

## § 26. ВАГА ТІЛА. ВАГА ТІЛА, ЯКЕ РУХАЄТЬСЯ З ПРИСКОРЕННЯМ. НЕВАГОМІСТЬ. ПЕРЕВАНТАЖЕННЯ

Зі спогадів Ю. О. Гагаріна: «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 дізнаєтеся з цього параграфа.

### Що таке вага тіла

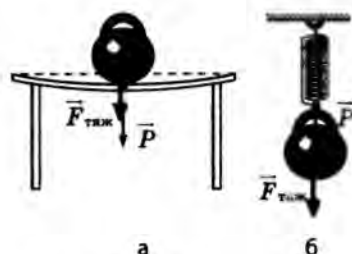
У результаті притягання до Землі всі тіла стискають або прогинають опору, розтягують підвіс. Сила, яка характеризує таку дію тіл, називається *вагою*.

**Вага тіла  $\vec{P}$**  — це сила пружності, з якою внаслідок притягання до Землі тіло діє на горизонтальну опору або вертикальний підвіс.

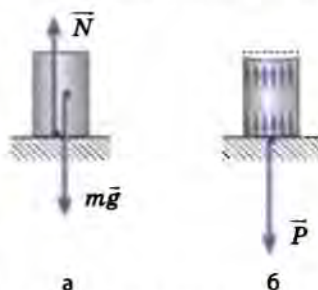
У СІ одиниця ваги, як і будь-якої іншої сили, — **ньютон (Н)**.

На відміну від сили тяжіння, яка прикладена до тіла, *вага прикладена до опори або підвісу* (рис. 26.1). Вага тіла і сила тяжіння відрізняються й своєю природою: сила тяжіння має гравітаційну природу; вага тіла — це сила пружності, тому *вага має електромагнітну природу*.

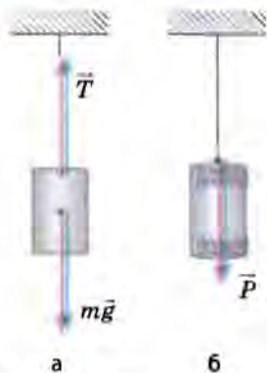
З'ясуємо причину виникнення ваги тіла. Для цього розглянемо тіло, що лежить на горизонтальній опорі (рис. 26.2), і тіло, розміщене на вертикальному підвісі (рис. 26.3). На кожне тіло діють дві сили: у першому випадку — сила тяжіння  $m\vec{g}$  та сила реакції опори  $\vec{N}$ ; у другому випадку — сила тяжіння  $m\vec{g}$  та сила натягу



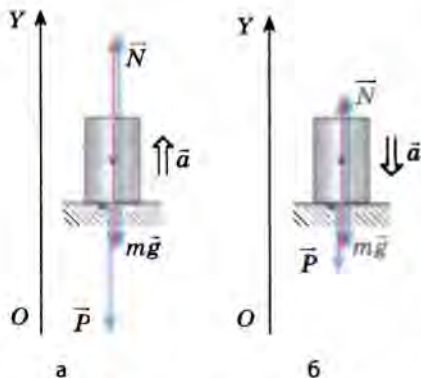
**Рис. 26.1.** Сила тяжіння  $\vec{F}_{\text{тяж}}$  діє на тіло (прикладена до центра тяжіння тіла); вага тіла  $\vec{P}$  діє на опору (а) або підвіс (б)



**Рис. 26.2.** Дії сили тяжіння  $m\vec{g}$  та сили реакції опори  $\vec{N}$  спричинюють деформацію стиснення (а). У результаті тіло, прагнучи повернутись у недеформований стан, тисне на опору із силою пружності  $\vec{P}$  (б)



**Рис. 26.3.** Дії сили тяжіння  $m\vec{g}$  та сили натягу  $\vec{T}$  спричиняють деформацію розтягнення (а). У результаті тіло, прагнучи повернутись у недеформований стан, діє на підвіс із силою пружності  $\vec{P}$  (б)



**Рис. 26.4.** До визначення ваги тіла, що рухається з прискоренням: а — прискорення напрямлене вертикально вгору; б — прискорення напрямлене вертикально вниз

підвісу  $\vec{T}$ . У кожному випадку сили прикладені до різних точок тіла й напрямлені протилежно, тому вони деформують тіло. У результаті деформації виникає сила пружності, що діє на опору (підвіс), — це і є вага тіла  $\vec{P}$ .

Якщо тіло перебуває у спокої або рухається з постійною швидкістю, то дія сили тяжіння і дія сили реакції опори (сили натягу підвісу) компенсують одна одну — вони рівні за модулем і протилежно напрямлені:  $\vec{N} = -m\vec{g}$  ( $\vec{T} = -m\vec{g}$ ). (1)

Відповідно до третього закону Ньютона сила, з якою тіло діє на опору (підвіс), дорівнює за модулем і є протилежною за напрямком силі, з якою опора (підвіс) діє на тіло:  $\vec{P} = -\vec{N}$  ( $\vec{P} = -\vec{T}$ ). (2)

З виразів (1) і (2) маємо:  $\vec{P} = m\vec{g}$ .

Отже, якщо тіло перебуває у стані спокою або рівномірного прямолінійного руху, то його вага за значенням дорівнює силі тяжіння й збігається з нею за напрямком.

## 2 За яких умов виникають перевантаження

Припустимо, що тіло перебуває на опорі та разом із нею рухається у гравітаційному полі Землі з прискоренням  $\vec{a}$ , напрямленим вертикально вгору. На тіло по вертикалі діють дві сили: сила тяжіння  $m\vec{g}$  і сила реакції опори  $\vec{N}$ . Пов'яжемо систему координат із Землею та спрямуємо вісь  $OY$  вертикально вгору (рис. 26.4, а). Відповідно до другого закону Ньютона:  $m\vec{g} + \vec{N} = m\vec{a}$ . Запишемо це рівняння в проекціях на вісь  $OY$ :

$$-mg + N = ma \Rightarrow N = mg + ma = m(g + a).$$

Відповідно до третього закону Ньютона  $P = N$ . Остаточного маємо:

$$P = m(g + a).$$

Таким чином, вага тіла, яке рухається з прискоренням, напрямленим вертикально вгору, більша, ніж вага тіла, яке перебуває у спокої.

Якщо людина рухається з прискоренням, напрямленим вертикально вгору, то вона зазнає *перевантаження* (збільшення ваги). Збільшення ваги тіла характеризується коефіцієнтом перевантаження.



**Коефіцієнт перевантаження  $n$**  — фізична величина, яка характеризує збільшення ваги тіла та дорівнює відношенню прискорення  $a$  тіла до прискорення  $g$  вільного падіння:

$$n = \frac{a}{g}$$

У разі  $n$ -кратного перевантаження ( $a = ng$ ) вага тіла збільшується в  $(n+1)$  разів.

Перевантаження зазнають космонавти під час зльоту й посадки космічного корабля; льотчик у літаку під часі маневрів; людина в ліфті (на початку підняття або наприкінці спускання); люди й тварини в момент приземлення у разі стрибка з висоти та ін. Коли є перевантаження, не тільки тіло сильніше тисне на опору, але й окремі частини тіла дужче тиснуть одна на одну. У людини в стані перевантаження спостерігається короткочасне ослаблення зору, частішає серцебиття, утруднюється дихання, тому тривале перевантаження можуть переносити тільки добре треновані люди.

### 3 Коли тіло перебуватиме у стані невагоміст

Розглянемо випадок, коли прискорення, з яким рухається тіло, напрямлене вертикально вниз (це відбувається, наприклад, під час руху автомобіля по опуклому мосту, стрибка людини з парашутом та ін.).

Нехай тіло перебуває на опорі й рухається разом із нею з прискоренням  $\vec{a}$ , напрямленим униз. На тіло діють дві сили: сила тяжіння  $m\vec{g}$  і сила реакції опори  $\vec{N}$  (див. рис. 26.4, б). Відповідно до другого закону Ньютона:  $m\vec{g} + \vec{N} = m\vec{a}$ . Запишемо це рівняння в проекціях на вісь  $OY$ :  $-mg + N = -ma \Rightarrow N = mg - ma = m(g - a)$ . Оскільки  $P = N$ , остаточно маємо:

$$P = m(g - a).$$

Таким чином, *вага тіла, яке рухається з прискоренням, напрямленим вертикально вниз, менша, ніж вага того самого тіла в стані спокою.*

Якщо в цьому випадку прискорення, з яким рухається тіло, дорівнює прискоренню вільного падіння ( $\vec{a} = \vec{g}$ ), то вага тіла дорівнює нулю й тіло припиняє діяти на опору.

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

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

У стані невагоміст не тільки тіло не тисне на опору, але й окремі частини тіла не тиснуть одна на одну. Космонавт на орбіті (пригадайте: на орбіті космічний корабель рухається тільки під дією сили

тяжіння) не відчуває своєї ваги, предмет, випущений з його рук, нікуди не падає. Причина цих явищ у тому, що сила тяжіння надає тілу, яке вільно падає, будь-якій його частині та усім предметам навколо однакового прискорення.

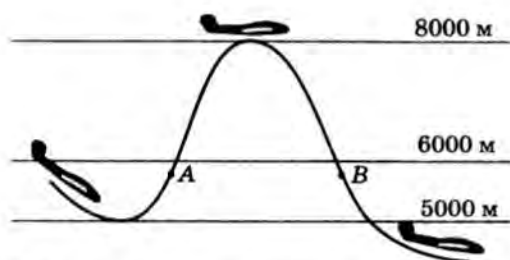


Рис. 26.5. Імітація умов невагомості під час польоту літака по балістичній траєкторії. Стан невагомості настає на ділянці кривої AB і триває 25–35 с

Щоб відчути стан невагомості, немає потреби обов'язково летіти на орбіту — досить 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 спрямувати літак по висхідній траєкторії («кинути» його під кутом до горизонту) і вимкнути двигуни, то поки літак рухається по параболі, всі тіла в ньому перебуватимуть у стані невагомості (рис. 26.5).

### Учимося розв'язувати задачі

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

Дано:

$$r = 250 \text{ м}$$

$$v = 100 \text{ м/с}$$

$$g \approx 10 \text{ м/с}^2$$

$$\frac{P}{F_{\text{тяж}}} = ?$$

**Аналіз фізичної проблеми.** Літак рухається по колу з постійною швидкістю, отже, він має постійне доцентрове прискорення.

Виконаємо пояснювальний рисунок, на якому зазначимо сили, які діють на льотчика, і напрямки його прискорення. Пов'яжемо систему координат із точкою на поверхні Землі, вісь  $OY$  спрямуємо вертикально вгору.

**Пошук математичної моделі, розв'язання.**

Згідно з другим законом Ньютона:

$$m\vec{g} + \vec{N} = m\vec{a}_{\text{дц}}.$$

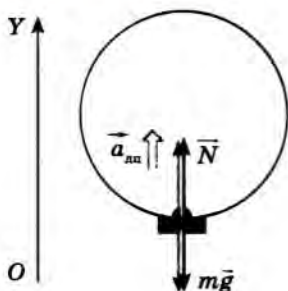
Запишемо це рівняння в проекціях на вісь  $OY$ :

$$-mg + N = ma_{\text{дц}} \Rightarrow N$$

$$\Rightarrow N = mg + ma_{\text{дц}} = m(g + a_{\text{дц}}) = m(g + v^2/r).$$

За третім законом Ньютона:

$$P = N = m(g + v^2/r).$$





Таким чином: 
$$\frac{P}{F_{\text{тяг}}} = \frac{m(g+v^2/r)}{mg} = \frac{g+v^2/r}{g}.$$

Визначимо значення шуканої величини:

$$\left[ \frac{P}{F_{\text{тяг}}} \right] = \frac{m/c^2 + m/c^2}{m/c^2} = 1; \quad \left\{ \frac{P}{F_{\text{тяг}}} \right\} = \frac{10 + 10\,000 : 250}{10} = 5; \quad \frac{P}{F_{\text{тяг}}} = 5.$$

**Аналіз результату.** Вага тіла у 5 разів більша за силу тяжіння, отже, коефіцієнт перевантаження дорівнює 4. Це цілком реальний результат.

**Відповідь:** у нижній частині траєкторії вага льотчика більша за силу тяжіння у 5 разів.

### Підбиваємо підсумки

Вага тіла  $\bar{P}$  — це сила пружності, з якою внаслідок притягання до Землі тіло діє на горизонтальну опору або вертикальний підвіс.

Відповідно до третього закону Ньютона вага дорівнює за модулем і протилежна за напрямком силі реакції опори (силі натягу підвісу):  $\bar{P} = -\bar{N}$  ( $\bar{P} = -\bar{T}$ ).

Якщо тіло перебуває у спокої або рухається з постійною швидкістю, то його вага за модулем дорівнює силі тяжіння:  $P = mg$ .

Якщо дане тіло рухається з прискоренням, напрямленим вертикально вгору, то його вага більша, ніж вага такого самого тіла, яке перебуває в спокої:  $P = m(g+a)$ , — дане тіло зазнає перевантаження.

Якщо дане тіло рухається з прискоренням, напрямленим вертикально вниз, то його вага менша, ніж вага такого самого тіла, яке перебуває в спокої:  $P = m(g-a)$ ; при цьому, якщо прискорення, з яким рухається дане тіло, дорівнює прискоренню вільного падіння ( $a = g$ ), то тіло перебуває у стані невагомості.

### Контрольні запитання

1. Що називають вагою тіла?
2. Чим вага тіла відрізняється від сили тяжіння?
3. Поясніть причину виникнення ваги тіла, коли тіло перебуває на опорі, підвісі.
4. Чому дорівнює вага тіла, коли воно перебуває у стані спокою або рівномірного прямолінійного руху?
5. Виведіть формулу для визначення ваги тіла, яке рухається з прискоренням, напрямленим вертикально вгору; з прискоренням, напрямленим вертикально вниз.
6. Що таке перевантаження? Чому його необхідно враховувати?
7. Що таке невагомість? За яких умов тіло перебуває у стані невагомості?

### Вправа № 22

Розв'язуючи задачі, вважайте, що  $g \approx 10 \text{ м/с}^2$ .

1. Людина стрибає зі стільця, тримаючи на долоні яблуко масою 200 г. З якою силою яблуко тисне на руку людини, коли людина перебуває у стані «польоту»?
2. У ліфті встановлено динамометр, на якому підвішене тіло масою 1 кг. Що покаже динамометр у разі, коли прискорення ліфта: а) дорівнює нулю; б) дорівнює  $5 \text{ м/с}^2$  і напрямлене вертикально вниз; в) дорівнює  $5 \text{ м/с}^2$  і напрямлене вертикально вгору?

3. Відразу після старту космічний корабель рухається вертикально вгору з прискоренням  $40 \text{ м/с}^2$ . З якою силою космонавт масою  $70 \text{ кг}$  тисне на крісло, у якому сидить? Яким є коефіцієнт перевантаження?
4. Автомобіль масою  $5 \text{ т}$  проходить верхню точку опуклого мосту зі швидкістю  $36 \text{ км/год}$ . З якою силою автомобіль тисне на міст у верхній його точці, якщо радіус кривизни мосту  $100 \text{ м}$ ? З якою швидкістю має рухатися автомобіль, щоб у верхній точці мосту опинитись у стані невагомості?
- 5\*. Відерце з водою обертають у вертикальній площині на мотузці завдовжки  $1 \text{ м}$ . З якою найменшою частотою потрібно обертати відерце, щоб у момент проходження верхньої точки траєкторії вода з нього не виливалася?