

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ТАВРІЙСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРОТЕХНОЛОГІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ ДМИТРА МОТОРНОГО**

Механіко-технологічний факультет



Кафедра ОПХВ імені професора
Ф.Ю. Ялпачика

**"ТЕХНОЛОГІЧНІ СИСТЕМИ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ
КОЕФІЦІЄНТА ТЕРТЯ ХАРЧОВИХ ПРОДУКТІВ ДО І ПІСЛЯ
ЗАМОРОЖУВАННЯ"**

методичні вказівки до лабораторної роботи з дисципліни
" Технологічні системи галузевого машинобудування"
для аспірантів спеціальності 133 «Галузеве машинобудування»
здобувачів ступеня вищої освіти «Доктор філософії»

Мелітополь – 2021

Технологічні системи для дослідження коефіцієнта тертя харчових продуктів до і після заморожування. Методичні вказівки для аспірантів, які навчаються за спеціальністю 133 «Галузеве машинобудування», здобувачів ступеня вищої освіти «Доктор філософії» – Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного, 2021. – 19 с.

Розробники Самойчук К.О., д.т.н., професор
Бойко В.С., к.т.н., доцент
Тарасенко В.Г., к.т.н., доцент
Паляничка Н.О., к.т.н., доцент

Рецензент: Волошина А.А., д.т.н., професор кафедри МС та ТС

Розглянуто та рекомендовано до друку на засіданні кафедри ОПХВ імені професора Ф.Ю. Ялпачика

Протокол № 1 від 27.08. 2021 року.

Затверджено методичною комісією механіко-технологічного факультету, протокол № 10 від 31.08.2021 року.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА

Технологічні системи для дослідження коефіцієнта тертя харчових продуктів до і після заморожування

Мета роботи: Експериментальним шляхом визначити коефіцієнти тертя для умов сухого граничного тертя по дереву, гумі і сталі деяких видів свіжих, заморожених і дефростованих плодів

Час виконання роботи 4 год.

1 Порядок виконання роботи

- розглянути основні теоретичні положення з природи і методів визначення коефіцієнта тертя спокою і руху;
- ознайомитись з принципом дії та будовою експериментальних установок для визначення коефіцієнта тертя спокою і руху;
- провести експериментальні дослідження з визначення коефіцієнта тертя спокою і руху зразків свіжої, замороженої та дефростованої рослинної продукції;
- обробити результати експерименту;
- сформулювати висновки за результатами роботи;
- оформити звіт по роботі і відзвітуватися перед викладачем.

2 Завдання для самопідготовки

У процесі підготовки до заняття студент повинен:

- **повторити:** конспект лекцій за темою заняття та опрацювати рекомендовану літературу;
- **знати:**
 - 1) область використання коефіцієнта тертя при розробці та модернізації технологічного обладнання переробної галузі;
 - 2) основні способи визначення коефіцієнта тертя руху і спокою;
- **вміти:** проводити налаштування експериментальних установок для визначення коефіцієнта тертя, визначати залежності за темою дослідження, аналізувати результати досліджень.

3 Основні теоретичні положення

Тертя – процес взаємодії тіл при їх відносному рухові (зсуві) або при русі тіла в газоподібному або рідкому середовищі. По-іншому називається фрикційною взаємодією (англ. **friction**). Вивченням процесів тертя займається розділ механіки фрикційної взаємодії або трибологією.

Вивчення природи тертя почалося в глибоку давнину, стародавні мислителі і винахідники постійно намагались зрозуміти і використати це явище.

Перші положення про закономірності зовнішнього тертя були викладені в роботі **Леонардо да Вінчі** опублікованій в **1508** році.

Через майже **200** років теорія тертя була сформульована французьким ученим **Гійомом Амонтоном** в **1699** році, вона згодом була названа механічною теорією тертя. За нею сила тертя залежить від пружних і пластичних взаємодій нерівностей:

$$F_{mp} = F_N \cdot f \quad (1)$$

де F_N - нормальне навантаження;

f - коефіцієнт тертя, обумовлений виразом:

$$f = \sigma_s / c \cdot \sigma_m$$

де σ_s - напруження зрізу, c - постійна величина ($c=3$),

σ_m - границя текучості матеріалу

В **1785** році **Шарль Кулон** розвив механічну теорію тертя викладену Амонтоном, додавши у вираз (1) додаткову силу адгезійного схоплювання F_A :

$$F_{mp} = F_A + F_N \cdot f$$

Цей закон називають законом Амонтона-Кулона.

В **1935** році вітчизняний учений **Б. В. Дерягін** запропонував молекулярну теорію тертя:

$$F_{mp} = f(F_N + p_0 \cdot S)$$

де p_0 - питома сила молекулярної взаємодії; S - площа контакту.

Надалі англійський фізик **Ф. Боуден** запропонував більш складне формулювання сили тертя, включивши в неї площі поверхонь контакту:

$$F_{\text{тр}} = F_z + F_n = \tau_z \cdot S_\phi + \tau_n \cdot S$$

де F_z - опір зрізу поверхонь контакту, Н;

F_n - опір пластичним явищам між поверхнями контакту, Н;

τ_z - дотичні напруження зрізу, Н/м²;

τ_n - опір пластичної деформації, Н/м²;

S_ϕ і S - відповідно площа фактичного контакту і поперечного перерізу, м².

В 1946 році **І. Г. Крагельський** розробив молекулярно-механічну теорію тертя:

$$F_{\text{тр}} = \tau_{\text{мех}} + \tau_{\text{мол}} = \alpha \cdot S_\phi + \beta \cdot F_N$$

де $\tau_{\text{мех}}$ - механічна складова сили тертя; $\tau_{\text{мол}}$ - молекулярна складова сили тертя; α і β - постійні коефіцієнти.

В 1952 році професор **Дубинін А. Д.** сформулював енергетичну теорію тертя, по ній молекулярно-механічна теорія тертя доповнюється ще й законом енергій та їх перетворень.

На даний час наука **трибологія** успішно розвивається як вітчизняними, так і зарубіжними вченими І.В. Крагельського, Н.Б. Демкіна, Н.А. Буше, А.В. Чичинадзе, Б.І. Костецького та ін. і охоплює все більшу область вивчення і результати цих досліджень впроваджуються в різні сфери матеріального виробництва.

Сила тертя – це зусилля, що виникає при контакті двох тіл і перешкоджає їхньому відносному руху. Причиною виникнення тертя є шорсткість поверхонь тертя і взаємодія молекул цих поверхонь. Сила тертя залежить від матеріалу поверхонь тертя і від того, наскільки сильно ці поверхні притиснуті одна до одної.

Тертя ковзання – сила, що виникає при поступальному переміщенні одного з контактуючих взаємодіючих тіл відносно іншого і діюча на це тіло в напрямку, протилежному напрямку ковзання.

Тертя кочення – момент сил, що виникає при коченні одного із двох контактуючих взаємодіючих тіл відносно іншого.

Тертя спокою – сила, що виникає між двома контактуючими тілами і перешкоджає виникненню відносного руху. Цю силу необхідно подолати для того, щоб привести два контактуючі тіла в рух одне відносно другого.

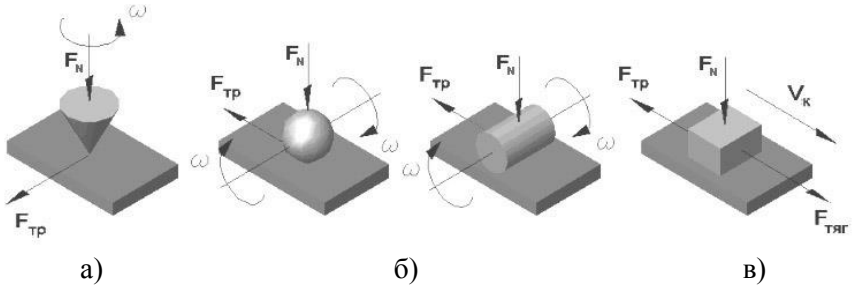


Рисунок 1 – Види тертя за кінематичними ознаками:

а) тертя вістря (вертіння); б) тертя кочення; в) тертя ковзання.

Крім перерахованих видів тертя розрізняють також тертя статичне і кінематичне. Статичне тертя характеризується мінімальним зусиллям (при мікрозміщенні контактуючих тіл), необхідним для виведення одного з тіл в стан його відносного руху. Кінематичне тертя характеризується зусиллям, прикладеним до тіла, що рухається для підтримання постійної швидкості його руху.

Тертя прийнято розділяти на:

- *сухе*, коли взаємодіючі тверді тіла не розділені ніякими додатковими шарами змащенням (у тому числі і твердими мастильними матеріалами) – випадок, що дуже рідко зустрічається на практиці; характерна відмітна риса сухого тертя – наявність значної сили тертя спокою;

- *граничне*, коли в області контакту можуть утримуватися шари і ділянки різної природи (окисні плівки, рідина і так далі) – найпоширеніший випадок при терті ковзання;

- *рідинне* (в'язке), що виникає при взаємодії тіл, розділених шаром твердого тіла (порошком графіту), рідини або газу (змащення) різної товщини – як правило, зустрічається при терті кочення, коли тверді тіла занурені в рідину, величина в'язкого тертя характеризується в'язкістю середовища;

- *змішане*, коли область контакту містить ділянки сухого і рідинного тертя;

- *еластогідродинамічне* (в'язкопружне), коли вирішальне значення має внутрішнє тертя в змащувальному матеріалі. Виникає при збільшенні відносних швидкостей переміщення.

Коефіцієнтом тертя називають коефіцієнт пропорційності, що пов'язує силу тертя $F_{\text{тр}}$ і силу нормального тиску F_N тіла на опору. Тобто формула (1) є дійсною і застосованою на даний час.

Коефіцієнт тертя є сукупною характеристикою пари матеріалів, що контактують і не залежить від площі контакту тіл. Він залежить від характеристик поверхонь, що труться, присутності на них забруднень, швидкості руху тіл відносно одне одного і т.д. Як правило, коефіцієнт тертя визначається емпірично.

Важливою характеристикою тертя є **кут тертя** – найбільший кут, який повна реакція утворює з нормаллю до поверхні. Цей кут відповідає мінімальному куту нахилу площини по відношенню до горизонту, при якому тіло, що лежить на цій площині починає ковзати вниз під дією сили тяжіння.

Для більшості матеріалів, що утворюють пари тертя значення коефіцієнта тертя визначені з достатньою точністю і включені до довідкової літератури.

Окрему специфічну групу матеріалів складають представники сільськогосподарської сировини і продуктів, які відзначаються великою різноманітністю і широким діапазоном фізико-механічних властивостей у тому числі і коефіцієнта тертя, від значення якого залежить їхня здатність переміщатися на різних стадіях технологічного процесу, як за допомогою транспортерів, так і під дією власної ваги.

Часто відомості про величину коефіцієнта тертя необхідні і при розрахунках опору подрібнюванню (різанню), інших процесів.

Таким чином, знання значень коефіцієнта тертя потрібне у процесі створення конструкцій машин і пристосувань для механізації переробки і зберігання сільськогосподарської продукції. Досить актуальне це питання і при розробці технологічних процесів зберігання із застосуванням методу низькотемпературного заморожування, на різних етапах якого (заморожування, зберігання, дефростація) продукт, що зберігається, тією чи іншою мірою змінює свої властивості.

У сучасній довідковій літературі, значення коефіцієнта тертя для певних груп плодоовочевої продукції приводяться усереднено і найчастіше не відбивають конкретних умов одержання цих значень. У наукових публікаціях можна знайти розрізнені відомості про цей показник, але вони, як правило, приводяться для розв'язання або пояснення локальних завдань, що цікавлять дослідника. Тому, слід зазначити, що найбільш повну картину змінення сил тертя між плодом і поверхнею контакту можуть дати тільки експериментальні дослідження коефіцієнта тертя.

4 Оснащення лабораторної роботи механізмами і приладами

Лабораторна робота оснащена двома лабораторними установками для визначення тертя 1) спокою і 2) тертя руху

У якості контрольно-вимірювальних приладів і допоміжного обладнання використовується: 1) тахометр; 2) ваги 3) набір гир (50 г, 75 г, 100 г, 125 г, 150 г); 4) рівень; 5) змінні поверхні тертя (дерев'яна, гумова, сталева) для обох лабораторних установок.

Як об'єкти дослідження використовуються плоди (баклажанів, солодкого перцю та ін.), свіжі, заморожені та після розморожування на повітрі або у воді.

Коефіцієнт тертя спокою плодоовочевої продукції визначається на установці, схема якою показана на рисунку 2.

Установка складається з похилої площини 1, регулювального гвинта 2 і лінійки 3.

Плід 4 поміщається на похилу площину 1 (гіпотенуза), а за допомогою гвинта 2 кут φ збільшується поки плід не починає ковзати по похилій площині. В цей час по лінійці 3 вимірюється катет.

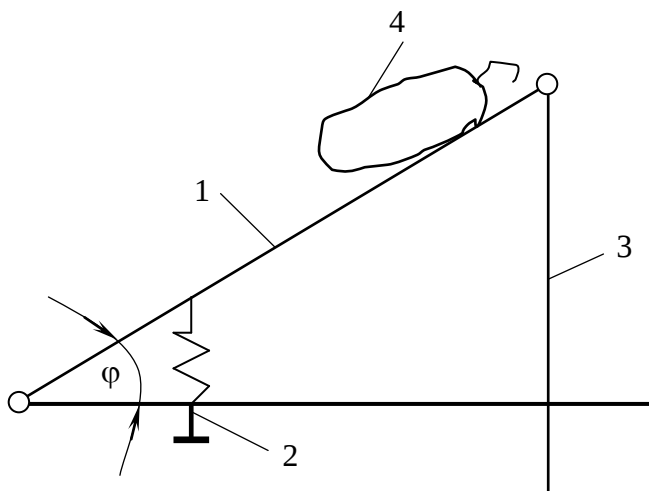


Рисунок 2 – Схема установки для визначення коефіцієнта тертя спокою

1 - похила площина; 2 - регулюючий гвинт; 3 - лінійка; 4 - плід.

Кут тертя визначається за виразом:

$$\varphi = \arcsin \frac{k}{c}, \quad (2)$$

де: k - катет що вимірюється, мм;

c - гіпотенуза (величина її для установки постійна)

Коефіцієнт тертя спокою визначається як:

$$f = \operatorname{tg} \varphi. \quad (3)$$

Коефіцієнт тертя спокою визначається по дереву, гумі і сталі, для чого установка укомплектована змінними поверхнями тертя.

Дані поверхні вибрані у зв'язку з тим що транспортуючі і завантажувальні пристрої переробного обладнання виготовлені в основному з цих матеріалів.



Рисунок 3 – Фото установки для визначення тертя спокою

Визначення коефіцієнта тертя руху проводився на відомому приладі І.В. Крагельського. Для підвищення стабільності показань і спрощення керування клиноремінний варіатор приладу був замінений відповідної клиноремінною передачею з постійним передаточним числом. Плавне ж регулювання частоти обертання диска здійснюється за рахунок застосування електродвигуна постійного струму, підключеного за реостатною схемою через випрямляч до звичайної однофазної електричної мережі.

Схема установки показана на рисунку 4.

Об'єкт випробування (плід баклажана, кисть винограду або фрагмент плода гарбуза) 1 укладається на поверхню диска 2, який обертається навколо вертикальної площини через клинопасову передачу 3 від електродвигуна постійного струму 4.

Плід за допомогою нитки 5 з'єднаний з пером самописця 6, яке переміщається по стрічці 7 на відстань, обумовлену деформацією татованої вимірювальної пружини 8.

Диск приладу має пристрої для швидкої заміни та кріплення його змінного покриття, яке імітує різні види поверхонь тертя, зокрема дерево, метал (сталь) і гума.

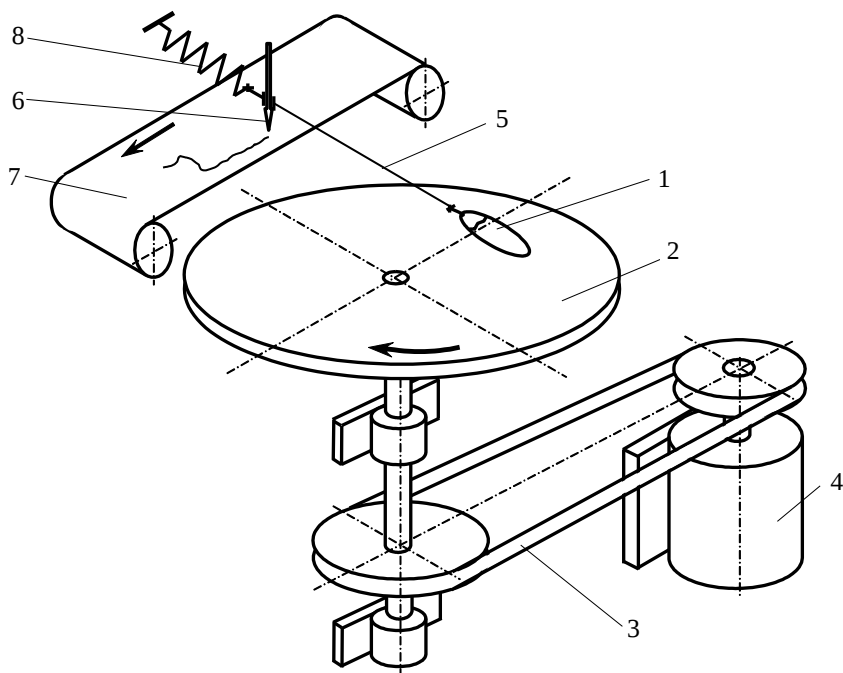


Рисунок 4 – Прилад для дослідження коефіцієнта тертя руху

1 - об'єкт випробувань (плід); 2 - диск; 3 - клинопасова передача; 4 - електродвигун постійного струму; 5 - нитка; 6 - перо самописця; 7 - вимірвальна пружина; 8 - стрічка самописця; 9 - привод самописця.

Запис зусилля тертя проводиться на стрічку з міліметрового паперу шириною 50 мм. Привод самописця також має безступінчасте регулювання переміщення стрічки. Це дає можливість узгодження швидкостей диска і паперу і тим самим одержання достовірної інформації про динаміку зміни зусилля тертя.

З метою встановлення залежності сили тертя від ваги об'єкта (нормального зусилля тиску) дослідження можна проводити за допомогою спеціально підготовлених зразків. Для цього маса плодів збільшувалась за допомогою металевих вставок (вантажів) впроваджуваних у м'якоть плода, не ушкоджуючи при цьому тертьові поверхні й не змінюючи положення його центру ваги.

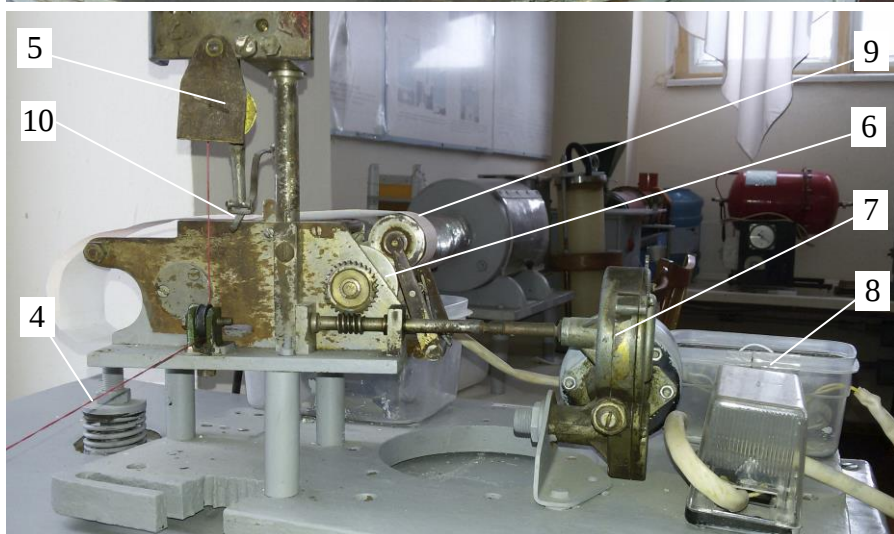


Рисунок 5 – Фото приладу для дослідження тертя руху

1 - диск; 2 - приводний вал диска; 3 - об'єкт дослідження; 4 - нитка;
 5 - навантажувач; 6 - механізм протягування стрічки 7 - привод
 самописця; 8 - електрообладнання; 9 - стрічка; 10 - перо самописця.

5 Методика проведення експерименту

Коефіцієнт тертя визначається для сухого і граничного (змішаного) тертя свіжого, замороженого і розмороженого плоду по дереву, гумі і сталі.

5.1 Визначення коефіцієнта тертя спокою

1 Виміряти довжину гіпотенузи (величина для всіх дослідів постійна і занести в таблицю 1.

2 Помістити на установку для визначення коефіцієнта тертя спокою (рисунок 3) продукт, що досліджується.

3 За допомогою регулювального гвинта 2 збільшувати кут φ (рисунок 2) поки продукт не почне ковзати по похилій площині.

4 Виміряти довжину катета k за допомогою лінійки 3 (рисунок 2) і занести дані в таблицю 1.

5 Повторити пункти 2. 3 і 4 п'ять разів.

Таблиця 1 – Параметри для визначення коефіцієнта тертя спокою.

Стан плоду	Матеріал покриття	Гіпотенуза	Катет k , мм (по дослідах)						Кут тертя, φ°	Коефіцієнт тертя, f
			1	2	3	4	5	ср.		
Свіжий	дерево									
	гума									
	сталь									
Заморожений	дерево									
	гума									
	сталь									
Дефростований	дерево									
	гума									
	сталь									

6 Замінити покриття похилої площини і повторити експеримент в тій же послідовності.

7 Визначити середнє значення катета по п'яти дослідах і розрахувати кут тертя φ за формулою (2) і результати занести в таблицю 1.

8 Розрахувати коефіцієнт тертя спокою за формулою (3) і занести його значення в таблицю 1.

5.2 Визначення коефіцієнта тертя руху

Визначення коефіцієнта тертя руху проводяться при робочих швидкостях руху продукту. $V_1 = 0,75$ м/с; $V_2 = 1,0$ м/с; $V_3 = 1,5$ м/с;

1 Провести тарування навантажувальної пружини для чого:

Розвернути раму блоку навантаження у положення для тарування. Заправити самописець стрічкою з міліметрового паперу шириною 50 мм. Тарування проводиться шляхом послідовного навішування на нитку 4 вантажів (гир) відповідної ваги. Для кожного вантажу вмикається самописець і проводиться тарувальну пряму, включаючи і пряму з нульовим навантаженням (рисунок 6).

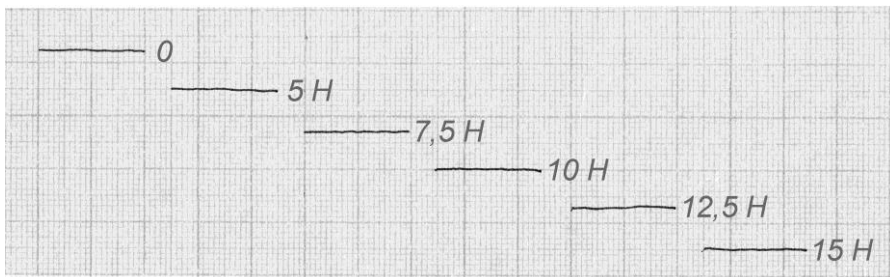


Рисунок 6 – Зразок стрічки з записом тарування пружини

2 Визначити частоту обертання для кожного режиму дослідження шляхом визначення відповідної частоти обертання диска за формулою:

$$n_i = 60 \cdot V_i / (\pi \cdot D), \quad (4)$$

де V_i - робоча швидкість руху продукту при випробуванні, м/с;

D - діаметр кола на диску, на якому розташовується продукт, м.

Значення D визначається заміром безпосередньо на диску.

3 Встановити за тахометром частоту обертання необхідну для першої серії дослідів (при $V_1 = 0,75$ м/с). Потрібна частота обертання виставляється за допомогою реостату керування електродвигуном постійного струму.

4 Встановити на диск приладу перший тип покриття (дерево), укласти на відмітку відповідного діаметра диска плід і з'єднати його з нитку приладу.

5 Ввімкнути одночасно електродвигун привода диска і електродвигун самописця. Записати на стрічку самописця зусилля виникаючі на нитці від сил тертя плоду об покриття диска.

6 Повторити досліди за пунктами 4 і 5 з плодами в іншому стані (заморожені, дефростовані).

7 Замінити покриття диска на гумове, потім сталеве і повторити експерименти у тій же послідовності.

8 Після проведення першої серії дослідів провести другу і третю серії змінивши швидкості випробувань (див. п. 3).

9 Записати отримані дані за результатами дослідів в таблицю 2.

6 Обробка результатів експериментів.

1 Визначити масштаб (Н/мм) запису амплітуди зусилля тертя на стрічці самописця.

$$\mu = m_g \cdot g / l, \quad (5)$$

де m_g - маса вантажу при таруванні, кг;

l - відстань на стрічці між нульовою лінією і лінією відповідній тарувальному вантажу, мм;

g - прискорення вільного падіння.

2 Заміряти величину амплітуди зусилля тертя на стрічці самописця і заносимо дані в таблицю 2.

3 Визначити середні значення амплітуди зусилля тертя, мм:

$$A_{cp} = \frac{A_1 + A_2 + A_3 + A_4 + A_5}{5}. \quad (6)$$

4 Визначити зусилля тертя (Н) для різних покриттів при різних швидкості руху:

$$F_{mp} = A_{cp} \cdot \mu, \quad (7)$$

де A_{cp} - середнє значення амплітуди, мм;

μ - масштаб запису, Н/мм;

[illegible]

5 Розрахувати нормальне зусилля тиску плоду на покриття диска, Н:

$$F_N = m_n \cdot g, \quad (8)$$

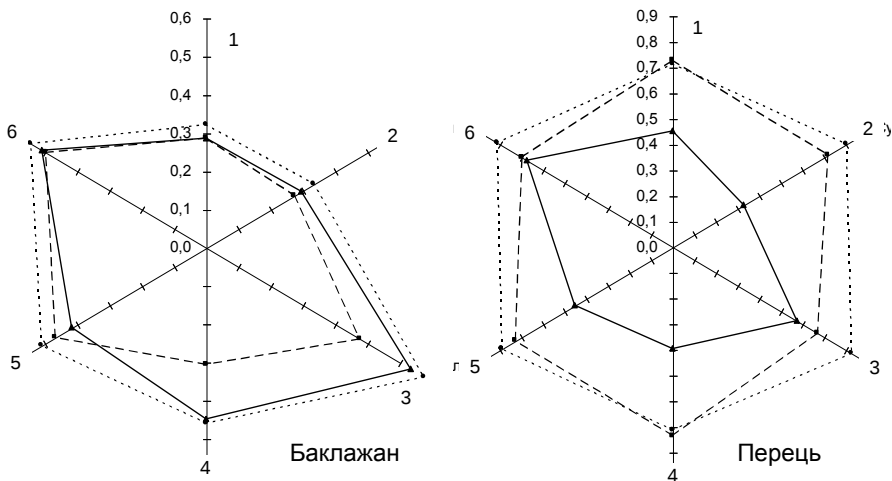
де m_n - маса плоду, кг;

6 Визначити коефіцієнт тертя руху за формулою:

$$f_{mp.p} = F_{mp} / F_N. \quad (9)$$

Одержані експериментальні і розрахункові дані занести в таблицю 2 та зробити висновки.

За результатами визначення коефіцієнта тертя спокою побудувати пелюсткові діаграми за зразком представленим на рисунку 7.



Об'єкт: ——— свіжий; - - - - - заморожений; - · - · - · - розморожений

Рисунок 7 – Зразок побудови пелюсткових діаграм за результатами визначення коефіцієнта тертя спокою

7 Вимоги безпеки

Під час проведення роботи додержуватись загальної інструкції з охорони праці, наведених в розділі „Загальні вимоги безпеки“.

8 Контрольні питання

- 1 Охарактеризуйте поняття явища „тертя“.
- 2 Які закони лежать в основі теорії тертя?
- 3 Дайте визначення терміну „сила тертя“.
- 4 Перерахуйте види тертя за характеристикою взаємодії тіл які ви знаєте?
- 5 У чому різниця між статичним і кінематичним тертям?
- 6 За яким принципом працює установка для визначення коефіцієнта тертя спокою?
- 7 Вкажіть взаємозв'язок між кутом тертя і коефіцієнтом тертя.
- 8 Поясніть принцип дії приладу І.В. Крагельського для визначення коефіцієнта тертя руху.
- 9 Наведіть порядок тарування силової пружини приладу визначення коефіцієнта тертя руху.
- 10 Наведіть порядок обробки результатів дослідів по визначенню коефіцієнта тертя.

9 Тестові завдання

1) Від яких факторів залежить значення сили тертя за законом Г. Амонтона?

- а) ...залежить від пружних і пластичних взаємодій нерівностей;
- б) ...залежить від сил взаємного тяжіння двох тіл, що контактують;
- в) ...залежить від сили тяжіння і площі тіл, що контактують.

2) Яким зусиллям сила тертя Г. Амонтона доповнена згідно з законом Шарля Кулона?

- а) додатковою силою атмосферного тиску;
- б) додатковою силою адгезійного схоплювання F_A ;
- в) додатковою силою зминання нерівностей шорсткості.

3) Вкажіть вірну формулу, що відображає взаємозв'язок між коефіцієнтом тертя і кутом тертя.

- а) $f = \arctg \varphi$; б) $f = tg \varphi$; в) $f = \cos \varphi$.

4) Вкажіть формулу закону Г. Амонтона.

- а) $F_{mp} = A_{cp} \cdot \mu$; б) $F_{mp} = F_N \cdot f$; в) $F_{mp} = F_A + F_N \cdot f$

5) Брусок масою 0,2 кг тягнуть по поверхні стола з показанням динамометра 0,5 Н, чому дорівнює коефіцієнт тертя?

- а) 0,1; б) 0,2; в) 0,4

5) Вкажіть повне формулювання терміну „тертя спокою“

а) сила, що виникає при поступальному переміщенні одного з контактуючих взаємодіючих тіл відносно іншого;

б) момент сил, що виникає при коченні одного із двох контактуючих взаємодіючих тіл відносно іншого;

в) сила, що виникає між двома контактуючими тілами і перешкоджаючи виникненню відносного руху.

6) Яке формулювання відповідає поняттю „тертя“?

а) кількісний показник взаємодії тіл, що є причиною появи прискорення тіл

б) явище збереження тілом швидкості у випадку, коли рівнодіюча сил, що діють на тіло, дорівнює нулю

в) взаємодія, що виникає в місці контакту тіл і перешкоджає їхньому відносному руху.

7) При якому виді тертя тіл виникає найбільша сила тертя?

а) при терті ковзання; б) при терті спокою; в) при терті кочення.

8) Силу тертя можна виміряти...

а) профілометром; б) рефрактометром; в) динамометром.

9) Вкажіть розмірність коефіцієнта тертя кочення

а) Н/мм²; б) без розмірності; в) мм.

10) У якому механізмі явище тертя дає позитивний ефект?

а) стрічковому конвеєрі; б) підшипниках ковзання;
в) різальному механізмі вовчка.

Література

1 Силин А.А. Трение и мы. / А.А. Силин. - М.: Наука, 1987. - 192 с.

2 Попов В.Л. Механика контактного взаимодействия и физика трения. / В.Л. Попов. - М.: ФИЗМАТЛИТ. 2013 - 352 с.

3 Лужнов Ю.М. Основы триботехники / Ю.М. Лужнов, В.Д. Александров. - М.: МАДИ, 2013. - 136 с.