

**Роман РОМАНЕНКО**

# **ЕКСПРЕС-МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ТЕРТЯ ТВЕРДИХ ХАРЧОВИХ ПРОДУКТІВ ЗА РІЗНИХ ТЕМПЕРАТУР**

*Обґрунтовано доцільність розроблення експрес-методів для дослідження термічних змін поверхні продуктів. Розроблено візуалізовані моделі сил, що виникають під час руху тіла по похилій площині. Наведено спроектовану схему установки для визначення коефіцієнта тертя при різних температурах поверхні продукту. На прикладі зразків сичужних сирів і сирного продукту проведено апробацію методу та визначено залежності коефіцієнта тертя від температури.*

*Ключові слова:* коефіцієнт тертя, універсальний вимірювальний прилад, візуалізовані моделі сил, термічна стійкість поверхні.

*Романенко Р. Экспресс-метод определения коэффициента трения твердых пищевых продуктов при разных температурах. Обоснована целесообразность разработки экспресс-методов для исследования термических изменений поверхности продуктов. Разработаны визуализированные модели сил, возникающих при движении физического тела по наклонной плоскости. Представлена схема установки для определения коэффициента трения при различных температурах поверхности*

продукта. На прикладі образців сичужних сирав та сирного продукту проведена апробація метода та определены зависимости коэффициента трения от температуры.

*Ключевые слова:* коэффициент трения, универсальный измерительный прибор, визуальные модели сил, термическая стойкость поверхности.

**Постановка проблеми.** Одним із пріоритетних напрямів дослідження матеріалів на сьогодні є вивчення фізичних властивостей їхніх поверхонь. За останнє десятиріччя на такі дослідження витрачено коштів більше, ніж на ядерні [1, с. 973]. І це не дивно, адже споживчі властивості усіх тіл, зокрема харчових продуктів, перебувають у прямій залежності від фізичного стану їхньої поверхні.

Сила тертя – один із показників, що визначає технологічні параметри виготовлення, порціонування та пакування харчових продуктів. При наявності відносного руху двох контактуючих тіл (наприклад, шматка сичужного сиру без упаковки та столу з нержавіючої сталі) виникають сили тертя – ковзання, кочення, спокою [2, с. 54–57].

На значення сили тертя впливають фізичні й хімічні процеси, які проходять при виробництві та переробці харчових продуктів: нагрівання, плавлення, охолодження; зміна об'єму й розмірів під впливом температури та тиску; деформування, що супроводжується розвитком пластичної та еластичної деформації й орієнтацією макромолекулярних ланцюгів; релаксаційні процеси [3, с. 224–241]. Теоретичними дослідженнями В. М. Юрова [4] встановлено основні залежності коефіцієнта тертя двокомпонентних сплавів від температури, проте виведені рівняння не описують властивості поверхонь харчових продуктів.



*Рис. 1.* Промисловий прилад Coesfeld Friction Tester для визначення коефіцієнта тертя полімерних матеріалів

Аналіз температурної залежності коефіцієнта тертя багатокомпонентних керамічних матеріалів проведено Ю. С. Аврамовим [5, с. 172–179], однак ці дослідження проводилися при температурах набагато нижчих за температуру плавлення.

Для визначення статичного й кінетичного коефіцієнтів тертя сировини та матеріалів використовують промислові прилади (рис. 1), що складаються з двигуна з підставкою, компенсаційних пружин, електронного динамометра та контролюючого мікропроцесорного блоку. При з'єднанні із самописним пристроєм реєструється точне значення тертя протягом експерименту. Мікропроцесорний блок автоматично обраховує значення статичного та динамічного коефіцієнтів тертя [6].

Значним недоліком промислових приладів є висока ціна та неможливість визначення температурної залежності. Реальною альтернативою такому є універсальний комп'ютерний вимірювальний прилад (УКВП) виробництва харківської фірми "ІТМ". Його укомплектовано високочутливим оптичним цифровим динамометром (ціна поділки 0.002 Н), частота вимірювань може сягати  $10\,000\text{ с}^{-1}$ , що дає змогу фіксувати найменші відхилення значень сили. Зараз прилад використовується для визначення реологічних властивостей харчових продуктів [7].

*Мета дослідження* – розробити спосіб визначення температурної залежності коефіцієнта тертя твердих харчових продуктів.

**Матеріали та методи.** Як тіло для апробації методу вибрано зразки сичужних сирів *Російський ТМ "Добряна"* і *"Клуб сиру"* та сирного продукту *Таврійський ТМ "Моліс"*.

Визначення коефіцієнтів тертя проведено за восьми значень температур (від  $-5$  до  $+45\text{ }^\circ\text{C}$ ). Значення показників електронного динамометра зафіксовано УКВП та програмним забезпеченням "Мультимедійна фізична лабораторія".

**Результати дослідження.** На *першому етапі* розробки за допомогою програмних засобів тривимірної візуалізації (зокрема, програми *AutoCAD 2007*) створено віртуальну модель установки для визначення коефіцієнта тертя (рис. 2).

*Другий етап* – визначення напрямків векторів основних сил, що діють на зразок матеріалу під час руху (рис. 3), та вивід робочої формули.

При русі по горизонтальній поверхні сила нормального тиску, як правило, дорівнює вазі тіла й може збігатися із силою тяжіння. При русі по похилій площині необхідно розкласти вагу на складові: силу, паралельну похилій площині та перпендикулярну їй. Остання забезпечує силу нормального тиску, а отже, й силу тертя ковзання. Величина сили тертя обчислюється за формулою:

$$F = F_w - P \cdot \cos \alpha, \quad (1)$$

де  $F$  – сила тертя ковзання чи кочення;

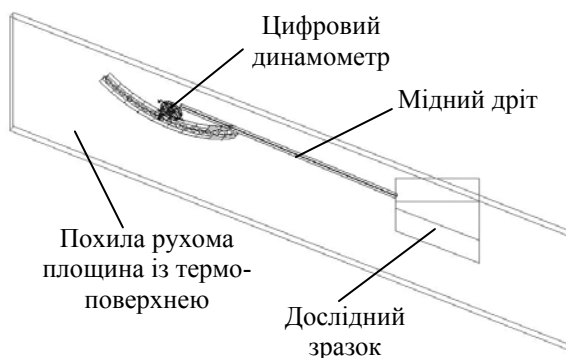


Рис. 2. Модель установки для визначення коефіцієнта тертя

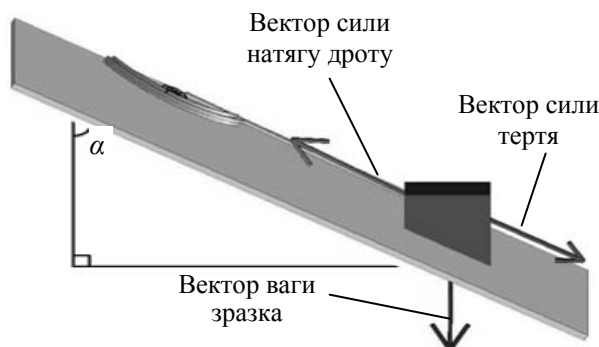


Рис. 3. Вектори сил, що діють на тіло під час руху по похилій площині

$F_w$  – сила взаємодії зразка та динамометра ( $H$ );

$P$  – вага зразка ( $H$ );

$\alpha$  – кут відхилення похилої рухомої площини від перпендикуляра.

Основною характеристикою тертя є коефіцієнт тертя  $\mu$ , що визначається природою поверхні матеріалів, з яких виготовлено взаємодіючі тіла: сила тертя ( $F$ ) та нормальне навантаження ( $N_{nor}$ ) у стані спокою зв'язані нерівністю:

$$|F| \leq \mu \cdot N_{nor} \quad (2)$$

Під час відносного руху це співвідношення перетворюється на закон Амонтона-Кулона:

$$|F| = \mu \cdot N_{nor} \quad (3)$$

Для більшості пар матеріалів значення коефіцієнта тертя  $\mu$  не перевищує 1 і перебуває в діапазоні 0.1–0.5. Якщо  $\mu > 1$ , це означає, що між контактуючими тілами є сила адгезії ( $F_{adh}$ ), і формула розрахунку коефіцієнта тертя матиме вигляд [7, с. 225–226]:

$$\mu = \frac{F}{N_{nor} + F_{adh}} \quad (4)$$

Слід зазначити, що при  $\mu \geq 2$  багатокомпонентні тіла можуть переходити в рідкий стан. Для сичужного сиру це означає утворення шару розплавленого продукту між поверхнею приладу та зразком. При виникненні такого явища сили тертя визначатимуться в'язкісними характеристиками розплавленого сиру, тому при  $\mu \geq 2$  не можна визначати лише силу тертя та адгезію, оскільки силу опору руху продукту по площині створюватиметься складний комплекс в'язкісно-реологічних характеристик аморфного (в нашому випадку) тіла.

*Третій етап* – розробка принципової схеми установки для визначення температурної залежності коефіцієнта тертя (рис. 4).

Для створення поверхні з регульованою температурою використано підставку *Usb warmer cooler* із функціями нагрівання та охолодження, яка має термоповерхню із нержавіючої харчової сталі. Площа круглої поверхні підставки – лише 17.28 см<sup>2</sup>, тому для визначення коефіцієнта тертя дослідний зразок повинен переміщатися на відстань до 5 см. Оскільки сила тертя залежить від швидкості руху, то з метою стабілізації швидкості зразка використано оптичний привід *CD-RW* компанії *Samsung* із швидкістю поступального руху лотка 3.2 м/с. Додатковою перевагою використання як двигуна комп'ютерного оптичного приводу є управління цим процесом безпосередньо з операційної системи без розробки додаткового програмного забезпечення.

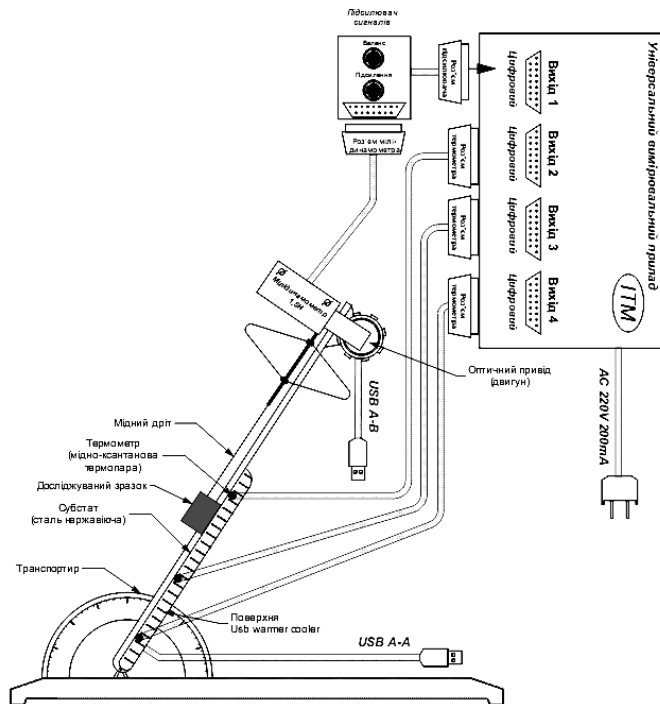


Рис. 4. Схема установки для визначення температурної залежності коефіцієнта тертя

Приклад отриманих результатів наведено на рис. 5.

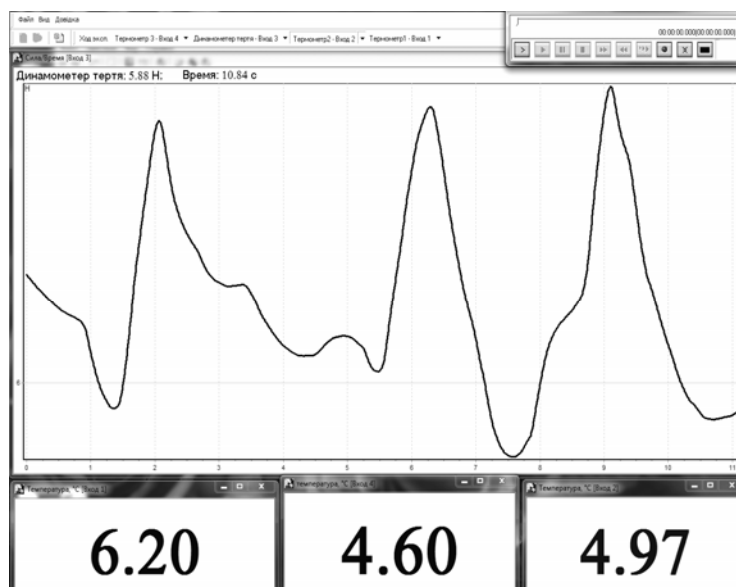


Рис. 5. Вікно програми "Навчальна лабораторія ІТМ". Показання датчиків при визначенні термічної залежності коефіцієнта тертя сиру Російський ТМ "Клуб сиру" (у нижніх вікнах значення термометрів поверхні)

Оскільки *Usb warmer cooler* не має вбудованих термометрів, то під термоповерхнею встановлено три мідно-ксантанові термометри, а

значення температури передавалися на УВКП кожні 0.5 с. Такий спосіб вимірювання температури іноді вносить суттєву похибку, тому термопари попередньо градуйовані лазерним пірметром DT-8855 і показували не температуру в місці їхнього встановлення, а температуру зовнішньої поверхні.

Проте система терморегуляції поверхні тертя потребує певного доопрацювання, адже вона не може достатньо точно встановлювати температуру поверхневого шару продукту. Подальшими кроками для удосконалення методу стане підключення *Usb warmer cooler* через програму "Управління зовнішніми пристроями ІТМ".

*Заключний етап* – збирання установки, калібрування датчиків і апробація методу. Оскільки поверхня ковзання в розробленій установці виготовлена з нержавіючої сталі, то всі коефіцієнти тертя на цьому етапі роботи визначаються відповідно до пари тіл "дослідний зразок – сталь".

Для подальшої обробки масив даних із чотирьох датчиків УВКП експортовано до табличного редактора *MS Excel*. Після математико-статистичної обробки даних і обрахунку результатів побудовано графік залежності коефіцієнта тертя дослідних зразків від температури (рис. 6).

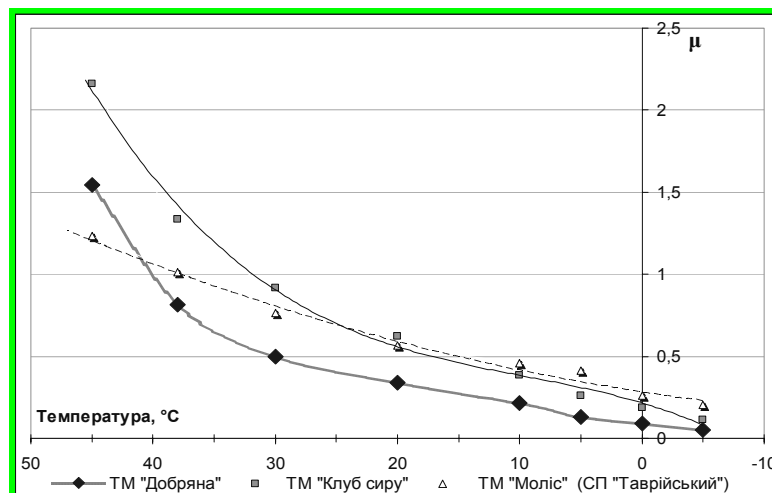


Рис. 6. Залежність коефіцієнта тертя сиру *Російський* та сирного продукту *Таврійський* від температури

Залежність коефіцієнта тертя зразка ТМ "Клуб сиру" від температури описується кубічним рівнянням, ТМ "Добряна" – експоненціальним рівнянням, що свідчить про більшу чутливість фізичних властивостей поверхні останнього до температури.

Виникнення суттєвої адгезії ( $\mu > 1$ ) між зразком і поверхнею в сирі ТМ "Клуб сиру" відбулося при температурі 31.8 °C, а ТМ "Добряна" – при 40.4 °C. Різні значення температур виникнення адгезії вказують на різну швидкість змін поверхні під час нагрівання.

Залежність коефіцієнта тертя від температури в сирного продукту *Таврійський* суттєво відрізняється від аналогічної залежності

зразків сиру, що вказує на різні теплофізичні та реологічні властивості цих продуктів при нагріванні.

**Висновки.** Розроблений метод дає змогу швидко визначати коефіцієнти тертя сировини та матеріалів за різних температур. Установлено, що тверді продукти, які при заданих умовах зберігання мають схожу консистенцію, суттєво відрізняються динамікою змін коефіцієнтів тертя при підвищенні температури, тому перспективою подальших теоретичних досліджень є вивчення залежностей теплофізичних властивостей твердих продуктів від їхнього хімічного складу та часу зберігання.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Assender H. How Surface Topography Relates to Materials' Properties / Hazel Assender, Valery Bliznyuk, Kyriakos Porfyrakis // Science. — 2002. — Vol. 297. — P. 973—976.
2. Найденко В. І. Фізика та методи дослідження сировини і матеріалів : навч. посіб. / В. І. Найденко. — К. : Київ. нац. торг.-екон. ун-т, 2004. — 509 с.
3. Гинсбург А. С. Теплофизические характеристики пищевых продуктов : справочник / А. С. Гинсбург, М. А. Громов, Г. И. Красовская. — М. : Агропромиздат, 1990. — 287 с.
4. Юров В. М. Температурная зависимость коэффициента трения / В. М. Юров // Междунар. журн. прикладных и фундаментальных исследований. — 2010. — № 8. — С. 149—151.
5. Авраамов Ю. С. Новые композиционные материалы на основе несмешивающихся компонентов: получение, структура, свойства / Ю. С. Авраамов, А. Д. Шляпи. — М. : МГИУ, 1999. — 206 с.
6. Lab Master Slip and Friction PDF Product Sheet. — Way of access : <http://www.testingmachines.com/32-91-lab-master-slip-friction.html>.
7. Методичні рекомендації до виконання науково-дослідних робіт на УВКП / [С. Л. Шаповал, Н. П. Форостяна, Ю. В. Литвинов, Р. П. Романенко]. — К. : Київ. нац. торг.-екон. ун-т, 2013. — 92 с.

Стаття надійшла до редакції 08.10.2013.

**Romanenko R. Express-method of determination of the friction coefficient at different temperatures.**

**Background.** One of the measures that determines the technological parameters of production, portioning and packaging of food products is friction. Significant disadvantages of industrial equipment that is used for friction coefficient determination is specialization and the inability to determine its temperature dependence.

**Material and methods.** As approval objects of developed methods rennet cheese samples of trademarks "Dobryana" and "Cheese Club" and cheese product "Taurian" by TM "Molis" have been selected. Determination of friction coefficients was carried out by the eight values of temperature (–5 to +45 °C).

**Results.** Using software visualization tools virtual model there have been created and defined the main directions of the vectors of forces acting on the sample during

movement. Schematic diagram of the installation to determine the temperature dependence of the coefficient of friction was developed.

The dependence of the friction coefficient in cheese samples TM "Cheese Club" and "Dobryana" on temperature, means lower thermal stability of the physical properties of the last sample surface. The emergence of significant adhesion ( $\mu > 1$ ) between the sample and the surface of cheese TM "Cheese Club" was held at a temperature of 31.8 °C, of cheese TM "Dobryana" at a temperature of 40.4 °C. Dependence of friction coefficient on temperature in the cheese product "Taurian" was different from a similar dependence of other cheese samples that indicates different thermal and rheological properties of these products during the heating.

**Conclusion.** Developed method allows to determine friction coefficients of solid foods at temperatures from -5 to 45 °C. Perspective area of theoretical research is to determine the dependence of thermophysical properties of solid foods on their chemical composition and storage time.

*Key words:* friction coefficients, universal measuring equipment, visualised power models, friction resistance of a surface

#### REFERENCES

1. Assender H. How Surface Topography Relates to Materials' Properties / Hazel Assender, Valery Bliznyuk, Kyriakos Porfyraakis // Science. — 2002. — Vol. 297. — P. 973—976.
2. Naydenko V. I. Fizika ta metodi doslidzhennya sirovini i materlaliv : navch. poslb. / V. I. Naydenko. — K. : Kiyiv. nats. torg.-ekon. un-t, 2004. — 509 s.
3. Ginsburg A. S. Teplofizicheskie harakteristiki pischevyih produktov : spravochnik / A. S. Ginsburg, M. A. Gromov, G. I. Krasovskaya. — M. : Agropromizdat, 1990. — 287 s.
4. Yurov V. M. Temperaturnaya zavisimost koeffitsienta treniya / V. M. Yurov // Mezhdunar. zhurn. prikladnyih i fundamentalnih issledovaniy. — 2010. — № 8. — S. 149—151.
5. Avraamov Yu. S. Novyie kompozitsionnyie materialyi na osnove neshivayushchihskomponentov: poluchenie, struktura, svoystva / Yu. S. Avraamov, A. D. Shlyapi. — M. : MGIU, 1999. — 206 s.
6. Lab Master Slip and Friction PDF Product Sheet. — Access mode : <http://www.testingmachines.com/32-91-lab-master-slip-friction.html>.
7. Metodichni rekomendatsiyi do vikonannya naukovo-doslidnih robit na UVKP / [S. L. Shapoval, N. P. Forostyana, Yu. V. Litvinov, R. P. Romanenko]. — K. : Kiyiv. nats. torg.-ekon. un-t, 2013. — 92 s.