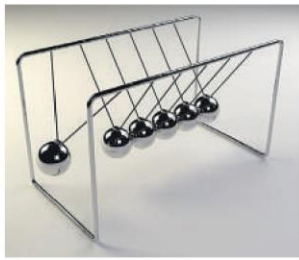


§ 17. ІМПУЛЬС ТІЛА. РЕАКТИВНИЙ РУХ. ПРУЖНЕ І НЕПРУЖНЕ ЗІТКНЕННЯ



Багато хто з вас бачив іграшку «коліска Ньютона» — кілька сталевих кульок, підвішених упритул одна до одної. Якщо першу кульку відвести вбік і відпустити, то остання відхилиться приблизно на такий самий кут, на який було відведено першу кульку. Повернувшись, остання кулька вдарить систему з решти п'яти кульок, після чого знову відхилиться перша кулька, а потім усе повториться. При цьому середні кульки залишаються практично нерухомими. Дію цієї іграшки легко пояснити, якщо скористатися законом збереження енергії та законом збереження імпульсу.



Рис. 17.1. Чим більша сила діє на тіло і чим триваліша дія цієї сили, тим сильніше змінюється імпульс тіла

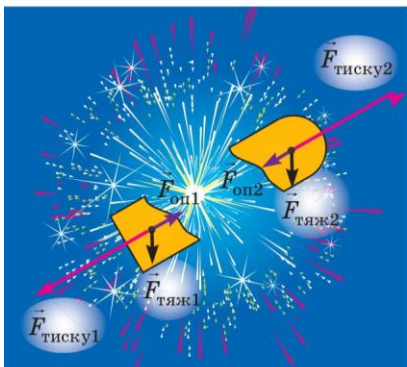


Рис. 17.2. Під час розриву снаряду для феєрверка сумарний імпульс системи зберігається, оскільки в момент розриву зовнішні сили (сила тяжіння та сила опору) незначні порівняно із силами тиску порохових газів

1 Імпульс тіла. Закон збереження імпульсу

У § 16 ви згадали закон збереження механічної енергії, а в цьому згадаєте ще одну фізичну величину, яка має властивість зберігатися, — *імпульс тіла*.

Імпульс тіла $\vec{p}$ — це векторна фізична величина, яка дорівнює добутку маси m тіла на швидкість $\vec{v}$ його руху:

$$\vec{p} = m\vec{v}$$

Одиниця імпульсу тіла в СІ — кілограм-метр за секунду: $[p] = 1 \text{ кг} \cdot \frac{\text{м}}{\text{с}} \left(\text{кг} \cdot \frac{\text{м}}{\text{с}} \right)$.

Запишемо *другий закон Ньютона в імпульсному вигляді*: $\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m} \Rightarrow \frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{t} = \frac{\vec{F}}{m}$, тобто:

$$\vec{F}t = m\vec{v} - m\vec{v}_0, \text{ або } \vec{F}t = \vec{p} - \vec{p}_0.$$

Величину $\vec{F}t$ називають **імпульсом сили**. Отже, *імпульс сили дорівнює зміні імпульсу тіла*: $\vec{F}t = \Delta \vec{p}$ (див. рис. 17.1).

? Як змінюється імпульс вашого тіла, коли на змаганнях із бігу ви зі старту набираєте швидкість 8 м/с? Знайдіть середнє значення сили, з якою ви відштовхуєтесь від ґрунту, якщо розбіг триває 2 с.

У *замкненій системі тіл* — системі, в якій тіла взаємодіють лише одне з одним, а зовнішні сили відсутні, зрівноважені або нехтовно малі (див., наприклад, рис. 17.2), *сумарний імпульс тіл*

залишається незмінним (зберігається), тобто виконується **закон збереження імпульсу**:

У замкненій системі тіл векторна сума імпульсів тіл до взаємодії дорівнює векторній сумі імпульсів тіл після взаємодії:

$$\vec{p}_{01} + \vec{p}_{02} + \dots + \vec{p}_{0n} = \vec{p}_1 + \vec{p}_2 + \dots + \vec{p}_n,$$

де n — кількість тіл системи.

Ураховуючи, що імпульс тіла дорівнює добутку маси m і швидкості $\vec{v}$ руху тіла, закон збереження імпульсу можна записати так:

$$m_1\vec{v}_{01} + m_2\vec{v}_{02} + \dots + m_n\vec{v}_{0n} = m_1\vec{v}_1 + m_2\vec{v}_2 + \dots + m_n\vec{v}_n$$

Із проявами закону збереження імпульсу ми маємо справу в природі, техніці, побуті тощо. Розглянемо два приклади застосування цього закону: *реактивний рух і зіткнення тіл*.

2 Від чого відштовхуються ракети

Згадайте дослід із кулькою, яка рухається завдяки повітрю, що виривається з її отвору (рис. 17.3). Цей рух — приклад *реактивного руху*.

Реактивний рух — це рух, що виникає внаслідок відділення з деякою швидкістю від тіла якоїсь його частини.

Реактивний рух можна спостерігати в природі (рис. 17.4); його широко використовують у техніці: найпростіші поливні системи, автомобілі на реактивній тязі, катери з водометними двигунами, реактивні літаки й, звичайно, *ракети*, адже реактивний рух — це єдиний спосіб пересуватися в безповітряному просторі.

Ракета — літальний апарат, який переміщується в просторі завдяки реактивній тязі, що виникає внаслідок відкидання ракетою частини власної маси.

Відокремлюваною частиною ракети є струмінь гарячого газу, який утворюється під час згоряння палива. Коли газовий струмінь із величезною швидкістю викидається із сопла ракети, то оболонка ракети одержує потужний імпульс, направлений у бік, протилежний руху струменя.

Якби паливо згорало миттєво, а розпечений газ відразу цілком викидався б із ракети, то закон збереження імпульсу для системи «оболонка ракети — розпечений газ» мав би вигляд: $0 = m_{\text{об}}\vec{v}_{\text{об}} + m_{\text{газу}}\vec{v}_{\text{газу}}$ (оскільки до старту імпульс системи дорівнює нулю), а отже, оболонка ракети набувала б

швидкості:
$$\vec{v}_{\text{об}} = -\frac{m_{\text{газу}}\vec{v}_{\text{газу}}}{m_{\text{об}}}.$$

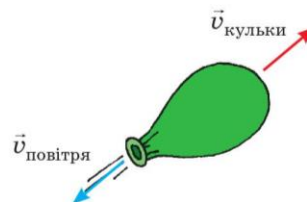


Рис. 17.3. Реактивний рух повітряної кульки

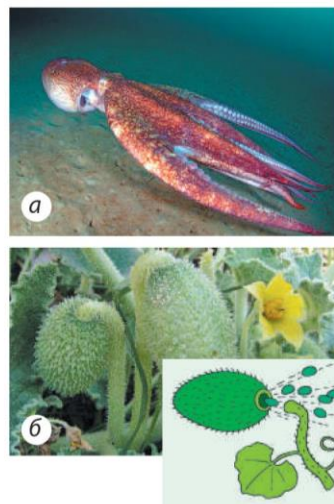


Рис. 17.4. Завдяки реактивному руху пересуваються багато мешканців морів і океанів (а); «шалений огірок» (огірок-пирскач) може подолати відстань до 12 м, розсіюючи по дорозі насіння (б)



13 квітня 2018 р. виповнилося 25 років із дня першого запуску української ракети-носія «Зеніт», створеної в конструкторському бюро «Південне» і на заводі «Південмаш» (Дніпро).

Зараз удосконалена триступенева ракета-носіїв «Зеніт-3SL» є найдосконалішим і найпотужнішим літальним апаратом свого класу у світі. Екологічно чистий (працює на кисні та гасі), недорогий, надійний «Зеніт» може бути запущений за будь-яких метеорологічних умов, здатен виводити на навколоземну орбіту супутники масою до 13 т.

Винахідник і підприємець Ілон Маск, засновник компанії SpaceX, яка працює в галузі будівництва космічного транспорту, на запитання журналістки про улюблену ракету відповів: «Найкраща ракета (після моєї) — це «Зеніт»».

На жаль, паливо згоряє поступово, тому частину газу доводиться «розганяти» разом із оболонкою; до того ж систему «оболонка ракети — розпечений газ» не можна вважати замкненою (зі збільшенням швидкості руху ракети значно зростає опір повітря). Обчислення з урахуванням цих і низки інших чинників показують, що для досягнення першої космічної швидкості (8 км/с) маса палива має у 200 разів перевищувати масу оболонки. А треба ж піднімати на орбіту не лише оболонку, а й обладнання, космонавтів, запаси води, кисню тощо. Через це виникла ідея використання *багатоступневих ракет*. Кожний ступінь такої ракети має запас палива та власний реактивний двигун, який розганяє ракету, доки не витратить паливо. Після цього ступінь відкидається, полегшуючи решту ракети та надаючи їй додаткового імпульсу.

Саме на багатоступневих ракетах було зроблено перші кроки людства в космос: 4 жовтня 1957 р. радянські вчені вивели на навколоземну орбіту *перший штучний супутник* Землі, а 12 квітня 1961 р. — космічний корабель «Восток», на борту якого був *перший у світі космонавт Юрій Олексійович Гагарін*; 21 липня 1969 р. американські астронавти *Ніл Армстронг і Базз Олдрін уперше висадилися на Місяці*.

Пройшло лише 60 років, а ми вже не можемо уявити своє життя без космосу. Згадайте: супутникове телебачення і супутниковий зв'язок, система GPS і супутниковий Інтернет, надійний прогноз погоди та супутникові карти. Зараз створено космічні кораблі багаторазового використання, космічні апарати висадилися на Венеру, Марс та інші планети Сонячної системи.

3 Пружне і непружне зіткнення

Короткочасну взаємодію тіл, у ході якої тіла безпосередньо торкаються одне одного, називають **зіткненням**.

У системі тіл, що стикаються, в ході зіткнення зазвичай виникають великі (порівняно

із зовнішніми) внутрішні сили, тому під час зіткнення систему тіл можна вважати замкненою і, розглядаючи зіткнення, використовувати закон збереження імпульсу. А от повна механічна енергія зберігається не завжди. Потенціальна енергія тіл безпосередньо до зіткнення і відразу після нього в більшості випадків є однаковою, тому далі йтиметься лише про кінетичну енергію.

Якщо після зіткнення сумарна кінетична енергія тіл зберігається, таке зіткнення називають **пружним** (рис. 17.5).

Якщо після зіткнення частина кінетичної енергії перетворюється на внутрішню енергію (витрачається на деформацію та нагрівання тіл), таке зіткнення називають **непружним**. Непружне зіткнення, після якого тіла рухаються як єдине ціле, називають **абсолютно neprужним** (рис. 17.6).

Якщо швидкості руху тіл до і після зіткнення (пружного чи neprужного) направлені вздовж прямої, що проходить через центри мас цих тіл, таке зіткнення називають **центральною**.

Абсолютне neprужне та пружне центральні зіткнення розглянемо на прикладах розв'язування задач.

4 Учимся розв'язувати задачі

Задача 1. Дві кульки масами 300 і 200 г, які рухаються зі швидкостями 4 і 2 м/с відповідно, зазнають центрального абсолютно neprужного зіткнення. Визначте, скільки кінетичної енергії кульок перетвориться на внутрішню, якщо: 1) кульки рухаються назустріч одна одній; 2) кульки рухаються одна за одною.

Дано:

$$m_1 = 0,3 \text{ кг}$$

$$m_2 = 0,2 \text{ кг}$$

$$v_{01} = 4 \text{ м/с}$$

$$v_{02} = 2 \text{ м/с}$$

$$E_{k0} - E_k - ?$$

$$E_{k0} - E'_k - ?$$

Аналіз фізичної проблеми. Зіткнення абсолютно neprужне, тому: 1) після зіткнення кульки рухаються як одне ціле; 2) сумарний імпульс системи зберігається; 3) кінетична енергія системи зменшується (частина енергії перетворюється на внутрішню).

Розв'язання

Знайдемо сумарну кінетичну енергію системи кульок до зіткнення:

$$E_{k0} = E_{k01} + E_{k02} = \frac{m_1 v_{01}^2}{2} + \frac{m_2 v_{02}^2}{2}; \quad E_{k0} = \frac{0,3 \cdot 16}{2} + \frac{0,2 \cdot 4}{2} = 2,8 \text{ (Дж)}.$$

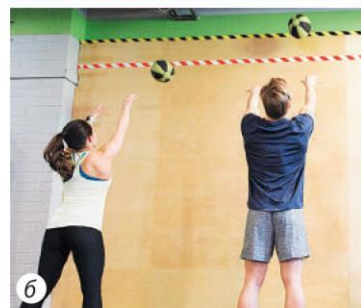


Рис. 17.5. Зіткнення більярдних куль (а), удари м'яча по бетонній стіні (б) можна вважати пружними

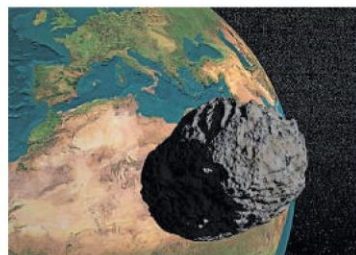
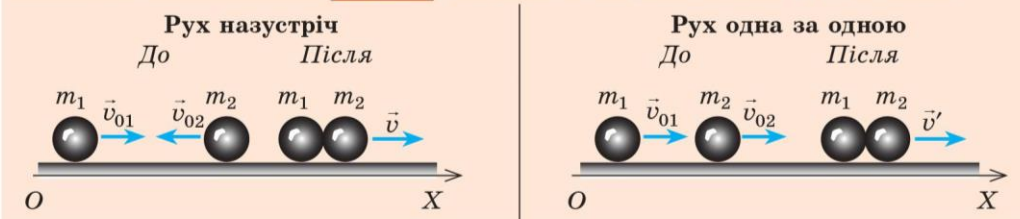


Рис. 17.6. Зіткнення метеорита із Землею є прикладом абсолютно neprужного зіткнення

Виконаємо пояснювальні рисунки; вісь OX спрямуємо вздовж руху кульок:



Запишемо закон збереження імпульсу у векторному вигляді та в проекціях на вісь OX :

$$\begin{aligned} m_1 \vec{v}_{01} + m_2 \vec{v}_{02} &= (m_1 + m_2) \vec{v}; \\ m_1 v_{01} - m_2 v_{02} &= (m_1 + m_2) v. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} m_1 \vec{v}_{01} + m_2 \vec{v}_{02} &= (m_1 + m_2) \vec{v}'; \\ m_1 v_{01} + m_2 v_{02} &= (m_1 + m_2) v'. \end{aligned}$$

Знайдемо швидкість руху кульок після зіткнення:

$$\begin{aligned} v &= \frac{m_1 v_{01} - m_2 v_{02}}{m_1 + m_2}; \\ v &= \frac{0,3 \cdot 4 - 0,2 \cdot 2}{0,3 + 0,2} = 1,6 \text{ м/с}. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} v' &= \frac{m_1 v_{01} + m_2 v_{02}}{m_1 + m_2}; \\ v' &= \frac{0,3 \cdot 4 + 0,2 \cdot 2}{0,3 + 0,2} = 3,2 \text{ м/с}. \end{aligned}$$

Знайдемо сумарну кінетичну енергію системи кульок після зіткнення:

$$\begin{aligned} E_k &= \frac{(m_1 + m_2) v^2}{2}; \\ E_k &= \frac{0,5 \cdot 1,6^2}{2} = 0,64 \text{ (Дж)}. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} E'_k &= \frac{(m_1 + m_2) v'^2}{2}; \\ E'_k &= \frac{0,5 \cdot 3,2^2}{2} = 2,56 \text{ (Дж)}. \end{aligned}$$

Визначимо зменшення кінетичної енергії системи кульок:

$$E_{k0} - E_k = 2,8 \text{ Дж} - 0,64 \text{ Дж} = 2,16 \text{ Дж}. \quad E_{k0} - E'_k = 2,8 \text{ Дж} - 2,56 \text{ Дж} = 0,24 \text{ Дж}.$$

Відповідь: 1) 2,16 Дж; 2) 0,24 Дж.

Аналіз результату. Бачимо, що в разі лобового зіткнення кульок на внутрішню енергію перетворюється значно більша кількість механічної енергії.



Поміркуйте, як отримані результати стосуються аварій на дорогах.

Задача 2. Дві кульки однакової маси, які рухаються зі швидкостями 4 і 2 м/с відповідно, зазнають центрального пружного зіткнення. Визначте швидкості руху кульок після зіткнення, якщо: 1) кульки рухаються назустріч одна одній; 2) кульки рухаються одна за одною.

Дано:
 $m_1 = m_2 = m$
 $v_{01} = 4 \text{ м/с}$
 $v_{02} = 2 \text{ м/с}$
 $v_1 — ?$
 $v_2 — ?$

Аналіз фізичної проблеми. Зіткнення пружне, тому: 1) після зіткнення кульки рухаються із різними швидкостями; 2) сумарний імпульс системи зберігається, оскільки зовнішні сили, які діють на кульки, скомпенсовані; 3) кінетична енергія системи не змінюється. Для розв'язання задачі скористаємося законом збереження імпульсу та законом збереження механічної енергії.

Виконаємо пояснювальні рисунки; вісь OX спрямуємо вздовж руху кульок.

Рух назустріч		Рух одна за одною	
До	Після	До	Після
Запишемо закон збереження імпульсу в проекціях на вісь OX і закон збереження кінетичної енергії:			
$m_1 v_{01} - m_2 v_{02} = -m_1 v_1 + m_2 v_2 ;$ $\frac{m_1 v_{01}^2}{2} + \frac{m_2 v_{02}^2}{2} = \frac{m_1 v_1^2}{2} + \frac{m_2 v_2^2}{2} .$		$m_1 v_{01} + m_2 v_{02} = m_1 v_1' + m_2 v_2' ;$ $\frac{m_1 v_{01}^2}{2} + \frac{m_2 v_{02}^2}{2} = \frac{m_1 v_1'^2}{2} + \frac{m_2 v_2'^2}{2} .$	
Урахуємо, що $m_1 = m_2 = m$, і після скорочення отримаємо систему рівнянь:			
$\begin{cases} v_{01} - v_{02} = -v_1 + v_2, \\ v_{01}^2 + v_{02}^2 = v_1^2 + v_2^2. \end{cases}$		$\begin{cases} v_{01} + v_{02} = v_1' + v_2', \\ v_{01}^2 + v_{02}^2 = v_1'^2 + v_2'^2. \end{cases}$	
Після простих перетворень маємо:			
$\begin{cases} v_{01} + v_1 = v_2 + v_{02}, \\ v_{01}^2 - v_1^2 = v_2^2 - v_{02}^2. \end{cases}$		$\begin{cases} v_{01} - v_1' = v_2' - v_{02}, \\ v_{01}^2 - v_1'^2 = v_2'^2 - v_{02}^2. \end{cases}$	
Поділимо друге рівняння системи на перше й отримаємо ще простішу систему:			
$\begin{cases} v_{01} + v_1 = v_2 + v_{02}, \\ v_{01} - v_1 = v_2 - v_{02}. \end{cases}$		$\begin{cases} v_{01} - v_1' = v_2' - v_{02}, \\ v_{01} + v_1' = v_2' + v_{02}. \end{cases}$	
Розв'яжемо отриману систему рівнянь методом додавання та знайдемо швидкості руху кульок після зіткнення:			
$v_2 = v_{01}; \quad v_1 = v_{02}.$		$v_2' = v_{01}; \quad v_1' = v_{02}.$	
Відповідь: для обох випадків $v_1 = v_{02} = 2$ м/с; $v_2 = v_{01} = 4$ м/с.			

Бачимо, що під час пружного центрального зіткнення тіла однакової маси обмінюються швидкостями.



Сподіваємось, тепер вам неважко пояснити, як працює «коліска Ньютона».



Підбиваємо підсумки

- Імпульс тіла $\vec{p}$ — це векторна фізична величина, яка дорівнює добутку маси m тіла на швидкість $\vec{v}$ його руху: $\vec{p} = m\vec{v}$. Зміна імпульсу тіла дорівнює імпульсу сили: $\Delta \vec{p} = \vec{F}t$.
- Систему тіл можна вважати замкненою, якщо зовнішні сили, що діють на систему, зрівноважені або набагато менші за внутрішні сили системи. У замкненій системі тіл виконується закон збереження імпульсу: геометрична сума імпульсів тіл до взаємодії дорівнює геометричній сумі імпульсів тіл після взаємодії: $m_1 \vec{v}_{01} + m_2 \vec{v}_{02} + \dots + m_n \vec{v}_{0n} = m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2 + \dots + m_n \vec{v}_n$.
- Реактивний рух — це рух, який виникає внаслідок відділення з деякою швидкістю від тіла якоїсь його частини; це єдиний спосіб пересуватися в безповітряному просторі.



Контрольні запитання

1. Охарактеризуйте імпульс тіла як фізичну величину.
2. Сформулюйте другий закон Ньютона в імпульсному вигляді.
3. Сформулюйте та запишіть закон збереження імпульсу.
4. Який рух називають реактивним? Наведіть приклади.
5. Чому для запуску з поверхні Землі космічних кораблів використовують багатоступеневі ракети?
6. Яке зіткнення називають непружним? абсолютно непружним? пружним? центральним? Наведіть приклади.
7. Яким є результат пружного центрального зіткнення тіл однакової маси?



Вправа № 17

1. Дві кульки рухаються в одному напрямку (рис. 1). Як зміниться імпульс системи кульок після зіткнення? Відповідь обґрунтуйте.
2. На рис. 2–4 наведено умови трьох задач. Розв'яжіть задачі, скориставшись законом збереження імпульсу.



Рис. 1

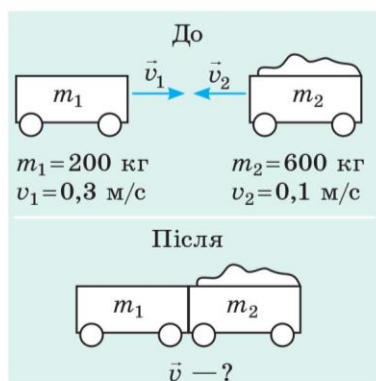


Рис. 2

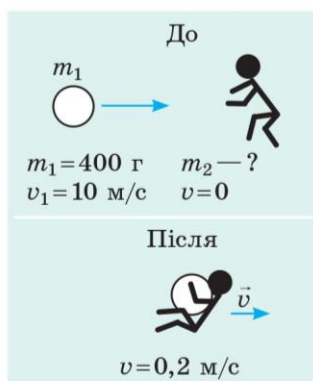


Рис. 3

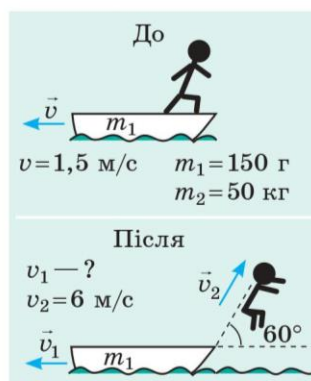


Рис. 4

3. Якою є маса кульки, якщо внаслідок пружного центрального зіткнення з нерухомою кулькою масою 1 кг швидкість її руху зменшилася від 4 до 2 м/с? Розгляньте два можливі випадки.
4. Визначте, який спортсмен надає спортивному снаряду найбільшого імпульсу: штовхач ядра — ядру; гравець у боулінг — кулі; гравець у гольф — м'ячу. Необхідні дані щодо мас і швидкостей руху снарядів знайдіть у додаткових джерелах інформації.



Експериментальні завдання

1. Візьміть дві однакові монети. Одну покладіть на аркуш і обведіть олівцем. Щиглем штовхніть на неї другу монету так, щоб зіткнення монет не було центральним. Проведіть лінії руху монет, виміряйте кут між напрямками їх руху. Повторіть дослід кілька разів, змінюючи швидкість руху монети. Поясніть одержані результати.
2. Візьміть два пружні м'ячі різного розміру, покладіть великий м'яч на маленький (рис. 5), розташуйте м'ячі над твердою поверхнею та відпустіть. Повторіть дослід, розмістивши цього разу маленький м'яч над великим. Поясніть спостережувані явища.



Рис. 5