



§ 32.

Закон захавання імпульсу. Рэактыўны рух

Знакаміты французскі філосаф і матэматык Рэнэ Дэкарт (1596 — 1650) сцвярджаў: «У Сусвеце ёсць вядомая колькасць руху, якая ніколі не змяняецца. І калі адно цела прыводзіць у рух другое, то яно губляе столькі свайго руху, колькі яго надае». Як вывесці гэта сцверджанне з закону змянення імпульсу?

У папярэднім параграфі мы даказалі, што імпульс сістэмы цел можа змяніцца толькі пад дзеяннем знешніх сіл:

$$\Delta \vec{p}_{\text{сіст}} = \vec{F}_{\text{знеш}} \Delta t. \quad (1)$$

А калі выніковая знешніх сіл $\vec{F}_{\text{знеш}} = \vec{0}$? Тады змяненне імпульсу $\Delta \vec{p}_{\text{сіст}} = \vec{0}$, і імпульс сістэмы застаецца пастаянным:

$$\vec{p}_{\text{сіст}} = \overline{\text{const}}. \quad (2)$$

Вектарная роўнасць (2) выражае *закон захавання імпульсу*. Імпульс механічнай сістэмы захоўваецца, калі выніковая знешніх сіл, што дзейнічаюць на яе, роўна нулю.

У якіх выпадках можна выкарыстоўваць закон захавання імпульсу? Перш за ўсё — калі на сістэму ўвогуле не дзейнічаюць знешнія сілы. Такія сістэмы называюць замкнутымі. Імпульс замкнутай сістэмы не змяняецца (захоўваецца), як і сцвярджаў Дэкарт.

Рэальныя механічныя сістэмы не бываюць замкнутымі. На ўсе целы вакол нас дзейнічае Зямля, на Зямлю дзейнічае Сонца і г. д. Аднак закон захавання імпульсу можна выкарыстоўваць і для незамкнутых сістэм, калі:

- знешнія сілы дзейнічаюць, але іх выніковая $\vec{F}_{\text{знеш}} = \vec{0}$;
- сістэмы «замкнутыя» ў дадзеным напрамку, г. зн. праекцыя $\vec{F}_{\text{знеш}}$ на гэты напрамак роўна нулю. У гэтым выпадку захоўваецца праекцыя $\vec{p}_{\text{сіст}}$ на гэты напрамак;
- знешнія сілы малыя або іх можна не ўлічваць.

Напрыклад, закон захавання імпульсу выкарыстоўваюць пры рашэнні задач аб сутыкненні цел, выстралах і г. д., калі на працягу вельмі малых прамежкаў часу ўнутры сістэмы ўзнікаюць вялізныя сілы. Разгледзім прыклад. Драўляны кубік масай M ляжыць на гарызантальным сталі. У кубік трапляе куля масай m і засядае ў

ім (мал. 234). Скорасць кулі \vec{v}_0 перад ударам гарызантальная. Трэба знайсці скорасць \vec{v} , якую набыў кубік.

Ці замкнутая сістэма «кубік + пуля»? Не. Але сіла цяжару сістэмы скампенсавана сілай рэакцыі апоры, а сіла трэння кубіка аб паверхню стала малая. Значыць, велічыню $\vec{F}_{\text{знеш}} \Delta t$ (дзе Δt — час удару) можна не ўлічваць і прыраўнаваць імпульс сістэмы «кубік + пуля» да ўдару (роўны $m\vec{v}_0$) да імпульсу гэтай сістэмы пасля ўдару $(m + M)\vec{v}$:

$$m\vec{v}_0 = (m + M)\vec{v}.$$

Значыць, скорасць кубіка разам з куляй пасля ўдару

$$\vec{v} = \frac{m}{m + M}\vec{v}_0. \quad (3)$$

Удар, у выніку якога целы аб'ядноўваюцца і паводзяць сябе як адзінае цэлае, называюць *абсалютна няпружкім ударам*.

Разгледжаны прыклад — прыватны выпадак такога ўдару. Іншымі прыкладамі з'яўляюцца злучэнне вагонаў пры счэпцы, склейванне пластылінавых шарыкаў пры ўдары і г. д.

Разгледзім цяпер прыклад, у якім адбываецца не аб'яднанне, а падзел частак сістэмы.

На гарызантальных чыгуначных рэйках стаіць платформа (мал. 235) з замацаванай на ёй гарматай. Устаноўка можа свабодна каціцца па рэйках. Ствол гарматы гарызантальны. Гармата робіць выстрал. Платформа набывае скорасць, накіраваную супраць скорасці снарада.

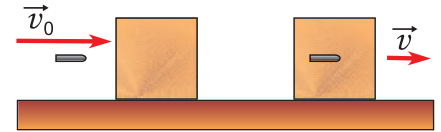
Як знайсці скорасць \vec{v}_1 платформы? Сіла цяжару, якая дзейнічае на ўстаноўку, кампенсавана сілай рэакцыі рэек. Трэнне качэння можна не ўлічваць. Значыць, як і ў папярэднім прыкладзе, можна выкарыстаць закон захавання імпульсу.

Паколькі імпульс сістэмы да выстрала быў роўны нулю, то пасля выстрала:

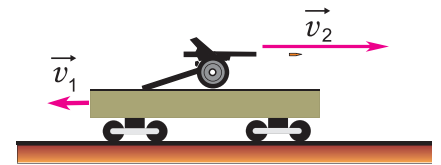
$$m_1\vec{v}_1 + m_2\vec{v}_2 = \vec{0}, \quad (4)$$

дзе m_1 — маса ўстаноўкі, m_2 — маса снарада, \vec{v}_1 і \vec{v}_2 — іх скорасці пасля выстралу (мал. 235). З роўнасці (4) знаходзім скорасць платформы:

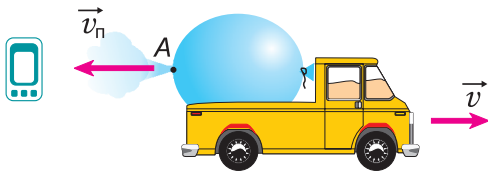
$$\vec{v}_1 = -\frac{m_2}{m_1}\vec{v}_2. \quad (5)$$



Мал. 234



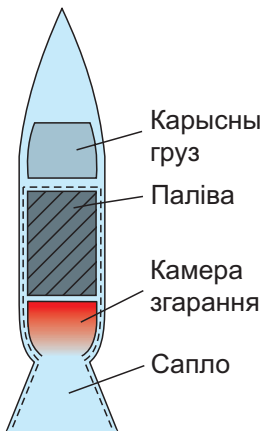
Мал. 235



Мал. 236



Мал. 237



Мал. 238

Чаму платформа пачала рухацца? Таму, што парахавыя газы, якія ўтварыліся ў канале ствала пры выстрале, дзейнічалі як на снарад, так і на гармату. Сіла, прыкладзеная да гарматы, выклікала рух платформы з гарматай у напрамку, процілеглым руху снарада («аддачу»).

Аналагічную з'яву можна назіраць на простым доследзе. Прымацуюем да цацачнага аўтамабіля надзьмуты паветраны шарык (мал. 236). Праколем яго ў пункце А іголкай. Утворацца струмень паветра, які вырываецца з шарыка, і аўтамабіль пачне рухацца.

Гэты рух узнік пры аддзяленні ад цела яго часткі з некаторай скорасцю, не роўнай нулю. Яго называюць *рэактыўным рухам*, а сілу, якая паскарае цела, — *рэактыўнай сілай*.

Рэактыўная сіла ўзнікае пры аддзяленні ад цела якой-небудзь яго часткі са скорасцю, не роўнай нулю (адносна цела).

Устройства, якое стварае рэактыўную сілу, называецца *рэактыўным рухавіком*.

Рэактыўнымі рухавікамі аснашчаны скарасныя самалёты, сучасныя касмічныя караблі (мал. 237). Спрошчаная схема рэактыўнага рухавіка паказана на малюнку 238.

Якую скорасць \vec{v} набывае ракета масай m_1 , калі яе рухавік выкіне порцыю газу масай m са скорасцю \vec{v}_r ?

Паводле закону захавання імпульсу з формулы (5) атрымаем модуль скорасці, якую набывае ракета:

$$v = \frac{m}{m_1} v_r. \quad (6)$$

Значыць, ракета набірае тым большую скорасць, чым большая скорасць выцякання газу з яе сапла і чым меншая яе маса. Адсюль зразумела выгада выкарыстання многаступенчатых ракет (мал. 238). Па меры выгарання паліва ў ступені яе аддзяляюць. Маса ракеты памяншаецца, што палягчае яе далейшы разгон. З дапамогай многаступенчатых ракет выводзяць на арбіту штучныя спадарожнікі Зямлі, даследуюць каляземную і міжпланетную касмічную прастору.

Першы ў свеце штучны спадарожнік Зямлі быў запушчаны ў 1957 г. у СССР. Першы арбітальны палёт чалавека вакол Зямлі

здзейсніў лётчык-касманаўт Ю. Гагарын у 1961 г. Амерыканскія астранаўты Н. Армстронг і Э. Олдрын у 1969 г. першымі высадзіліся на паверхню Месяца.

Ракетна-касмiчныя даследаванні сталі неад'емнай часткай сучаснай цывiлiзацыi. Сярод касманаўтаў ёсць ураджэнцы Беларусi: П. I. Клімук, У. В. Кавалёнак, А. В. Навіцкі. З касмадрома «Байка-нур» 22 ліпеня 2012 г. быў запушчаны Беларускі касмічны апарат (БКА) — спадарожнік масай 400 кг. Ён забяспечвае дыстанцыйнае зандзіраванне тэрыторыі Беларусі шляхам здымкі з космасу.

Галоўныя вывады

1. Калі выніковая знешніх сіл роўна нулю, то імпульс сістэмы захоўваецца.
2. Закон захавання імпульсу можна выкарыстаць у дачыненні да незамкнутых сістэм, калі ўплыў знешніх сіл можна не ўлічваць.
3. Рэактыўная сіла ўзнікае пры аддзяленні ад цэла якой-небудзь яго часткі з не роўнай нулю скорасцю.

Кантрольныя пытанні

1. Што адбудзецца з імпульсам сістэмы, калі на яе перастануць дзейнічаць знешнія сілы?
2. У якіх выпадках у дачыненні да незамкнутай сістэмы можна выкарыстоўваць закон захавання імпульсу?
3. Якую сілу называюць рэактыўнай? Прывядзіце прыклады.
4. За кошт чаго павялічваецца скорасць ракеты ў працэсе яе руху?
5. Чаму для запуску касмічных караблёў выкарыстоўваюць многаступеньчатыя ракеты?



Прыклад рашэння задачы

Два вагоны масамі $m_1 = 10$ т і $m_2 = 20$ т рухаліся па гарызантальным участку шляху насустрач адзін аднаму. Модулі скорасці руху вагонаў $v_1 = 0,1 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ і $v_2 = 0,2 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ адпаведна. Вызначыце модуль і напрамак скорасці руху вагонаў пасля спрацоўвання аўтасчэпкі.

Дадзена:

$$m_1 = 10 \text{ т} = 1,0 \cdot 10^4 \text{ кг}$$

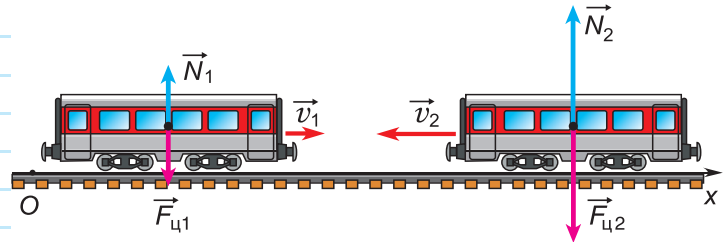
$$m_2 = 20 \text{ т} = 2,0 \cdot 10^4 \text{ кг}$$

$$v_1 = 0,1 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

$$v_2 = 0,2 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

\vec{v} — ?

Рашэнне



Мал. 239

На сістэму з двух вагонаў (мал. 239) дзейнічаюць знешнія сілы: сілы цяжару $\vec{F}_{ц1} = m_1 \vec{g}$ і $\vec{F}_{ц2} = m_2 \vec{g}$ і сілы рэакцыі рэак \vec{N}_1 і \vec{N}_2 , якія кампенсуюць іх. Сілы трэння качэння малыя, іх можна не ўлічваць.

У выніку сума знешніх сіл, якія дзейнічаюць на вагоны, роўна нулю. Значыць, да сістэмы з двух вагонаў можна прымяніць закон захавання імпульсу: $m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2 = (m_1 + m_2) \vec{v}$. Тут \vec{v} — скорасць вагонаў пасля счэпкі. У праекцыі на вось Ox атрымаем: $m_1 v_1 - m_2 v_2 = (m_1 + m_2) v_x$.

Адсюль
$$v_x = \frac{m_1 v_1 - m_2 v_2}{m_1 + m_2};$$

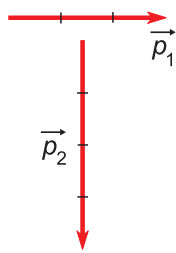
$$v_x = \frac{1,0 \cdot 10^4 \text{ кг} \cdot 0,1 \frac{\text{м}}{\text{с}} - 2,0 \cdot 10^4 \text{ кг} \cdot 0,2 \frac{\text{м}}{\text{с}}}{(1,0 + 2,0) \cdot 10^4 \text{ кг}} = \frac{0,1 \frac{\text{м}}{\text{с}} - 0,4 \frac{\text{м}}{\text{с}}}{3,0} = -0,1 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Знак «-» паказвае на тое, што пасля аўтасчэпкі вагоны будуць рухацца супраць напрамку восі Ox .

Адказ: скорасць \vec{v} накіравана супраць восі Ox ; $v = 0,1 \frac{\text{м}}{\text{с}}$.



Мал. 240



Мал. 241

Практыкаванне 25

1. На малюнку 240, а паказаны імпульс \vec{p} замкнутай сістэмы з двух цел у момант часу t . У момант часу $t_1 > t$ імпульс першага цела стаў роўны \vec{p}_1 (мал. 240, б). Пакажыце імпульс другога цела сістэмы ў момант часу t_1 . Якім будзе імпульс другога цела, калі імпульс першага цела стане роўным $-\vec{p}_1$?

2. Імпульсы цел замкнутай сістэмы ў момант часу t паказаны на малюнку 241. Які імпульс сістэмы ў момант часу $t_1 > t$? У момант часу $t_0 < t$?

3. Лодка масай $m_1 = 100$ кг рухаецца па возеры з пастаяннай скорасцю, модуль якой $v_1 = 1,5 \frac{\text{м}}{\text{с}}$. З лодкі саскоквае хлопчык масай $m_2 = 40$ кг. Вызначыце модуль скорасці і напрамак руху лодкі пасля скачка хлопчыка, калі хлопчык скокне:

а) з носа лодкі ў напрамку яе руху са скорасцю, модуль якой $v_2 = 2,0 \frac{\text{м}}{\text{с}}$;

б) таксама як у папярэднім выпадку, але пры $v_2 = 6,0 \frac{\text{м}}{\text{с}}$;

в) з кармы ў напрамку, процілеглым руху лодкі, пры $v_2 = 2,0 \frac{\text{м}}{\text{с}}$.

Вызначыце таксама напрамак і модуль скорасці, з якой павінен скокнуць хлопчык, каб лодка спынілася. Усе скорасці разглядаюцца ў сістэме адліку «бераг». У гэтай і наступных задачах сілу супраціўлення вады не ўлічваць.

4. На возеры ў стане спакою знаходзіцца плыт масай $m_1 = 300$ кг. На плыце стаіць чалавек масай $m_2 = 60$ кг. Вызначыце адлегласць, на якую адносна берага перамесціцца плыт, калі чалавек пройдзе па плыце шлях $s = 6,0$ м перпендыкулярна берагу.



5. Сын з бацькам сядзяць у нерухомай лодцы на адлегласці $l = 3,0$ м адзін ад аднаго і ловяць у возеры рыбу. Куды і на колькі перамесціцца лодка, калі сын з бацькам памяняюцца месцамі? Маса бацькі $m_1 = 80$ кг, маса сына $m_2 = 40$ кг, маса лодкі $M = 50$ кг.

6. Хлопчык масай $m_1 = 50$ кг, што бяжыць са скорасцю, модуль якой $v_1 = 6,0 \frac{\text{м}}{\text{с}}$, даганяе цялежку, што рухаецца са скорасцю, $v_2 = 0,6 \frac{\text{м}}{\text{с}}$, і заскоквае на яе. Маса цялежкі $m_2 = 30$ кг. Вызначыце скорасць руху цялежкі з хлопчыкам.

7. У той момант, калі лодка выплывае з-пад моста, у яе вертыкальна апускаюць з моста груз масай $m_1 = 40$ кг. Маса лодкі $m_2 = 120$ кг, модуль скорасці яе руху $v = 2,0 \frac{\text{м}}{\text{с}}$. Ці зменіцца скорасць лодкі пасля атрымання грузу і на колькі?

8. Механічная сістэма складаецца з двух цел. Ці можа імпульс аднаго з цел сістэмы быць большым за імпульс сістэмы? Адказ аргументуйце.



9. Тры хлопчыкі бягуць адзін за адным з аднолькавай скорасцю. Першы хлопчык заскоквае ў нерухомую цялежку, якая апынулася на яго шляху. Цялежка набывае скорасць $v_1 = 1,0 \frac{\text{м}}{\text{с}}$. Затым у гэту ж цялежку заскоквае другі хлопчык, і скорасць руху цялежкі становіцца $v_2 = 1,5 \frac{\text{м}}{\text{с}}$. З якой скорасцю будзе рухацца цялежка пасля таго, як у яе заскочыць трэці хлопчык? Масы хлопчыкаў аднолькавыя. Трэнне не ўлічваць.