



§ 12. СИЛА ПРУЖНОСТІ. ВАГА ТІЛА



Перший у світі космонавт Ю. О. Гагарін згадував: «Я відчув, що якась нездоланна сила дедалі більше втискає мене в крісло. І хоч воно було розташоване так, щоб максимально зменшити вплив велетенської ваги, яка навалилася на моє тіло, було важко ворухнути рукою й ногою». Про те, як і чому виникають перевантаження, за яких умов тіло перебуває у стані невагомості, ви дізнаєтесь із цього параграфа.

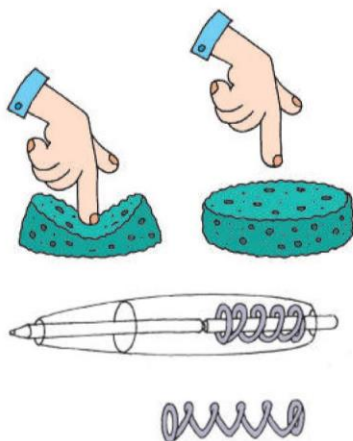


Рис. 12.1. Після припинення дії сили пружні тіла відновлюють свої форму та розміри

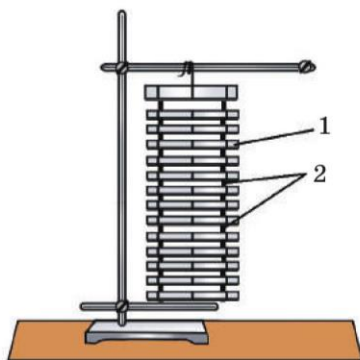


Рис. 12.2. Механічна модель твердого тіла: паралельні пластини (1), що імітують шари молекул, з'єднані пружинами (2), що імітують взаємодію між молекулами

1

Згадуємо про деформацію

Натиснемо на кнопку кулькової ручки — пружина всередині ручки стиснеться, і довжина пружини зменшиться; помнемо в руці шматочок пластиліну — зміниться його форма; натиснемо пальцем на гумку — одночасно зміняться і форма, і розміри гумки.

Зміну форми та (або) розмірів тіла називають **деформацією**.

Якщо припинити стискати пружину, тиснути на гумку, тобто усунути дію зовнішніх сил, і пружина, і гумка повністю відновлять свою форму та розміри, тобто перестануть бути деформованими (рис. 12.1). А от форма шматочка пластиліну не відновиться — пластилін її «не пам'ятає» і залишиться деформованим.

Деформації, які повністю зникають після припинення дії на тіло зовнішніх сил, називають **пружними**; деформації, які зберігаються, називають **пластичними**.

Причина виникнення і пружної, і пластичної деформацій полягає в тому, що під дією сил, прикладених до тіла, його різні частини зміщуються одна відносно одної. За характером зміщення частин розрізняють *деформації стиснення, розтягнення, зсуву, вигину, кручення*. Зупинимось на пружній деформації стиснення та розтягнення. Для цього скористаємось механічною моделлю твердого тіла (рис. 12.2).

Натиснемо на модель твердого тіла зверху рукою: верхні пластини почнуть переміщуватися вниз, нижні залишаться майже нерухомими, і в результаті модель змінить

розміри — деформується. Приблизно так само під час стискання твердого тіла зміщуються в напрямку дії сили шари його молекул, унаслідок чого розміри тіла зменшуються. Таку деформацію називають *деформацією стиснення* — її зазнають ніжки столів і стільців, фундаменти будинків тощо (див. [рис. 12.3, а](#)).

Якщо ж тіло розтягувати, шари молекул розійдуться і тіло також змінить свої розміри. Таку деформацію називають *деформацією розтягнення* — її зазнають троси, ланцюги в підіймальних пристроях, стяжки між вагонами тощо (див. [рис. 12.3, б](#)).

Фізичну величину, яка дорівнює зміні довжини тіла при деформації розтягнення або стиснення, називають **видовженням** Δl (або x):

$$\Delta l = l - l_0,$$

де l — довжина деформованого тіла; l_0 — початкова довжина тіла ([рис. 12.4](#)).

2 Коли виникає сила пружності

Якщо ви згинаєте гілку дерева, стискаєте еспандер, натягуєте тятиву лука, тобто деформуєте ці тіла, ви відчуваєте їхній опір: з боку цих тіл починає діяти сила, яка прагне відновити той стан тіла, в якому тіло перебувало до деформації. Цю силу називають *силою пружності* ([рис. 12.5](#)).

Сила пружності $\vec{F}_{\text{пруж}}$ — це сила, яка виникає під час деформації тіла і намагається повернути тіло в недеформований стан.

Вивчаючи деформацію тонких довгих стрижнів, англійський природознавець *Роберт Гук* (1635–1703) установив закон, який згодом отримав назву **закон Гука**:

У разі малих пружних деформацій розтягнення або стиснення сила пружності прямо пропорційна видовженню тіла:

$$\vec{F}_{\text{пруж}} = -k\vec{x}$$

Знак « $-$ » показує, що сила пружності напрямлена в бік, протилежний видовженню.

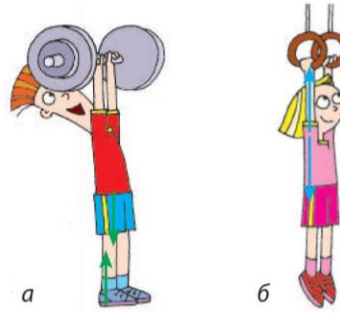


Рис. 12.3. Кістки, м'язи, зв'язки людини зазнають і деформації стиснення (а), і деформації розтягнення (б)

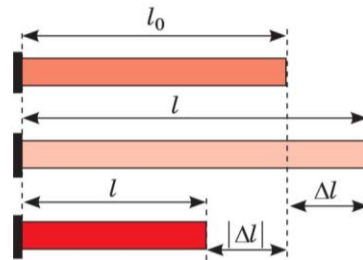


Рис. 12.4. Деформації стиснення та розтягнення стрижня; Δl — видовження стрижня

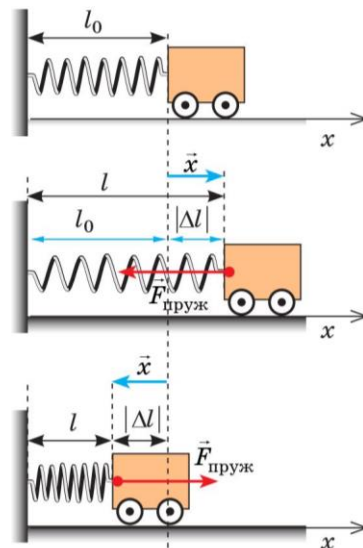


Рис. 12.5. Сила пружності $\vec{F}_{\text{пруж}}$ завжди прагне повернути тіло в недеформований стан. Тут $\vec{x}$ — вектор видовження

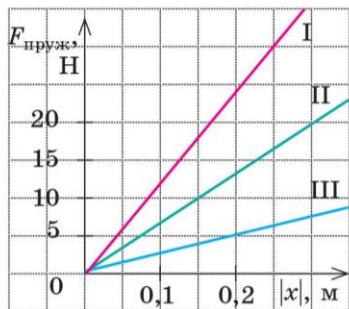


Рис. 12.6. У разі малих пружних деформацій графік залежності сили пружності від модуля видовження тіла — пряма лінія

Закон Гука можна записати і для модулів:

$$F_{\text{пруж}} = k|x| = k|\Delta l|,$$

де $x = \Delta l$ — видовження.

Оскільки сила пружності прямо пропорційна видовженню тіла, то графік залежності $F_{\text{пруж}}(|x|)$ — пряма лінія (рис. 12.6).

Коефіцієнт пропорційності k називають **жорсткістю** тіла (стрижня, балки, шнура, пружини*). Жорсткість тіла можна визначити, скориставшись законом Гука:

$$F_{\text{пруж}} = k|x| \Rightarrow k = \frac{F_{\text{пруж}}}{|x|}.$$

Одиниця жорсткості в СІ — ньютон на метр: $[k] = 1 \frac{\text{Н}}{\text{м}} \left(\frac{\text{Н}}{\text{м}} \right)$.

- **Жорсткість** — це характеристика тіла, тому вона не залежить ані від сили пружності, ані від видовження тіла.
- **Жорсткість залежить:** від пружних властивостей матеріалу, з якого виготовлене тіло; від форми тіла та його розмірів (див. § 35).

? За графіками на рис. 12.6 визначте жорсткості тіл I–III. Чи можете ви відразу, не виконуючи розрахунків, визначити, яке тіло має найбільшу жорсткість?

3 Якою є природа сили пружності

Відомо, що всі тіла складаються з атомів (молекул, йонів), а ті, у свою чергу, — з ядра, яке має позитивний заряд, і електронної хмари, заряд якої негативний. Між зарядженими складниками частинок речовини існують сили електромагнітного притягання та відштовхування.

Якщо тіло не деформоване, сили притягання дорівнюють силам відштовхування. Під час деформації взаємне розташування частинок у тілі змінюється. Якщо відстань між частинками збільшується, то електромагнітні сили притягання стають більшими, ніж сили відштовхування, і частинки починають притягуватися одна до одної. Якщо відстань між частинками зменшується, то більшими стають сили відштовхування. Інакше кажучи, частинки речовини «прагнуть» повернутися до стану рівноваги. Таким чином, *сила пружності — результат електромагнітної взаємодії частинок речовини.*

4 Деякі види сил пружності. Вага тіла

Зазвичай силу пружності позначають символом $\vec{F}_{\text{пруж}}$. Однак є сили пружності, для позначення яких використовують окремі символи.

Якщо тіло розташоване на опорі, то опора деформується (прогинається). Деформація опори спричиняє появу сили пружності, яка діє на тіло

* Дріт, із якого виготовлена пружина, зазнає деформації кручення, але сила пружності, що виникає при розтягненні й стисненні пружини, підпорядковується закону Гука.

перпендикулярно до поверхні опори. Цю силу називають **силою нормальної реакції опори** та позначають символом $\vec{N}$ (рис. 12.7).

Якщо тіло закріпити на підвісі (нитці, джгуті, шнурі), то підвіс деформується (розтягується) і діятиме на тіло з певною силою пружності, направленою *вздовж підвісу*, — **силою натягу підвісу** $\vec{T}$ (рис. 12.8).

Усі тіла внаслідок гравітаційного притягання стискають або прогинають опору або розтягують підвіс. Силу, яка характеризує таку дію тіл, називають **вагою** і позначають символом $\vec{P}$.

На рис. 12.9, 12.10 показано, як виникає ця сила, якщо тіло розташоване біля поверхні Землі і діє на горизонтальну опору або вертикальний підвіс.

У таких випадках відповідно до третього закону Ньютона вага тіла за модулем дорівнює силі нормальної реакції опори або силі натягу підвісу та направлена протилежно їм: $\vec{P} = -\vec{N}$; $\vec{P} = -\vec{T}$. Саме такі випадки виникнення ваги тіла ми розглядатимемо далі.

Зверніть увагу! Якщо тіло перебуває у стані спокою або рівномірного прямолінійного руху, то вага тіла за модулем дорівнює силі тяжіння ($\vec{P} = m\vec{g}$) і збігається з нею за напрямком. Дійсно, в такому випадку сила тяжіння і сила нормальної реакції опори (або сила натягу підвісу) скомпенсовані, тому вони рівні за модулем і протилежні за напрямком: $\vec{N} = -m\vec{g}$ ($\vec{T} = -m\vec{g}$); оскільки $\vec{P} = -\vec{N}$ ($\vec{P} = -\vec{T}$), маємо: $\vec{P} = m\vec{g}$. Але, на відміну від сили тяжіння, яка прикладена до тіла, *вага прикладена до опори або підвісу*.

Вага тіла і сила тяжіння різняться й своєю природою: сила тяжіння — це гравітаційна сила, а природа ваги тіла — електромагнітна.

5 За яких умов вага тіла змінюється

Нам здається, що в невагомості перебувають тільки космонавти на орбіті, а перевантаження зазнають лише льотчики під час виконання фігур вищого пілотажу та космонавти. Але це не так.

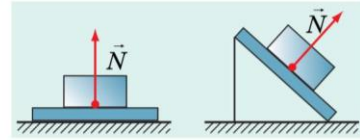


Рис. 12.7. Сила нормальної реакції опори направлена перпендикулярно до поверхні опори

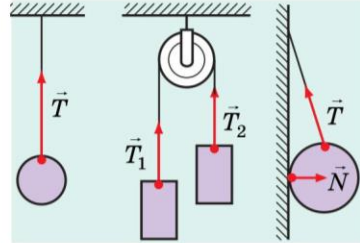


Рис. 12.8. Сила натягу підвісу направлена вздовж підвісу

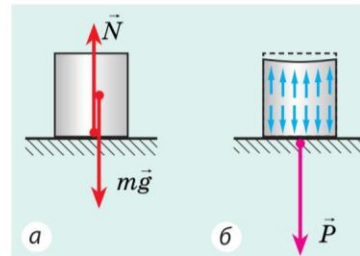


Рис. 12.9. Дії сили тяжіння та сили реакції опори спричиняють деформацію стиснення (а). Тіло, прагнучи повернутись у недеформований стан, тисне на опору із силою пружності $\vec{P}$ (б)

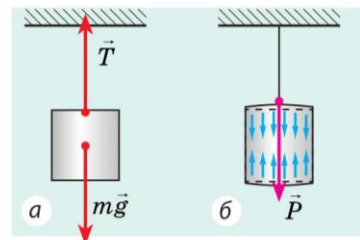


Рис. 12.10. Дії сили тяжіння та сили натягу підвісу спричиняють деформацію розтягнення (а). Тіло, прагнучи повернутись у недеформований стан, розтягує підвіс із силою пружності $\vec{P}$ (б)

? Розгляньте рис. 12.11 і зробіть висновки: куди напрямлене прискорення руху тіла, коли тіло зазнає перевантаження? відчуває зменшення ваги? Чому дорівнює прискорення, коли тіло перебуває у стані невагомості?

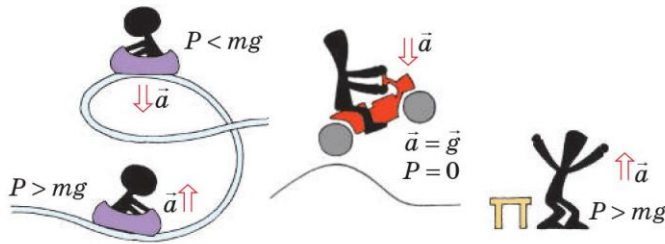


Рис. 12.11. Усі ми час від часу зазнаємо перевантажень ($P > g$), відчуваємо зменшення ваги ($P < mg$) або перебуваємо у стані невагомості ($P = 0$)

Збільшення ваги (перевантаження)	Зменшення ваги
Розглянемо тіло, яке перебуває на опорі та разом із нею рухається в гравітаційному полі Землі з прискоренням $\vec{a}$. На тіло діють дві сили: сила тяжіння $m\vec{g}$ і сила нормальної реакції опори $\vec{N}$. Пов'яжемо систему координат із Землею та спрямуємо вісь OY вертикально вгору. Відповідно до другого закону Ньютона: $m\vec{g} + \vec{N} = m\vec{a}$. Запишемо це рівняння в проекціях на вісь OY для двох випадків.	
1. <i>Прискорення напрямлене вертикально вгору</i> $OY: -mg + N = ma \Rightarrow$ $\Rightarrow N = mg + ma = m(g + a)$. Відповідно до третього закону Ньютона $P = N$. Остаточно маємо: $P = m(g + a)$.	2. <i>Прискорення напрямлене вертикально вниз</i> $OY: -mg + N = -ma \Rightarrow$ $\Rightarrow N = mg - ma = m(g - a)$. Відповідно до третього закону Ньютона $P = N$. Остаточно маємо: $P = m(g - a)$.
<i>Вага тіла, яке рухається з прискоренням, напрямленим вертикально вгору, більша, ніж вага цього тіла в стані спокою.</i> Коли є перевантаження, не тільки тіло сильніше тисне на опору, але й окремі частини тіла сильніше тиснуть одна на одну.	<i>Вага тіла, яке рухається з прискоренням, напрямленим вертикально вниз, менша, ніж вага цього тіла в стані спокою.</i> Якщо в цьому випадку прискорення руху тіла дорівнює прискоренню вільного падіння ($\vec{a} = \vec{g}$), вага тіла дорівнює нулю і тіло не діє на опору.

6

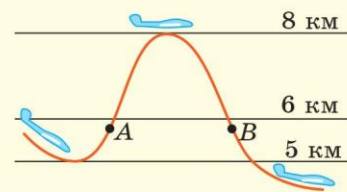
Як відчувати стан невагомості

Стан тіла, за якого вага тіла дорівнює нулю, називають **станом невагомості**.

У стані невагомості на тіло діє тільки сила тяжіння (тіло вільно падає), і навпаки: *якщо тіло рухається тільки під дією сили тяжіння, воно перебуває у стані невагомості*.

У стані невагомості не тільки тіло не тисне на опору, але й окремі частини тіла не тиснуть одна на одну; космонавт на орбіті (згадайте: на орбіті космічний корабель рухається тільки під дією сили тяжіння) не відчуває своєї ваги, предмет, випущений із його рук, нікуди не падає. Річ у тім, що сила тяжіння надає кожному тілу та будь-якій частині тіла однакового прискорення.

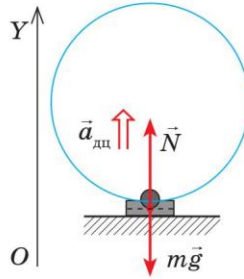
Щоб відчути стан невагомості, достатньо просто підстрибнути. А от для тренування космонавтів використовують той факт, що тіло, кинуте під кутом до горизонту, під дією сили тяжіння рухається по параболі. Якщо у верхніх шарах атмосфери літак спрямувати по висхідній траєкторії («кинути» його під кутом до горизонту) і суттєво зменшити тягу двигунів, то деякий час усі тіла в літаку перебуватимуть у стані невагомості.



7 Учимся розв'язувати задачі

Задача. Літак виконує «мертву петлю», описуючи у вертикальній площині коло радіуса 250 м. У скільки разів вага льотчика в нижній частині траєкторії більша за силу тяжіння, якщо швидкість руху літака 100 м/с?

Аналіз фізичної проблеми. Літак рухається по колу, отже, льотчик має доцентрове прискорення. Виконаємо пояснювальний рисунок, на якому зобразимо сили, що діють на льотчика, і напрямок його прискорення. Оберемо одновимірну систему координат, яку пов'яжемо з точкою на поверхні Землі, вісь OY спрямуємо вертикально вгору.



Дано:
 $r = 250 \text{ м}$
 $v = 100 \text{ м/с}$
 $g = 10 \text{ м/с}^2$

$\frac{P}{F_{\text{тяж}}}$ — ?

Розв'язання. За другим законом Ньютона: $m\vec{g} + \vec{N} = m\vec{a}_{\text{дц}}$.

У проекціях на вісь OY :

$$-mg + N = ma_{\text{дц}} \Rightarrow N = m(a_{\text{дц}} + g).$$

За третім законом Ньютона $P = N$, тому $P = m(a_{\text{дц}} + g)$. Остаточного маємо:

$$\frac{P}{F_{\text{тяж}}} = \frac{m(a_{\text{дц}} + g)}{mg} = \frac{a_{\text{дц}} + g}{g}, \text{ де } a_{\text{дц}} = \frac{v^2}{r}.$$

Перевіримо одиниці, знайдемо значення шуканих величин:

$$[a_{\text{дц}}] = \frac{(\text{м/с})^2}{\text{м}} = \frac{\text{м}^2}{\text{с}^2 \cdot \text{м}} = \frac{\text{м}}{\text{с}^2}, \quad a_{\text{дц}} = \frac{100^2}{250} = 40 (\text{м/с}^2);$$

$$\frac{P}{F_{\text{тяж}}} = \frac{40 \text{ м/с}^2 + 10 \text{ м/с}^2}{10 \text{ м/с}^2} = 5.$$

Аналіз результату. Вага льотчика в 5 разів більша за силу тяжіння — це реальний результат.

Відповідь: $P/F_{\text{тяж}} = 5$.

Алгоритм розв'язування задач на рух тіла під дією кількох сил

1. Прочитайте умову задачі. З'ясуйте, які сили діють на тіло, яким є характер його руху (рухається з прискоренням чи рівномірно прямолінійно).

2. Запишіть коротку умову задачі. У разі необхідності переведіть значення фізичних величин в одиниці СІ.

3. Виконайте пояснювальний рисунок, на якому позначте сили, що діють на тіло, і напрямок прискорення руху тіла.

4. Виберіть інерціальну систему відліку. Кількість осей координат і їх напрямок оберіть з огляду на умову задачі.

5. Запишіть рівняння другого закону Ньютона у векторному вигляді та в проекціях на всі координат. Запишіть формули для обчислення сил. Одержавши систему рівнянь, розв'яжіть її. Якщо в задачі є додаткові умови, використайте їх.

6. Перевірте одиницю, знайдіть числове значення шуканої величини.

7. Проаналізуйте результат. Запишіть відповідь.



Підбиваємо підсумки

• Деформацією називають зміну форми або (і) розмірів тіла. Якщо після припинення дії на тіло зовнішніх сил деформація повністю зникає, це пружна деформація; якщо деформація зберігається, це пластична деформація.

• Силу, яка виникає в тілі в разі його деформації і намагається повернути тіло в недеформований стан, називають силою пружності. Сила пружності має електромагнітну природу, її можна розрахувати за законом Гука: $\vec{F}_{\text{пруж}} = -k\vec{x}$, де k — жорсткість тіла. Закон Гука виконується тільки в разі малих пружних деформацій.

• Вага тіла $\vec{P}$ — це сила, з якою внаслідок гравітаційного притягання тіло тисне на опору або розтягує підвіс. Якщо опора горизонтальна або підвіс вертикальний, то відповідно до третього закону Ньютона вага тіла дорівнює за модулем і протилежна за напрямком силі нормальної реакції опори (силі натягу підвісу): $\vec{P} = -\vec{N}$ ($\vec{P} = -\vec{T}$).

♦ Якщо тіло перебуває у стані спокою або рухається рівномірно прямолінійно, то вага тіла за модулем дорівнює силі тяжіння: $P = mg$.

♦ Якщо тіло рухається з прискоренням, напрямленим вертикально вгору, це тіло зазнає перевантаження (вага тіла більша, ніж його вага у стані спокою): $P = m(g + a)$.

♦ Якщо тіло рухається з прискоренням, напрямленим вертикально вниз, вага тіла менша, ніж його вага у стані спокою: $P = m(g - a)$.



Контрольні запитання

1. Що таке деформація? У чому причина її виникнення? 2. Які види деформацій ви знаєте? Які деформації називають пружними? пластичними? Наведіть приклади. 3. Дайте означення сили пружності. Якою є її природа? 4. Сформулюйте закон Гука. Які межі його застосування? 5. Від чого залежить жорсткість тіла? Яка одиниця жорсткості в СІ? 6. Яку силу називають силою нормальної реакції опори? силою натягу підвісу? Як напрямлені ці сили? Наведіть приклади. 7. Що таке вага? Чим вага тіла відрізняється від сили тяжіння? 8. Поясніть причину виникнення ваги тіла. 9. Що таке невагомість? За яких умов тіло перебуває у стані невагомості? 10. За яких умов тіло зазнає перевантаження?

Фізика в цифрах

- $P=0$ — відсутність навантаження (стан невагомості).
- $P=mg$ — «нормальне» навантаження (на поверхні Землі).
- $P=3mg$ — максимальне навантаження, що відчувається на «американських гірках».
- $P=4,3mg$ — максимальне навантаження, на яке розраховані пасажирські літаки.
- $P=5mg$ — навантаження, за якого більшість людей непритомнюють.
- $P=9mg$ — навантаження, яке витримує людина за штурвалом винищувача під час крутих віражів.



Вправа № 12

1. На скільки видовжиться гумовий шнур під дією сили 5 Н, якщо жорсткість шнура 25 Н/м?
2. На рис. 1 показано траєкторію автомобіля. У якій точці траєкторії вага водія дорівнює силі тяжіння? У якій точці водій автомобіля зазнає перевантаження, а в якій — зменшення ваги?
3. Під дією тягара масою 10 кг дріт видовжився на 1 мм. Яка жорсткість дроту?
4. У ліфті встановлено динамометр, на якому підвішено тіло масою 1 кг. Що показує динамометр, коли прискорення ліфта: а) дорівнює нулю; б) дорівнює 5 м/с^2 і напрямлене вертикально вниз; в) дорівнює 5 м/с^2 і напрямлене вертикально вгору?
5. Визначте вагу автомобіля в точках А і В (див. рис. 1), якщо він рухається з незмінною швидкістю 54 км/год, а його маса дорівнює 2 т. Із якою швидкістю має рухатись автомобіль, щоб у точці В опинитись у стані невагомості?
6. Відерце з водою обертають у вертикальній площині на мотузці завдовжки 1 м. Із якою найменшою швидкістю потрібно обертати відерце, щоб у момент проходження верхньої точки вода з нього не виливалась?
7. Ракета-носіє із космічним кораблем стартує з поверхні Землі, рухаючись із прискоренням 30 м/с^2 . Визначте вагу космонавта, який при цьому перебуває на борту корабля, якщо його маса 75 кг. Чому крісло космонавтів під час зльоту та посадки розташовують так, щоб прискорення було напрямлено перпендикулярно до тулуба космонавта, а не вздовж нього?
8. Доведіть, що жорсткість k системи двох пружин жорсткістю k_1 і k_2 можна розрахувати за формулами, поданими на рис. 2.
9. Скористайтесь додатковими джерелами інформації та дізнайтеся, як впливає на здоров'я та стан людини значне перевантаження; тривале перебування у стані невагомості.
10. На початку § 7 ішлося про цирковий номер «Людина — гарматне ядро». Якого навантаження зазнає спортсмен під час пострілу? Необхідні дані знайдіть у додаткових джерелах інформації.
11. Коли виникає сила тертя? Чи завжди ця сила заважає рухові тіла?

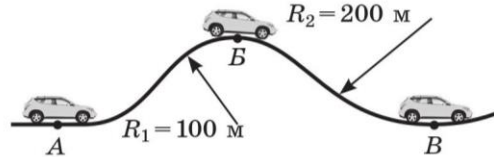


Рис. 1

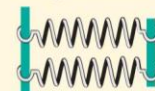
З'єднання пружин

Послідовне



$$\frac{1}{k_{\text{посл}}} = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2}$$

Паралельне



$$k_{\text{пар}} = k_1 + k_2$$

Рис. 2



Експериментальне завдання

Жорсткість тіла суттєво залежить від його форми. Доведіть це, використавши декілька однакових смужок паперу, дві книжки та невеликий вантаж. Надайте смужкам різної форми (див., наприклад, рис. 3) і дослідіть їхню деформацію внаслідок дії однакової сили.

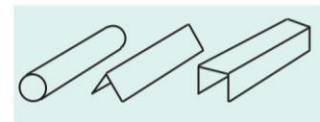


Рис. 3