

УДК 539.621

О.М. БРАУН

Інститут фізики Національної академії наук України  
просп. Науки, 46, Київ, 03028, Україна

## СУЧАСНІ УЯВЛЕННЯ ПРО МЕХАНІЗМИ ТЕРТЯ

Наукове повідомлення на засіданні Президії НАН України  
24 жовтня 2012 року

*Тертя є однією з найстаріших фізичних проблем. Воно має велике практичне значення, однак, незважаючи на це, повного розуміння проблеми поки що немає. Доповідь присвячено останнім теоретичним дослідженням з фізики тертя. Викладено результати молекулярно-динамічного моделювання тертя, які з'ясовують мікроскопічні механізми руху тонкої плівки мастила. Обговорено підхід до тертя на мезоскопічному рівні, узагальнення якого дозволяють урахувати взаємодію між контактами (нерівностями), описати поширення самовідновних тріщин у фрикційному інтерфейсі та роль деформацій підкладки на початку ковзання, а також передбачити появу провісників землетрусів.*

**Ключові слова:** механізми тертя, молекулярно-динамічне моделювання, самовідновні тріщини, фрикційний інтерфейс.

Доповідь присвячено розгляду тертя з погляду фізики. Передусім нагадаємо основні визначення. Слід розрізняти тертя ковзання, тертя кочення і тертя зносу. Ми розглядатимемо лише тертя ковзання. Більш того, ми розглянемо випадок примежового тертя, коли між поверхнями, що труться, знаходиться дуже тонка – всього кілька молекулярних шарів – плівка мастила. Такий режим майже завжди відбувається на початку ковзання після зупинки, коли мастило видавлюється із зони контакту.

З другого боку, слід розрізняти статичне і кінетичне тертя. Сила кінетичного тертя – це сила, яку потрібно прикласти, щоб підтримувати гладке ковзання. При цьому в систему накачується енергія, яка в кінцевому підсумку йде на нагрівання атмосфери.

Дані оцінювання свідчать, що в економічно розвинених країнах втрати на тертя становлять приблизно 6% валового національного доходу, тому зниження тертя навіть на 1% забезпечить величезний економічний ефект.

Сила статичного тертя – це сила, яку потрібно прикласти для початку руху. Статичне тертя також дуже важливе. Саме воно дає нам можливість ходити, а автомобілям – їздити. Завдяки статичному тертю утримуються разом нитки в одязі, конструкції на болтах тощо.

Тертя всюдиусе, тому проблема тертя актуальна для численних галузей науки і техніки, таких як матеріалознавство, машинобуду-

вання (особливо розроблення наномашин), космічна галузь, де традиційні мастила не працюють, біологія, медицина (наприклад, тертя у суглобах), геофізика (зокрема, проблема передбачення землетрусів), енергозаощадження, екологія та ін..

Проблема тертя стара, як світ. Тому не дивно, що вивченням тертя зацікавилися ще в середні віки, коли почала формуватися сучасна наука. Дослідженням тертя займалися такі видатні вчені, як Леонардо да Вінчі, Амонтонс, Ейлер, Кулон. У результаті було сформульовано два основних закони, відомих як закони Амонтона. Перший з них стверджує, що коефіцієнт тертя, який визначається як відношення сили тертя до сили навантаження,  $\mu = F_{\text{friction}}/F_{\text{load}}$ , є сталою величиною для певної пари матеріалів. Згідно з другим законом, кінетичне тертя менше за статичне і не залежить від швидкості ковзання. У такому вигляді ці закони увійшли до сучасних підручників, у тому числі для вищої школи. Однак обидва закони емпіричні і не мали теоретичного пояснення аж до середини минулого століття.

Трактування першого закону Амонтона з'явилося лише в 1950 р. (коли будову ядра було вже вивчено, а атомну бомбу випробувано) завдяки роботі Ф. Боудена і Д. Тabora (F. Bowden, D. Tabor). Вони звернули увагу на те, що справжні поверхні контакту майже завжди є грубими, тому загальна площа контакту має зростати з навантаженням. За низького тиску

(пружний режим) число контактів збільшується з навантаженням, а за високого тиску (пластичний режим) з навантаженням зростає площа окремих контактів. Оскільки сила тертя пропорційна реальній площі контакту, відношення сили тертя до сили навантаження залишатиметься сталим.

Варто також відзначити й інші моделі, що пояснювали певні аспекти проблеми тертя, зокрема моделі Томлінсона і Френкеля – Конторової. Однак загалом ситуація на початку 90-х років XX ст. була такою: всі закони наближені, всі теорії феноменологічні.

Новий етап розвитку трибології розпочався в середині 1990-х років завдяки двом чинникам: по-перше, бурхливому розвитку комп'ютерного моделювання, а по-друге – значному прогресу в галузі фізики та хімії поверхні. Другий фактор виявився визначальним для розвитку трибології в Інституті фізики НАН України, де сформувалася відома школа фізичної електроніки, заснована Наумом Давидовичем Моргулісом, тривалий час керована Петром Григоровичем Борзяком, а по ім Антоном Григоровичем Наумовцем – всесвітньо відомим ученим у галузі фізики поверхні. Отже, постала проблема побудови фізичної теорії тертя. Однак перш ніж перейти до теоретичних результатів, отриманих в Інституті фізики НАН України, варто коротко описати основні експериментальні методики, які застосовують у трибології.

У традиційному трибологічному експерименті вимірюють силу тертя, а контролюють швидкість ковзання, жорсткість повзунка, силу навантаження і температуру. Основна проблема таких досліджень криється в тому, що практично невідомо, що відбувається в інтерфейсі тертя, затиснутому з обох боків непрозорими твердими тілами.

У методі вимірювання поверхневих сил (Surface Force Apparatus, SFA), запропонованому Д. Табором і Р. Вінтертоном (D. Tabor, R. Winterton, 1969) і згодом розвиненому Дж. Ізраїлешвілі (J. Israelaschvili), використовують атомно-плоскі слюдяні пластинки, наклеєні на два циліндрики діаметром близько 1 см, які стикаються навхрест. До зони контакту вносять крапельку мастила. Цей прилад дозволяє оцінити площу контакту, а товщину шару мастила можна контролювати за допомогою оптичної інтерференції з точністю  $\sim 1 \text{ \AA}$ .

Значного прогресу в трибології було досягнуто завдяки вістряним методикам – скануючій тунельній (СТМ), атомно-силовій (АСМ) і фрикційній мікроскопії, що дають змогу на атомному рівні досліджувати поверхні та сили в контакті. Проте такі методики дозволяють вивчати лише окремих контакт.

Співробітники Інституту фізики НАН України О.А. Марченко, В.С. Кулик і Д.В. Стрижеус розробили левітуючий трибометр. Основна його ідея полягає у використанні циліндрика і підставки з магнітиками, розміщеними так, що циліндрик левітує над підставкою в магнітному полі. На кінчику циліндрика розташована золота кулька, яка впирається у певну поверхню. Якщо циліндрик хитнути, за загасанням коливань можна знайти коефіцієнт тертя. Головна перевага цієї методики в тому, що прилад можна легко «розібрати» і досліджувати поверхні тертя за допомогою СТМ або АСМ як до, так і після вимірювання тертя.



Левітуючий трибометр, розроблений в Інституті фізики НАН України

Нарешті, слід згадати експерименти Дж. Файнберга та ін. з Єрусалимського університету, у яких вони брали два прозорих плексигласових блоки і вимірювали в реальному часі реальну площу контакту, використовуючи ефект повного внутрішнього відбиття лазерного променя – світло проходить лише крізь контакти. При цьому вимірюють зміну площі реальних контактів безпосередньо в процесі ковзання [1].

В експериментах було отримано важливі результати:

- зона справжнього атомного контакту є малою; типовий розмір контакту  $\sim 1\text{--}10 \text{ мкм}$ ;

- значення сил, характерні для сил атомного масштабу – близькі до порогу пластичності,  $f \sim 10^9$  N, і тому відбувається пружна та/або пластична деформація контактів;
- тонка плівка ( $< 10$  молекулярних діаметрів) майже завжди організована у шари;
- якщо товщина менша, ніж  $\sim 3$  шари, більшість плівок поводить себе як тверде тіло.

Звернімося тепер до теоретичних результатів, отриманих в Інституті фізики НАН України. У процесі моделювання тертя методом молекулярної динаміки (МД) виникає серйозна проблема. Тертя – процес нерівноважний. Оскільки до блока, що ковзає по поверхні, прикладають зовнішню силу, в систему закачується енергія, і якщо її не видаляти, температура системи постійно зростатиме. Значить, потрібно вводити загасання. Однак воно, в свою чергу, визначатиме й силу кінетичного тертя, тому коефіцієнт загасання не можна обирати довільно. На щастя, коефіцієнт загасання для атомів, що рухаються поблизу поверхні твердого тіла, відомий із наших попередніх досліджень коливань і дифузії адсорбованих атомів [2]. Це дозволило розробити МД-алгоритм для розрахунку коефіцієнта тертя, в якому коефіцієнт загасання залежить від координат і швидкостей атомів мастила.

Результати моделювання свідчать, що основний фактор, який визначає поведінку трибологічної системи, – це співвідношення між амплітудою взаємодії атомів (молекул) мастила між собою і амплітудою взаємодії атомів мастила з поверхнями [3]. Якщо взаємодія атомів мастила між собою сильніша, ніж з поверхнею, то мастило твердне, а ковзання відбувається на межі мастило – поверхня. Це випадок жорсткого мастила, і саме він може забезпечити найнижче тертя. Пов'язано це з так званим ефектом несумірності, відкритим і активно дослідженим у 70-х роках ХХ ст., відомим як перехід Обрі (Aubry). Строга теорія цього ефекту досить складна [4], але на якісному рівні сутність полягає в тому, що у разі руху несумірного ланцюжка атомів у періодичному потенціалі поверхні, коли одні атоми підіймаються на максимуми потенціалу, а інші спускаються в мінімуми, ці два процеси точно компенсують один одного, так що сумарні втрати енергії дорівнюють нулю. Більш строго, якщо дві періодичні структури несумірні і достатньо жорсткі, то статичне тертя дорівнює

нулю, а кінетичне – надзвичайно мале. Отже, за допомогою жорсткого мастила можна досягти досконалого ковзання, або «надзмащування» (superlubricity).

Проте така ситуація можлива лише у разі ідеальної кристалічної структури поверхні та плівки мастила. У реальності структури завжди неідеальні, а плівка мастила має дефекти. Однак це можна виправити, якщо спеціально добирати параметри мастила. Саме коли плівка ковзає, її температура зростає. Якщо вона наблизиться до температури плавлення плівки (але нижче її), то дефекти відпалляться, плівка самовпорядкується («самовідшліфується»), і система перейде до режиму суперзмащення [5].

Протилежний випадок – це коли взаємодія атомів мастила з поверхнею сильніша, ніж їх взаємодія між собою. У такому разі один (або кілька) шарів мастила прикріплюються до поверхонь, захищаючи їх від руйнування, а ковзання відбувається в об'ємі мастила. При цьому плівка мастила плавиться під час ковзання і стає рідкою (МД-моделювання передбачає, що часто плівка залишається шаруватою, так що ковзання відбувається за механізмом «шар-по-шару»). Це випадок м'якого (традиційного) мастила. У разі м'якого мастила кінетичне тертя визначається в'язкістю плівки мастила – чим менша в'язкість, тим менше тертя. Отже, найкраще змащення забезпечує вакуумний зазор – при цьому кінетичне тертя є надзвичайно малим, хоча і ненульовим. Чудовими мастилами можуть бути повітря і водяна плівка [6, 7] (останній факт відомий кожному, хто виходив на вулицю в ожеледь). До речі, природа обрала саме водні розчини як мастила в суглобах.

Втім проблема рідкого мастила полягає в тому, що воно може видавлюватися із зони контакту. А якщо мастило буде видавлене, то прямий контакт рухомих поверхонь спричинить їх руйнування (що відповідає тертю зносу). Щоб уникнути видавлювання мастила або принаймні уповільнити цей процес, слід підвищувати в'язкість мастила, проте водночас збільшиться й тертя. Тому добір оптимального мастила – це пошук компромісу: в'язкість має бути достатньо великою, щоб уникнути видавлювання, але не занадто, щоб зменшити тертя. Оскільки в'язкість залежить від температури, для різних температур потрібно використовувати різні мастила.

У разі рідкого мастила постає питання про форму його молекули. Як правило, традиційні

мастила складаються з ланцюгових молекул, які міцно зв'язуються з поверхнями. Яке ж мастило буде ефективнішим: те, в якому всі атоми молекули мастила прикріплюються до поверхні, чи те, в якому вони прикріплюються лише одним (кінцевим) атомом, утворюючи щіткоподібну структуру? МД-моделювання показало, що другий випадок ефективніший; хоча він спричинює більше тертя, проте щіткоподібне мастило продовжує працювати, навіть якщо між поверхнями залишається значно менше ніж два його моношари [8].

Останній результат було підтверджено експериментально в Інституті фізики НАН України за допомогою левітуючого трибометра. Досліджували дві речовини – *n*-октантіол ( $C_8H_{16}SH$ ) і *n*-октанову кислоту ( $C_8H_{16}O_2$ ). Їхні молекули мають однакову довжину і відрізняються лише головкою:  $-SH$  і  $-OC-OH$  відповідно. На поверхні золота вони утворюють абсолютно однакові щіткоподібні структури. Однак, незважаючи на збіг структур, коефіцієнти тертя для моношарів *n*-октантіолу і *n*-октанової кислоти на реконструйованій поверхні Au(111) відрізняються приблизно в 3 рази. Пояснити це можна сильнішим зв'язком *n*-октантіолу з поверхнею золота.

З відкриттям фулеренів – кулеподібних молекул  $C_{60}$  – виникла ідея використати їх як мастило. Відомо, що тертя кочення в 100–1000 разів менше, ніж тертя ковзання. Постало питання, чи може тертя кочення працювати на мікроскопічному рівні, тобто чи можуть фулерени слугувати «молекулярними підшипниками»? Однак експерименти дали негативний результат – моношар фулеренів спричинив значно більше тертя, ніж традиційні мастила.

МД-моделювання допомогло з'ясувати причину невдачі [9]. Коли молекули котяться по поверхні, сторони сусідніх молекул рухаються в протилежних напрямках. Тому під час зіткнення молекули повністю блокують обертання одна одної. Цей ефект аналогічний виникненню автомобільних заторів. Щоб уникнути заторів, концентрація фулеренів має бути значно меншою від моношару, тобто фулерени можуть бути ефективні як домішки до традиційного рідкого мастила. Крім того, кочення фулерену по періодичному потенціалу поверхні подібно до роботи зубчастого колеса, тому для ефективного обертання фулерену стали підкладки треба узгоджувати з відстанню між атомами фулерену [10]. У разі дотримання цих

двох умов фулерени справді можуть забезпечити надзвичайно низьке тертя.

Нарешті, МД-моделювання показало, що коефіцієнт статичного тертя не є однозначно визначеною величиною. Наприклад, якщо одну з поверхонь ковзання повернути на невеликий кут, статичне тертя може змінитися більш ніж на порядок величини [11]. Отже, під час контакту двох атомно-гладких полікристалічних поверхонь різні ділянки матимуть різні пороги для початку ковзання. Очевидно, що те саме відбувається під час контакту шорстких поверхонь. Однак навіть під час контакту монокристалічних атомно-гладких поверхонь, розділених плівкою мастила, у разі припинення ковзання мастило замерзає за механізмом Ліфшиця – Сльозова через виникнення зародків різних розмірів, які утворюють контакти між поверхнями [12].

Таким чином, в усіх випадках поверхні зв'язані контактами, що характеризуються неперервним розподілом порогів для початку руху.

Для опису тертя на мезоскопічному рівні вдалим виявилось використання так званої землетрусної моделі (Earthquake-like Model, EQ model), запропонованої спочатку для опису землетрусів. У цій моделі дві поверхні зв'язані системою контактів. Коли тіло рухається, напруження в контактах зростає,  $f_i(t) = k_i x_i(t)$ . Окремий контакт є закріпленим, доки  $f_i(t) < f_{si}$ . Якщо сила перевищує поріг  $f_{si}$ , відбувається швидке ковзання цього контакту і напруження спадає. Потім контакт відновлюється, і процес повторюється. Така модель належить до класу клітинних автоматів (cellular automaton) і, як правило, піддається лише чисельному моделюванню. Нам вдалося вивести кінетичне рівняння (master equation) для цієї моделі, що дає змогу отримати чисельний розв'язок з будь-якою наперед заданою точністю, а в деяких випадках – і аналітичні розв'язки [12, 13]. Крім того, оскільки в інтерфейсі тертя різні контакти характеризуються різними порогоми, нами було введено неперервний розподіл порогів  $P_c(x_s)$ .

Із практики відомо, що є два типи ковзання – гладке ковзання, яке відбувається під час руху жорсткої системи та/або за високої швидкості, і стрибкоподібний рух на зразок злипання-проковзування (stick-slip), добре всім знайомий за скрипом дверей чи звучанням

скрипки і спостережуваний за малих швидкостей та/або у м'якій системі.

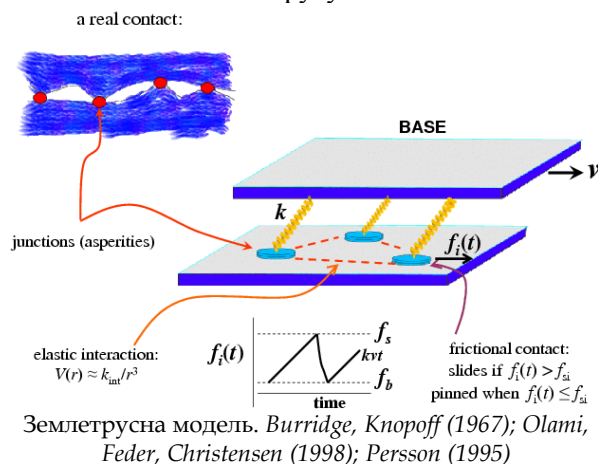
За допомогою кінетичного рівняння було показано, що режим злипання-проковзування виникає через пружну нестабільність, і знайдено відповідну величину жорсткості системи  $K^*$ , так що при  $K < K^*$  реалізується режим злипання-проковзування, а при  $K > K^*$  – режим гладкого ковзання [12]. Більш того, для режиму гладкого ковзання було знайдено аналітичну залежність сили кінетичного тертя  $f_k$  від швидкості ковзання  $v$ : у загальному випадку  $f_k(v)$  лінійно зростає за малих  $v$  завдяки температурі, але  $f_k(v)$  спадає за великих  $v$  внаслідок старіння контактів [14]. Отже, другий закон Амонтонса (відомий також як закон Кулона) у загальному випадку є невірним; на практиці зазвичай спостерігається режим поблизу максимуму залежності  $f_k(v)$ , де тертя залежить від швидкості логарифмічно.

Однак в описаному вище підході ігнорувалися пружні деформації у твердому тілі. Якщо один із контактів руйнується, то напруження, яке він підтримував, має бути розподілене між сусідніми контактами. Для знаходження закону, за яким відбувається цей розподіл, на кластері Інституту фізики НАН України обчислено розподіл сил у ґратці контактів, коли один або кілька контактів руйнуються [15]. Виявилося, що існує пружна кореляційна довжина, яка визначається формулою  $\lambda_c = a(Ea/k)$ , де  $a$  – середня відстань між контактами,  $E$  – модуль Юнга,  $k$  – пружність контактів. У ближній зоні на відстанях  $r < \lambda_c$  напруження спадає з відстанню як  $\delta f(r) \sim r^{-1}$  і систему можна вважати жорсткою. На значних відстанях  $r > \lambda_c$ , де напруження спадає за законом  $\delta f(r) \sim r^{-3}$ , необхідно враховувати пружні деформації під час ковзання твердого тіла, а різні ділянки інтерфейсу тертя можуть зазнавати різних зміщень.

Отже, на макрорівні процес ковзання можна розглядати як переміщення самовідновної тріщини (self-healing crack). У разі моделювання тертя за допомогою землетрусної моделі цей процес можна звести до такого сценарію: розрив одного контакту призводить до збільшення напруження на сусідніх контактах, через що вони також розриваються, і т.д. Відбувається ланцюгова реакція розривів, аналогічна ефекту доміно. Використовуючи кінетичне рівняння, цей процес можна описати за допомогою моделі, подібної до моделі Френкеля – Конторової, і отримати аналітичний розв'язок для перемі-

щення самовідновної тріщини як солітонної хвилі [16].

Описані результати дали змогу пояснити експерименти Дж. Файнберга та ін., у яких досліджували початок руху ковзання. Виявилося, що до початку ковзання всього блока по інтерфейсу пробігає кілька хвиль, що призводять до стрибкоподібного зниження напруження в блоці та зменшення реальної площі контактів [1, 17]. Було запропоновано модель, що складається з ланцюжка землетрусних моделей, зв'язаних пружинками [18], результати якої добре узгоджуються з експериментом. Одержані дані дозволяють сподіватися на можливість передбачення реальних землетрусів: якщо ковзання всього блока інтерпретувати як землетрус, то описані вище хвилі є провісниками великого землетрусу.



Висновки [19, 20]:

- розроблено МД-алгоритм моделювання тертя, заснований на рівняннях Ланжевена із коефіцієнтом загасання, який залежить від координат і швидкостей атомів мастила;
- результати моделювання показали, що залежно від співвідношення між амплітудами взаємодії атомів мастила між собою та з поверхнями, мастило може бути м'яким чи жорстким;
- у разі м'якого (традиційного) мастила воно плавиться під час ковзання, а коефіцієнт тертя визначається в'язкістю мастила;
- жорстке мастило залишається твердим під час ковзання, а за оптимальних параметрів воно може самовпорядковуватися, забезпечуючи досконале ковзання;
- досліджено роль форми молекул мастила і показано, що щіткоподібні або сферичні

молекули можна використовувати як ефективні домішки до традиційних мастил;

- побудовано теорію тертя на мезоскопічному рівні за допомогою кінетичного рівняння, що дає змогу розділити складну проблему поведінки трибологічної системи на два окремих підзавдання: (1) дослідження динаміки фрикційного інтерфейсу, якщо відомий розподіл статичних порогів, та (2) визначення цього розподілу для певної системи, що є окремою проблемою для МД-моделювання;
- показано, що взаємодія контактів спричинює появу пружної кореляційної довжини;
- урахування деформації повзунка призводить до появи колективних мод (солітонних хвиль) в інтерфейсі тертя.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Rubinstein S.M., Cohen G., Fineberg J. Detachment fronts and the onset of dynamic friction // *Nature*. – 2004. – V. 430. – P. 1005–1009.
2. Браун О.М., Волокитин А.И., Жданов В.П. Колесательная спектроскопия адсорбатов // *Усп. физ. наук*. – 1989. – Т. 158. – С. 421–450.
3. Braun O.M., Peyrard M. Friction in a solid lubricant film // *Phys. Rev. E*. – 2001. – V. 63. – 046110.
4. Braun O.M., Kivshar Yu.S. The Frenkel-Kontorova Model: Concepts, Methods, and Applications. – Berlin: Springer-Verlag, 2004.
5. Braun O.M., Paliy M., Consta S. Ordering of a thin lubricant film due to sliding. – *Phys. Rev. Lett.* – 2004. – V. 92. – 256103.
6. Paliy M., Braun O.M., Consta S. The friction properties of an ultrathin confined water film // *Tribol. Lett.* – 2006. – V. 23. – P. 7–14.
7. Paliy M., Braun O.M., Consta S. Friction in a thin water layer: Dissociative versus non-dissociative friction // *J. Phys. Chem. C*. – 2012. – V. 116. – P. 8932–8942.
8. Braun O.M., Manini N., Tosatti E. Role of lubricant molecular shape in microscopic friction // *Phys. Rev. B*. – 2008. – V. 78. – 195402.
9. Braun O.M. Simple model of microscopic rolling friction // *Phys. Rev. Lett.* – 2005. – V. 95. – 126104.
10. Braun O.M., Tosatti E. Molecular rolling friction: the cogwheel model // *J. Phys. Condens. Matter*. – 2008. – V. 20. – 354007.
11. Braun O.M., Manini N. Dependence of boundary lubrication on the misfit angle between the sliding surfaces // *Phys. Rev. E*. – 2011. – V. 83. – 021601.
12. Braun O.M., Peyrard M. Master equation approach to friction at the mesoscale // *Phys. Rev. E*. – 2010. – V. 82. – 036117.
13. Braun O.M., Peyrard M. Modeling friction on a mesoscale: Master equation for the earthquakelike model // *Phys. Rev. Lett.* – 2008. – V. 100. – 125501.
14. Braun O.M., Peyrard M. Dependence of kinetic friction on velocity: Master equation approach // *Phys. Rev. E*. – 2011. – V. 83. – 046129.
15. Braun O.M., Peyrard M., Stryzheus D.V., Tosatti E. Collective effects at frictional interfaces // *Tribol. Lett.* – 2012. – V. 48. – doi: 10.1007/s11249-012-9913-z.
16. Braun O.M., Peyrard M. Crack in the frictional interface as a solitary wave // *Phys. Rev. E*. – 2012. – V. 85. – 026111.
17. Rubinstein S.M., Barel I., Reches Z. et al. Slip sequences in laboratory experiments resulting from inhomogeneous shear as analogs of earthquakes associated with a fault edge // *Pure Appl. Geophys.* – 2011. – V. 168. – 2151.
18. Braun O.M., Barel I., Urbakh M. Dynamics of transition from static to kinetic friction // *Phys. Rev. Lett.* – 2009. – V. 103. – 194301.
19. Braun O.M. Bridging the gap between the atomic-scale and macroscopic modeling of friction // *Tribol. Lett.* – 2010. – V. 39. – P. 283–293.
20. Braun O.M., Naumovets A.G. Nanotribology: Microscopic mechanisms of friction // *Surf. Sci. Rep.* – 2006. – V. 60. – 79–158.

О.М. Браун

Институт физики Национальной академии наук Украины  
просп. Науки, 46, Киев, 03028, Украина

#### СОВРЕМЕННЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О МЕХАНИЗМЕ ТРЕНИЯ

Трение является одной из старейших физических проблем. Оно имеет большое практическое значение; несмотря на это, полное понимание проблемы пока отсутствует. Доклад посвящен последним теоретическим исследованиям физики трения. Во-первых, изложены результаты молекулярно-динамического моделирования трения, которые проясняют микроскопические механизмы движение тонкой пленки смазки. Во-вторых, обсуждается подход к трению на мезоскопическом уровне. Обобщения этого подхода позволяют учесть взаимодействие между контактами (неровностями), описать распространение самовосстанавливающейся трещины во фрикционном интерфейсе и роль деформаций подложки при начале скольжения, а также предсказать появление предвестников землетрясений.

**Ключевые слова:** механизм трения, молекулярно-динамическое моделирование, самовосстанавливающиеся трещины, фрикционный интерфейс.

O.M. Braun

*Institute of Physics of National Academy of Sciences of Ukraine  
46 Nauky av., Kyiv 03028, Ukraine*

#### MODERN UNDERSTANDING OF THE FRICTIONAL MECHANISMS

*Friction is one of the oldest physical problems of great practical importance; despite of this, a full understanding of the problem is still lacking. The talk is devoted to recent theoretical studies of the physics of friction. First, the results of molecular dynamics simulations are considered, which clarify microscopic mechanisms of motion of a thin lubricant film. Then, the master equation approach to friction on the mesoscopic scale is discussed. Generalizations of this approach in order to incorporate the interaction between the contacts (asperities), the soliton-like propagation of self-healing cracks in the frictional interface, and the role of substrate deformations at the onset of sliding which leads to appearance of precursors, are considered*

**Keywords:** friction mechanism, molecular dynamics simulation, self-healing cracks, frictional interface.