



§ 13. СИЛА ТЕРТЯ



Чому профілі сучасних літаків та підводних човнів нагадують контури тіла дельфіна? Чому взимку автомобілі «перевзувають» у шиповану гуму? Чому так важко рухатися в ожеледицю? Як «падає» парашутист? Як зменшити силу тертя? А може, її зовсім не варто зменшувати, а навпаки, слід збільшувати? Що буде, якщо тертя зникне зовсім? Поміркуємо.

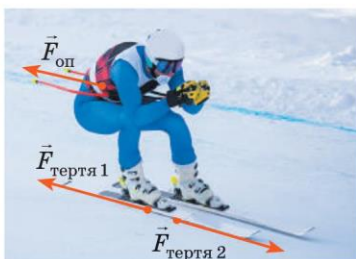


Рис. 13.1. Відносно поверхні снігу та відносно повітря лижник рухається вправо, тому сила тертя $\vec{F}_{\text{тертя}1}$ і сила опору $\vec{F}_{\text{оп}}$, які діють на лижника, напрямлені вліво. Сніг відносно лижника рухається вліво, з боку лижника на сніг діє сила тертя $\vec{F}_{\text{тертя}2}$, напрямлена вправо

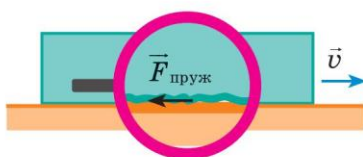


Рис. 13.2. Один із механізмів виникнення сухого тертя пов'язаний із наявністю нерівностей на поверхнях дотичних тіл

1 Згадуємо силу тертя

У ході будь-якого руху тіло обов'язково контактує з мікро- або макротілами навколо (поверхнею іншого тіла, частинками рідини або газу, всередині яких тіло рухається, тощо). Під час такого контакту виникають сили, що сповільнюють рух тіла, — *сили тертя*.

Сила тертя $\vec{F}_{\text{тертя}}$ — це сила, яка виникає під час руху чи спроби руху одного тіла по поверхні іншого або під час руху тіла всередині рідкого чи газоподібного середовища.

Сила тертя завжди напрямлена вздовж поверхні дотичних тіл і протилежно напрямку швидкості їх відносного руху (рис. 13.1).

Тертя між поверхнею твердого тіла і навколишнім рідким або газоподібним середовищем називають *опором середовища* або *рідким (в'язким) тертям*. Тертя між поверхнями двох дотичних твердих тіл називають *сухим тертям*.

2 Чому виникає сила сухого тертя

Якщо взяти лупу та розглянути поверхню будь-якого тіла, побачимо величезну кількість дрібних нерівностей. Коли одне тіло ковзає або намагається ковзати по поверхні іншого, нерівності чіпляються одна за одну й *деформуються*. Виникають *сили пружності*, напрямлені в бік, протилежний деформації (рис. 13.2). Це одна з причин виникнення сили сухого тертя.

Є й інші причини. Так, у деяких місцях виступи тіл щільно притиснуті один

до одного — відстань між ними настільки мала, що діють сили міжмолекулярного притягання, в результаті чого виступи виявляються ніби «склеєними». Зрозуміло, що таке «склеювання» відбувається в ході всього руху й перешкоджає йому.

І сила пружності, і сила міжмолекулярного притягання мають електромагнітне походження, тож *природа сили сухого тертя — електромагнітна.*

? На рис. 13.3 знайдіть щонайменше два приклади, коли змінюють силу сухого тертя, збільшуючи чи зменшуючи нерівності поверхонь.

3 Які існують види сухого тертя

Розрізняють три види сухого тертя: *тертя спокою, тертя ковзання, тертя кочення.*

Спробуйте, прикладаючи невелику силу, зрушити з місця важкі санки, — санки не зрушаться, бо виникне *сила тертя спокою*, яка зрівноважить прикладену зовнішню силу.

Сила тертя спокою $\vec{F}_{\text{тертя сп}}$ — це сила тертя, яка виникає між дотичними поверхнями двох тіл і перешкоджає виникненню їх відносного руху.

Сила тертя спокою завжди дорівнює за модулем і протилежна за напрямком рівнодійній зовнішніх сил $\vec{F}_{\text{зовн}}$, які намагаються зрушити тіло з місця (рис. 13.4):

$$\vec{F}_{\text{тертя сп}} = -\vec{F}_{\text{зовн}}$$

Чим більшу силу прикладатимемо, тим більшою буде сила тертя спокою. Нарешті за певного значення рівнодійної зовнішніх сил (а отже, і сили тертя спокою) тіло зрушить із місця. Тобто *сила тертя спокою має певне максимальне значення.*

Найчастіше дія сили тертя спокою є «корисною»: завдяки їй речі не вислизують із рук, крейда залишає слід на дошці, грифель олівця — слід на папері; ця сила дозволяє виконувати повороти, утримує коріння рослин у ґрунті. Завдяки силі тертя спокою пересуваються люди, тварини, транспорт (рис. 13.5).



Рис. 13.3. До завдання в § 13

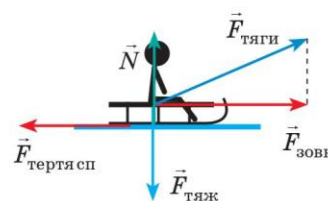


Рис. 13.4. Зовнішні сили намагаються зрушити тіло. Сила тертя спокою, яка при цьому виникає, зрівноважує зовнішні сили, і тіло перебуває в стані спокою



Рис. 13.5. Шини автомобіля в момент дотику з поверхнею дороги намагаються, по суті, здійснити рух назад. У результаті виникає сила тертя спокою, напрямлена вперед, — рушійна сила

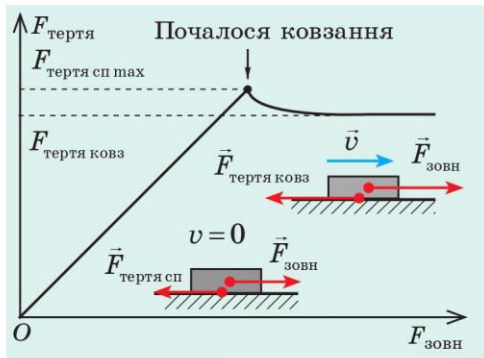


Рис. 13.6. Коли сила тертя спокою сягає максимального значення, тіло рушає з місця (починає ковзання)

Сила тертя ковзання $\vec{F}_{\text{тертя ковз}}$ — це сила, яка виникає в разі ковзання одного тіла по поверхні іншого і напрямлена протилежно напрямку відносної швидкості руху тіл.

Сила тертя ковзання діє вздовж поверхні дотику тіл і трохи менша від максимальної сили тертя спокою (рис. 13.6). Саме тому тіла починають рухатися з місця ривком і зрушити їх важче, ніж потім рухати. Це особливо помітно, коли тіла є масивними.

Ваш життєвий досвід свідчить, що сила тертя ковзання залежить від властивостей дотичних поверхонь тіл і збільшується зі збільшенням сили нормальної реакції опори (рис. 13.7). Закон, що відбиває залежність $F_{\text{тертя ковз}}$ (N), експериментально встановлений французьким ученим *Г. Амонтоном* (1663–1705) і перевірений його співвітчизником *Ш. Кулоном* (1736–1806), тому має назву **закон Амонтона — Кулона**:

Сила тертя ковзання не залежить від площі дотику тіл і прямо пропорційна силі N нормальної реакції опори:

$$F_{\text{тертя ковз}} = \mu N$$

Тут μ — **коефіцієнт тертя ковзання**, який залежить від матеріалів і якості обробки дотичних поверхонь, незначно залежить від відносної швидкості руху дотичних поверхонь і є безрозмірною величиною:

$$\mu = \frac{F_{\text{тертя ковз}}}{N}; [\mu] = 1 \frac{\text{Н}}{\text{Н}} = 1.$$

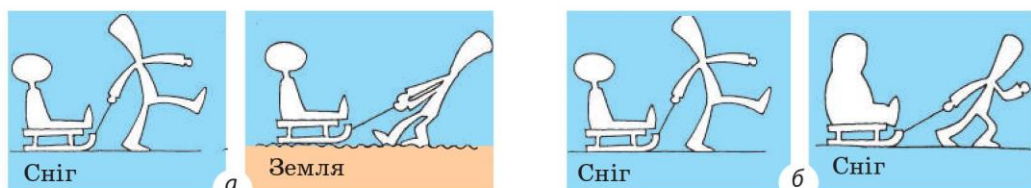


Рис. 13.7. Сила тертя ковзання залежить від якості та роду поверхонь (а) і збільшується зі збільшенням сили нормальної реакції опори (б)

У техніці, на транспорті, в побуті часто вживають заходів для збільшення максимальної сили тертя спокою. Так, на сходинок або взуття наклеюють антиковзні накладки, узимку автомобілі «перевзують» у зимові шини.

? Наведіть ще кілька подібних прикладів.

Після того як рівнодійна зовнішніх сил зрівняється з максимальною силою тертя спокою, тіло починає ковзання, — і тоді говорять про *силу тертя ковзання*.

Значення коефіцієнтів тертя ковзання встановлюють виключно експериментально. Зазвичай таблиці коефіцієнтів тертя ковзання містять орієнтовні середні значення для пар матеріалів (див. [таблицю](#)).

Силу тертя ковзання можна зменшити, змастивши дотичні поверхні. Тверде змащення змінює якість поверхні; рідке змащення віддаляє дотичні поверхні одну від одної — сухе тертя замінюється значно слабшим рідким тертям.

Тертя істотно зменшиться, якщо між дотичними поверхнями розташувати тверді котки, тобто ковзання замінити коченням. Досліди показують, що *за однакових умов сила тертя кочення в десятки разів менша, ніж сила тертя ковзання*.

Одна з причин виникнення сили тертя кочення полягає в тому, що поверхня, по якій рухається кулясте тіло (циліндр, колесо, куля), деформується, тому тіло весь час немов заковчується на невелику похилу площину ([рис. 13.8](#)). Чим більша деформація поверхні, тим більший кут нахилу площини і тим більшою є сила тертя кочення. Саме тому *сила тертя кочення*:

- зменшується зі збільшенням твердості поверхні, якою котиться тіло, та твердості матеріалу, з якого виготовлене тіло;
- збільшується зі збільшенням тиску тіла на поверхню;
- зменшується зі збільшенням радіуса тіла.

4 Від чого залежить сила опору середовища

Сила опору середовища (сила в'язкого тертя) $\vec{F}_{\text{оп}}$ — сила, яка виникає під час руху тіла всередині рідкого або газоподібного середовища.

Розглянемо кілька причин виникнення в'язкого тертя.

1. *Ламінарне обтікання*. Якщо тверде тіло рухається всередині рідини або газу, то прилеглі шари середовища рухаються разом із тілом ([рис. 13.9](#)). Чим більшою є в'язкість середовища, тим більше його шарів залучаються до руху.

2. *Лобовий опір*. Частинки середовища зіштовхуються з тілом і сповільнюють його рух.

3. *Вихрове обтікання*. Якщо тіло рухається з великою швидкістю, то ламінарне обтікання переходить у вихрове: безпосередньо за тілом

Матеріали	Коефіцієнт тертя ковзання
Сталь по льоду	0,02
Сталь по сталі	0,15
Бронза по бронзі	0,20
Дерево по дереву	0,25
Папір (картон) по дереву	0,40
Гума по бетону	0,75

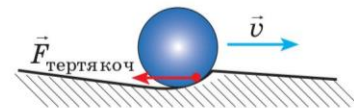


Рис. 13.8. Поверхня, якою котиться тіло, деформується, і це є однією з причин виникнення сили тертя кочення

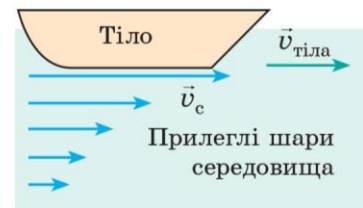


Рис. 13.9. Швидкість руху прилеглих до тіла шарів середовища (v_c) у міру віддалення від тіла поступово зменшується до нуля

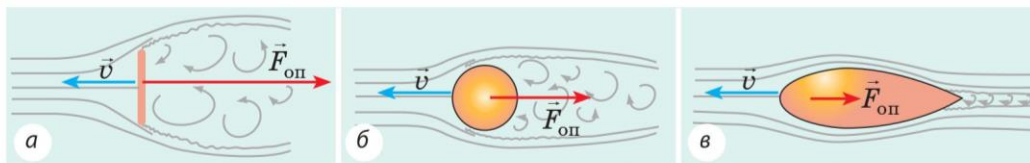


Рис. 13.10. За однакових умов найбільша сила опору діє на шайбу (а), найменша — на тіло краплеподібної (обтічної) форми (в)

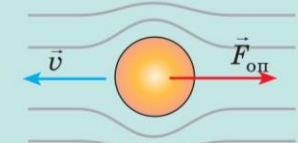
утворюється зона зменшеного тиску, і тіло ніби втягується в цю зону, сповільнюючи свій рух.

Сила опору середовища суттєво залежить від форми тіла (рис. 13.10).

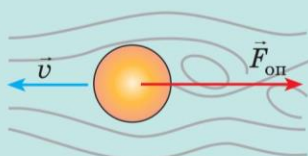
Сила опору середовища збільшується:

1) зі збільшенням швидкості v руху тіла; при цьому:

- якщо $v < v_k$, то $F_{\text{оп}} \sim v$



- якщо $v > v_k$, то $F_{\text{оп}} \sim v^2$



v_k — критична швидкість — швидкість руху тіла, за якої ламінарне обтікання перетворюється на вихрове

2) зі збільшенням площі поперечного перерізу тіла.

Наприклад, під час падіння парашутист набирає значну швидкість, проте відразу після розкриття парашута сила опору повітря різко збільшується і парашутист починає гальмувати



3) зі збільшенням густини та в'язкості середовища, за певних змін якості поверхні:

- збільшення густини середовища збільшує лобовий опір;
- збільшення в'язкості середовища та певні нерівності поверхні тіла сприяють залученню до руху більше прилеглих шарів середовища



Рис. 13.11. До завдання в § 13



Акули, дельфіни, риби можуть рухатися досить швидко. Які особливості конфігурації їхньої голови, особливості форми і поверхні їхніх тіл цьому сприяють?

Зверніть увагу! Не існує сили рідкого тертя спокою. Тобто якщо тіло, розташоване в рідкому або газоподібному середовищі, перебуває в стані спокою відносно середовища, то сила опору середовища на нього не діє.



А чому ж тоді можуть ширяти лелеки, планери, навіть білки (рис. 13.11)? Яка сила компенсує силу тяжіння?

Учимося розв'язувати задачі

Задача. На горизонтальній дорозі автомобіль має зробити поворот радіуса 45 м. Яку найбільшу швидкість може мати автомобіль, щоб «вписатись» у цей поворот? Вважайте, що коефіцієнт тертя ковзання шин об асфальт $\mu = 0,5$.

Аналіз фізичної проблеми. Автомобіль «не впишеться» в поворот, якщо $\vec{F}_{\text{тертя сп}}$, напрямлена до центра кола, сягне максимального значення й «перейде» в силу тертя ковзання. Будемо вважати, що $F_{\text{тертя сп max}} = \mu N$.

Зверніть увагу: крім сили тертя спокою, яка напрямлена до центра кола та запобігає бічному ковзанню автомобіля, існує ще сила тертя спокою, яка запобігає прослизанню коліс уздовж напрямку руху автомобіля та власне і є силою тяги автомобіля (рис. 13.12).

Виконаємо пояснювальний рисунок, позначивши на ньому сили, що діють на автомобіль, і напрямок прискорення руху автомобіля. Систему координат пов'яжемо з тілом на поверхні Землі.

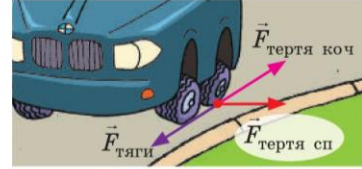


Рис. 13.12. Сили тертя, які діють на ведуче колесо автомобіля під час повороту

Дано:
 $r = 45$ м
 $\mu = 0,5$
 $g = 10$ м/с²

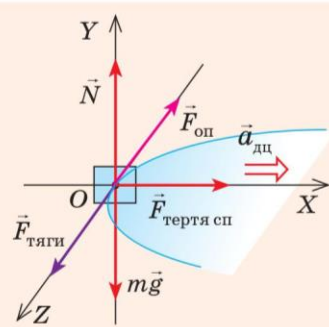
v_{max} — ?

Пошук математичної моделі, розв'язання. Запишемо другий закон Ньютона у векторному вигляді:

$$\vec{F}_{\text{тяги}} + \vec{N} + m\vec{g} + \vec{F}_{\text{оп}} + \vec{F}_{\text{тертя сп}} = m\vec{a}_{\text{дц}}.$$

Спроектуємо рівняння на осі координат:

$$\begin{cases} OX: F_{\text{тертя сп}} = ma_{\text{дц}}, \\ OY: N - mg = 0, \\ OZ: F_{\text{тяги}} - F_{\text{оп}} = 0. \end{cases}$$



Оскільки $F_{\text{тертя сп max}} = \mu N = \mu mg$; $a_{\text{дц}} = \frac{v^2}{r}$, то маємо: $\mu mg = \frac{mv^2}{r} \Rightarrow v = \sqrt{\mu gr}$.

Перевіримо одиницю, знайдемо значення шуканої величини:

$$[v] = \sqrt{\text{м} / \text{с}^2 \cdot \text{м}} = \text{м} / \text{с}; \quad v = \sqrt{0,5 \cdot 45 \cdot 10} = 15 \text{ (м/с)}.$$

Відповідь: $v_{\text{max}} = 15$ м/с.



Підбиваємо підсумки

- Сила тертя — це сила, яка виникає під час руху або спроби руху одного тіла по поверхні іншого, а також під час руху тіла всередині рідкого чи газоподібного середовища. Сила тертя завжди напрямлена вздовж поверхонь дотичних тіл і протилежно швидкості їх відносного руху.

- Розрізняють сили тертя спокою, тертя ковзання, тертя кочення та опору середовища. Усі ці сили, крім сили тертя кочення, мають електромагнітну природу, оскільки зумовлені міжмолекулярною взаємодією.

- Сила тертя спокою дорівнює за модулем і протилежна за напрямком рівнодійній зовнішніх сил, що діють на тіло: $\vec{F}_{\text{тертя сп}} = -\vec{F}_{\text{зовн}}$.

♦ Сила тертя ковзання прямо пропорційна силі нормальної реакції опори: $F_{\text{тертя ковз}} = \mu N$, де μ — коефіцієнт тертя ковзання, що залежить від матеріалів дотичних поверхонь і якості обробки дотичних поверхонь.

♦ Сила тертя кочення прямо пропорційна силі нормальної реакції опори, набагато менша за силу тертя ковзання, залежить від радіуса тіла та матеріалу дотичних поверхонь.

♦ Сила опору середовища суттєво залежить від форми тіла, збільшується зі збільшенням швидкості руху тіла, площі його поперечного перерізу, а також зі збільшенням в'язкості та густини середовища.



Контрольні запитання

1. Дайте означення сили тертя. 2. Які види тертя ви знаєте? 3. Якими є причини виникнення сухого тертя? рідкого тертя? 4. Чому силу тертя спокою називають рушійною силою? 5. Дайте означення сили тертя ковзання. Як вона напрямлена і за якою формулою її обчислюють? 6. Як можна зменшити (збільшити) силу тертя? Наведіть приклади. 7. Від яких факторів залежить сила опору середовища? Наведіть приклади.



Вправа № 13

1. Чому небезпечно їхати автомобілем по мокрій або зледенілій дорозі?
2. Чому, якщо машина забуксувала, то під колеса підкладають колоди?
3. Чому спринтерські дистанції долають у шипованому взутті, а стаєрські — у м'якому?
4. Обчисліть гальмівний шлях і час гальмування автомобіля, якщо він рухався по прямій горизонтальній ділянці дороги й перед гальмуванням мав швидкість 72 км/год. Коефіцієнт тертя ковзання гуми по бетону 0,8.
5. Запряг собак починає тягти з незмінною силою 150 Н санки масою 100 кг. За який проміжок часу санки проїдуть перші 200 м шляху? Вважайте, що коефіцієнт тертя ковзання полозів по снігу дорівнює 0,05.
6. Робітник штовхає вагонетку із силою, напрямленою вниз під кутом 45° до горизонту. Яку найменшу силу має прикласти робітник, щоб зрушити вагонетку з місця, якщо її маса 300 кг, а коефіцієнт опору 0,01*? Вагонетка стоїть горизонтально.
7. Наведіть приклади сучасних механізмів, апаратів, пристосувань, швидкісних транспортних засобів, створюючи які, конструктори «підгледіли» в природі способи збільшення або зменшення сил тертя та опору середовищ. У разі необхідності скористайтеся додатковими джерелами інформації.



Експериментальне завдання

Скориставшись підручними засобами (гумовий шнур, тіла різних форм, пілосос, клаптик картону, посудина з водою, металева кулька та ін.), проведіть низку простих дослідів (див., наприклад, рисунок) щодо виявлення факторів, від яких залежить опір середовища (або сила тертя ковзання чи кочення). Опишіть ці досліді або підготуйте відеозвіт.



* Нагадуємо: в подібних задачах коефіцієнт опору рухові (μ) враховує всі види тертя: тертя кочення коліс, тертя ковзання в осях тощо. У таких випадках сила опору $\vec{F}_{\text{оп}}$ обчислюється за формулою $F_{\text{оп}} = \mu N$, де μ — коефіцієнт опору.