

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ ТАРАСА ШЕВЧЕНКА

**О. О. Каленик,
І.В. Плющай,
Т. Л. Цареградська**

ФІЗИКА

ДЛЯ СТУДЕНТІВ-ІНОЗЕМЦІВ

Навчальний посібник



УДК
К

Рецензенти:

д-р фіз.-мат. наук, проф. Вільчинський С.Й.
д-р. фіз.-мат. наук, доц. Макаренко О.В.

*Рекомендовано до друку вченою радою
фізичного факультету
(протокол № від)*

*Схвалено науково-методичною радою
Київського національного університету імені Тараса Шевченка
(протокол № . від)*

Каленик О. О.

К17 Фізика для слухачів-іноземців : навч. посіб. / О.О. Каленик,
І.В. Плющай, Т. Л. Цареградська. – К. : ВПЦ "Київський університет",
2021. – 296 с.

ISBN 978-966-933-000-0

Посібник містить практичний курс, адаптований до вивчення слухачами-іноземцями основних явищ та законів фізики. Структура і зміст посібника відповідають програмі з фізики для підготовчих відділень. Посібник допоможе іноземним громадянам систематизувати та поглибити знання основ фізики, забезпечити сприйняття українською мовою навчальної інформації під час вивчення фізики та споріднених дисциплін у закладах вищої освіти.

УДК

ISBN

© Каленик О. О., Плющай І.В., Цареградська Т.Л., 2021

© Київський національний університет імені Тараса Шевченка,
ВПЦ "Київський університет", 2021

ЗМІСТ

ПЕРЕДМОВА	5
Основні позначення	6
Розділ 1. КІНЕМАТИКА МАТЕРІАЛЬНОЇ ТОЧКИ	
§ 1. Фізика – наука про природу.....	10
§ 2. Механічний рух.....	13
§ 3. Матеріальна точка. Траєкторія	16
§ 4. Система відліку.....	21
§ 5. Фізичні величини.....	25
§ 6. Скаляр. Дії зі скалярами	28
§ 7. Вектор. Дії з векторами.....	34
§ 8. Рівномірний прямолінійний рух.....	40
§ 9. Відносність руху. Закон додавання швидкостей.....	47
§ 10. Нерівномірний рух. Прискорення.....	53
§ 11. Рівноприскорений прямолінійний рух.....	60
§ 12. Рух тіл і гравітація. Криволінійний рух.....	67
§ 13. Рівномірний рух по колу.....	78
Розділ 2. ДИНАМІКА МАТЕРІАЛЬНОЇ ТОЧКИ	
§ 14. Взаємодія тіл. Маса. Сила.	83
§ 15. Закони Ньютона.....	89
§ 16. Імпульс тіла. Закон збереження імпульсу.....	93
§ 17. Закон всесвітнього тяжіння. Сили в механіці	100
§ 18. Вага тіла. Невагомість. Космічні швидкості.....	109
§ 19. Механічна робота. Потужність.....	114
§ 20. Механічна енергія. Закон збереження енергії.....	121
§ 21. Механічні коливання і хвилі.....	130
Розділ 3. МОЛЕКУЛЯРНА ФІЗИКА І ТЕРМОДИНАМІКА	
§ 22. Молекулярно-кінетична теорія будови речовин.....	142
§ 23. Основне рівняння молекулярно-кінетичної теорії...	149
§ 24. Властивості газів. Рівняння стану ідеального газу...	154
§ 25. Основні поняття термодинаміки.....	163
§ 26. Закони термодинаміки.....	168

§ 27. Фазові перетворення.....	179
Розділ 4. ЕЛЕКТРИКА І МАГНЕТИЗМ.	
ОПТИКА	
§ 28. Електричний заряд. Закон Кулона.....	190
§ 29. Основні характеристики електричного поля.....	195
§ 30. Електрична ємність. Енергія електричного поля	205
§ 31. Електричний струм. Опір. Закон Ома.....	212
§ 32. Закони постійного електричного струму.....	222
§ 33. Магнітне поле. Сила Ампера.	228
§ 34. Магнітний потік. Електромагнітна індукція.	236
§ 35. Змінний струм. Електромагнітні хвилі.	242
§ 36. Геометрична оптика.....	248
§ 37. Хвильова оптика...	258
§ 38. Основні поняття квантової оптики	264
Розділ 5. АТОМНА ТА ЯДЕРНА ФІЗИКА	
§ 39. Будова атома. Постулати Бора.....	269
§ 40. Будова атомного ядра. Ізотопи.....	273
§ 41. Радіоактивність. Ядерні реакції.....	279
§ 42. Ядерний реактор. Термоядерний синтез.....	284
Література	290
Додаток	291

ПЕРЕДМОВА

Структура та зміст посібника відповідає програмі з фізики у підготовці іноземних громадян до навчання в закладах вищої освіти України. У посібнику наведено необхідний обсяг інформації для оволодіння слухачами-іноземцями знаннями про основні фізичні явища та закони.

Для ефективного засвоєння навчального матеріалу посібник адаптовано відповідно до програми вивчення української мови. Перший розділ посібника адаптований максимально і знайомить слухачів з фізичними величинами, явищами, основними поняттями по завершенню фонетичного та початкового граматичного курсів української мови. Усі параграфи посібника побудовані таким чином: текст – основні поняття і закони; приклади розв'язання типових задач; лексико-граматичний матеріал – нові слова і терміни; приклади конструкцій наукового стилю мовлення; вправи для самостійної роботи. Навчанню також сприяє довідковий і ілюстративний матеріал – основні позначення, рисунки, графіки, таблиці числових значень фізичних констант та характеристик речовин. У кінці кожного параграфа представлено термінологічний словник мовою посередника.

Виконання слухачами-іноземцями завдань для самостійного опрацювання, вирішення завдань 2-5 розділів посібника сприятимуть практичному застосуванню набутих знань, розвитку логічного мислення і отримання навиків формування усних та письмових відповідей.

Основні позначення

Латинська абетка

Друковані букви	Рукописні букви	Назва
A a	<i>A a</i>	а
B b	<i>B b</i>	бе
C c	<i>C c</i>	це
D d	<i>D d</i>	де
E e	<i>E e</i>	е
F f	<i>F f</i>	еф
G g	<i>G g</i>	ге (же)
H h	<i>H h</i>	ха (аш)
I i	<i>I i</i>	і
J j	<i>J j</i>	йот (жи)
K k	<i>K k</i>	ка
L l	<i>L l</i>	ель
M m	<i>M m</i>	ем
N n	<i>N n</i>	ен
O o	<i>O o</i>	о
P p	<i>P p</i>	пе
Q q	<i>Q q</i>	ку
R r	<i>R r</i>	ер
S s	<i>S s</i>	ес
T t	<i>T t</i>	те
U u	<i>U u</i>	у
V v	<i>V v</i>	ве
W w	<i>W w</i>	дубль-ве
X x	<i>X x</i>	ікс
Y y	<i>Y y</i>	ігрек
Z z	<i>Z z</i>	зет

Грецька абетка

Αα	альфа	Nν	ню
Ββ	бета	Ξξ	ксі
Γγ	гама	Οο	омікрон
Δδ	дельта	Ππ	пі
Εε	епсилон	Ρρ	ро
Ζζ	дзета	Σσ	сигма
Ηη	ета	Ττ	тау
Θθ	тета	Φφ	фі
Ιι	йота	Χχ	хі
Κκ	каппа	Υυ	юпсилон (іпсилон)
Λλ	лямбда	Ψψ	псі
Μμ	мю	Ωω	омега

Префікси одиниць вимірювання фізичних величин

Кратність *	Префікс		Знак		Приклад
	UA	SI	UA	SI	
10^{12}	терра	terra	Т	T	Тбайт – терабайт
10^9	гіга	giga	Г	G	ГГц – гігагерц
10^6	мега	mega	М	M	МДж – мегаджоуль
10^3	кіло	kilo	к	k	кН – кілоньютон
10^2	гекто	hecto	г	h	га – гектар
10	дека	deca	да	da	дал – декалітр
10^{-1}	деци	deci	д	d	дм – дециметр
10^{-2}	санти	centi	с	c	см – сантиметр
10^{-3}	мілі	milli	м	m	мВ – мілівольт
10^{-6}	мікро	micro	мк	mc	мкКл - мікрокулон
10^{-9}	нано	nano	н	n	нм – нанометр
10^{-12}	піко	piko	п	p	пФ – пікофарад

* Читається:

10^{12} – «десять у дванадцятому степені»; 10^9 – «десять у дев'ятому степені»; 10^6 – «десять у шостому степені»; 10^3 – «десять у кубі»; 10^2 – «десять у квадраті», 10^{-1} – «десять у мінус першому степені»; 10^{-2} – «десять у мінус другому степені» і т.д.

Математичні символи

$a = b$	a дорівнює b (бе)
$a \neq b$	a не дорівнює b
$a < b$	a менше b
$a \leq b$	a менше або дорівнює b
$a > b$	a більше b
$a \geq b$	a більше або дорівнює b
+	знак додавання (плюс)
–	знак віднімання (мінус)
$\cdot, \times, *$	знак множення (помножити)
$\div, \square/\square, \frac{\square}{\square}$	знак ділення (розділити, поділити)
$a + b = c$	читається "а плюс бе дорівнює це"
$a - b = d$	читається "а мінус бе дорівнює де"
$a \cdot b = m$	читається "а помножити на бе дорівнює ем"
$a : b = n (b \neq 0)$	читається "а поділити на бе дорівнює ен при бе, що не дорівнює нулю"
$a \approx b$	a наближено дорівнює b
$b = a \pm h$	число a є наближенням числа b з точністю h (аш)
$a \cdot 10^n$	стандартний вигляд дійсного додатного числа, n – порядок дійсного додатного числа, $1 \leq a < 10$. Читається "а помножити на десять в степені ен"
Δa	абсолютна похибка числа (дельта а)
δa	відносна похибка числа (дельта а)
$a_0, a_1 a_2 \dots$	нескінченний десятковий дріб (a_0 – ціле число, $a_i \in \{0, 1, \dots, 9\}, i = 1, 2, \dots$)
0,5(17)	зразок запису періодичного десяткового дробу
%	відсоток або процент

$\frac{a}{b} = \frac{c}{d}$	пропорція
a^n	ступінь, a – основа, n – показник степеня. Читається "а в степені ен"
$\sqrt[n]{a}$	корінь n -го степеня із a
\Rightarrow	знак логічного слідування
$p \Rightarrow q$	із p випливає q
\Leftrightarrow	символ еквівалентності (рівносильності)
$\left\{ \right.$	знак системи рівнянь, які об'єднані сполучником "і"
$\left[\right.$	знак сукупності рівнянь, які об'єднані сполучником "або"
Σ	знак суми, $\sum_{i=1}^n a_i = a_1 + a_2 + \dots + a_n$. Читається "сума а-і, і змінюється від одиниці до ен"
Π	знак добутку, $\prod_{i=1}^n a_i = a_1 \cdot a_2 \cdot \dots \cdot a_n$. Читається "добуток а-і, і змінюється від одиниці до ен"
$a_i, i = 1, 2, 3 \dots (i = \overline{1, n})$	читається "числа а-ті, де і набуває значень 1, 2, 3 і так далі (і набуває значень від одного до ен)"
\forall	для всіх, будь-яких (квантор загальності)
\exists	існує (квантор існування)
N	множина натуральних чисел
Z	множина цілих чисел
Q	множина раціональних чисел
I	множина ірраціональних чисел
R	множина дійсних чисел
C	множина комплексних чисел
∞	знак нескінченності
$-\infty$	мінус нескінченність

Розділ 1. КІНЕМАТИКА¹ МАТЕРІАЛЬНОЇ ТОЧКИ

§1. Фізика – наука про природу

1. Що вивчає фізика?

Фізика – наука про природу. Природа – це все, що є навколо нас: об'єкти (об'єкт) природи та явища (явище) природи.

Об'єкт природи – це Сонце, зірка, океан, озеро, камінь, повітря, крейда, телефон, ручка, дошка, молекула, атом, фотон тощо.

Явище природи – це вітер, дощ, туман, зміна пори року, схід Сонця, зміна дня і ночі, кипіння води, звук, вогонь тощо.

Макрооб'єкт – це об'єкт природи, який має великі розміри. Сонце, Земля, Місяць, людина, автомобіль – це макрооб'єкти.

Мікрооб'єкт – це об'єкт природи, який має малі розміри ($10^9 - 10^{-15}$ м). Молекула, атом, електрон, ядро атома, протон, нейтрон, фотон – це мікрооб'єкти.

Об'єкти природи складаються з речовин. Вода, повітря, кисень, крейда, алюміній – це речовини. **Речовина** – це **матерія**.

Світло – це не речовина. Але світло – це також матерія. Світло – це **фізичне поле**. Фізичне поле передає **взаємодію** між об'єктами природи. Речовина і поле – два види матерії.

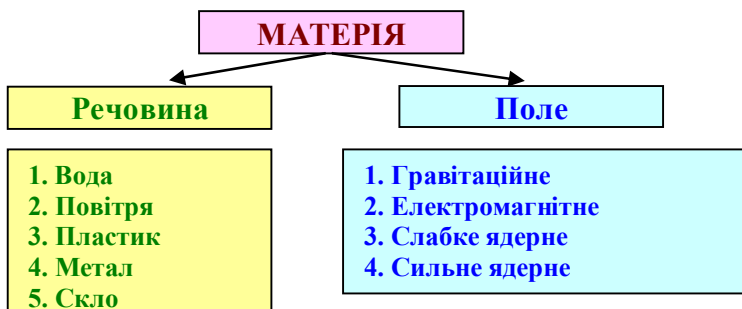


Рис. 1.1

¹ Слово «кінематика» походить від грецького слова «кінема», яке означає – рух.

2. Рух матерії

Матерія весь час змінюється: за осінню приходить зима, ніч змінює день, хвилі на морі, вогонь горить, вода тече, сіль розчиняється у воді. Це приклади зміни матерії.

Рух – це будь які зміни матерії.

Рух – це основна властивість матерії.

У природі є такі форми руху матерії: фізичні, хімічні, біологічні, соціальні.

Механічний рух, тепловий рух, електромагнітні процеси, атомні та ядерні процеси – це фізичні форми руху матерії.

Фізика вивчає фізичні властивості матерії і форми її руху.

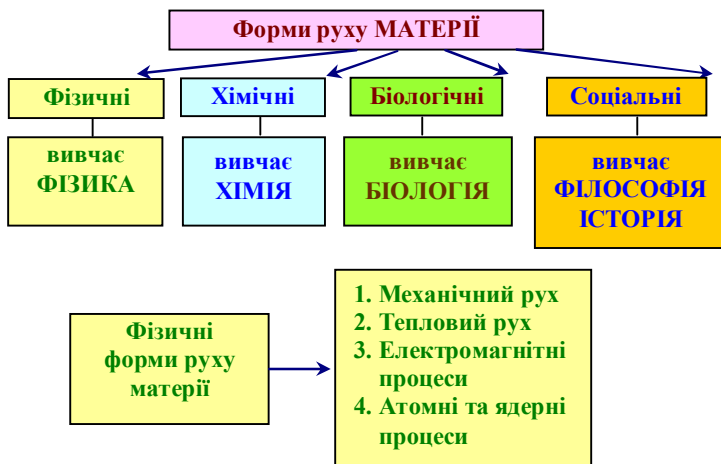


Рис. 1.2

СЛОВА І СЛОВОСПОЛУЧЕННЯ

наука	science	природа	nature
об'єкт	object	явище	phenomenon
макрооб'єкт	macro- object	мікрооб'єкт	micro- object
розмір	size	форма	form
молекула	molecule	атом	atom
протон	proton	електрон	electron
фотон	photon	ядро	nuclear
вода	water	повітря	air
кисень	oxygen	крейда	choke
звук	sound	процес	process
матерія	matter	речовина	substance
поле	field	світло	light
рух	motion, movement	взаємодія	interaction
електромагніт- не поле	electromagnetic field	гравітація	gravitation
слабке ядерне поле	weak nuclear field	сильне ядерне поле	strong nuclear field
механічний рух	mechanical motion	фізичне поле	physical field
тепловий рух	thermo motion	атомні процеси	atomic processes

Завдання для самостійної роботи

І. Дайте відповіді на запитання

1. Сонце – це об'єкт природи?
2. Зміна дня і ночі – це явище природи?
3. Рух Землі навколо Сонця – це явище природи?
4. Автомобіль – це макрооб'єкт?
5. Молекула – це мікрооб'єкт?
6. З чого складаються об'єкти природи?

7. Гравітація – це явище?
8. Як називаються зміни матерії?
9. Що вивчає фізика?

II. Виконайте вправи

1. Назвіть п'ять об'єктів природи.
2. Назвіть три явища природи.
3. У реченні вставте потрібне слово:
 - а) Речовина – це ...
 - б) Світло – це фізичне ...
 - в) ... і поле – це два види матерії.
 - г) ... – це основна властивість матерії.
4. Назвіть 2 види матерії.
5. Наведіть приклади речовин.
6. Наведіть приклади фізичних полів.
7. Назвіть форми руху матерії.

Запам'ятайте!

1. Що – це що

Світло – це фізичне поле

2. Що вивчає що

Фізика вивчає фізичні властивості матерії

§2. Механічний рух

1. Тіло відліку

В фізиці макрооб'єкти називають **фізичними тілами** або просто **тілами**. Земля, автобус, людина, стіл, книга – це тіла.

Фізичне тіло має форму та розміри. Стіл, книга, Земля мають різну форму і розмір.

Кожне тіло знаходиться серед інших тіл. Наприклад, книга знаходиться на столі або ліворуч від зошита, праворуч від ручки.

Фізичні тіла знаходяться (*інф.* – **знаходиться**) серед інших тіл. Це означає, що фізичні тіла існують (*інф.* – **існують**) у **просторі (простір)**.

Положення даного тіла у просторі визначають **відносно** інших тіл.

Книга знаходиться на столі. В цьому прикладі стіл – це **тіло відліку**.

Приклад. Автобус їде по дорозі (рис. 1.3). Автобус знаходиться праворуч від дерева. Ми визначили положення автобуса відносно дерева.



Рис.1.3

Положення автобуса у просторі змінюється відносно дерева. В даному прикладі тіло відліку – дерево.

Положення фізичного тіла у просторі визначають відносно тіла відліку.

Тілом відліку називають об'єкт, відносно якого визначають положення тіла у просторі.

2. Механічний рух

Літак летить з Києва до Одеси 1 годину. Студент іде з гуртожитку до факультету 3 хвилини. Ці процеси мають одну спільну властивість: вони змінюються з **часом (час)**.

Механічним рухом називається зміна положення тіла у просторі з часом.

Як відбувається механічний рух?

Механічний рух відбувається у просторі з часом.

3. Відносність механічного руху

Приклад. Їде автобус. В автобусі сидить пасажир. Якщо тіло відліку – це автобус, то положення пасажирів відносно автобусу залишається незмінним. Пасажир не рухається відносно автобусу, тобто пасажир знаходиться у стані спокою відносно автобусу.

Пасажир знаходиться у стані спокою відносно автобусу, але він рухається разом з автобусом відносно Землі.

Механічний рух та стан спокою (нерухомий стан) є відносними.

СЛОВА І СЛОВОСПОЛУЧЕННЯ

фізичне тіло	physical body	тіло відліку	reference body
праворуч	right	ліворуч	left
знаходитись	to be	існувати	to exist
положення	position	відносно	relatively
автобус	bus	час	time
відносність руху	relativity movement	механічний рух	mechanical movement
рухомий стан (стан руху)	moving state (state of motion)	нерухомий стан (стан спокою)	stationary state (state of rest)

Завдання для самостійної роботи

I. Дайте відповіді на запитання

1. Як у фізиці називаються об'єкти природи?
2. Стіл – це фізичне тіло?
3. Де знаходяться фізичні тіла?
4. Як визначають положення тіла у просторі?
5. Що називається тілом відліку?
6. Як відбувається механічний рух?

II. Виконайте вправи

1. Назвіть 5 фізичних тіл, різних за формою та розміром.
2. Наведіть 5 прикладів механічного руху тіл.
3. У реченні вставте потрібне слово:
 - а) Фізичні тіла ... серед інших тіл.
 - б) Рух відбувається у просторі з
 - в) Механічним рухом називається ... положення тіла у просторі з часом.
 - г) Механічний рух та нерухомий стан є
4. Визначте тіло відліку у наступних прикладах:
 - а) крейда лежить біля дошки;
 - б) викладач сидить за столом;
 - в) Земля рухається навколо Сонця.

Запам'ятайте!

1. Що називається чим

Світло – це фізичне поле

2. Що визначають відносно чого

Положення тіла у просторі визначають
відносно тіла відліку

§3. Матеріальна точка. Траскторія

1. Матеріальна точка

Фізичні тіла мають форму та розміри. При вивченні механічного руху тіла часто не враховують його форму та розміри.

Приклад 1. Розглянемо рух планети Земля навколо Сонця. Земля має радіус 6370 кілометрів (км). Відстань від Землі до Сонця 150 000 000 км (читається: «сто п'ятдесят мільйонів кілометрів»). Ця відстань більше за радіус Землі у 23000 разів. Відстань між Землею і Сонцем набагато більша за розмір Землі. Тому Землю у цій задачі можна вважати **матеріальною точкою**.

Матеріальна точка - це фізична модель, у якій не враховують розмір та форму тіла в умовах даної задачі.

Приклад 2. Літак летить над Землею з Києва до Львова. В цій задачі треба враховувати розміри і форму Землі. В цій задачі Земля не може бути матеріальною точкою.

В одній задачі фізичне тіло може бути матеріальною точкою, в іншій задачі воно не може бути матеріальною точкою.

2. Траєкторія

Умовна лінія, якою рухається матеріальна точка, називається траєкторією.

Траєкторія – це лінія, вздовж якої рухається матеріальна точка.

Рух матеріальної точки вздовж прямої лінії називається **прямолінійним рухом**. Траєкторія такого руху – пряма лінія.

Рух матеріальної точки вздовж кривої лінії називається **криволінійним рухом**. Траєкторія такого руху – крива лінія.

Рух по колу, по еліпсу, по параболі, по гіперболі – це приклади криволінійного руху (рис.1.4). Коло, еліпс, парабола, гіпербола – це криві лінії.

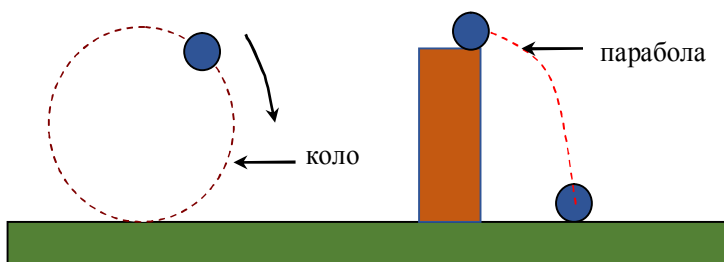


Рис.1.4

3. Види механічного руху

Якщо треба врахувати розміри і форму тіла в даній задачі, то це тіло розглядається як сукупність матеріальних точок.

Розглянемо рух сукупності двох точок автобусу: точки A і точки B (рис.1.5). Траєкторії точок A і B однакові. Якщо всі точки тіла описують однакові траєкторії, то рух називається **поступальним**.

Поступальний рух – це рух, при якому всі точки тіла мають однакові траєкторії. При переміщенні точки B у точку A , траєкторія буде тією самою. Такі траєкторії можуть бути прямими або кривими лініями.



Рис.1.5

На рисунку кожна з точок A , B , C рухається по колу (рис.1.6).

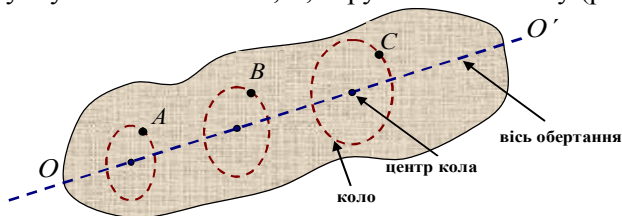


Рис.1.6

Центри всіх кіл знаходяться на одній прямій лінії OO' . Ця пряма називається **віссю обертання**. Рух тіла в даному випадку називається **обертальним рухом**.

Обертальний рух – це рух, при якому будь-яка точка тіла обертається навколо центру, що знаходиться на осі обертання.

Приклад 3. Планета Земля обертається навколо своєї осі (рис.1.7). Місто Київ і місто Барселона обертаються разом із Землею. Траєкторія руху точки на Землі – це коло з центром на осі обертання.



Рис.1.7

СЛОВА І СЛОВОСПОЛУЧЕННЯ

матеріальна точка	material point	фізична модель	physical model
відстань	distance	набагато більше	much more
вважати	to consider	траєкторія	trajectory
враховувати	to take into account	не враховувати (нехтувати)	to neglect
прямолінійний рух	rectilinear motion	криволінійний рух	curvilinear motion
лінія	line	пряма лінія	straight line
вздовж лінії	along the line	крива лінія	curve
коло	circle	еліпс	ellipse
парабола	parabola	гіпербола	hyperbola
поступальний рух	forward motion	обертальний рух	rotator motion

Завдання для самостійної роботи

I. Дайте відповіді на запитання

1. Що таке матеріальна точка?
2. Яка відстань між Землею і Сонцем?
3. Який радіус планети Земля?
4. Що називається траєкторією руху?
5. Який рух називається поступальним?
6. Який рух називається обертальним?

II. Виконайте вправи

1. Земля рухається навколо Сонця. В цій задачі Земля – це матеріальна точка?
2. Земля обертається навколо своєї осі. В цій задачі Земля – це матеріальна точка?
3. У реченні вставте потрібне слово:
 - а) Матеріальна точка – це фізична ... , у якій не ... форму і розміри тіла.
 - б) Рух матеріальної точки вздовж ... лінії називається прямолінійним рухом.
 - в) Рух матеріальної точки вздовж ... лінії називається криволінійним рухом.
4. Зі слів «крива» і «лінія» утворіть прикметник до слова «рух».
5. Зі слів «пряма» і «лінія» утворіть прикметник до слова «траєкторія». (прямолінійна траєкторія)
6. Наведіть приклади поступального руху тіл.
7. Наведіть приклади обертального руху тіл.

Запам'ятайте!

1. Що – це що

Матеріальна точка – це фізична модель

2. Що називається чим

Пряма називається віссю обертання

§4. Система відліку

1. Основна задача механіки

Основна задача механіки – це визначення положення тіла у просторі в будь-який момент часу.

Нехай точка A рухається прямолінійно відносно будинку (рис.1.8).

Будинок – це тіло відліку. Від будинку починається рух точки A .



Рис.1.8

Положення точки на прямій визначається **координатою** x . Знайти координату точки – це значить виміряти відстань від початку координат 0 до точки A . Ця відстань називається **координатою**.

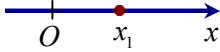
0 , x_1 , x_2 – це координати точки A під час руху. 0 – це початкова координата точки A . Змінюється положення тіла, змінюється його координата на прямій.

Координатна вісь – це пряма, на якій положення точки A позначається координатою x .

2. Система координат

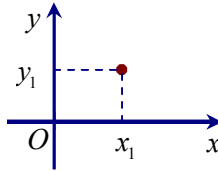
Точка на прямій лінії має одну координату, на площині має дві координати, а у просторі – три координати. Щоб визначити положення тіла застосовують систему координат.

одна координата -
 x_1



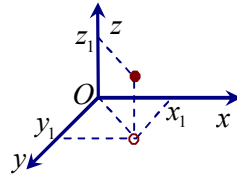
а)

дві координати -
 $(x_1; y_1)$



б)

три координати -
 $(x_1; y_1; z_1)$



в)

Рис.1.9

Французький математик і філософ Рене Декарт з'єднав три координатні осі під прямим кутом. Така система координат називається прямокутною або Декартовою системою координат.

3. Час

Визначити координати точки в даний момент часу – це означає розв'язати **основну задачу** механіки. Для цього треба виміряти час. Час вимірюють за допомогою періодичних процесів.

Періодичні процеси – це процеси, які повторюються через **рівні проміжки часу (періоди часу)**.

Період – це проміжок (інтервал) часу, через який процес повторюється.

Рух Землі відносно Сонця, обертальний рух Землі навколо своєї осі, коливання маятника – приклади періодичних процесів. Рік, доба, година (год), хвилина (хв), секунда (с) – це одиниці часу.

Основною одиницею часу в СІ є **секунда (с)**. Різні одиниці часу зв'язані між собою так:

1 рік = 365 (366) діб;

1 доба = 24 год = 1440 хв = 86400 с

1 год = 60 хв = 3600 с

$1\text{с} = 1 \text{ доба}/86400$. Читається так: «одна секунда дорівнює одна доба розділити на вісімдесят шість тисяч чотириста секунд».

Час вимірюють за допомогою годинника, секундоміра, таймера тощо.

4. Система відліку

Система відліку, яка допомагає розв'язати основну задачу механіки, має три складові частини:

1. Тіло відліку.
2. Система координат.
3. Прилад для вимірювання часу.

Системою відліку називається тіло відліку, пов'язана з ним система координат та прилад для вимірювання часу.

СЛОВА І СЛОВОСПОЛУЧЕННЯ

відстань	distance	проміжок часу	time interval
координата	co-ordinate	період	period
вісь	axis	хвилина	minute
система координат	system of co-ordinate	доба	twenty -four hours
прямокутна система координат	rectangular coordinate system	Декартова система координат	Cartesian coordinate system
система відліку	reference system	площина	plane
лінія	line	простір	space

І. Дайте відповіді на запитання

1. Чим визначають положення точки на прямій?
2. Що означає знайти координату точки на прямій?
3. Скільки потрібно координат для визначення положення точки на прямій, на площині, у просторі?
4. Чому Декартова система координат називається прямокутною?

5. Яка основна одиниця часу в системі СІ?
6. Схід Сонця – це періодичний процес?
7. Який період обертання Землі навколо Сонця?

II. Виконайте вправи

1. Сформулюйте основну задачу механіки.
2. У реченні вставте потрібне слово:
 - а) Основна задача механіки – це визначення ... тіла у будь-який момент часу.
 - б) Система відліку складається з тіла відліку, системи ... і приладу для вимірювання часу.
 - в) Земля обертається ... Сонця.
 - г) Земля ... навколо своєї осі.
4. Зі слова «*період*» утворіть прикметник до слова «*процес*».
5. Зі слів «*прямий*» і «*кут*» утворіть прикметник до словосполучення «система координат».
6. Наведіть приклади періодичних процесів.
7. Наручний годинник має три стрілки, що обертаються. Визначте періоди обертання кожної стрілки.
8. З чого складається система відліку?

Запам'ятайте!

1. Що – це що

Будинок – це тіло відліку

2. Що визначають чим

Положення точки визначають координатою

3. Що вимірюють за допомогою чого

Час вимірюють за допомогою годинника

§5. Фізичні величини

1. Фізичні явища

Фізика вивчає фізичні форми руху матерії, які можна описати як **фізичні явища** з фізичними тілами. Фізичні явища у природі відбуваються з фізичними тілами.

Фізичне явище – це зміни (події) у природі, які відбуваються за однакових причин або мають спільні (загальні для всіх) ознаки.

Наприклад, політ літака, біг людини, рух автобуса, переміщення планет, інші аналогічні події мають спільну ознаку. Ці тіла змінюють своє положення у просторі. Всі ці приклади є **механічними явищами**. Кипіння води, танення льоду, випаровування води, виділення теплоти під час згорання палива – це приклади **теплових явищ**. Є й інші види фізичних явищ: **електромагнітні, оптичні та ядерні** тощо.

2. Фізичні величини

Матеріальні об'єкти або явища мають певні фізичні властивості: розміри, форму, густину, колір, агрегатний стан тощо.

Фізичною властивістю називається те, чим інше тіло або явище відрізняється від іншого тіла або явища. Наприклад, фізичною властивістю будь-якого тіла є його лінійні розміри.

Фізичні властивості тіл характеризуються за допомогою фізичних величин.

Фізична величина є кількісною характеристикою (мірою) певної фізичної властивості тіла або явища. Довжина, площа, об'єм, час, температура, швидкість, сила – це характеристики фізичних явищ та властивостей тіл або фізичні величини.

Наприклад, **довжина** (L) – це фізична величина, що є мірою лінійних розмірів тіл; **площа** (S) – це фізична величина, яка є мірою поверхні тіла; **об'єм** (V) – міра частини простору, яку це тіло займає.

На рисунку зображено фізичне тіло, яке має форму паралелепіпеда (рис.1.10). Це тіло має лінійні розміри: довжину

– a , ширину – b , висоту – h , . Площа однієї з граней $S = a \cdot h$, а об’єм тіла дорівнює $V = a \cdot b \cdot h$.

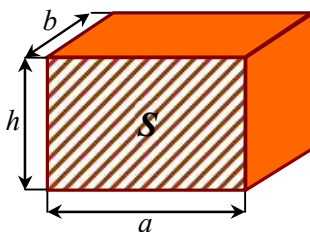


Рис.1.10

Фізичною величиною називається характеристика явища або властивість тіла, яку можливо виміряти.

Що означає знайти або виміряти фізичну величину? Виміряти фізичну величину означає порівняти її з одиницею вимірювання цієї величини.

Одиниця вимірювання – це фіксоване (одиничне) значення фізичної величини.

Наприклад, одиницею довжини є 1 метр (м), одиницею маси – 1 кілограм (кг), часу – 1 секунда (с). Середня відстань від Землі до Сонця дорівнює 150 млн. км. Довжину цієї відстані називають астрономічною одиницею (1 а.о.).

СЛОВА І СЛОВОСПОЛУЧЕННЯ

зміни (події)	changes (activity, doings)	фізичне явище	physical phenomenon
ознака, властивість	property	характери- стика	characteristic
механічні явища	mechanical phenomena	теплові явища	thermodynamic phenomena
лінійний розмір	linear size	колір	colour
форма	form	густина	density
порівнювати		ширина	wide
довжина	length	площа	square
висота	height	об’єм	volume

агрегатний стан	aggregate state	одиниця вимірювання	unit of measure
-----------------	-----------------	---------------------	-----------------

I. Дайте відповіді на запитання

1. Що таке фізичне явище?
2. Що називається фізичною властивістю?
3. Чим одні фізичні тіла відрізняються від інших?
4. Які ви знаєте характеристики фізичних тіл або явищ?
5. Як називається кількісна характеристика фізичного тіла або явища?
6. Чи можна виміряти фізичну величину?

II. Виконайте вправи

1. Наведіть приклади фізичних тіл та фізичних явищ.
 2. Назвіть механічні явища, теплові явища.
 3. Наведіть приклади фізичних властивостей тіл або явищ.
 4. Вставте потрібне слово (слова) у речення.
- а) Фізична величина є кількісною ... даної фізичної властивості тіла або явища.
- б) Одиниця вимірювання – це ... фізичної величини.
- в) Виміряти фізичну величину означає ... її з одиницею вимірювання цієї величини.

Запам'ятайте!

1. Що – це що

Одиниця вимірювання – це фіксоване (одиничне) значення фізичної величини

2. Що характеризуються

за допомогою чого

Фізичні властивості тіл характеризуються за допомогою фізичних величин.

§6. Скаляр. Дії зі скалярами

Фізичні величини поділяють на **скаляри** і **вектори** (скалярні та векторні фізичні величини).

Фізичні величини

Скаляри		Вектори	
час	t , с (секунда)	переміщення	\vec{r} , м (метр)
довжина, відстань	l , м (метр)	швидкість	\vec{v} , $\frac{\text{м}}{\text{с}}$ (метр за секунду)
площа	S , м^2 (метр у квадраті)	прискорення	\vec{a} , $\frac{\text{м}}{\text{с}^2}$ метр за секунду у квадраті
об'єм	V , м^3 (метр у кубі)	сила	\vec{F} , Н (Ньютон)
маса	m , кг (кілограм)	імпульс	\vec{p} , $\text{кг} \cdot \frac{\text{м}}{\text{с}}$

Скалярна фізична величина (**скаляр**) – це величина, яка має тільки **числове значення**. Для скаляра не має значення напрям у просторі. Скалярними величинами є час, маса, температура, довжина, площа, об'єм, густина тощо.

Дії зі скалярами виконують так само як і дії з числами.

1. Додавання. Додати два скаляри означає знайти суму числових значень двох скалярних величин.

Наприклад, знайдемо суму двох довжин. Записують це так $l_1 + l_2 = l$. Читається «ель один плюс ель два дорівнює ель». Символ (знак) «+» має походження від латинського слова "et", що означає "і". Знак «=» читається «дорівнює» і означає **рівність** правої і лівої частини. Число l_1 – перший **доданок**. Число l_2 – другий **доданок**, разом l_1 і l_2 – **доданки**, l – їхня сума. **Сума** – це результат дії додавання.

2. Віднімання. Віднімання – це дія обернена додаванню. Додамо два інтервали часу t_1 і t_2 . Нехай ця сума дорівнює

$t = t_1 + t_2$. Знайдемо чому дорівнює t_2 : $t_2 = t - t_1$. Отримали різницю двох скалярів. **Різниця** – це результат дії віднімання.

Знак « $-$ » читається «мінус». Вираз $t_2 = t - t_1$ читається «те два дорівнює те мінус те один», де t – зменшуване, t_1 – від'ємник, t_2 – різниця.

Правила дій з числом 0 (нулем):

$$a - 0 = a, \text{ тому що } a + 0 = a;$$

$$a - a = 0, \text{ тому що } 0 + a = a;$$

$$0 - 0 = 0, \text{ тому що } 0 + 0 = 0.$$

3. Множення. Запишемо вираз $S = l \cdot d$. Цей вираз читається « l ес дорівнює ель d помножити на де». Помножити скаляр l на скаляр d означає знайти суму d доданків, кожен з яких дорівнює l :

$$l \cdot d = \underbrace{l + l + \dots + l}_d \text{ доданків}$$

Число l – перший **множник**, число d – другий **множник**, разом l , d – **множники (співмножники)**, S – **добуток**. Добуток є результатом дії множення. Якщо $d = 1$, то $l \cdot 1 = l$.

Число 0 (нуль) у добутку:

1) якщо хоча б один із множників (співмножників) дорівнює нулю, тоді добуток дорівнює нулю;

2) якщо добуток дорівнює нулю, тоді хоча б один із множників (співмножників) дорівнює нулю.

$$a \cdot 0 = 0; 0 \cdot 0 = 0; 0 \cdot b = 0; 1 \cdot 0 = 0.$$

Закони арифметики, які виконуються для дій додавання і множення.

Закон	Додавання	Дія	Множення
комутативний	$a + b = b + a$		$a \cdot b = b \cdot a$
асоціативний	$(a + b) + c = a + (b + c)$		$(a \cdot b) \cdot c = a \cdot (b \cdot c)$
дистрибутивний		$(a + b) \cdot c = a \cdot c + b \cdot c$	

4. Ділення. Ділення – це дія обернена множенню. Розділити скаляр S на скаляр t – означає знайти число V , добуток якого на число t дорівнює S . Тобто мають виконуватися дві рівності:

$$\frac{S}{t} = V \Rightarrow S = V \cdot t.$$

$$\frac{S}{t} = V, \text{ де } S - \text{ділене, } t - \text{дільник, } V - \text{частка. Частка - це}$$

результат дії ділення.

Вираз $\frac{S}{t} = V$ читається «с розділити на те дорівнює ве».

Щоб знайти невідоме ділене x , треба частку b помножити на дільник a : якщо $x : a = b$, тоді $x = b \cdot a$.

Частки від ділення будь-якого числа на нуль не існують.

Правило ділення нуля на натуральне число: $0 : a = 0$.

5. Піднесення до степеня. Дія піднесення до степеня – це дія множення числа на самого себе декілька разів.

Степенем числа a^n (читається «а в степені ен») називається добуток n множників, що дорівнюють a :

$$a^n = \underbrace{a \cdot a \cdot \dots \cdot a}_n, \quad n > 1,$$

де a – основа степеня, n – показник степеня.

Для показників $n=2$ та $n=3$ степінь числа читається «квадрат» («у квадраті») та «куб» («у кубі»). Наприклад, вираз

$$\frac{mV^2}{2}$$

читається «ем ве квадрат розділити на два», а вираз $\frac{4}{3}\pi R^3$

читається «чотири третіх пі ер куб».

Степенем числа a з показником 1 є саме число a : $a^1 = a$. Число a з показником степеня 1 дорівнює числу a .

Будь-яке число (окрім 0) у нульовому степені дорівнює 1: $a^0 = 1$, якщо $a \neq 0$.

Властивості степеня:

$$1. \quad a^n = \underbrace{a \cdot a \cdot \dots \cdot a}_n$$

$$2. \quad a^0 = 1.$$

$$3. \quad a^{-n} = \frac{1}{a^n}$$

$$4. \quad a^m \cdot a^n = a^{m+n}$$

$$5. \quad (a \cdot b)^n = a^n \cdot b^n$$

$$6. \quad (a^m)^n = a^{m \cdot n}$$

$$7. \quad \frac{a^m}{a^n} = a^{m-n}$$

$$8. \quad \left(\frac{a}{b}\right)^n = \frac{a^n}{b^n}$$

6. Добування кореня. Якщо $x^n = a$ (n і a – відомі величини), то $x = \sqrt[n]{a}$ називається коренем n -го (енного) степеня з будь-якого числа a , де x – **корінь**; n – **показник кореня**; a – **підкореневий вираз**; $\sqrt{}$ – **знак кореня (радикал)**. Вираз $x = \sqrt[n]{a}$ читається «ікс дорівнює корінь енного степеня із а».

Добування кореня – це дія, обернена піднесенню до степеня. Добути корінь n -го (енного) степеня з числа a $x = \sqrt[n]{a}$ означає знайти таке число x , що $a = x^n$.

$\sqrt{25}$, $\sqrt[3]{1}$, $\sqrt[4]{16}$ і $\sqrt[7]{0}$ мають відповідно такі числові значення: 5, 1, 2 і 0.

Властивості кореня:

$$1. \quad \sqrt[n]{a^m} = \sqrt[n]{a^{mp}} - \text{основна властивість кореня}$$

$$2. \quad \sqrt[n]{a \cdot b} = \sqrt[n]{a} \cdot \sqrt[n]{b}$$

$$3. \quad \sqrt[n]{\frac{a}{b}} = \frac{\sqrt[n]{a}}{\sqrt[n]{b}}$$

$$4. \quad \sqrt[m]{a^n} = a^{\frac{n}{m}}$$

$$5. \quad \sqrt[n]{a^n \cdot b} = a \sqrt[n]{b}$$

$$6. \quad a \sqrt[n]{b} = \sqrt[n]{a^n \cdot b};$$

СЛОВА І СЛОВОСПОЛУЧЕННЯ

скаляр	scalar	вектор	vector
числове значення	numerical value	модуль	module
дорівнює	to equal	рівність	equality
дати	to add	доданок	addend
додавання	addition	сума	sum
відняти	to subtract	зменшуване	minuend
віднімання	subtraction	різниця	difference
від'ємник	deduction	множення	multiplication
помножити	to multiply	множник	multiplier
добуток	product	ділення	division
розділити	to divide	ділене	dividend
дільник	divisor	частка	part
піднесення до степеня	exponentiation	показник степеня	index of power
ступінь	power	основа степеня	base of power

I. Дайте відповіді на запитання

1. Що таке скаляр?
2. Що означає дати два скаляри?
3. Як називається результат додавання, віднімання?
4. Що означає помножити один скаляр на інший?
5. Як називається результат множення, ділення?
6. Як знайти невідоме ділене, дільник?
7. Що називається степенем числа?
8. Що означає добути корінь із числа?

II. Виконайте вправи

1. Наведіть приклади скалярних величин.
2. Прочитайте вирази: $m = m_1 + m_2$; $S = V \cdot t$; $a = \frac{V_2 - V_1}{t}$.
3. Вставте потрібне слово (слова) у речення.
 - а) Різниця – це результат дії
 - б) Ділення – це дія обернена
 - в) Дія піднесення ... – це дія множення числа на самого себе декілька разів.

4. Обчисліть: 3^{-3} ; $(-5)^{-2}$; 1^{-10} ; $\left(\frac{2}{3}\right)^3$; $(-1)^7$; $\left(\frac{1}{3}\right)^{-1}$; $\left(\frac{7}{5}\right)^0$.

5. Запишіть 2^{60} у вигляді степеня з основою:

а) 4; б) 8; в) 16; г) 32.

6. Запишіть у вигляді степеня з основою 2 числа: 8; 4; 2; 1;

$$\frac{1}{2}; \frac{1}{4}; \frac{1}{8}; \frac{1}{16}.$$

7. Спростити вираз: $3\frac{4}{7} \cdot a^{-6} \cdot b^2 \cdot \left(1\frac{3}{7} \cdot a^2 \cdot b^{-3}\right)^{-2}$.

8. Знайти значення виразу: $\frac{5^{-6} \cdot (5^2)^{-4}}{(5^{-3})^6 \cdot 5^3}$

9. Знайдіть значення виразів:

а) $\sqrt{121 \cdot 64}$; б) $\sqrt{169 \cdot 0,36}$; в) $\sqrt{1,44 \cdot 0,04 \cdot 0,0001}$.

10. Виконайте множення:

а) $(3\sqrt{12} - \sqrt{75})\sqrt{3}$; б) $(4\sqrt{0,02} + \sqrt{8})\sqrt{2}$

в) $\left(2\sqrt{\frac{5}{2}} - \sqrt{10} + \sqrt{\frac{125}{2}}\right)\sqrt{\frac{5}{2}}$; г) $(3\sqrt{5} - \sqrt{72}) \cdot (3\sqrt{5} + \sqrt{72})\sqrt{2}$.

11. Виконайте ділення:

а) $(12\sqrt{45} - 6\sqrt{20}):3\sqrt{5}$; б) $(\sqrt{28} - \sqrt{252} + 2\sqrt{63}):\sqrt{7}$.

Запам'ятайте!

1. Що означає що

Додати два скаляри означає знайти суму
їхніх числових значень

2. Що – це що

Добування кореня – це дія, обернена
піднесенню до степеня.

§7. Вектор. Дії з векторами

1. Вектор. Векторна фізична величина (**вектор**) – це величина, яка має числове значення (**модуль**) та напрямок у просторі. Векторними величинами є переміщення, швидкість, прискорення, сила, імпульс, момент сили тощо.

Вектор – це направлений відрізок. Довжина цього відрізка є скалярною величиною і називається модулем або числовим значенням вектора. Напрямок стрілки показує напрям вектора \vec{a} у просторі. Точка A – початок вектора \vec{AB} , точка B його кінець (рис.1.11). Модуль вектора позначається $|\vec{a}| = a$, $|\vec{AB}|$.

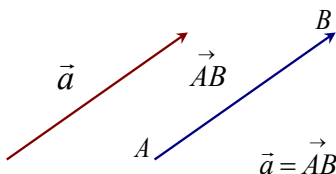


Рис.1.11

Вектор \vec{a} дорівнює вектору \vec{AB} , бо їхні модулі рівні $|\vec{a}| = |\vec{AB}|$ і напрями збігаються (мають один і той самий напрям).

Вектори є рівними $\vec{a} = \vec{AB}$, якщо вони мають рівні модулі та однаковий напрямки у просторі.

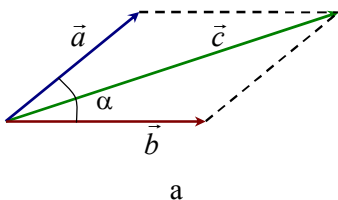
2. Додавання векторів. Додавання векторів виконують за правилом паралелограма або правилом трикутника. Щоб виконати додавання за правилом паралелограма, початки векторів зводять у одну точку. Результатом додавання векторів буде новий вектор. Його напрям визначається діагоналлю паралелограма (рис.1.12, а). Щоб виконати додавання за правилом трикутника, початок другого вектора розташовують у кінці першого. Результатом додавання векторів буде новий вектор. Його напрям визначається стороною трикутника (рис.1.12, б).

Модуль вектора \vec{c} , який є результатом додавання двох векторів \vec{a} і \vec{b} , знаходиться за формулою:

$$c = \sqrt{a^2 + 2ab\cos\alpha + b^2},$$

де a, b, c – модулі векторів $\vec{a}, \vec{b}, \vec{c}$, α – кут між векторами \vec{a} і \vec{b} .

правило паралелограма



правило трикутника

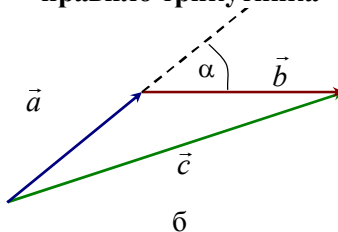


Рис.1.12

За правилами паралелограма і трикутника виконують дію додавання n векторів:

$$\vec{a}_1 + \vec{a}_2 + \dots + \vec{a}_n = \sum_{i=1}^n \vec{a}_i.$$

Спочатку знаходять результат додавання $\vec{a}_1 + \vec{a}_2$. До нового вектора додають \vec{a}_3 за тим самим правилом. Повторюємо ці дії знов і знов доки не додамо останній вектор \vec{a}_n .

3. Віднімання векторів. Віднімання векторів виконують за правилом трикутника. Щоб виконати віднімання $\vec{a} - \vec{b} = \vec{d}$ за правилом трикутника, початки векторів зводять у одну точку. Результатом віднімання векторів буде новий вектор \vec{d} , який має початок у кінці другого вектора \vec{b} (який віднімають), а кінець у кінці першого \vec{a} (від якого віднімають). Модуль вектора \vec{d} визначається стороною трикутника (рис.1.13).

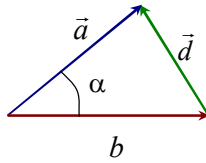


Рис.1.13

Якщо $\vec{a} - \vec{b} = \vec{d}$, то $\vec{a} = \vec{b} + \vec{d}$. Як видно з рис.1.13 для $\vec{a} = \vec{b} + \vec{d}$ виконується правило трикутника. Отже, різниця двох векторів $\vec{a} - \vec{b} = \vec{d}$ знайдена правильно.

Модуль вектора \vec{d} , який є різницею двох векторів $\vec{a} - \vec{b}$, знаходиться за формулою:

$$d = \sqrt{a^2 - 2ab\cos\alpha + b^2},$$

де a, b, d – модулі векторів $\vec{a}, \vec{b}, \vec{d}$, α – кут між векторами \vec{a} і \vec{b} .

4. Множення векторів. Результатом множення векторів є два види добутку: **скалярний** та **векторний**. Добуток двох векторів називається скалярним, бо його результатом є скаляр. Добуток двох векторів називається векторним, бо його результатом є новий вектор.

Скалярний добуток. Скалярним добутком двох векторів \vec{a} і \vec{b} називається вираз $(\vec{a} \cdot \vec{b}) = a \cdot b \cdot \cos\alpha$, де α – кут між векторами \vec{a} і \vec{b} , а a і b їхні модулі.

Скалярний добуток допомагає знайти модуль вектора, який є сумою або різницею двох векторів. Доведемо формулу $d = \sqrt{a^2 + b^2 - 2ab\cos\alpha}$ обчислення модуля вектора \vec{d} , який є різницею двох векторів $\vec{d} = \vec{a} - \vec{b}$.

Доведення. Піднесемо до квадрату ліву і праву частини рівності $\vec{d} = \vec{a} - \vec{b}$:

$(\vec{d})^2 = (\vec{a} - \vec{b})^2$. У лівій частині маємо скалярний добуток

$(\vec{d} \cdot \vec{d}) = d \cdot d \cdot \cos 0^\circ = d^2$. Розкриємо дужки у правій частині.

Маємо три скалярних добутки.

$$(\vec{a} - \vec{b})^2 = (\vec{a} \cdot \vec{a}) - 2(\vec{a} \cdot \vec{b}) + (\vec{b} \cdot \vec{b}) = a^2 - 2ab \cos \alpha + b^2.$$

Рівність матиме вигляд: $d^2 = a^2 - 2ab \cos \alpha + b^2$.

Звідси $d = \sqrt{a^2 - 2ab \cos \alpha + b^2}$. Формулу доведено.

Векторний добуток. Векторним добутком двох векторів \vec{a} і \vec{b} є вектор $\vec{j} = [\vec{a} \times \vec{b}]$, де \vec{j} – вектор, перпендикулярний до площини, у якій лежать вектори \vec{a} і \vec{b} , а його модуль $j = a \cdot b \cdot \sin \alpha$, де α – кут між векторами \vec{a} і \vec{b} , а a і b їхні модулі.

4. Проекція вектора на вісь координат

Проекцією вектора \vec{a} на вісь Ox називається різниця координат початку і кінця цього вектора: $a_x = x_2 - x_1$. Проекція вектора \vec{a} на вісь Ox визначається за формулою: $a_x = a \cdot \cos \alpha$, де a – модуль вектора \vec{a} , α – кут між напрямом осі Ox і вектором \vec{a} (рис.1.14).

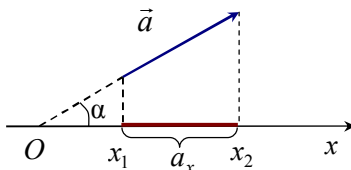
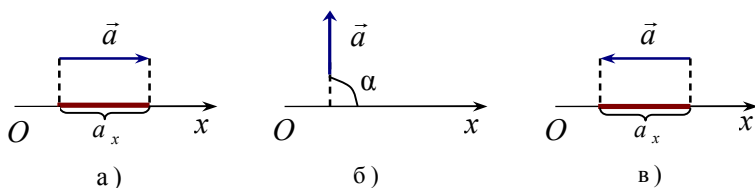


Рис.1.14

Проекція вектора на вісь може бути додатною (рис.1.15, а), від'ємною (рис.1.15, в) або дорівнювати нулю (рис.1.15, б).



а) $\alpha = 0^\circ$; $a_x = a$; б) $\alpha = 90^\circ$; $a_x = 0$; в) $\alpha = 180^\circ$; $a_x = -a$.

Рис.1.15

5. Розклад вектора на компоненти

Вектор можна розкласти на компоненти по перпендикулярам, напрямки яких співпадають з осями прямокутної системи координат. На рис.1.16 зображено варіант такого розкладу, де \vec{V}_1 , \vec{V}_2 – компоненти вектора \vec{V} .

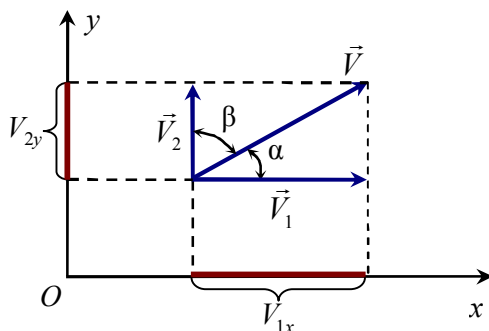


Рис.1.16

За правилом додавання векторів $\vec{V} = \vec{V}_1 + \vec{V}_2$ (в даному випадку паралелограм є прямокутником).

$V_{1x} = V \cdot \cos \alpha$ – проекція вектора \vec{V} (\vec{V}_1) на вісь Ox ,

$V_{2y} = V \cdot \cos \beta = V \cdot \sin \alpha$ – проекція вектора \vec{V} (\vec{V}_2) на вісь Oy , V -

модуль вектора \vec{V} . За теоремою Піфагора модуль вектора

$$V = \sqrt{V_{1x}^2 + V_{2y}^2}.$$

СЛОВА І СЛОВОСПОЛУЧЕННЯ

вектор	vector	кут	angle
напрямок у просторі	direction in the space	числове значення	numerical value
правило паралелограма	parallelogram law	правило трикутника	triangle law
діагональ	diagonal	сторона	side
скалярний добуток	scalar product	векторний добуток	vector product
проекція	projection	компонента	component
перпендикуляр	perpendicular	розклад на компоненти	component's decomposition
прямокутна система	Cartesian system	теорема Піфагора	Pythagorean theorem
додатне значення	positive value	від'ємне значення	negative value
модуль вектора	module of vector	прямокутник	rectangle

I. Дайте відповіді на запитання

1. Що таке вектор?
2. Чим відрізняється вектор від скаляру?
3. Як додати два вектори?
4. Які ви знаєте правила додавання векторів?
5. Що називається скалярним добутком двох векторів?
6. Чому добуток називається скалярним (векторним)?
7. Як отримати проекцію вектора на числову вісь?
8. Чи може проекція вектора бути від'ємною, дорівнювати нулю?
9. Яким має бути кут між вектором і віссю Ox , щоб проекція вектора дорівнювала нулю, була додатною?
10. Як розкласти вектор на компоненти?

II. Виконайте вправи

1. Наведіть приклади векторних фізичних величин.
 2. Вставте потрібне слово (слова) у речення.
- а) ... – це направлений відрізок.

б) Додавання векторів виконують за правилом
в) Проекцією вектора \vec{a} на вісь Ox називається ... початку і кінця цього вектора.

3. Запишіть формулу для визначення модуля вектора, який дорівнює сумі (різниці) двох векторів.

4. Запишіть формулу для визначення модуля вектора, який дорівнює скалярному (векторному) добутку двох векторів.

5. Знайдіть модуль вектора, який є сумою векторів \vec{a} і \vec{b} . Кут між векторами $\alpha = 45^\circ$, а їхні модулі $a = 3$ см і $b = 5$ см.

6. Знайдіть модуль вектора, який є різницею векторів \vec{a} і \vec{b} . Кут між векторами $\alpha = 60^\circ$, а їхні модулі $a = 4$ см і $b = 7$ см.

7. Знайдіть скалярний добуток векторів \vec{a} і \vec{b} . Кут між векторами $\alpha = 30^\circ$, а їхні модулі $a = 2$ см і $b = 4$ см.

Запам'ятайте!

1. Що виконують за чим

Додавання векторів виконують за правилом паралелограма

2. Що визначається чим

Модуль вектора визначається стороною трикутника

§ 8. Рівномірний прямолінійний рух

1. Переміщення, шлях і відстань

Рух фізичного тіла призводить до зміни його положення у просторі. На рис.1.17 зображено точки 1 і 2, які визначають **початкове і кінцеве** положення тіла у просторі. **Переміщенням** називається вектор $\Delta \vec{r}$, який показує як змінилося положення тіла у просторі.

Одиницею вимірювання переміщення в СІ є **1 метр** (1 м).

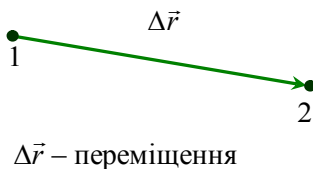
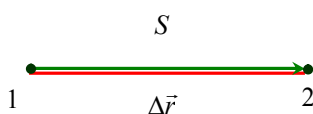
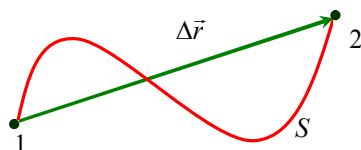


Рис.1.17

Відстань S - це **шлях**, який долає тіло в процесі руху від точки 1 до точки 2 (рис.1.18, а). Якщо тіло рухається прямолінійно, тоді модуль вектора переміщення $|\Delta \vec{r}|$ дорівнює відстані S між точками 1 і 2 (рис.1.18, а).



а) $|\Delta \vec{r}| = S$



б) $|\Delta \vec{r}| \neq S$

Рис.1.18

Якщо рух тіла не прямолінійний, тоді переміщення $|\Delta \vec{r}|$ не дорівнює відстані S між точками 1 і 2 (рис.1.18, б).

Одиницею вимірювання відстані і шляху в СІ є **1 метр** (1 м). Переміщення – це вектор, а відстань і шлях – це скаляри.

Рівномірний прямолінійний рух – це рух тіла, траєкторія якого є пряма лінія, а за рівні проміжки часу тіло долає однакові відстані.

Нерівномірний рух – це прямолінійний рух, при якому тіло за однакові проміжки часу долає неоднакові відстані.

2. Швидкість руху матеріальної точки

Нехай тіло рухається рівномірно і прямолінійно. Прямолінійний рух означає, що траєкторією руху тіла є пряма лінія. Розіб'ємо час руху тіла Δt на n однакових інтервалів

$\Delta t_1 = \Delta t_2 = \dots = \Delta t_n$, тобто $\Delta t = \Delta t_1 + \Delta t_2 + \dots + \Delta t_n$. За кожен інтервал часу тіло буде мати переміщення $\Delta \vec{r}_1 = \Delta \vec{r}_2 = \dots = \Delta \vec{r}_n$. Для рівномірного прямолінійного руху виконуються відношення:

$$\frac{\Delta \vec{r}_1}{\Delta t_1} = \frac{\Delta \vec{r}_2}{\Delta t_2} = \dots = \frac{\Delta \vec{r}_n}{\Delta t_n} = \text{const.}$$

Це **відношення** називається швидкістю і позначається вектором \vec{V} :

$$\vec{V} = \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t} = \frac{\vec{r} - \vec{r}_0}{\Delta t}, \quad \text{швидкість} = \frac{\text{переміщення}}{\text{час}}.$$

Інтервал часу $\Delta t = t - t_0$, де t_0 – час початку руху (1), t – час завершення руху (2). Якщо $t_0 = 0$, тоді $\Delta t = t$ і $\vec{V} = \frac{\Delta \vec{r}}{t}$.

Швидкість рівномірного прямолінійного руху – це фізична векторна величина, яка є **відношенням** переміщення до часу, за який це переміщення відбулося.

При рівномірному прямолінійному русі вектор швидкості \vec{V} і вектор переміщення $\Delta \vec{r}$ мають один і той самий напрям у просторі. Одиницею вимірювання швидкості в СІ є **1 метр за 1 секунду** (1

$$\text{м/с}): \quad |\vec{V}| = \frac{|\Delta \vec{r}|}{t} = \frac{1 \text{ метр}}{1 \text{ секунда}} = 1 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Рівномірним прямолінійним рухом називається рух зі швидкістю, яка є сталою за модулем та напрямом.

3. Рівняння руху матеріальної точки

Розглянемо рівномірний прямолінійний рух тіла вздовж осі Ox зі швидкістю \vec{V} (рис.1.19). Вектори \vec{r}_0 , \vec{r} – це **радіус-вектори**, які з'єднують початок координат O і точки 1 і 2. За правилом трикутника різниця $\Delta \vec{r} = \vec{r} - \vec{r}_0$ є переміщенням тіла за час t . Проекція вектора переміщення на вісь Ox дорівнює $r_x = x - x_0$, де x – координата проекції кінця вектора $\Delta \vec{r}$, а x_0 – координата проекції початку вектора $\Delta \vec{r}$. Тоді величина проекції вектора

швидкості на вісь Ox дорівнює: $V_x = \frac{r_x - r_{x_0}}{t} = \frac{x - x_0}{t}$. Звідси

$$x = x_0 + V_x \cdot t.$$

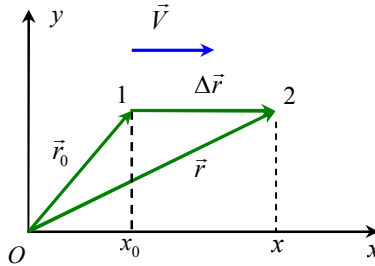


Рис.1.19

Рівняння $x = x_0 + V_x \cdot t$ називається рівнянням координати рівномірного прямолінійного руху. Координата x залежить лише від часу t , який пройшов з початку руху. Тобто координата x є функцією від t при сталих x_0 (початкова координата) та V_x (проекція вектора швидкості на вісь Ox):

$$x(t) = x_0 + V_x \cdot t.$$

Для рівномірного прямолінійного руху шлях, який долає тіло, дорівнює його переміщенню $S = |\Delta \vec{r}| = x - x_0 = V_x \cdot t$

Якщо $V_x = V$, тоді $S = V \cdot t$. Отримаємо рівняння шляху

$$S(t) = S_0 + V \cdot t,$$

де S_0 – початковий шлях.

4. Графічне представлення руху

Координата матеріальної точки, яка рухається рівномірно і прямолінійно є лінійною функцією від часу: $x(t) = x_0 + V \cdot t$, де $V = V_x$. Так само як і шлях: $S(t) = S_0 + V \cdot t$

Швидкість руху матеріальної точки не залежить від часу, отже на графіку залежності швидкості від часу це буде пряма

лінія, яка паралельна осі Ot (рис.1.20, а). На рис.1.20 б,в зображені залежності координати і шляху від часу. **Тангенс кута нахилу** прямої дорівнює модулю швидкості руху матеріальної точки:

$$V = \frac{x - x_0}{t} = \frac{S - S_0}{t} = \operatorname{tg} \alpha .$$

Шлях S , який долає матеріальна точка, дорівнює добутку $S = V \cdot t$, тобто площі прямокутника $OABC$ (рис.1.20, а).

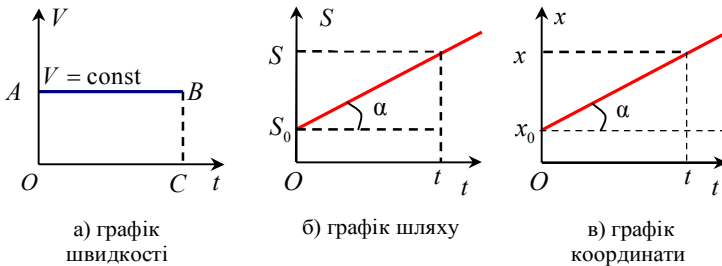


Рис.1.20

Задача. З точок A і B одночасно почали рух два тіла в одному напрямку. Відстань між точками A і B дорівнює 90 м. Тіло, що рухається з точки A , має швидкість 5 м/с, а тіло, що рухається з точки B , має швидкість 2 м/с. Через який час перше тіло наздожене друге?

Дано:

$$x_{01} = 0 \text{ м}$$

$$x_{02} = 90 \text{ м}$$

$$V_1 = 5 \text{ м/с}$$

$$V_2 = 2 \text{ м/с}$$

Знайти t – ?

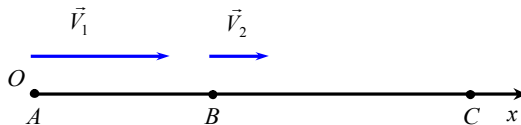


Рис.1.21

Розв'язок

1. Нехай рух відбувається вздовж осі Ox (рис.1.21). В точці A починає рух перше тіло. В той самий момент в точці B починає рух друге тіло. А в точці C обидва тіла зустрінуться, тобто перше тіло наздожене друге.

2. Запишемо рівняння руху першого і другого тіла:

$$x_1 = x_{01} + V_1 \cdot t$$

$$x_2 = x_{02} + V_2 \cdot t,$$

де x_1 і x_2 координати першого і другого тіла, x_{01} і x_{02} початкові координати першого і другого тіла.

3. В точці C перше тіло наздожене друге. Це означає, що виконується умова $x_1 = x_2$:

$$x_{01} + V_1 \cdot t = x_{02} + V_2 \cdot t \Rightarrow$$

$$\Rightarrow t = \frac{x_{02} - x_{01}}{V_1 - V_2} = \frac{90\text{ м} - 0\text{ м}}{5\text{ м/с} - 2\text{ м/с}} = 30\text{ с}.$$

СЛОВА І СЛОВОСПОЛУЧЕННЯ

рівномірний прямолінійний рух	uniform rectilinear motion	одиниця вимірювання	unit of measurement
початкове положення	initial position	кінцеве положення	finish position
переміщення	displacement	відстань	distance
шлях	part, distance travelled	відношення	ratio
швидкість	velocity, speed	вздовж	along
1 метр за 1 секунду	1 meter per second	радіус-вектор	radius vector
рівняння	equation	залежати	to depend
залежність	dependence	початковий шлях	initial path
одночасно	simultaneously	наздоганяти	overtake
в одному напрямку	in one directly	представлення	representation
тангенс	tangent	кут нахилу	inclination's angle

I. Дайте відповіді на запитання

1. Що показує вектор переміщення?
2. В яких одиницях вимірюється переміщення, шлях, відстань?
3. Чим відрізняється переміщення і шлях?
4. Який рух називається рівномірним прямолінійним?
5. Яка фізична величина називається швидкістю тіла?
6. В яких одиницях вимірюється швидкість?
7. Який рух називається нерівномірним прямолінійним?
8. Яким є модуль і напрям швидкості матеріальної точки, яка рухається рівномірно і прямолінійно?

II. Виконайте вправи

1. Наведіть приклади векторних фізичних величин.
2. Зі слів «*рівно*» і «*міра*» утворіть прикметник до слова «рух».
3. Зі слів «*пряма*» і «*лінія*» утворіть прикметник до слова «рух».
4. Вставте потрібне слово (слова) у речення.
 - а) ... – це вектор, а відстань і шлях – це скаляри.
 - б) $\frac{\Delta \vec{r}}{t}$ – це ... називається ... і позначається вектором \vec{V} .
 - в) $x = x_0 + V_x \cdot t$ називається ... координати рівномірного прямолінійного руху.
5. Запишіть рівняння координати рівномірного прямолінійного руху матеріальної точки.
6. Побудуйте на одному графіку залежності координат від часу руху двох матеріальних точок. Швидкість руху першої точки – $V_1 = 1 \text{ м/с}$, а швидкість другої – $V_2 = 2 \text{ м/с}$. Початкова координата першої точки – $x_{01} = 1 \text{ м}$, а початкова координата другої – $x_{02} = 0 \text{ м}$.
7. З точок A і B одночасно почали рух два тіла назустріч одне одному. Відстань між точками A і B дорівнює 100 м . Тіло, що рухається з точки A , має швидкість 3 м/с , а тіло, що рухається з точки B , має швидкість 7 м/с . На якій відстані від точки A тіла зустрінуться?

Запам'ятайте!

1. Якщо ... , тоді ...

Якщо рух тіла не прямолінійний, тоді переміщення $|\Delta\vec{r}|$ не дорівнює відстані S

2. Що залежить від чого

Координата x залежить від часу t

§ 9. Відносність руху. Закон додавання швидкостей

1. Закон додавання швидкостей

Розглянемо рух тіла (катера) в різних системах відліку. Позначимо: xuz – нерухома система координат; $x'y'z'$ – рухома система координат; $\Delta\vec{r}_1$ – переміщення тіла відносно води; $\Delta\vec{r}_2$ – переміщення води відносно берега; Δt – інтервал часу, за який відбулися переміщення (рис.1.22).

Переміщення $\Delta\vec{r}$ тіла відносно берега є векторною сумою двох переміщень, а саме: $\Delta\vec{r} = \Delta\vec{r}_1 + \Delta\vec{r}_2$.

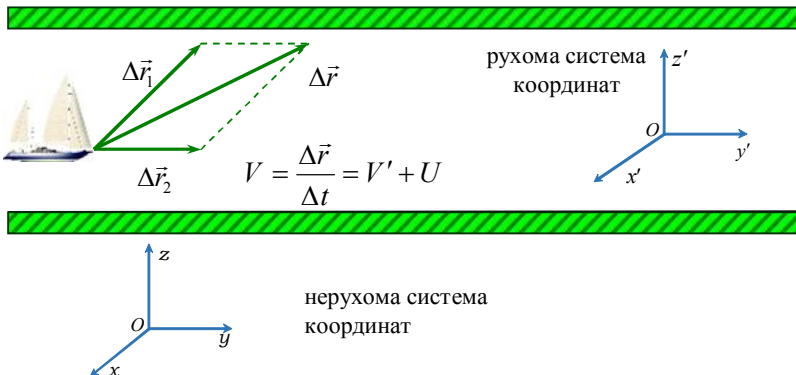


Рис.1.22

Поділимо рівність $\Delta\vec{r} = \Delta\vec{r}_1 + \Delta\vec{r}_2$ на Δt :

$\frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t} = \frac{\Delta \vec{r}_1}{\Delta t} + \frac{\Delta \vec{r}_2}{\Delta t}$, де $\vec{V} = \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t}$ – швидкість тіла у нерухомій системі координат, $\vec{V}' = \frac{\Delta \vec{r}_1}{\Delta t}$ – швидкість тіла у рухомій системі координат, $\vec{U} = \frac{\Delta \vec{r}_2}{\Delta t}$ – швидкість рухомої системи координат відносно нерухомої (швидкість води відносно берега).

Отримаємо:

$$\vec{V} = \vec{V}' + \vec{U}$$

Це рівняння – класичний закон додавання швидкостей: **Швидкість тіла \vec{V} в нерухомій системі відліку дорівнює векторній сумі швидкості тіла \vec{V}' у рухомій системі відліку і швидкості \vec{U} рухомої системи відносно нерухомої.**

Окрім класичного закону додавання швидкостей існує релятивістський закон додавання швидкостей. Класичний закон додавання швидкостей виконується для швидкостей, модуль яких набагато менше швидкості світла c . Релятивістський закон додавання швидкостей виконується для швидкостей, модулі яких близькі до швидкості світла c , і має вигляд:

$$\vec{V} = \frac{\vec{V}' + \vec{U}}{1 + \frac{(\vec{V}' \cdot \vec{U})}{c^2}}.$$

У класичній механіці швидкості набагато менші за швидкість світла ($V' \ll c$, $U \ll c$), тому релятивістський закон додавання швидкостей стає класичним.

Координати тіла, переміщення та його швидкість \vec{V} є різними відносно різних систем відліку. Траєкторія руху, шлях, переміщення і швидкість залежать від вибору системи відліку. **Це означає, що механічний рух є відносним.**

Задача 1. З пункту A проти течії вийшов моторний човен, швидкість якого 18 км/год відносно води. Швидкість води 2 м/с. На якій відстані від пункту A буде моторний човен через 2 години?

Дано:

$$V' = 18 \text{ км/год} = 5 \text{ м/с}$$

$$U = 2 \text{ м/с}$$

$$t = 2 \text{ год} = 7,2 \cdot 10^3 \text{ с}$$

Знайти: x - ?

Розв'язок

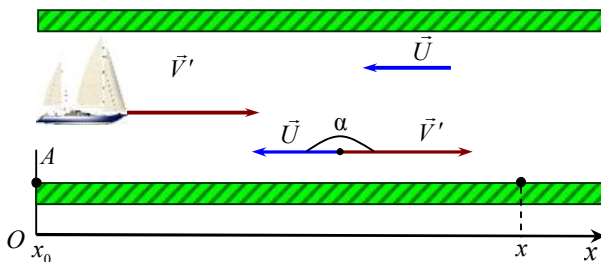


Рис.1.23

1. Рухатися проти течії означає, що вектор швидкості руху пароплава \vec{V}' направлений назустріч вектору швидкості води \vec{U} (рис. 1.23). Тобто кут між векторами \vec{V}' і \vec{U} дорівнює 180° або π ($\cos \pi = -1$).

2. Щоб знайти x , треба знайти швидкість човна V відносно берега (нерухомої системи). Тоді рівняння координати руху човна $x = x_0 + V \cdot t$, де початкова координата $x_0 = 0$. Отже $x = V \cdot t$.

3. За законом додавання швидкостей $\vec{V} = \vec{V}' + \vec{U}$. Залишається знайти модуль швидкості V . Застосовуємо формулу додавання двох векторів за правилом паралелограма:

$$V = \sqrt{(V')^2 + (U)^2 + 2V' \cdot U \cdot \cos \alpha} = \sqrt{(V')^2 + (U)^2 + 2V' \cdot U \cdot \cos \pi} = \\ = \sqrt{(V')^2 + (U)^2 - 2V' \cdot U} = \sqrt{(V' - U)^2} = V' - U.$$

Таким чином, $V = V' - U$

$$4. x = V \cdot t = (V' - U) \cdot t = (5 \text{ м/с} - 2 \text{ м/с}) \cdot 7,2 \cdot 10^3 \text{ с} = 2,16 \cdot 10^4 \text{ м}.$$

Відповідь: $x = 2,16 \cdot 10^4 \text{ м} = 21,6 \text{ км}.$

Задача 2. Козак хоче перепливати з одного берега Дніпра на інший перпендикулярно до напрямку течії найкоротшим шляхом. Модуль швидкості козака відносно води становить $V' = 0,75 \text{ м/с}$, а модуль швидкості течії – $U = 0,5 \text{ м/с}$. Під яким кутом α до течії має пливати козак?

Дано:

$$V' = 0,75 \text{ м/с}$$

$$U = 0,5 \text{ м/с}$$

Знайти: α - ?

Розв'язок

1. Позначимо швидкість козака відносно берега як вектор \vec{V} . За умовою задачі напрям вектора \vec{V} перпендикулярний до берега і вектора течії \vec{U} (рис.1.24). За законом додавання швидкостей

$$\vec{V} = \vec{V}' + \vec{U}$$

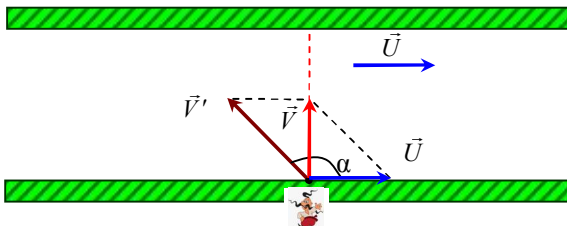


Рис.1.24

2. Знайдемо модуль швидкості \vec{V} відносно берега (нерухома система відліку). За умовами задачі вектор \vec{V} перпендикулярний до берега, тоді за теоремою Піфагора

$$V^2 + U^2 = V'^2$$

$$V = \sqrt{V'^2 - U^2}$$

3. За правилом паралелограма модуль швидкості \vec{V}

$$V = \sqrt{(V')^2 + (U)^2 + 2V' \cdot U \cdot \cos\alpha}.$$

Тоді маємо рівність:

$$\sqrt{V'^2 - U^2} = \sqrt{(V')^2 + (U)^2 + 2V' \cdot U \cdot \cos\alpha}$$

$$V'^2 - U^2 = V'^2 + U^2 + 2V' \cdot U \cdot \cos\alpha$$

$$-2U^2 = 2V' \cdot U \cdot \cos\alpha$$

$$\cos\alpha = -\frac{U}{V'}$$

$$\alpha = \arccos\left(-\frac{U}{V'}\right) = \arccos\left(-\frac{0,5}{0,75}\right) \approx 139^\circ.$$

$$\text{Відповідь: } \alpha = \arccos\left(-\frac{2}{3}\right) \approx 139^\circ.$$

СЛОВА І СЛОВОСПОЛУЧЕННЯ

моторний човен	powerboat	течія	flow, stream
проти	against	назустріч	towards
козак	kozak	плавати (пливти)	to swim
найкоротший	shortest	берег	bank
нерухома система відліку	fixed reference system	рухома система відліку	mobile reference system

І. Дайте відповіді на запитання

1. Яким є механічний рух?
2. Від чого залежить швидкість і переміщення?

3. Як додаються швидкості тіла у рухомій та нерухомій системі відліку і як враховується швидкість рухомої системи відносно нерухомої?

II. Виконайте вправи

1. Дайте означення класичного закону додавання швидкостей.

2. Запишіть формулу закону додавання швидкостей.

3. Зі слова «*рух*» утворіть прикметник до словосполучення «система відліку».

3. Зі слів «*рух*» і префікса «*не*» утворіть прикметник до словосполучення «система відліку».

4. Вставте потрібне слово (слова) у речення.

а) Переміщення $\Delta \vec{r}$ тіла відносно берега є ... двох переміщень.

б) Координати тіла, переміщення та його швидкість \vec{V} є різними ... різних систем відліку.

в) Рівняння $\vec{V} = \vec{V}' + \vec{U}$ – це класичний ... швидкостей.

5. Човен рухається під кутом 120° до напрямку течії ріки. Швидкість човна відносно води 1 м/с , швидкість течії така ж сама. Знайдіть модуль швидкості човна відносно берега.

6. З точок A і B одночасно почали рух два човни назустріч один одному. Відстань між точками A і B дорівнює 2 км . Човен, що рухається з точки A , має швидкість 4 м/с . Човен, що рухається з точки B , має швидкість 7 м/с . Течія має напрям від A до B . Швидкість течії дорівнює 1 м/с . На якій відстані від точки A човни зустрінуться?

7. Плавець перепливає річку, яка має ширину $d = 150 \text{ м}$. Швидкість плавця відносно води 1 м/с , швидкість течії $0,5 \text{ м/с}$. Знайти час, який необхідний плавцю, щоб дістатися до протилежного берега (рис.1.25). Кут між вектором швидкості плавця у воді \vec{V}' і вектором течії \vec{U} дорівнює $\alpha = 90^\circ$.

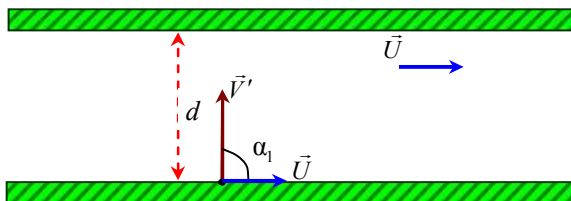


Рис.1.25

Запам'ятайте!

1. Що відносно чого
Швидкість течії відносно берега
2. Що залежить від чого
Переміщення залежить від
вибору системи відліку

§ 10. Нерівномірний рух. Прискорення

1. Швидкість нерівномірного руху

Рух, при якому тіло за однакові інтервали часу здійснює неоднакові переміщення, називається нерівномірним або змінним рухом.

При цьому $\Delta t_1 = \Delta t_2 = \dots = \Delta t_n$ і $t = \Delta t_1 + \Delta t_2 + \dots + \Delta t_n$, а $\Delta \vec{r}_1 \neq \Delta \vec{r}_2 \neq \dots \neq \Delta \vec{r}_n$ і $\vec{r} = \Delta \vec{r}_1 + \Delta \vec{r}_2 + \dots + \Delta \vec{r}_n$.

Нерівномірний рух характеризується **середньою** і **миттєвою** швидкостями.

Середня швидкість руху тіла - це середня швидкість переміщення \vec{r} (вектор \vec{V}_{cp}) і середня швидкість подолання

шляху (скаляр V_{cp}): $\vec{V}_{cp} = \frac{\vec{r}}{t}$ або $V_{cp} = \frac{S}{t}$.

Нехай тіло за послідовні інтервали часу Δt_n долає відповідні відрізки шляху ΔS_n .

За весь час руху $t = \sum_n \Delta t_n$ тіло пройде увесь шлях
 $S = \sum_n \Delta S_n$.

Тоді середня швидкість $V_{сер} = \frac{\sum_n \Delta S_n}{\sum_n \Delta t_n}$.

Задача

Першу половину шляху тіло рухалось зі швидкістю 60 км/год, а другу половину шляху - зі швидкістю 40 км/год. Знайти середню швидкість руху тіла.

Дано:

$$V_1 = 60 \text{ км/год}$$

$$V_2 = 40 \text{ км/год}$$

Знайти: $V_{сер}$ - ?

Розв'язок

1. Середня швидкість на всьому шляху дорівнює: $V_{сер} = \frac{S}{t}$, де

$S = S_1 + S_2$, а $t = t_1 + t_2$. За умовою $S_1 = S_2 = \frac{S}{2}$. Тоді $t_1 = \frac{S}{2V_1}$, а

$$t_2 = \frac{S}{2V_2}.$$

2. Знайдемо середню швидкість:

$$V_{сер} = \frac{S}{\frac{S}{2V_1} + \frac{S}{2V_2}} = \frac{2V_1V_2}{V_1 + V_2}, \quad V_{сер} = \frac{2 \cdot 60 \cdot 40}{60 + 40} = 48 \text{ км/год}.$$

Відповідь: $V_{сер} = 48 \text{ км/год}$.

Миттєва швидкість. Під час нерівномірного руху швидкість тіла змінюється з часом. Якщо за час Δt

переміщення точки A дорівнює $\Delta \vec{r}$, тоді відношення $\frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t}$ визначає середню швидкість за цей час.

Якщо зменшувати інтервал часу Δt , напрям вектора переміщення $\Delta \vec{r}$ наближається до дотичної в точці A траєкторії руху в момент часу Δt .

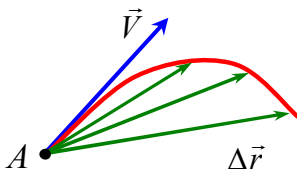


Рис.1.26

Тому вектор швидкості \vec{V} є дотичним до траєкторії руху тіла в кожній точці траєкторії.

Миттєвою швидкістю називають швидкість тіла в даний момент часу в даній точці траєкторії.

Миттєву швидкість визначають за формулою:

$$\vec{V} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t}.$$

Миттєва швидкість дорівнює **границі** відношення переміщення до проміжку часу, якщо цей проміжок часу нескінченно мала величина.

З математики відомо, що границя $\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t}$ є **похідною** функції $\vec{r}(t) = \frac{d\vec{r}(t)}{dt} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t}$ в даний момент часу в даній точці траєкторії руху тіла.

Приклад. Знайдемо похідну координати $x'(t)$ для рівняння координати рівномірного прямолінійного руху $x(t) = x_0 + V \cdot t$:

$$x'(t) = \frac{dx(t)}{dt} = (x_0 + V \cdot t)' = V; \quad V = x'(t).$$

Отже, швидкість тіла, яке рухається рівномірно і прямолінійно, в будь-який момент часу дорівнює похідній по часу функції координати тіла.

2. Рівноприскорений рух. Прискорення

Рівноприскореним прямолінійним рухом називається такий рух, під час якого, швидкість тіла за будь-які однакові інтервали часу змінюється на одну й ту саму величину.

Фізична векторна величина, на яку змінюється швидкість тіла називається **прискоренням**.

Прискорення – це векторна величина \vec{a} , яка дорівнює відношенню вектора зміни швидкості $\Delta\vec{V}$ до інтервалу часу Δt , протягом якого ця зміна відбулася:

$$\vec{a} = \frac{\vec{V} - \vec{V}_0}{t - t_0} = \frac{\Delta\vec{V}}{\Delta t}, \text{ де } \vec{V}_0 - \text{початкова швидкість, } \vec{V} - \text{кінцева}$$

швидкість.

Прискорення характеризує зміну швидкості за одиницю часу. Одиниця прискорення в СІ – метр на секунду у квадраті (м/с^2).

Якщо відлік часу вести з моменту $t_0 = 0$, тоді $\vec{a} = \frac{\Delta\vec{V}}{t}$.

Відповідно до цієї формули значення вектора швидкості в будь-який момент часу t :

$$\vec{V}(t) = \vec{V}_0 + \vec{a}t$$

Отримали залежність зміни швидкості від часу при рівноприскореному русі тіла.

В проекціях на вісь Ox :

$$a_x = \frac{V_x - V_{0x}}{t}.$$

На рис.1.27 наведено приклад **рівноприскореного** руху в додатному напрямі осі Ox : модуль вектора швидкості збільшується.

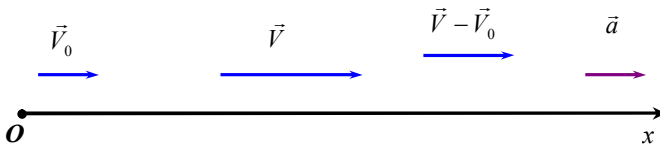


Рис.1.27

При рівноприскореному русі тіла виконуються наступні співвідношення:

$$\vec{a} = \frac{\Delta \vec{V}}{t}; a_x = \frac{V_x - V_{0x}}{t}; V_x > V_{0x}; \Delta V > 0; a_x > 0$$

При рівноприскореному русі напрям вектора швидкості \vec{V} співпадає з напрямом вектора прискорення \vec{a} (кут між векторами \vec{V} і \vec{a} дорівнює 0°).

На рис.1.28 наведено приклад **рівносповільненого** руху в додатному напрямі осі Ox : модуль вектора швидкості зменшується.

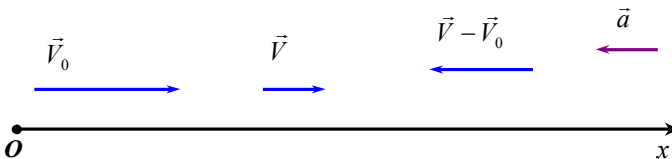


Рис.1.28

При рівносповільненому русі тіла виконуються наступні співвідношення:

$$\vec{a} = \frac{\Delta \vec{V}}{t}; a_x = \frac{V_x - V_{0x}}{t}; V_x < V_{0x}; \Delta V < 0; a_x < 0$$

При рівносповільненому русі напрям вектора швидкості \vec{V} і вектор прискорення \vec{a} мають протилежні напрями (кут між векторами \vec{V} і \vec{a} дорівнює 180°).

СЛОВА І СЛОВОСПОЛУЧЕННЯ

нерівномірний рух	ununiform motion	прискорення	acceleration
середня швидкість	average velocity	миттєва швидкість	instantaneous velocity
проекція швидкості	velocity projection	дотична	tangent
границя	limit	похідна	derivative
додатний напрям	positive direction	від'ємний напрям	negative direction
рівно-прискорений рух	uniformly accelerated motion	рівно-сповільнений рух	uniformly decelerated motion
модуль швидкості зростає	increasing module speed	модуль швидкості зменшується	decreasing module speed

І. Дайте відповіді на запитання

1. Який рух називається нерівномірним прямолінійним рухом?
2. Чому дорівнює середня швидкість?
3. Що таке миттєва швидкість?
4. Як розташований вектор швидкості до траєкторії руху тіла?
5. Який рух називають рівноприскореним?
6. Що називається прискоренням?
7. Яка одиниця вимірювання прискорення в СІ?
8. Як зміниться швидкість тіла, якщо прискорення і швидкість тіла мають один напрям?
9. Як зміниться швидкість тіла, якщо прискорення і швидкість тіла мають протилежні напрями?

ІІ. Виконайте вправи

1. Зі слів «*прискорення*» і «*рівно*» утворіть прикметник до слова «рух».

2. Зі слів «*повільно*» і «*рівно*» утворіть прикметник до слова «рух».

3. Вставте потрібне слово (слова) у речення.

а) Нерівномірний рух характеризується ... і ... швидкостями. б) Миттєва швидкість дорівнює ... відношення переміщення до проміжку часу.

в) При рівносповільненому русі напрям вектора швидкості \vec{V} і вектор прискорення \vec{a} мають ... напрями.

4. Запишіть формули для визначення середньої та миттєвої швидкостей.

5. Запишіть формулу для визначення прискорення тіла.

6. Автомобіль проїхав відстань від міста A до міста B зі швидкістю 70 км/год, а назад повертався з швидкістю 90 км/год. Якою була середня швидкість руху автомобіля?

7. Автомобіль одну годину рухався зі швидкістю $V_1=70$ км/год, а наступні дві години – зі швидкістю $V_2=90$ км/год. Знайти середню швидкість руху автомобіля.

8. Велосипедист їхав з одного міста до другого. Половину шляху він проїхав з швидкістю 12 км/год. Далі половину часу руху, що залишився, їхав з швидкістю 6 км/год, а потім до кінця шляху йшов пішки з швидкістю 4 км/год. Визначити середню швидкість руху велосипедиста на всьому шляху.

9. Початкова швидкість тіла $V_0=5$ м/с. За 5 секунд швидкість тіла збільшилась у 2 рази. Знайти прискорення тіла.

Запам'ятайте!

1. Що характеризується чим

Нерівномірний рух характеризується середньою і миттєвою швидкостями

2. Що визначають чим

Миттєву швидкість визначають за формулою

§ 11. Рівноприскорений прямолінійний рух

1. Рівняння швидкості

При рівноприскореному прямолінійному русі, початкова швидкість якого \vec{V}_0 , прискорення $\vec{a} = \frac{\vec{V} - \vec{V}_0}{t}$. Звідки швидкість

$\vec{V} = \vec{V}_0 + \vec{a}t$ – це **рівняння швидкості**. Проекція вектора швидкості на вісь: $V_x = V_{0x} + a_x t$.

1. Нехай швидкість збільшується ($\vec{V} > \vec{V}_0$) і напрямки вектора прискорення і вектора швидкості збігаються. В такому випадку $V_{0x} = V_0$, $V_x = V$, $a_x = a$ і тоді $V = V_0 + at$.

2 Нехай швидкість зменшується ($\vec{V} < \vec{V}_0$) і напрям вектора прискорення є протилежним до напрямку вектора швидкості. В такому випадку $V_{0x} = V_0$, $V_x = V$, $a_x = -a$ і тоді $V = V_0 - at$.

3. Зобразимо графік залежності проекції прискорення від часу $a_x = a$ (Рис.1.29). Залежність проекції вектора прискорення від часу є прямою лінією, яка паралельна осі часу Ot .

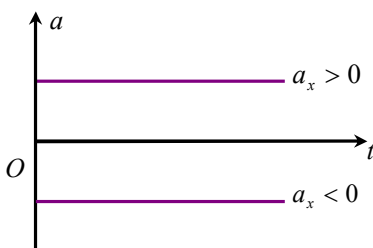


Рис.1.29

4. Зобразимо графік проекції швидкості $V_x = V$ (Рис.1.30). Відрізок 1 – залежність швидкості від часу $V = V_0 + at$ (швидкість збільшується), відрізок 2 – залежність швидкості від часу $V = V_0 - at$ (швидкість зменшується). V_0 – початкова швидкість.

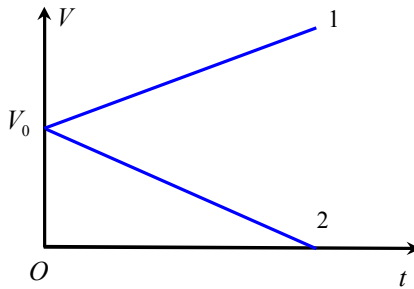


Рис.1.30

2. Рівняння шляху і координати

При рівноприскореному русі проекція швидкості є **лінійною залежністю** від часу. Якщо $V_x = V$, тоді $V = V_0 - at$. Відомо, що середнє значення лінійної функції дорівнює середньому арифметичному, тобто $V_{\text{сеп}} = \frac{V_0 + V}{2}$. Шлях тіла при рівноприскореному прямолінійному русі можна знайти за формулою $S = V_{\text{сеп}} \cdot t$. Підставимо в цю формулу вираз для середньої швидкості. Отримаємо: $S = \frac{V_0 + V}{2} \cdot t$. Замість V підставимо вираз $V = V_0 - at$:

$$S = \frac{V_0 + V_0 - at}{2} t = V_0 t - \frac{at^2}{2}.$$

$S = V_0 t - \frac{at^2}{2}$ – **це рівняння шляху** рівноприскореного прямолінійного руху.

Якщо $\vec{V} < \vec{V}_0$, рівняння шляху має вигляд: $S = V_0 t - \frac{at^2}{2}$. У випадку $V_0 = 0$ маємо рівняння $S = \frac{at^2}{2}$.

$$x = x_0 + V_{0x}t + \frac{a_x t^2}{2} \quad - \quad \text{це рівняння координати}$$

рівноприскореного прямолінійного руху, де x_0 – початкова координата; V_{0x} – проекція початкової швидкості на вісь Ox ; a_x – проекція прискорення на вісь Ox . Рівняння шляху і координати ще називають **рівнянням руху тіла**.

Знайдемо вираз, який зв'яже шлях та швидкість рівноприскореного прямолінійного руху. Середня швидкість дорівнює $V_{\text{сер}} = \frac{V_0 + V}{2}$. З рівняння $V = V_0 + at$ знаходимо час руху. Середню швидкість V_{av} і час t підставимо у формулу рівняння шляху рівноприскореного прямолінійного руху:

$$t = \frac{V - V_0}{a}, \quad S = V_{\text{av}}t = \frac{V_0 + V}{2} \cdot \frac{V - V_0}{a} = \frac{V^2 - V_0^2}{2a}.$$

Отримаємо вираз $V^2 = V_0^2 + 2aS$.

3. Графік рівноприскореного руху

Графік залежності координати від часу при рівноприскореному русі – це **парабола**. На рис.1.30 зображені чотири параболи для різних випадків рівняння руху: 1 – початкова координата x_0 і початкова швидкість V_0 дорівнюють нулю; 2 – початкова координата x_0 дорівнює нулю, початкова швидкість V_0 не дорівнює нулю; 3 – початкова координата x_0 не дорівнює нулю, початкова швидкість V_0 не дорівнює нулю; 4 – початкова координата x_0 дорівнює нулю, початкова швидкість V_0 не дорівнює нулю, прискорення направлене проти напрямку початкової швидкості V_0 (рівносповільнений рух).

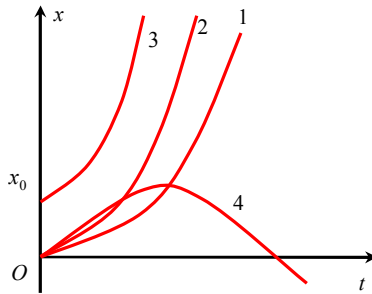


Рис.1.30

$$1 - x = \frac{a_x t^2}{2}; \quad 2 - x = V_{0x} t + \frac{a_x t^2}{2};$$

$$3 - x = x_0 + V_{0x} t + \frac{a_x t^2}{2}; \quad 4 - S = V_{0x} t - \frac{a_x t^2}{2}.$$

Задача 1. Рівняння руху тіла має вигляд $x = 15t + 0,4t^2$. Знайти прискорення тіла. Визначити початкову швидкість і швидкість через 5 с.

Дано:

$$t = 5 \text{ с}$$

Знайти: $a_x - ?$ $V_{0x} - ?$ $V_x - ?$

Розв'язок

1. Порівняємо дане рівняння руху тіла з рівнянням руху у загальному вигляді: $x = x_0 + V_{0x} t + \frac{a_x t^2}{2}$ і $x = 15t + 0,4t^2$.

Очевидно, що $x_0 = 0$, $V_{0x} = 15 \text{ м/с}$, $\frac{a_x}{2} = 0,4 \text{ м/с}^2$. Отже $a_x = 0,8 \text{ м/с}^2$.

2. Швидкість тіла через 5 с знайдемо за допомогою формули $V_x = V_{0x} + a_x t$, $V_x = 15 \text{ м/с} + 0,8 \text{ м/с}^2 \cdot 5 \text{ с} = 19 \text{ м/с}$.

Відповідь: $V_x = 19 \text{ м/с}$.

Задача 2.

Тіло рухається рівноприскорено. За п'яту секунду тіло долає шлях 45 м. Знайти прискорення тіла і шлях за десяту секунду.

Дано:

$$\Delta S_5 = 45 \text{ м}$$

Знайти: $a - ? \Delta S_{10} - ?$

Розв'язок

1. Потрібно розрізняти шлях за п'ять секунд і шлях за п'яту секунду (кількісний і порядковий чисельники). Щоб визначити шлях за п'яту секунду руху потрібно визначити шлях за п'ять секунд S_5 і за чотири секунди S_4 і знайти їхню різницю:

$$\Delta S_5 = S_5 - S_4, \text{ де } S_5 = \frac{at_5^2}{2}, S_4 = \frac{at_4^2}{2}, t_5 = 5 \text{ с}, t_4 = 4 \text{ с}.$$

$$\Delta S_5 = \frac{at_5^2}{2} - \frac{at_4^2}{2}$$

$$45 \text{ м} = \frac{a}{2}(t_5^2 - t_4^2) = \frac{a}{2}(25 - 16) \text{ с}^2 \Rightarrow a = \frac{2 \cdot 45}{9} = 10 \text{ м/с}^2.$$

2. У такий самий спосіб знаходимо шлях за десяту секунду:

$$\Delta S_{10} = S_{10} - S_9,$$

$$\text{де } S_{10} = \frac{at_{10}^2}{2}, S_9 = \frac{at_9^2}{2}, t_{10} = 10 \text{ с}, t_9 = 9 \text{ с}, a = 10 \text{ м/с}^2.$$

$$\Delta S_{10} = S_{10} - S_9 = \frac{at_{10}^2}{2} - \frac{at_9^2}{2} = \frac{a}{2}(t_{10}^2 - t_9^2) = \frac{10 \text{ м/с}^2}{2}(100 - 81) \text{ с}^2 = 95 \text{ м}.$$

Відповідь: $a = 10 \text{ м/с}^2, \Delta S_{10} = 95 \text{ м}.$

СЛОВА І СЛОВОСПОЛУЧЕННЯ

лінійна залежність	linear dependence	вивести формулу	to obtain a formula
середнє арифметичне	arithmetical average	проекція прискорення	acceleration projection
початкова швидкість	initial speed	кінцева швидкість	final speed
початкова координата	initial coordinate	кінцева координата	final coordinate
рівняння швидкості	equation of velocity	рівняння координати	equation of coordinate
рівняння	equation	рівняння	equation

шляху	of traveled distance	руху	of motion
графік проекції швидкості	graph of velocity projection	графік координати	graph of coordinate
графік шляху	graph of traveled distance	графік проекції прискорення	graph of acceleration projection
пряма	straight line	парабола	parabola

I. Дайте відповіді на запитання

1. Який рух називається рівноприскореним прямолінійним рухом?
2. В яких одиницях СІ вимірюється шлях, швидкість, прискорення?
3. Як направлений вектор прискорення по відношенню до вектора швидкості, якщо тіло рухається рівносповільнено?
4. Як направлений вектор прискорення по відношенню до вектора швидкості, якщо тіло рухається рівноприскорено?

II. Виконайте вправи

1. Зі слова «*лінія*» утворіть прикметник до слова «залежність».
2. Зі слів «*початок*» і «*кінець*» утворіть прикметники до слова «швидкість».
3. Вставте потрібне слово (слова) у речення.
 - а) Якщо $V = V_0 - at$, то швидкість тіла ...
 - б) Якщо $V = V_0 + at$, то швидкість тіла ...
 - в) При рівноприскореному русі проекція швидкості є ... від часу.
4. Запишіть рівняння швидкості, шляху та координати рівноприскореного руху.

5. На рис.1.31 зображено два графіки залежності швидкості V_1 та швидкості V_2 від часу. Знайти прискорення a_1 та a_2 . Записати рівняння швидкості і рівняння руху для обох тіл.

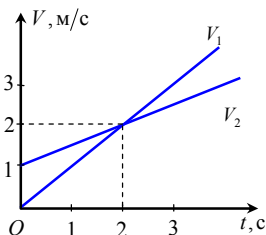


Рис.1.31

6. Потяг рухається зі швидкістю 72 км/год. Під час гальмування до повної зупинки він подолав відстань 200 м. Знайти час гальмування?

7. Автомобіль рухається з прискоренням $0,5 \text{ м/с}^2$. ($V_0 = 0 \text{ м/с}$). Який шлях автомобіль долає за третю секунду?

8. За п'яту секунду тіло долає відстань на 1 м більше, ніж за третю секунду. Чому дорівнює прискорення тіла, якщо початкова швидкість тіла $V_0 = 0 \text{ м/с}$?

Запам'ятайте!

1. З чого знаходимо що

З рівняння $V = V_0 + at$ знаходимо час руху.

2. Що є чим

Графік залежності є параболою.

§ 12. Рух тіл і гравітація. Криволінійний рух

На всі фізичні тіла на поверхні Землі діє **гравітація**. **Гравітаційна сила** діє при **вільному падінні тіл**, руху тіл, які кинули **горизонтально** або під кутом до **горизонту**. Такий рух відбувається з **прискоренням вільного падіння** $g = 9,8 \text{ м/с}^2$. Прискорення вільного падіння направлене до центра Землі і перпендикулярно до поверхні.

1. Вільне падіння тіл

Вільне падіння тіл поблизу поверхні Землі – це приклад рівноприскореного прямолінійного руху під дією гравітації. Нехай тіло вільно падає з висоти h (рис.1.32). Початкова швидкість тіла при вільному падінні дорівнює $V_0 = 0 \text{ м/с}$, а прискорення $a = g = 9,8 \text{ м/с}^2$. Величина прискорення вільного падіння залежить від висоти над поверхнею Землі і географічної широти. Так на екваторі $g = 9,780 \text{ м/с}^2$, а на полюсі $g = 9,832 \text{ м/с}^2$. На висотах від 0 до декількох кілометрів (0-10 км) прискорення вільного падіння – це стала величина і її середнє значення дорівнює $g = 9,8 \text{ м/с}^2$.

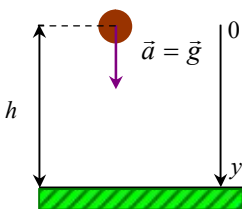


Рис.1.32

Рівняння руху тіла при рівноприскореному прямолінійному русі має вигляд: $y = y_0 + V_{0y}t + \frac{a_y t^2}{2}$. Рух тіла відбувається вздовж осі

О_y, причому $y_0 = 0$, $V_{0y} = 0$, $a_y = g$. Тоді рівняння руху матиме вигляд: $y = \frac{gt^2}{2}$.

Швидкість тіла в будь-який момент часу $V = V_y = gt$. На висоті h швидкість тіла дорівнює 0. На поверхні швидкість тіла максимальна. Шлях, який подолає тіло (висота падіння) $h = \frac{gt^2}{2}$.

Звідси час падіння тіла $t = \sqrt{\frac{2h}{g}}$. Тоді швидкість тіла на поверхні: $V = \sqrt{2gh}$.

2. Рух тіла, кинутого вертикально вгору

Рух тіла, кинутого вертикально вгору має два етапи: перший етап – рух угору до найвищої точки траєкторії (максимальної висоти підйому H); другий етап – вільне падіння тіла з висоти H . На першому етапі рух тіла рівносповільнений, на другому етапі – рівноприскорений.

I етап. Тіло, яке кинули вертикально вгору має початкову швидкість V_0 і прискорення $a_y = -g$. Вектор прискорення вільного падіння і вектор швидкості тіла, яке піднімається вертикально вгору мають протилежні напрямки. В найвищій точці (висота H) тіло зупиниться (рис.1.33).

Швидкість тіла $V = V_0 - gt$, де V_0 – початкова швидкість. Час руху тіла вгору до зупинки на висоті H ($V = 0$): $t = \frac{V_0}{g}$. З

рівняння руху $y = y_0 + V_0t - \frac{gt^2}{2}$ знаходимо максимальну висоту

підйому тіла $H = V_0t - \frac{gt^2}{2}$. Підставимо в це рівняння час $t = \frac{V_0}{g}$:

$$H = V_0 \frac{V_0}{g} - \frac{g \left(\frac{V_0}{g} \right)^2}{2} = \frac{V_0^2}{2g}, \quad H = \frac{V_0^2}{2g}.$$

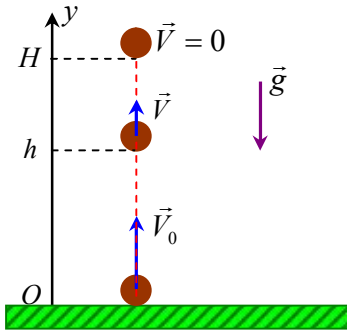


Рис.1.33

II етап. Після досягнення висоти H тіло зупиняється і починає вільно падати. Тоді $H = \frac{V_{\kappa}^2}{2g}$, де V_{κ} – кінцева швидкість тілі при падінні. Тоді,

$$\frac{V_0^2}{2g} = \frac{V_{\kappa}^2}{2g}, \quad V_0 = V_{\kappa}.$$

$$t_I = \frac{V_0}{g} \text{ – час підйому на висоту } H. \quad t_{II} = \frac{V_{\kappa}}{g} \text{ – час падіння з}$$

висоти H . Так як $V_0 = V_{\kappa}$, то $t_I = t_{II}$.

Початкова швидкість тіла, яке кинули вертикально вгору дорівнює його кінцевій швидкості при падінні. Час підйому тіла на максимальну висоту дорівнює часу його падіння.

Задача

Тіло вільно падає з висоти 98 м. Одночасно кинули інше тіло вертикально вгору зі швидкістю 39,2 м/с. Через який час і на якій висоті від Землі ці тіла зустрінуться (рис.1.34)?

Дано:

$$H = 98 \text{ м}$$

$$V_0 = 39,2 \text{ м/с}$$

$$g = 9,8 \text{ м/с}^2$$

Знайти: t —?, h —?

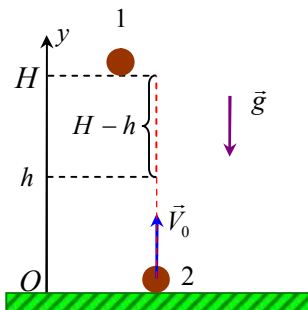


Рис.1.34

Розв'язок

1. Шлях, який долає перше тіло при вільному падінні до моменту зустрічі з другим тілом дорівнює $H - h = \frac{gt^2}{2}$.

2. За час t друге тіло підніметься на висоту: $h = V_0 t - \frac{gt^2}{2}$.

3. Маємо систему рівняння, з якої треба знайти t і h .

$$\begin{cases} H - h = \frac{gt^2}{2} \\ h = V_0 t - \frac{gt^2}{2} \end{cases}$$

Додамо до першого рівняння друге: $H - h + h = \frac{gt^2}{2} + V_0 t - \frac{gt^2}{2}$.

$$t = \frac{H}{V_0} = \frac{98 \text{ м}}{39,2 \text{ м/с}} = 2,5 \text{ с};$$

$$h = H - \frac{gt^2}{2} = 67,4 \text{ м.}$$

Відповідь: $h = 67,4 \text{ м, } t = 2,5 \text{ с.}$

3. Криволінійний рух. Приклади криволінійного руху

Криволінійний рух – це рух тіла, траєкторія якого є крива лінія. У полі гравітації Землі криволінійний рух тіла відбувається коли кут між напрямком швидкості і напрямком вектора прискорення вільного падіння не дорівнює 0° і не дорівнює 180° . Криволінійний рух розглядають як два незалежні рухи: один рух вздовж осі Ox , а другий вздовж осі Oy . Існує два випадки криволінійного руху, траєкторія якого є параболою.

Тіло, кинуте горизонтально. Кут між вектором початкової швидкості і вектором прискорення вільного падіння складає 90° . Такий рух можна розкласти на два незалежні рухи: прямолінійний рівномірний вздовж осі Ox і вільне падіння вздовж осі Oy з висоти H , на якій знаходилося тіло (рис. 1.35). Вектор швидкості тіла \vec{V} дорівнює векторній сумі $\vec{V} = \vec{V}_x + \vec{V}_y$, де $\vec{V}_x = \vec{V}_0$, $\vec{V}_y = \vec{g}t$.

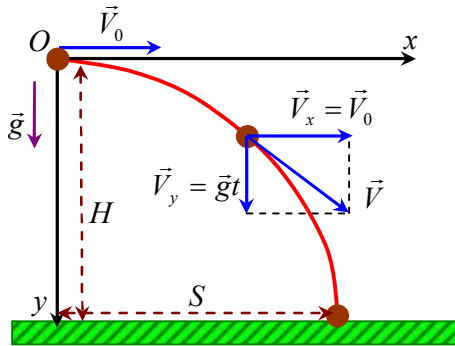


Рис.1.35

Рівняння руху тіла в проекції на вісь Ox : $V_{0x} = V_0$, тоді $x = V_0 \cdot t$. Рівняння руху тіла в проекції на вісь Oy : $V_y = g \cdot t$, тоді

$y = \frac{gt^2}{2}$. З останнього рівняння знаходимо час польоту тіла:

$t = \sqrt{\frac{2y}{g}}$. Якщо тіло досягає поверхні Землі, то координата

$y = H$, де H – висота, з якою кинули тіло. Отже $t = \sqrt{\frac{2H}{g}}$.

Відстань $S = x$, яку подолає тіло у горизонтальному напрямку

дорівнює $S = V_0 \cdot \sqrt{\frac{2H}{g}}$.

Дальність польоту S – це максимальна відстань, яку тіло долає в горизонтальному напрямку до точки падіння.

З рівняння $x = V_0 t$ знайдемо t і підставимо його у вираз

$y = \frac{gt^2}{2}$. Отримаємо $y = \frac{g}{2V_0^2} \cdot x^2$. Рівняння траєкторії руху тіла

– це **парабола**.

Тіло, кинуте під кутом до горизонту. Кут α між вектором початкової швидкості і вектором прискорення вільного падіння має довільне значення. Такий рух можна розкласти на два незалежні рухи: прямолінійний рівномірний вздовж осі Ox і рух тіла, яке кинули вертикально вгору вздовж осі Oy (рис. 1.36).

Вектор швидкості тіла \vec{V} дорівнює векторній сумі $\vec{V} = \vec{V}_x + \vec{V}_y$,

де $\vec{V}_x = \vec{V}_{0x}$, $\vec{V}_y = \vec{V}_{0y} + \vec{g}t$, $\vec{V}_0 = \vec{V}_{0x} + \vec{V}_{0y}$.

Рух тіла, кинутого під кутом α до горизонту, має два етапи: I етап – тіло піднімається рівносповільнено до найвищої точки траєкторії H ; II етап – тіло рухається рівноприскорено вздовж до падіння на поверхню Землі. Тіло рухається вздовж осі Oy так само як рухається тіло, яке кинули вертикально вгору і яке досягає висоти H . Вздовж осі Ox тіло долає шлях S і весь час рухається рівномірно і прямолінійно.

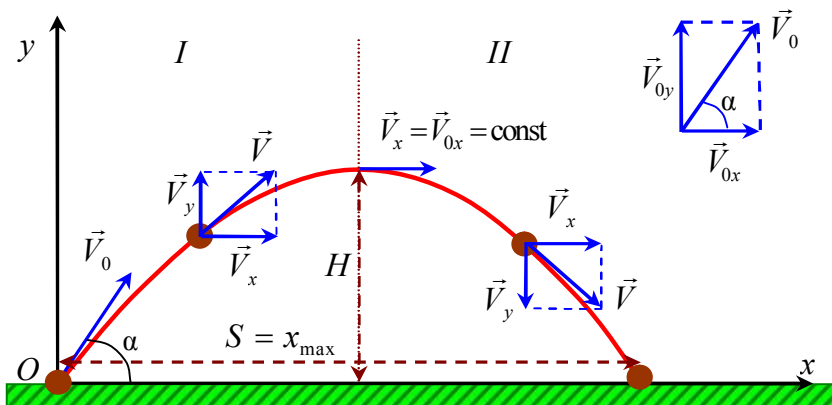


Рис.1.36

Знайдемо значення модулів векторів \vec{V}_{0x} і \vec{V}_{0y} : $V_{0x} = V_0 \cos \alpha$; $V_{0y} = V_0 \sin \alpha$.

Компоненти швидкості під час рівносповільненого руху тіла до найвищої точки траєкторії: $V_x = V_0 \cos \alpha$, $V_y = V_0 \sin \alpha - gt$.

Рівняння координат тіла: $x = V_0 \cos \alpha \cdot t$, $y = V_0 \sin \alpha \cdot t - \frac{gt^2}{2}$.

З останніх двох рівняння виділяємо час t і знаходимо рівняння траєкторії руху тіла:

$$y = \operatorname{tg} \alpha \cdot x - \frac{g}{2V_0^2 \cos^2 \alpha} \cdot x^2.$$

Це рівняння є рівнянням **параболи**, гілки якої направлені вниз.

Час, який тіло рухається вгору до максимальної висоти H дорівнює часу падіння з максимальної висоти на поверхню Землі: $t_I = t_{II}$.

На висоті H швидкість $V_y = V_0 \sin \alpha - gt_I = 0$, звідки знаходимо $t_I = \frac{V_0 \sin \alpha}{g}$, де t_I — час підйому тіла на висоту H .

Якщо у рівняння координати $y = V_0 \sin \alpha \cdot t - \frac{gt^2}{2}$ підставити час t_I , то отримаємо значення величини H ,

$$H = V_0 \sin \alpha \cdot \frac{V_0 \sin \alpha}{g} - \frac{g}{2} \left(\frac{V_0 \sin \alpha}{g} \right)^2 = \frac{V_0^2 \sin^2 \alpha}{2g},$$

$$H = \frac{V_0^2 \sin^2 \alpha}{2g}.$$

Загальний час польоту тіла $t = t_I + t_{II} = 2t_I$ і дорівнює:

$$t = \frac{2V_0 \sin \alpha}{g}.$$

Дальність польоту:

$$S = x_{\max} = V_0 \cos \alpha \cdot \frac{2V_0 \sin \alpha}{g} = \frac{V_0^2 \sin 2\alpha}{g}.$$

Дальність польоту тіла буде максимальною при даній початковій швидкості \vec{V}_0 коли $\sin 2\alpha = 1$ і кут $\alpha = 45^\circ$.

Рух тіл в атмосфері Землі зустрічає опір повітря. Траєкторія руху тіла не відповідає математичній параболі. В реальних умовах траєкторія руху тіла – це балістична крива (рис.1.37).

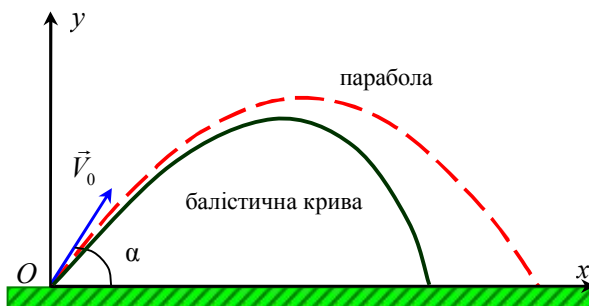


Рис.1.37

Задача

Визначити координату y_{\max} найвищої точки траєкторії тіла, координату x_n - точки падіння і швидкість V_n в цій точці.

Тіло кинули під кутом $\alpha = 30^\circ$ до горизонту з положення, яке має координату $y_0 = 5$ м над поверхнею. Початкова швидкість тіла становила 10 м/с. Визначити координату y_{\max} найвищої точки траєкторії тіла, координату x_n - точки падіння і швидкість тіла V_n в цій точці (рис.1.38).

Дано:

$$\alpha = 30^\circ$$

$$y_0 = 5 \text{ м}$$

$$V_0 = 10 \text{ м/с.}$$

Знайти: $y_{\max} - ?$, $x_n - ?$, $V_n - ?$

Розв'язок

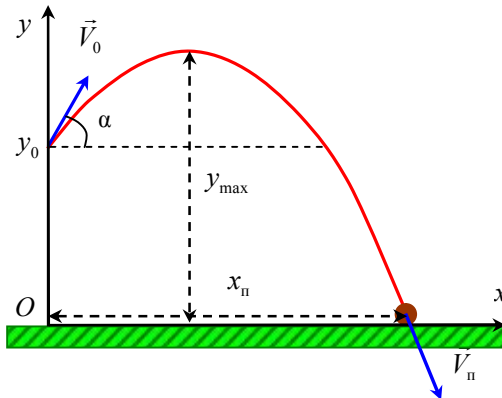


Рис.1.38

1. Координата y_{\max} визначається формулою:

$$y_{\max} = y_0 + \frac{V_0^2 \sin^2 \alpha}{g}, \quad y_{\max} = \left(5 + \frac{10^2 \cdot 0,5^2}{2 \cdot 9,8} \right) \text{ м} \approx 6,3 \text{ м}.$$

2. Для визначення x_{Π} треба знайти час польоту тіла до падіння на Землю. Для цього ми використаємо рівняння руху тіло вздовж осі Oy (в кінці польоту координата y дорівнює 0):

$$y = y_0 + V_0 t_{\Pi} \sin \alpha - \frac{gt_{\Pi}^2}{2} = 0, \quad \text{звідси}$$

$$t_{\Pi} = \frac{V_0 \sin \alpha + \sqrt{V_0^2 \sin^2 \alpha + 2gy_0}}{g} \approx 1,6 \text{ с},$$

$$x_{\Pi} = V_0 t_{\Pi} \cos \alpha = 10 \cdot 1,6 \cdot 0,87 \text{ м} \approx 14 \text{ м}.$$

3. Кінцева швидкість V_{Π} дорівнює:

$$V_{\Pi} = \sqrt{(V_0 \cos \alpha)^2 + (V_0 \sin \alpha - gt_{\Pi})^2} = 14 \text{ м/с}.$$

Відповідь: $y_{\max} \approx 6,3 \text{ м}$, $t_{\Pi} \approx 1,6 \text{ с}$, $V_{\Pi} \approx 14 \text{ м/с}$.

СЛОВА І СЛОВОСПОЛУЧЕННЯ

гравітація	gravity	вільне падіння	free falling
вертикально вгору	vertical upwards	вертикально вниз	vertical down
горизонт	horizon	поверхня Землі	ground
незалежний рух	independent motion	прискорення вільного падіння	free falling acceleration
висота	height	вздовж осі	along axe
полюс	pole	екватор	equator
кинути	to throw	одночасно	simultaneously
географічна широта	geographical latitude	дальність польоту	range of flight
тіло, кинуте горизонтально	body that thrown horizontally	під кутом до горизонту	thrown at angle to the horizon
опір повітря	air resistance	час польоту	flight time

I. Дайте відповіді на запитання

1. Чому дорівнює середнє значення прискорення вільного падіння на Землі?
2. Який напрямок має вектор прискорення вільного падіння?
3. Від чого залежить модуль прискорення вільного падіння?
4. Де прискорення вільного падіння має більше значення на полюсі чи на екваторі?
5. Яка основна відмінність руху тіл з висоти h , одне з яких падає вільно, а інше – кинуте горизонтально?
6. Якою буде траєкторія руху тіла, яке кинули під кутом \vec{V}_0 до горизонту з початковою швидкістю \vec{V}_0 ?
7. Яким має бути значення кута α , щоби дальність польоту тіла була максимальною?

II. Виконайте вправи

1. Зі слова «горизонт» утворіть прикметник до слова «напрямок».
2. Зі слів «вертикаль» і «горизонталь» утворіть прислівник до дієслова «рухатись».
3. Вставте потрібне слово (слова) у речення.
 - а) Початкова швидкість тіла, яке кинули вертикально вгору дорівнює його кінцевій швидкості при
 - б) Час ... тіла на максимальну висоту дорівнює часу його падіння.
 - в) Криволінійний рух розглядають як два ... рухи.
4. Одне тіло рухається горизонтально, а інше вертикально. Визначте кут між напрямками руху цих тіл.
5. Запишіть рівняння параболи.
6. М'яч, підкинутий вертикально вгору, впав на Землю через 3 с. З якою швидкістю було кинуте м'яч і на яку висоту він піднімався?
7. Тіло падає з висоти 490 м. Визначити, яку відстань тіло пройде за останню секунду падіння.
8. Як зміняться час і дальність польоту тіла, кинутого горизонтально з деякої висоти, із збільшенням швидкості кидання в два рази?

9. Столом котиться кулька зі швидкістю 2 м/с і падає на відстані 0,8 м від столу. Яку висоту має стіл?

10. Камінь кинули під кутом 60° з початковою швидкістю 10 м/с. Знайти максимальну висоту підйому, дальність та час польоту каменю.

Запам'ятайте!

1. Що досягає чого

Тіло досягає висоти H

2. Що долає що

Тіло долає шлях S

§ 13. Рівномірний рух по колу

1. Лінійна та кутова швидкість

Рівномірний рух по колу є ще одним прикладом криволінійного руху. Траєкторією такого руху є **коло**. Рух по колу характеризується **лінійною** і **кутовою** швидкостями.

Рівномірним рухом по колу називають рух, при якому модуль швидкості не змінюється.

Розглянемо рух матеріальної точки по колу зі сталою швидкістю. Положення точки, яка рухається по колу, визначають **радіус-вектором**, проведеним з центра кола до даної точки. В кожній точці кола вектор швидкості \vec{V} спрямований по дотичній до кола і перпендикулярний до радіус-вектору \vec{r} . За час Δt точка здійснює рух дугою AB . При цьому точка долає шлях $\Delta S = \overset{\smile}{AB}$, а радіус-вектор \vec{r} здійснює поворот на $\Delta\phi$ (рис.1.39).

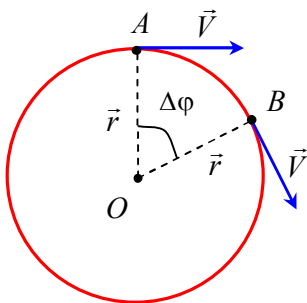


Рис.1.39

Модуль лінійної швидкості дорівнює: $V = \frac{\Delta S}{\Delta t}$, де ΔS – довжина дуги кола, що пройдена за час Δt . **Модуль лінійної швидкості матеріальної точки, яка рухається рівномірно по колу, дорівнює модулю миттєвої швидкості.**

Період обертання T – час повного оберту матеріальної точки по колу. Довжина кола $S = 2\pi R$ (де $R = |\vec{r}|$ – радіус кола). Тоді з виразу для лінійної швидкості отримаємо:

$$V = \frac{2\pi R}{T}.$$

Кількість обертів матеріальної точки за 1 секунду називається **частотою обертання**. Частоту обертання позначають літерою n . Період – це величина, обернено пропорційна частоті: $T = \frac{1}{n}$.

Тоді лінійна швидкість: $V = 2\pi Rn$.

При рівномірному русі по колу за будь які проміжки часу точка здійснює рівні **кутові переміщення**. Цей висновок можна записати так: $\frac{\Delta\phi}{\Delta t} = \text{const}$.

Вираз $\frac{\Delta\varphi}{\Delta t} = \text{const}$ називається **кутовою швидкістю** матеріальної точки, що рівномірно рухається по колу і позначається літерою ω .

Кутовою швидкістю називається фізична величина, що дорівнює відношенню кута $\Delta\varphi$, на який повертається радіус-вектор \vec{r} , до часу Δt : $\omega = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t}$

Одиницею СІ кутової швидкості є радіан за секунду (рад/с).

Радіаном називається кут, довжина дуги якого дорівнює радіусу кола R . Один радіан наближено дорівнює $57^\circ 17' 44''$ (п'ятдесят сім градусів сімнадцять хвилин сорок чотири секунди).

Якщо точка здійснює повний оберт по колу, то кут $\Delta\varphi = 2\pi$, а час повного оберту дорівнює періоду обертання, тобто $\Delta t = T$.

Кутова швидкість $\omega = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t}$. Враховуємо, що $T = \frac{1}{n}$. Тоді $\omega = 2\pi n$. З виразу для $V = \frac{2\pi R}{T}$ встановлюємо співвідношення між лінійною та кутовою швидкістю: $V = \omega R$.

Лінійна швидкість дорівнює добутку кутової швидкості на радіус кола.

2. Доцентрове прискорення

Під час рівномірного руху по колу модуль швидкості має сталі значення $V = \text{const}$. Напрямок вектора швидкості змінюється з часом $\vec{V} \neq \text{const}$. Вектор зміни швидкості завжди спрямований до центра кола. Рівномірний рух по колу – це рух з прискоренням \vec{a}_n (рис.1.40).

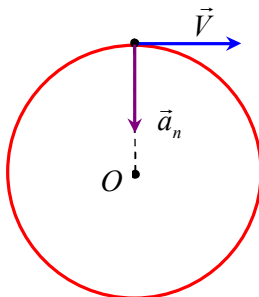


Рис.1.40

Прискорення, що змінює напрямок вектора миттєвої швидкості матеріальної точки під час її руху по колу, називається доцентровим прискоренням і дорівнює:

$$a_n = \frac{V^2}{R}.$$

Вектор доцентрового прискорення напрямлений до центра кола перпендикулярно до вектора миттєвої швидкості.

СЛОВА І СЛОВОСПОЛУЧЕННЯ

коло	circle	дуга	arc
радіан	radian	період обертання	rotation period
лінійна швидкість	linear velocity	частота обертання	rotation frequency
кутова швидкість	angular velocity	доцентрове прискорення	centripetal (normal) acceleration

I. Дайте відповіді на запитання

1. Як визначити лінійну швидкість рівномірного руху по колу?
2. Що називається кутовою швидкістю?
3. В яких одиницях вимірюють кутову швидкість?
4. Чому дорівнює радіан?
5. Що називають частотою обертання?
6. Що називається доцентровим прискоренням?

7. Що можна сказати про напрямок вектора миттєвої швидкості?

8. Куди направлений вектор доцентрового прискорення?

II. Виконайте вправи

1. Зі слова «*кут*» утворіть прикметник до слів «переміщення» та «швидкість».

2. Зі слів «*до*» і «*центр*» утворіть прикметник до слова «прискорення».

3. Вставте потрібне слово (слова) у речення.

а) В кожній точці кола вектор швидкості \vec{V} спрямований по ... до кола і ... до радіус-вектору \vec{r} .

б) Період ... T – час повного оберту матеріальної точки по колу.

в) Лінійна швидкість дорівнює ... кутової швидкості на радіус кола.

4. Запишіть формули визначення кутової швидкості, зв'язку лінійної і кутової швидкостей та доцентрового прискорення.

5. Тіло рухається по колу і здійснює 12 обертів за хвилину. Знайти період обертання та кутову швидкість. Яке прискорення має тіло, якщо радіус обертання дорівнює 2 м?

6. Визначити лінійну і кутову швидкість штучного супутника Землі, якщо період його обертання по орбіті 105 хвилин, а висота польоту 1200 км? Середній радіус Землі 6400 км.

7. Найдіть швидкість і прискорення точок земного екватора, обумовлені добовим обертанням Землі. Радіус Землі 6400 км.

8. Космонавтів тренують на перевантаження в спеціальних центрифугах. З якою частотою повинна обертатися центрифуга, щоб космонавт, який перебуває на відстані 3 м від осі обертання рухався з прискоренням $5g$?

Розділ 2. ДИНАМІКА² МАТЕРІАЛЬНОЇ ТОЧКИ

§ 14. Взаємодія тіл. Маса. Сила

Динаміка – це розділ механіки, у якому вивчають причини і закони руху фізичних тіл.

1. Взаємодія тіл, як причина руху

Рух фізичних тіл буває рівномірним і нерівномірним, прямолінійним і криволінійним. При цьому причини зміни модуля швидкості фізичних тіл, причини зміни напрямку вектора швидкості в кінематиці не відомі. Фізичне тіло починає рухатись, якщо на тіло діє інше тіло. Наприклад, металева кулька, що лежить на столі, починає рухатися тоді, коли на неї налетить інша кулька чи її просто штовхне рука людини. Якщо кулька мала початкову швидкість, то в результаті дії інших тіл може змінитися не тільки модуль, але і напрямок швидкості кульки. Але якщо на кульку не діють інші тіла, то вона самотійно не змінить власної швидкості, не почне рухатися відносно стола.

Дія другого тіла на перше називається **взаємодією** через те, що при цьому і перше тіло діє на друге (слово «взаємодія» складається з двох слів «взаємно» і «дія»).

Взаємодія – це сумісна дія кількох фізичних тіл, коли результат дії одного з них впливає на інші, що змінює їхню динамічну поведінку.

2. Маса тіла

Італійський фізик Галілей³ наприкінці XVI ст. зробив важливе відкриття: якщо на тіло не діють інші тіла, то тіло перебуває у стані спокою або рухається рівномірно і прямолінійно. Це явище було названо **інерцією**, а така властивість фізичних тіл – **інертністю**.

² Слово «динаміка» походить від грецького слова «динамік», яке означає – сила.

³ Галілео Галілей (1564-1642) – видатний італійський мислитель епохи Відродження, фізик, астроном, математик, засновник класичної механіки.

Інерція – явище збереження нерухомого стану або рівномірного прямолінійного руху за відсутності дії на тіло інших тіл (**рух за інерцією**).

Властивість тіла від якої залежить його прискорення при взаємодії з іншими тілами називається **інертністю**.

Інертність має кількісну міру. Фізична величина, яка є мірою інертності тіла називається **інертною масою** або просто **масою** тіла. Інертна маса – основна динамічна характеристика тіла.

Маса характеризує ще одну властивість тіл – здатність взаємодіяти з іншими тілами. У цих випадках маса виступає як міра **гравітації**, і її називають **гравітаційною масою**. В сучасній фізиці встановлена рівність значень інертної і гравітаційної маси тіла.

Одиницею вимірювання маси у СІ є 1 кілограм – 1 кг. Маса є скалярною величиною та позначається латинською буквою m . Існує два способи вимірювання маси. Перший спосіб – привести тіло невідомої маси у взаємодію з еталоном ($m_{em} = 1\text{кг}$). Властивість інертності має таку особливість, що різні тіла під дією на них однакових сил дістають різні прискорення. Відношення мас взаємодіючих тіл обернено пропорційне модулю їх прискорень:

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

Тому масу m_m тіла можна визначити за допомогою еталону масою m_{em} за формулою:

$$m_m = m_{em} \frac{a_{em}}{a_m},$$

де m_{em} - маса еталона 1 кг, а a_{em} , a_m - прискорення еталона і тіла.

Другий спосіб вимірювання маси тіла полягає у порівнянні маси тіла на терезах з еталоном. При цьому вимірюють вагу тіла, тобто порівнюють дію тіла і еталона на шальки терезів.

Маса тіла – це фізична величина, яка вважається однією з основних властивостей матерії. Маса визначає інерційні,

гравітаційні та енергетичні властивості фізичних тіл ($E = mc^2$) від макроскопічних об'єктів до атомів і елементарних частинок.

У сучасній фізиці елементарних частинок маса не є фундаментальною властивістю частинок матерії, а є наслідком взаємодії частинок зі спеціальним полем Хіггса⁴.

3. Густина тіла

Густина речовини ρ – це скалярна фізична величина, що дорівнює відношенню маси тіла до його об'єму:

$$\rho = \frac{m}{V}.$$

Фізичний зміст густини полягає в тому, що вона показує, яка маса даної речовини міститься в одиниці об'єму. Атоми різних хімічних елементів мають різні маси. Речовини складаються з атомів або молекул. Маса речовини є сумою мас атомів (молекул), які містяться у даному об'ємі речовини. На значення густини впливає також щільність упакування атомів (молекул) в одиниці об'єму. Одиниця густини в СІ – **кілограм на метр кубічний** (кг/м^3).

Числові значення густин різних речовин значно відрізняються одне від одного. Наприклад, густина води $\rho_{H_2O} = 1000 \text{ кг/м}^3$, густина заліза $\rho_{Fe} = 7800 \text{ кг/м}^3$, густина золота $\rho_{Au} = 19300 \text{ кг/м}^3$, густина дерева (сосна) $\rho = 500 \text{ кг/м}^3$.

4. Сила

Кількісною мірою дії на тіло інших тіл є сила. Сила є векторною величиною та позначається латинською буквою F . Під дією сили змінюється швидкість тіла або тіло деформується. **Деформація** – це зміна форми тіла під дією сили.

Силою називається фізична векторна величина, яка є мірою дії на тіло з боку інших тіл або фізичних полів.

⁴ Пітер Хігс (1929 р.н.) – англійський фізик-теоретик, передбачив існування механізму появи маси у субатомних елементарних частинок (1960 р.). У 2012 р. на підтвердження цього механізму на БАК було відкрито бозон Хіггса.

Сила повністю визначена, якщо задані її модуль, напрям і точка прикладання. Напрямок вектора сили співпадає з вектором прискорення тіла, на яке діє сила.

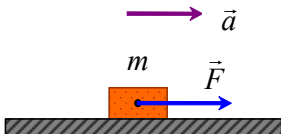


Рис.2.1

Сила – це вектор. Всі можливі дії з векторами (див. § 7, с.32) виконуються для сили, а саме: додавання, множення, розкладання на компоненти.

Одиниця сили в СІ – **Ньютон**⁵ (**Н**): $1\text{Н} = \frac{1\text{кг} \cdot 1\text{м}}{1\text{с}^2}$. Один

Ньютон – це сила, яка надає тілу масою 1 кг прискорення 1 м/с².

Рівнодійною силою називають силу, дією якої можна замінити дію декількох сил, прикладених до тіла в одній точці.

Рівнодійна сила дорівнює векторній сумі всіх сил, що діють на тіло:

$$\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_n = \sum_{i=1}^n \vec{F}_i$$

Якщо дві сили діють на тіло під кутом одна до одної, напрям їх рівнодійної збігається з діагоналлю паралелограма. Якщо сили мають однаковий напрямок, їх рівнодійна спрямована в той самий бік, а модуль рівнодійної сили дорівнює сумі їх модулів. Рівнодійна двох протилежно напрямлених сил спрямована в бік більшої сили.

Сили, що діють між частинами замкненої системи тіл, називаються **внутрішніми силами**.

Сили, що діють на системи тіл ззовні, називаються **зовнішніми силами**.

⁵ Одиниця вимірювання сили названа на честь видатного англійського фізика і математика Ісаака Ньютона (1642-1727), засновника класичної динаміки та математичного аналізу.

Система тіл, на яку не діють зовнішні сили, називається **замкненою або ізольованою системою**.

Задача. Дві сили $F_1 = 10\text{Н}$ і $F_2 = 25\text{Н}$ прикладені в одній точці і направлені вздовж однієї лінії в протилежних напрямках. Визначити рівнодійну силу (рис.2.2).

Дано:

$$F_1 = 10\text{Н}$$

$$F_2 = 25\text{Н}$$

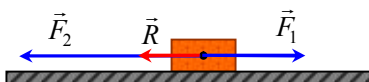


Рис.2.2

Знайти: $\vec{R} - ?$ і $\vec{F} - ?$

Розв'язок

1. Рівнодійна сила $\vec{R} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2$. Кут α між векторами \vec{F}_1 і \vec{F}_2 дорівнює 180° . Тоді за правилом додавання векторів

$$R = \sqrt{F_1^2 + F_2^2 + 2F_1F_2 \cdot \cos \alpha} = \sqrt{F_1^2 + F_2^2 - 2F_1F_2} = F_1 - F_2,$$

$R = F_1 - F_2 = -15\text{Н}$. Знак мінус означає, що напрямок рівнодійної сили направлений проти напрямку вектора \vec{F}_1 і співпадає з напрямком вектора \vec{F}_2 .

СЛОВА І СЛОВОСПОЛУЧЕННЯ

динаміка	dynamics	взаємодія	interaction
інерція	inertia	інертність	inertness
маса	mass	інертна маса	inert mass
гравітація	gravity	гравітаційна маса	gravity mass
об'єм	volume	густина	density
деформація	deformation	щільність упакування	packing density
сила	force	рівнодійна сила	net force
ізольована система	isolated system	точка прикладання	point of application
внутрішні сили	internal forces	зовнішні сили	external forces

I. Дайте відповіді на запитання

1. Що таке динаміка?

2. Що означає слово «динаміка»?
3. Яка причина руху тіл?
4. Яке фізичне явище називається інерцією?
5. Що означає властивість інертності?
6. Маса – це міра інертності чи гравітації?
7. Що таке густина і від чого вона залежить?
8. Як правильно визначити силу, яка прикладена до тіла?
9. Що таке рівнодійна сила?
10. Яка система називається ізольованою?

II. Виконайте вправи

1. Зі слова «інерція» утворіть прикметник до слів «рух» і «маса».
2. Зі слів «рівність» і «дія» утворіть прикметник до слова «сила».
3. Вставте потрібне слово (слова) у речення.
 - а) Фізичне тіло починає рухатись, якщо на тіло ... інше тіло.
 - б) ... маса – основна динамічна характеристика тіла.
 - в) Маса речовини є сумою мас ..., які містяться у даному об'ємі речовини.
4. Назвіть одиницю вимірювання сили.
5. Фізичне тіло має форму куба, масу 6 кг і складається з речовини густиною ρ . Якою буде маса тіла, якщо довжину ребра кубу зменшити у 2 рази?
6. Вертикальну силу $R = 100$ Н розкладіть на два компоненти, з яких один є горизонтальним і за абсолютним значенням дорівнює 100 Н. Визначити величину другого компонента сили.

Запам'ятайте!

1. Що визначає що

Маса визначає інерційні, гравітаційні та енергетичні властивості фізичних тіл

2. Що співпадає з чим

Напрямок вектора сили співпадає з вектором прискорення тіла

§ 15. Закони Ньютона

1. Перший закон Ньютона. Інерціальні системи відліку

Перший закон Ньютона дає відповідь на питання чому фізичні тіла можуть бути нерухомими або рухатися рівномірно і прямолінійно без зміни сталої швидкості. Ньютон пояснює це явище існуванням інерціальних систем відліку.

Інерціальна система відліку – це система відліку, у якій тіла знаходяться у стані спокою (нерухомий стан) або рухаються рівномірно і прямолінійно. Система відліку, яка рухається із сталою швидкістю відносно інерціальної системи, також є інерціальною. В інерціальних системах відліку тіла знаходяться у стані спокою або рухаються рівномірно і прямолінійно, бо на тіла не діє сила або векторна сума всіх сил дорівнює нулю (дія сил скомпенсована). В інерціальних системах відліку тіла мають прискорення, якщо на них діє сила. Система відліку, яка рухається рівномірно і прямолінійно відносно інерціальної системи також буде інерціальною.

Якщо система відліку рухається з прискоренням або траєкторія її руху – крива лінія, то система відліку не буде інерціальною. Такі системи називаються **неінерціальними системами відліку**. Перший закон Ньютона не виконується в неінерціальних системах відліку.

І закон Ньютона: **в інерціальній системі відліку тіла знаходяться у нерухомому стані або рухаються рівномірно і прямолінійно, якщо на тіла не діють сили або дія сил скомпенсована.**

Принцип відносності Галілея

В інерціальних системах відліку всі механічні процеси відбуваються однаково. Під час переходу від однієї інерціальної системи відліку до іншої можуть змінюватися швидкість тіла, його переміщення, траєкторія, але не прискорення, отже, і не закони руху.

Принцип відносності Галілея стверджує:

В будь-яких інерціальних системах відліку закони механічного руху однакові.

Принцип відносності Галілея або механічний принцип відносності засвідчує фізичну рівноправність всіх інерціальних систем відліку.

Принцип відносності **Альберт Ейнштейн** узагальнив на всі явища природи:

Всі процеси природи відбуваються однаково в усіх інерціальних системах відліку.

2. Другий закон Ньютона

Другий закон Ньютона: **прискорення, з яким рухається тіло прямо пропорційне силі і обернено пропорційне масі тіла:**

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m} \quad \text{або} \quad \vec{F} = m\vec{a} .$$

Отже, добуток маси на прискорення дорівнює силі, що діє на тіло.

В разі дії на тіло водночас кількох сил, під величиною \vec{F} треба розуміти рівнодійну силу. В цьому випадку другий закон Ньютона набуває вигляду:

$$\vec{a} = \frac{\sum_{i=1}^n \vec{F}_i}{m} \quad \text{або} \quad \sum_{i=1}^n \vec{F}_i = m\vec{a} .$$

Це рівняння називається **основним рівнянням динаміки** або **законом руху**.

3. Третій закон Ньютона

Третій закон Ньютона: тіла діють одне на одне з силами, направленими вздовж однієї прямої, рівними за модулем і протилежними за напрямком: $\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}$ (рис.2.3).

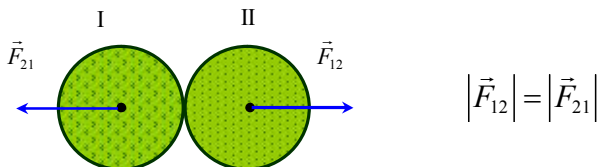


Рис.2.3

Сили \vec{F}_{12} та \vec{F}_{21} , що виникають під час взаємодії, прикладені до різних тіл і тому не можуть урівноважити одна одну. Рівність сил за величиною під час взаємодії має місце завжди і не залежить від того, рухаються тіла чи перебувають у нерухомому стані.

Так, наприклад, через гравітацію Земля діє на Місяць силою притягання. Рівна по модулю і протилежна за напрямком сила з боку Місяця, також є силою притягання. Силу, з якою Місяць діє на Землю ми можемо спостерігати під час припливу і відливу океану.

Закони динаміки Ньютона є основою класичної механіки. Слово «класична» означає, що існує і інша механіка, а саме релятивістська механіка. В класичній механіці маса і лінійні розміри тіла, а також час не залежать від швидкості руху тіла. В релятивістській механіці властивості тіла, простору і часу змінюються при наближенні швидкості руху тіла до швидкості світла.

СЛОВА І СЛОВОСПОЛУЧЕННЯ

інерціальна система відліку	inertial frame of reference	неінерціальна система відліку	non-inertial frame of reference
дія сил скомпенсована	acting forces compensated	прямо пропорційно	in direct proportion
обернено пропорційно	inversely	водночас	simultaneously
основне рівняння динаміки	basic equation of dynamics	наближення до швидкості світла	approaching the speed of light
сила притягання	gravity force	класична механіка	classical mechanics
релятивістська механіка	relativistic mechanics	закон набуває вигляду	the law takes the form
приплив і відлив океану	ocean ebb and flow	властивості тіла, простору і часу	properties of body, space and time

I. Дайте відповіді на запитання

1. Які системи відліку називаються інерціальними?
2. Чим відрізняється неінерціальна система відліку від інерціальної?
3. Як залежить прискорення тіла від його маси?
4. Як залежить прискорення тіла від сили, яка на нього діє?
5. Яке з тіл має меншу інертність: тіло масою 1кг чи тіло масою 2 кг?
5. Як порівняти сили, що діють між двома тілами?
6. Як направлені сили взаємодії двох тіл?
7. Чому сили взаємодії між тілами не можна урівноважити?

II. Виконайте вправи

1. Зі слова «інерція» утворіть прикметник до слова «система».
2. З дієслова «притягувати» утворіть іменник до слова «сила».
3. Вставте потрібне слово (слова) у речення.

- а) Система відліку, яка рухається із ... швидкістю відносно інерціальної системи, також є
- б) Прискорення, з яким рухається тіло ... пропорційне силі і ... пропорційне масі тіла.
- в) Тіла діють одне на одне з силами, направленими вздовж однієї прямої, ... за модулем і ... за напрямком.
4. На тіла масами 2 кг і 6 кг діє однакова сила. Порівняйте прискорення першого і другого тіла.

Запам'ятайте!

1. Що не виконується де

Перший закон Ньютона не виконується в неінерціальних системах відліку

2. Що набуває чого

Другий закон Ньютона набуває вигляду:

$$\vec{a} = \frac{\sum_{i=1}^n \vec{F}_i}{m}$$

§ 16. Імпульс тіла. Закон збереження імпульсу

1. Імпульс тіла та імпульс сили.

Другий закон Ньютона можна записати в іншій формі, якщо ввести нову величину – імпульс тіла.

Імпульс тіла – це векторна величина, що дорівнює добутку маси тіла на його швидкість: $\vec{p} = m\vec{V}$.

Одиниця імпульсу в СІ – 1 кілограм-метр за секунду $\left(\frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}} \right)$.

Підставимо прискорення $\vec{a} = \frac{\Delta \vec{V}}{\Delta t}$ у формулу другого закону Ньютона $\vec{F} = m\vec{a}$.

$$\text{Дістанемо: } \vec{F} = m \frac{\Delta \vec{V}}{\Delta t} = \frac{\Delta m \vec{V}}{\Delta t} = \frac{\Delta \vec{p}}{\Delta t}.$$

Отже, сила дорівнює зміні імпульсу за одиницю часу.

Останню формулу можна записати так: $\vec{F} \Delta t = \Delta \vec{p}$.

Добуток сили на час її дії називають **імпульсом сили**.

Тепер другий закон Ньютона сформулюється в імпульсній формі: **Зміна імпульсу тіла дорівнює імпульсу сили**.

Результатом дії сили є зміна імпульсу тіла.

2. Закон збереження імпульсу.

Нехай в ізолюваній системі взаємодіють два тіла (рис.2.4).

Позначимо:

m_1, m_2 – маса першого і другого тіла;

$\vec{V}_{01}, \vec{V}_{02}$ – початкові швидкості тіл до взаємодії;

\vec{V}_1, \vec{V}_2 – кінцеві швидкості тіл після взаємодії.

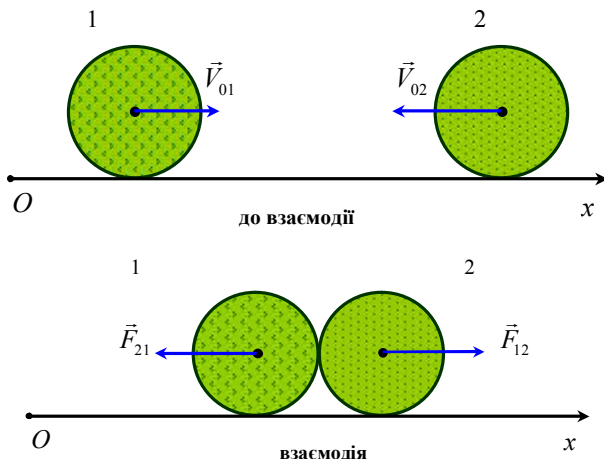




Рис.2.4

Згідно з третім законом Ньютона сили, що діють на тіла при їх взаємодії, рівні за модулем і мають протилежні напрямки: $\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}$. Для кожного з тіл запишемо зміну імпульсу:

$$\vec{F}_{12} t = m_1 \vec{V}_1 - m_1 \vec{V}_{01},$$

$$-\vec{F}_{21} t = m_2 \vec{V}_2 - m_1 \vec{V}_{02},$$

де t – час взаємодії тіл. Далі одержимо:

$$m_1 \vec{V}_{01} + m_2 \vec{V}_{02} = m_1 \vec{V}_1 + m_2 \vec{V}_2.$$

Використаємо означення імпульсу тіла і запишемо вираз у іншій формі:

$$\vec{p}_{01} + \vec{p}_{02} = \vec{p}_1 + \vec{p}_2.$$

Останнє рівняння відображає закон збереження імпульсу для двох тіл, які взаємодіють між собою.

У системи тіл, які взаємодіють між собою, закон збереження імпульсу ізольованої (замкненої) системи формулюється так:

В ізольованій системі векторна сума імпульсів тіл до взаємодії дорівнює векторній сумі імпульсів тіл після взаємодії.

Тобто сумарний імпульс ізольованої системи залишається сталим.

3. Реактивний рух

Реактивний рух – це рух тіла внаслідок відокремлення і відльоту від тіла його частини. Інша частина тіла при цьому

рухатиметься в протилежний бік. **В основі реактивного руху лежить закон збереження імпульсу.**

Прикладом реактивного руху є рух ракети. Розглянемо дію реактивного двигуна ракети. Газ, який утворюється коли згорає паливо, вилітає з великою швидкістю через реактивне сопло. Газ – це та частина ракети, що від неї відокремлюється.

Схема будови ракети



За законом збереження імпульсу та відсутності впливу зовнішніх сил сума векторів імпульсів залишається сталою. Після включення двигуна ракети сума векторів імпульсу ракети та імпульсу газів, що вилітають з двигуна, дорівнює нулю:

$$M\vec{V}_p + m\vec{V}_g = 0,$$

де M, \vec{V}_p – маса і швидкість ракети, m, \vec{V}_g – маса і швидкість газу.

$$\vec{V}_p = -\frac{m\vec{V}_g}{M}.$$

Швидкість ракети \vec{V}_p тим більша, чим більша швидкість газу \vec{V}_g , що вилітає із сопла ракети, і чим більше відношення маси газу до маси ракети $\frac{m}{M}$.

Реактивний рух дає можливість рухатися тілу у просторі без середовища (повітря, води, поверхні Землі)) без взаємодії з

іншими тілами. Ракета може рухатися у космічному просторі. Ракети застосовують для виведення на космічну орбіту штучних супутників Землі, польотів до інших планет та подорожі у міжпланетному та міжзоряному просторі.

Задача. Вагон масою 500 кг рухається у горизонтальному напрямку зі швидкістю 4 м/с. Назустріч йому рухається інший вагон масою 300 кг зі швидкістю 8 м/с. Якою буде швидкість вагонів, якщо після зіткнення вони рухатимуться разом? (рис.2.5)

Дано:

$$m_1 = 500 \text{ кг}$$

$$V_{01} = 4 \text{ м/с}$$

$$m_2 = 300 \text{ кг}$$

$$V_{02} = 8 \text{ м/с}$$

Знайти: V – ?

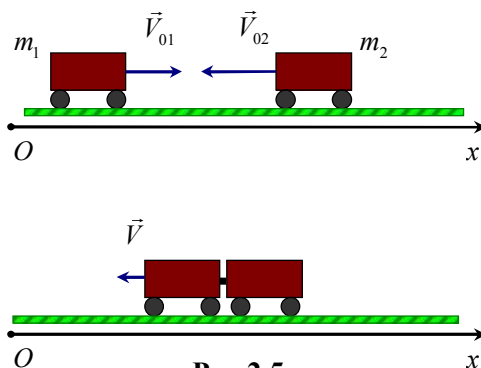


Рис.2.5

Розв'язок

1. Запишемо закон збереження імпульсу для двох тіл у векторній формі:

$$m_1 \vec{V}_{01} + m_2 \vec{V}_{02} = (m_1 + m_2) \vec{V}.$$

2. Далі запишемо рівняння закону збереження імпульсу у проекції векторів на вісь Ox :

$$m_1 V_{01} - m_2 V_{02} = (m_1 + m_2) V.$$

3. Обчислимо швидкість V , яку потрібно знайти:

$$V = \frac{m_1 V_{01} - m_2 V_{02}}{m_1 + m_2} = \frac{500 \cdot 4 - 300 \cdot 8}{800} \text{ м/с} = -0,5 \text{ м/с}.$$

Знак «мінус» означає, що рух вагонів разом відбувається у протилежному напрямку по відношенню до обраного додатного напрямку осі Ox .

Відповідь: $V = -0,5 \text{ м/с}$.

СЛОВА І СЛОВОСПОЛУЧЕННЯ

імпульс тіла	body momentum	відокремлювати	to separate
закон збереження	conservation principle	імпульс сили	impulse
реактивний рух	jet motion	ракета	rocket
імпульс	momentum	відокремлення	separation
газ	gas	паливо	fuel
згорати	burn	сопло	nozzle
космічний корабель	spaceship	космічна орбіта	space orbit
штучний супутник	artificial satellite	міжпланетний простір	interplanetary space
вагон	railway carriage	міжзоряний простір	interstellar space

I. Дайте відповіді на запитання

1. Чому дорівнює імпульс тіла?
2. В яких одиницях вимірюється імпульс тіла?
3. Чому дорівнює імпульс сили?
4. В яких системах виконується закон збереження імпульсу?
5. Якою величиною є сума імпульсів усіх тіл ізольованої системи?
5. Який рух тіл називається реактивним?
6. Як можна удвічі збільшити швидкість ракети?
7. За допомогою якого руху можна подорожувати у космічному просторі?

II. Виконайте вправи

1. Знайдіть синонім до слова «ізолювана» система.
2. Зі слова «космос» утворіть прикметник до слова «орбіта».

3. Вставте потрібне слово (слова) у речення.

а) Імпульс тіла – це ... величина, що дорівнює добутку маси тіла на його

б) Зміна імпульсу тіла дорівнює ... сили.

в). В основі реактивного руху лежить закон

4. Запишіть другий закон Ньютона в імпульсній формі.

5. Снаряд масою 20 кг, що летить горизонтально з швидкістю 500 м/с, влучає в платформу з піском масою 10 т і застрягає в ній. З якою швидкістю почала рухатись платформа?

6. М'яч масою 0,8 кг після удару футболіста летить зі швидкістю 20 м/с. Визначити силу удару F , якщо удар тривав $\Delta t = 0,02$ с.

7. Людина масою 70 кг, яка стоїть на дорозі, стрибнула на скейтборд . Якою буде швидкість скейтборду, якщо його маса 5 кг , а початкова швидкість 2,5 м/с?

8. Метеорит і ракета рухаються назустріч один одному під кутом 90° . Ракета влучає в метеорит і застряє в ньому. Маса метеорита M , маса ракети m , швидкість метеорита V_1 , швидкість ракети V_2 . Визначити імпульс метеорита разом з ракетою після зіткнення.

Запам'ятайте!

1. Що називають чим

Добуток сили на час її дії називають імпульсом сили.

2. Що відображає що

Рівняння відображає закон збереження імпульсу

§ 17. Закон всесвітнього тяжіння. Сили в механіці

1. Гравітаційна взаємодія тіл.

Гравітаційні сили або сили всесвітнього тяжіння – це сили взаємного притягання між усіма матеріальними тілами в природі. У відповідності з третім законом Ньютона між двома тілами діють рівні за модулем і протилежні за напрямом сили гравітаційного притягання.

Силу взаємного притягання, що діє між небесними тілами – Сонцем, Місяцем, планетами, кометами, зірками, Ньютон назвав **силою всесвітнього тяжіння** і встановив **закон всесвітнього тяжіння**.

Ньютон показав, що сили взаємного притягання двох тіл залежать від маси тіл і відстані між ними.

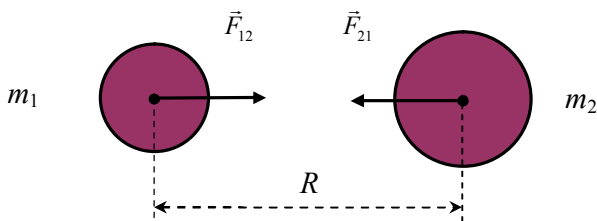


Рис.2.6

Розглянемо два тіла масами m_1 та m_2 на відстані R . Між двома масами діють гравітаційні сили \vec{F}_{12} і \vec{F}_{21} .

Закон всесвітнього тяжіння: всі тіла притягуються одне до одного з силами, які прямо пропорційні добутку мас тіл, і обернено пропорційні квадрату відстані між ними:

$$F_{12} = F_{21} = G \frac{m_1 m_2}{R^2},$$

де $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{кг}^2$ – **гравітаційна стала** або **стала всесвітнього тяжіння**, яку визначають експериментально.

Фізичний зміст гравітаційної сталою полягає у тому, що гравітаційна стала дорівнює силі притягання двох тіл масою 1 кг

кожне, між якими відстань дорівнює 1 м. Форма запису закону всесвітнього тяжіння справедлива для двох матеріальних точок і для тіл, що мають форму кулі.

2. Сила тяжіння

Силу, з якою Земля діє на кожне тіло і надає йому прискорення, називають **силою тяжіння**.

Ця сила направлена до центру Землі. У відповідності з другим законом Ньютона сила тяжіння, яка діє на тіло масою m дорівнює: $\vec{F}_{\text{тяж}} = m\vec{g}$, де \vec{g} – **прискорення вільного падіння**. Значення \vec{g} залежить від географічної широти місця і його висоти над рівнем моря (рис.2.7).

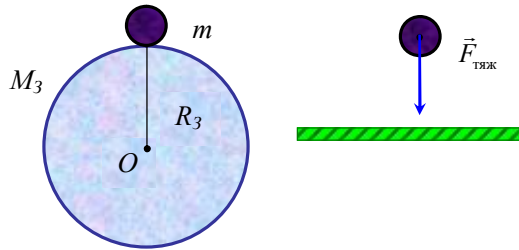


Рис.2.7

Якщо знехтувати обертанням Землі і вважати систему відліку, пов'язану із Землею, інерціальною, то сила тяжіння дорівнює гравітаційній силі:

$$mg = G \frac{mM_3}{R_3^2},$$

де $M_3 = 5,98 \cdot 10^{24}$ кг – маса Землі; R_3 – радіус Землі.

Звідки матимемо формулу для обчислення прискорення вільного падіння через масу і радіус Землі:

$$g = G \frac{M_3}{R_3^2}.$$

Таким чином, прискорення вільного падіння визначається масою і радіусом Землі і не залежить від маси тіла. Обчислимо

цей вираз і отримаємо числове значення прискорення вільного падіння – $9,81 \text{ м/с}^2$. Прискорення вільного падіння має різне значення в різних точках Землі, так як радіус Землі на полюсі менше ніж на екваторі (Земля – не ідеальна куля, а сплюснута на полюсах). За звичай в задачах використовують значення \vec{g} на широті 45° – $9,8 \text{ м/с}^2$.

Якщо тіло знаходиться на висоті H , тоді

$$g_H = G \frac{M_3}{(R_3 + H)^2}.$$

3. Сили тертя

Сили тертя – це сили, що виникають у місці дотику тіл, якщо на ці тіла діє сила \vec{F} , яка намагається зсунути тіло (рис.2.8).

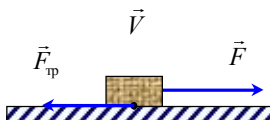


Рис.2.8

Сили тертя направлені по дотичній до поверхні. Ці сили перешкоджають переміщенню одного тіла відносно іншого.

Сили тертя зумовлені взаємодією молекул і мають електромагнітну природу.

Тертя спокою – тертя, яке існує між дотичними поверхнями, коли відсутнє їхнє взаємне переміщення. Модуль сили тертя спокою дорівнює модулю прикладеній зовнішній силі. Сила тертя спрямована протилежно до сили, яка намагається зсунути тіло вздовж поверхні.

$$\vec{F}_{\text{тр}} = -\vec{F}$$

Сила тертя спокою при зростанні зовнішньої сили збільшується доти, доки не почнеться ковзання.

При ковзанні теж діє сила, що перешкоджає рухові – сила тертя ковзання. Вона приблизно дорівнює максимальній силі тертя спокою.

Експериментально встановлено **закон тертя ковзання: сила тертя ковзання завжди направлена проти руху і за значенням прямо пропорційна силі нормального тиску тіла на опору:**

$$|\vec{F}_{\text{тр}}| = \mu |\vec{N}|,$$

де μ – коефіцієнт, що називається коефіцієнтом тертя, \vec{N} – сила нормального тиску (або рівна їй за модулем сила реакції опори). Сила нормального тиску направлена перпендикулярно поверхні, на якій знаходиться тіло.

Коефіцієнт тертя залежить від матеріалу і якості обробки поверхонь.

Якщо одне тіло котиться по поверхні іншого, виникає **тертя кочення**. За умови однакової якості поверхонь тертя кочення менше від тертя ковзання в десятки разів. Тому в механізмах прагнуть замінити тертя ковзання тертям кочення.

4. Сили пружності

Деформацією називається зміна форми, розмірів чи об'єму тіла під дією зовнішніх сил.

Якщо деформація повністю зникає після припинення дії зовнішньої сили, деформацію називають **пружною**. Під час пружних деформацій в тілі виникають сили пружності. Під дією зовнішньої сили частинки тіла (атоми, молекули) зміщуються зі своїх положень рівноваги, при цьому у тілі виникають сили, що намагаються повернути частинки в положення рівноваги. Це і є сили пружності.

Сили пружності мають електромагнітну природу. Для пружних деформацій експериментально встановлений **закон Гука**. Для однобічного розтягнення або стискання, під дією зовнішньої сили, що спрямована вздовж стрижня закон Гука формулюють так:

Сила пружності $F_{\text{пр}}$, яка виникає під час деформації тіла, прямо пропорційна видовженню тіла і направлена у бік, протилежний зовнішній силі.

Проекція сили пружності на вісь Ox для різних випадків прикладення зовнішньої сили зображено на рис.2.9:

$$(F_{\text{пр}})_x = -kx$$

Коефіцієнт k називають **коефіцієнтом жорсткості**. Його значення залежить від розмірів та матеріалу тіла. Одиниця коефіцієнту жорсткості – Ньютон на метр (Н/м).

Наприклад, книга, що лежить на столі, деформує його і викликає силу пружності $\vec{N} = -m\vec{g}$, що направлена вертикально в гору.

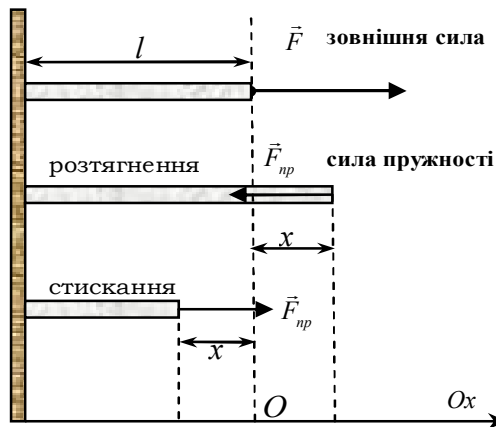


Рис.2.9

Сила пружності, що діє на тіло з боку опори, називається **силою реакції опори**. Сила пружності, яка діє на тіло з боку підвісу $\vec{T} = -m\vec{g}$, називається **силою натягу підвісу** (рис.2.10).

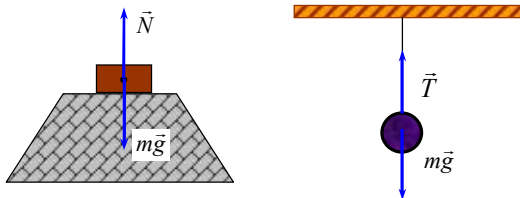


Рис.2.10

Деформація називається **пружною**, якщо після припинення дії сили деформація повністю зникає.

Деформація називається **пластичною**, якщо після припинення дії сили деформація зберігається.

Задача 1. В якій точці на прямій, що з'єднує Землю і Місяць, тіло буде притягуватись Землею і Місяцем з однаковою силою? Відстань між Землею і Місяцем вважати рівною 60 земним радіусам, маса Землі в 81 раз більше маси Місяця (рис.2.11).

Дано:

$$S = 60R_3$$

$$R_3 = 6370 \text{ км}$$

$$M_3 = 81M_M$$

Знайти: r -?

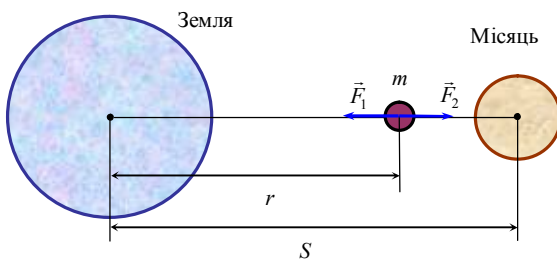


Рис.2.11

Розв'язок

1. Сила гравітаційної взаємодії між Землею і тілом масою m :

$$F_1 = G \frac{mM_3}{r^2}; \text{ а між тілом і Місяцем: } F_2 = G \frac{mM_M}{(S-r)^2}.$$

2. За умовою задачі $F_1 = F_2$,

$$G \frac{mM_3}{r^2} = G \frac{mM_M}{(60R_3 - r)^2},$$

$$\text{звідси } \frac{M_3}{M_M} = \frac{r^2}{(60R_3 - r)^2} \Rightarrow 81(60R_3 - r)^2 = r^2 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow 9(60R_3 - r) = r \Rightarrow r = 54R_3.$$

Відповідь: $r = 54R_3$.

Задача 2. Тіло сповзає рівномірно площиною, яка має кут нахилу 40° . Визначити коефіцієнт тертя (рис.2.12).

Дано:

$$\alpha = 40^\circ$$

Знайти: μ -?

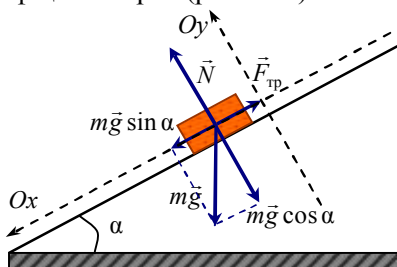


Рис.2.12

Розв'язок

1. Осі системи координат розташуємо так, як показано на рис.2.12. Тоді рівняння руху тіла у векторній і скалярній формі матимуть вигляд:

$$m\vec{g} + \vec{N} + \vec{F}_{\text{тр}} = m\vec{a} = 0, \quad mgsin\alpha - F_{\text{тр}} = 0, \quad N - mgcos\alpha = 0.$$

За умовою задачі тіло рухається рівномірно і прямолінійно. Це означає, що прискорення $\vec{a} = 0$. Тому права частина рівняння руху дорівнює нулю.

$$2. \text{ Сила тертя } F_{\text{тр}} = \mu N, \quad mgsin\alpha - F_{\text{тр}} = 0, \quad N - mgcos\alpha = 0.$$

Звідси:

$$\mu = \frac{F_{\text{тр}}}{N} = \frac{mgsin\alpha}{mgcos\alpha}$$

$$\mu = \frac{sin\alpha}{cos\alpha} = tg\alpha = tg40^\circ \approx 0,84.$$

Відповідь: $\mu \approx 0,84$.

СЛОВА І СЛОВОСПОЛУЧЕННЯ

гравітація	gravitation	сила тяжіння	attractive force
притягання	attraction	деформація	deformation
гравітаційна стала	gravity constant	пружна деформація	elastic deformation
реакція опори	support reaction	сила пружності	elastic force
пружина	spring	пружинний маятник	spring pendulum
сила тертя	friction force	тиснення	compression
тертя спокою	static friction	жорсткість	inflexibility
ковзання	sliding	закон Гука	Hook's law
тертя ковзання	sliding friction	видовження	linear expansivity
коефіцієнт тертя	friction coefficient	тертя кочення	woobling friction

I. Дайте відповіді на запитання

1. Що таке гравітація?
2. Від чого залежить сила гравітаційної взаємодії двох мас?
3. Як називається сила, з якою Земля діє на всі фізичні тіла?
4. Який напрямок має прискорення вільного падіння?
5. Де виникає сила тертя?
6. Який напрямок має сила тертя?
7. Від чого залежить величина сили тертя?
8. Що таке деформація?
9. Який напрямок має сила пружності по відношенню до зовнішньої сили?

II. Виконайте вправи

1. Вставте потрібне слово (слова) у речення.
 - а) Всі тіла притягуються одне до одного з силами, які ... пропорційні добутку мас тіл, і ... пропорційні квадрату відстані між ними.
 - б) Силу, з якою Земля діє на кожне тіло називають ...

в) ... називається зміна форми, розмірів чи об'єму тіла під дією ... сил.

....

2. Запишіть і сформулюйте закон всесвітнього тяжіння.

3. Виведіть формулу для обчислення прискорення вільного падіння.

4. Запишіть формулу для визначення сили тертя.

5. Запишіть і сформулюйте закон Гука.

6. У скільки разів зменшиться сила притягання до Землі штучного супутника при віддаленні його на відстань, рівну п'яти радіусам Землі?

7. Знайти прискорення вільного падіння на Марсі та Юпітері. Радіус Марса становить 3396 км, радіус Юпітера – 71,4 тис. км . Маса Марса 0,107 маси Землі, а маса Юпітера – 318 мас Землі.

8. Космічний корабель вийшов на колову орбіту радіусом 10 млн. км навколо відкритої ним зірки. Яка маса цієї зірки, якщо період обертання корабля дорівнює 628000 с?

9. Брусок масою 1,6 кг рівномірно тягнуть по столу за допомогою пружини жорсткістю 40 Н/м. Яке видовження пружини, якщо коефіцієнт тертя між бруском і столом дорівнює 0,3 ?

10. Тіло, яке кинули по льодовому майданчику зі швидкістю 36 км/год, проходить до зупинки 40 м. Який коефіцієнт тертя між тілом і льодом?

11. Знайти видовження тросу з жорсткістю 100 кН/м при буксируванні автомобіля масою 2 т з прискоренням $0,5 \text{ м/с}^2$.

Запам'ятайте!

1. Що визначається чим

Прискорення вільного падіння визначається масою і радіусом Землі.

2. Що залежить від чого

Коефіцієнт тертя залежить від матеріалу і якості обробки поверхонь.

§ 18. Вага тіла. Невагомість. Космічні швидкості

1. Вага тіла.

Вага тіла – це сила, з якою тіло діє на горизонтальну опору чи підвіс у гравітаційному полі Землі.

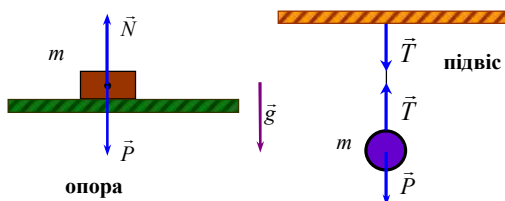


Рис.2.13

Якщо опора чи підвіс нерухомі або рухаються зі сталою швидкістю $\vec{a} = 0$, вага за модулем дорівнює силі тяжіння:

$|\vec{P}| = |\vec{N}|$ або $|\vec{P}| = |\vec{T}|$. За другим законом Ньютона $\vec{F} + \vec{T} = m\vec{a}$. $\vec{F} + \vec{T} = 0$, або в проекції на вертикальну вісь $F - T = 0$, $F = T = mg$.

Розглянемо декілька прикладів. Нехай поверхня (опора, підвіс) рухається так, що прискорення напрямлене вгору (рис.2.14).

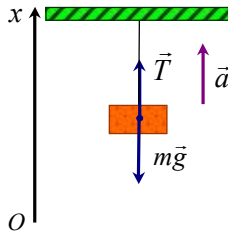


Рис.2.14

Тоді основний закон динаміки для тіла масою m , що міститься на опорі:

$$\vec{F} + \vec{T} = m\vec{a}, \text{ де } \vec{F} = m\vec{g}$$

Запишемо це рівняння в проекціях на вісь Ox :

$$T - F = ma.$$

Сила реакції опори дорівнює:

$$T = F + ma.$$

За третім законом Ньютона, вага тіла P дорівнює: $|\vec{P}| = |\vec{T}|$

$$P = F + ma, \quad P = mg + ma, \quad P = m(g + a),$$

де a – модуль прискорення.

Таким чином, якщо тіло знаходиться на опорі, яка рухається з прискоренням спрямованим вгору, вага тіла зростає і виникає перевантаження. **Перевантаження** – це збільшення ваги тіла у результаті руху опори з прискоренням.

Перевантаження виникає у двох випадках: коли опора разом з тілом рухається вгору рівноприскорено або рухаються вниз рівносповільнено.

Якщо тіло разом з опорою рухається з прискоренням спрямованим вертикально вниз, вага тіла зменшується (рис.2.15):

$$ma = mg - T, \quad T = m(g - a), \quad P = m(g - a).$$

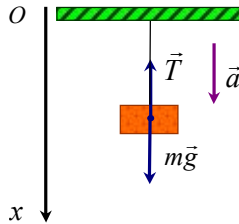


Рис.2.15

Якщо тіло разом з опорою вільно падає, то $a = g$. Тоді із останньої формули випливає, що $P = 0$.

Зникнення ваги під час руху опори з прискоренням вільного падіння називається **невагомістю**. Очевидно, що стан вільного падіння будь-якого тіла є станом невагомості.

В стані невагомості на всі тіла рухомої системи діють лише сили тяжіння, які надають усім тілам системи однакового прискорення. Тому ці тіла не тиснуть одне на одне й на опори і не спричиняють деформації тіл.

2. Рух штучних супутників Землі

Розглянемо рух тіла по коловій орбіті навколо Землі. Супутник рухається під дією гравітаційної сили F_{c-3} :

$$F_{c-3} = G \frac{mM_3}{(R_3 + h)^2},$$

де $R_3 + h$ – радіус орбіти, R_3 – радіус Землі, h – висота тіла над Землею (рис.2.16).

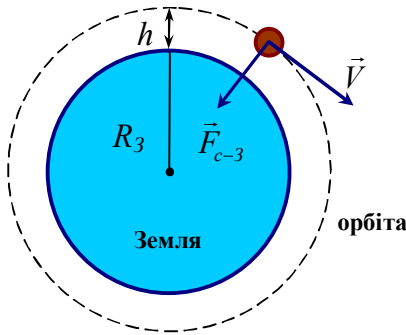


Рис.2.16

Оскільки тіло рухається рівномірно по колу, то його прискорення – доцентрове і за модулем дорівнює: $a = \frac{V^2}{R_3 + h}$.

За другим законом Ньютона $F_{c-3} = ma$ або

$$G \frac{mM_3}{(R_3 + h)^2} = \frac{mV^2}{R_3 + h},$$

де m, M_3 – маси супутника і Землі. З цього виразу отримаємо рівняння для швидкості:

$$V = \sqrt{\frac{GM_3}{R_3 + h}}.$$

Якщо тілу на висоті h над Землею надати в горизонтальному напрямку швидкість, що визначається останньою формулою, то воно буде рухатись по колу навколо Землі. Таке тіло називається **штучним супутником Землі**.

Швидкість, з якою супутник рухається навколо Землі коловою орбітою тільки під дією сили всесвітнього тяжіння, називається **першою космічною швидкістю**. Під час руху всі тіла у супутнику перебувають у стані невагомості.

Для штучного супутника Землі, що обертається поблизу поверхні Землі, можна обчислити значення першої космічної

швидкості, якщо значення $h=0$, $R_3=6370$ км та $g=9,8$ м/с². З

виразу для $g = G \frac{M_3}{R_3^2}$ знайдемо $GM_3 = gR_3^2$. Тоді вираз для

швидкості супутника набуває вигляду:

$$V = \sqrt{\frac{GM_3}{R_3 + h}} = \sqrt{\frac{gR_3^2}{R_3 + h}}, \quad V = V_0 = \sqrt{gR_3} \approx 7,9 \text{ км/с}.$$

При початковій швидкості більшій за 7,9 км/с, але меншій ніж 11,2 км/с штучний супутник Землі рухається навколо Землі по еліпсу. Чим більша початкова швидкість, тим більше буде видовжений еліпс. При початковій швидкості 11,2 км/с еліпс перетворюється у параболу і супутник припиняє рух навколо Землі і стає супутником Сонця. Ця швидкість називається **другою космічною швидкістю**.

Таким чином, друга космічна швидкість – це швидкість, яку слід надати тілу, щоб воно подолало силу тяжіння Землі і стало супутником Сонця.

Третьою космічною швидкістю називають швидкість, яку треба надати космічному апарату біля поверхні Землі, щоб він подолав силу тяжіння Сонячної системи і став супутником центру нашої Галактики. Третя космічна швидкість дорівнює 16,7 км/с.

СЛОВА І СЛОВОСПОЛУЧЕННЯ

вага	weight	космічна швидкість	escape velocity
опора	support	еліпс	ellipse
підвіс	hanger	гіпербола	hyperbola
невагомість	weightlessness	Галактика	Galaxy
штучний супутник	artificial satellite	Сонячна система	planetary system

I. Дайте відповіді на запитання

1. Яка сила називається вагою тіла?
2. В якому випадку вага тіла дорівнює силі тяжіння?
3. Що таке перевантаження?
4. Коли виникає невагомість?
5. Що називають першою космічною швидкістю?
6. Якою орбітою рухається тіло з другою космічною швидкістю?

II. Виконайте вправи

1. Вставте потрібне слово (слова) у речення.
 - а) Перевантаження – це збільшення ... у результаті руху опори з прискоренням.
 - б) Стан вільного падіння будь-якого тіла є станом
 - в) Швидкість, з якою супутник рухається навколо Землі коловою орбітою тільки під дією сили всесвітнього тяжіння, називається першою
2. Запишіть формули для визначення ваги тіла у випадку перевантаження.
3. Запишіть формулу, яка відповідає зменшенню ваги тіла та умову невагомості.
4. Виведіть формулу для першої космічної швидкості.
5. У скільки разів зміниться вага тіла, яке рухається разом з ліфтом вниз з прискоренням $a=0.5g$.
6. Визначити першу космічну швидкість на поверхні Місяця, якщо його радіус становить 1760 км, а прискорення вільного падіння на Місяці в 6 раз менше, ніж на Землі.
7. Час обертання Юпітера в 12 раз більший за час обертання Землі навколо Сонця. Яка відстань від Юпітера до Сонця, якщо відстань від Землі до Сонця становить $150 \cdot 10^9$ м? Орбіти вважати коловими.

Запам'ятайте!

1. Чим ..., тим ...

Чим більша початкова швидкість, тим більше
буде видовжений еліпс.

§ 19. Механічна робота. Потужність

1. Робота сил в механіці

Фізична величина, яка дорівнює скалярному добутку сили на переміщення точки прикладання сили називається **механічною роботою** (рис.2.17).

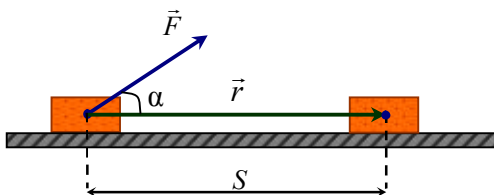


Рис.2.17

За означенням у випадку дії сталої сили та прямолінійного руху механічна робота A дорівнює:

$$A = (\vec{F} \cdot \vec{r}) = F \cdot S \cdot \cos \alpha,$$

де \vec{r} – переміщення, $S = |\vec{r}|$ – шлях.

Одиниця роботи в СІ – це **Джоуль**⁶: $1\text{ Дж} = 1\text{ Н} \cdot 1\text{ м}$. Один Джоуль дорівнює роботі, яку виконує сила величиною один Ньютон під час переміщення тіла на один метр, якщо напрям дії сили збігається з напрямом переміщення. Значення роботи може бути додатним або від’ємним в залежності від знаку $\cos \alpha$.

⁶ Джеймс Джоуль (1818-1889) – видатний англійський фізик, який довів еквівалентність механічної та теплової енергії і відкрив закон збереження енергії. На його честь у фізиці названа одиниця роботи і енергії.

Сила, яка діє у напрямку переміщення називається **силою тяги**: $A = (\vec{F} \cdot \vec{r}) = F \cdot r \cdot \cos 0^\circ = F \cdot S > 0$. Робота сили тяги завжди додатна (рис.2.18).

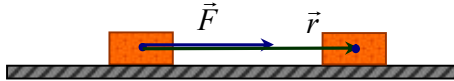


Рис.2.18

Якщо на тіло діє сила опору \vec{F} , то робота такої сили від'ємна (рис.2.19).

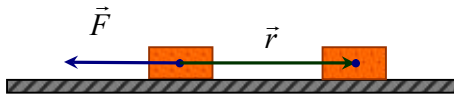


Рис.2.19

$$A = (\vec{F} \cdot \vec{r}) = F \cdot r \cdot \cos 180^\circ = F \cdot S \cdot (-1) < 0.$$

Якщо на тіло діє \vec{F} – сила, яка перпендикулярна до переміщення, то робота цієї сили дорівнює нулю (рис.2.20).

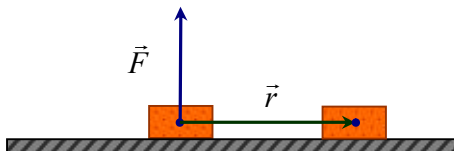


Рис.2.20

$$A = (\vec{F} \cdot \vec{r}) = F \cdot r \cdot \cos 90^\circ = F \cdot S \cdot 0 = 0$$

Приклад 1. **Робота сили тяжіння** обчислюється за формулою: $A = mg(h_1 - h_2)$, де $h_1 - h_2$ – різниця висот початкового і кінцевого положення тіла (рис.2.21).

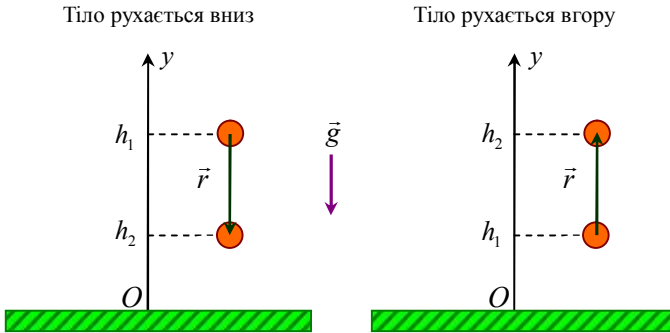


Рис.2.21

Тіло рухається вниз – робота додатна $A = mg\Delta h$. Тіло рухається вгору – робота від’ємна $A = -mg\Delta h$.

Приклад 2. Робота сили пружності $\vec{F}_{\text{пр}}$ обчислюється за формулою:

$$A = \frac{k(x_1^2 - x_2^2)}{2},$$

де k – коефіцієнт пружності, x_1, x_2 – початкова і кінцева координата кінця пружини, яка деформується (рис.2.22).

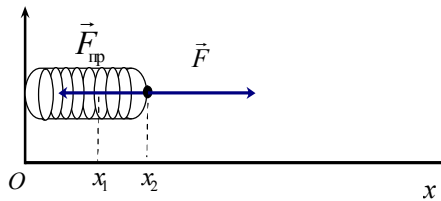


Рис.2.22

Робота сили пружності може бути додатна або від’ємна в залежності від напрямку деформації по відношенню до додатного напрямку осі Ox .

2. Консервативні сили

Нехай тіло під дією сил тяжіння або пружності переміщується по замкненій траєкторії і повертається в початкове положення. Тоді в попередніх формулах $h_1 = h_2$, $x_1 = x_2$. Отже, робота $A = 0$.

Робота сил тяжіння або пружності по замкненій траєкторії дорівнює нулю.

Сили, які мають таку властивість називаються консервативними. Сили тяжіння та пружності – **консервативні сили**.

Сили тертя – неконсервативні сили, їхня робота по замкненій траєкторії ніколи не дорівнює нулю.

3. Потужність

Потужністю називається скалярна величина, яка дорівнює відношенню виконаної роботи до інтервалу часу, протягом якого вона була виконана:

$$P = \frac{A}{t}$$

Одиниця вимірювання потужності в СІ – **Ватт⁷ (Вт)**:
1 Вт = 1 Дж/с. 1 Вт – це потужність, при якій за 1 с виконується робота в 1 Дж. В науці і техніці часто використовують одиниці вимірювання роботи кіловатт (1кВт=10³ Вт) та мегаватт (1 МВт = 10⁶ Вт).

Якщо під дією сталої сили тяги F , тіло рухається рівномірно зі швидкістю V , то потужність дорівнює:

$$P = \frac{A}{t} = \frac{F \cdot S}{t} = F \cdot V.$$

⁷ Джеймс Ватт (1736-1819) – шотландський механік, винахідник універсальної парової машини. На його честь названа одиниця вимірювання потужності у фізиці.

При рівномірному русі потужність дорівнює добутку сили на швидкість руху. При рівномірному русі обчислюють середню потужність:

$$P_{cp} = FV_{cp}.$$

4. Коефіцієнт корисної дії (ККД)

У природі сила не тільки виконує переміщення тіла, але і долає дію сил опору (тертя, опір повітря, тощо). Робота, яку виконує сила по переміщенню тіла і подолання сил опору називається **повною роботою**. Частина роботи сили, яка витрачається на переміщення тіла, називається **корисною роботою**. Повна робота завжди більше корисної роботи. Якщо роботу виконує пристрій або механізм, то частина повної роботи буде витрачатися на подолання тертя в механізмі і на переміщення окремих частин механізму, а не переміщення тіла.

Відношення корисної роботи до повної роботи називають **коефіцієнтом корисної дії** механізму.

Скорочене позначення коефіцієнта корисної дії (**ККД**).

ККД визначають у процентах і позначають грецькою буквою η (читається «ета»):

$$\eta = \frac{A_k}{A} \cdot 100\%; \quad \eta = \frac{P_k}{P} \cdot 100\%,$$

де A_k (P_k) – корисна робота (потужність), A (P) – повна робота (потужність). Коефіцієнтом корисної дії будь якого механічного пристрою **завжди менше 100%**.

Задача. Двигуни електровозу при русі зі швидкістю 54 км/год розвивають потужність 900 кВт. Визначити силу тяги, якщо ККД двигунів становить 80 %.

Дано:

$$V = 54 \text{ км/год} = 15 \text{ м/с}$$

$$P = 900 \text{ кВт} = 9 \cdot 10^5 \text{ Вт}$$

$$\underline{\eta = 80 \% = 0,8}$$

Знайти: F – ?

Розв'язок

1. Корисна потужність $P_k = F \cdot V$.

2. ККД двигунів $\eta = \frac{P_k}{P} = \frac{F \cdot V}{P}$.

3. Сила тяги $F = \frac{P \cdot \eta}{V} = \frac{9 \cdot 10^5 \cdot 0,8}{15} \text{ Н} = 48 \text{ кН}$

Відповідь: $F = 48 \text{ кН}$.

СЛОВА І СЛОВОСПОЛУЧЕННЯ

робота	work	потужність	power
Джоуль	Joule	Ватт	Watt
консервативні сили	conservative forces	коефіцієнт корисної дії	efficiency
повна робота	full work	корисна робота	useful work
повна потужність	full power	корисна потужність	useful power

I. Дайте відповіді на запитання

1. Яка фізична величина називається механічною роботою?
2. Яка одиниця вимірювання роботи в СІ?
3. Яка сила називається силою тяги?
4. У якому випадку робота сили дорівнює нулю?
5. Які сили називають консервативними силами?
6. Що називається потужністю?
7. У яких одиницях вимірюється потужність?
8. Чи може коефіцієнт корисної дії механізму дорівнювати 100%?

II. Виконайте вправи

1. Вставте потрібне слово (слова) у речення.

- а) Значення роботи може бути ... або ... в залежності від знаку $\cos \alpha$.
- б) Якщо на тіло діє сила, яка ... до переміщення, то робота цієї сили дорівнює нулю.
- в) Повна робота завжди більше ... роботи.

2. Запишіть вираз для визначення механічної роботи.
3. Запишіть формулу обчислення роботи, яку виконують сили тяжіння.
4. Запишіть формулу обчислення роботи, яку виконують сили пружності.
5. Запишіть формулу для визначення коефіцієнта корисної дії.
6. Яку роботу виконає сила тяги, яка піднімає ліфт масою 6 т на висоту 100 м із прискоренням $1,4 \text{ м/с}^2$?
7. Поїзд масою $6 \cdot 10^5 \text{ кг}$ рівномірно підіймається на гору. Підйом гори 5 м на кілометр шляху. Сила тертя 10 Н. Швидкість поїзда 72 км/год. Визначити потужність електровоза.
8. Автомобіль масою 3,5 т проїхав по горизонтальній дорозі 10 км. Яку роботу виконали сили опору, якщо коефіцієнт опору дорівнює 0,06?

Запам'ятайте!

1. Якщо ... , то

Якщо на тіло діє сила опору \vec{F} , то робота такої сили від'ємна.

2. Що виражають у чому

ККД виражають у процентах

§ 20. Механічна енергія. Закон збереження енергії.

1. Механічна енергія

Енергією називають найбільш загальну кількісну міру руху і взаємодії. Енергія характеризує стан системи та її здатність виконувати роботу при переході із одного стану в інший.

У фізиці розглядають різні форми енергії: механічну, теплову, електричну, магнітну, гравітаційну, ядерну тощо.

Зміна енергії завжди пов'язана з виконанням роботи.

Механічною енергією тіла (системи) називається скалярна фізична величина, що характеризує механічний стан тіла, зміна якого дорівнює механічній роботі, яку система може здійснити:

$$\Delta E = A, \quad E_2 - E_1 = A,$$

де E_1 – початкова енергія тіла, E_2 – кінцева енергія тіла, A – механічна робота.

Одиницею вимірювання енергії в СІ є **Джоуль (Дж)**.

2. Кінетична енергія

Знайдемо роботу, яку виконує стала сила F по переміщенню тіла масою m на відстань S по горизонтальній поверхні. Якщо напрям сили збігається з напрямом переміщення, а початкова і кінцева швидкості тіла дорівнюють V_1 і V_2 , тоді із формул для

рівноприскореного руху $V_2 = V_1 + at$ і $S = V_1 t + \frac{at^2}{2}$ одержимо

вираз для переміщення $S = \frac{V_2^2 - V_1^2}{2a}$.

Робота сталої сили дорівнює:

$$A = F \cdot S = ma \frac{V_2^2 - V_1^2}{2a} = \frac{mV_2^2}{2} - \frac{mV_1^2}{2}.$$

Скалярну величину $E_k = \frac{mV^2}{2}$, яка має розмірність роботи, називають **кінетичною енергією**.

Енергія, яка характеризує механічний рух тіла, називається кінетичною енергією тіла:

$$E_k = \frac{mV^2}{2}$$

Кінетична енергія – величина відносна, вона залежить від вибору системи відліку. Якщо на тіло під час руху діє сила або

одночасно кілька сил, кінетична енергія тіла змінюється – тіло прискорюється або зупиняється.

Робота сили або рівнодійної сил, прикладених до тіла, дорівнює зміні кінетичної енергії тіла:

$$A = E_{K2} - E_{K1} = \frac{mV_2^2}{2} - \frac{mV_1^2}{2}$$

Остання формула називається **теоремою про кінетичну енергію**.

3. Потенціальна енергія

Існує інший вид механічної енергії, який називається потенціальною енергією. Кінетична енергія – це енергія руху. Потенціальна енергія – це енергія, яку має нерухоме тіло у результаті дії на нього іншого тіла за допомогою сил різної природи: гравітаційних сил, сил пружності, електростатичних сил тощо.

Потенціальна енергія – це енергія, яка характеризує взаємодію тіла з іншими тілами або взаємодію частин тіла між собою.

Приклад 1. Нехай тіло масою m підіймається на висоту h відносно поверхні Землі під дією сили F зі сталою швидкістю $V = \text{const}$ (рис.2.23).

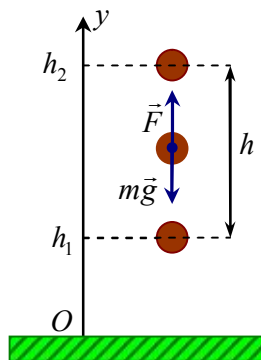


Рис.2.23

Знайдемо роботу сили тяжіння при підйомі тіла з висоти h_1 на висоту h_2 :

$$A = mgh \cdot \cos 180^\circ = -mg(h_2 - h_1)$$

$$A = -(mgh_2 - mgh_1)$$

У останній формулі робота сили тяжіння дорівнює зміні деякої фізичної величини зі знаком «мінус», а саме mgh . Такий вираз для роботи сили характерний для консервативних сил, робота яких по замкненій траєкторії дорівнює нулю. Відповідно для консервативних сил можна ввести поняття потенціальної енергії, різниця якої і буде дорівнювати роботі сили зі знаком мінус.

Фізичну величину, що дорівнює добутку маси тіла на прискорення вільного падіння і висоту, називають потенціальною енергією тіла, піднятого над Землею:

$$E_{\text{п}} = mgh$$

Остання формула справедлива, якщо поверхню Землі вважати за нульовий рівень відліку енергії і обчислювати енергію на висотах, значно менших за радіус Землі (6370 км). Робота сили тяжіння зі зміною потенціальної енергії тіла завжди має протилежний знак:

$$A = -(E_{\text{п}2} - E_{\text{п}1})$$

У фізиці вважається, що робота проти сил тяжіння, коли тіло підіймається від висоти 0 до h – додатна. А робота сили тяжіння, коли тіло вільно падає з висоти h до 0 – від'ємна.

Потенціальна енергія тіла може набувати як додатних, так і від'ємних значень. Потенціальна енергія тіла на висоті h $E_{\text{п}} = mgh$ – додатна. Тіло, що перебуває на глибині h від поверхні Землі, має від'ємне значення потенціальної енергії $E_{\text{п}} = -mgh$. Значення потенціальної енергії залежить від вибору нульового рівня відліку. У даному прикладі $h=0$ – рівень світового океану Землі вважається нульовим рівнем потенціальної енергії тіла у замкненій системі гравітаційної взаємодії «тіло-Земля».

У замкненій системі будь-яких тіл масами m і M , які взаємодіють за законом всесвітнього тяжіння, потенціальна енергія тіла визначається формулою $E_{\Pi} = -G \frac{mM}{r}$, де r - відстань між центрами мас.

Приклад 2. Робота, яку здійснює сила пружності при деформації пружини від початкової координати x_1 до кінцевої координати x_2 (рис.2.22):

$$A = \frac{k(x_1^2 - x_2^2)}{2} = \frac{kx_1^2}{2} - \frac{kx_2^2}{2}.$$

У останній формулі робота сили пружності дорівнює зміні деякої фізичної величини зі знаком «мінус», а саме $\frac{kx^2}{2}$.

Фізичну величину, яка дорівнює половині добутку коефіцієнта жорсткості тіла на квадрат координати деформації, називають потенціальною енергією пружної деформації:

$$E_{\Pi} = \frac{kx^2}{2}$$

Отже, робота сил пружності дорівнює зміні потенціальної енергії пружно деформованого тіла з протилежним знаком:

$$A = -(E_{\Pi 2} - E_{\Pi 1})$$

Потенціальна енергія пружної деформації – це енергія взаємодії окремих частин тіла між собою.

4. Закон збереження енергії

Нехай тіло під дією єдиної консервативної сили переходить із початкового стану (1) у кінцевий стан (2). Робота цієї сили дорівнює зміні потенціальної енергії тіла зі знаком «мінус»:

$$A = -(E_{\Pi 2} - E_{\Pi 1})$$

За теоремою про кінетичну енергію, ця сама робота дорівнює зміні кінетичної енергії тіла:

$$A = E_{K2} - E_{K1} = \frac{mV_2^2}{2} - \frac{mV_1^2}{2}$$

Із рівності виразів для роботи, можна записати :

$$E_{K2} - E_{K1} = -(E_{П2} - E_{П1})$$

З останньої формули можна зробити висновок, що зміна потенціальної енергії тіла дорівнює зміні його кінетичної енергії. Останню формулу можна переписати так:

$$E_{K2} + E_{П2} = E_{K1} + E_{П1}.$$

Отже, сума кінетичної і потенціальної енергії тіла у початковому стані (1) дорівнює сумі кінетичної і потенціальної енергії у кінцевому стані (2), якщо на тіло діє консервативна сила.

Сума кінетичної та потенціальної енергії тіл називається **повною механічною енергією**. Так само можна розглянути повну механічну енергію системи тіл, наприклад ізолюваної системи (на яку не діють зовнішні сили).

Закон збереження повної механічної енергії: у будь-який момент часу повна механічна енергія ізолюваної системи тіл залишається сталою (зберігається), якщо не діють неконсервативні сили (сили тертя):

$$E_K + E_{П} = \text{const}.$$

Можливо і інше формулювання закону збереження енергії: зміна повної механічної енергії ізолюваної системи, в якій не діють сили тертя, від початкового стану до кінцевого дорівнює нулю:

$$\Delta E = 0,$$

де $E = E_K + E_{П}$ – повна механічна енергія ізолюваної системи тіл.

Закон збереження енергії розкриває фізичний зміст поняття роботи: робота дорівнює енергії, яка перетворилася з одного виду в інший.

Якщо в системі разом з силами тяжіння і пружності діють сили тертя, повна механічна енергія зменшується. Внутрішня енергія взаємодіючих тіл при цьому збільшується. Зменшення механічної енергії дорівнює збільшенню внутрішньої енергії.

В загальному випадку закон збереження і перетворення енергії формулюється так:

Енергія не виникає і не зникає, а тільки передається від одного тіла до іншого або перетворюється з одного виду в еквівалентну кількість енергії іншого виду.

Задача 1. Тіло на висоті 2,2 м від поверхні Землі рухалось зі швидкістю 10 м/с. З якою швидкістю буде рухатись тіло біля поверхні Землі? Опір повітря не враховувати.

Дано:

$$h_1 = 2,2 \text{ м}$$

$$h_2 = 0 \text{ м}$$

$$V_1 = 10 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

$$g = 9,8 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$$

Знайти V_2 -?

Розв'язок

Зміна кінетичної енергії тіла дорівнює зміні його потенціальної енергії з протилежним знаком:

$$A = E_{K2} - E_{K1} = \frac{mV_2^2}{2} - \frac{mV_1^2}{2} = -(mgh_2 - mgh_1);$$

$$V_2^2 - V_1^2 = 2g(h_1 - h_2);$$

$$V_2 = \sqrt{2g(h_1 - h_2) + V_1^2};$$

$$V_2 = \sqrt{2 \cdot 9,8 \cdot 2,2 + 100} \approx \sqrt{144} = 12 \text{ м/с}.$$

Відповідь: $V_2 \approx 12 \text{ м/с}.$

Задача 2. Тіло кинули під кутом до горизонту. На висоті 10 метрів кінетична енергія тіла вдвічі перевищувала його потенціальну енергію. Знайти початкову швидкість тіла.

Дано:

$$h_1 = 0 \text{ м}$$

$$h_2 = 10 \text{ м}$$

$$E_{K2} = 2 \cdot E_{П2}$$

$$g = 9,8 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$$

Знайти V_1 -?

Розв'язок

За законом збереження механічної енергії:

$$E_{K1} + E_{П1} = E_{K2} + E_{П2};$$

$$\frac{mV_1^2}{2} + mgh_1 = \frac{mV_2^2}{2} + mgh_2;$$

$$\frac{mV_1^2}{2} + mg \cdot 0 = 2mgh_2 + mgh_2;$$

$$\frac{V_1^2}{2} = 3gh_2;$$

$$V_1 = \sqrt{6gh_2} \approx \sqrt{6 \cdot 9,8 \frac{\text{м}}{\text{с}^2} \cdot 10 \text{ м}} \approx 24,2 \text{ м/с}.$$

Відповідь: $V_1 \approx 24,2 \text{ м/с}.$

СЛОВА І СЛОВОСПОЛУЧЕННЯ

кінетична енергія	kinetic energy	внутрішня енергія	internal energy
потенціальна енергія	potential energy	перетворення енергії	transformation of energy
нульовий рівень	zero level	еквівалентна кількість	equivalent amount

повна енергія	full energy	закон збереження енергії	law of energy conservation
виникати	to arise	зникати	to disappear

I. Дайте відповіді на запитання

1. Що таке енергія?
2. З чим пов'язана зміна енергії?
3. Що називають кінетичною енергією?
4. Що називають потенціальною енергією?
5. Чи може потенціальна енергія тіла дорівнювати нулю?
6. У якому випадку потенціальна енергія тіла є від'ємною?

II. Виконайте вправи

1. Вставте потрібне слово (слова) у речення.
 - а) Зміна енергії ... пов'язана з виконанням роботи.
 - б) Потенціальна енергія пружної деформації – це енергія ... окремих частин тіла між собою.
 - в) Зменшення ... енергії дорівнює збільшенню ... енергії.
2. Сформулюйте теорему про кінетичну енергію.
3. Сформулюйте закон збереження енергії для ізолюваної системи.
4. Сформулюйте закон збереження енергії в загальному випадку.
5. Запишіть вираз для визначення кінетичної енергії тіла.
6. Запишіть формулу обчислення потенціальної енергії тіла на висоті h над поверхнею Землі.
7. Запишіть формулу обчислення потенціальної енергії деформації пружини, якщо її видовження становить x .
8. Тіло кинути під кутом до горизонту з початковою швидкістю 20 м/с. Знайти висоту, на якій кінетична енергія тіла дорівнюватиме його потенціальній енергії.
9. Запишіть кінетичну енергію тіла через його масу m і імпульс p .
10. Динамометр, пружина якого розтягнута на 10 см, показує силу 100 Н. Чому дорівнює потенціальна енергія розтягнутої пружини?

11. Камінь кинули вертикально вгору зі швидкістю 15 м/с. На якій висоті його кінетична енергія в 2 рази перевищує потенціальну енергію?

12. Тіло кинули горизонтально з початковою швидкістю 25 м/с. Через скільки секунд кінетична енергія тіла збільшиться удвічі?

13. Тіло масою 2 кг кинули під кутом до горизонту. У верхній точці траєкторії на висоті 20 м його кінетична енергія дорівнює 100 Дж. Якою була початкова швидкість тіла? Під яким кутом до горизонту його кинули?

Запам'ятайте!

1. Що характеризує що

Енергія характеризує стан системи та її здатність виконувати роботу.

2. Що називається чим

Сума кінетичної та потенціальної енергії тіл називається повною механічною енергією.

§21. Механічні коливання

1. Характеристики механічних коливань

Коливаннями називають такі види руху чи зміни станів системи, які періодично повторюються у часі. За своєю фізичною природою коливання поділяються на **механічні та електромагнітні**. За характером коливань – на вільні, вимушені та автоколивання.

Механічні коливання – це періодичні рухи з повторенням положення рівноваги системи. На рис.2.24 зображені приклади механічних коливальних систем: математичний і пружинний маятники.

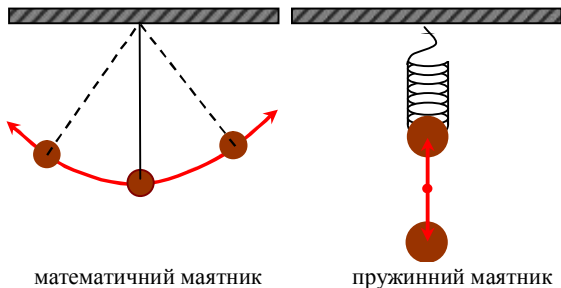


Рис.2.24

Вільними коливаннями називають коливання, які відбуваються за рахунок внутрішньої енергії системи.

Вимушеними коливаннями називають коливання, які виникають в системі під дією періодичних зовнішніх сил.

Автоколивання — це коливання, спричинені сталим зовнішнім впливом на систему, яка сама їх регулює. Прикладом автоколивальної системи є годинник з маятником або наручний механічний годинник.

Коливання характеризуються такими параметрами: **амплітудою, періодом, частотою, фазою змінного параметра.**

Частота коливань ν — це кількість коливань за одну секунду: $\nu = \frac{1}{T}$.

Циклічна частота ω — це кількість коливань за 2π секунд: $\omega = \frac{2\pi}{T}$.

Одиницею частоти в СІ є **Герц**⁸ ($1 \text{ Гц} = 1 \text{ с}^{-1}$).

Амплітуда коливань A — це максимальне зміщення системи від положення рівноваги.

Період коливань T — це найменший проміжок часу, за який система здійснює одне повне коливання (повертається у початковий стан).

⁸ Генріх Герц (1857-1894) — німецький фізик, який першим отримав електромагнітні хвилі та дослідив їх властивості. На його честь названа одиниця вимірювання частоти.

Фаза коливань $\varphi = \omega t + \varphi_0$ – величина, якою задаються миттєві значення змінних параметрів коливальної системи. В момент початку відліку часу ($t=0$) фаза дорівнює початковій фазі φ_0 .

Коливання тіла відносно положення рівноваги задається функцією $f(t)$, яка описує залежність зміщення x від часу t : $x = f(t)$.

2. Гармонічні коливання

Періодичні коливання системи, під час яких її параметри змінюються за законом синуса або косинуса, називають **гармонічними коливаннями** (рис.2.25).

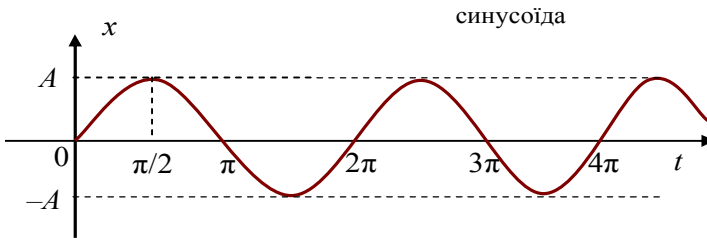


Рис.2.25

Рівняння гармонічних коливань – це рівняння виду:

$$x = A \sin(\omega t + \varphi_0),$$

де x – зміщення точки від положення рівноваги, $A = x_0$ – амплітуда (максимальне зміщення), ω – циклічна частота, t – час, $(\omega t + \varphi_0)$ – фаза коливання, φ_0 – початкова фаза. Фаза визначає ступінь відхилення від положення рівноваги в момент t .

Швидкість під час гармонічних коливань визначається формулою:

$$V = \omega A \cos(\omega t + \varphi_0) = V_0 \sin\left(\omega t + \varphi_0 + \frac{\pi}{2}\right),$$

де $V_0 = \omega A$ – амплітуда швидкості. Фаза швидкості випереджає фазу зміщення на $\frac{\pi}{2}$. Цю формулу отримують диференціюванням зміщення $x = A \sin(\omega t + \varphi_0)$ по часу t :

$$V(t) = \frac{dx(t)}{dt} = (A \sin(\omega t + \varphi_0))' = A \omega \cos(\omega t + \varphi_0).$$

Аналогічно, диференціюванням швидкості по часу отримуємо прискорення під час гармонічних коливань:

$$a(t) = \frac{dV(t)}{dt} = (A \omega \cos(\omega t + \varphi_0))'$$

$$a = -\omega^2 A \sin(\omega t + \varphi_0) = -a_0 \sin(\omega t + \varphi_0) = -\omega^2 x,$$

де $a_0 = \omega^2 A$ – амплітуда прискорення. Фаза прискорення випереджає фазу зміщення x на π радіан (знаходяться у протифазі). **Фаза коливань вимірюється в радіанах** (рад).

Під час гармонічних коливань прискорення прямо пропорційне зміщенню: $a = -\omega^2 x$. Отже, проекція сили на напрям коливань дорівнює: $F_x = m a = -m \omega^2 x$.

За останньою формулою можна дати інше визначення гармонічних коливань.

Коливання, які відбуваються під дією сили, величина якої прямо пропорційна зміщенню і направлена до положення рівноваги, називаються гармонічними коливаннями.

3. Математичний та пружинний маятники

Математичним маятником називають матеріальну точку, підвішену на невагомій і нерозтяжній нитці, яка здійснює рух у вертикальній площині під дією сили тяжіння.

Маятник коливається під дією сили тяжіння $m\vec{g}$ і сили пружності нитки \vec{T} . Модуль рівнодійної цих сил дорівнює $F = mg \sin \alpha$ (рис.2.26).

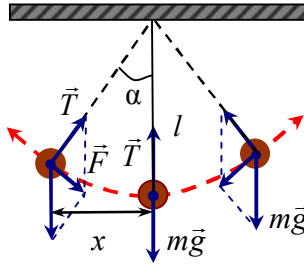


Рис.2.26

При малих кутах відхилення $\sin \alpha = \frac{x}{l}$, де x – зміщення маятника від положення рівноваги, l – довжина нитки.

Від положення рівноваги до максимального відхилення напрям зміщення x і рівнодійної сили F мають протилежні напрямки: $F = -mg \frac{x}{l}$.

Прискорення маятника $a = -g \frac{x}{l} = -\omega_0^2 x$, де $\omega_0 = \sqrt{\frac{g}{l}}$, ω_0 – власна циклічна частота.

Період коливань математичного маятника визначається формулою:

$$T = \frac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}.$$

Пружинним маятником називається система, що складається з пружини малої маси з жорсткістю k , до якої прикріплено тіло масою m (рис.2.27).

Період коливань пружинного маятника визначається за формулою:

$$T = \frac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}},$$

де $\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$ – власна циклічна частота коливань.

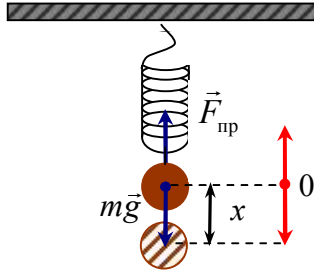


Рис.2.27

Знайдемо кінетичну та потенціальну енергію пружинного маятника:

$$E_{\kappa} = \frac{mV^2}{2} = \frac{m\omega^2 A^2}{2} \sin^2 \omega t ,$$

$$E_n = \frac{kx^2}{2} = \frac{m\omega^2 A^2}{2} \cos^2 \omega t .$$

В процесі коливань відбувається перетворення потенціальної енергії в кінетичну і навпаки. Значення повної енергії в будь-який момент часу дорівнює сумі кінетичної та потенціальної енергії:

$$E_{\kappa} + E_n = \frac{m\omega^2 A^2}{2} \sin^2 \omega t + \frac{m\omega^2 A^2}{2} \cos^2 \omega t$$

$$E_{\kappa} + E_n = \frac{m\omega^2 A^2}{2} .$$

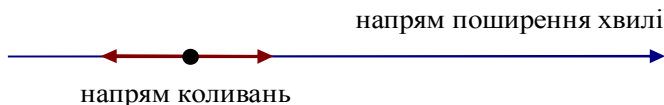
Під час коливань виконується **закон збереження механічної енергії: в процесі гармонічних коливань повна механічна енергія коливальної системи залишається незмінною:**

$$E = E_{\kappa} + E_n = \frac{m\omega^2 A^2}{2} = \frac{kA^2}{2} = \text{const} .$$

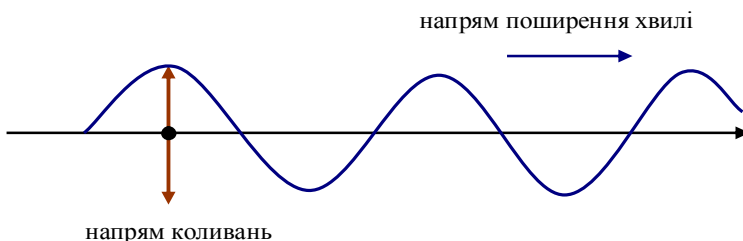
3. Механічні хвилі

Процес поширення коливань у пружному середовищі називають **механічною хвилею**.

Якщо напрям коливань паралельний напрямку поширення хвилі, то така хвиля називається **повздовжньою хвилею**.



Якщо напрям коливань перпендикулярний до напрямку поширення хвилі, то така хвиля називається **поперечною хвилею**.



Відстань, яку подолала хвиля за період коливань, називається **довжиною хвилі**:

$$\lambda = VT,$$

де λ – довжина хвилі, T – період коливань, V – швидкість поширення хвилі (рис.2.28).

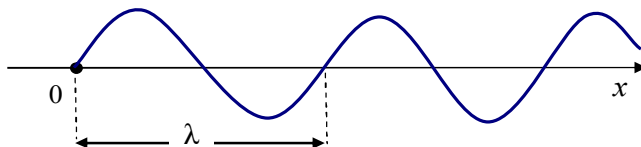


Рис.2.28

Довжину хвилі можна записати в іншому вигляді:

$$\lambda = VT = \frac{V}{\nu} = \frac{2\pi V}{\omega},$$

де $\nu = \frac{1}{T}$ – частота коливань, ω – циклічна частота коливань.

Якщо середовище газове або рідке, то в ньому можуть бути тільки повздовжні хвилі, які являють собою чергування розтягувань і стискувань. На поверхні рідини можуть спостерігатися поперечні хвилі. Якщо середовище тверде, то пружна хвиля може бути як поперечною, так і повздовжньою.

Прикладом повздовжньої хвилі у пружному середовищі є **звук**. Звук – це пружні хвилі, які за своєю частотою та інтенсивністю можуть сприйматися органами слуху. Звукові коливання, які мають частоту, меншу від 18 Гц, називаються **інфразвуками**, від 20 кГц до 10^9 Гц – **ультразвуками**, а вищу за 10^9 Гц – **гіперзвуками**.

Швидкість звуку в повітрі (при 0°C) становить 332 м/с, у воді – 1500 м/с, у сталі – 5500 м/с. У вакуумі звук не розповсюджується.

Швидкість звуку залежить від пружних властивостей середовища, температури, тиску. В більшості рідин швидкість звуку зменшується зі зниженням температури. Виключенням є вода. У воді швидкість звуку при нагріванні на 1 К збільшується на 2,5 м/с.

Людські органи слуху здатні сприймати звукові хвилі частотою від **18** до **20000 Гц**. Людина найкраще сприймає звукові коливання з частотами 1000 – 3000 Гц. Під час сприйняття звуку людина розрізняє три характеристики – висоту, тембр, гучність звуку.

Задача 1.

Математичний маятник з періодом коливань 2 с має довжину 0,9973 м. Визначити прискорення сили тяжіння.

Дано:

$$T = 2 \text{ с}$$

$$l = 0,9973 \text{ м}$$

Знайти: g – ?

Розв'язок

$$\text{Маятник має період коливань } T = \frac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}.$$

$$\text{Звідси } g = \frac{4\pi^2 l}{T^2} \approx 9,882 \text{ м/с}^2.$$

$$\text{Відповідь: } g \approx 9,882 \text{ м/с}^2.$$

Задача 2. Точка здійснює гармонічні коливання з періодом 2 с. Амплітуда коливань 10 см. Знайти зміщення, швидкість і прискорення точки через 2 с після проходження положення рівноваги. Початок коливань співпадає з положенням рівноваги.

Дано:

$$T = 2 \text{ с}$$

$$A = 0,1 \text{ м}$$

$$t = 2 \text{ с}$$

$$\varphi_0 = 0$$

Знайти: x , V , a – ?

Розв'язок

1. Зміщення точки:

$$x = A \sin(\omega t + \varphi_0), \quad x = A \sin \frac{2\pi}{T} t,$$

$$x = 0,1 \cdot \sin \frac{2 \cdot 180}{2} \cdot 0,2 = 0,1 \cdot \sin 36^\circ \approx 0,06 \text{ м}.$$

2. Швидкість точки:

$$V = \omega A \cos(\omega t + \varphi_0); \quad V = \frac{2\pi}{T} A \cos \frac{2\pi}{T} t,$$

$$V = \frac{2 \cdot 3,14}{2} \cdot 0,1 \cdot \cos 36^\circ \approx 0,25 \text{ м/с}.$$

3. Прискорення точки:

$$a = -\omega^2 A \sin(\omega t + \varphi_0), \quad a = -\frac{4\pi^2}{T^2} x$$

$$|a| = \frac{4 \cdot 3,14^2}{4} \cdot 0,06 \approx 0,57 \text{ м/с}^2.$$

Відповідь: $x \approx 0,06 \text{ м}$, $V \approx 0,25 \text{ м/с}$, $|a| \approx 0,57 \text{ м/с}^2$.

СЛОВА І СЛОВОСПОЛУЧЕННЯ

коливання	oscillations	період	period
періодичний рух	periodic motion	частота	frequency
коливальна система	oscillating system	циклічна частота	cyclic frequency
механічні коливання	mechanical oscillations	амплітуда	amplitude
електромагнітні коливання	electromagnetic oscillations	гармонічні коливання	harmonic oscillations
вільні коливання	free oscillations	математичний маятник	simple pendulum
вимушені коливання	forced oscillations	пружинний маятник	spring pendulum
автоколивання	auto-oscillations	звук	sound
механічні хвилі	mechanical waves	інфразвук	infra- sound
поперечні хвилі	transverse waves	ультразвук	ultra-sound
повздовжні хвилі	longitudinal waves	гучність	volume
довжина хвилі	wave-length	швидкість хвилі	velocity of wave

І. Дайте відповіді на запитання

1. Що називають коливаннями?
2. Що таке вільні та вимушені коливання?
3. Що називають автоколиваннями?
4. Які ви знаєте характеристики коливальних процесів?
5. Які коливання називають гармонічними коливаннями?
6. Що таке фаза коливань?
7. Від чого залежить період коливань математичного маятника?
8. Як відбувається перетворення енергії під час коливань пружинного маятника?
9. Що таке хвиля?

10. Які види механічних хвиль ви знаєте?
11. Що називається довжиною хвилі?
12. Які коливання називаються звуковими?

II. Виконайте вправи

1. Як зміниться період коливань математичного маятника, якщо довжину нитки зменшили у 2 рази?
2. Знайдіть жорсткість пружини, якщо підвішений на ній вантаж масою 700 г здійснює 18 коливань за 21 секунду?
3. Визначити прискорення сили тяжіння в тому місці Землі, в якому довжина секундного маятника буде 0,995 м.
4. Яка швидкість звуку в матеріалі, у якому звукові хвилі з частотою 900 Гц мають довжину хвилі 5 м?

Запам'ятайте!

1. Що здійснює що

Маятник здійснює коливання

2. Що розповсюджується н чому

Механічні хвилі розповсюджуються у
пружному середовищі

Розділ 3. МОЛЕКУЛЯРНА ФІЗИКА І ТЕРМОДИНАМІКА

§ 22. Молекулярно-кінетична теорія будови речовин

1. Основні положення молекулярно-кінетичної теорії

Молекулярна фізика вивчає теплові явища, обумовлені рухом і взаємодією молекул речовин.

Молекулярно-кінетична теорія – це наукова теорія, яка пояснює теплові явища, фізичні властивості тіл і речовин в різних агрегатних станах на основі їх молекулярної будови, взаємодії і руху молекул.

Основні положення молекулярно-кінетичної теорії:

1. Фізичні тіла мають дискретну будову. Вони складаються з частинок (молекул, атомів, іонів).

2. Частинки знаходяться в неперервному хаотичному русі⁹.

3. Частики взаємодіють між собою з силами притягання і відштовхування.

Дискретний склад речовини, існування атомів і молекул доведений великою кількістю спостережень і експериментів: розповсюдження запаху, звуку, явище дифузії, розширення і стиснення тіл, випаровування, фотографії молекул і атомів.

2. Розміри і маса молекул

Сучасні методи досліджень дозволяють з великою точністю визначити розмір молекул і атомів. Лінійні розміри атомів і молекул мають величину порядку 10^{-10} м. Розміри складних молекул значно більші. Так молекули білка мають лінійні розміри $43 \cdot 10^{-10}$ м.

На рис.3.1 показано зображення атомів Si на поверхні кристалу кремнію (силіціюм) отримані за допомогою атомно-силового мікроскопу. Один сантиметр рисунку становить

⁹ Хаотичний рух – невпорядкований, безладний рух (від грецького *хаос* – безладдя, відсутність порядку).

близько $1 \text{ нм} = 10^{-9} \text{ м}$. Стрілкою показано місце, у якому відсутній атом. Це «вакансія» – порушення у періодичності розташування атомів у структурі речовини.

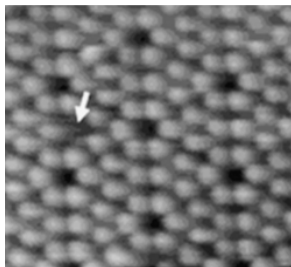


Рис.3.1

Маси молекул дуже малі. Наприклад, маса молекули гідрогену $m_{\text{H}_2} = 3,34 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$, маса молекули води $m_{\text{H}_2\text{O}} = 30 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$.

На практиці користуватися такими числами не дуже зручно. Тому, одиницею вимірювання маси молекул є **атомна одиниця маси (а.о.м.)**.

Атомна одиниця маси дорівнює $1/12$ маси ізоотопу карбону $^{12}_6\text{C}$, який найбільше розповсюджений у Всесвіті серед інших ізоотопів хімічних елементів. Експериментально встановлено, що **а.о.м.** дорівнює $1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$. Тоді маса молекули гідрогену $m_{\text{H}_2} = 2 \text{ а.о.м.}$

Чим більше молекул в тілі, тим більшу кількість речовини містить дане тіло. Відносне число атомів або молекул в тілі називають **кількістю речовини**.

Кількістю речовини називають відношення числа N молекул до числа атомів N_A в $0,012 \text{ кг}$ вуглецю $^{12}_6\text{C}$:

$$n = \frac{N}{N_A}$$

Кількість речовини вимірюють в **молях**.

Моль – це кількість речовини, яка дорівнює кількості атомів у $0,012$ кг вуглецю $^{12}_6\text{C}$.

Відношення числа молекул N речовини до кількості речовини називається сталою Авогадро¹⁰ N_A :

$$N_A = \frac{N}{n}.$$

Закон Авогадро: у рівних об'ємах різних газів за однакових тиску і температури міститься однакова кількість молекул. Ця кількість молекул називається числом або сталою Авогадро і дорівнює $N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$ моль⁻¹.

Молярною масою M називається величина, що дорівнює відношенню маси речовини m до кількості речовини n :

$$M = \frac{m}{n}.$$

Одиницею молярної маси є **кілограм на моль (кг/моль)**. Молярна маса хімічних елементів знаходиться із періодичної таблиці хімічних елементів (рис.3.2). Для складних молекул молярна маса дорівнює алгебраїчній сумі молярних мас атомів, з яких вона складається.

ПЕРІОДИЧНА СИСТЕМА ХІМІЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ

ПЕРІОДИ	ГРУПИ ЕЛЕМЕНТІВ															
	I		II		III		IV		V		VI		VII		VIII	
1	H Гідроген (1,0079)														He Гелій (4,0026)	Символ Протягати числі
2	Li Літій (6,941)	Be Берилій (9,0122)	B Бор (10,811)	C Карбон (12,0107)	N Нітроген (14,0064)	O Оксиген (15,9994)	F Фтор (18,9984)	Ne Неон (20,1797)	O Оксиген (15,9994) Високоті атомна вага Низька елементарна Електронна формула							
3	Na Натрій (22,9898)	Mg Магній (24,3047)	Al Алюміній (26,9815)	Si Силіцій (28,0855)	P Фосфор (30,9738)	S Сульфур (32,065)	Cl Хлор (35,453)	Ar Аргон (39,948)								
4	K Калій (39,0983)	Ca Кальцій (40,078)	Sc Скандій (44,9559)	Ti Титан (47,88)	V Ванадій (50,9415)	Cr Хро́м (51,9961)	Mn Манган (54,938)	Fe Залізо (55,845)	Co Кобальт (58,933)	Ni Нікель (58,6934)						
5	Rb Рубідій (85,4678)	Sr Стронцій (87,62)	Y Йттрій (88,9058)	Zr Церійон (91,224)	Nb Ніобій (92,90638)	Mo Молибден (95,94)	Tc Технецій (98)	Ru Рутеній (101,07)	Rh Родій (102,9055)	Pd Паладій (106,42)						
6	Cs Цезій (132,90545196)	Ba Барій (137,327)	*La Лантан (138,90547)	Hf Гафній (178,49)	Ta Тантал (180,94788)	W Вольфрам (183,84)	Re Рений (186,207)	Os Осмій (190,23)	Ir Ірідій (192,22)	Pt Платина (195,08)						
7	Fr Францій (223)	Ra Радій (226)	*Ac Актиній (227)	Rf Резерфордій (261)	Db Дубній (262)	Sg Сиборгій (266)	Bh Борівій (264)	Hs Гасій (277)	Mt Мейтнерій (268)	Uun Унунілій (289)						

Наприклад, молярна маса молекули CO_2 складає

$$M_{\text{CO}_2} = M_{\text{C}} + 2 \cdot M_{\text{O}} = (12 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 16 \cdot 10^{-3}) \frac{\text{кг}}{\text{моль}} = 44 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{моль}}.$$

Маса однієї молекули речовини $m_{\text{м}}$ визначається відношенням молярної маси і сталої Авогадро:

$$m_{\text{м}} = \frac{M}{N_A}.$$

3. Сили взаємодії між молекулами

Сили міжмолекулярної взаємодії є комбінацією сил притягання та відштовхування. Згідно експериментальним та теоретичним дослідженням, сили взаємодії між молекулами обернено пропорційні відстані між частинками: сили притягання

$$F_{\text{пр}} = -\frac{b}{r^n}, \text{ сили відштовхування } F_{\text{в}} = \frac{a}{r^m}, \text{ де } r \text{ відстань між}$$

частинками, a, b, m, n – сталі коефіцієнти для даної речовини, причому $m > n$. В різних випадках n має значення 6, 7, 8, а m – від 9 до 15.

Залежність сил взаємодії молекул $F(r)$ від відстані між молекулами зображена на рис.3.3. Нехай одна молекула знаходиться в початку координат O , а інша – на деякій відстані від неї.

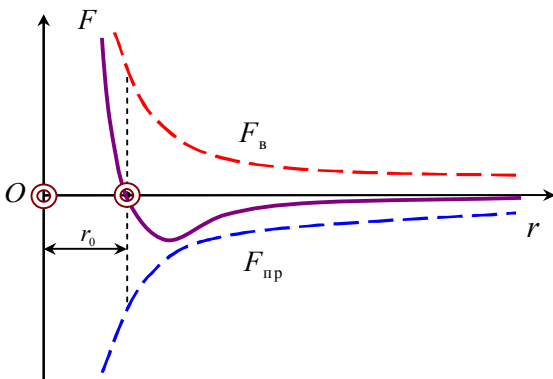


Рис.3.3

З графіка видно, що сили взаємодії між молекулами залежать від відстані між ними. При $r > r_0$ сила притягання більше сили відштовхування, а при $r < r_0$, сила відштовхування більше сили притягання. При $r = r_0$ сили притягання дорівнюють силам відштовхування. Цей стан відповідає найбільш стабільному розташуванню молекул у речовині. Відстань r_0 називається **рівноважною відстанню**.

Одночасне існування сил притягання і відштовхування означає, що на частинки діє рівнодіюча сила $F(r)$. Аналіз функції $F(r)$ пояснює виникнення сил пружності в твердих тілах. Дія сил притягання між молекулами перешкоджає розтягненню тіла і сприяє поверненню молекул на рівноважну відстань. При стисканні сили відштовхування протидіють зовнішнім силам і повертають молекули до стабільного положення.

4. Тепловий рух молекул

Неперервний хаотичний рух частинок (молекул, атомів, іонів) називається **тепловим рухом**. Основними властивостями теплового руху є його **масовість, неперервність і хаотичність**.

Тепловий рух характеризується середньою квадратичною швидкістю $V_{\text{кв}}$:

$$V_{\text{кв}} = \sqrt{\overline{V^2}} = \sqrt{\frac{V_1^2 + V_2^2 + \dots + V_N^2}{N}}.$$

Тут $\overline{V^2}$ - середній квадрат швидкості молекул. Середній квадрат швидкості не дорівнює квадрату середньої швидкості:

$$\overline{V^2} \neq (\bar{V})^2,$$

$$\text{де } (\bar{V})^2 = \left(\frac{V_1 + V_2 + \dots + V_N}{N} \right)^2.$$

Властивості теплового руху молекул, атомів, іонів залежать від **агрегатного стану речовини**. Одна і та сама речовина може

знаходитись в різних агрегатних станах в залежності від умов. Наприклад, речовина H_2O може бути водяною парою, водою, льодом. Відомі чотири агрегатні стани речовини: газ, рідина, тверде тіло, плазма.

Газ. В газах сили притягання не здатні утримати частинки одну біля одної, вони розлітаються і займають увесь об'єм.

В газах частинки рухаються прямолінійно і хаотично до зіткнення з іншими частинками. При зіткненні частинки змінюють напрям швидкості. Шлях кожної частинки – це ламана лінія. Кінетична енергія молекули набагато більша потенціальної енергії взаємодії молекул $E_K \gg E_P$.

Рідина. В рідинах частинки здійснюють хаотичні коливальні рухи біля положення рівноваги і прямолінійні переміщення в нові положення рівноваги. В рідинах $E_K \approx E_P$.

Тверде тіло. В твердих тілах частинки здійснюють хаотичні коливальні рухи біля положення рівноваги. В твердих тілах $E_K \ll E_P$.

Плазма. Плазма подібна до газу. Відмінність полягає у тому, що складається із електронів, позитивно та негативно заряджених іонів. 99,9% видимої маси у Всесвіті складає плазма. У зірках плазма знаходиться під надзвичайно високим тиском і температурою. Міжзоряний простір теж складається із надзвичайно розрідженої плазми. Наша зірка Сонце – це плазмова куля із суміші іонів H^+ та He^{2+} .

СЛОВА І СЛОВОСПОЛУЧЕННЯ

теорія	theory	дифузія	diffusion
дискретний	discrete	броунівський рух	Brownian motion
неперервний	continuous	моль	mole
хаотичний	chaotic	стала Авогадро	Avogadro's constant
тепловий рух	thermal motion	молярна маса	molar mass
сили притягання	attracting forces	коливання молекул	molecular oscillating
сили відштовхування	repulsive forces	середня квадратична швидкість	root mean square speed
агрегатний стан	aggregate state	ламана лінія	broken line
газ	gas	тверде тіло	solid
рідина	liquid	плазма	plasma

I. Дайте відповіді на запитання

1. Які явища вивчає молекулярна фізика?
2. Які лінійні розміри молекул?
3. У яких одиницях вимірюють масу молекул?
4. Що таке моль?
5. Скільки молекул у одному молі?
6. Як знайти масу однієї молекули речовини?
7. Які сили беруть участь у взаємодії молекул?
8. Як залежать сили взаємодії між молекулами від відстані між ними?
9. Який рух називають тепловим рухом?
10. Як рухаються молекули газів?

II. Виконайте вправи

1. Сформулюйте основні положення молекулярно-кінетичної теорії.
2. Запишіть формулу для визначення кількості молів.
3. Запишіть формулу для обчислення маси однієї молекули.

4. Знайти масу молекул: H_2O , H_2SO_4 , Fe_2O_3 . Відповідь запишіть у кілограмах і а.о.м.

5. Знайти кількість молекул нітрогену, якщо маса даного газу складає 28 кг.

Запам'ятайте!
1. Що визначається чим
Маса однієї молекули речовини m_m визначається відношенням молярної маси і сталої Авогадро.
4. Що перешкоджає чому
Дія сил притягання між молекулами перешкоджає розтягненню тіла і сприяє поверненню молекул на рівноважну відстань.

§ 23. Основне рівняння молекулярно-кінетичної теорії

1. Ідеальний газ

У газах, зазвичай, сили взаємодії молекул такі малі, що ними можна нехтувати. Розміри молекул газів також малі порівняно з відстанями між ними. Тому для спрощення розрахунків можна нехтувати власним об'ємом молекул і силами притягання, що діють між ними. Таке спрощення дає змогу замінити вивчення реальних газів вивченням їх наближеної моделі – **ідеального газу**.

Ідеальний газ – модель реального газу, в якій не враховуються розміри молекул, їх взаємодія, а зіткнення молекул вважають абсолютно пружним ударом.

Поняття ідеального газу допомагає абстрагуватися від особливостей реального газу і сформулювати закони, спільні для всіх газів.

2. Температура тіла і швидкість руху молекул

Молекула ідеального газу, що рухається зі швидкістю V_i , має кінетичну енергію $E_{ki} = \frac{mV_i^2}{2}$. Сума кінетичних енергій всіх

молекул газу є загальною кінетичною енергією газу. Якщо всі молекули однакові, то:

$$E_K = \frac{m}{2} \sum_{i=1}^N V_i^2,$$

де N – число молекул газу.

Розділимо загальну кінетичну енергію E_K молекул на кількість молекул N : $\frac{E_K}{N} = \frac{m}{2N} \sum_{i=1}^N V_i^2$.

Відношення $\frac{E_K}{N}$ називають **середньою кінетичною енергією** поступального руху молекули. Останню формулу можна записати так:

$$\bar{E}_K = \frac{m}{2} \overline{V^2}.$$

Величину $\overline{V^2}$ називають середнім значенням квадрата швидкості.

Досліди і розрахунки показують, що середня кінетична енергія поступального руху однієї молекули прямо пропорційна абсолютній температурі: $\bar{E}_K = \frac{m}{2} \overline{V^2} = \frac{3}{2} kT$,

де $\frac{3}{2}k$ – коефіцієнт пропорційності.

Отже, **абсолютна температура T є мірою середньої кінетичної енергії теплового руху молекул**. У цьому полягає фізичний зміст абсолютної температури.

Одиниця вимірювання абсолютної температури в СІ – **Кельвін**¹¹ (1 K).

Коефіцієнт k у формулі $\bar{E}_K = \frac{3}{2} kT$ називають **сталою Больцмана**¹²: $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К. Фізичний зміст сталої

¹¹ Вільям Томсон, лорд Кельвін (1824-1907) – видатний шотландський фізик, один із засновників сучасної термодинаміки. На його честь названа одиниця вимірювання абсолютної температури.

Больцмана полягає у зміні кінетичної енергії однієї молекули при зміні абсолютної температури на один Кельвін.

З рівності $\bar{E}_k = \frac{m}{2} \overline{V^2} = \frac{3}{2} kT$, випливає, що середній квадрат

швидкості молекул дорівнює: $\overline{V^2} = \frac{3kT}{m}$.

Квадратний корінь цієї величини називається середньою квадратичною швидкістю теплового руху молекул:

$$V_{\text{ср.кв.}} = \sqrt{\frac{3kT}{m}} = \sqrt{\frac{3RT}{M}},$$

де $R = k \cdot N_A = k \cdot \frac{m}{M}$ – молярна газова стала; M – молярна маса, m – маса молекули.

Молярна газова стала дорівнює: $R = 8,31 \text{ Дж/(К} \cdot \text{моль)}$.

Фізичний зміст молярної газової сталої полягає у зміні кінетичної енергії одного молю газу при зміні абсолютної температури на один Кельвін.

Обчислимо середню квадратичну швидкість молекул газів. Наприклад, при $T = 273 \text{ К}$ молекули нітрогену N_2 ($M_{N_2} = 28 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$) мають швидкість $V_{\text{ср.кв.}} \approx 493 \text{ м/с}$.

Молекули гідрогену H_2 ($M_{H_2} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$) при такій температурі мають швидкість $V_{\text{ср.кв.}} \approx 1845 \text{ м/с}$.

Швидкості молекул газів за нормальних умов дуже великі. Молекули рухаються швидше, ніж поширюється звук у повітрі. Значення швидкості молекул газу обчислені теоретично збігаються з експериментальними результатами.

3. Тиск газу

¹² Людвіг Больцман (1844-1906) – австрійський фізик, який зробив великий внесок у розвиток термодинаміки і статистичної фізики.

Тиск газу – це результат пружних ударів великої кількості молекул об стінку посудини. Оскільки молекул дуже багато і вони взаємодіють зі стінкою дуже часто, можна замінити їхню сумарну дію на поверхню стінки однією силою, яка діє безперервно. Значення цієї сили, що припадає на одиницю поверхні стінки, визначає тиск, який чинить газ на стінку посудини :

$$P = \frac{F}{S},$$

де P – тиск, F – сила, S – площа поверхні.

Тиск – скалярна величина, що дорівнює силі, яка діє на одиницю площі поверхні перпендикулярно до цієї поверхні.

Одиниця тиску в СІ – **Паскаль**¹³ (Па): $1 \text{ Па} = 1 \text{ Н/м}^2$.

Сила удару молекул при постійній масі газу залежить від значення кінетичної енергії теплового руху молекул. Обчислення показують, що тиск ідеального газу дорівнює:

$$P = \frac{2}{3} n_0 \overline{E_K},$$

де $\overline{E_K}$ – середнє значення кінетичної енергії ідеального газу,

$n_0 = \frac{N}{V}$ – концентрація молекул, тобто число молекул в одиниці об'єму: N – кількість молекул, V – об'єм газу.

Це рівняння називають **основним рівнянням молекулярно-кінетичної теорії ідеального газу**.

Тиск ідеального газу пропорційний добуткові концентрації молекул і середньої кінетичної енергії поступального руху молекул.

Основне рівняння молекулярно-кінетичної теорії встановлює зв'язок між мікроскопічними величинами (маса молекул, кількість частинок в одиниці об'єму, середня кінетична енергія молекули) і макроскопічною величиною – тиском, який вимірюється у експериментах. Середня кінетична енергія молекули також зв'язана з іншим макроскопічним параметром

¹³ Блез Паскаль (1623-1662) – видатний французький філософ, математик, фізик і письменник. На його честь названа одиниця вимірювання тиску.

газу – абсолютною температурою, яка також вимірюється експериментально.

СЛОВА І СЛОВОСПОЛУЧЕННЯ

Стала Больцмана	Boltzmann's constant	концентрація молекул	concentration of molecules
ідеальний газ	ideal gas	тиск	pressure
абсолютна температура	absolute temperature	молекулярно- кінетична теорія	molecular- kinetic theory
експеримент	experiment	об'єм	volume
Паскаль	Pascal	Кельвін	Kelvin

I. Дайте відповіді на запитання

1. Який газ називається ідеальним газом?
2. Який фізичний зміст абсолютної температури?
3. У яких одиницях вимірюють абсолютну температуру?
4. Що називається середньою квадратичною швидкістю?
5. Який фізичний зміст сталої Больцмана?
6. Який фізичний зміст молярної газової сталої?
7. Як визначити тиск газу?
8. У яких одиницях вимірюють тиск?
9. Зв'язок між якими величинами встановлює основне рівняння молекулярно-кінетичної теорії?

II. Виконайте вправи

1. Назвіть основні властивості ідеального газу.
2. Запишіть формулу зв'язку середньої кінетичної енергії молекул газу і його абсолютної температури.
3. Запишіть основне рівняння молекулярно-кінетичної теорії.
4. Знайти концентрацію молекул двоокису карбону CO_2 , якщо два молі цього газу мають об'єм 1 м^3 .
5. Визначити середню квадратичну швидкість і середню кінетичну енергію теплового руху молекул оксигену при температурі 300 К .

6. Чому дорівнює середня кінетична енергія молекул водню, якщо в посудині об'ємом 3 м^3 знаходиться $2,5 \text{ кг}$ газу, тиск якого 150 кПа ?

Запам'ятайте!
1. Що є що
Сума кінетичних енергій всіх молекул газу є загальною кінетичною енергією газу.
4. Що встановлює що
Основне рівняння молекулярно-кінетичної теорії встановлює зв'язок між мікроскопічними величинами і макроскопічною величиною – тиском.

§ 24. Властивості газів. Рівняння стану ідеального газу

1. Газові закони

Стан ідеального газу визначається його об'ємом, тиском і температурою. P – тиск, V – об'єм і T – температура називаються параметрами стану газу. Рівняння, що зв'язують ці величини називають **газовими законами**.

Ізопроцес – це процес, при якому один із параметрів стану газу залишається сталим.

Ізотермічний процес – це процес зміни стану газу при сталій температурі $T = \text{const}$.

Закон Бойля-Маріотта¹⁴: для даної маси газу при сталій температурі добуток об'єму газу на тиск газу є сталою величиною: $PV = \text{const}$, ($m = \text{const}$; $T = \text{const}$).

При ізотермічному процесі для будь-яких двох станів газу справедливий вираз $P_1V_1 = P_2V_2$. На рис.3.4 зображено **діаграми**

¹⁴ Роберт Бойль (1627-1691) – англійський фізик, хімік і філософ, один із засновників Лондонського королівського товариства.
Едм Маріотт (1620-1684) – французький фізик і ботанік, абат

стану газу для двох різних температур T_1 і T_2 . Лінії сталої температури в різних координатах називаються **ізотермами**.

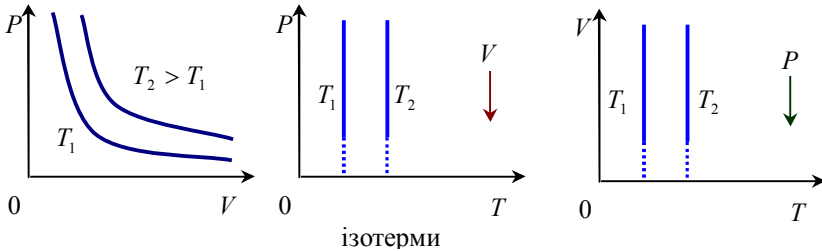


Рис.3.4

Ізобарний процес – це процес зміни стану газу при сталому тиску $P = \text{const}$.

Закон Гей-Люссака¹⁵: нагрівання газу на 1 K при сталому тиску призводить до збільшення об'єму газу на $1/273$ частини об'єму при $T_0 = 273\text{ K}$:

$$V_t = V_0(1 + \beta t) \text{ або } V_T = V_0\beta T,$$

де $V_T = V_t - V_0$, β – коефіцієнт об'ємного розширення, t – температура у градусах Цельсія¹⁶. Для всіх газів $\beta = \frac{1}{273}\text{ K}^{-1}$. При ізобарному процесі для будь-яких двох станів газу справедливі вирази:

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{T_2}{T_1} \text{ або } \frac{V_2}{T_2} = \frac{V_1}{T_1}.$$

¹⁵ Жозеф-Луї Гей-Люссак (1778-1850) – французький хімік і фізик, член Французької академії наук.

¹⁶ Андерс Цельсій (1701-1744) – шведський астроном і математик, який запропонував вимірювати температуру від 0° градусів – температура плавлення льоду до 100° – температура кипіння води.

На рис.3.5 зображено діаграми стану газу для двох різних тисків P_1 і P_2 . Лінії сталої тиску в різних координатах називаються **ізобарами**.

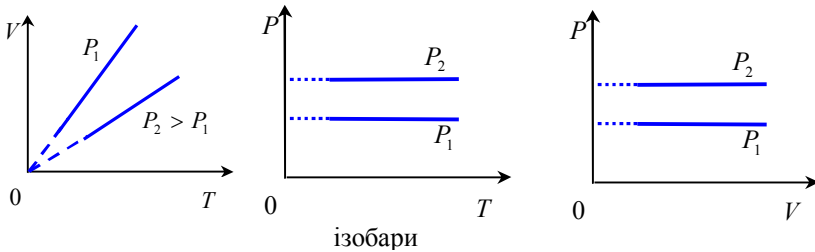


Рис.3.5

Ізохорний процес – це процес зміни стану газу при сталому об’ємі $V = \text{const}$.

Закон Шарля¹⁷: нагрівання газу на 1 K при сталому об’ємі призводить до збільшення тиску газу на $1/273$ частини тиску при $T_0 = 273 \text{ K}$:

$$P_t = P_0(1 + \gamma t), \quad P_T = P_0 \gamma T,$$

де $P_T = P_t - P_0$, γ – температурний коефіцієнт тиску. Для всіх газів $\gamma = \frac{1}{273} \text{ K}^{-1}$.

При ізохорному процесі для будь-яких двох станів газу справедливі вирази:

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{T_2}{T_1} \quad \text{або} \quad \frac{P_2}{T_2} = \frac{P_1}{T_1}.$$

На рис.3.6 зображено діаграми стану газу для двох різних об’ємів V_1 і V_2 . Лінії сталого об’єму в різних координатах називаються **ізохорами**.

¹⁷ Жак Шарль (1746-1823) – французький винахідник і фізик.

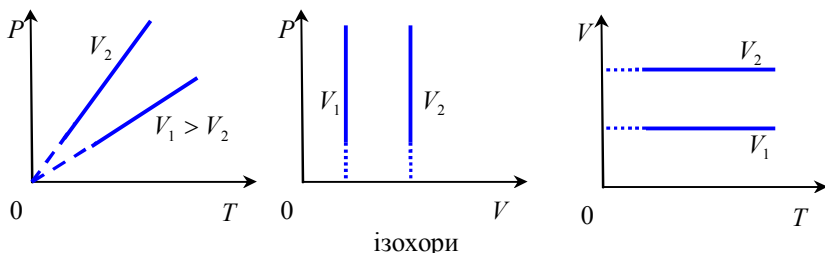


Рис.3.6

2. Рівняння Клайперона¹⁸

Рівняння Клайперона узагальнює газові закони. При сталій масі газу $m = \text{const}$:

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2}.$$

Для даної масу газу відношення добутку тиску на об'єм до абсолютної температури є величиною сталою:

$$\frac{PV}{T} = \text{const}.$$

Часто стан газу порівнюють зі станом газу при нормальних умовах в СІ: $P_0 = 1.01 \cdot 10^5 \text{ Па}$; $T_0 = 273 \text{ К}$.

3. Абсолютний нуль температури

Залежність тиску ідеального газу при незмінному об'ємі від температури є лінійною: $P_t = P_0(1 + \gamma t)$, де P_0 – тиск газу при $T_0 = 273 \text{ К}$. На рис.3.7 зображений графік залежності $P(t) = P_0(1 + \gamma t)$, де t – температура у градусах Цельсія.

¹⁸ Бенуа Клайперон (1799-1864) – французький фізик і інженер, вивів рівняння стану ідеального газу.

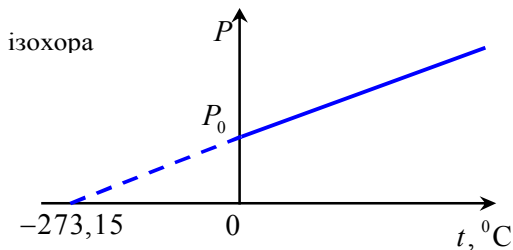


Рис.3.7

Якщо продовжити пряму у бік від'ємних температур, то отримаємо точку перетину ізохори з віссю температури $t, ^\circ\text{C}$. В цій точці тиск газу $P=0$, $0 = P_0(1 + \gamma t)$. Але $P_0 \neq 0$, тому $1 + \gamma t = 0$. Звідки знаходимо температуру у точці перетину

$t = -\frac{1}{\gamma} = -273,15^\circ\text{C}$. Температура $t = -273,15^\circ\text{C}$ є температурою

початку відліку (нуль) **шкали Кельвіна** вимірювання абсолютної температури.

Нуль Кельвін – абсолютний нуль температури
 $0\text{ K} = -273,15^\circ\text{C}$.

Фізичний зміст абсолютного нуля полягає в тому, що при цій температурі зникає тиск газу, припиняється будь який рух молекул. На практиці досягти температури 0 K неможливо, до цієї температури можна наблизитися нескінченно близько. В сучасній фізиці досягли температуру у 10^{-7} K .

4. Закон Дальтона¹⁹

Тиск суміші n газів визначається наступним виразом:

$$P = \sum_{i=1}^n P_i, \text{ де } P_i - \text{ парціальний тиск.}$$

¹⁹ Джон Дальтон (1766-1844) – британський хімік і фізик, відомий теорією корпускулярної будови матерії та дослідженнями кольорової сліпоты (дальтонізм).

Парціальний тиск – це тиск лише одного газу із суміші у даному об’ємі, якщо інші гази видалити.

Закон Дальтона: Тиск сумі газів дорівнює сумі їхніх парціальних тисків.

5. Рівняння стану ідеального газу

Для отримання рівняння стану ідеального газу скористаємося рівнянням Клайперона для даної маси газу:

$$\frac{PV}{T} = B = \text{const} .$$

Для обчислення сталої B використаємо **закон Авогадро**: В однакових об’ємах різних газів за однакових умов міститься однакова кількість молекул.

У одному молі різних газів міститься $N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$ моль⁻¹ – число Авогадро молекул.

За нормальних умов $P_0 = 1,013 \cdot 10^5$ Па ; $T_0 = 273$ К один моль ідеального газу має об’єм $V_M = 0,0224$ м³/моль . Тоді:

$$\frac{P_0 V_0}{T_0} = \frac{1,013 \cdot 10^5 \text{ Па} \cdot 0,0224 \text{ м}^3/\text{моль}}{273 \text{ К}} = 8,31 \text{ Дж}/(\text{К} \cdot \text{моль}) .$$

Цю сталу позначають літерою R і називають **молярною газовою сталою**. Це та сама стала з рівняння середньої кінетичної енергії газу $R = k \cdot N_A = k \cdot \frac{m}{M}$ (§ 22, с. 144).

Рівняння стану ідеального газу для одного моля має вигляд:

$$PV_M = RT ,$$

де V_M – об’єм одного моля газу.

Для довільної маси газу $m = nM$, де n – кількість молів, M – молярна маса. Для n молей об’єм дорівнює $V = nV_M$. Помножимо рівняння $PV_M = RT$ на n : $nPV_M = nRT$, звідси

$$PV = \frac{m}{M} RT.$$

Це рівняння називають **рівнянням стану ідеального газу** або **рівнянням Менделєєва-Клапейрона**.

В цьому рівнянні P – тиск газу, V – об'єм газу, M – молярна маса, m – маса газу, T – температура газу, R – молярна газова стала.

Задача 1. Газ при температурі 455 К має об'єм V_0 . До якої температури потрібно охолодити газ при сталому тиску, щоб його об'єм став $2/5 V_0$?

Дано:

$$T_1 = 477 \text{ К}$$

$$V_1 = V_0$$

$$V_2 = \frac{2}{5} V_0$$

$$P_1 = P_2$$

Знайти: T_2 – ?

Розв'язок

При ізобарному процесі виконується закон Гей-Люссака:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2} \Rightarrow T_2 = \frac{V_2 T_1}{T_1}.$$

$$T_2 = \frac{\frac{2}{5} V_0 \cdot 455 \text{ К}}{V_0} = 182 \text{ К}.$$

Відповідь: $T_2 = 182 \text{ К}.$

Задача 2. В балоні об'ємом 5 л знаходиться 5 кг кисню при 300 К. Яку масу газу потрібно випустити з балону, щоб при температурі 350 К тиск зменшився на $2 \cdot 10^4 \text{ Па}$?

Дано:

$$V = 5 \text{ л} = 5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$$

$$m = 5 \text{ кг}$$

$$T_1 = 300 \text{ К}$$

$$T_2 = 350 \text{ К}$$

$$\Delta P = 2 \cdot 10^4 \text{ Па}$$

Знайти: Δm – ?

Розв'язок

Запишемо рівняння стану ідеального газу у першому і другому станах:

$$1. PV = \frac{m}{M} RT_1$$

$$2. (P - \Delta P)V = \frac{m - \Delta m}{M} RT_2.$$

Відніmemo від першого рівняння друге:

$$PV - (P - \Delta P)V = \frac{mRT_1}{M} - \frac{(m - \Delta m)RT_2}{M}.$$

$$\Delta PV = \frac{mRT_1}{M} - \frac{mRT_2}{M} + \frac{\Delta mRT_2}{M},$$

$$\Delta PVM + mRT_2 - mRT_1 = \Delta mRT_2,$$

$$\Delta m = \frac{\Delta PVM}{RT_2} + \frac{m(T_2 - T_1)}{T_2} = m \left(1 - \frac{T_1}{T_2} \right) + \frac{\Delta PVM}{RT_2},$$

$$\Delta m = 5 \text{ кг} \left(1 - \frac{300 \text{ К}}{350 \text{ К}} \right) + \frac{2 \cdot 10^4 \text{ Па} \cdot 5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 \cdot 32 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}}{8,31 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{моль)} \cdot 350 \text{ К}} \approx$$

$$\approx 0,71 \text{ кг}.$$

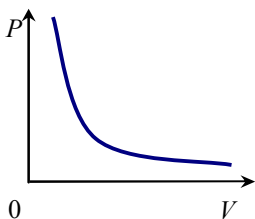
Відповідь: $\Delta m \approx 0,71 \text{ кг}.$

СЛОВА І СЛОВОСПОЛУЧЕННЯ

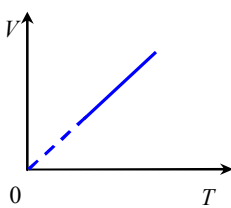
параметр стану	state parameter	нуль Кельвін	zero of Kelvin
ізотермічний процес	isothermal process	закон Дальтона	Dalton's law
ізобарний процес	isobar process	парціальний тиск	partial pressure
ізохорний процес	isochoric process	манометр	manometer
коефіцієнт об'ємного розширення	volume expansion coefficient	термічний коефіцієнт тиску	pressure thermal coefficient
рівняння стану	state equation	закон Авогадро	Avogadro's law

І. Дайте відповіді на запитання

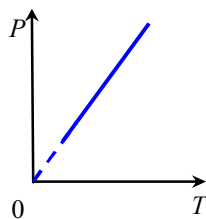
1. Як називаються ізопроекти зі сталою температурою і тиском?
2. Як називається процес зміни стану ідеального газу при незмінному об'ємі?
3. Який фізичний зміст абсолютного нуля температури?
4. Чи можна отримати температуру газу, яка дорівнює 0 K?
5. Що таке парціальний тиск?
6. На якому з графіків зображено ізобарний процес?



A



Б



B

ІІ. Виконайте вправи

1. Назвіть параметри стану ідеального газу.
2. Сформулюйте закон Бойля-Маріотта.
3. Сформулюйте закон Дальтона.
4. Запишіть рівняння стану ідеального газу і назвіть всі змінні і сталі величини у цьому рівнянні.

5. При деякій температурі газ знаходиться під тиском $2 \cdot 10^5$ Па. На скільки градусів підніметься температура газу при сталому об'ємі, якщо тиск газу став $2,5 \cdot 10^5$ Па.

6. При 0°C газ має тиск $2 \cdot 10^6$ Па? Яким буде тиск газу при 819°C , якщо об'єм газу не зміниться?

7. Визначити масу повітря у кімнаті об'ємом 60 м^3 при температурі 20°C і тиску 10^5 Па, якщо густина повітря при нормальних умовах $1,29 \text{ кг/м}^3$.

8. Балон ємністю 100 л містить 5,76 кг кисню. При якій температурі виникає небезпека вибуху, якщо балон витримує тиск до $5 \cdot 10^6$ Па?

Запам'ятайте!
1. Що позначають чим
Цю сталу позначають літерою R і називають молярною газовою сталою.
2. Що називають чим
Це рівняння називають рівнянням стану ідеального газу.

§ 25. Основні поняття термодинаміки

1. Внутрішня енергія ідеального газу

Термодинаміка – розділ фізики, який вивчає теплові явища в газах, рідинах та твердих тілах, на основі перетворення теплової форми руху матерії в інші види енергії.

Атоми і молекули не лише перебувають у хаотичному русі, а й весь час взаємодіють між собою. У газах - це короткочасні зіткнення. У рідинах і твердих тілах – це постійна взаємодія атомів, молекул або іонів, у результаті якої вони коливаються біля відносно стабільних положень рівноваги.

Внутрішня енергія тіла складається з кінетичної енергії теплового руху атомів і молекул та потенціальної енергії їхньої взаємодії:

$$U = \sum_N E_{K_N} + \sum_N E_{П_N} ,$$

де N – число частинок.

Термодинамічною системою називають макроскопічне тіло або сукупність макроскопічних тіл.

Ідеальний газ є термодинамічною системою. Внутрішня енергія ідеального газу дорівнює сумі кінетичних енергій руху молекул:

$$U = E_{K_1} + E_{K_2} + \dots + E_{K_N}, \text{ де } N - \text{число молекул.}$$

Середня кінетична енергія молекул ідеального газу визначається виразом:

$$\overline{E_K} = \frac{3}{2} kT.$$

Якщо газ містить N молекул, то їх загальна енергія дорівнює:

$$U = \frac{3}{2} kTN$$

Звідси, справедливим є твердження, що зміна внутрішньої енергії ідеального газу в термодинамічному процесі визначається тільки зміною його температури:

$$\Delta U = U_2 - U_1 = \frac{3}{2} Nk(T_2 - T_1).$$

Зміну внутрішньої енергії газу можна здійснити двома способами:

- при здійсненні роботи (стиснення або розширення газу);
- при **теплообміні** (нагрівання або охолодження газу).

Зміна внутрішньої енергії тіл в результаті виконання роботи дорівнює значенню цієї роботи:

$$A = \Delta U = U_2 - U_1,$$

де ΔU – зміна внутрішньої енергії тіла.

Внутрішня енергія тіла може змінюватись при теплообміні між тілами без виконання роботи.

Кількісну зміну внутрішньої енергії при теплообміні називають **кількістю теплоти** і позначають буквою Q . Кількість теплоти вимірюють в одиницях енергії (Джоуль).

Зміна внутрішньої енергії термодинамічної системи в процесі теплообміну дорівнює кількості теплоти, яку отримала або втратила система:

$$Q = \Delta U = U_2 - U_1,$$

де U_1 і U_2 початкове і кінцеве значення внутрішньої енергії.

Надана кількість теплоти збільшує температуру тіла або змінює його агрегатний стан.

Розрізняють три види теплообміну: **теплопровідність, конвекція, теплове випромінювання.**

Теплопровідність – це процес передачі теплоти від більш нагрітих частин тіла до менш нагрітих, у результаті якого має місце вирівнювання температури без перенесення речовини.

Найвищу теплопровідність мають метали, серед яких найкращими провідниками теплоти є мідь і срібло.

Найгіршими провідниками теплоти вважаються гази.

Під час передавання теплоти у рідинах і газах поряд з теплопровідністю відбуваються теплообмінні процеси, що супроводжуються перенесенням речовини.

Конвекцією називається теплообмін унаслідок перенесення речовини у газах і рідинах.

Існує такий вид теплообміну, який не потребує наявності середовища. Цей особливий вид теплообміну називається **променевим, або тепловим випромінюванням.**

Теплову енергію випромінюють усі без винятку тіла, оскільки всі вони мають внутрішню енергію. Енергія, яку випромінює тіло, залежить від його температури: чим вища температура тіла, тим більше енергії воно випромінює.

Завдяки тепловому випромінюванню теплота передається в безповітряному просторі, у космосі. Енергія Сонця потрапляє на Землю і підтримує життя на ній.

2. Питома теплоємність

Кількість теплоти надана тілу внаслідок нагрівання залежить від його маси і речовини та різниці температур у кінцевому і початковому станах:

$$Q = cm(T_2 - T_1) = cm\Delta T.$$

Якщо тіло охолоджується, то $T_1 > T_2$, тому кількість теплоти, яка виділяється при охолодженні тіла, дорівнює:

$$Q = cm(T_1 - T_2),$$

де c – питома теплоємність.

Фізична величина, що визначається кількістю теплоти, яку треба надати 1 кг речовини для підвищення її температури на 1 К, називається питомою теплоємністю речовини.

Одиницею питомої теплоємності є Дж/(кг·К)

Числове значення питомої теплоємності речовини визначає зміну внутрішньої енергії тіла масою 1 кг зі зміною температури на 1 К. Встановлено, що різні речовини мають різну питому теплоємність. Вода має питому теплоємність $c_{H_2O} = 4200 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$.

Питома теплоємність залежить від процесу при якому відбувається нагрівання. Теплоємність c_p при $P = \text{const}$ називається питомою теплоємністю при сталому тиску, а c_v при $V = \text{const}$ називається питомою теплоємністю при сталому об'ємі.

Якщо нагрівання тіла відбувається при сталому тиску, то кількість теплоти спрямована на збільшення внутрішньої енергії тіла і на виконання роботи. Тому $c_p > c_v$.

Задача. Металеve тіло, питома теплоємність якого $c = 125 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$, падає з висоти $h = 1200 \text{ м}$. Під час удару об землю тіло нагрілося. На скільки градусів збільшилась температура тіла, якщо 50 % механічної енергії перетворилося на внутрішню енергію тіла?

Дано:

$$c = 125 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$$

$$U = 0,5 \cdot E_{II}$$

$$h = 1200 \text{ м}$$

Знайти ΔT – ?

Розв'язок

Зміна внутрішньої енергії тіла: $\Delta U = Q = cm\Delta T$.

Тіло на висоті h має потенційну енергію $E_{\text{п}} = mgh$.

За умовою задачі $0,5 \cdot E_{\text{п}} = Q$. Тоді $0,5mgh = cm\Delta T$.

$$\text{Звідси } \Delta T = \frac{0,5gh}{c} = \frac{0,5 \cdot 9,8 \cdot 1200}{125} \text{ К} = 47 \text{ К}.$$

Відповідь: $\Delta T = 47 \text{ К}$.

СЛОВА І СЛОВОСПОЛУЧЕННЯ

термодинаміка	thermodynamics	термодинамічна система	thermodynamic system
внутрішня енергія	internal energy	кількість теплоти	amount of heat
теплообмін	heat exchange	теплоємність речовини	heat capacity of substance
тепло-провідність	thermal conduction	питома теплоємність	specific heat capacity
охолодження	cooling	теплове випромінювання	thermal radiation
нагрівання	heating	конвекція	convection

I. Дайте відповіді на запитання

1. Що вивчає термодинаміка?
2. Що називають внутрішньою енергією тіла?
3. Що називається термодинамічною системою?
4. Які існують способи зміни внутрішньої енергії тіла?
5. Що таке кількість теплоти?
6. Що називається питомою теплоємністю?
7. Який фізичний зміст питомої теплоємності тіла?
8. Які види теплообміну існують у природі?

II. Виконайте вправи

1. Запишіть вираз для внутрішньої енергії термодинамічної системи.

2. Запишіть формулу для визначення кількості теплоти, яка передається тілу в процесі теплообміну.

3. Яке тіло має більшу внутрішню енергію: кусок льоду при 0°C чи утворена з цього куска вода при 0°C ?

4. Тіло летить зі швидкістю 200 м/с , його питома теплоємність $125\text{ Дж/(кг}\cdot\text{K)}$. Як зміниться температура тіла, якщо вся кінетична енергія перетвориться на внутрішню енергію тіла?

5. Локомотив масою 200 т , рухаючись із швидкістю 72 км/год , був зупинений гальмами. Яка кількість теплоти виділилась при гальмуванні?

Запам'ятайте!
1. Що визначається чим
Середня кінетична енергія молекул ідеального газу визначається виразом: $\overline{E_K} = \frac{3}{2}kT$.
2. Що залежить від чого
Питома теплоємність залежить від зміни тиску і об'єму при нагріванні.

§ 26. Закони термодинаміки

1. Перший закон термодинаміки

Внутрішня енергія тіла може бути змінена у процесі теплопередачі чи виконання роботи, причому обидва процеси можуть відбуватись і одночасно.

Перший закон термодинаміки: зміна внутрішньої енергії термодинамічної системи ΔU дорівнює алгебраїчній сумі кількості теплоти Q і виконаної роботи A :

$$\Delta U = Q - A,$$

де ΔU – зміна внутрішньої енергії термодинамічної системи ($\Delta U = U_2 - U_1 = \frac{3}{2} Nk(T_2 - T_1)$) – для ідеального газу при нагріванні $T_2 > T_1$). A – робота, яку виконує термодинамічна система над іншими тілами. Знак «мінус» означає, що ми враховуємо роботу, що виконується над системою з боку інших тіл.

Для кращого розуміння першого закону термодинаміки розглянемо термодинамічну систему – ідеальний газ, стан якого змінюється зі зміною його параметрів P – тиску, V – об'єму і T – температури. Наприклад, газ у циліндрі під поршнем може нагріватися за рахунок передачі йому певної кількості теплоти, і одночасно виконуватися робота газом, що розширюється.

Розглянемо перший закон термодинаміки в різних ізопроцесах зміни стану ідеального газу:

1) **ізотермічний процес**: $T = \text{const}$, тоді $\Delta U = 0$ і $Q = A$. Кількість теплоти Q дорівнює роботі A . Якщо Q надається газу, то робота виконується системою і газ розширюється. Якщо Q відводиться від газу, то робота виконується над системою і газ стискається.

2) **ізобарний процес**: $P = \text{const}$, $\Delta U \neq 0$, $A \neq 0$, $A = P \cdot \Delta V$, $\Delta U = Q - A$ або $Q = \Delta U + A$.

Відбувається розширення (стискання) газу при незмінному тиску, змінюється внутрішня енергія газу і газ виконує роботу (над газом виконується робота).

3) **ізохорний процес**: $V = \text{const}$, $\Delta U \neq 0$, $A = 0$: вся підведена кількість теплоти витрачається на зміну внутрішньої енергії газу $\Delta U = Q$.

4) **адіабатний процес**: $Q = 0$, $A = \Delta U$. Ідеальний газ виконує роботу над зовнішніми тілами за рахунок своєї внутрішньої енергії.

Адіабатний процес – це процес за відсутності теплообміну з навколишнім середовищем:

Перший закон термодинаміки: енергія не виникає і не зникає, а тільки перетворюється із одного виду в інший. Перший закон термодинаміки є іншою формою закону збереження енергії.

Встановлення першого закону термодинаміки було пов'язане з невдалими спробами створення теплової машини, яка б нескінченно довго виконувала роботу без надходження теплоти ззовні. В термодинаміці таку машину називають **«вічним» двигуном першого роду**: неможливо нескінченно довго виконувати роботу за рахунок внутрішньої енергії системи.

2. Рівняння теплового балансу

Розглянемо ізольовану термодинамічну систему, в якій зміна внутрішньої енергії тіл відбувається лише в процесі теплообміну $\Delta U = Q$. Усі тіла, що перебувають у теплообміні, з часом досягають **стану теплової рівноваги**, тобто температура всіх тіл стає однаковою.

Перебуваючи в теплообмінному процесі, одні тіла віддають таку кількість теплоти, яку отримують інші. Ця умова досягнення стану теплової рівноваги називається **тепловим балансом**.

Рівняння теплового балансу складають з урахуванням того, що сума кількості теплоти, яку отримали тіла, дорівнює сумі кількості теплоти, яку віддали інші тіла внаслідок теплообміну:

$$\sum_{i=1}^n Q_i^{\text{від}} = \sum_{j=1}^m Q_j^{\text{отр}},$$

де n – кількість тіл, що віддають теплоту, m – кількість тіл, що отримують теплоту.

Рівняння теплового балансу: кількість теплоти, віддана тілами, внутрішня енергія яких зменшується, дорівнює кількості теплоти, яку тіла отримали, внутрішня енергія яких збільшується.

3. Питома теплота згорання палива

При згоранні різних видів палива виділяється різна кількість теплоти. Кількість теплоти при згоранні палива залежить від виду палива і пропорційна масі палива:

$$Q = q \cdot m,$$

де q – питома теплота згорання.

Питома теплота згорання палива – це кількість теплоти, яка виділяється при повному згоранні 1 кг палива:

$$q = \frac{Q}{m}.$$

Одиницею вимірювання питомої теплоти згорання q в СІ є **Джоуль/кілограм (Дж/кг)**.

Завжди при згоранні палива в системі виділяється більше теплоти, ніж використовується в корисних цілях.

Відношення кількості корисної теплоти Q_K до кількості теплоти Q , яке виділилось при повному згоранні палива, називається коефіцієнтом корисної дії нагрівача:

$$\eta = \frac{Q_K}{Q} \cdot 100\%, \quad Q_K = cm_T \Delta T, \quad Q = m_{\text{п}} q$$

де η – коефіцієнт корисної дії; c – питома теплоємність тіла; m_T – маса тіла, яке нагрівають; ΔT – зміна температури тіла при нагріванні; q – питома теплота згорання палива; $m_{\text{п}}$ – маса палива.

Коефіцієнт корисної дії нагрівача вимірюють у відсотках.

4. Другий закон термодинаміки

Перший закон термодинаміки не накладає обмежень на напрям перетворення енергії з одного виду у інший і вимагає лише збереження повної енергії в ізольованих термодинамічних системах. Але досвід свідчить, що **самовільні (спонтанні) процеси** у термодинамічних системах протікають у певному напрямку, а перетворення внутрішньої енергії в інші види має певні обмеження: неможливо запас внутрішньої повністю перетворити у роботу без втрат.

Передача теплоти від гарячого тіла до холодного, перетворення механічної енергії у внутрішню, розширення газу у вакуумі – все це приклади **необоротних процесів**.

Процес називають **оборотним**, якщо можливе повернення системи в початковий стан без будь-яких змін у навколишньому середовищі.

Якщо після закінчення процесу в навколишніх тілах чи в даній системі залишились якісь зміни, процес є **необоротним**. Усі процеси в природі супроводжуються явищами теплопровідності та тертя і тому є необоротними. Положення про необоротність природних процесів становить одне із загальних формулювань другого закону термодинаміки.

Другий закон термодинаміки історично з'явився для пояснення принципу роботи теплової машини. Необхідно було встановити умови ефективного перетворення теплоти на роботу. Теоретичні дослідження роботи теплової машини уперше були проведені Саді Карно²⁰.

Для роботи теплової машини потрібні наступні складові:

- робоче тіло – ідеальний газ;
- нагрівач, який має температуру T_2 і у результаті теплообміну передає робочому тілу кількість теплоти Q_2 ;
- холодильник, який має температуру $T_1 < T_2$ і у результаті теплообміну відбирає у робочого тіла кількість теплоти Q_1 .

Теплові машини, до яких у термодинаміці відносять теплові двигуни і холодильні машини, для безперервної роботи повинні працювати по замкненому колу циклу, при якому робоче тіло теплової машини періодично повертається в початковий стан (рис.3.8).

У загальному випадку робота ідеального газу дорівнює:

$$A = \int_{V_1}^{V_2} P dV ,$$

²⁰ Саді Карно (1796-1832) – французький фізик і інженер, який сформулював перший і другий закони термодинаміки.

де V_1 , V_2 – початковий і кінцевий об’єм газу, P – тиск газу, який є функцією об’єму і температури з рівняння стану ідеального газу $P = \frac{m}{M} \frac{RT}{V}$.

На рис.3.8,а представлено замкнений цикл, робота в якому виконується тільки при ізобарному процесі $P = \text{const}$. Ізобара 1-2 відображає розширення ідеального газу і виконання роботи $A > 0$. Після чого система повертається у початковий стан. Робота, яку виконує ідеальний газ дорівнює площі чотирикутника 1-2-3-4:

$$A = P \cdot (V_2 - V_1).$$

З рівняння стану ідеального газу: $PV_1 = \frac{m}{M}RT_1$ і

$$PV_2 = \frac{m}{M}RT_2.$$

Тоді $A = P \cdot \left(\frac{m}{M}RT_2 - \frac{m}{M}RT_1 \right) = \frac{m}{M}R(T_2 - T_1)$. Як видно з останньої формули, робота газу залежить лише від різниці його кінцевої і початкової температур. Якщо $T_2 = T_1$, робота $A = 0$.

Одним з прикладів роботи теплової машини є цикл Карно (рис.3.8,б). Напрямок циклу вказаний стрілочками. Цикл складається з двох оборотних ізотермічних (1-2 і 3-4) і двох оборотних адіабатних (2-3 і 4-1) процесів. В такому напрямку циклу робота газу буде додатною, у зворотному напрямку від’ємною. Робота газу дорівнює площі фігури обмеженої ізотермами і адіабатами 1-2-3-4. Висновок про роботу такої теплової машини сформульований у вигляді теореми Карно.

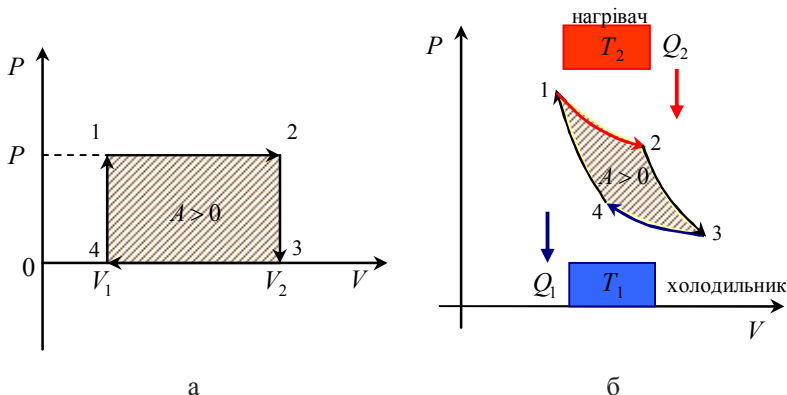


Рис.3.8

Теорема Карно. Коефіцієнт корисної дії оборотного циклу Карно є найбільшим серед всіх інших можливих циклів і не залежить від природи робочого тіла, а визначається тільки температурами нагрівача і холодильника:

$$\eta = 1 - \frac{Q_1}{Q_2} = 1 - \frac{T_1}{T_2}$$

З теореми Карно випливає, що ККД будь-якої теплової машини завжди менше одиниці. Якщо різниця температур нагрівача і холодильника дорівнює нулю, то теплота не може перетворюватися у роботу.

Перший закон термодинаміки є законом збереження при перетворенні енергії з одного виду і інший: теплоти у роботу.

Другий закон термодинаміки задає напрям термодинамічних процесів та визначає умови максимально ефективного перетворення теплоти у роботу.

Існує декілька еквівалентних формулювань другого закону термодинаміки.

Другий закон термодинаміки:

1. Клаузіус²¹ (1850 р.) **Самовільний процес передачі тепла від менш нагрітого тіла до більш нагрітого неможливий.** В ізольованій термодинамічній системі тепло передається від тіл з більшою температурою до тіл з меншою температурою.

2. Вільям Томсон (лорд Кельвін) (1851 р.) **Процес, єдиним результатом якого є перетворення теплоти на роботу неможливий.** Не можна побудувати машину, яка б виконувала роботу лише за рахунок одержання теплоти. Фактично, це заперечення можливості існування вічного двигуна «perpetuum mobile» другого роду.

Вічний двигун «perpetuum mobile» першого роду – це уявна система, що здійснює роботу необмежений час без доступу енергії із зовнішніх джерел. Можливість його існування заперечується законом збереження енергії.

Вічний двигун «perpetuum mobile» другого роду – це уявна система, яка перетворює всю отриману теплоту у роботу, що суперечить другому закону термодинаміки.

Задача 1. В калориметр масою 0,13 кг, який містить 0,3 кг води, при температурі 8,4°С опустили металеве тіло масою 0,2 кг, нагріте до 100°С. В калориметрі встановилася температура 21,5°С. Визначити питому теплоємність тіла, якщо питома теплоємність калориметра дорівнює $0,38 \cdot 10^3$ Дж/(кг·К).

Дано:

$$m_1 = 0,13 \text{ кг}$$

$$m_2 = 0,3 \text{ кг}$$

$$m_3 = 0,2 \text{ кг}$$

$$T_1 = T_2 = 273^\circ\text{C} + 8,4^\circ\text{C} = 281,4 \text{ К}$$

$$T_3 = 273^\circ\text{C} + 100^\circ\text{C} = 373 \text{ К}$$

$$\theta = 273^\circ\text{C} + 21,5^\circ\text{C} = 294,5 \text{ К}$$

Знайти: c_3 -?

Розв'язок

²¹ Рудольф Клаузіус (1822-1888) – німецький фізик, який сформулював другий закон термодинаміки та запровадив поняття ентропії.

1. В теплообміні приймають участь три тіла: калориметр, вода і метал. Метал віддає теплоту, а вода і калориметр отримують. В результаті теплообміну в ізольованій системі встановиться рівноважна температура θ .

2. Складемо рівняння теплового балансу: $Q_1 + Q_2 = Q_3$.

$$Q_1 = c_1 m_1 (\theta - T_1); \quad Q_2 = c_2 m_2 (\theta - T_1); \quad Q_3 = c_3 m_3 (T_3 - \theta);$$

$$c_3 m_3 (T_3 - \theta) = c_1 m_1 (\theta - T_1) + c_2 m_2 (\theta - T_1)$$

$$\text{Звідси } c_3 = \frac{(c_1 m_1 + c_2 m_2)(\theta - T_1)}{m_3 (T_3 - \theta)};$$

$$c_3 = \frac{(0,38 \cdot 10^3 \cdot 0,13 + 4,19 \cdot 10^3 \cdot 0,3) \cdot (294,5 - 281,4)}{0,2 \cdot (373 - 294,5)} \text{ Дж/(кг} \cdot \text{K)} \approx$$

$$\approx 9,2 \cdot 10^2 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{K)}.$$

Відповідь: $c_3 \approx 9,2 \cdot 10^2 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{K)}$

Задача 2. Скільки потрібно спалити вугілля з теплотворною властивістю $3,1 \cdot 10^7 \text{ Дж/кг}$, щоб 100 кг води при 303 К нагріти до 373 К, якщо ККД нагрівача 60 %.

Дано:

$$q = 1,3 \cdot 10^7 \text{ Дж/кг}$$

$$m_1 = 100 \text{ кг}$$

$$T_1 = 303 \text{ K}$$

$$T_2 = 373 \text{ K}$$

$$\eta = 60\%$$

Знайти: m - ?

Розв'язок

1. Знайдемо кількість корисної теплоти Q , яку необхідно для нагрівання води з 303 К до 373 К: $Q_K = c m_1 \Delta T$, де $c = 4200 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{K)}$.

2. Знайдемо кількість теплоти, яка виділяється при згоранні вугілля масою m : $Q = q m$.

3. Запишемо формулу для ККД нагрівача:

$$\eta = \frac{Q_K}{Q} \cdot 100\%, \quad \eta = \frac{cm_1 \Delta T}{qm} \cdot 100\% .$$

$$\text{Відповідно маса вугілля } m = \frac{cm_1 \Delta T}{\eta q} \cdot 100\% ;$$

$$m = \frac{4200 \cdot 100 \cdot 70 \cdot 100}{60 \cdot 3,1 \cdot 10^7} \text{ кг} \approx 1,5 \text{ кг}$$

Відповідь: $m \approx 1,5 \text{ кг}$.

СЛОВА І СЛОВОСПОЛУЧЕННЯ

адіабатний процес	adiabatic process	тепловий баланс	heat balance
другий закон термодинаміки	second law of thermodynamics	стан теплової рівноваги	state of thermal equilibrium
оборотний процес	reversible process	необоротний процес	irreversible process
еквівалентний	equivalent	згорання палива	fuel burning
питома теплота згорання	specific heat of combustion	самовільний процес	spontaneous processes
паливо	fuel	резервуар	reservoir
нагрівач	heater	холодильник	refrigerator
калориметр	calorimeter	двигун	engine
теорема Карно	Carnot theorem	циклічний процес	cyclical process

І. Дайте відповіді на запитання

1. Чому дорівнює внутрішня енергія термодинамічної системи?
2. На що витрачається кількість теплоти надана термодинамічній системі?
3. За рахунок чого ідеальний газ виконує роботу в адіабатичному процесі?
4. Що таке питома теплота згорання палива і в яких одиницях вона вимірюється?
5. Який процес називається самовільним, оборотним, необоротним?

6. Що називається тепловою машиною і які вона має складові?
7. Від чого залежить ККД ідеальної теплової машини?
8. Чому не можливе існування вічного двигуна першого роду?
9. Чому не можливе існування вічного двигуна другого роду?

II. Виконайте вправи

1. Сформулюйте перший закон термодинаміки.
2. Запишіть вираз для визначення зміни внутрішньої енергії термодинамічної системи.
3. Запишіть рівняння теплового балансу.
4. Виведіть формулу для обчислення роботи при ізобарному процесі.
5. Сформулюйте теорему Карно і запишіть чому дорівнює ККД циклу Карно.
6. Сформулюйте другий закон термодинаміки.
7. Якою стане температура води, якщо змішати 100 г окропу і 100 г води, температура якої 20°C ?
8. Змішали 10 кг води при 9°C , 20 кг води при 40°C і 6 кг води при 100°C . Визначити температуру суміші.
9. Визначити коефіцієнт корисної дії нагрівача, якщо при згоранні 0,2 кг бензину можна закип'ятити 1 л води, яка мала температуру 20°C .

Запам'ятайте!
1. Що складається з чого
Цикл Карно складається з двох оборотних ізотермічних і двох оборотних адіабатних процесів.
2. Що задає що
Другий закон термодинаміки задає напрям термодинамічних процесів.

§27. Фазові перетворення

1. Поняття фази

У термодинаміці розрізняють поняття агрегатного стану і фази. У §21 вводилося поняття агрегатного стану речовини на основі молекулярно-кінетичної теорії і енергії взаємодії між молекулами речовини.

Агрегатні стани – стани однієї і тієї ж речовини, переходи між якими супроводжуються різкою (стрибкоподібною) зміною її фізичних властивостей. Речовина може бути в чотирьох агрегатних станах: газоподібний, рідкий, твердий і плазма. В межах одного агрегатного стану речовина може знаходитися в декількох фазах, що відрізняються за своїми властивостями, складом і будовою.

Фаза – це стан термодинамічної рівноваги речовини, який має інші фізичні властивості відмінні від інших рівноважних станів тієї ж речовини. Нехай маємо речовину H_2O . Якщо у закритій посудині є вода, то така система складається з двох фаз: рідка фаза – вода і газоподібна фаза – суміш повітря з водяною парою. Якщо у воду додати лід, то така система матиме три фази: лід – це тверда фаза речовини H_2O .

Поняття «фаза» не еквівалентне поняттю агрегатного стану. Речовина, яка знаходиться в одному агрегатному стані може мати декілька фаз. Так відомо декілька різних фаз льоду – твердого стану H_2O , багато різних фаз твердого вуглецю C – вугілля, алмаз, графіт, графен, фулерен тощо, які відрізняються будовою кристалічної структури.

Перехід речовини з однієї фази в іншу називається **фазовим переходом** або **фазовим перетворенням**. Зміна фази завжди пов'язана зі змінами властивостей. Прикладом фазового переходу є зміна агрегатного стану речовини або зміна складу і будови речовини.

Існують фазові переходи I і II роду.

Фазовий перехід I роду. Прикладом фазового переходу I роду є зміна агрегатного стану речовини (рис.3.9). Зміна

кожного агрегатного стану на інший має свою назву. Перехід рідини у газоподібний стан називається **випаровуванням**, а зворотній процес називається **конденсацією**. Перехід твердого тіла у рідину називається **плавленням**, а зворотній процес називається **кристалізацією**.

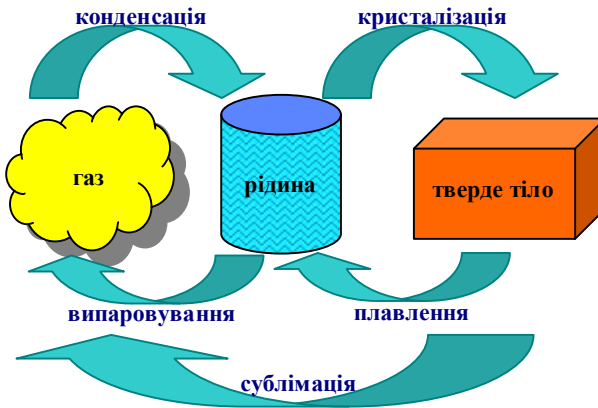


Рис.3.9

Процес плавлення супроводжується поглинанням теплоти, а при кристалізації теплота виділяється. Ця кількість теплоти називається **теплотою фазового переходу**. Фазові переходи I роду відбуваються при сталій температурі, об'єм речовини та порядок у розташуванні атомів (молекул) змінюються. Наприклад, при плавленні тілу треба передати кількість теплоти, яка буде достатньою для подолання потенціальної енергії зв'язку між атомами (молекулами) у твердому тілі. Тобто, теплота витрачається не на нагрівання системи і її температура в процесі плавлення залишається сталою.

Фазовий перехід II роду не пов'язаний з поглинанням або виділенням теплоти. Такі переходи відбуваються при стрибкоподібній зміні теплоємності системи при незмінному об'ємі. Прикладами фазових переходів II роду є: перехід металів, деяких сплавів і керамік при дуже низьких

температурах у надпровідний стан, при якому електричний опір провідника стрибком зменшується до нуля; перетворення звичайного рідкого гелію (гелію I) при $T = 2,9 \text{ K}$ у іншу рідку модифікацію (гелій II), що має властивість надтекучості.

2. Плавлення і кристалізація

Тепловий процес, під час якого тверде тіло переходить у рідкий стан, називається плавленням.

Температура, при якій відбувається плавлення (тиск є нормальним), називається **температурою (точкою) плавлення**.

Плавлення відбувається обов'язково з поглинанням теплоти, коли тіло досягає температури плавлення. Якщо припинити передачу тілу теплоти, то зупиниться і сам процес плавлення.

На рис.3.10 представлений схематичний графік зміни агрегатного стану речовини. При нагріванні твердого тіла його температура збільшується (лінія AB) до точки плавлення $T_{\text{пл}}$. Теплота плавлення $Q_{\text{пл}} = Q_2 - Q_1$ є теплотою фазового переходу. При подальшому нагріванні тіла його температура залишається сталою (лінія BC) доки все тіло не розплавиться (точка C). Після повного розплавлення температура знову збільшується (лінія CD). Між точками A і B є одна фаза – тверде тіло. У точці B розпочинається фазовий перехід I роду і з'являється нова фаза – рідина. Між точками B і C існує дві фази разом – тверде тіло і рідина. В точці C завершується фазовий перехід твердого тіла у рідину.

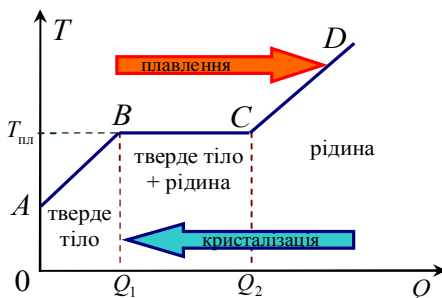


Рис.3.10

Процес переходу рідин у твердий стан називається кристалізацією.

Процес кристалізації обернений процес по відношенню до процесу плавлення. Щоб відбувалася кристалізація треба теплоту відводити від термодинамічної системи. Лінія DC – охолодження рідини, CB – кристалізація при сталій температурі $T_{кр}$. Температура кристалізації дорівнює температурі плавлення $T_{кр} = T_{пл}$. точка B – повна кристалізація тіла, BA – охолодження твердого тіла. Температура при нормальному тиску, при якій відбувається кристалізація, називається **температурою кристалізації**. Теплота плавлення дорівнює теплоті кристалізації:

$$Q_{пл} = Q_{кр}.$$

Теплові процеси плавлення і кристалізації відбуваються за сталої температури, оскільки під час цих процесів відбуваються зміни упорядкування атомів і молекул речовини у кристалічній структурі або, навпаки, їх руйнування.

Існує багато речовин, які не мають сталої температури плавлення і кристалізації. Такі речовини називаються **аморфними** (віск, смола, скло тощо).

Питома теплота плавлення – це кількість теплоти, яка необхідна для перетворення 1 кг речовини з твердого стану в рідкий при температурі плавлення :

$$\lambda = \frac{Q_{пл}}{m},$$

Питома теплота плавлення позначається літерою λ і вимірюється в **Джоулях на кілограм** (Дж/кг). Наприклад, питома теплота плавлення льоду становить 332 кДж/кг. Це означає, що для того щоб розтанув 1 кг льоду при 0°C , потрібно надати йому 332 кДж теплоти.

Щоб визначити кількість теплоти, необхідну для плавлення твердого тіла, треба питому теплоту плавлення речовини помножити на масу тіла:

$$Q_{пл} = \lambda m.$$

3. Випаровування і конденсація

Випаровування – це явище переходу рідин у газоподібний стан. Випаровування властиве не лише рідинам, а й твердим тілам.

Сублімація – це явище переходу твердого тіла у газоподібний стан.

Випаровування рідин відбувається з поглинанням енергії – теплоти випаровування $Q_{\text{вип}}$. Енергетичні витрати на випаровування рідин характеризує питома теплота пароутворення.

Фізична величина, що дорівнює відношенню кількості теплоти, необхідної для перетворення рідини масою 1 кг у пару при температурі пароутворення до маси, називається питомою теплотою пароутворення:

$$r = \frac{Q_{\text{вип}}}{m}.$$

Питома теплота пароутворення в СІ вимірюється у **Джоулях на кілограм** (Дж/кг). Наприклад, питома теплота пароутворення води дорівнює $r_{\text{H}_2\text{O}} = 2,3$ МДж/кг.

Щоб визначити кількість теплоти, необхідну для випаровування певної маси рідини, треба її питому теплоту пароутворення помножити на масу: $Q_{\text{вип}} = rm$.

Конденсація – це процес переходу речовини з газоподібного у рідкий стан. Конденсація супроводжується виділенням теплоти $Q_{\text{конд}}$, яка дорівнює теплоті випаровування: $Q_{\text{конд}} = Q_{\text{вип}}$. Питома теплота пароутворення дорівнює питомій теплоті конденсації.

Швидкість випаровування залежить від таких факторів:

- 1) типу рідини – різні рідини мають різні значення r ;
- 2) від температури – випаровування збільшується зі збільшенням температури;
- 3) від площі поверхні – чим більша площа поверхні, тим інтенсивніше йтиме процес випаровування;

4) від тиску повітря над поверхнею – чим більше тиск, тим вище ймовірність повернення у рідину молекул, що знаходяться над поверхнею.

4. Кипіння

Кипіння – це внутрішнє випаровування рідини, внаслідок якого всередині її об'єму утворюються бульбашки газу, який піднімається на поверхню.

Розглянемо процес кипіння на прикладі кипіння води (рис.3.11). Вода всередині має мікроскопічні бульбашки повітря. При нагріванні випаровування здійснюється всередину цих бульбашок. Зі збільшенням тиску в бульбашці, збільшується її об'єм. Процес кипіння відбувається тоді, коли тиск пару в середині бульбашки перевищує зовнішній тиск. Бульбашка піднімається на поверхню і розривається. Рух бульбашок в рідині створює **перемішування** або **конвекцію** потоків рідини, які мають різну температуру у результаті нагрівання.

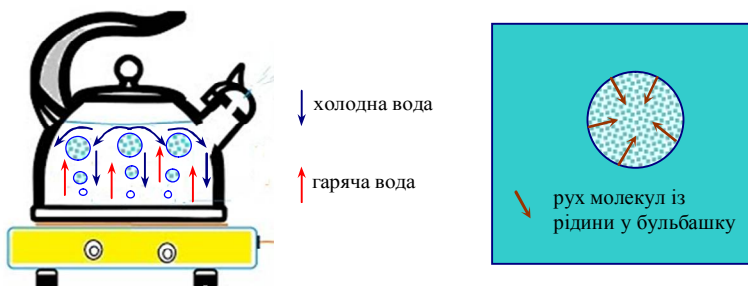


Рис.3.11

Температура, при якій рідина кипить, називається **температурою кипіння** або **точкою кипіння** T_K (рис.3.12). Кожна речовина має свою температуру кипіння. Температура кипіння рідин залежить від зовнішнього тиску, оскільки бульбашкам пари потрібно подолати дію зовнішнього тиску. Збільшуючи зовнішній тиск, можна підвищувати температуру кипіння рідини. При зменшенні зовнішнього тиску температура кипіння знижується. Так, наприклад, в нормальних умовах вода

кипить при 100°C , а в горах, де тиск менший, вона може кипіти і при $81,5^{\circ}\text{C}$.

Під час кипіння температура рідини залишається сталою, доки вся рідина не перетвориться на газ.

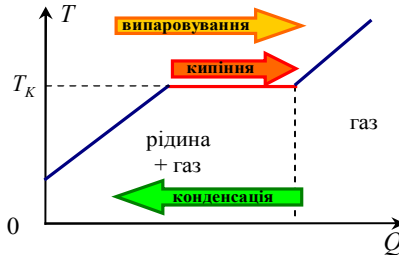


Рис.3.12

Задача 1. Кусок льоду масою m при температурі 0°C поміщають в калориметр масою m_1 , в якому знаходиться вода масою m_2 . Нехай c_1 – питома теплоємність калориметра, c_2 – питома теплоємність води, T_1 – початкова температура води і калориметра, θ – кінцева температура суміші. Визначити питому теплоту плавлення льоду λ .

Дано:

m – маса льоду

m_1 – маса калориметра

m_2 – маса води

$T_{\text{пл}} = 273\text{K}$ – температура плавлення льоду

T_1 – початкова температура води і калориметра

θ – кінцева температура суміші

c_1 – питома теплоємність калориметра

c_2 – питома теплоємність води

Знайти: λ – ?

Розв'язок.

Вода і калориметр відають теплоту на плавлення льоду і нагрівання утвореної з льоду води до температури теплового балансу θ .

1. Кількість необхідної теплоти для плавлення льоду дорівнює:

$$Q_1 = \lambda m.$$

2. Кількість теплоти для нагрівання води масою m , яка утворилася в результаті плавлення льоду, від $T_{\text{пл}} = 273 \text{ K}$ до θ дорівнює:

$$Q_2 = c_2 m (\theta - 273 \text{ K}).$$

3. Кількість теплоти, яку віддали калориметр Q_3 і вода Q_4 на плавлення льоду і нагрівання утвореної води від 273 K до кінцевої температури θ дорівнює:

$$Q_3 = c_1 m_1 (T_1 - \theta);$$

$$Q_4 = c_2 m_2 (T_1 - \theta).$$

4. Складемо рівняння теплового балансу:

$$Q_1 + Q_2 = Q_3 + Q_4;$$

$$\lambda m + c_2 m (\theta - 273 \text{ K}) = c_1 m_1 (T_1 - \theta) + c_2 m_2 (T_1 - \theta);$$

$$\lambda = \frac{(c_1 m_1 + c_2 m_2)(T_1 - \theta) - c_2 m (\theta - 273 \text{ K})}{m}.$$

$$\text{Відповідь: } \lambda = \frac{(c_1 m_1 + c_2 m_2)(T_1 - \theta) - c_2 m (\theta - 273 \text{ K})}{m}.$$

Задача 2. Скільки вугілля потрібно для перетворення в пар 1 т води при 10° C , якщо температура кипіння води при $P = 8 \cdot 10^5 \text{ Па}$ дорівнює 170° C , а ККД нагрівача 70% ?

Дано:

$$m_1 = 1000 \text{ кг}$$

$$c_1 = 4,2 \cdot 10^3 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{K})$$

$$T_1 = 10^\circ \text{ C} = 283 \text{ K}$$

$$T_{\text{к}} = 170^\circ \text{ C} = 443 \text{ K}$$

$$m_2 = 1000 \text{ кг}$$

$$r = 2,3 \cdot 10^6 \text{ Дж/кг}$$

$$q = 2,93 \cdot 10^7 \text{ Дж/кг}$$

$$\eta = 70\%$$

Знайти: m – ?

Розв'язок.

1. Використана кількість теплоти, яка отримана від згорання вугілля дорівнює $Q_3 = qm$.

2. Корисна кількість теплоти, яка йде на нагрівання води до температури кипіння і випаровування $Q_K = Q_3 \eta = qm\eta$.

3. Теплота, яка передається воді при нагріванні до точки кипіння, дорівнює: $Q_1 = c_1 m_1 (T_K - T_1)$.

4. Теплота, яка витрачається на випаровування дорівнює $Q_2 = rm_2$.

5. Запишемо рівняння теплового балансу:

$$Q_K = Q_1 + Q_2 ;$$

$$qm\eta = c_1 m_1 (T_K - T_1) + rm_2 .$$

З останнього рівняння знайдемо масу вугілля:

$$m = \frac{c_1 m_1 (T_K - T_1) + rm_2}{q\eta} \approx 130 \text{ кг} .$$

Відповідь: $m \approx 130 \text{ кг}$.

СЛОВА І СЛОВОСПОЛУЧЕННЯ

фаза	phase	точка плавлення	melting-point
фазове перетворення	phase transformation	теплота плавлення	heat of melting
питома теплота плавлення	specific heat of melting	теплотою фазового переходу	heat of phase transformation
плавлення	melting	кристалізація	crystallization
аморфні речовини	amorphous substance	температура суміші	temperature of mixture

пароутворення	vaporization	питома теплота пароутворення	specific heat of vaporization
випаровування	evaporation	кипіння	boiling
сублімація	sublimation	бульбашка	bubble
конденсація	condensation	перемішування	interfusion
точка кипіння	boiling point	конвекція	convection

I. Дайте відповіді на запитання

1. Що називається фазою?
2. Зміна агрегатного стану – це фазовий перехід якого роду?
3. В чому полягає відмінність фази від агрегатного стану?
4. Який процес називається плавленням?
5. Який фізичний зміст питомої теплоти плавлення?
6. В яких одиницях вимірюється питома теплота плавлення?
7. Як називається термодинамічний процес, протилежний до плавлення?
8. Чи відмінна температура плавлення від температури кристалізації певної речовини?
9. Які процеси називаються випаровуванням і конденсацією?
10. Який фізичний зміст питомої теплоти пароутворення?
11. Від чого залежить швидкість випаровування?
12. Що таке кипіння?
13. Як температура кипіння залежить від зовнішнього тиску?

II. Виконайте вправи

1. Назвіть агрегатні стани речовини H_2O .
2. Наведіть приклади фазових перетворень I роду.
3. Наведіть приклади фазових перетворень II роду.
4. Скільки теплової енергії виділиться з утворенням 5 кг льоду, якщо питома теплота плавлення льоду дорівнює 332 кДж/кг.
5. З якою швидкістю свинцева куля повинна вдаритись об перешкоду, щоб розплавитись, якщо до удару температура кулі була $100^\circ C$? При ударі в теплоту перетворюється 60 % енергії кулі. Питома теплота плавлення свинцю 25 кДж/кг.

6. Яку кількість теплоти треба надати 50 г води, температура якої 0°C , щоб довести її до кипіння і перетворити половину її маси у водяну пару?

7. Яку кількість теплоти необхідно витратити на перетворення 6 кг льоду при -20°C у пар з температурою 100°C ?

Розділ 4. ЕЛЕКТРИКА²² І МАГНЕТИЗМ. ОПТИКА

§ 28. Електричний заряд. Закон Кулона

1. Електричні заряди

У природі існує ще один вид взаємодії між фізичними тілами окрім гравітаційної взаємодії. Ця взаємодія називається **електромагнітною** і відбувається між тілами, які мають електричний заряд.

Електричним зарядом називають фізичну величину, яка характеризує властивість тіла або частинки вступати в електромагнітну взаємодію.

Електрика вивчає явища природи, які обумовлені існуванням, рухом і взаємодією електричних зарядів. Розділ фізики, який вивчає електромагнітну взаємодію, називається **електродинамікою**. Електродинаміка охоплює електрику, магнетизм та вивчає властивості електромагнітних хвиль. Розділ електродинаміки, що вивчає тільки нерухомі електричні заряди, називається **електростатикою**.

У природі існують два види електричних зарядів. Один вид називають **позитивним**, а інший вид називають **негативним**. Електричні заряди взаємодіють з силами відштовхування і притягання. Заряди одного знаку відштовхуються, а заряди різних знаків притягуються.

Електричний заряд позначається буквою q . Носіями електричних зарядів є деякі елементарні частинки. Наприклад, атом гідрогену H складається із одного протону (ядро) та одного електрону, який обертається навколо ядра. Протон і електрон – це елементарні частинки. Протон має позитивний заряд, а електрон має негативний заряд. Але атом гідрогену електрично нейтральний, тобто його сумарний електричний заряд дорівнює нулю. Електричний заряд протона та електрона називається **елементарним зарядом**.

²² Слово «електрика» походить від грецького слова «електрон» – у перекладі означає бурштин (*англ.* amber) – затверділа смола сосни, яка має властивість притягувати дрібні предмети після натирання її тканиною.

Електричний заряд електрона та протона за абсолютним значенням дорівнює

$$|e| = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл.}$$

Одиниця електричного заряду в СІ – **Кулон**²³ (Кл).

Закон збереження електричного заряду: у ізольованій системі при будь-яких взаємодіях тіл алгебраїчна сума n електричних зарядів всіх тіл залишається сталою:

$$\sum_{i=1}^n q_i = \text{const}$$

Тіла, в яких електричні заряди можуть вільно рухатись, називають **провідниками**.

До провідників відносяться всі метали, графіт, розчини солей, кислот.

Діелектрики або ізолятори – це тіла, в яких електричні заряди не можуть вільно рухатись. До діелектриків належать пластмаса, скло, ебоніт, шовк, дерево.

Напівпровідники – це тіла, що мають властивості провідників або діелектриків в залежності від умов.

До них відносяться германій, кремній, багато сплавів та хімічних сполук.

2. Закон Кулона

Електричне поле – це фізичне поле, що існує навколо електричних зарядів. Поле нерухомих зарядів називають **електростатичним полем**.

Розглянемо модель точкового заряду. **Точковим зарядом** називають заряджені тіла, розміри яких малі в порівнянні з відстанню між ними.

Закон Кулона: сили взаємодії \vec{F}_{12} , \vec{F}_{21} двох нерухомих точкових зарядів q_1 і q_2 , розташованих на відстані r в рідині чи газі, пропорційні добутку цих зарядів, обернено пропорційні квадрату відстані між ними і спрямовані вздовж прямої, що з'єднує ці заряди (рис.4.1):

²³ Шарль Кулон (1736-1806) – французький фізик, військовий інженер, встановив основний закон електростатики, який назвали його ім'ям.

$$F_{12} = F_{21} = \frac{1}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \cdot \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2},$$

де $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Кл}^2/(\text{Н} \cdot \text{м}^2)$ – електрична стала;

ϵ – діелектрична проникність речовини.

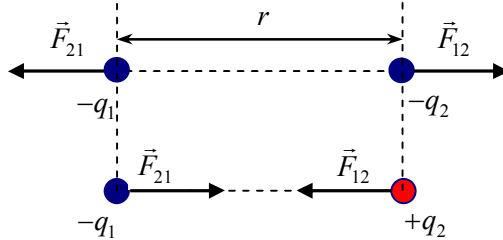


Рис.4.1

Діелектрична проникність – це характеристика речовини, яка показує у скільки разів сила взаємодії зарядів в даному середовищі менше ніж у вакуумі. Вона є безрозмірною величиною і завжди $\epsilon > 1$. У вакуумі $\epsilon = 1$.

Якщо електричний заряд має тіло (формою і розмірами якого не можна знехтувати), то важливою характеристикою є поверхнева густина електричного заряду.

Поверхнева густина електричного заряду рівномірно зарядженого провідника дорівнює відношенню величини заряду

до площі провідника: $\sigma = \frac{q}{S}$.

Задача. Дві металеві кульки діаметром $d = 5$ см знаходяться у трансформаторній оливі ($\epsilon = 2,2$). Відстань між центрами кульок $r = 0,5$ м. Визначити поверхневу густину зарядів на куляках, якщо вони взаємодіють із силою $F = 2,2 \cdot 10^{-3} \text{ Н}$.

Дано:

$$d = 5 \text{ см} = 0,05 \text{ м}$$

$$r = 0,5 \text{ м}$$

$$F = 2,2 \cdot 10^{-3} \text{ Н}$$

$$\epsilon = 2,2$$

Знайти σ – ?

Розв'язок. Поверхнева густина заряду на кулі $\sigma = \frac{q}{S}$,

де $S = 4\pi R^2 = \pi d^2$ – площа поверхні кулі радіусом $R = \frac{d}{2}$.

Величину заряду визначимо за законом Кулона:

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon} \cdot \frac{q^2}{r^2} \Rightarrow q = \sqrt{4\pi\epsilon_0\epsilon F} \cdot r.$$

Підставивши значення q та S у формулу для поверхневої густини заряду, знайдемо величину

$$\sigma = \frac{\sqrt{4\pi\epsilon_0\epsilon F} \cdot r}{\pi d^2} \approx 4,7 \cdot 10^{-5} \text{ Кл/м}^2.$$

Відповідь: $\sigma \approx 4,7 \cdot 10^{-5} \text{ Кл/м}^2$.

СЛОВА І СЛОВОСПОЛУЧЕННЯ

позитивний заряд	positive charge	електрична стала	electric constant
негативний заряд	negative charge	діелектрична проникність	permittivity
електричне поле	electric field	ізолятор	insulator
елементарний заряд	elementary charge	провідник	conductor
закон Кулона	Coulomb's law	напівпровідник	semiconductor
поверхнева густина заряду	surface density of charge	діелектрик	dielectric

І. Дайте відповіді на запитання

1. Який вид взаємодії існує між зарядженими тілами?
2. Які види зарядів існують у природі?
3. Що таке елементарний заряд?
4. Які заряди називають точковими?
5. У яких одиницях вимірюють електричний заряд?
6. Чому дорівнює сила взаємодії між зарядами?
7. Яка фізична природа відносної діелектричної проникності діелектрика?

8. У чому полягає відмінність між провідником, діелектриком і напівпровідником?

9. Як знайти поверхневу густину заряду тіла?

II. Виконайте справи

1. Запишіть і сформулюйте закон збереження заряду.

2. Запишіть і сформулюйте закон Кулона.

3. Два однакових позитивних заряди знаходяться на відстані 3 см один від одного і відштовхуються у воді із силою $F = 1,6 \cdot 10^{-4}$ Н. Визначити величину кожного заряду ($\epsilon_{H_2O} = 81$).

4. Однакові маленькі металеві кульки, що несуть однойменні заряди 15 нКл і 60 нКл, знаходяться на відстані 2 м одна від одної. Кульки доторкнулись одна до одної, а потім розвели на деяку відстань (заряди додалися та поділилися порівну). На яку відстань їх потрібно розвести, щоб сила взаємодії не змінилася?

5. Дві кулі мають маси по 10 г. Які однакові заряди необхідно надати цим кулям, щоб кулонівське відштовхування зрівноважило гравітаційне притягання? Відстань між кулями велика в порівнянні з їхніми радіусами.

6. Дві однакові кульки, кожна масою m , підвішені в одній точці на нитках довжиною l . Кульки мають однакові заряди. Кут між нитками 2α . Визначити заряди кульок.

Запам'ятайте!

1. Що охоплює що

Електродинаміка охоплює електрику, магнетизм та вивчає властивості електромагнітних хвиль.

2. Що має що

Протон має позитивний заряд, а електрон має негативний заряд.

§ 29. Основні характеристики електричного поля

1. Напруженість електричного поля

Кожен електричний заряд створює електричне поле, яке діє тільки на електричні заряди. Сили, з якими електричне поле діє на заряджені тіла, називаються **електричними силами**. Електричне поле, яке створює заряд, розповсюджується від цього заряду до нескінченності.

Електричне поле вивчають за допомогою пробного заряду – одиничного позитивного точкового заряду $q_0 = +1$.

Силовою характеристикою електричного поля є **напруженість** \vec{E} .

Напруженість електричного поля \vec{E} в даній точці – це векторна фізична величина, що дорівнює відношенню електричної сили \vec{F} , з якою поле діє на пробний заряд q_0 , розміщений у даній точці поля:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0}.$$

Напрямок вектора напруженості \vec{E} збігається з напрямком сили \vec{F} . Одиниця вимірювання напруженості \vec{E} в СІ **Ньютон на Кулон**: [Н/Кл].

Якщо підставити у рівняння $\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0}$ вираз сили з закону

Кулона, то можна отримати формулу для визначення напруженості навколо точкового заряду:

$$F_{12} = F_{21} = \frac{1}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \cdot \frac{q \cdot q_0}{r^2}$$
$$E = \frac{F}{q_0} = \frac{1}{q_0} \cdot \frac{1}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \cdot \frac{q \cdot q_0}{r^2} = \frac{1}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \cdot \frac{q}{r^2},$$

де q – точковий заряд, який створює поле; r – відстань від заряду до точки, де визначають напруженість.

За напрямком вектора \vec{E} приймається напрямок сили \vec{F} , яка діє на точковий позитивний заряд q_0 , розміщений у даній точці

поля. Знайдемо напруженість в точці A , яка є сумою напруженостей зарядів $-q_1$ та $+q_2$, а саме $\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$ (рис.4.2).

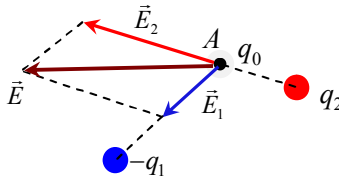


Рис.4.2

Для електричних полів справедливий **принцип суперпозиції**: якщо електричне поле утворено декількома зарядами, то його напруженість в даній точці поля дорівнює векторній сумі напруженостей \vec{E}_i , які створені в цій точці кожним зарядом окремо:

$$\vec{E} = \sum_{i=1}^n \vec{E}_i,$$

де n – кількість електричних зарядів.

2. Лінії напруженості електричного поля

Електричні поля графічно зображують за допомогою силових ліній.

Силовою лінією електричного поля називається уявна лінія, дотична до якої в кожній точці збігається з вектором напруженості \vec{E} (рис.4.3).

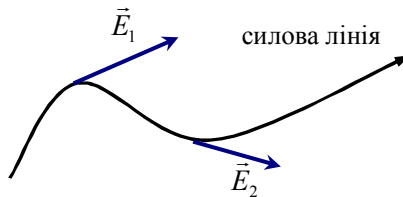


Рис.4.3

Лінії напруженості електричного поля починаються на позитивних зарядах і закінчуються на негативних електричних зарядах. Якщо позитивні і негативні заряди знаходяться на

великій відстані один від одного, тоді лінії поля прямують у нескінченність (рис.4.4).

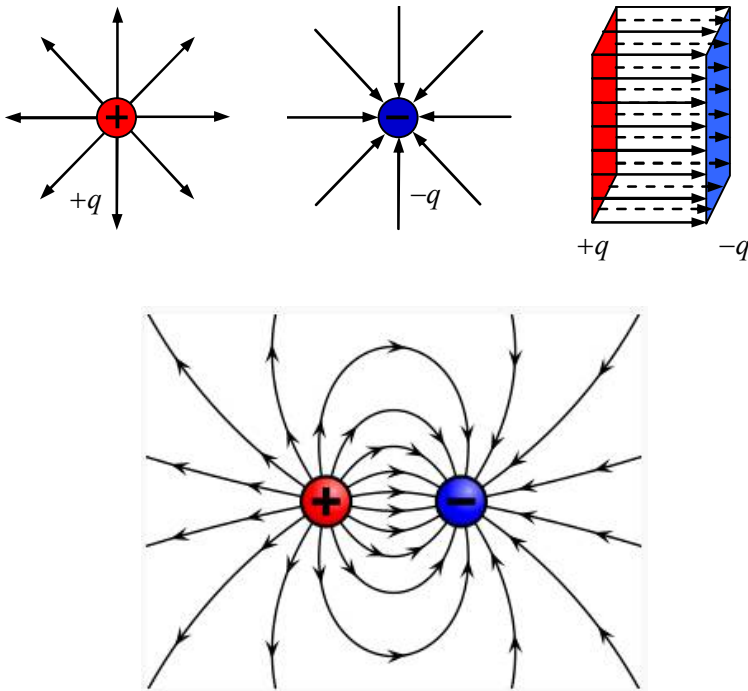


Рис.4.4

3. Потенціал. Різниця потенціалів

Розглянемо нерухомий позитивний заряд Q , який створює електричне поле. Під дією електричного поля рухомий пробний заряд q_0 буде віддалятися від заряду Q до нескінченності. Вважається, що на нескінченній відстані від заряду відсутні інші заряди і напруженість електричного поля дорівнює нулю. На практиці поверхню Землі беруть за початок відліку, тобто за точку, у якій відсутня напруженість інших зарядів.

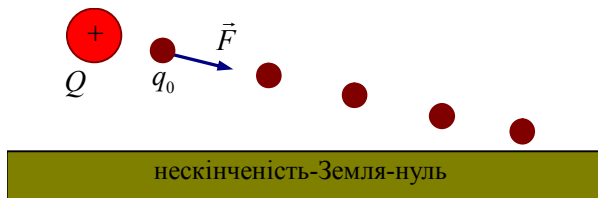


Рис.4.5

При переміщенні пробного заряду q_0 до поверхні Землі електричне поле заряду Q виконує роботу.

Потенціал електричного поля – це скалярна фізична величина, яка дорівнює відношенню роботи, яку здійснюють електричні сили при переміщенні позитивного точкового заряду q_0 із даної точки поля на нескінченність, до величини цього заряду:

$$\varphi = \frac{A}{q_0},$$

де φ – потенціал; A – робота електричних сил.

Одиниця вимірювання потенціалу в СІ – **Вольт**²⁴ (В).

$$1 \text{ В} = \frac{1 \text{ Дж}}{1 \text{ Кл}}.$$

Потенціал поля на відстані r від точкового заряду обчислюється з виразу $\varphi = \frac{q}{4\pi\epsilon_0\epsilon r}$.

Нехай потенціал поля в точці A дорівнює φ_1 , а потенціал у точці B дорівнює φ_2 . Можна знайти різницю потенціалів $\varphi_1 - \varphi_2$ двох точок поля:

²⁴ Алессандро Вольта (1745-1827) – італійський фізик, який у 1800 році створив першу електричну батарею. На його честь названо одиницю вимірювання потенціалу і напруги.

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{A_1}{q_0} - \frac{A_2}{q_0} = \frac{A_1 - A_2}{q_0}$$

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{A_{12}}{q_0}$$

Різницю потенціалів називають **напругою** і позначають буквою U :

$$\varphi_1 - \varphi_2 = U \text{ — напруга.}$$

Якщо $q_0 = +1$, то $\varphi_1 - \varphi_2 = A_{12}$.

Різниця потенціалів двох точок електричного поля дорівнює роботі електричних сил при переміщенні одиничного позитивного заряду з однієї точки поля в іншу.

Одиниця вимірювання напруги в СІ – Вольт (В). $1 \text{ В} = \frac{1 \text{ Дж}}{1 \text{ Кл}}$.

4. Потенціальна енергія електростатичного поля.

Нехай заряд q під дією електричного поля переміщується з точки з потенціалом φ_1 у точку з потенціалом φ_2 , причому $\varphi_1 > \varphi_2$. Робота з переміщення заряду q в електричному полі дорівнює $A = q(\varphi_1 - \varphi_2)$. За законом збереження і перетворення енергії для стаціонарного випадку величина цієї роботи не залежить від форми і довжини траєкторії і є сталою величиною.

Робота електростатичних сил дорівнює добутку заряду на різницю потенціалів в початковій і кінцевій точках шляху.

Наслідок: робота електростатичних сил при переміщенні заряду по замкненій траєкторії дорівнює нулю.

Позначимо потенціальну енергію позитивного заряду q_0 в електричному полі буквою W_{Π} , щоб відрізнити від позначення напруженості поля E . Тоді зміна потенціальної енергії при зміні положення заряду дорівнює роботі електростатичних сил:

$$A = \Delta W_{\Pi} = W_{\Pi 2} - W_{\Pi 1} = q_0(\varphi_1 - \varphi_2) = -q_0(\varphi_2 - \varphi_1);$$

$$W_{\Pi 2} - W_{\Pi 1} = -(q_0\varphi_2 - q_0\varphi_1) = -q_0\Delta\varphi.$$

З останнього виразу видно, що величина $q_0\varphi$ має розмірність енергії-роботи Джоуль. Знак мінус означає, що потенціальна

енергія q_0 зменшується зі зменшення потенціалу $\varphi_2 < \varphi_1$.

Потенціальна енергія заряду q_0 у точці поля створеного іншим точковим зарядом q дорівнює добутку величини цього заряду на потенціал у даній точці поля:

$$W_{\Pi} = q_0 \varphi = q_0 \cdot \frac{q}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r}.$$

Потенціал є **енергетичною характеристикою** електричного поля.

Розглянемо однорідне поле з напруженістю E між рівномірно зарядженими пластинами на відстані d одна від одної.

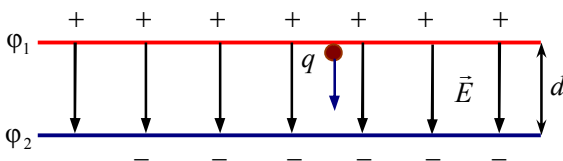


Рис.4.6

Нехай позитивний заряд q переміщується з однієї пластини на іншу. Робота електричного поля по переміщенню заряду дорівнює $A = q(\varphi_1 - \varphi_2)$. З іншого боку ця робота дорівнює $A = F \cdot d = E \cdot q \cdot d$.

Прирівняємо ці рівності і отримуємо $q(\varphi_1 - \varphi_2) = E \cdot q \cdot d$.

$$\text{Звідси: } E = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{d} \text{ або } E = -\frac{\varphi_2 - \varphi_1}{d} = -\frac{\Delta\varphi}{d}.$$

Напруженість однорідного електричного поля дорівнює зміні потенціалу на одиницю довжини силової лінії. Знак мінус показує, що вектор напруженості поля завжди спрямований у бік зменшення потенціалу.

За принципом суперпозиції, електричне поле утворене декількома зарядами має потенціал в даній точці поля, який дорівнює алгебраїчній сумі потенціалів φ_i кожного заряду:

$$\varphi = \sum_{i=1}^n \varphi_i,$$

де n – кількість електричних зарядів.

Потенціал електричного поля зображають у вигляді ліній. Лінії однакового потенціалу називаються **еквіпотенціальними лініями** або **еквіпотенціальними поверхнями** у тривимірному просторі. Еквіпотенціальні поверхні перпендикулярні до силових **ліній** поля (рис.4.7).

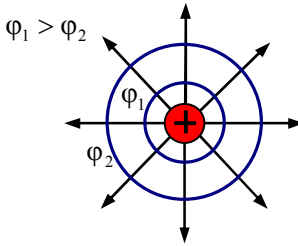


Рис.4.7

Задача 1. Два точкових заряди $q_1 = 0,67 \cdot 10^{-8}$ Кл і $q_2 = 1,33 \cdot 10^{-8}$ Кл знаходяться на відстані 40 см один від одного у вакуумі. Яку роботу потрібно виконати, щоб наблизити заряди до відстані 25 см між ними?

Дано:

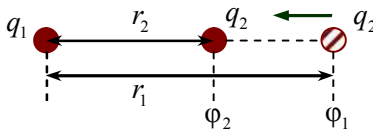
$$q_1 = 0,67 \cdot 10^{-8} \text{ Кл}$$

$$q_2 = 1,33 \cdot 10^{-8} \text{ Кл}$$

$$r_1 = 0,4 \text{ м}$$

$$r_2 = 0,25 \text{ м}$$

Знайти: $A = ?$



Розв'язок. Нехай заряд q_1 утворює поле, а заряд q_2 рухається в цьому полі з точки r_1 в точку r_2 .

Робота з переміщення заряду q_2 дорівнює $A = q_2(\varphi_2 - \varphi_1)$, де φ_1 і φ_2 – потенціали початкової і кінцевої точок поля. Знайдемо потенціали цих точок:

$$\varphi_1 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q_1}{r_1}; \quad \varphi_2 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q_1}{r_2}.$$

Підставимо значення φ_1 і φ_2 у вираз для роботи:

$$A = q_2 (\varphi_2 - \varphi_1) = q_2 \left(\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q_1}{r_2} - \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q_1}{r_1} \right) = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_1} \right)$$

$$A = \frac{0,67 \cdot 10^{-8} \text{ Кл} \cdot 1,33 \cdot 10^{-8} \text{ Кл}}{4 \cdot 3,14 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Кл}^2}{\text{Н} \cdot \text{м}^2}} \left(\frac{1}{0,25 \text{ м}} - \frac{1}{0,4 \text{ м}} \right)$$

$$\text{Відповідь: } A = 1,2 \cdot 10^{-5} \text{ Дж}.$$

Задача 2. Яку різницю потенціалів має пройти електрон, щоб його швидкість збільшилася від значення $V_1 = 1,0 \cdot 10^7$ м/с до $V_2 = 3,0 \cdot 10^7$ м/с. Маса електрона дорівнює $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$ кг.

Дано:

$$V_1 = 1,0 \cdot 10^7 \text{ м/с}$$

$$V_2 = 3,0 \cdot 10^7 \text{ м/с}$$

$$m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$$

$$e = -1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$$

Знайти: $\varphi_1 - \varphi_2 = ?$

Розв'язок. За законом збереження енергії робота дорівнює зміні енергії системи: $\Delta E = -A$.

Зміна кінетичної енергії електрона при проходженні різниці потенціалів дорівнює:

$$\Delta E_K = E_{K2} - E_{K1} = \frac{mV_2^2}{2} - \frac{mV_1^2}{2}.$$

В загальному випадку зміна потенціальної енергії при зміні положення заряду в електричному полі:

$$\Delta E_{\Pi} = E_{\Pi2} - E_{\Pi1} = e \cdot \varphi_2 - e \cdot \varphi_1 = e \cdot (\varphi_2 - \varphi_1).$$

За законом збереження енергії:

$$\Delta E_K + \Delta E_{\Pi} = \frac{mV_2^2}{2} - \frac{mV_1^2}{2} + e \cdot (\varphi_2 - \varphi_1) = 0.$$

$$\text{Звідси } \frac{mV_2^2}{2} - \frac{mV_1^2}{2} = e \cdot (\varphi_1 - \varphi_2)$$

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{m}{2e} \cdot (V_2^2 - V_1^2) =$$

$$= \frac{9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}}{2 \cdot (-1,6 \cdot 10^{-19}) \text{ Кл}} \cdot \left(9,0 \cdot 10^{14} \frac{\text{м}^2}{\text{с}^2} - 1,0 \cdot 10^{14} \frac{\text{м}^2}{\text{с}^2} \right) \approx -2275 \text{ В}$$

Відповідь: $\varphi_1 - \varphi_2 \approx -2275 \text{ В}$.

СЛОВА І СЛОВОСПОЛУЧЕННЯ

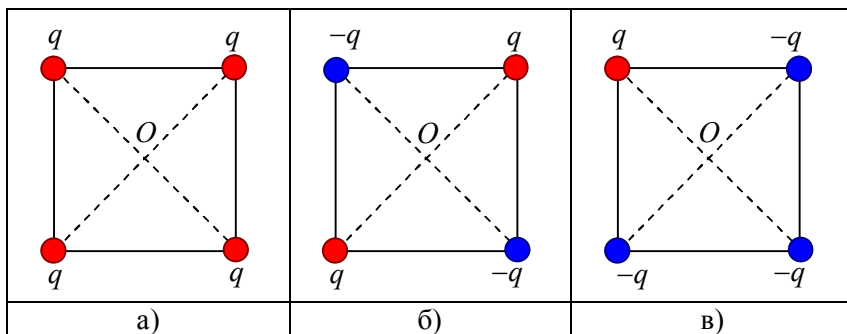
напруженість	electrical intensity	силова лінія	power line
принцип суперпозиції	superposition principle	Вольт	Volt
потенціал	potential	напруга	voltage
різниця потенціалів	potential difference	точковий заряд	point charge

I. Дайте відповіді на запитання

1. Як називається силова характеристика електричного поля?
2. Що таке силова лінія? На яких зарядах починається силова лінія?
3. Якою характеристикою поля є потенціал?
4. Як називається різниця потенціалів?
5. У яких одиницях вимірюють потенціал і напругу?
6. Чому дорівнює робота електричних сил?
7. Чи залежить величина роботи електричних сил від траєкторії руху заряду?
8. Чому потенціальна енергія електричного поля зменшується при збільшенні відстані від заряду, який створює це поле?

II. Виконайте вправи

1. У вершинах квадрату зі стороною a знаходяться електричні заряди q і $-q$. Знайдіть величину напруженості і потенціалу у точці O .



2. При переміщенні заряду в електричному полі здійснена робота 4 Дж. Визначити величину заряду, якщо його переміщення відбувалося при напрузі 100 В.

3. В однорідному електричному полі різниця потенціалів між точками, які знаходяться на одній силовій лінії і відстані 9 см, дорівнює 360 В. Знайти напруженість поля.

4. Кулька масою 10^{-3} кг має заряд 10^{-8} Кл і переміщується з точки А, потенціал якої дорівнює 600 В, в точку В з нульовим потенціалом. Визначити швидкість кульки в точці А, якщо швидкість в точці В дорівнює 0,2 м/с.

5. Ртутна кулька, потенціал якої 1200 В, розбивається на 1000 однакових краплин. Знайти потенціал кожної краплини.

6. Вісім водяних краплин радіусом 10^{-3} м і зарядом 10^{-10} Кл кожна зливаються в одну загальну краплину. Знайти її потенціал.

Запам'ятайте!
1. Що діє на що Електричне поле діє на заряд.
2. Що вивчають за допомогою чого Електричне поле вивчають за допомогою пробного заряду.

§ 30. Електроємність. Енергія електричного поля

1. Електроємність

Провідник, який знаходиться далеко від інших зарядів, називається **відокремленим**. Якщо збільшити заряд на відокремленому провіднику на Δq , його потенціал прямо пропорційно збільшиться на $\Delta \varphi$. Коефіцієнт пропорційності позначають C : $\Delta q = C \Delta \varphi$.

Електроємність провідника – це фізична величина, яка дорівнює відношенню величини заряду q відокремленого провідника до його потенціалу φ : $C = \frac{q}{\varphi}$.

Одиниця вимірювання електроємності в СІ – Фарад²⁵ [Ф]:

$$1 \text{ Ф} = \frac{1 \text{ Кл}}{1 \text{ В}}.$$

Знайдемо електроємність провідника, який має форму кулі радіусу R і заряд q . Потенціал поверхні кулі дорівнює:

$$\varphi = \frac{q}{4\pi\epsilon_0\epsilon R},$$

а електроємність $C = \frac{q}{\varphi} = q \cdot \frac{4\pi\epsilon_0\epsilon R}{q} = 4\pi\epsilon_0\epsilon R$.

Електроємність відокремленої кулі прямо пропорційна її радіусу і залежить від середовища, в якій вона знаходиться. Обчислимо електроємність планети Земля, яка має форму подібну до кулі. Радіус Землі приблизно дорівнює $R = 6400$ км. Звідси, електроємність Землі дорівнює:

$$C_3 = 4\pi\epsilon_0\epsilon R_3 \approx 3,14 \cdot 1 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м} \cdot 6,4 \cdot 10^6 \text{ м} \approx 7,0 \cdot 10^{-5} \text{ Ф}.$$

Якщо куля має електроємність 1 Ф, то радіус такої кулі має становити $R \approx 9,0 \cdot 10^6$ км, що більше радіусу Землі у 1400 разів.

²⁵ Майкл Фарадей (1791-1867) – англійський фізик, хімік, основоположник вчення про електромагнітне поле. На його честь названа одиниця електроємності.

1 Фарад – це дуже велика електроємність. На практиці користуються мікрофарадами (мкФ) – $1\text{ мкФ} = 10^{-6}\text{ Ф}$ і пікофарадами (пФ) – $1\text{ пФ} = 10^{-12}\text{ Ф}$.

2. Конденсатор

Конденсатор – це пристрій для накопичення і зберігання електричного заряду. Конденсатор має два провідники, які мають протилежні електричні заряди. Ці провідники знаходяться на деякій відстані один від одного, а простір між ними заповнений шаром діелектрика.

Система двох паралельних плоских пластин, які розділені шаром діелектрика, називається **плоским** конденсатором (рис.4.8). Конденсатор накопичує та утримує заряд на пластинах. Заряди на пластинах конденсатора мають різний знак. Процес передачі заряду пластині конденсатора називається **зарядкою конденсатора**.

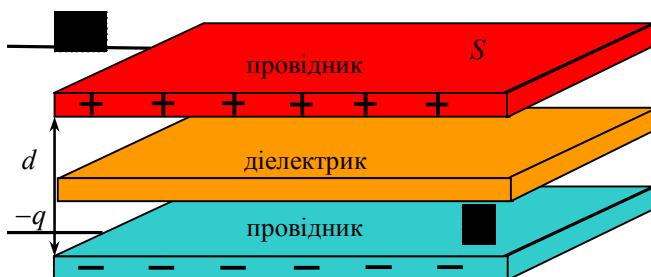


Рис.4.8

Пластини називають **обкладинками конденсатора**. Для зарядки одну обкладинку з'єднують з додатнім полюсом джерела, а іншу обкладинку з від'ємним полюсом або заземлюють.

Електроємність конденсатора визначають за формулою:

$$C = \frac{q}{\varphi_1 - \varphi_2},$$

де $(\varphi_1 - \varphi_2)$ – різниця потенціалів між обкладками. Електроємність плоского конденсатора знаходять за формулою:

$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S}{d},$$

де S – площа кожної обкладки; d – відстань між обкладками; ε_0 – електрична стала; ε – відносна діелектрична проникність діелектрика між обкладками. Ємність плоского конденсатора, який складається з двох пластин, прямо пропорційна площі його пластин, величині відносної діелектричної проникності і обернено пропорційна товщині діелектрика.

Для збільшення електроємності у конденсаторі застосовують n пластин. Електроємність такого конденсатора знаходиться за формулою:

$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S}{d} (n - 1),$$

де n – кількість пластин.

3. З'єднання конденсаторів

У практичному застосуванні конденсатори з'єднують **паралельно** та **послідовно**. З'єднані конденсатори називаються – **батареями**. Два конденсатори з'єднані паралельно, якщо з'єднуються пластини одного знаку. При послідовному з'єднанні – пластини різних знаків. На рисунках конденсатор схематично позначають символом $\text{—} \text{—} \text{—}$.

При паралельному з'єднанні заряди одного знаку $q = \frac{C}{\varphi}$ на обкладках конденсаторів будуть додаватися. При цьому потенціал з'єднаних обкладинок одного знаку залишається сталим (рис.4.9). Сумарний заряд обкладинок дорівнює: $Q = q_1 + q_2 + \dots + q_n$. Розділимо ліву і праву частину цього рівняння на потенціал φ :

$$\frac{Q}{\varphi} = \frac{q_1}{\varphi} + \frac{q_2}{\varphi} + \dots + \frac{q_n}{\varphi} \Rightarrow C_{\text{зар}} = C_1 + C_2 + \dots + C_n$$

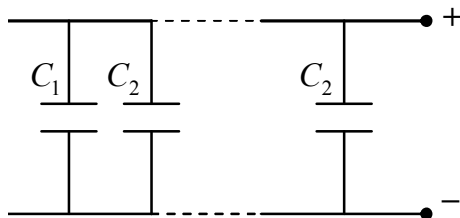


Рис.4.9

Загальна ємність батареї конденсаторів, з'єднаних паралельно дорівнює:

$$C_{\text{заг}} = C_1 + C_2 + \dots + C_n.$$

При послідовному з'єднанні конденсаторів з'єднуються обкладинки із зарядами різних знаків. При цьому додаватися будуть різниці потенціалів на обкладинках, а заряд залишається однаковим $q_1 = q_2 = \dots = q_n = q$ (рис.4.10).

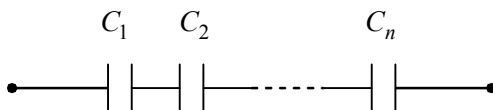


Рис.4.10

$$\varphi = \frac{q}{C_{\text{заг}}} = \frac{q}{C_1} + \frac{q}{C_2} + \dots + \frac{q}{C_n} \Rightarrow \frac{1}{C_{\text{заг}}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n}$$

$$\frac{1}{C_{\text{заг}}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n}$$

Загальна ємність батареї конденсаторів при послідовному з'єднанні завжди менша, ніж найменша ємність конденсатора в цій батареї. Тому такий тип з'єднання застосовують для зменшення загальної електроємності батареї.

Змішане з'єднання конденсаторів складається з послідовного і паралельного з'єднань.

4. Енергія електричного поля

Будь-який заряджений провідник має енергію, яку він отримує в процесі зарядки. При розрядці провідник віддає цю енергію. Енергія конденсатора дорівнює роботі, яку потрібно виконати щоб збільшити різницю потенціалів на обкладинках конденсатора від 0 до φ .

Її можна визначити за формулою:

$$W = q \cdot \varphi_{\text{середн.}}, \quad \text{де} \quad \varphi_{\text{середн.}} = \frac{0 + \varphi}{2} = \frac{\varphi}{2} \quad - \quad \text{середнє значення}$$

потенціалу.

Тому $W = \frac{q \cdot \varphi}{2}$. Якщо врахувати, що $q = C\varphi$, формулу для енергії W зарядженого конденсатора можна записати так:

$$W = \frac{C \cdot \varphi^2}{2},$$

де C – електроємність провідника; q – заряд; φ – потенціал.

Енергія заряджених тіл – це енергія електричного поля, яке утворене електричними зарядами. Тому такий вид енергії називається **енергією електричного поля**. Наприклад, у плоскому конденсаторі енергія електричного поля концентрується у просторі між його обкладинками.

Задача 1. Конденсатори ємністю 2 мкФ і 8 мкФ з'єднані послідовно і підключені до джерела напруги 200 В. Визначити різницю потенціалів на кожному конденсаторі і енергію кожного конденсатора.

Розв'язок. При послідовному з'єднанні заряди на конденсаторах будуть однаковими $q_1 = q_2 = q$. $\varphi_1 - \varphi_2 = U$.

Різниця потенціалів на конденсаторах: $U_1 = \frac{q}{C_1}$ та $U_2 = \frac{q}{C_2}$.

Заряд $q = CU$, де C – електроємність з'єднаних конденсаторів. При послідовному з'єднанні:

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \quad \text{або} \quad C = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}. \quad \text{Тоді} \quad q = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} U.$$

$$U_1 = \frac{C_2}{C_1 + C_2} U; \quad U_2 = \frac{C_1}{C_1 + C_2} U.$$

$$W_1 = \frac{C_1 \cdot U_1^2}{2}, \quad W_2 = \frac{C_2 \cdot U_2^2}{2}.$$

Відповідь: $U_1 = 160 \text{ В}$; $U_2 = 40 \text{ В}$;

$W_1 = 2,6 \cdot 10^{-2} \text{ Дж}$; $W_2 = 6,4 \cdot 10^{-3} \text{ Дж}$.

СЛОВА І СЛОВОСПОЛУЧЕННЯ

електроємність	electrical capacity	плоский конденсатор	plate capacitor
Фарад	Farad	конденсатор	capacitor
пластина	plate	паралельно	in parallel connection
батарея	battery	послідовно	in series connection
заземлення	grounding	енергія поля	fields energy

I. Дайте відповіді на запитання

1. Яка фізична величина називається електроємністю?
2. В яких одиницях вимірюється електроємність?
3. Що таке конденсатор?
4. Як з'єднують конденсатори?
5. Від чого залежить електроємність конденсатора?
6. Де концентрується енергія електричного поля у плоскому конденсаторі?

II. Виконайте вправи

1. Конденсатор $C_1 = 3 \text{ мкФ}$ заряджений до напруги $U_1 = 300 \text{ В}$, а конденсатор $C_2 = 2 \text{ мкФ}$ заряджений до напруги $U_2 = 200 \text{ В}$. Після зарядки конденсатори з'єднали паралельно. Яка напруга встановиться на обкладинках після їх з'єднання?

2. До паралельно з'єднаних конденсаторів з електроємністю 2 мкФ і 4 мкФ послідовно підключений конденсатор 1 мкФ . Визначити електроємність батареї.

3. Куля занурена в оливу ($\varepsilon = 4$) і має потенціал 4500 В. Поверхнева густина заряду дорівнює $\sigma = 1,13 \cdot 10^{-5}$ Кл/м². Знайти радіус, заряд, ємність і енергію кулі.

4. Для порівняння ємностей двох конденсаторів ємністю C_1 та C_2 їх зарядили відповідно до напруг $U_1 = 300$ В та $U_2 = 100$ В і після цього з'єднали паралельно. При цьому різниця потенціалів між обкладинками стала $U = 250$ В. Знайти відношення $\frac{C_1}{C_2}$.

Запам'ятайте!
1. Що накопичує що Конденсатор накопичує заряд.
2. Що з'єднують як Конденсатори з'єднують послідовно або паралельно.

§ 31. Електричний струм. Закон Ома

1. Електричний струм. Сила струму

Електричним струмом називається впорядкований рух електричних зарядів. В металах це впорядкований рух електронів; в електролітах – рух іонів; струм в газах – рух електронів та іонів. Напрямок електричного струму вважають напрямком руху позитивних зарядів.

Сила струму – це фізична величина, яка дорівнює відношенню заряду, який переноситься через провідник, до часу, за який відбувається перенос заряду:

$$I = \frac{q}{t},$$

де I – сила струму, q – заряд, t – час.

Одиниця сили струму в СІ – **Ампер**²⁶ (А): $1 \text{ А} = \frac{1 \text{ Кл}}{1 \text{ с}}$.

Постійним електричним струмом є струм, сила і напрямок якого не змінюються протягом часу.

Сила постійного струму в металевому провіднику, який має площу поперечного перерізу S , дорівнює:

$$I = ne\bar{V}S,$$

де e – абсолютне значення заряду електрона; n – число носіїв зарядів в одиниці об'єму; \bar{V} – середня швидкість упорядкованого руху електронів. Для того, аби у провіднику виникав електричний струм мають бути вільні носії зарядів та створена напруга $U = \phi_1 - \phi_2$ на кінцях провідника. Як наслідок, утвориться електричне поле, яке діятиме на заряди і змусить їх рухатись у провіднику. Різницю потенціалів, тобто електричну напругу U створюють за допомогою **джерела електричної енергії**. Таким джерелом, наприклад, є конденсатор. Існує багато пристроїв і обладнання, які перетворюють інші види енергії (механічну, хімічну, світлову, ядерну) у електричну енергію.

2. Напруга на ділянці кола.

Для підтримки безперервного переміщення зарядів вздовж провідника витрачається енергія джерела струму. Електричний струм у провіднику виконує роботу, яка перетворює енергію джерела струму у інші види енергії. Відношення виконаної роботи A з переміщення заряду q вздовж провідника до модуля цього заряду визначається напругою U , яка прикладена до ділянки кола:

$$U = \frac{A}{q}.$$

Існування напруги U між двома точками простору (в тому числі і в металевому провіднику) означає, що в цьому просторі є

²⁶ Андре-Марі Ампер (1775-1836) – видатний французький фізик, дослідник природи електромагнетизму. На його честь названа одиниця вимірювання електричного струму.

електричне поле. Для збереження електричного поля в провіднику необхідно постійно підводити енергію від джерела струму.

Електричне коло може складатися з джерела струму і вимірювальних приладів.

На рис.4.11 наведено приклад електричного кола. Кожен елемент кола має свою назву і схематичне зображення. Напрямок струму вказаний стрілками.

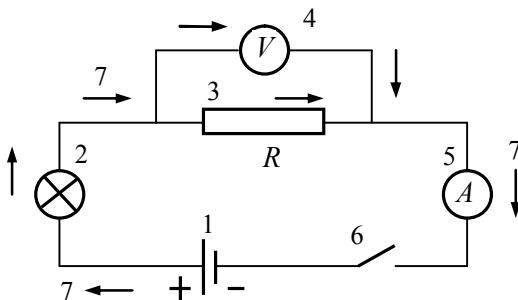


Рис.4.11

1 – джерело струму (е.р.с. – електрорушійна сила); 2 – електрична лампа; 3 – резистор (електричний опір); 4 – вольтметр (прилад для вимірювання напруги); 5 – амперметр (прилад для вимірювання сили струму); 6 – вимикач, 7 – напрям струму.

Сила струму на ділянці кола вимірюється амперметром, а напруга – вольтметром. Амперметр під'єднується до ділянки електричного кола послідовно, а вольтметр – паралельно.

3. Опір. Закон Ома для ділянки кола.

Будь-який провідник має властивість чинити **опір** направленому руху вільних зарядів у провіднику. Наприклад у металах носіями зарядів, які вільно рухаються, є електрони. Метал – це тверде тіло, яке має кристалічну будову. У вузлах **кристалічної ґратки** знаходяться позитивно заряджені іони – атоми металу, від яких відокремилися один або декілька

електронів. Ці електрони рухаються вільно, хаотично і належать усім іонам. Такі електрони називають **електронним газом**. Утворюється **металічний зв'язок** — колективна електрична взаємодія між іонами і електронним газом. На рис.4.12 зображена елементарна комірка об'ємноцентричної кристалічної ґратки Fe.

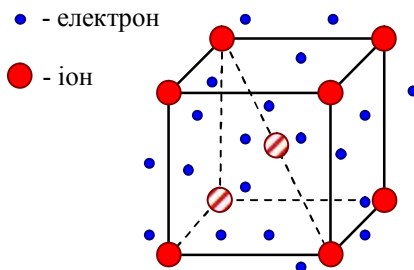


Рис.4.12

Якщо до провідника прикласти різницю потенціалів, то виникає електричне поле, яке діє на вільні електрони. Вони починають рухатися направлено, з'являється електричний струм. Взаємодія електронів з іонами ґратки перешкоджає направленому руху електронів. У цьому полягає природа опору провідника протіканню електричного струму.

Опір — це фізична величина, яка характеризує властивості провідника перешкоджати проходженню електричного струму через нього.

Для вивчення залежності сили струму від напруги складають електричне коло з джерела струму, **реостата**, амперметра і вольтметра.

Реостат — це прилад, що дозволяє плавно змінювати опір провідника, а отже і силу струму в ньому.

Магазин опорів — це прилад, що дозволяє не тільки змінювати опір, але і вимірювати його.

Експериментально встановлено, що сила струму I в провіднику прямо пропорційна прикладеній напрузі U :

$$I = \sigma \cdot U ,$$

де коефіцієнт пропорційності σ називається **провідністю** або **електропровідністю** провідника.

Коефіцієнт пропорційності σ , який не залежить від напруги, дорівнює $\sigma = \frac{1}{R}$, де R – опір провідника. **Опір обернено пропорційний електропровідності**. Відношення напруги на даній ділянці електричного кола до сили струму є мірою опору ділянки, тобто:

$$R = \frac{U}{I}.$$

Закон Ома для ділянки кола: сила струму прямо пропорційна напрузі і обернено пропорційна опору:

$$I = \frac{U}{R}.$$

Одиницею опору в СІ є Ом²⁷. $1\text{ Ом} = \frac{1\text{ В}}{1\text{ А}}$.

Закон Ома можна представити графічно (рис.4.13): $\text{tg } \alpha = \frac{1}{R} = \sigma$. Цей графік називають **вольт-амперною характеристикою** опору.

Опір металевго провідника прямо пропорційний довжині провідника l , обернено пропорційний площі поперечного перерізу S і залежить від матеріалу, з якого виготовлений провідник:

$$R = \frac{\rho \cdot l}{S},$$

де ρ – питомий опір. В СІ одиниця вимірювання питомого опору Ом·м.

²⁷ Георг Ом (1787-1853) – німецький фізик, відкрив закон залежності сили струму від напруги. Його ім'ям названа одиниці вимірювання електроопору.

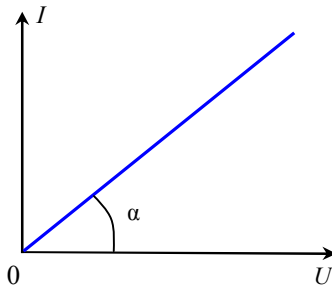


Рис.4.13

Опір металевих провідників залежить від температури. Ця залежність має вигляд:

$$R = R_0(1 + \alpha \cdot t)$$

де R_0 – опір при 0°C ; α – **температурний коефіцієнт опору**,
 t – температура у градусах Цельсія.

Температурний коефіцієнт опору є відносною зміною опору провідника при нагріванні на один градус.

Значення температурного коефіцієнта електричного опору α для окремих металів						
Метал	Залізо, Fe	Вольфрам, W	Алюміній, Al	Мідь, Cu	Срібло, Ag	Платина, Pt
α, K^{-1}	$6,5 \cdot 10^{-3}$	$4,5 \cdot 10^{-3}$	$4,4 \cdot 10^{-3}$	$4,3 \cdot 10^{-3}$	$4,1 \cdot 10^{-3}$	$3,9 \cdot 10^{-3}$

4. З'єднання провідників

У електричному колі провідники з'єднують послідовно, паралельно або змішано.

При послідовному з'єднанні провідників (рис.4.14) струм, який протікає через ці провідники буде одним і тим самим. Тобто сила струму у всіх ділянках коло буде однакою:

$$I = I_1 = I_2.$$

За законом Ома на послідовно з'єднаних провідниках з різними опорами R_1 і R_2 напруга буде різною: $U_1 = I \cdot R_1$ та

$U_2 = I \cdot R_2$. Але загальна напруга на двох провідниках дорівнює сумі напруг $U = U_1 + U_2$.

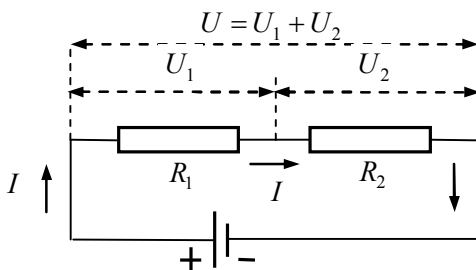


Рис.4.14

За законом Ома $U = I \cdot R$, де R – загальний опір двох провідників. Тоді

$$I \cdot R = I \cdot R_1 + I \cdot R_2;$$

$$R = R_1 + R_2$$

Якщо послідовно з'єднані провідників n , то їхній загальний опір визначається виразом:

$$R = R_1 + R_2 + \dots + R_n$$

Напруги на кожному з провідників прямо пропорційні їх опорам:

$$I = \frac{U_1}{R_1} = \frac{U_2}{R_2} \Rightarrow \frac{U_2}{U_1} = \frac{R_2}{R_1}.$$

При паралельному з'єднанні провідників напруги на паралельних ділянках кола однакові (рис.4.15).

Сила струму у вузлі електричного кола дорівнює сумі сил струмів на паралельних ділянках:

$$I = I_1 + I_2.$$

Враховуючи закон Ома матимемо справедливим є вираз:

$$\frac{U}{R} = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2}.$$

Звідки
$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \Rightarrow R = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}.$$

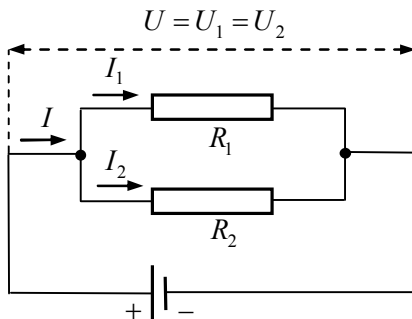


Рис.4.15

Отже, обернена величина загального опору дорівнює сумі обернених величин опорів паралельних ділянок.

З'єднані n провідників мають загальний опір, який визначається виразом:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}.$$

З рівності $U_1 = U_2$ отримаємо співвідношення між опором та силою струмів паралельних ділянок кола:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1}.$$

Сили струмів паралельних ділянок обернено пропорційні їхнім опорам.

Пояснити зміну загального опору двох металевих провідників, які з'єднані послідовно або паралельно, можна за допомогою питомого опору. Опір провідника довжиною l дорівнює $R = \frac{\rho \cdot l}{S}$. Провідник довжиною l можна розділити на дві частини однакові частини двома способами: $l = l_1 + l_2$ (як послідовне з'єднання двох провідників) та $S = S_1 + S_2$ (як паралельне з'єднання двох провідників).

Якщо $l = l_1 + l_2$, то ці частини мають відповідні опори $R_1 = \frac{\rho \cdot l_1}{S}$ та $R_2 = \frac{\rho \cdot l_2}{S}$. Виділимо з виразів для опору цілого провідника і його частин l , l_1 , l_2 . Тоді справедливим є вираз:

$$l = \frac{R \cdot S}{\rho}; \quad l_1 = \frac{R_1 \cdot S}{\rho}; \quad l_2 = \frac{R_2 \cdot S}{\rho}$$

$$\frac{R \cdot S}{\rho} = \frac{R_1 \cdot S}{\rho} + \frac{R_2 \cdot S}{\rho} \Rightarrow R = R_1 + R_2.$$

Для двох частин дроту з'єднаних паралельно додаватимуться їхні площі перерізів: $S = S_1 + S_2$.

Виділимо площі перерізів та знайдемо їхню суму. Ця сума дорівнюватиме загальній площі перерізу двох провідників, які з'єднані паралельно:

$$S = \frac{\rho \cdot l}{R}; \quad S_1 = \frac{\rho \cdot l}{R_1}; \quad S_2 = \frac{\rho \cdot l}{R_2}$$

$$\frac{\rho \cdot l}{R} = \frac{\rho \cdot l}{R_1} + \frac{\rho \cdot l}{R_2} \Rightarrow \frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}.$$

Задача 1. На рисунку наведено електричне коло. Вольтметр, який увімкнений паралельно до резистору $R_1 = 4 \text{ Ом}$, показує $U_1 = 40 \text{ В}$. Напруга джерела струму підтримується сталою і дорівнює $U = 100 \text{ В}$. Знайдіть відношення сили струму, який проходить через вольтметр, до сили струму, який проходить через резистор з опором $R_2 = 6 \text{ Ом}$ (див. рис.).

Дано:

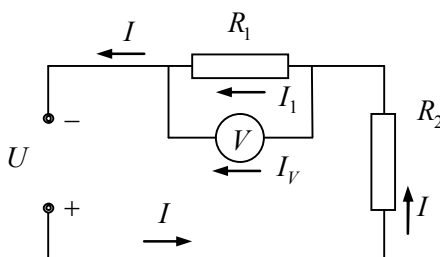
$$R_1 = 4 \text{ Ом}$$

$$R_2 = 6 \text{ Ом}$$

$$U_1 = 40 \text{ В}$$

$$U = 100 \text{ В}$$

Знайти: $\frac{I_V}{I} - ?$



Розв'язок. I_V – сила струму, що проходить через вольтметр.

Напруга на резисторі з опором R_2 дорівнює $U_2 = U - U_1$, а сила струму, що проходить через цей резистор, за законом Ома для ділянки кола:

$$I = \frac{U_2}{R_2} = \frac{U - U_1}{R_2}.$$

Але $I = I_1 + I_V$, де I_1 – сила струму у резисторі R_1 . Звідси $I_V = I - I_1$. Тоді

$$\frac{I_V}{I} = 1 - \frac{I_1}{I} = 1 - \frac{\frac{U_1}{R_1}}{\frac{U - U_1}{R_2}} = 1 - \frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{U_1}{U - U_1} = 1 - \frac{6}{4} \cdot \frac{30}{(100 - 30)} \approx 0,36.$$

Відповідь: $\frac{I_V}{I} \approx 0,36$.

Задача 2. Електрична лампа з вольфрамовим дротом при 0°C має опір 300 Ом, а при її світінні опір дроту дорівнює 2400 Ом. Визначити температуру розжарення дроту.

Дано:

$$\alpha_W = 4,5 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$$

$$R_0 = 300 \text{ Ом}$$

$$R = 2400 \text{ Ом}$$

$$t - ?$$

Розв'язок. Залежність опору металевих провідників від температури має вигляд: $R = R_0(1 + \alpha \cdot t)$

$$t = \frac{R - R_0}{\alpha \cdot R_0} = \frac{2400 - 300}{4,5 \cdot 10^{-3} \cdot 300} \approx 1555^\circ \text{C}$$

Відповідь: $t \approx 1555^\circ \text{C}$.

СЛОВА І СЛОВОСПОЛУЧЕННЯ

струм	current	напруга	voltage
сила струму	force of current	електричне коло	electric circuit
резистор	resistor	реостат	rheostat
постійний струм	direct current (DC)	джерело струму	current source
змінний струм	alternating current (AC)	дріт розжарення	incandescent wire

I. Дайте відповіді на запитання

1. Що називається електричним струмом?
2. Що таке сила струму?
3. Який струм називається постійним струмом?
4. З яких елементів складається електричне коло?
5. Як під'єднують до ділянки електричного кола амперметр, вольтметр?
6. Що таке електричний опір провідника?
7. Як визначити загальний опір електричного кола, яке складається з провідників з'єднаних паралельно (послідовно)?

II. Виконайте вправи

1. Поясніть як виникає електричний опір у металевому провіднику.
2. Сформулюйте закон Ома для ділянки електричного кола.
3. Мідний дріт довжиною 1 км має опір 2,55 Ом. Визначити діаметр проводу, якщо питомий опір міді дорівнює $\rho_{\text{Cu}} = 1,75 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$.
4. Визначити напругу на кінцях алюмінієвого дроту довжиною 10 м і діаметром 0,2 мм, по якому протікає струм силою 70 мА. Питомий опір алюмінію $\rho_{\text{Al}} = 2,82 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$.
5. Струм силою 80 А розгалужується по двом провідникам, опір яких 5 Ом і 11 Ом. Визначити силу струму в кожному провіднику, напруги на них і загальний опір.
6. Розрахувати силу струму, що проходить по мідному дроту довжиною 100 м, площею поперечного перерізу $0,5 \text{ мм}^2$, якщо до кінців дроту прикладена напруга 6,8 В. Питомий опір міді дорівнює $\rho_{\text{Cu}} = 1,75 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$.
7. На скільки рівних частин треба розрізати дріт, опором 400 Ом, щоб при паралельному з'єднанні його частин отримати опір 4 Ом?

Запам'ятайте!
1. Що вимірюється чим
Сила струму на ділянці кола вимірюється
амперметром

§ 32. Закони постійного електричного струму

1. Електрорушійна сила джерела струму

Для створення і підтримки електричного струму в електричному колі необхідне джерело струму – **генератор**. Усередині генератора відбувається розділення різноіменних зарядів. Сили, які розділяють заряди в генераторі, мають неелектричну природу. Ці сили називають **сторонніми силами**. В генераторах робота сторонніх сил виконується за рахунок механічної енергії води або вітру, в акумуляторах і батареях – за рахунок хімічної енергії, в фотоелементах – за рахунок енергії Сонця.

У замкнутому колі діють сторонні сили у джерелі струму та кулонівські сили у всьому колі. Робота кулонівських сил у замкнутому контурі дорівнює нулю. Розділенню та переносу зарядів всередині джерела струму перешкоджає внутрішнє електричне поле і опір середовища джерела струму.

Під дією сторонніх сил $\vec{F}_{\text{ст}}$ відбувається переміщення вільних зарядів від одного полюсу до іншого (від A до B). Коли електрична сила $\vec{F}_{\text{ел}}$ дорівнюватиме сторонній силі $\vec{F}_{\text{ел}} = -\vec{F}_{\text{ст}}$, робота сторонніх сил припиниться і різниця потенціалів на полюсах джерела стане максимальною (рис.4.16).

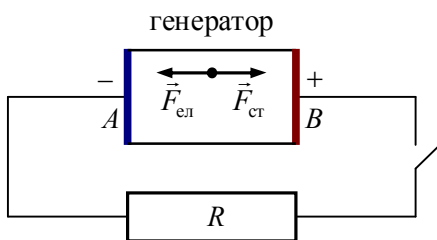


Рис.4.16

У замкнутому колі здійсниться робота по переміщенню заряду по всьому колу за рахунок енергії сторонніх сил (рис.4.16). Величина, що визначається відношенням роботи

сторонніх сил до величини переміщеного заряду всередині джерела при розімкненому колі, називається електрорушійної силою джерела ЕРС і позначається ε :

$$\varepsilon = \frac{A_{\text{ст}}}{q}.$$

Якщо $q = 1 \text{ Кл}$, то $\varepsilon = A_{\text{ст}}$. Це означає, що ЕРС джерела в СІ дорівнює роботі сторонніх сил по переміщенню заряду величиною 1 Кл всередині джерела при розімкненому колі, тобто

$$\varepsilon = A_{\text{ст}} = q \cdot (\varphi_1 - \varphi_2) = q \cdot U.$$

Напруга на полюсах розімкненого джерела струму дорівнює його ЕРС.

2. Закон Ома для повного (замкненого) кола

Розглянемо найпростіше повне замкнене електричне коло. Воно складається з джерела струму електрорушійної сили ε , яке має внутрішній опір r та зовнішнього опору R (рис.4.17).

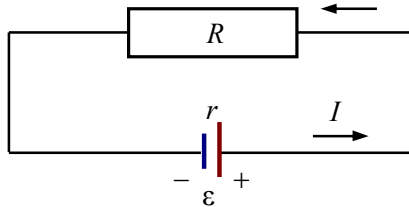


Рис.4.17

Закон Ома для повного кола. Сила струму у замкненому колі прямо пропорційна електрорушійній силі джерела струму і обернено пропорційна опору всього кола:

$$I = \frac{\varepsilon}{R + r}.$$

3. Робота і потужність електричного струму

Електрична енергія може бути перетворена в інші види

енергії. Мірою перетворення електричної енергії є робота сил електричного поля, що переміщує заряди уздовж кола. Нехай на зовнішній ділянці ланцюга напруга дорівнює U .

Це означає, що робота електричного поля генератора по переміщенню заряду 1 Кл на даній ділянці ланцюга дорівнює U . Робота по переміщенню заряду q дорівнює $A = q \cdot U$. Але $q = I \cdot t$, тому

$$A = I \cdot U \cdot t.$$

Робота постійного струму на ділянці електричного кола дорівнює добутку напруги на кінцях цієї ділянки на силу струму і на час його проходження.

Одиницею роботи електричного струму в СІ є 1 Дж = 1В·1А·1с. На практиці використовують інші одиниці роботи: 1кВт·год (кіловат-година), 1кВт·год = $3,6 \cdot 10^6$ Дж.

Потужність постійного струму на ділянці електричного кола дорівнює добутку напруги на кінцях цієї ділянки на силу струму:

$$P = \frac{A}{t} = I \cdot U.$$

В СІ одиницею потужності є Ват (Вт): 1Вт = 1А·1В.

ККД (коефіцієнт корисної дії) джерела струму дорівнює відношенню корисної роботи до всієї роботи:

$$\eta = \frac{A_{\text{кор}}}{A} = \frac{IUt}{I\varepsilon t} = \frac{U}{\varepsilon} = \frac{IR}{I(R+r)};$$

$$\eta = \frac{R}{(R+r)}.$$

4. Закон Джоуля-Ленца

Електричний струм, який проходить по провіднику, нагріває його. Робота A електричних сил у провіднику з опором R , по якому протягом часу t тече струм I , дорівнює кількості теплоти Q , що виділяється в провіднику:

$$Q = A = qU = IUt = I^2 R t = \frac{U^2}{R} t .$$

Закон Джоуля – Ленца. Кількість теплоти, що виділяється в провіднику зі струмом, прямо пропорційна силі струму, напрузі й часу проходження струму через провідник: $Q = IUt$.

Закон Джоуля – Ленца встановлює кількісне співвідношення між силою струму та теплотою, яка виділяється у провіднику $Q = I^2 R t$. Виділення кількості теплоти при проходження струму у провіднику відповідає закону збереження та перетворення енергії. Так, електричні заряди, які мають потенціальну енергію у електричному полі починають рухатись. При цьому заряди набувають кінетичної енергії руху. Рухаючись у провіднику частину енергії заряди передають іонам кристалічної ґратки. Починає зростати амплітуда коливань іонів відносно положення рівноваги. Таким чином, зростає інтенсивність теплового руху, провідник нагрівається і його температура збільшується.

Задача 1. Два провідника з опором 5 Ом і 10 Ом з'єднані паралельно і знаходяться у електричному колі. У першому провіднику виділилося 100 Дж теплоти. Яка кількість теплоти виділиться за такий же час у другому провіднику?

Дано:

$$R_1 = 5 \text{ Ом}$$

$$R_2 = 10 \text{ Ом}$$

$$Q_1 = 100 \text{ Дж}$$

Знайти: Q_2 –?

Розв'язок. Кількість теплоти, що виділилася у першому провіднику при паралельному з'єднанні, дорівнює $Q_1 = \frac{U^2}{R_1} t$.

Кількість теплоти, що виділилася в другому провіднику

$$Q_2 = \frac{U^2}{R_2} t.$$

Знайдемо відношення $\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{R_2}{R_1}$. Звідси $Q_2 = \frac{R_1}{R_2} Q_1$.

Відповідь: $Q_2 = 50$ Дж.

Задача 2. Невелика гідроелектростанція витрачає $V = 240 \text{ м}^3$ води за 1 хвилину. Висота напору води 4 м. Скільки електроламп, які з'єднані паралельно, може обслуговувати такий генератор, якщо кожна лампа споживає струм силою $I_n = 1 \text{ А}$ з напругою $U = 220 \text{ В}$? Коефіцієнт корисної дії (ККД) генератора $\eta = 75\%$.

Дано:

$$V = 240 \text{ м}^3$$

$$t = 60 \text{ с}$$

$$h = 4 \text{ м}$$

$$I_n = 1 \text{ А}$$

$$U = 220 \text{ В}$$

$$\eta = 75\%$$

Знайти: $n - ?$

Розв'язок. Електролампи включаються в мережу паралельно, тому загальна сила струму: $I = n \cdot I_n$.

Потужність, що споживається лампами: $P = n I_n U$. Потужність

електростанції дорівнює: $P = \frac{A \cdot \eta}{t} = \frac{mgh \cdot \eta}{t} = \frac{V\rho gh \cdot \eta}{t}$, де A –

робота води, що падає з висоти h за $t = 60 \text{ с}$; m – маса води;

$\rho = 10^3 \text{ кг/м}^3$ – густина води; $g = 9,8 \text{ м/с}^2$ – прискорення вільного падіння.

Отже $n I_n U = \frac{V\rho gh \cdot \eta}{t}$, звідки $n = \frac{V\rho gh \cdot \eta}{I_n U t} = 535$.

Відповідь: 535.

СЛОВА І СЛОВОСПОЛУЧЕННЯ

джерело струму	current source	полюс	pole
розімкнути	to disconnect	генератор	generator
електрорушійна сила	electromotive force	кіловат-година	kWatt-hour
розімкнене коло	disconnective circuit	сторонні сили	nonelectrical forces
зовнішня ділянка кола	external circuit	внутрішня ділянка кола	internal circuit

I. Дайте відповіді на запитання

1. Для чого в електричному колі необхідне джерело струму?
2. Які сили називають сторонніми силами?
3. Що називається електрорушійною силою джерела струму?
4. Чому дорівнює робота постійного струму?
5. Чому дорівнює потужність постійного струму?
6. Як пояснити теплову дію електричного струму?

II. Виконайте вправи

1. Сформулюйте закон Ома для повного кола.
2. Сформулюйте закон Джоуля-Ленца.
3. Електровоз рухається зі швидкістю 54 км/год і розвиває силу тяги 68,6 кН. Напруга в лінії 1500 В, електродвигуни мають ККД $\eta = 92\%$. Визначити силу струму в двигунах електровозу.
4. Дві лампи мають однакові потужності. Одна з них розрахована на напругу 120 В, а інша – на 220 В. У скільки разів відрізняється опір ламп?
5. Нагрівач електричного чайника має дві секції. При вмиканні першої секції чайник закипає за час t_1 , при вмиканні другої секції – за час t_2 . За який час закипить вода, якщо увімкнути дві секції: а) паралельно; б) послідовно?

Запам'ятайте!
1. Що встановлює що
Закон Джоуля – Ленца встановлює
кількісне співвідношення між силою струму
та теплотою

§ 33. Магнітне поле. Сила Ампера

1. Магнітні явища

Магнітні явища відомі людству з давніх часів. У природі існують мінерали – природні магніти, які притягують або відштовхують подібні мінерали або залізо (Fe).

Магнетизм – це форма взаємодії рухомих електричних зарядів. Така взаємодія відбувається за допомогою магнітного поля. Нерухомі електричні заряди не створюють магнітне поле. Коли заряд починає рухатись з'являється магнітне поле. Магнітне поле діє на рухомі електричні заряди. Магнітне поле передає взаємодію зі швидкістю 300 000 км/с, тобто зі швидкістю світла. Магнітне поле має енергію. Електрика і магнетизм – це дві сторони електромагнітної взаємодії, електромагнітного поля.

Планета Земля має магнітне поле (рис.4.18, а). Існує гіпотеза, що магнітне поле Землі створює рідке ядро нашої планети, яке складається з заліза (Fe). Рух іонів заліза при обертанні планети створює електричний струм, який генерує магнітне поле.

Існує явище полярного сяйва на полюсах Землі, коли заряджені частинки з великими швидкостями рухаються від Сонця в магнітному полі Землі і взаємодіють з атмосферою. Магнітне поле Землі – це бар'єр, який захищає нашу планету від шкідливої радіації Сонця і не дозволяє сонячному вітру знищити атмосферу (рис.4.18,б).

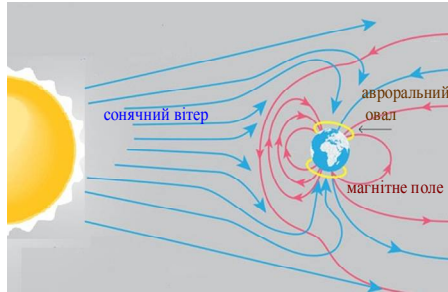
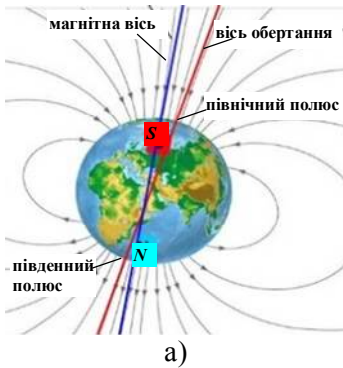


Рис. 4.18

2. Сила Ампера

Вперше взаємодію провідників, через які протікає електричний струм досліджував Ампер. У результаті такої взаємодії виникають сили притягання і відштовхування між провідниками в залежності від напрямків струму. Сила взаємодії двох провідників зі струмом названа **силою Ампера** \vec{F}_A (рис.4.19).

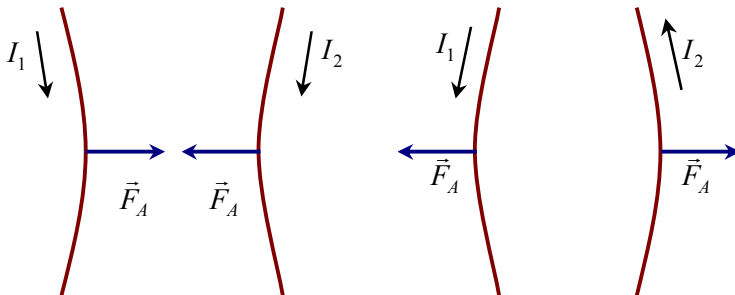


Рис. 4.19

Сила Ампера виникає через те, що на провідник зі струмом діє магнітне поле, створене іншим провідником зі струмом. Взаємодія двох провідників зі струмом передається через магнітне поле. Сила Ампера залежить від величини струму і

розташуванню провідника зі струмом у магнітному полі. Сила Ампера \vec{F}_A для лінійного провідника, який має довжину l визначається виразом:

$$\vec{F}_A = [I \cdot \vec{l} \cdot \vec{B}] = I \cdot \vec{l} \times \vec{B},$$

де $I \cdot [\vec{l} \cdot \vec{B}] = I \cdot \vec{l} \times \vec{B}$ – векторний добуток величин $I \cdot \vec{l}$ і \vec{B} – **вектор магнітної індукції** магнітного поля, I – сила струму у провіднику, \vec{l} – вектор направленості провідника у напрямку протікання струму I .

За означенням векторного добутку модуль сили Ампера дорівнює:

$$F_A = I \cdot l \cdot B \cdot \sin \alpha.$$

Закон Ампера: сила, з якою магнітне поле діє на провідник зі струмом прямо пропорційна силі струму, довжині провідника і залежить від орієнтації провідника у магнітному полі.

3. Вектор магнітної індукції

Вектор магнітної індукції \vec{B} є силовою характеристикою магнітного поля. Модуль вектора магнітної індукції дорівнює відношенню максимального значення сили Ампера \vec{F}_A ($\sin \alpha = 1$, $\alpha = 90^\circ$) до добутку сили струму на довжину провідника:

$$B = \frac{F_A}{I \cdot l}.$$

В СІ одиниця магнітної індукції – **Тесла**²⁸: $1 \text{ Тл} = \frac{1 \text{ Н}}{1 \text{ А} \cdot 1 \text{ м}}.$

Три вектори \vec{B} , \vec{F}_A і \vec{l} взаємно перпендикулярні, тобто вектор \vec{F}_A перпендикулярний до площини, у якій знаходяться вектори \vec{l} і \vec{F}_A , між якими кут 90° .

²⁸ Ніколо Тесла (1856-1943) – американський фізик і винахідник сербського походження. Зробив великий внесок у розвиток електротехніки та фізики електромагнетизму. Його ім'ям названа одиниця магнітної індукції.

Магнітне поле зображують графічно за допомогою **магнітних силових ліній вектора \vec{B}** . **Силовою лінією** вектора \vec{B} називається така уявна лінія, дотична до якої в будь-якій точці збігається з напрямком вектора магнітної індукції у цій точці. Напрямок силових ліній вектора \vec{B} визначається за правилом правої руки. Для прямолінійного провідника: великий палець по напрямкові струму, зігнуті чотири пальці вкажуть напрямку силової лінії (рис.4.20, а). Для провідника зі струмом по колу: чотири пальці – за напрямком струму, а великий палець під прямим кутом покаже напрямку силової лінії в центрі кола (рис.4.20, б).

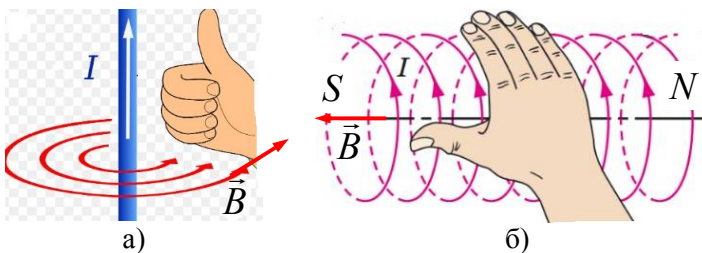


Рис. 4.20

За напрямку магнітної силової лінії прийнято вважати напрямку від північного магнітного полюсу до південного. На відміну від силових ліній електричного поля магнітні силові лінії завжди замкнені (не мають ні початку, ні кінця) і оточують провідник зі струмом.

Напрямок силових ліній можна також встановити за правилом свердлика. На рис. 4.21 зображено провідник зі струмом, який розташований перпендикулярно до сторінки: а) напрямку струму від читача (\times – кінець вектора); б) напрямку струму на читача (\cdot – початок вектора). Свердлики при обертанні за годинниковою стрілкою вгвинчуються у сторінку і показує напрямку магнітних силових ліній (а). За правилом свердлика силові лінії для струму з рис.4.21, б мають протилежний напрямку.

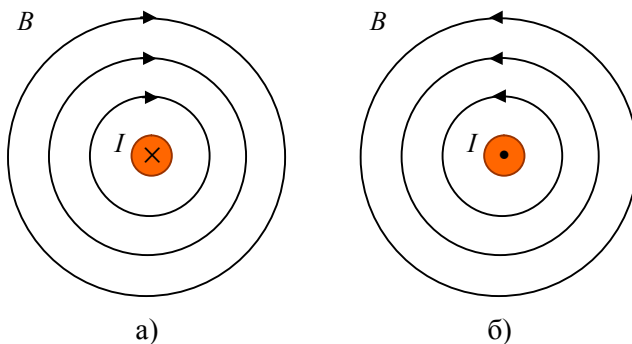


Рис. 4.21

4. Сила Лоренца²⁹

Лоренц пояснив існування сили Ампера тим, що магнітне поле діє на рухомі заряди в провіднику зі струмом. Таким чином, сила Ампера є сумою сил, що діють на вільні заряджені частинки, що рухаються в провіднику зі струмом.

Якщо вільний заряд q рухається зі швидкістю \vec{V} у магнітному полі з магнітною індукцією \vec{B} , то сила Лоренца дорівнює:

$$\vec{F}_L = q[\vec{V} \times \vec{B}]$$

$$F_L = q \cdot V \cdot B \cdot \sin \alpha$$

де $[\vec{V} \times \vec{B}]$ – векторний добуток \vec{V} і \vec{B} , α – кут між цими векторами.

Наведемо приклади взаємодії позитивного (рис.4.22, а) і негативного (рис.4.22, б) зарядів з постійним магнітним полем. Нехай заряджена частинка влітає під прямим кутом зі швидкістю \vec{V} у постійне магнітне поле, силові лінії якого направлені від читача перпендикулярно до сторінки.

²⁹ Гендрік Лоренц (1853-1928) – нідерландський фізик, який створив класичну електронну теорію, за допомогою якої пояснив багато електричних та оптичних явищ.

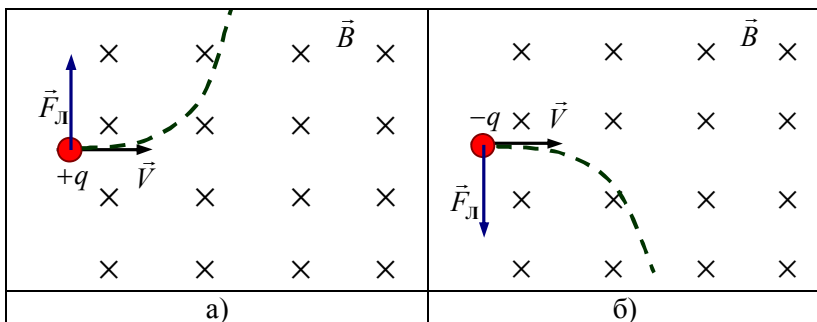


Рис.4.22

В такому випадку заряджена частинка буде рухатися по колу радіуса r . Якщо маса частинки m і заряд q , то за другим законом Ньютона виконуватиметься рівність:

$$ma = qVB,$$

де $a = \frac{V^2}{r}$ – доцентрове прискорення частинки, яка рухається по

колу радіуса r . Звідси $r = \frac{mV}{qB}$, а $V = \frac{rqB}{m}$.

Заряджена частинка, яка рухається перпендикулярно, до силових магнітних ліній, рухатиметься по коловій траєкторії. Сила Лоренца не здійснює роботу, а лише змінює напрямок швидкості зарядів і є доцентровою силою.

Якщо збільшувати величину магнітної індукції, то збільшиться частота обертання по колу. Цей процес використовують у **прискорювачах** елементарних частинок, на яких вивчають властивості частинок, природу їхньої взаємодії та будову матерії.

Задача. Циклотрон призначений для прискорення протонів до енергії 5 МеВ. (1 МеВ = 10^6 еВ, 1 еВ = $1,6 \cdot 10^{-19}$ Дж). Визначити найбільший радіус орбіти, вздовж якої рухається протон, якщо індукція магнітного поля дорівнює 1 Тл.

Дано:

$$E_K = 5 \text{ Мев} = 8 \cdot 10^{-13} \text{ Дж}$$

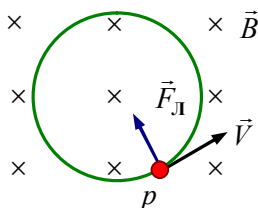
$$B = 1 \text{ Тл}$$

$$m_p = 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$$

$$q = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$$

Знайти:

$$r - ?$$



Розв'язок. На протон в магнітному полі діє сила Лоренца і ця сила є доцентровою силою, яка забезпечує рух протона по колу радіуса r . Радіус буде максимальним, якщо кут між вектором \vec{B} і швидкістю \vec{V} дорівнює 90° :

$$m_p a = qVB \cdot \sin 90^\circ \Rightarrow m_p \frac{V^2}{r} = qVB.$$

Звідси $r = \frac{m_p V}{qB}$. Модуль швидкості знаходимо із виразу для

$$\text{кінетичної енергії протона: } E_K = \frac{m_p V^2}{2} \Rightarrow V = \sqrt{\frac{2E_K}{m_p}}.$$

$$\text{Тоді } r = \frac{\sqrt{2m_p E_K}}{qB} = \frac{\sqrt{2 \cdot 1,67 \cdot 10^{-27} \cdot 8 \cdot 10^{-13}}}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 1} \text{ м} = 0,32 \text{ м, де } q -$$

заряд протона.

Відповідь: $r = 0,32 \text{ м}$.

СЛОВА І СЛОВОСПОЛУЧЕННЯ

магнітне поле	magnetic field	магніт	magnet
північний полюс	north pole	південний полюс	south pole
магнітна індукція	magnetic induction	Тесла	Tesla
сила Ампера	Ampere force	сила Лоренца	Lorentz force
магнітна силова лінія	magnetic field lines	циклотрон	cyclotron

I. Дайте відповіді на запитання

1. На що діє магнітне поле?
2. З якою швидкістю передає взаємодію магнітне поле?
3. Яка сила називається силою Ампера?
4. Як встановити напрямок магнітних силових ліній у провіднику зі струмом?
5. Що таке сила Лоренца?
6. Яким чином розташовані вектор швидкості заряду і сила Лоренца?

II. Виконайте вправи

1. Назвіть приклади магнітних явищ.
2. Опишіть природу полярного саява.
3. Запишіть вирази для сили Ампера та сили Лоренца.
4. Електрон описує в однорідному магнітному полі коло радіусом $r = 4 \cdot 10^{-4} \text{ м}$. Швидкість електрона $V = 3,5 \cdot 10^6 \text{ м/с}$. Знайти індукцію магнітного поля.
5. Протон та електрон, прискорені однаковою різницею потенціалів, влітають в однорідне магнітне поле перпендикулярно до ліній магнітної індукції. У скільки разів радіус кривизни r_1 траєкторії протона більший за радіус кривизни r_2 траєкторії електрона?

Запам'ятайте!
1. Що передається через що
Взаємодія двох провідників зі струмом передається через магнітне поле.

§ 34. Магнітний потік. Електромагнітна індукція.

1. Магнітний потік

Магнітний потік — це скалярна фізична величина, яка дорівнює потоку вектора магнітної індукції через поверхню:

$$\Phi = B \cdot S \cdot \cos \alpha,$$

де B – магнітна індукція, S – площа поверхні, α – кут між вектором \vec{B} і перпендикуляром до поверхні.

Фізичним змістом магнітного потоку є кількість силових ліній, що перетинають поверхню. Магнітний потік може бути як позитивним, так і негативним. Знак визначається вибором напрямку, у якому проводиться перпендикуляр до поверхні (рис.4.23).

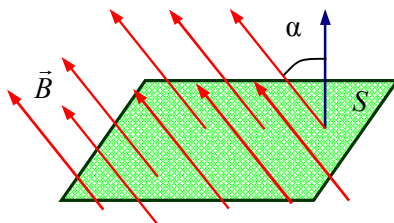


Рис.4.23

Одиницею магнітного потоку в СІ є **Вебер**³⁰: $1 \text{ Вб} = 1 \text{ Тл} \cdot 1 \text{ м}^2$.

2. Електромагнітна індукція.

Явище **електромагнітної індукції** було відкрите у 1831 році англійським фізиком Майклом Фарадеєм. В серії експериментів Фарадей спостерігав, появу електричного струму у **котушці індуктивності** при зміні магнітного потоку. Котушка індуктивності – це провідник у формі кола або декількох кілець певного радіусу. Магнітний потік змінювався у два способи: рухався постійний магніт біля котушки та провідник рухався у незмінному магнітному полі. Тобто, змінний у часі магнітний потік викликав появу електрорушійної сили.

³⁰ Вільгельм Вебер (1804-1891) – німецький фізик, один з розробників теорії електродинамічних явищ. Його ім'ям названа одиниця вимірювання магнітного потоку.

Отже, явище появи струму в замкненому провідному контурі при зміні магнітного потоку, називається **електромагнітною індукцією**.

Закон електромагнітної індукції Фарадея: генерована (індукована) електрорушійна сила прямо пропорційна швидкості зміни магнітного потоку:

$$\varepsilon = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}.$$

Знак «мінус» означає, що напрямок індукованого струму має протилежний напрямок по відношенню до явища, яке викликало появу ЕРС.

Закон Ленца: напрямок індукційного струму завжди такий, що магнітне поле індукованого струму протидіє зміні того магнітного потоку, який викликає цей струм.

Для котушки індуктивності, яка має n витків, величина ЕРС збільшується пропорційно кількості витків:

$$\varepsilon = -n \cdot \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}.$$

3. Самоіндукція

Нехай через котушку, яка має n витків тече струм I від зовнішнього джерела. Цей струм створює в котушці магнітне поле, і тому через витки проходить власний магнітний потік Φ . Цей магнітний потік, за законом електромагнітної індукції, викликає появу ЕРС. Ця ЕРС називається електрорушійною силою самоіндукції. А струм, який вона викликає, називається струмом самоіндукції I_c . Струм самоіндукції направлений проти зміни струму I , який породжує потік Φ .

Самоіндукція – це явище виникнення в провіднику електрорушійної сили індукції за умови зміни власного магнітного потоку, що спричинена зміною сили струму в цьому провіднику.

Магнітний потік у котушці індуктивності прямо пропорційний величині струму I , який проходить по котушці:

$$\Phi = L \cdot I,$$

де L – коефіцієнт пропорційності, який називається **індуктивністю**. Індуктивність – характеризує властивість даної котушки зі струмом створювати магнітний потік.

Зміна магнітного потоку дорівнює: $\Delta\Phi = L \cdot \Delta I$. Підставимо вираз для $\Delta\Phi$ у вираз закону електромагнітної індукції. Отримає рівняння для визначення ЕРС самоіндукції:

$$\varepsilon = -L \cdot \frac{\Delta I}{\Delta t}.$$

4. Енергія магнітного поля

Явище електромагнітної індукції є свідченням виконання закону збереження енергії. Змінний магнітний потік призводить до появи електрорушійної сили, яка є джерелом електричної енергії. Таким чином, можна стверджувати, що енергія магнітного поля перетворюється у енергію електричного струму. І навпаки, енергія електричного струму перетворюється у енергію магнітного поля.

Розглянемо електричне коло, яке складається з послідовно з'єднаних конденсатора C , котушки індуктивності L і вимикача (рис.4.24). Надамо конденсатору заряд q . Енергія накопичена у конденсаторі – це енергія електричного поля, яка дорівнює:

$$W_{\text{ел}} = \frac{CU^2}{2},$$

де $U = \frac{q}{C}$ – напруга на обкладинках конденсатора.

Струм у електричному колі відсутній доки не буде замкнено вимикач. Після замикання електричного кола конденсатор починає розряджатися і через котушку індуктивності протікатиме струм. Виникає явище електромагнітної індукції, яке у свою чергу викликає появу струму самоіндукції. Струм самоіндукції має протилежний напрямок до початкового струму розрядки конденсатора. Струм самоіндукції перезаряджатиме конденсатор зі зміною знаків заряду на його обкладинках.

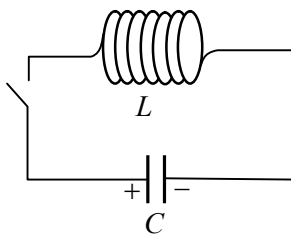


Рис.4.24

Енергія магнітного поля зосереджена у котушці індуктивності і дорівнює:

$$W_{\text{маг}} = \frac{LI^2}{2},$$

де I – струм, який протікає через котушку індуктивності.

Загальна енергія електромагнітного поля дорівнює сумі енергій електричного і магнітного полів:

$$W = W_{\text{ел}} + W_{\text{маг}} = \frac{CU^2}{2} + \frac{LI^2}{2}.$$

Енергія електромагнітного поля залишається незмінною, якщо відсутні втрати енергії у електричному колі на подолання опору провідників.

Задача 1. Індукція однорідного магнітного поля дорівнює 0,5 Тл. Знайти магнітний потік через рамку площею 25 см², розміщену перпендикулярно до ліній індукції. Як зміниться магнітний потік, якщо рамку повернути на кут $\phi = 60^\circ$ від початкового положення?

Дано:

$$B = 0,5 \text{ Тл}$$

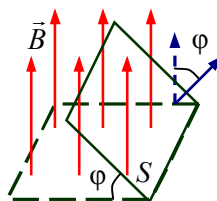
$$S = 25 \text{ см}^2 = 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$$

$$\phi_1 = 0^\circ$$

$$\phi_2 = 60^\circ$$

Знайти:

$$\Phi_1 = ?$$



$$\Phi_1 = ?$$

Розв'язок.

$$\Phi_1 = B \cdot S \cdot \cos \varphi_1$$

$$\Phi_2 = B \cdot S \cdot \cos \varphi_2$$

$$\Phi_1 = 0,5 \cdot 2,5 \cdot 10^{-3} \cdot \cos 0^\circ = 1,25 \cdot 10^{-3} \text{ Вб}$$

$$\Phi_2 = 0,5 \cdot 2,5 \cdot 10^{-3} \cdot \cos 60^\circ = 1,25 \cdot 10^{-3} \cdot 0,5 \text{ Вб} = 6,25 \cdot 10^{-4} \text{ Вб}$$

Відповідь: $\Phi_1 = 1,25 \cdot 10^{-3} \text{ Вб}$ $1,25 \cdot 10^{-3} \text{ Вб}$; $\Phi_2 = 6,25 \cdot 10^{-4} \text{ Вб}$.

Задача 2. За 5 мс магнітний потік, який пронизує контур, спадає з 9 мВб до 4 мВб. Визначити ЕРС індукції у контурі.

Розв'язок. ЕРС електромагнітної індукції дорівнює:

$$\varepsilon = -\frac{\Delta \Phi}{\Delta t}.$$

$$\varepsilon = -\frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = -\frac{\Phi_2 - \Phi_1}{\Delta t} = -\frac{(4 - 9) \cdot 10^{-3} \text{ Вб}}{5 \cdot 10^{-3} \text{ с}} = 1 \text{ В}.$$

Відповідь: $\varepsilon = 1 \text{ В}$.

СЛОВА І СЛОВОСПОЛУЧЕННЯ

Генрі	Henry	Вебер	Weber
електромагнітна індукція	electromagnetic induction	індукційний струм	induction current
електромагнітне поле	electromagnetic field	виток	turn
магнітний потік	magnetic flux	котушка	coil

І. Дайте відповіді на запитання

1. Що називається магнітним потоком?
2. В яких одиницях вимірюється магнітний потік?
3. Що таке електромагнітна індукція?
4. В яких одиницях вимірюється електромагнітна індукція?

5. Чому виникає явище самоіндукції?

II. Виконайте вправи

1. Сформулюйте закон електромагнітної індукції.
2. Запишіть математичний вираз закону електромагнітної індукції Фарадея.
3. Сформулюйте закон Ленца.
4. Запишіть вираз для енергії магнітного поля.
5. Знайти швидкість зміни магнітного потоку в котушці з 2000 витків при збудженні в ній ЕРС індукції 120 В.
6. У котушці з 200 витків збуджується постійна ЕРС індукції 160 В. На скільки змінився протягом 5 мс магнітний потік через кожний з витків?
7. Дротовий виток радіусом 1 см, що має опір 1 мОм, пронизується однорідним магнітним полем, лінії індукції якого перпендикулярні до площини витка. Індукція магнітного поля плавно змінюється зі швидкістю 0,01 Тл/с. Яка кількість теплоти виділиться у витку за 1 хвилину?

Запам'ятайте!
1. Що створює що Струм створює магнітне поле.
2. Що протидіє чому Магнітне поле індукованого струму протидіє зміні магнітного потоку

§ 35. Змінний струм. Електромагнітні хвилі

1. Коливальний електричний контур

У електричному колі, яке складається з послідовно з'єднаних конденсатора і котушки індуктивності (рис.4.24) виникають коливання електричного струму і напруги. Таке електричне коло

називається **коливальним контуром**, а коливання у ньому є гармонійними (якщо немає опору провідників).

Гармонійними коливаннями називаються коливання параметрів системи, які змінюються за законом **синуса** або **косинуса**. Так в електричному колі за законами синуса або косинуса змінюються заряд, напруга і струм. За відсутності електричного опору коливання не затухатимуть.

Щоб у коливальному контурі виникли **вільні коливання**, системі необхідно передати енергію, наприклад зарядити конденсатор. В початковий момент часу на обкладинках конденсатора буде максимальний електричний заряд q_{\max} . Величина заряду змінюється із часом за законом:

$$q(t) = q_{\max} \cdot \cos \omega t,$$

де ωt – фаза коливань, ω – циклічна частота коливань.

У 1853 р. англійський фізик Вільям Томсон (лорд Кельвін) вивів формулу для періоду власних коливань електричного коливального контуру:

$$T = 2\pi \cdot \sqrt{LC}.$$

Тоді циклічна частота власних коливань дорівнює:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

Щоб визначити силу струму у колі потрібно знайти похідну функції зміни заряду по часу:

$$I(t) = \frac{dq}{dt} = q'(t) = -q_{\max} \omega \cdot \sin \omega t$$

$$I(t) = -q_{\max} \omega \cdot \sin \omega t,$$

де $I_{\max} = q_{\max} \omega$ – максимальна сила струму у колі.

Зміна напруги на обкладинках конденсатора співпадає зі зміною заряду:

$$U(t) = \frac{q_{\max}}{C} \cdot \cos \omega t = U_{\max} \cdot \cos \omega t.$$

2. Вихрове електричне поле

Виникнення індукційного струму у коливальному контурі

призводить до зміни магнітного потоку. Виникає електричний струм, який створює змінне магнітне поле. Це змінне магнітне поле є причиною появи індукційного електричного струму.

Електричне поле може бути створене не тільки електричними зарядами. Електричне поле, яке виникає при змінах магнітного поля, називають **вихровим електричним полем**. Робота сил вихрового електричного поля по переміщенню електричних зарядів є причиною виникнення ЕРС індукції. Вихрове електричне поле не пов'язане з електричними зарядами, його лінії напруженості є замкненими.

У 1865 р. шотландський фізик Джеймс Максвелл створив теорію електромагнітного поля, у якій висунув гіпотезу, що електричне і магнітні поля мають однакові властивості. При будь-якій зміні електричного поля в **навколишньому просторі** виникає вихрове магнітне поле. І навпаки, при будь-якій зміні магнітного поля в навколишньому просторі виникає вихрове електричне поле. В результаті утворюється система зв'язаних змінних електричних і магнітних полів (рис. 4.26).

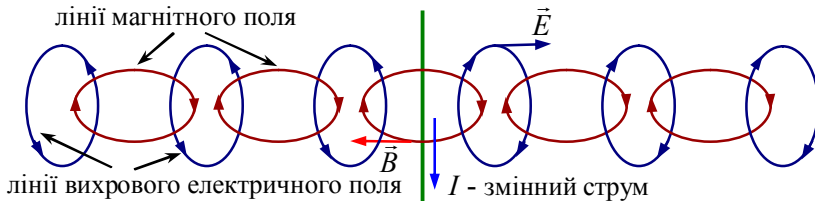


Рис.4.26

4. Електромагнітні хвилі

Теорія електромагнітного поля базується на рівняннях Максвелла у інтегральній і диференціальній формі. Ці рівняння описують електромагнітне поле як коливання взаємно перпендикулярних векторів напруженості електричного поля та магнітної індукції, які поширюються у просторі з часом. Електромагнітне поле поширюється у вигляді поперечної електромагнітної хвилі, яка складається з двох хвиль –

електричної і магнітної, фази коливань яких співпадають (рис.4.27).

Електромагнітна хвиля – це процес поширення в просторі зв’язаних коливань електричного та магнітного поля.

Швидкість поширення електромагнітної хвилі – це відстань, на яку поширюється електромагнітна хвиля за одиницю часу. Швидкість поширення електромагнітних хвиль у вакуумі є сталою й дорівнює швидкості світла у вакуумі: $c = 3 \cdot 10^8$ м/с .

Довжина хвилі λ – це відстань, на яку поширюється електромагнітна хвиля за час, що дорівнює періоду коливань. Довжина хвилі пов’язана зі швидкістю її поширення у вакуумі формулою:

$$c = \frac{\lambda}{T} = \lambda \cdot \nu ,$$

де T – період коливань, ν – частота коливань.

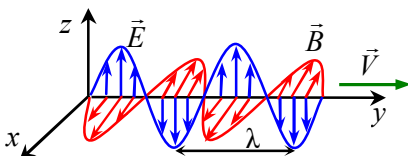


Рис.4.27

Швидкість електромагнітної хвилі у вакуумі є максимально можливою швидкістю у природі. Під час переходу з одного середовища в інше швидкість поширення електромагнітної хвилі змінюється, також змінюється її довжина. При цьому частота коливань електромагнітної хвилі залишається сталою.

У 1888 р. Генріх Герц вперше штучно створив електромагнітну хвилю за допомогою **генератора** електромагнітних коливань, схема якого зображена на рис.4.28. Герц також дослідив властивості електромагнітних хвиль, які передбачені рівняннями Максвелла.

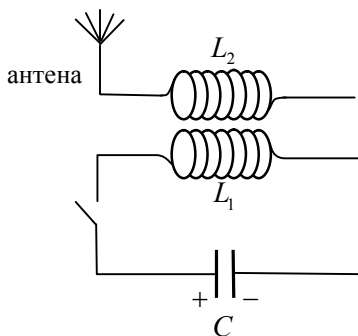


Рис.4.28

Досліди Герца показали, що електромагнітні хвилі відбиваються від провідника, заломлюються на межі іншого середовища, долають перешкоди. При цьому **відбивання, заломлення, інтерференція, дифракція і поляризація** електромагнітних хвиль відбуваються за такими самими законами, які виконуються для світла. Таким чином, Генріх Герц підтвердив висновок Максвелла про електромагнітну природу світла.

Шкала електромагнітних хвиль в залежності від їхньої довжини наведена у таблиці.

Назва	Довжина хвилі
Наддовгі	1 000 000 км – 15 км
Радіохвилі	15 км – 10 см
Ультрарадіохвилі	10 см – 0,1 мм
Інфрачервоні	100 мкм – 0,8 мкм
Світлові	800 нм – 400 нм
Ультрафіолетові	400 нм – 5 нм
Рентгенівські хвилі	5 нм – 0,004 нм
Гамма-промені	0,004 нм – 0,0001 нм

Задача 1. У скільки разів зміниться період коливань у коливальному контурі, якщо до плоского повітряного конденсатора паралельно приєднати такий самий конденсатор, у якого простір між пластинами заповнений слюдою. Відносна діелектрична проникність слюди дорівнює 6.

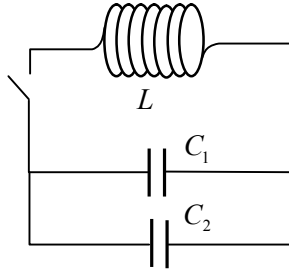
Дано:

$$\epsilon_1 = 1$$

$$\epsilon_2 = 6$$

Знайти:

$$\frac{T_2}{T_1} - ?$$



Розв'язок. Період коливань у коливальному контурі визначається формулою Томсона: $T = 2\pi\sqrt{LC}$.

Електроємність плоского конденсатора дорівнює:

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{d}.$$

Тоді $C_1 = \frac{\epsilon_0 \epsilon_1 S}{d}$, $C_2 = \frac{\epsilon_0 \epsilon_2 S}{d}$. При паралельному з'єднанні загальна електроємність дорівнюватиме:

$$C_{\text{заг}} = C_1 + C_2 = \frac{\epsilon_0 S}{d} + \frac{6 \cdot \epsilon_0 S}{d} = 7 \frac{\epsilon_0 S}{d} = 7C_1$$

Тоді відношення періодів дорівнює:

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{2\pi\sqrt{L(C_1 + C_2)}}{2\pi\sqrt{LC_1}} = \sqrt{\frac{7C_1}{C_1}} = \sqrt{7} \approx 2,65$$

$$T_2 \approx 2,65 \cdot T_1$$

Відповідь: період коливань збільшиться приблизно у 2,65 рази.

СЛОВА І СЛОВОСПОЛУЧЕННЯ

коливальний контур	oscillating circuit	змінний струм	alternating current
електромагнітна хвиля	electromagnetic wave	гармонійні коливання	harmonic oscillation
вихрове поле	vortex field	генератор	generator
відбивання	reflection	інтерференція	interference
заломлення	refraction	дифракція	diffraction
поляризація	polarization	навколишній простір	surrounding space

I. Дайте відповіді на запитання

1. Що таке коливальний електричний контур?
2. Які коливання електричного струму називаються гармонійними?
3. Що таке вихрове електричне поле? Чим воно відрізняється від звичайного електричного поля?
4. Що називається електромагнітною хвилею? Які основні характеристики електромагнітних хвиль?
5. Які основні властивості електромагнітної хвилі?

II. Виконайте вправи

1. Запишіть закон зміни заряду конденсатора у коливальному контурі за наявності гармонійних коливань.
2. Виконайте диференціювання функції зміни заряду і отримайте функцію зміни електричного струму у коливальному контурі.
3. Перерахуйте назви електромагнітних хвиль за їх довжиною.
4. Амплітуда сили струму у контурі становить 1 мА, максимальний заряд конденсатора – 10 мкКл. Визначте циклічну частоту коливань.
5. У коливальному контурі заряд конденсатора змінюється за законом $q = 5 \cdot 10^{-6} \sin 10^3 \pi t$. Визначте максимальний магнітний потік, що пронизує котушку, якщо ємність конденсатора дорівнює 2 мкФ.

Запам'ятайте!
1. Хто створив що
Джеймс Максвелл створив теорію електромагнітного поля.
2. Хто підтвердив що
Генріх Герц підтвердив висновок Максвелла про електромагнітну природу світла.

§ 36. Геометрична оптика

1. Природа світла

Оптика – це розділ фізики, в якому вивчаються природа світла, закони розповсюдження світлових хвиль і процеси взаємодії світла з речовиною. Оптику умовно поділяють на три частин.

Геометрична оптика розглядає світло як прямолінійний промінь. **Хвильова оптика** розглядає світло як електромагнітну хвилю. **Квантова оптика** розглядає світло як потік фотонів.

За сучасними уявленнями, світло – це складний електромагнітний процес, який має як хвильові, так і **корпускулярні** властивості. Слово «корпускулярні» походить від латинської слова *corpusculum* (лат. – «частинка»).

Інтерференція, дифракція, поляризація світла – це фізичні явища, які обумовлені хвильовими властивостями світла. Ці явища описуються **хвильовою теорією світла**.

Фотоефект, атомні і молекулярні спектри, теплове випромінювання – це фізичні явища, які обумовлені корпускулярними властивостями світла. Ці явища описуються **квантовою теорією**.

Хвильова (електромагнітна) та корпускулярна (квантова) теорії доповнюють одна одну, відображають дуалістичні властивості світла.

Дуалістичні властивості (дуалізм) означає, що світло є одночасно і хвилею, і частинкою.

2. Закони відбивання і заломлення світла

В однорідному середовищі поширення світла відбувається **прямолінійно**. Геометричну лінію, яка вказує напрямок поширення світла, називають **світловим променем**. Утворення тіні пояснюється **прямолінійністю** поширення світла.

Великою кількістю спостережень та експериментів було встановлено чотири основні закони оптичних явищ:

- 1) закон прямолінійного поширення світла;
- 2) закон незалежності світлових променів;
- 3) закон відбивання світла;
- 4) закон заломлення світла.

Відбивання світла – це зміна напрямку променя на межі двох середовищ, коли промінь залишається в тому ж самому середовищі (рис.4.29).

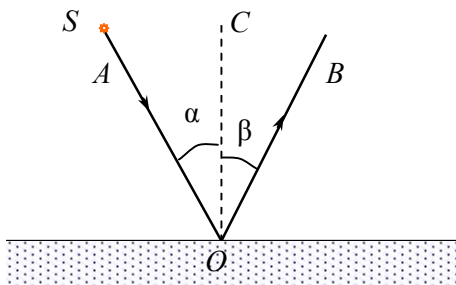


Рис.4.29

Тут AO – падаючий промінь; OB – відбитий промінь, OC – перпендикуляр, проведений в точці падіння світла.

Закони відбивання світла:

1) падаючий промінь AO , що падає на поверхню і відбитий промінь OB лежать в одній площині з перпендикуляром OC до границі поділу середовищ;

2) кут відбивання β дорівнює куту падіння α . Відбивання світла, яке задовольняє цим законам, називається **дзеркальним відбиванням**. Якщо умова дзеркальності не

виконується, то відбивання називається **дифузним**.

Заломлення світла – це зміна напрямку променів на межі двох середовищ (рис.4.30), де S – джерело світла, AO – падаючий промінь, OB – заломлений промінь.

Відношення швидкості світла у вакуумі c до швидкості світла V в даному середовищі називається **абсолютним показником заломлення** цього середовища:

$$n = \frac{c}{V}.$$

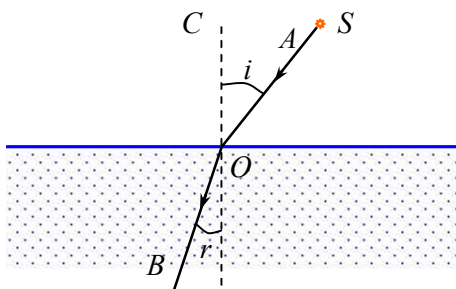


Рис.4.30

Відносним показником заломлення n_{21} другого середовища відносно першого називається відношення швидкості світла в першому середовищі V_1 до швидкості світла в другому середовищі V_2 :

$$n_{21} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{n_2}{n_1},$$

де n_1 та n_2 – абсолютні показники заломлення першого і другого середовищ. Якщо $n_{21} > 1$, то друге середовище називається оптично більш щільним (з більшою оптичною густиною), ніж перше середовище. У таблиці наведена швидкість світла у деяких середовищах.

Середовище	Швидкість світла, м/с
повітря	$3 \cdot 10^8$
вода	$2,25 \cdot 10^8$
скло	$1,98 \cdot 10^8$
діамант	$1,24 \cdot 10^8$

Закони заломлення світла:

1) заломлений промінь ОВ і падаючий промінь АО лежать в одній площині з перпендикуляром ОС до границі поділу середовищ в точці падіння променя;

2) відношення синусу кута падіння до синусу кута заломлення є сталою величиною для даних двох середовищ та дорівнює відносному показнику заломлення цих середовищ:

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{n_2}{n_1} = n_{21}$$

Закони відбивання і заломлення світла справедливі для однорідних середовищ за умови відсутності поглинання світла. Результатом заломлення променів світла у різних шарах однієї речовини, які мають різні коефіцієнти заломлення, спостерігається явище **рефракції**. Наприклад, прошарки повітря біля поверхні землі мають вищу температуру і, відповідно, інший коефіцієнт заломлення. Тому можливе викривлення зображення предметів.

Рефракція – це явище заломлення та викривлення променів світла у шарах однієї речовини з різним коефіцієнтом заломлення.

3. Явище повного внутрішнього відбивання

Якщо світлові промені падають із середовища з більшою оптичною густиною (скло) у середовище з меншою оптичною густиною (вода), то при кутах падіння $i \geq i_3$, де $\sin i_3 = n_{21}$, заломлення світла не відбувається.

За умови $i = i_3$ кут заломлення дорівнює $r = \frac{\pi}{2}$ та при $i > i_3$

світло не перетинає границю з іншим середовищем (рис.4.31).

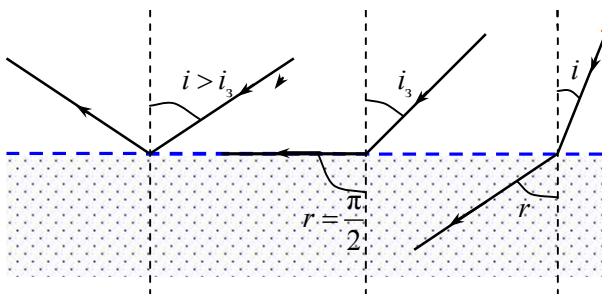


Рис.4.31

Це явище називається **повним внутрішнім відбиванням**. Якщо світло переходить із середовища $n_1 = n$ у повітря, для якого $n_2 \approx 1$, то умова повного внутрішнього відбивання набуде вигляду: $\sin i_3 = \frac{1}{n}$.

4. Дисперсія світла

Результатом проходження білого світла через скляну **призму** є його розкладання на складові і утворення на екрані кольорової смуги з семи кольорів, яка називається **дисперсійним спектром**. Світло різного кольору має різну довжину світлової хвилі (рис.4.32).

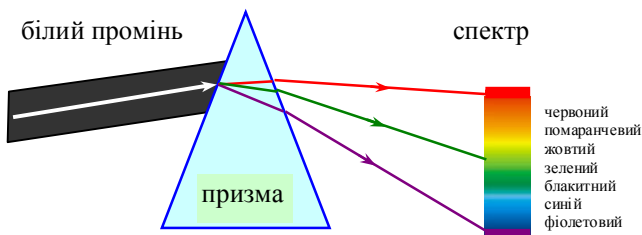


Рис.4.32

Явище залежності показника заломлення речовини від довжини світлової хвилі називається **дисперсією світла** $n = f(\lambda)$ (рис.4.33).

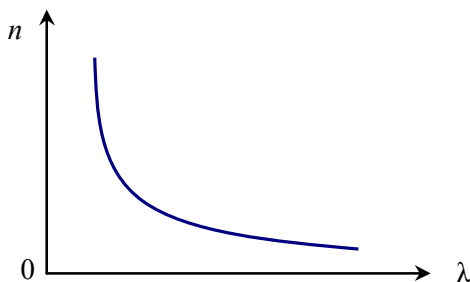


Рис.4.32

Розкладання природного світла і утворення спектру – це наслідок дисперсії. Якщо показник заломлення зменшується зі збільшенням довжини хвилі, то дисперсія світла називається **нормальною дисперсією**, в іншому випадку – **аномальною дисперсією**.

4. Формула лінзи

Оптична лінза – це оптичний елемент, який здатен заломлювати світлові промені. Лінзи виготовляють з прозорого матеріалу: скло, пластик, кварц тощо. Око людини має природну лінзу – **кришталік**. Лінзи мають дві або одну сферичну поверхню. Тонкою лінзою називають лінзу, товщина якої набагато менша кривизни її поверхні. Лінзи бувають опуклі і ввігнуті. Опуклі лінзи збирають промені (**збирна лінза**, рис.4.33, а), ввігнуті лінзи розсіюють промені (**розсіювальна лінза**, рис.4.33, б).

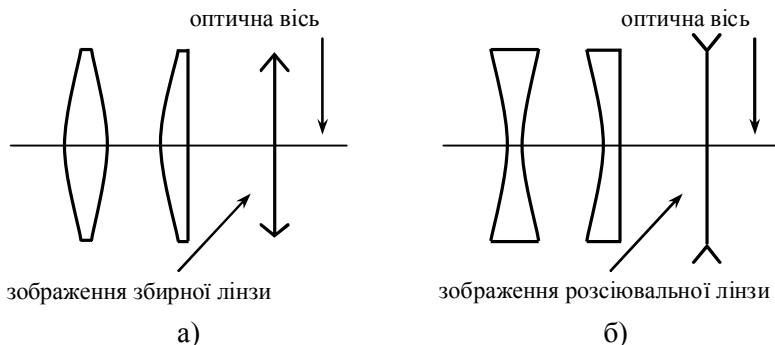


Рис.4.33

Фокальна площина – це площина на якій перетинаються паралельні промені, які проходять через лінзу.

Фокус – це точка перетину оптичної осі з фокальною площиною. Промінь, паралельний оптичній осі, після заломлення перетинає оптичну вісь у фокусі. Промінь, який проходить через центр лінзи O не змінюється, тобто проходить крізь лінзу без заломлення. Лінза має два фокуси і дві фокальні площини (рис.4.34).

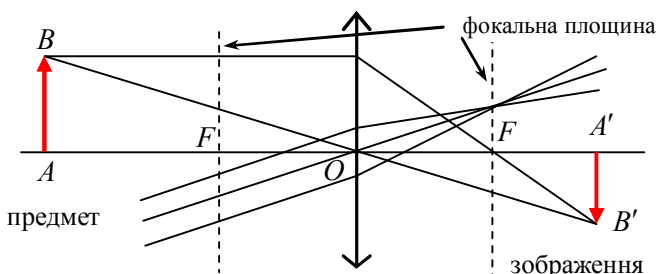


Рис.4.34

Оптичні властивості лінзи задаються **фокусною відстанню** F і або **оптичною силою** $D = \frac{1}{F}$. Одиницею вимірювання

оптичної сили є **діоптрія** – $1D = \frac{1}{m}$. Одна діоптрія – це оптична сила системи з фокусною відстанню 1 м.

Фокусна відстань лінзи F пов'язана з відстанню від лінзи до предмету та його зображення співвідношенням, яке називається **формула лінзи**:

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{d} + \frac{1}{f},$$

де F – фокусна відстань (відстань $|OF|$ від фокусу F до центру лінзи), d – відстань $|AO|$ від **предмету** до центру лінзи, f – відстань $|OA'|$ від **зображення** предмету до центру лінзи (рис.4.34).

Правило знаків при застосуванні формули лінзи:

1. перед $\frac{1}{F}$ ставиться знак «+», якщо лінза збирна, і «–», якщо лінза розсіювальна;
2. перед $\frac{1}{f}$ ставиться знак «+», якщо зображення дійсне, і «–», якщо воно уявне;
3. перед $\frac{1}{d}$ ставиться знак «+», якщо предмет дійсний (на лінзу падає розбіжний пучок променів), і «–», якщо предмет уявний (на лінзу падає збіжний пучок променів).

Задача 1. На скляну пластинку, показник заломлення якої $n = 1,5$ падає промінь світла. Знайти кут падіння променя, якщо кут між заломленим і відбитим променями дорівнює 90° .

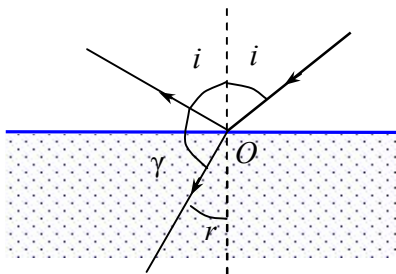
Дано:

$$n = 1,5$$

$$\gamma = 90^\circ$$

Знайти:

$$i = ?$$



Розв'язок. З рисунку видно, що $i + \gamma + r = 180^\circ$.

$$\text{Звідси } r = 180^\circ - i - \gamma, \quad r = 90^\circ - i.$$

Згідно із законом заломлення світла $\frac{\sin i}{\sin r} = n$, де

$$\sin r = \sin(90^\circ - i) = \cos i$$

$$\text{Тоді } \frac{\sin i}{\cos i} = n, \quad i = \arctg n \approx 0,98 \text{ рад.}$$

$$\text{Відповідь: } i \approx 0,98 \text{ рад} \approx 56^\circ.$$

Задача 2. Довжина хвилі світла червоної лінії в спектрі водню становить 656 нм. Визначити довжину хвилі цього ж світла в склі, якщо показник заломлення скла для цих променів $n = 1,51$.

Дано:

$$\lambda_0 = 656 \text{ нм}$$

$$n = 1,51$$

Знайти:

$$\lambda - ?$$

Розв'язок. При переході світла з одного середовища в інше частота світла не змінюється, а змінюється довжина хвилі.

$$\text{Для вакууму } \lambda_0 = \frac{c}{\nu}, \text{ для скла } \lambda = \frac{V}{\nu}, \text{ тоді } \frac{\lambda_0}{\lambda} = \frac{c}{V}.$$

$$\text{Оскільки } \frac{c}{V} = n, \text{ то } \frac{\lambda_0}{\lambda} = n. \text{ Звідси } \lambda = \frac{\lambda_0}{n} = \frac{656 \text{ нм}}{1,51} = 434 \text{ нм.}$$

$$\text{Відповідь: } \lambda = 434 \text{ нм.}$$

СЛОВА І СЛОВОСПОЛУЧЕННЯ

оптика	optics	абсолютний показник заломлення	absolute refractive index
дифузне відбивання	diffuse reflection	відносний показник заломлення	relative refractive index
корпускула	corpuscle	однорідне середовище	homogeneous medium
джерело світла	light source	повне внутрішнє відбивання	total internal reflection
частинка	particle	світловий промінь	light ray
дуалізм	dualism	відбивання світла	light reflection
призма	prism	заломлення світла	light refraction
тінь	shadow	дзеркальне відбивання	specular reflection
дисперсія	dispersion	спектр	spectrum

I. Дайте відповіді на запитання

1. Що вивчає оптика?
2. Які явища обумовлені хвильовими властивостями світла?
3. Які явища обумовлені корпускулярними властивостями світла?
4. Що означає дуалізм світла?
5. Що називається дисперсією світла?

II. Виконайте вправи

1. Сформулюйте закони відбивання та заломлення світла.
2. Запишіть вирази для абсолютного і відносного показників заломлення.
3. Запишіть умову повного внутрішнього відбивання.
4. Швидкість світла у воді $2,25 \cdot 10^8$ м/с, а у склі $2,0 \cdot 10^8$ м/с. Знайдіть показник заломлення скла відносно води.
5. Промінь падає зі скла у воду. Знайдіть відношення швидкостей світла в цих середовищах. Знайдіть кут заломлення, якщо кут падіння дорівнює 30° .
6. Предмет розміщений на відстані 0,15 м від розсіювальної лінзи з подвійною фокусною відстанню 0,6 м. На якій відстані від лінзи отримується зображення даного предмета?

Запам'ятайте!
1. Що характеризується чим
Світло різного кольору характеризується різними показниками заломлення у даному середовищі

§ 37. Хвильова оптика

Розглянемо явища, в яких світло виявляє хвильові властивості.

1. Інтерференція світла.

Інтерференція світла – це явище накладання когерентних світлових хвиль, в результаті якого в одних місцях простору виникають максимуми, а в інших – мінімуми інтенсивностей.

Когерентні хвилі – це хвилі, які мають однакові частоти і стали різницю фаз.

Розглянемо накладання двох когерентних хвиль. Якщо на шляху джерела S поставити перешкоду з двома щілинами S_1 і S_2 , то вони стануть джерелами когерентних хвиль.

Розглянемо точку A екрану, яка знаходиться на відстанях r_1 і r_2 від S_1 і S_2 (рис.4.35).

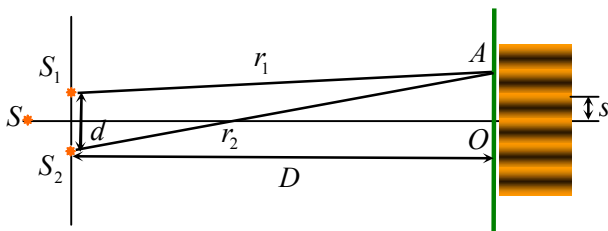


Рис.4.35

Різниця $r_2 - r_1$ називається **геометричною різницею ходу хвиль**:

$$\Delta = r_2 - r_1.$$

Різниця фаз $\Delta\varphi$ залежить від геометричної різниці ходу Δ променів: $\Delta\varphi = \frac{2\pi\Delta}{\lambda}$.

Інтерференційна картина на екрані, яка утворюється двома монохроматичними когерентними джерелами S_1 і S_2 , є послідовним чергуванням світлих і темних смуг (максимуми і мінімуми освітленості на рис.4.35).

Максимуми освітленості спостерігаються в тих точках екрану, для яких різниця ходу Δ дорівнює цілому числу хвиль:

$$\Delta = k\lambda,$$

або парному числу півхвиль:

$$\Delta = 2k \cdot \frac{\lambda}{2}$$

В ці точки хвилі приходять з однаковими фазами.

Мінімуми освітленості спостерігаються в тих точках, для яких різниця ходу Δ дорівнює непарному числу півхвиль:

$$\Delta = (2k + 1) \cdot \frac{\lambda}{2},$$

де λ – довжина хвилі, $k = 0, \pm 1, \pm 2 \dots$.

В ці точки хвилі приходять із протилежними фазами.

Відстань між двома сусідніми максимумами s дорівнює:

$$s = \frac{\lambda D}{d},$$

де λ – довжина хвилі, d – відстань між щілинами, D – відстань від щілин до екрану. Також має виконуватись умова $D \gg d$. Вимірювання величини s для відомих відстаней d і D дозволяє експериментально визначити довжину світлової хвилі λ .

2. Дифракція світла

Дифракція світла – це явище, що полягає у відхиленні ходу променів від законів геометричної оптики. Це універсальне хвильове явище. Дифракція – це, наприклад, огинання світловими хвилями перешкод, тобто проникнення хвилі в область геометричної тіні. Перешкодами можуть бути отвори в непрозорих екранах, границі непрозорих тіл, щілини.

Дифракція супроводжується появою максимумів і мінімумів інтенсивності світла, тобто **інтерференцією вторинних хвиль**, що утворились після огинання світловим променем перешкод.

Розглянемо щілину BC шириною b , яка є перешкодою на шляху променів до екрану (рис.4.36).

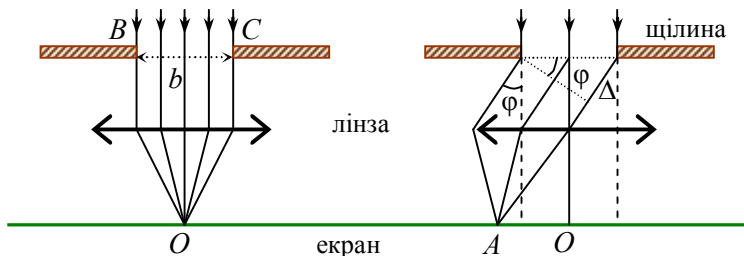


Рис.4.36

Лінза збирає всі паралельні промені в одній точці у фокальній площині лінзи (проходить через точку O на рисунку). Так як лінза не дає різниці хода, то в точці O буде центральна світлова смуга (головний максимум). Вторинні промені від щілини можуть розповсюджуватись під довільним кутом ϕ , який називається кутом дифракції. На екрані буде спостерігатися дифракційна картина: чергування темних і світлих смуг, симетричних відносно центральної світлої смуги в точці O .

У довільній точці A (рис. 4.36) може спостерігатися максимум або мінімум інтенсивності, а може бути проміжне значення інтенсивності в залежності від співвідношення між шириною щілини, кутом ϕ та довжиною хвилі.

3. Дифракційна ґратка

Найпростіша дифракційна ґратка — це система з N однакових щілин шириною b , кожна з яких розташована на рівних непрозорих проміжках на відстані a одна від одної (рис.4.37).

Світлова хвиля розділяється щілинами ґратки на окремі когерентні вторинні хвилі. Ці хвилі зазнають дифракції на щілинах та інтерферують. Оскільки для різних довжин хвиль максимума інтерференції виявляються під різними кутами (обумовленими різницею ходу променів, що інтерферують), то біле світло розкладається в спектр.

Величина $d = b + a$ називається **сталюю ґратки** або **періодом ґратки**.



Рис.4.37

Головні дифракційні максимуми на дифракційній ґратці спостерігаються під кутами φ , які задовольняють умові:

$$d \sin \varphi = n\lambda \quad (n = 0, 1, 2 \dots),$$

де n – порядок головного максимуму.

Дифракційні мінімуми визначаються умовою:

$$b \sin \varphi = m\lambda \quad (m = 1, 2, 3 \dots)$$

Дифракційна ґратка є найпростішим оптичним приладом для вимірювання довжин хвиль.

4. Поляризація світла

Світлові хвилі є поширенням поперечних електромагнітних коливань. Напрямок коливання світлової хвилі є перпендикулярним до напрямку поширення хвилі. Реальне джерело світла складається з безлічі атомів, які випромінюють хаотично, тобто світлові хвилі мають різні площини коливань. Це означає, що кожен промінь реального джерела світла має багато орієнтованих площин коливання. Такий промінь є природним світлом або неполяризованим світлом (рис.4.38, а).

Природне світло можна поляризувати, тобто створити умови, щоб коливання вектора напруженості електричного поля відбувалося упорядковано, наприклад, уздовж одного напрямку OO' (рис.4.38, б).

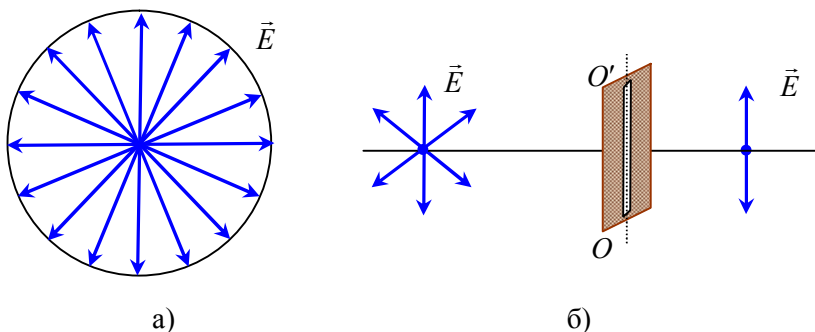


Рис.4.38

Світло, у якого електричні коливання відбуваються лише в одній площині, називається **плоскополяризованим**. Світло, що випромінюється окремим атомом, є поляризованим протягом всього періоду випромінювання.

Світло, яке відбивається від границі розділу діелектриків буде повністю поляризованим у площині, перпендикулярній площині падіння, якщо кут падіння i задовольняє умові (**закон Брюстера**):

$$\operatorname{tg} i = n_{21},$$

де n_{21} – відносний показник заломлення середовища.

Природне світло поляризується при проходженні в певних напрямках через деякі речовини, наприклад, турмалін.

Задача. Знайти найбільший порядок спектру для жовтої лінії натрію Na з довжиною хвилі 589 нм, якщо період дифракційної ґратки дорівнює 2 мкм.

Розв'язок. З формули дифракційної ґратки: $d \sin \varphi = n\lambda$. Порядок спектру буде максимальним, коли $\sin \varphi = 1$, тобто при куті відхилення $\varphi = 1,57$ рад.

$$\text{Отже } n = \frac{\lambda}{d}, \quad n = 3.$$

Відповідь: $n = 3$.

СЛОВА І СЛОВОСПОЛУЧЕННЯ

когерентні джерела	coherent sources	порядок спектру	order spectrum
смуга	band	спектр	spectrum
інтерференція	interference	освітленість	luminosity
посилення світла	light amplification	ослаблення світла	light attenuation
різниця ходу	path difference	різниця фаз	phase difference
дифракційна ґратка	diffraction grating	монохроматичне світло	monochromatic light
період ґратки	period grating	дифракція	diffraction
природне світло	natural light	поляризоване світло	polarized light
перешкода	obstacle	екран	screen

І. Дайте відповіді на запитання

1. Що називається інтерференцією світла?
2. Що таке когерентні джерела світла?
3. Чому дорівнює геометрична різниця ходу хвиль?
5. Яке явище називається дифракцією світла?
6. Що таке дифракційна ґратка?
7. Що називається поляризацією світла?

ІІ. Виконайте вправи

1. Сформулюйте умови максимуму і мінімуму освітленості при інтерференції світла.
2. Запишіть умову головних дифракційних максимумів і мінімумів.
3. Різниця ходу двох хвиль, що інтерферують у вакуумі, дорівнює: а) 0; б) $0,2 \lambda$; в) $0,5 \lambda$; Знайти відповідні різниці фаз?
4. На дифракційну ґратку з періодом $d = 0,004 \text{ мм}$ падає нормально (під прямим кутом) монохроматичне світло. При цьому головний максимум четвертого порядку відповідає відхиленню променів на кут 30° . Визначити довжину хвилі світла.

§ 38. Основні поняття квантової оптики

1. Фотони

Згідно квантової теорії, світло випромінюється окремими порціями енергії – **квантами світла**. Елементарна частинка світла, яка є квантом електромагнітного поля, називається **фотоном**. У квантовій оптиці світло розглядається як **потік фотонів**.

Основними характеристиками фотону є його енергія E та імпульс p . Енергія фотону пропорційна його частоті або обернено пропорційна довжині хвилі:

$$E = h\nu \quad \text{або} \quad E = h \frac{c}{\lambda},$$

де c – швидкість світла у вакуумі; $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – стала Планка³¹; ν – частота; λ – довжина світлової хвилі у вакуумі.

Якщо енергію фотону $E = h\nu$ прирівняти до **релятивістської енергії**³² $E = mc^2$, то можна знайти **релятивістську масу** фотону:

$$m = \frac{h\nu}{c^2} = \frac{h}{c\lambda}$$

Релятивістська маса фотону – це аналог класичної маси тіла, яка входить до виразів кінетичної енергії і імпульсу тіла, що рухається зі швидкістю $V \ll c$.

Релятивістська маса $m_{\text{рел}}$ і класична маса $m_{\text{кл}}$ зв'язані співвідношенням:

³¹ Макс Планк (1858-1947) – німецький фізик, один з творців квантової механіки. У 1900 році заперечив неперервність випромінювання енергії та висунув ідею існування кванту – неподільної порції енергії $h\nu$.

³² Релятивістська теорія або теорія відносності, створена Альбертом Ейнштейном у 1905 році, описує зміни маси, довжини, енергії, імпульсу та часу для тіл, які рухаються зі швидкостями близькими до швидкості світла.

$$m_{\text{рел}} = \frac{m_{\text{кл}}}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}.$$

Маса фотону не пов'язана з **масою спокою** (класичною масою тіла). Маса спокою фотону дорівнює нулю. Фотон в стані спокою не існує.

Якщо вважати фотон частинкою, то його імпульс дорівнює:

$$p = mc = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}.$$

Енергія і імпульс фотону виражені через хвильові характеристики: частоту або довжину хвилі у вакуумі. При малих частотах ν переважають хвильові властивості світла, при великих ν – квантові властивості. Таким чином, у виразах для енергії і імпульсу фотона поєднані корпускулярні та хвильові властивості світла (корпускулярно-хвильовий дуалізм).

2. Фотоелектричний ефект (фотоефект)

Фотоефект – це явище «вибивання» світлом електронів з речовини. Для твердих і рідких тіл розглядають зовнішній та внутрішній фотоефект. Якщо електрони виходять за межі освітленої речовини, то фотоефект називається **зовнішнім фотоефектом**. Зовнішній фотоефект спостерігається у дослідах з вибивання електронів з поверхні металів під дією променів світла.

Експериментально встановлені **закони фотоефекту**:

1. Максимальна початкова швидкість V_{max} фотоелектронів залежить від частоти світла і властивостей поверхні металу.

2. Загальна кількість фотоелектронів n , які вириваються з катода за одиницю часу та сила фотоструму насичення I_n прямо пропорційні інтенсивності падаючого світла.

3. Для кожної речовини існує гранична найменша частота світла ν_{min} (червона границя фотоефекту), при якій має місце зовнішній фотоефект. Для частот $\nu < \nu_{\text{min}}$ фотоефект відсутній.

Схема досліду явища фотоефекту зображена на рис.4.38.

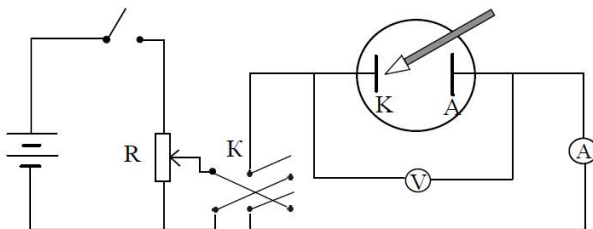


Рис.4.38

Пучок світла потрапляє на катод K – металеву пластину. З освітленої негативно зарядженої пластинки вириваються електрони, які під дією різниці потенціалів прямують до аноду A . Електричне коло стає замкненим. Амперметр показує струм величиною I . При вимкненні світла струм зникає.

Електрони, що вилітають з поверхні тіла, називаються **фотоелектронами**.

Німецький фізик Альберт Ейнштейн врахував квантову природу фотону і пояснив закони фотоефекту.

Рівняння Ейнштейна для фотоефекту:

$$h\nu = \frac{mV^2}{2} + A_{\text{вих}}.$$

Енергія фотона $h\nu$ витрачається на роботу виходу електрона з металу $A_{\text{вих}}$ та надання електрону кінетичної енергії $\frac{mV^2}{2}$.

Зовнішній фотоефект можливий за умови $h\nu_{\text{min}} \geq A_{\text{вих}}$.

Червона границя фотоефекту залежить тільки від роботи виходу електрона, тобто від хімічної природи металу:

$$\nu_{\text{min}} = \frac{A_{\text{вих}}}{h} \quad \text{або} \quad \lambda_{\text{max}} = \frac{ch}{A_{\text{вих}}}.$$

При довжинах хвиль $\lambda > \lambda_{\max}$ фотоефект не спостерігається.

Явище фотоефекту використовується в техніці. Прилади, дія яких заснована на явищах фотоефекту, називаються **фотоелементами**.

Задача. Знайти найбільшу швидкість електрона, що вилетів з вольфраму, при освітленні його світлом з довжиною хвилі 180 нм, якщо робота виходу електрона $7,2 \cdot 10^{-19}$ Дж.

Дано:

$$\lambda = 1,80 \cdot 10^{-7} \text{ м}$$

$$A_{\text{вих}} = 7,2 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$$

Знайти:

$$V_{\max} = ?$$

Розв'язок. Запишемо рівняння Ейнштейна для фотоефекту:

$$h\nu = \frac{mV^2}{2} + A_{\text{вих}},$$

де $m = 9,1 \cdot 10^{-31}$ кг – маса електрону; $\nu = \frac{c}{\lambda}$ – частота світла.

$$\text{Тоді } V_{\max} = \sqrt{\frac{2}{m} \left(\frac{hc}{\lambda} - A_{\text{вих}} \right)}.$$

$$V_{\max} = \sqrt{\frac{2}{9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}} \left(\frac{6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}}{1,80 \cdot 10^{-7} \text{ м}} - 7,2 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} \right)} \approx 9,2 \cdot 10^5 \text{ м/с}.$$

Відповідь: $V_{\max} \approx 9,2 \cdot 10^5 \text{ м/с}.$

СЛОВА І СЛОВОСПОЛУЧЕННЯ

квант світла	quantum of light	рівняння Ейнштейна	Einstein's equation
катод	cathode	фотоефект	photoelectric effect
анод	anode	фотоелектрон	photoelectron
фотон	photon	стала Планка	Planck's constant
робота виходу	work function	червона границя фотоефекту	threshold frequency

I. Дайте відповіді на запитання

1. Як називається елементарна частинка світла?
2. Чому дорівнює енергія фотона?
3. Від чого залежить імпульс фотона?
4. Чому маса спокою фотона дорівнює нулю?
5. Що називається фотоефектом?
6. Який фізичний зміст рівняння Ейнштейна?
7. За якої умови зовнішній фотоефект зникає?

II. Виконайте вправи

1. Запишіть вираз для енергії і імпульсу фотона.
2. Сформулюйте закони фотоефекту.
3. Фотоефект припиняється, якщо частота світла ν зменшується у три рази. Встановіть відповідність між фізичною величиною (цифра) та формулою (буква).

1. Робота виходу електрона

А. $\frac{2h\nu}{3}$

2. Максимальна кінетична енергія електронів

Б. $\sqrt{\frac{4mh\nu}{3}}$

3. Мінімальний імпульс фотонів, що викликають фотоефект

В. $\sqrt{\frac{4h\nu}{3m}}$

4. Імпульс вибитого електрона

Г. $\frac{h\nu}{3}$

Д. $\frac{h\nu}{3c}$

5. Червона границя фотоефекту вольфраму 230 нм. Визначити кінетичну енергію електронів, що вириваються з вольфраму ультрафіолетовим світлом з довжиною хвилі 150 нм.

6. Знайти роботу виходу електронів з металу, якщо фотоефект в ньому починається при частоті $\nu_{\min} = 6 \cdot 10^{14}$ Гц.

7. Визначте червону границю фотоефекту для цинку та максимальну швидкість фотоелектронів, що вибиваються з поверхні цинку світлом довжиною хвилі 200 нм. Робота виходу для цинку 3,74 еВ. ($1 \text{ еВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$).

Розділ 5. АТОМНА ТА ЯДЕРНА ФІЗИКА.

§ 39. Будова атома. Постулати Бора.

Атомна фізика вивчає будову атомів, їх взаємодію, будову електронних оболонок, закономірності випромінювання та поглинання енергії атомами.

1. Модель будови атома Резерфорда

В 1911 році Ернест Резерфорд запропонував „планетарну” **модель атому**. У цій моделі атом складається з центрального ядра, в якому концентрується майже вся маса атома та його позитивний заряд. Навколо ядра по коловим орбітам, подібно планетам навколо Сонця, рухаються електрони. Сукупність цих електронів назвали **електронною оболонкою**.

Планетарна модель атома знаходиться у протиріччі з рядом експериментальних фактів. Вона не пояснює випромінювання та поглинання атомами електромагнітних хвиль. Згідно класичної теорії електрон, рухаючись орбітою навколо атома, має постійно випромінювати електромагнітні хвилі. Електрон втрачатиме енергію на випромінювання і приблизно через 10^{-8} с мав би впасти на ядро, а атом припинити своє існування. Але атоми стабільні. Це означає, що електрони в атомах рухаються за іншими законами, які відмінні від законів класичної механіки та класичної електродинаміки.

2. Постулати Бора

У 1923 році датський фізик Нільс Бор для пояснення стабільності планетарної моделі атома запропонував два постулати:

1. Атому властиві цілком стійкі (**стаціонарні**) стани з відповідними значеннями енергії $E_1, E_2, \dots E_n$, у яких атом не поглинає і не випромінює електромагнітні хвилі. Це означає, що електрони в атомі **рухаються не на будь-яких орбітах**, а тільки на цілком певних, для яких виконується умова, що момент

імпульсу електрона mVr кратний величині $\frac{h}{2\pi}$, тобто

$$mVr = n \frac{h}{2\pi} = n\hbar ,$$

де m, V, r – відповідно маса, швидкість і радіус орбіти електрона; h – стала Планка; $n = 1, 2, 3, \dots$.

2. При переході з одного стаціонарного стану у інший атом випромінює або поглинає електромагнітну хвилю (фотон – квант випромінювання), частота якої визначається умовою

$$E_{\pi} - E_{\kappa} = h\nu ,$$

де E_{π} – початкова енергія атома; E_{κ} – енергія атома після випромінювання; ν – частота випромінювання.

За допомогою теорії Бора були обраховані:

- стаціонарні орбіти електрону атома водню;
- енергетичні рівні атома, що відповідають цим орбітам;
- всі переходи електрону з однієї орбіти на іншу та відповідні цим переходам частоти квантів випромінювання.

3. Природа атомних спектрів

Спектр випромінення – це сукупність електромагнітних хвиль, які випромінюються тілом.

Природу атомних спектрів пояснює квантова теорія. При переході атома з одного стаціонарного стану у інший відбувається випромінювання або поглинання кванту світла (фотона).

Залежно від агрегатного стану речовини та її молекулярної будови спектри випромінення бувають **лінійчатиими, смугастими та суцільними**.

Лінійчаті спектри складаються з окремих вузьких спектральних ліній, кожній з яких відповідає електромагнітна хвиля певної частоти. Такі спектри характерні для газів, у яких молекули дисоційовані на окремі атоми чи іони. Отже, лінійчаті спектри відповідають випромінненню незваємодіючих атомів.

Практичне застосування лінійчатих спектрів базується на

тому факті, що кожний хімічний елемент має свій характерний набір довжин хвиль спектральних ліній. Тому за допомогою лінійчастого спектру завжди можна встановити наявність хімічного елементу у речовині.

Смугасті спектри утворюються випроміненням молекул і складаються з окремих смуг, кожна з яких являє собою велику кількість близько розташованих вузьких смуг, що перекриваються між собою.

Суцільні спектри випромінюються нагрітими твердими тілами та рідинами і характеризуються неперервним розподілом енергії електромагнітної хвилі за частотою.

Вперше лінії у видимій частині спектру атомарного водню спостерігалися Бальмером у 1885 році. Теорія Бора блискуче описує закономірності у спектрі атома водню.

На жаль, атом водню виявився єдиним, для якого теорія Бора дає такі гарні результати. Застосування цієї теорії до атому гелію, наступного за воднем елементу періодичної таблиці, не дає навіть якісного збігу з експериментом.

Подальші дослідження показали, що вірна ідея про існування у атомів дискретних енергетичних рівнів потребує зовсім іншого математичного апарату, який пізніше (1926 - 1927 роки) був розвинений у **квантовій механіці**.

Класична механіка описує стан частинки за допомогою координати та швидкості в певний момент часу.

Квантова механіка описує стан частинки **ймовірністю** її знаходження в певний момент часу в певній області простору.

Задача. Визначити радіус першої борівської орбіти електрона ($n = 1$).

Розв'язок

Між ядром та електроном діє сила Кулона, яка відіграє роль відцентрової.

$$\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r^2} = \frac{mv^2}{r} \Rightarrow \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r} = mv^2.$$

Згідно першого постулату Бора:

$$mvr = n \frac{h}{2\pi} \Rightarrow mv^2 = n^2 \frac{h^2}{4\pi^2 r^2 m}.$$

Отже,

$$\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r^2} = n^2 \frac{h^2}{4\pi^2 r^2 m}$$

Отримаємо: $r = \frac{\epsilon_0 n^2 h^2}{\pi e^2 m}.$

$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}, n = 1, h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Дж}\cdot\text{с},$
 $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}, m = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$

отже $r = 0,53 \cdot 10^{-10} \text{ м}$

Відповідь: $r = 0,53 \cdot 10^{-10} \text{ м}$

Слова і словосполучення

планетарна модель	planetary model
електронна оболонка	electron shell
стаціонарні орбіти	stationary orbit
спектри атомів	spectra of atoms
спектральні лінії	spectral lines
лінійчаті спектри	line spectrum
суцільні спектри	continuous spectrum
смугасті спектри	striped spectra
ядро атома	nucleus
енергетичні рівні	energy levels
квантова механіка	quantum mechanics
ймовірність	probability

Запитання

1. Що вивчає атомна фізика?
2. В чому полягає планетарна модель атома?
3. Що таке електронна оболонка атома?
4. Сформулюйте постулати Бора.

5. Що таке атомні спектри?
6. Яка природа атомних спектрів?
7. Які існують види спектрів?
8. Що таке лінійчаті спектри?
9. Яке практичне застосування лінійчатих спектрів?

Запам'ятайте!

1. Що складається з чого

Лінійчаті спектри складаються з окремих вузьких спектральних ліній

2. Що описує що

Теорія Бора описує закономірності в спектрі атому водню

Задачі

1. Знайти швидкість електрона на першій борівській орбіті ($n = 1$).
2. Знайти напруженість електричного поля ядра на першій борівській орбіті ($n = 1$).

§40. Будова атомного ядра. Ізотопи.

1. Будова ядра

Ядерна фізика вивчає структуру і перетворення атомних ядер при опроміненні атомів частинками, які швидко рухаються. До складу всіх атомних ядер входять два види елементарних частинок – **протони і нейтрони**.

Протон (p) має позитивний заряд, рівний заряду електрона ($|e| = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл) і масу спокою рівну $m_p = 1,6726 \cdot 10^{-27}$ кг.

Нейтрон (n) не має заряду, його маса дорівнює $m_n = 1,6749 \cdot 10^{-27}$ кг.

Загальна назва цих частинок – **нуклони**.

Масу ядер і елементарних частинок зазвичай визначають в

атомних одиницях маси (а.о.м.):

$$m_p \approx m_n \approx 1 \text{ а.о.м.} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг.}$$

Кількість протонів визначає величину заряду ядра Z .

Сума кількості протонів і нейтронів ядра дорівнює масовому числу A :

$$A = Z + N_n,$$

де A – масове число; Z – число протонів; N_n – число нейтронів.

Атомні ядра позначають символом ${}_Z^AX$, де X – символ хімічного елементу. Наприклад, ${}^{16}_8\text{O}$ означає ядро кисню.

Між нуклонами існує ядерна взаємодія, яку характеризують **ядерними силами**. Ці сили проявляються на відстані (10^{-14} – 10^{-15}) м. Ядерні сили приблизно в 100 разів більші за сили електростатичної взаємодії протонів.

Теоретично доведено, що нейтрон та протон можуть перетворюватись один в одне. Нейтрон перетворюється на протон, випромінюючи електрон і нейтрино ν :

$$n \rightarrow p + e^- + \nu.$$

Протон теоретично може перетворюватися на нейтрон, випромінюючи позитрон і антинейтрино $\bar{\nu}$:

$$p \rightarrow n + e^+ + \bar{\nu}.$$

Час життя вільного нейтрона складає 14,7 хвилин. Вільний протон є стабільним, час життя складає $2,9 \cdot 10^{29}$ років. Протони, нейтрони, електрони, позитрони, нейтрино, антинейтрино, фотони і деякі інші частинки, які не можуть дробитися на інші частинки, називають **елементарними**.

2. Явище радіоактивності

Природною радіоактивністю називається спонтанне перетворення ядер нестійких ізотопів одного хімічного елементу в ядра ізотопів інших хімічних елементів.

Ізотопи хімічного елементу відрізняються кількістю нейтронів у ядрі.

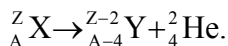
Природна радіоактивність часто супроводжується випусканням α -, β - і γ -випромінювань.

Альфа-промені (α) є потоком ядер атомів гелію ${}^4_2\text{He}$. Кожна α -частинка має заряд $+2e$ і масове число **4**. Вони вилітають з ядра зі швидкістю від 14 000 до 20 000 км/с. α -промені мають високу іонізуючу здатність і невелику проникаючу. Альфа-промені повністю поглинаються шаром біологічної тканини товщиною 0,12 мм.

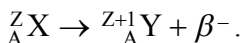
Бета-промені (β) є потоком електронів зі швидкістю $v \approx 160\,000$ км/с. Пробіг β -частинок в повітрі 40 м, в алюмінії – 2 см, в біологічної тканини – 6 см.

Гамма-промені (γ) є потоком фотонів. Гамма-промені мають частоту $\sim 10^{20}$ Гц та енергію ~ 1 МеВ. Тіло людини вони пронизують наскрізь.

При **α -розпаді** заряд ядра зменшується на дві одиниці, а масове число – на чотири одиниці:



При **β -розпаді** заряд ядра збільшується на одиницю та елемент зміщується в періодичній системі на один номер вправо без зміни масового числа:



3. Закон радіоактивного розпаду. Період напіврозпаду

Радіоактивний розпад веде до зменшення кількості атомів радіоактивного елементу. Він має випадковий характер, тобто можна говорити тільки про ймовірність розпаду кожного атома за певний проміжок часу.

Кількість атомів ΔN , які розпадаються за час Δt , пропорційна часу і загальній кількості N атомів радіоактивного елемента:

$$\Delta N = -\lambda N \Delta t,$$

де λ – стала розпаду.

Стала розпаду дорівнює відносному зменшенню кількості атомів в одиницю часу:

$$\lambda = -\frac{\Delta N}{N\Delta t}.$$

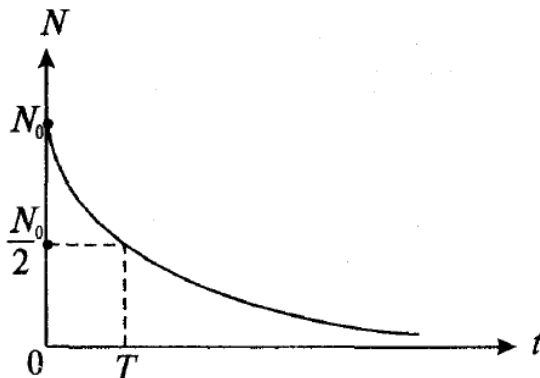
Знак «мінус» показує зменшення кількості атомів протягом певного часу.

Закон радіоактивного розпаду має вигляд

$$N = N_0 e^{-\lambda t},$$

де N_0 – число атомів в початковий момент часу; N – число атомів, що залишилися за час t , число $e \approx 2,72$.

Графічно закон радіоактивного розпаду представлений на рисунку.



У результаті радіоактивного розпаду утворюється речовина з новими фізичними та хімічними властивостями. Для характеристики швидкості розпаду радіоактивного елементу вводиться поняття періоду напіврозпаду T .

Періодом напіврозпаду називається час, протягом якого кількість атомів хімічного елементу зменшується в два рази. Період напіврозпаду дорівнює

$$T = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,693}{\lambda}.$$

Значення T та λ для різних радіоактивних елементів різні.

Наприклад, для урану ${}^{238}_{92}\text{U}$ значення періоду напіврозпаду становить $4,5 \cdot 10^9$ років, для радію ${}^{226}_{88}\text{Ra}$ – 1622 роки.

Задача. Визначити період напіврозпаду радону, якщо за одну добу із 1 мільйона атомів розпадається 175 000 атомів.

Розв'язок

$$\text{Період напіврозпаду дорівнює } T = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,693}{\lambda}.$$

Знайдемо сталу розпаду λ .

$$\Delta N = N_0 - N = N_0 - N_0 e^{-\lambda t} = N_0 (1 - e^{-\lambda t}), \quad \frac{\Delta N}{N_0} = (1 - e^{-\lambda t}).$$

$$\text{Логарифмуємо: } \ln 1 - \ln \frac{\Delta N}{N_0} = \ln(e^{-\lambda t}) \Rightarrow$$

$$-\lambda t = -\ln \frac{\Delta N}{N_0} \Rightarrow \lambda = \frac{\ln(\Delta N / N_0)}{t}.$$

Період напіврозпаду радону дорівнює

$$T = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{(\ln 2)t}{\ln(\Delta N / N_0)} = 3,3 \cdot 10^5 \text{ с.}$$

Відповідь: $T=3,3 \cdot 10^5 \text{ с.}$

Слова і словосполучення

ядро	nucleus	гамма-промені (γ)	gamma rays (γ)
радіоактивність	radioactivity	масове число	mass number
природна радіоактивність	natural radioactivity	елементарна частинка	elementary particle
нейтрон	neutron	розпад	decay
протон	proton	період напіврозпаду	half-life
альфа-промені (α)	alpha rays (α)	нуклон	nucleon
бета-промені (β)	beta rays (β)	символ	symbol

Запитання

1. Що вивчає ядерна фізика?
2. З яких частинок складається ядро?
3. Що називають масовим числом?
4. Що називається радіоактивністю?
5. Що представляють собою α -, β - і γ -промені?
6. Сформулюйте закон радіоактивного розпаду.
7. Що називається періодом напіврозпаду?

Запам'ятайте!

1. Що входить до складу чого

Нуклони входять до складу ядра.

2. Що супроводжується чим

Радіоактивність супроводжується випусканням α -, β - і γ -променів.

Задачі

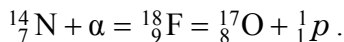
1. Скільки ядер урану ${}^{238}_{92}\text{U}$ розпалося протягом року, якщо початкова маса урану 1 г? Період напіврозпаду урану ${}^{238}_{92}\text{U}$ дорівнює $4,51 \cdot 10^9$ років.
2. Період напіврозпаду радіоактивного фосфору ${}^{30}_{15}\text{P}$ дорівнює 30 хвилин. Чому дорівнює стала розпаду цього елементу?
3. Визначити період піврозпаду радону, якщо за 1 добу з 1 мільйона атомів розпадається 175000 атомів.

§41. Ядерні реакції. Штучна радіоактивність

1. Ядерні реакції

Вивчення природної радіоактивності показало, що це явище обумовлено внутрішньоядерними процесами. У зв'язку з цим були зроблені спроби штучного перетворення одних хімічних елементів в інші.

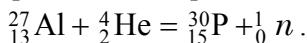
Ядерною реакцією називається процес перетворення атомних ядер під впливом швидких елементарних частинок або ядер інших атомів. Перша штучна ядерна реакція була здійснена в 1919 році англійським вченим Ернестом Резерфордом. Цю реакцію можна записати у вигляді:



Дана реакція протікає так: α -частинка потрапляє в ядро азоту N та поглинається ним. Утворюється проміжне ядро ізотопу фтору F, воно викидає з себе один протон (p) і перетворюється на ядро ізотопу кисню O.

У 1932 році англійський фізик Джеймс Чедвік в результаті ядерної реакції відкрив **нейтрон**. Період напіврозпаду вільного нейтрона складає біля 10 хвилин.

Явище **штучної радіоактивності** було відкрито в 1934 році французькими фізиками Ірен та Фредеріком Жоліо Кюрі при дослідженні реакції опромінення ядер алюмінію α - частинками:



Отриманий штучний ізотоп фосфору (${}^{30}_{15}\text{P}$) є радіоактивним.

Завдяки ядерним реакціям періодична система елементів поповнилася штучно створеними хімічними елементами з зарядом ядра, який перевищує заряд ядра урану (${}^{235}_{92}\text{U}$). Такі хімічні елементи отримали назву **трансуранових елементів** (наприклад, нептуній, плутоній, америцій).

2. Енергія зв'язку ядра. Дефект маси

Енергія зв'язку – це одна з найважливіших величин, що

характеризує стійкість атомного ядра. **Енергією зв'язку ядра** – це енергія, необхідна для повного розщеплення ядра на нуклони, що входять до його складу. Відповідно до закону збереження енергії, енергія нуклонів, які зв'язані в ядрі, має бути меншою за енергію роз'єднаних нуклонів на значення енергії зв'язку ядра $\varepsilon_{\text{зв}}$.

Відповідно до закону пропорційності маси і енергії, зміна енергії системи супроводжується пропорційною зміною маси системи: $\varepsilon_{\text{зв}} = \Delta mc^2$,

де c – швидкість світла у вакуумі.

Маса атомного ядра менша суми мас нуклонів, які складають ядро, на величину Δm , яка називається **дефектом маси ядра**.

Дефект маси визначається різницею між масою N окремих нуклонів до злиття їх в ядро атома більш важкого елемента і масою ядра, що утворилося в результаті цієї реакції:

$$\Delta m = Nm_n - m_{\text{я}}$$

$$\text{або } \Delta m = (Zm_p + (A - Z)m_n) - m_{\text{я}},$$

де Z – атомний номер; A – масове число.

Наявність дефекту маси призводить до того, що при об'єднанні окремих нуклонів в ядрі звільняється енергія, що дорівнює енергії зв'язку:

$$\varepsilon_{\text{зв}} = c^2 \left[(Zm_p + (A - Z)m_n) - m_{\text{я}} \right].$$

Дефект маси спостерігається і у випадках, коли ядро атому важкого елемента ділиться на два легших ядра.

Виділення ядерної енергії відбувається як при реакції поділу важких ядер, так і при реакції синтезу легких ядер.

Ядерна енергія, яка виділяється кожним ядром, дорівнює різниці між енергією зв'язку продукту реакції і енергією зв'язку вихідного ядерного матеріалу:

$$\Delta \varepsilon = \varepsilon_{\text{зв}2} - \varepsilon_{\text{зв}1}$$

де $\varepsilon_{\text{зв}2}$ – енергія зв'язку продукту реакції; $\varepsilon_{\text{зв}1}$ – енергія зв'язку вихідного продукту. На цьому прикладі засновані промислові способи отримання ядерної енергії.

Задача 1. Обчислити дефект маси ядра ізоотопу неону Ne.
Розв'язок

За визначенням, дефект маси ядра дорівнює:

$$\Delta m = (Zm_p + (A - Z)m_n) - m_{\text{я}}$$

Для неону ${}^{20}_{10}\text{Ne}$: $A = 20$ та $Z = 10$.

Тоді $\Delta m = (10m_p + 10m_n) - m_{\text{я}}$.

$$m_p = 1,6724 \cdot 10^{-27} \text{ кг},$$

$$m_n = 1,6748 \cdot 10^{-27} \text{ кг},$$

$$m_{\text{я}} = 33,1888 \cdot 10^{-27} \text{ кг}.$$

$$\Delta m = 10(1,6724 \cdot 10^{-27} + 1,6748 \cdot 10^{-27}) - 33,1888 \cdot 10^{-27} = 2,832 \cdot 10^{-28} \text{ кг}.$$

Відповідь: $2,832 \cdot 10^{-28}$ кг.

Задача 2. Знайти енергію зв'язку ядра ізоотопу літію ${}^7_3\text{Li}$.

Розв'язок

Енергія зв'язку ядра дорівнює $\varepsilon_{\text{зв}} = \Delta mc^2$.

Обчислюємо

$$\varepsilon_{\text{зв}} = [Zm_p + (A - Z)m_n - m_{\text{я}}] c^2, \text{ де } c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с};$$

$$\varepsilon_{\text{зв}} = [3m_p + 4m_n - m_{\text{я}}] c^2;$$

$$\varepsilon_{\text{зв}} = (3 \cdot 1,6724 \cdot 10^{-27} + 4 \cdot 1,6748 \cdot 10^{-27} - 11,6475 \cdot 10^{-27}) (3 \cdot 10^8)^2 =$$

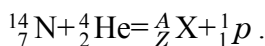
$$6,201 \cdot 10^{12} \text{ Дж}$$

Відповідь: $6,201 \cdot 10^{12}$ Дж

Задача 3. У результаті захоплення α -частинки ядром ізоотопу азоту ${}^{14}_7\text{N}$ утворюються невідомий елемент і протон. Написати реакцію і визначити невідомий елемент.

Розв'язок

Запишемо ядерну реакцію:



Суми масових чисел і зарядів в правій і лівій частинах цього виразу мають бути рівні.

$$\text{Маємо } 14 + 4 = 1 + A \text{ та } 7 + 2 = 1 + Z.$$

Звідси $A = 17, Z = 8$.

Запишемо отриманий елемент: ${}^{17}_8\text{X}$.

З таблиці Менделєєва знайдемо, що це ізотоп кисню ${}^{17}_8\text{O}$.

Відповідь: ізотоп кисню ${}^{17}_8\text{O}$.

Слова і словосполучення

ядерна реакція	nuclear reaction	проміжне ядро	intermediate nucleus
енергія зв'язку	binding energy	легке ядро	easy nucleus
штучний	artificial	опромінення	exposure
дефект маси	mass defect	реакція синтезу	fusion reaction
штучна радіоактивність	artificial radioactivity	трансуранові елементи	transuranic elements
важке ядро	hard nucleus	продукт реакції	the reaction product

Запитання

1. Що називається ядерною реакцією?
2. Що таке штучна радіоактивність?
3. Ким і коли було відкрито явище штучної радіоактивності?
4. Що таке трансуранові елементи? Наведіть приклади трансуранових елементів.

5. Що таке радіоактивний ізотоп?
6. Що називається енергією зв'язку ядра? Як визначити енергію зв'язку?
7. Що таке дефект маси?

Задачі

1. Внаслідок радіоактивного розпаду уран $^{238}_{92}\text{U}$ перетворюється на свинець $^{206}_{82}\text{Pb}$. Скільки α - та β -розпадів має місце в цьому випадку?
2. Внаслідок захоплення нейтрона ядром атома азоту $^{14}_7\text{N}$ утворюється невідомий елемент і α -частинка. Написати реакцію і визначити утворений елемент.
3. Знайти енергію зв'язку ядра урану $^{238}_{92}\text{U}$ та енергію зв'язку, що приходить на один нуклон.

§42. Ядерний реактор. Термоядерний синтез

1. Ланцюгові ядерні реакції

Ланцюгові ядерні реакції – це реакції, в яких виділяється велика енергія та вилітає декілька нейтронів, які можуть викликати ділення сусідніх ядер речовини.

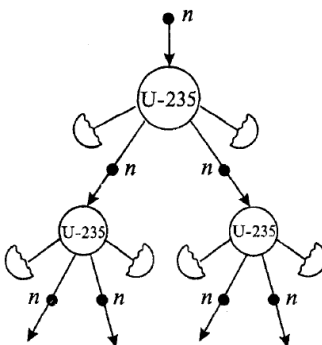


Схема ланцюгової реакції

Найбільш просто ланцюгова реакції відбувається в речовині, ядра якої діляться під дією повільних нейтронів, наприклад в ізотопі урана-235 ($^{235}_{92}\text{U}$).

Якщо один з нейтронів потрапляє в одне з ядер урану, то це ядро ділиться на уламки та при цьому утворюються два нейтрони. Ці миттєві нейтрони потрапляють в два нових ядра. При цьому утворюються чотири нейтрони, які викличуть ділення чотирьох ядер. В результаті виділиться вісім нейтронів і т.д.

Розвиток ланцюгової реакції характеризується коефіцієнтом розмноження нейтронів K .

Коефіцієнт розмноження нейтронів K визначається відношенням числа нейтронів в деякій ланці реакції, до числа нейтронів в попередній ланці. Приклад. Ланцюгової реакції в нашому прикладі відповідає коефіцієнт розмноження:

$$K = 4/2 = 8/4 = 2.$$

Необхідною умовою розвитку ланцюгової реакції є умова $K \geq 1$.

Маса речовини, що ділиться, в якій реакція йде з $K = 1$, називається **критичною масою**.

Приклад. Для чистого урану $^{235}_{92}\text{U}$ критична маса становить близько 40 кг при формі кулі. Якщо маса ядерного матеріалу менше критичної, то $K < 1$ і реакція поділу згасне. Якщо $K > 1$, то ланцюгова реакція швидко розвивається та може призвести до вибуху. Така реакція відбувається в атомній бомбі. Якщо $K = 1$, то реакція йде з постійною інтенсивністю.

2. Ядерний реактор

Ядерний реактор – це пристрій, призначений для отримання керованої самопідтримуваної ланцюгової реакції поділу, яка супроводжується виділенням енергії.

Основні елементи ядерного реактора:

ядерне паливо, сповільнювач і відбивач нейтронів, теплоносії для відводу тепла, що утворюється в реакторі, регулятори швидкості ланцюгової реакції поділу.

Ядерним паливом є ізомери урану $^{235}_{92}\text{U}$ і $^{238}_{92}\text{U}$, плутоній $^{239}_{94}\text{Pu}$, торій $^{232}_{90}\text{Th}$.

Сповільнювачі і відбивачі нейтронів сприяють збільшенню числа повільних нейтронів, які найбільш ефективні для розвитку ланцюгової реакції поділу. Для підтримки стаціонарного режиму реактора ($K = 1$) в активну зону вводяться управляючі стрижні з бору або кадмію, які сильно поглинають теплові нейтрони.

Теплоносіями в реакторі є вода, рідкий натрій та інші речовини. Поряд з виділенням енергії в ядерному реакторі відбувається утворення і накопичення нового ядерного палива - плутонію $^{239}_{94}\text{Pu}$. Плутоній радіоактивний: він випромінює α -, β - і γ -промені. Його період напіврозпаду $T = 24100$ років.

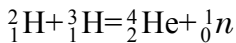
Ядерною енергією називається енергія, яка виділяється при ланцюгових ядерних реакціях поділу важких ядер.

Ядерна енергія використовується в **атомних електростанціях**.

3. Термоядерні реакції

Термоядерними реакціями називаються екзотермічні ядерні реакції синтезу легких ядер у більш важкі. Ці реакції відбуваються при надвисоких температурах порядку (10^7 - 10^9) К.

При термоядерних реакціях виділяється дуже велика енергія. При реакції злиття ядер дейтерію ^2_1H і тритію ^3_1H в ядро гелію ^4_2He виділяється енергія 3,5 MeV на один нуклон, загальна енергія, що виділяється в результаті реакції 17,6 MeV:



В реакції поділу енергія на 1 нуклон складає приблизно 1 MeV.

(1 MeV = 10^6 eV, 1 eV = $1,6 \cdot 10^{-19}$ Дж)

При синтезі ядра гелію з чотирьох протонів виділяється енергія, рівна 6,7 MeV на одну частинку:



де $^0_{+1}\text{e}$ або e^+ – символ позитрона.

Термоядерні реакції відбуваються всередині Сонця і зірок, і є джерелом енергії, який забезпечує їх випромінювання. Здійснення термоядерних реакцій в земних умовах створить величезні можливості для отримання енергії.

Наприклад, при використанні дейтерію, що міститься в літрі звичайної води, в реакції термоядерного синтезу виділиться стільки ж енергії, скільки виділяється при згорянні 350 л бензину.

У водневій бомбі термоядерна реакція некерована. Для здійснення керованої термоядерної реакції необхідно створити і підтримувати в деякому об'ємі температуру близько 10^8 К. Це необхідно для того, щоб зблизити ядра елементів, долаючи величезні сили кулонівського відштовхування. При температурі 10^8 К «термоядерне пальне» є плазмою.

Плазма – це іонізований газ, що складається з електронів і ядер.

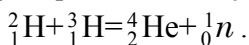
Плазму утримують за допомогою магнітного поля, а високу температуру отримують, пропускаючи через неї електричний струм великої сили.

Збереження стійкості плазми – це основна проблема при здійсненні керованої термоядерної реакції.

Задача. Яка кількість енергії виділяється в результаті термоядерної реакції синтезу 1 г гелію з дейтерію і тритію?

Розв'язок

Рівняння термоядерної реакції синтезу ядер дейтерію і тритію:



Кількість енергії, що виділяється при цьому:

$$\Delta E = \Delta mc^2$$

Дефект маси дорівнює:

$$\Delta m = (m_{\text{дейтерію}} + m_{\text{тритію}}) - (m_{\text{гелію}} + m_{\text{нейтрона}}).$$

$$\Delta m = (2,01474 + 3,01700) - (4,00389 + 1,00899) = 0,01887 \text{ а.е.м.}$$

Відомо, що однією атомної одиниці маси відповідає 931,2 МеВ. Енергія, що виділилася при синтезі атома гелію, дорівнює

$$\Delta E' = 931,2 \cdot 0,01887 = 17,6 \text{ MeV. } 1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV, } 1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж.}$$

Енергія, що виділилася при синтезі 1 грама гелію:

$$\Delta E = \Delta E' \frac{N_A}{\mu}, \quad N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1} - \text{число Авогадро,}$$

$$\mu = 4 - \text{молярна маса гелію.}$$

Відповідь: $424 \cdot 10^9 \text{ Дж}$

Слова і словосполучення

ланцюгова реакція	chain reaction	уповільнювач	moderator
миттєвий нейтрон	instant neutron	теплоносій	heat-carrier
коефіцієнт розмноження	multiplication factor	відбиваючий елемент	reflector
критична маса	critical mass	стрижень	rod
вибух	explosion	ядерна енергія	nuclear energy
атомна бомба	A-bomb nuclear bomb	термоядерний синтез	nuclear energy fusion
ядерний реактор	nuclear reactor	термоядерна реакція	thermonuclear reaction

Запитання

1. Що називають ланцюговими реакціями?
2. Чим визначається коефіцієнт розмноження?
3. Що таке критична маса?
4. Що називається ядерним реактором?
5. Які основні елементи реактора?
6. Що називається ядерною енергією?
7. Що таке термоядерні реакції?
8. Що являє собою плазма?

Запам'ятайте!

1. Що розпадається на що

Нейтрон розпадається на протон, електрон і антинейтрино.

2. Що перетворюється на що

Всі елементарні частинки перетворюються одна на одну.

3. Що призначене для отримання чого

Ядерний реактор призначений для отримання ядерної енергії.

Задачі

1. Знайти число нейтронів, що виникають за одиницю часу в урановому реакторі з тепловою потужністю $P = 100$ МВт, якщо середня кількість нейтронів на кожний акт ділення $\nu = 2,5$. Вважати, що при кожному акті звільняється енергія $E = 200$ МеВ.
2. Чому реакції злиття легких ядер можуть протікати лише при температурах порядку мільйонів градусів? Зробіть кількісну оцінку такої температури.
3. Чому синтез легких ядер енергетично більш вигідний, ніж реакція розподілу важких?

Література

1. Навчальні програми (довузівська підготовка іноземних громадян) / Уклад.: Б.М. Андрющенко, Ю.М. Івашенко, Ю.О. Колтаков та ін.- К.: ІВЦ Видавництво «Політехніка», 2005.- Ч.2.: Фізика. - 168 с.
2. Физика. Учебное Пособие для студентов-иностранцев подготовительных факультетов вузов / Корочкина Л.Н.; Каурова А.С., Шутенко Л. Д., Стасюк Б.П. – М.: Высшая Школа, 1983. – 392 с.
3. Физика: Учебное пособие для студентов-иностранцев подготовительных факультетов / Корочкина Л.Н. – К.: Издательство Европейского университета, 2006. – 217 с.
4. Фізика для студентів-іноземців. Навчальний посібник. /Каленик О.О., Корочкіна Л.М. – К.: «Інтерсервіс», 2013. – 194 с.
5. Практичні заняття з фізики (електрика, оптика, атомна та ядерна фізика) для студентів-іноземців підготовчих відділень. /Каленик О.О. Цареградська Т.Л. – К.: «Інтерсервіс», 2017. – 134 с.
6. SAT. Subject test. Physics /Robert Jansen, M.A., Greg Young, M.S.Ed. –NY: Barron's Educational Series, Inc., 2013. – 589 p.
7. Фізика. Комплексна підготовка до зовнішнього незалежного оцінювання /Уклад: Н. Струж, В. Мацюк, С. Остап'юк – Тернопіль: Підручники і посібники, 2016. – 432 с.

ДОДАТОК

1. ОСНОВНІ ФІЗИЧНІ КОНСТАНТИ

Швидкість світла у вакуумі	$c = 2,998 \cdot 10^8 \text{ м/с}$
Гравітаційна стала	$\gamma = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3/(\text{кг} \cdot \text{с}^2)$
Прискорення вільного падіння	$g = 9,807 \text{ м/с}^2$
Стала Авогадро	$N_A = 6,023 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$
Стала Больцмана	$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж} \cdot \text{К}^{-1}$
Молярна газова стала	$R = 8,31 \text{ Дж} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$
Стандартний об'єм моля газу	$V_0 = 22,4 \text{ л/моль}$
Елементарний заряд	$e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$
Маса електрона	$m_e = \begin{cases} 0,911 \cdot 10^{-30} \text{ кг} \\ 0,511 \text{ MeV} \end{cases}$
Маса протона	$m_p = \begin{cases} 1,672 \cdot 10^{-27} \text{ кг} \\ 938,26 \text{ MeV} \end{cases}$
Постійна Планка	$h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$ $\hbar = \frac{h}{2\pi} = \begin{cases} 1,0546 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с} \\ 0,659 \cdot 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{с} \end{cases}$
Атомна одиниця маси	$1 \text{ а.о.м.} = \begin{cases} 1,660 \cdot 10^{-27} \text{ кг} \\ 931,4 \text{ MeV} \end{cases}$
Електрична стала	$\varepsilon_0 = 0,885 \cdot 10^{-11} \text{ Ф/м}$
Магнітна стала	$\mu_0 = 1,257 \cdot 10^{-6} \text{ Гн/м}$
Радіус Землі	R_3 $6,37 \cdot 10^6 \text{ м}$
Маса Землі	M_3 $5,97 \cdot 10^{24} \text{ кг}$
Гравітаційна стала	G $6,67 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3/(\text{кг} \cdot \text{с}^2)$
Об'єм одного моля при нормальних умовах	V_0 $22,4 \text{ м}^3/\text{моль}$
Постійна Фарадея	F $9,65 \cdot 10^4 \text{ Кл/моль}$

2. ГУСТИНА ДЕЯКИХ РЕЧОВИН

Тверді тіла, 10^3 кг/м^3			
Алюміній	2,7	Мідь	8,9
Дерево	0,8	Нікель	8,8
Залізо	7,8	Свинець	11,3
Цегла	1,8	Срібло	10,5
Лід	0,9	Сталь	7,8
Рідини, 10^3 кг/м^3			
Вода чиста	1	Масло	0,9
Вода морська	1,03	Ртуть	13,6
керосин	0,8	Спирт	0,8
Гази, кг/м^3			
Водень	0,089	Гелій	0,18
Повітря	1,29	Кисень	1,43

3. МОДУЛЬ ПОЗДОВЖНЬОЇ ПРУЖНОСТІ (МОДУЛЬ ЮНГА), 10^{11} Па

Алюміній	0,7	Мідь	1,2
Залізо	2,1	Сталь	2,2
Латунь	0,9	Свинець	0,17

4. КОЕФІЦІЄНТ ПОВЕРХНЕВОГО НАТЯГУ РІДИН (ПРИ КІМНАТНІЙ ТЕМПЕРАТУРІ), 10^{-2} Н/м

Анілін	4,3	Мильний розчин	4
Вода	7,4	Спирт	2,2
Керосин	3,6	Ртуть	47,1

5. ПИТОМА ТЕПЛОЄМНІСТЬ, 10^3 Дж/(кг·К)

Азот	1,05	Лід	2,1
Алюміній	0,88	Мідь	0,39
Вода	4,19	Олово	0,23
Водень	14,2	Повітря	1,005
Залізо	0,46	Свинець	0,13
Кисень	0,92	Спирт	2,42
Латунь	0,38	Сталь	0,46

6. ТЕМПЕРАТУРА ПЛАВЛЕННЯ ТВЕРДИХ ТІЛ, К

Алюміній	933	Мідь	1356
Залізо	1803	Олово	505
Латунь	1173	Свинець	600
Лід	273	Срібло	1233

7. ПИТОМА ТЕПЛОТА ПЛАВЛЕННЯ ТВЕРДИХ ТІЛ, 10^5 Дж/кг

Алюміній	3,9	Олово	0,58
Лід	3,35	Свинець	0,25
Мідь	1,8	Срібло	1,01

8. ТЕМПЕРАТУРА ПАРООУТВОРЕННЯ, К

Вода	373	Спирт	351
Ртуть	630	Ефір	308

9. ПИТОМА ТЕПЛОТА ПАРООУТВОРЕННЯ, 10^5 Дж/кг

Вода	22,6	Спирт	9,05
Ртуть	2,82	Ефір	3,68

10. ПИТОМА ТЕПЛОТА ЗГОРАННЯ, 10^7 Дж/кг

Бензин	4,61	Керосин	4,61
Дерево	1,26	Нафта	4,61
Кам'яне вугілля	2,93	Спирт	2,93

11. КОЕФІЦІЄНТ ЛІНІЙНОГО РОЗШИРЕННЯ ТВЕРДИХ ТІЛ, 10^{-5} K^{-1}

Алюміній	2,4	Мідь	1,7
Залізо	1,2	Свинець	2,9
Інвар	0,15	Сталь	1,1
Латунь	1,9	Скло	0,9

12. КОЕФІЦІЄНТ ОБ'ЄМНОГО РОЗШИРЕННЯ РІДИН, 10^{-4} K^{-1}

Вода	1,8	Ртуть	1,8
Керосин	10,0	Сірчана кислота	5,6
Нафта	10,0	Спирт	11,0

Примітка. Значення фізичних величин наведені при нормальних умовах.

13. ДІЕЛЕКТРИЧНА ПРОНИКНІСТЬ

Діелектрик	ϵ	Діелектрик	ϵ
Вода	81	Поліетилен	2,3
Повітря	1,00058	Слюда	7,0
Віск	7,8	Спирт	26
Гас	2,0	Скло	6,0
Парафін	2,0	Фарфор	6,0
Плексиглас	3,5	Ебоніт	2,7

14. ПИТОМИЙ ЕЛЕКТРООПІР ПРОВІДНИКІВ ТА ІЗОЛЯТОРІВ

Провідник	Питомий електроопір (при 20°C) ρ , нОм·м	Температурний коефіцієнт α , к $^{\circ}\text{C}^{-1}$	Ізолятор	Питомий електроопір ρ , Ом·м
Алюміній	25	4,5	Папір	10^{10}
Вольфрам	50	4,8	Парафін	10^{15}
Залізо	90	6,5	Слюда	10^{13}
Золото	20	4,0	Фарфор	10^{13}
Мідь	16	4,3	Шелак	10^{14}
Свинець	190	4,2	Ебоніт	10^{14}
Срібло	15	4,1	Янтар	10^{17}

15. ПОКАЗНИКИ ЗАЛОМЛЕННЯ n

Газ	n	Рідина	n	Тверде тіло	n
Азот	1,00030	Бензол	1,50	Алмаз	2,42
Повітря	1,00029	Вода	1,33	Кварц	1,46
Кисень	1,00027	Гліцерин	1,47	Скло	1,50

Примітка: Показник заломлення залежить від довжини світла, тому наведені значення n слід розглядати як умовні.

15. РОБОТА ВИХОДУ ЕЛЕКТРОНА З МЕТАЛУ

Метал	A , еВ	Метал	A , еВ
Алюміній	3,74	Мідь	4,47
Барій	2,29	Молібден	4,27
Вісмут	4,62	Натрій	2,27
Вольфрам	4,50	Нікель	4,84
Залізо	4,36	Платина	5,29
Золото	4,58	Срібло	4,28
Калій	2,15	Титан	3,92
Кобальт	4,25	Цезій	1,89
Літій	2,39	Цинк	3,74

16. ПЕРІОДИ НАПІВРОЗПАДУ РАДІОНУКЛІДІВ

Кобальт ^{60}Co	5,2 року (β)
Стронцій ^{90}Sr	28 років (β)
Полоній ^{210}Po	138 діб (α)
Радон ^{222}Rn	3,8 доби (α)
Радій ^{226}Ra	1620 років (α)
Уран ^{238}U	$4,5 \cdot 10^9$ років (α)

17. ДЕЯКІ ПОЗАСИСТЕМНІ ОДИНИЦІ

1 Å	10^{-10} м
1 атм	101,3 кПа або 760 мм.рт.ст.
1 бар	100 кПа
1 мм.рт.ст.	133,3 Па
1 кал	4,18 Дж

Навчальне видання

КАЛЕНИК Олександр Олександрович
ПЛЮЩАЙ Інна Вячеславівна
ЦАРЕГРАДСЬКА Тетяна Леонідівна

ФІЗИКА

ДЛЯ СТУДЕНТІВ-ІНОЗЕМЦІВ

Навчальний посібник

Редактор *Л. П. Львова*

Оригінал-макет виготовлено ВПЦ "Київський університет"

Виконавець *Л. П. Львова*



Формат 60x84^{1/16}. Ум. друк. арк. 21,9. Наклад 100. Зам. № 220-9683.
Гарнітура Times New Roman. Папір офсетний. Друк офсетний. Вид. № П11.
Підписано до друку 04.11.20

Видавець і виготовлювач
ВПЦ "Київський університет"

б-р Тараса Шевченка, 14, м. Київ, 01601

☎ (044) 239 32 22; (044) 239 31 72; тел./факс (044) 239 31 28

e-mail: vpc_div.chief@univ.net.ua; redaktor@univ.net.ua

<http://vpc.univ.kiev.ua>

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 1103 від 31.10.02