int. Agrophys*. 23: 137–145

Jouki M, Khazaei N (2012) Some Physical Properties of Rice Seed (*Oriza sativa*). *Res. J. Appl. Sci. Eng. Technol*. 4(13): 1846–1849

Kabas O, Yilmaz E, Ozmerzi A, Akinci İ (2007) Some physical and nutritional properties of cowpea seed (*Vigna sinensis* L.). *J. Food Eng*. 79: 1405–1409. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2006.04.022

Kalkan F, Kara M (2011). Handling, frictional and technological properties of wheat as affected by moisture content and cultivar. *Powder Technol*. 213: 116–122. DOI: 10.1016/j.powtec.2011.07.015

Kaliniewicz Z, Markowski P, Anders A, Jadwisieńczyk K (2015) Frictional properties of selected seeds. *Technical Sciences*. 18(2): 85–101

Khodabakhshian R, Emadi B, Abbaspour Fard MH (2010) Frictional Behavior of Sunflower Seed and its Kernel as a Function of Moisture Content, Variety and Size. *Journal of Agricultural Science and Technology*. 4 (3): 83–94

Kovalyshyn SJ, Dadak VO, Sokolyk VV, Grundas S, Stasiak M, Tys J (2015) Geometrical and friction properties of perennial grasses and their weeds in view of an electro-separation method. *Int. Agrophys*. 29(2): 185–191. DOI: 10.1515/intag-2015-0027

Malik MA, Saini CS (2016) Engineering properties of sunflower seed: Effect of dehulling and moisture content, *Cogent Food & Agriculture*. 2:1, 1145783. DOI: 10.1080/23311932.2016.1145783

Ortiz-Hernandez AA, Araiza-Esquivel M, Delgadillo-Ruiz L, Ortega-Sigala JJ, Durán-Muñoz HA, Mendez-Garcia VH, Yacaman MJ, Vega-Carrillo HR (2020) Physical characterization of sunflower seeds dehydrated by using electromagnetic induction and low-pressure system. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. 60, 102285. DOI: 10.1016/j.ifset.2019.102285

Riyahi R, Rafiee S, Dalvand MJ, Keyhani A (2011) Some physical characteristics of pomegranate seeds and arios. *J. Agric. Tech*. 7(6): 1523–1537.

Rusinek R, Molenda M (2007) Static and kinetic friction of rapessed. *Research in Agricultural Engineering*. 53(1): 14–19. DOI: 10.17221/2129-RAE

Santalla EM, Mascheroni RH (2003) Note: Physical Properties of High Oleic Sunflower Seeds. *Food Science and Technology International*. 9(6): 435–442. DOI: 10.1177/1082013203040756

Sharobeem YF (2007) Apparent dynamic friction coefficients for grain crops. *Misr J. Agric. Eng*. 24(3): 557–574

Sologubik CA, Campañone LA, Pagano AM, Gely MC (2013) Effect of moisture content on some physical properties of barley. *Ind. Crops Prod*. 43: 762–767. DOI: 10.1016/j.indcrop.2012.08.019

Tarighi J, Mahmondi A, Rad MK (2011) Moisture-dependent engineering properties of sunflower (var. Armaviriski). Aust. J. Agric. Eng. 2(2): 40–44

Wang S, Yu Z, Zhang W, Zhao D., Aorigele (2022) Friction coefficient calibration of sunflower seeds for discrete element modeling simulation. Phyton-International Journal of Experimental Botany, 91 (11), 2559–2582. DOI: 10.32604/phyton.2022.021354

STUDY OF THE FRICTIONAL PROPERTIES OF SUNFLOWER SEED SURFACES

E. B. Aliiev^{1,2}

¹ *Institute of Oilseed Crops of the National Academy of Agrarian Sciences of Ukraine,*

² *Dnipro State Agrarian and Economic University*

The frictional properties of agricultural crop seeds are an essential factor in designing mechanical components in agricultural machinery, particularly for their structural and technological parameters during harvesting, cleaning, sorting, storage, and processing of seeds. This study aimed to determine the coefficients of sliding friction of sunflower seeds on different working surfaces. Sunflower seeds of various varieties and surfaces made of stainless, galvanized, and painted steel, aluminum, plywood, polyethylene, rubber, as well as sandpapers with different grit sizes (P500, P1000, P1500, P2000) were used as materials for the experiments. Measurements were performed using an SRT-6210 profilometer to determine surface roughness, along with a specially developed module for measuring friction coefficients. The experimental results indicate variations in frictional properties depending on the surface characteristics. Painted and galvanized steel showed the lowest roughness, making them suitable for applications requiring minimal friction. In contrast, rubber demonstrated high roughness values, making it appropriate for anti-slip surfaces. Sandpapers had the highest roughness levels, indicating their suitability for applications where significant resistance to sliding is needed. Summarizing the obtained data, a methodology for grouping sunflower seed samples by surface frictional properties is proposed: measuring the sliding friction coefficient for seeds on several reference surfaces (sandpapers P500, P1000, P1500, P2000) with known properties; creating classification groups of seeds based on the friction coefficient ranges for each surface; and developing a classification algorithm using machine learning and data clustering methods.

Key words: frictional properties, sunflower seeds, coefficient of friction, surface roughness, grouping, methodology.