

§ 10. СИЛА. МАСА. ДРУГИЙ І ТРЕТІЙ ЗАКОНИ НЬЮТОНА



1 Згадуємо силу

Уявіть: розігнавшись на спортивному велосипеді, ви припинили крутити педалі. Врешті-решт велосипед обов'язково зупиниться — швидкість його руху поступово зменшиться до нуля. А от час зупинки велосипеда, а отже, і його прискорення суттєво залежать від того, чи натискаєте ви при цьому на гальмо. Тобто те саме тіло *в результаті різної дії (взаємодії) набуває різного прискорення*. Унаслідок різної дії тіло може також по-різному змінювати свої форму та розміри — *деформуватися*.

Кількісною мірою взаємодії є сила.

Сила $\vec{F}$ у механіці — це векторна фізична величина, що є мірою взаємодії тіл, у результаті якої тіло набуває прискорення або деформується.



Рис. 10.1. Якщо ви, граючи у волейбол, ударите по м'ячу, то можете прискорити його рух, зупинити, змінити напрямок руху або закрутити — це залежить від напрямку, точки прикладення й сили удару

Одиниця сили в СІ — **ньютон**:

$$[F] = 1 \text{ Н (N)}.$$

1 Н дорівнює силі, яка, діючи на тіло масою 1 кг, надає йому прискорення 1 м/с^2 .

У фізиці силою називають також дію одного тіла на інше. Наприклад, можна сказати: на м'яч діє сила пружності, — хоча насправді на м'яч діють руки волейболіста, дія яких характеризується силою пружності.

Результат дії сили $\vec{F}$ залежить від модуля F цієї сили, її напрямку та місця прикладення (якщо тіло не є матеріальною точкою) (рис. 10.1).

? Наведіть кілька простих прикладів (рух, спорт, приготування їжі та ін.), коли необхідно замислитися, яку силу (більшу чи меншу) слід прикласти і куди її спрямувати.

Чому тіла по-різному реагують на ту саму дію

Зміна швидкості руху тіла залежить не тільки від сили, яка діє на тіло: якщо до тенісного м'яча та металевого ядра прикласти однакову силу, швидкість руху ядра зміниться менше або для тієї самої зміни швидкості необхідно буде більше часу. Тобто *різним тілам властиво по-різному реагувати на ту саму дію*.

Властивість тіла, яка полягає в тому, що для зміни швидкості руху тіла під дією сили потрібен деякий час, називають **інертністю**.

Чим тіло інертніше, тим меншого прискорення воно набуває внаслідок тієї самої дії. У наведеному вище прикладі ядро інертніше за м'яч, адже внаслідок тієї самої дії воно повільніше за м'яч змінює швидкість свого руху. Інертні властивості тіла характеризує *інертна маса тіла*.

Будь-яке тіло має також властивість гравітаційно взаємодіяти з іншими тілами. Цю властивість характеризує *гравітаційна маса тіла*. Інертна маса тіла дорівнює його гравітаційній масі, тому далі говоритимемо просто про *масу тіла*.

Маса m — фізична величина, яка є мірою інертності та мірою гравітації тіла.

Одиниця маси в СІ — **кілограм**: $[m] = 1 \text{ кг (kg)}$.

1 кг дорівнює масі міжнародного еталона кілограма.

Виміряти масу тіла означає порівняти її з масою еталона, тобто з масою тіла, масу якого взято за одиницю. Один із найпоширеніших способів прямого вимірювання маси тіла — *зважування* (маса — міра гравітації, тому тіла рівної маси однаково притягуються до Землі, а отже, й однаково тиснуть на опору).

Зважування — найзручніший спосіб вимірювання маси, однак не універсальний. Як, наприклад, виміряти масу молекули або масу Місяця, адже покласти ці об'єкти на ваги неможливо? У таких випадках використовують той факт, що маса — міра інертності. Якщо на два тіла масами m_1 і m_2 діють однакові сили, то *порівняти маси цих тіл можна, якщо визначити прискорення, набуті тілами в результаті дії цих сил*:

$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{a_2}{a_1}$$



Спробуйте довести останнє твердження, спираючись на другий закон Ньютона, з яким ви ознайомилися в минулому навчальному році. Якщо не вийде, поверніться до цього питання після вивчення пункту 3 § 10.

Основні властивості маси

1. *Маса тіла — величина інваріантна*: вона не залежить ані від вибору системи відліку, ані від швидкості руху тіла.

2. *У класичній механіці маса тіла — величина адитивна*: маса тіла дорівнює сумі мас усіх частинок, із яких складається тіло, а маса системи тіл дорівнює сумі мас тіл, що утворюють систему.

3. *У класичній механіці виконується закон збереження маси*: в ході будь-яких процесів у системі тіл загальна маса системи залишається незмінною; маса тіла не змінюється під час його взаємодії з іншими тілами.

3 Другий закон Ньютона

Поставимо на тверду горизонтальну поверхню легкорухомий візок і тягнутимемо його за допомогою вантажу. Маса вантажу для кожного дослідів добиратимемо так, щоб розтягнення пружин під час руху візка було однаковим. Вимірюючи час t , протягом якого візок долає, наприклад, відстань $s = 2$ м, визначатимемо прискорення руху візка ($a = 2s/t^2$):

Досліди на підтвердження другого закону Ньютона	
Маса тіла (візка) збільшується; сила, що діє на тіло, та сама Результат дослідів: прискорення, якого набуває тіло, обернено пропорційне масі цього тіла: $a \sim \frac{1}{m}$.	Маса тіла (візка) та сама; сила, що діє на тіло, збільшується Результат дослідів: прискорення, якого набуває тіло, прямо пропорційне прикладеній до тіла силі: $a \sim F$.
Отже, $a \sim \frac{F}{m}$.	

Узявши до уваги, що одиницю сили обирають так, що коефіцієнт пропорційності у виразі $a \sim F/m$ дорівнює 1, сформулюємо **другий закон Ньютона**:

■ Прискорення, якого набуває тіло внаслідок дії сили, прямо пропорційне цій силі та обернено пропорційне масі тіла:

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m}$$

• Другий закон Ньютона, записаний у вигляді $\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m}$, справджується тільки в інерціальних системах відліку.

• У більшості випадків на тіло діють кілька сил. Якщо тіло можна вважати матеріальною точкою, то всі ці сили можна замінити однією — рівнодійною. Рівнодійна дорівнює геометричній сумі сил, які діють на тіло: $\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_n$ (рис. 10.2), тому другий закон Ньютона зазвичай записують так:

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_n}{m}, \text{ або } \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_n = m\vec{a}$$

- Напрямок прискорення руху завжди збігається з напрямком рівнодійної сил, які діють на тіло: $\vec{a} \uparrow \vec{F}$.

- Якщо сили, що діють на тіло, скомпенсовані, тобто *рівнодійна дорівнює нулю* ($\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_n = 0$), тіло не змінюватиме швидкості свого руху ані за значенням, ані за напрямком: $\vec{a} = 0$ (рис. 10.3), отже, рухатиметься *рівномірно прямолінійно або перебуватиме у спокої*.

- Тіло рухається *рівноприскорено прямолінійно* тільки тоді, коли *рівнодійна сил, прикладених до тіла, не змінюється з часом*.

4 Третій закон Ньютона

«Дії завжди існує рівна й протилежна протидія, інакше: дії двох тіл одне на одне між собою рівні й напрямлені протилежно» — так І. Ньютон сформулював свою третю й останню «аксіому руху».

❓ Які прояви третьої «аксіоми руху» ви зараз «бачите» навколо? з якими «зустрілися» впродовж дня? протягом минулого тижня?

Сили завжди виникають парами: якщо тіло А діє на тіло Б із силою $\vec{F}_1$, то обов'язково є «зворотна» сила $\vec{F}_2$, що діє на тіло А з боку тіла Б, причому сила $\vec{F}_2$ дорівнює за модулем силі $\vec{F}_1$ і протилежна їй за напрямком: $\vec{F}_1 = -\vec{F}_2$. А от прояви цих сил (або однієї з них) не завжди помітні. Наприклад, коли яблуко впало з яблуні, розбилося та прим'яло траву, ми бачимо і «дію», і «протидію». Також добре помітна дія Землі на яблуко (яблуко впало), а от протидію (притягання Землі до яблука) ми не помітимо.

Підкреслимо: «дія» і «протидія» — це завжди *сили однієї природи*, вони завжди *направлені вздовж однієї прямої* (рис. 10.4) — і сформулюємо **третій закон Ньютона** в сучасному вигляді:

Тіла взаємодіють із силами, що мають одну природу, напрямлені вздовж однієї прямої, рівні за модулем і протилежні за напрямком:

$$\vec{F}_1 = -\vec{F}_2$$

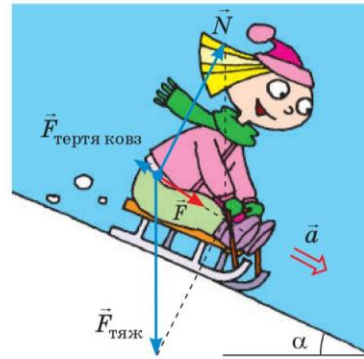


Рис. 10.2. Сила $\vec{F}$ — рівнодійна сил тяжіння $\vec{F}_{\text{тяж}}$, сил $\vec{N}$ нормальної реакції опори і сил тертя ковзання $\vec{F}_{\text{тертя ковз}}$. Сила $\vec{F}$ — причина прискорення $\vec{a}$ дівчинки

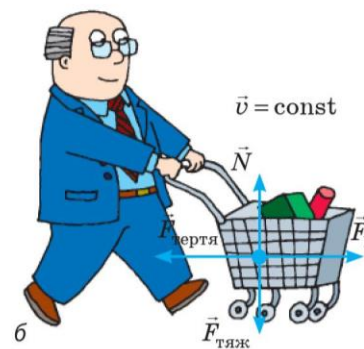
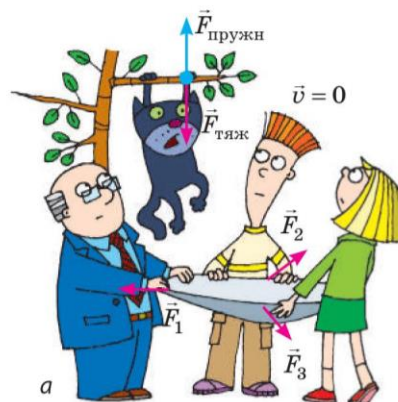


Рис. 10.3. Якщо рівнодійна сил, прикладених до тіла, дорівнює нулю, то тіло перебуває в стані спокою (а) або рухається з незмінною швидкістю (б)



Рис. 10.4. Сили, що виникають під час взаємодії, мають одну природу, напрямлені вздовж однієї прямої, рівні за модулем і протилежні за напрямком

5 Чи зміг би Мюнхгаузен витягнути себе за косицю з болота

За будь-якої взаємодії двох тіл виникає пара рівних за модулем і протилежних за напрямком сил. І дуже добре, що ці сили не мають рівнодійної, адже вони прикладені до різних тіл і тому не можуть зрівноважити (компенсувати) одна одну, інакше ми були б приречені на нерухомість або на безперервний рівномірний прямолінійний рух.

Дещо інша справа, коли точки, до яких прикладена пара сил, є частинами одного тіла (однієї системи матеріальних точок). У такому випадку векторна сума всіх внутрішніх сил системи дорівнює нулю ($\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_n = 0$ — додаються пари рівних за модулем і протилежних за напрямком сил), тому внутрішні сили не надають тілу прискорення (завдяки внутрішнім силам тіло не може ані зсунутися з місця, ані зупинитися, ані змінити напрямок руху). Для того щоб тіло набуло прискорення, потрібні зовнішні сили.



То чи зміг би барон Мюнхгаузен, герой відомого твору Р. Е. Распе, витягнути себе з болота за волосся? А як зміг би?



Підбиваємо підсумки

- Сила $\vec{F}$ — векторна фізична величина, яка є мірою дії на тіло з боку інших тіл, у результаті чого тіло набуває прискорення або (і) деформується. Одиниця сили в СІ — ньютон (Н). Якщо на матеріальну точку одночасно діють кілька сил, їх можна замінити рівнодійною ($\vec{F}$): $\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_n$.

- Основний закон динаміки — другий закон Ньютона: прискорення, якого набуває тіло під дією сили, прямо пропорційне цій силі та обернено пропорційне масі тіла: $\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m}$. Цей закон виконується тільки в інерціальних СВ.

- Третій закон Ньютона — це закон взаємодії: тіла взаємодіють із силами, що мають одну природу, напрямлені вздовж однієї прямої, рівні за модулем і протилежні за напрямком: $\vec{F}_1 = -\vec{F}_2$. Пара сил, що виникають під час взаємодії двох тіл, не зрівноважують одна одну, оскільки прикладені до різних тіл.



Контрольні запитання

1. Охарактеризуйте силу та масу як фізичні величини. **2.** Дайте означення інертності. **3.** На яких властивостях тіла ґрунтується кожний зі способів вимірювання маси? **4.** Від яких чинників залежить прискорення руху тіла?

5. Сформулюйте другий закон Ньютона. 6. Як записати другий закон Ньютона, якщо на тіло діють кілька сил? 7. Сформулюйте третій закон Ньютона. Наведіть приклади його прояву. 8. Коли пара сил, що виникають під час взаємодії двох тіл, зрівноважують одна одну?



Вправа № 10

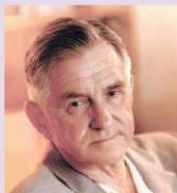
1. Завдяки інертності можна зекономити автомобільне паливо. Як і чому це можливо?
2. Чи буде рухатися візок (див. рисунок), якщо магніти досить потужні? Відповідь обґрунтуйте.
3. Більярдна куля під дією двох взаємно перпендикулярних сил 0,81 і 1,08 Н набуває прискорення 5 м/с^2 . Визначте масу кулі.
4. Із 1 січня 2018 р. в Україні діє закон, що обмежує швидкість руху транспортних засобів у населених пунктах 50 км/год, тоді як раніше було 60 км/год. У скільки разів сила удару в разі ДТП буде меншою, якщо шлях, який проходить транспортний засіб до зупинки, залишиться тим самим?
5. Дайте відповіді на запитання, поставлені на початку § 10.
6. Поясніть твердження: «Інертність — це властивість тіла, інерція — це явище природи».
7. Хлопець масою 60 кг стрибає з висоти 1,8 м. Із якою силою ноги хлопця вдаряться об землю, якщо він: 1) не зігнув коліна і час зупинки склав 0,1 с? 2) зігнув коліна, внаслідок чого час зупинки збільшився в 10 разів?
8. *Класична задача.* Кінь тягне віз. Відповідно до третього закону Ньютона: з якою силою кінь тягне віз, із такою самою силою віз тягне коня. Чому ж тоді віз рухається за конем, а не навпаки?
9. Придумайте кілька простих задач на застосування другого та третього законів Ньютона. Оформте і розв'яжіть отримані задачі. Скористайтесь додатковими джерелами інформації, щоб дані в умовах задач були реальними.



Експериментальне завдання

Запропонуйте кілька експериментів для перевірки третього закону Ньютона. Проведіть такі експерименти.

Фізика і техніка в Україні



Олег Костянтинович Антонов (1906–1984) — видатний український радянський літакобудівник, провідний авіаконструктор СРСР, академік АН УРСР і АН СРСР. О. К. Антонов — один із засновників радянського планеризму. Він створив понад 50 типів планерів, на яких було встановлено численні світові рекорди. Проте світову славу О. К. Антонов здобув як конструктор надійних пасажирських і транспортних літаків.

Із 1946 р. О. К. Антонов — головний, а з 1967 р. — генеральний конструктор дослідно-конструкторського бюро, яке зараз має назву Державне підприємство «Антонов».

Під керівництвом О. К. Антонова розроблено транспортні літаки Ан-8, Ан-12, Ан-22, Ан-26, Ан-32, Ан-72, багатоцільові літаки Ан-2, Ан-14, пасажирські літаки Ан-10, Ан-24 та ін. Транспортні літаки Ан-124 «Руслан» і Ан-225 «Мрія» і сьогодні незамінні для перевезень великогабаритних вантажів.

НАНУ заснувала премію ім. О. К. Антонова за видатні досягнення в галузі технічної механіки та літакобудування.