

ПОВНИЙ КУРС

НАВЧАЛЬНО-ПРАКТИЧНИЙ
ДОВІДНИК**Фізика**

ФІЗИКА

ПОВНИЙ КУРС**Відповідає
ДЕРЖАВНОМУ
СТАНДАРТУ**

- усі теми шкільного курсу фізики
- алгоритми розв'язування задач
- розв'язання типових задач за кожною темою

НАВЧАЛЬНО-ПРАКТИЧНИЙ
ДОВІДНИКВИДАВНИЦТВО
РАНОК

УДК 53.1:372.8(0.75.4)=161.1
ББК 74.265.1
С59

Соколович Ю. А.

С59 **Фізика: Навчально-практичний довідник / Ю. А. Соколович, Г. С. Богданова. — Х.: Видавництво «Ранок», 2010. — 384 с.**

ISBN 978-611-540-200-7

Довідник являє собою чітко структурований виклад курсу фізики загальноосвітньої школи з акцентами на поняттях і закономірностях фізики, методах та алгоритмах розв'язування основних типів задач.

У виданні наведений комплекс спеціально підібраних розрахункових задач із розв'язаннями, витримані нормативні вимоги до їх оформлення, надані методичні рекомендації.

У межах кожного розділу навчальний матеріал подано за темами і супроводжено схемами, рисунками, графіками, таблицями, що дає змогу наочно ілюструвати його зміст.

Видання складено відповідно до чинної програми з фізики для загальноосвітніх навчальних закладів, тому буде корисним як під час вивчення навчального матеріалу, так і в ході підготовки до поточного або підсумкового контролю, ЗНО. Систематичне використання довідника сприятиме формуванню й закріпленню навичок самостійної роботи з довідковою літературою.

Посібник можна використовувати в комплекті з будь-яким чинним підручником з фізики. Наявність предметного покажчика максимально полегшить пошук потрібної інформації.

Призначено для учнів 7—11 класів, абітурієнтів, учителів фізики.

УДК 53.1:372.8(0.75.4)=161.1
ББК 74.265.1

ISBN 978-611-540-200-7

© Ю. А. Соколович, Г. С. Богданова, 2002
© ТОВ Видавництво «Ранок», 2010

ЗМІСТ

ПЕРЕДМОВА	11
------------------------	-----------

МЕХАНІКА

1. КІНЕМАТИКА МАТЕРІАЛЬНОЇ ТОЧКИ.....	13
1.1. Основні поняття.....	13
1.2. Операції з векторними величинами.....	15
1.3. Відносність руху. Класичний закон додавання швидкостей	18
1.4. Прямолінійний рух.....	19
1.5. Криволінійний рух. Рівномірний рух по колу	25
1.6. Приклади розв'язання задач	28
2. ДИНАМІКА МАТЕРІАЛЬНОЇ ТОЧКИ	37
2.1. Основні закони динаміки. Сила. Рівнодійна сила	37
2.2. Сили в механіці.....	42
2.3. Рух тіла в безповітряному просторі (без урахування сили тертя).....	53
2.4. Алгоритм розв'язання кількісних задач із фізики....	55
2.5. Методичні рекомендації щодо розв'язання задач з динаміки	56
2.6. Приклади розв'язання задач	56
3. ЗАКОНИ ЗБЕРЕЖЕННЯ В МЕХАНІЦІ	69
3.1. Імпульс тіла. Імпульс сили.....	69
3.2. Закон збереження імпульсу	69
3.3. Реактивний рух	69
3.4. Енергія. Закон збереження енергії. Види енергії.....	70
3.5. Види механічної енергії та їх зв'язок з роботою	71
3.6. Механічна робота і потужність	73
3.7. Механічний удар	75
3.8. Прості механізми.....	76
3.9. Приклади розв'язання задач	80

4. МЕХАНІКА ТВЕРДОГО ТІЛА.....	100
4.1. Основні поняття.....	100
4.2. Умови і види рівноваги твердого тіла	101
4.3. Момент імпульсу. Закон збереження моменту імпульсу.....	104
4.4. Зіставлення рівнянь механіки поступального й обертального рухів (табл. 2)	105
4.5. Приклади розв'язання задач	106
5. ГІДРОСТАТИКА І АЕРОСТАТИКА.....	112
5.1. Тиск	112
5.2. Закон Паскаля.....	113
5.3. Гідростатичний тиск.....	113
5.4. Сполучені посудини	113
5.5. Гідростатичний парадокс	114
5.6. Гідравлічна машина	115
5.7. Закон Архімеда	115
5.8. Умови плавання тіл (табл. 3)	116
5.9. Атмосферний тиск, його вимірювання	117
5.10. Приклади розв'язання задач	118
6. ГІДРОДИНАМІКА І АЕРОДИНАМІКА.....	128
6.1. Струминна течія рідин і газів.....	128
6.2. Рівняння Бернуллі	129
6.3. Підйомна сила крила літака.....	131
6.4. Коефіцієнт лобового опору для тіл різної форми (табл. 4)	133
6.5. Приклади розв'язання задач	134

МОЛЕКУЛЯРНА ФІЗИКА

1. ОСНОВИ МОЛЕКУЛЯРНО-КІНЕТИЧНОЇ ТЕОРІЇ БУДОВИ РЕЧОВИНИ.....	137
1.1. Основні положення молекулярно-кінетичної теорії та їх дослідне обґрунтування	137
1.2. Сили молекулярної взаємодії	138
1.3. Маса атомів і молекул.....	139
1.4. Молярна маса. Кількість речовини	140

1.5.	Ідеальний газ. Основне рівняння молекулярно-кінетичної теорії ідеального газу (рівняння Клаузіуса)	141
1.6.	Температура. Термодинамічна шкала температур і її зв'язок з температурою за міжнародною шкалою . . .	142
1.7.	Середня швидкість теплового руху одноатомних молекул. Дослід Штерна.	143
1.8.	Приклади розв'язання задач	144
2.	ВЛАСТИВОСТІ ГАЗІВ (ГАЗОВІ ЗАКОНИ).	145
2.1.	Рівняння стану ідеального газу (рівняння Клапейрона — Менделєєва)	145
2.2.	Газові закони	146
2.3.	Закон Дальтона	148
2.4.	Розподіл молекул ідеального газу за швидкостями (розподіл Максвелла)	149
2.5.	Середня довжина вільного пробігу молекул	149
2.6.	Приклади розв'язання задач	149
3.	ВЛАСТИВОСТІ ПАРИ	157
3.1.	Пара. Випаровування і конденсація	157
3.2.	Насичена і ненасичена пара	158
3.3.	Вологість повітря (відносна й абсолютна). Точка роси.	159
3.4.	Кипіння. Перегріта рідина	161
3.5.	Приклади розв'язання задач	161
4.	ВЛАСТИВОСТІ РІДИН	164
4.1.	Особливості поверхневого шару рідини.	165
4.2.	Поверхнева енергія. Поверхневий натяг	165
4.3.	Явище змочування. Капілярні явища.	166
4.4.	Формула Лапласа	167
4.5.	Приклади розв'язання задач	168
5.	ВЛАСТИВОСТІ ТВЕРДИХ ТІЛ	175
5.1.	Кристалічні та аморфні тіла. Їхні властивості	175
5.2.	Типи твердих кристалів	176
5.3.	Рідкі кристали.	177
5.4.	Дефекти кристалічних ґраток	177

5.5. Механічні властивості твердих тіл	178
5.6. Приклади розв'язання задач	179
6. ТЕПЛОВЕ РОЗШИРЕННЯ ТВЕРДИХ І РІДКИХ ТІЛ.....	182
6.1. Графік залежності потенціальної енергії взаємодії найпростіших молекул від відстані між ними (потенціальна яма)	182
6.2. Лінійне й об'ємне розширення твердих і рідких тіл.	182
6.3. Особливості теплового розширення води.	183
6.4. Приклади розв'язання задач	183

ОСНОВИ ТЕРМОДИНАМІКИ

1. ВНУТРІШНЯ ЕНЕРГІЯ І ЇЇ ЗМІНА ПРИ ТЕПЛОПЕРЕДАЧІ ТА ВИКОНАННІ РОБОТИ	185
1.1. Внутрішня енергія ідеального газу	186
1.2. Робота ідеального газу. Її геометричне тлумачення ..	186
1.3. Теплопередача та її види.	187
1.4. Кількість теплоти. Рівняння теплового балансу	188
1.5. Питома теплоємність речовини	188
1.6. Питома теплота згоряння палива. ККД нагрівача ...	190
1.7. Змінювання агрегатного стану речовини	190
2. ПЕРШИЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМІКИ. АДІАБАТИЧНИЙ ПРОЦЕС.....	191
3. ДРУГИЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМІКИ. ЕНТРОПІЯ..	193
4. ТЕПЛОВІ ДВИГУНИ	194
5. ПРИКЛАДИ РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧ	196

ЕЛЕКТРОДИНАМІКА

1. ЕЛЕКТРОСТАТИКА.....	207
1.1. Електричний заряд. Закон збереження заряду	207
1.2. Взаємодія зарядів. Закон Кулона.....	208

1.3.	Електричне поле. Електростатичне поле. Напруженість електричного поля. Принцип суперпозиції полів. . . .	209
1.4.	Електричне поле у речовині	212
1.5.	Робота в електростатичному полі. Потенціал поля. Різниця потенціалів двох точок поля	214
1.6.	Електрична напруга	215
1.7.	Електризація тіл	216
1.8.	Електрична ємність. Плоский конденсатор. Енергія електричного поля.	217
1.9.	Приклади розв'язання задач	218
2.	ПОСТІЙНИЙ СТРУМ	223
2.1.	Електричний струм. Сила струму. Густина струму . .	223
2.2.	Закон Ома для ділянки кола. Опір металевих провідників. Надпровідність	224
2.3.	Послідовне і паралельне з'єднання провідників.	226
2.4.	ЕРС. Закон Ома для повного кола. З'єднання елементів	228
2.5.	Робота і потужність струму. Закон Джоуля — Ленца	230
2.6.	Приклади розв'язання задач	231
3.	СТРУМИ ПРОВІДНОСТІ.	236
3.1.	Електричний струм у металах. Контактна різниця потенціалів. Явище Пельтьє	236
3.2.	Струм в електролітах	238
3.3.	Електричний струм у газах (газовий розряд)	240
3.4.	Струм у напівпровідниках	244
3.5.	Струм у вакуумі (струм переносу)	248
3.6.	Приклади розв'язання задач	252
4.	МАГНЕТИЗМ	254
4.1.	Магнітне поле. Магнітна індукція поля	254
4.2.	Магнітне поле струму	256
4.3.	Дія магнітного поля на рухомий заряд (сила Лоренца) і провідник зі струмом (сила Ампера). Правило лівої руки	258
4.4.	Дія магнітного поля на рамку зі струмом. Магнітний потік	259

4.5. Закон взаємодії паралельних струмів	260
4.6. Магнітне поле у речовині	261
4.7. Приклади розв'язання задач	266
5. ЕЛЕКТРОМАГНІТНА ІНДУКЦІЯ.....	272
5.1. Явище електромагнітної індукції. Вихрове електричне поле	272
5.2. Основний закон електромагнітної індукції (закон Фарадея). Правило Ленца. Правило правої руки	274
5.3. Індукційні струми в суцільних провідниках	275
5.4. Самоіндукція. Індуктивність. Енергія магнітного поля	276
5.5. Електромагнітне поле. Теорія Максвелла в якісному вигляді	277
5.6. Приклади розв'язання задач	279

ФІЗИКА КОЛИВАНЬ

1. КОЛИВАЛЬНИЙ РУХ.....	282
1.1. Основні поняття.....	282
1.2. Гармонічні коливання.....	283
1.3. Приклади розв'язання задач	288
2. ЗМІННИЙ СТРУМ	292
2.1. Одержання змінного синусоїдного струму. Закономірності змінного струму	292
2.2. Діюче значення змінного струму	293
2.3. Опір змінному струму. Закон Ома для змінного струму	294
2.4. Електричний резонанс. Резонанс напруг. Резонанс струмів	295
2.5. Випрямлення змінного струму.....	296
2.6. Трансформація змінного струму	297
2.7. Змінний струм високої частоти	298
2.8. Приклади розв'язання задач	299

3. ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ КОЛИВАННЯ.....	302
3.1. Коливальний контур. Вільні електромагнітні коливання	302
3.2. Закономірності вільних електромагнітних коливань. Згасаючі коливання	303
3.3. Отримання незгасаючих електромагнітних коливань	305
3.4. Приклади розв'язання задач	305
4. МЕХАНІЧНІ ХВИЛІ. ЗВУК.....	307
4.1. Поздовжні і поперечні хвилі. Промінь. Довжина хвилі. Фронт хвилі	307
4.2. Принцип Гюйгенса	308
4.3. Інтерференція хвиль.....	310
4.4. Дифракція хвиль.....	310
4.5. Звук. Звукові хвилі. Інтенсивність, висота і тембр звуку	311
4.6. Луна. Звуковий резонанс	312
4.7. Приклади розв'язання задач	313
5. ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ХВИЛІ	314
5.1. Випромінювання електромагнітних хвиль відкритим коливальним контуром	314
5.2. Швидкість поширення електромагнітних хвиль	316
5.3. Принцип радіозв'язку. Модуляція і детектування (демодуляція).....	316
5.4. Класифікація радіохвиль і особливості їх поширення	317
5.5. Приклади розв'язання задач	318

ОПТИКА

1. ХВИЛЬОВА ОПТИКА	320
1.1. Монохроматичне світло. Заломлення світла	320
1.2. Дисперсія світла	321
1.3. Розподіл енергії в спектрі білого світла. Теплове випромінювання	322
1.4. Інтерференція білого світла за Френелем	323

1.5.	Інтерференція білого світла за Ньютоном.	
	Кільця Ньютона	324
1.6.	Дифракція білого світла	325
1.7.	Поляризація світла	327
1.8.	Явище Доплера	328
1.9.	Приклади розв'язання задач	329
2.	ГЕОМЕТРИЧНА ОПТИКА	332
2.1.	Прямолінійне поширення світла в однорідному середовищі	332
2.2.	Закони відбивання світла	332
2.3.	Закони заломлення світла.	
	Повне відбивання світла	334
2.4.	Хід променів через плоскопаралельну пластинку, призму	336
2.5.	Сферичні лінзи	337
2.6.	Око як оптична система	341
2.7.	Оптичні прилади. Кутове збільшення	342
2.8.	Сферичні дзеркала	345
2.9.	Приклади розв'язання задач	346
3.	ВИПРОМІНЮВАННЯ ТА СПЕКТРИ.	348
3.1.	Люмінесценція	348
3.2.	Інфрачервоні та ультрафіолетові промені	348
3.3.	Рентгенівські промені.	349
3.4.	Спектри випромінювання. Спектри поглинання	350
3.5.	Спектральний аналіз	351
3.6.	Приклади розв'язання задач	351

СУЧАСНА ФІЗИКА

1.	СПЕЦІАЛЬНА ТЕОРІЯ ВІДНОСНОСТІ (ЧАСТКОВА ТЕОРІЯ ВІДНОСНОСТІ)	352
1.1.	Поняття про простір і час	352
1.2.	Постулати СТВ. Перетворення Лоренца	352
1.3.	Висновки СТВ	353
1.4.	Приклади розв'язання задач	356

2. КВАНТОВА ОПТИКА	356
2.1. Теорія Планка. Імпульс фотона	356
2.2. Фотоефект	357
2.3. Фотоеlementи та їх застосування	358
2.4. Світловий тиск	358
2.5. Корпускулярно-хвильовий дуалізм	360
2.6. Хімічний вплив світла. Чорно-біла фотографія. Фотосинтез. Ланцюгові реакції	360
2.7. Приклади розв'язання задач	361
3. ФІЗИКА АТОМА	363
3.1. Планетарна модель атома Резерфорда	363
3.2. Постулати Бора. Борівські орбіти	364
3.3. Атом Гідрогену за Н. Бором	365
3.4. Приклади розв'язання задач	365
4. ФІЗИКА АТОМНОГО ЯДРА	367
4.1. Відкриття протона і нейтрона	367
4.2. Теорія будови ядра	368
4.3. Енергія зв'язку ядра. Дефект маси.	368
4.4. Природна радіоактивність	369
4.5. Штучна радіоактивність	370
4.6. Часткове звільнення внутрішньоядерної енергії при екзотермічних ядерних реакціях	370
4.7. Закон радіоактивного розпаду	373
4.8. Приклади розв'язання задач	373
5. ЕЛЕМЕНТАРНІ ЧАСТИНКИ	374
5.1. Фізика елементарних частинок	374
5.2. Приклади розв'язання задач	375
ПРЕДМЕТНИЙ ПОКАЖЧИК	377

ПЕРЕДМОВА

Навчально-практичний довідник складено відповідно до чинної програми з фізики для загальноосвітніх навчальних закладів. Посібник являє собою докладний, заснований на багаторічному педагогічному досвіді авторів, виклад усього курсу фізики загальноосвітньої школи з акцентами на основних поняттях і закономірностях фізики.

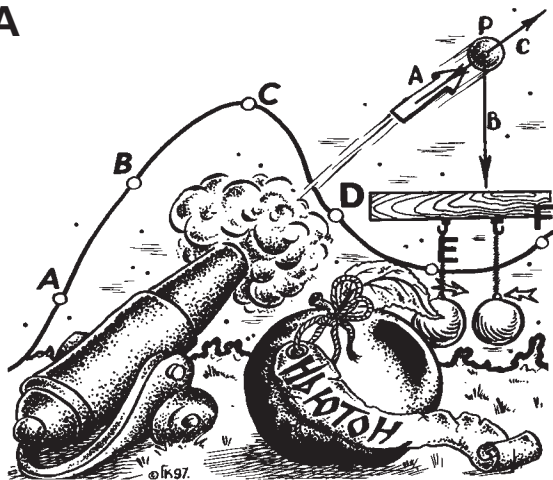
Посібник якнайкраще допоможе учням в реалізації завдань успішного навчання учнів, а вчителям — щодо втілення ідеї диференційованого підходу в процесі навчання фізики. Адже у виданні наведений комплекс спеціально підібраних задач із розв'язаннями, надані методичні рекомендації, розглянутий алгоритм розв'язування кількісних задач, витримані нормативні вимоги до оформлення задач.

Слід звернути увагу й на те, що автори орієнтують учнів не на кількість розв'язаних завдань, а на їхню розмаїтість. Завдання підібрані так, щоб у процесі розв'язування краще усвідомити фізичну суть досліджуваних явищ і закономірностей. Завдання допоможуть учням виділити основне при вивченні певної теми й переконатися в успішному її засвоєнні.

Очевидною є багатопрофільність застосування: посібник можна використати як під час вивчення поточного навчального матеріалу, так і для повторення вже засвоєного й систематизації знань. Посібник значно полегшить підготовку до поточного й підсумкового контролю, зовнішнього незалежного оцінювання; сприятиме формуванню й закріпленню навичок самостійної роботи з довідковою літературою.

Посібник чітко структурований, ілюстрований численними схемами, рисунками, таблицями; ним можна користуватися у комплекті з будь-яким чинним підручником з фізики. Наявність докладного змісту й предметного покажчика максимально полегшать пошук потрібної інформації.

МЕХАНІКА



1. КІНЕМАТИКА МАТЕРІАЛЬНОЇ ТОЧКИ

1.1. ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ

Кінематика — це розділ механіки, що вивчає механічний рух тіл, не розглядаючи причин, які цей рух зумовлюють.

Механічний рух — це зміна з часом положення тіла в просторі відносно інших тіл.

У шкільному курсі кінематики розглядають рівномірний прямолінійний рух, рівноприскорений прямолінійний рух, рівномірний рух по колу.

Основне завдання механіки — визначити координати тіла і його швидкість у будь-який момент часу.

Шляхи спрощення основного завдання механіки:

- розглядати тіло як матеріальну точку;
- розглядати поступальний рух тіла.

Матеріальною точкою називають тіло, розмірами якого можна знехтувати в умовах даної задачі. Матеріальна точка є фізичною моделлю.

Наприклад, якщо розглядати падіння м'яча відносно хлопчика, м'яч можна вважати матеріальною точкою, а при вивченні деформації м'яча при ударі об землю — ні (рис. 1, а).

Поступальним називають такий рух тіла, при якому будь-яка пряма, що пов'язана з тілом, переміщується паралельно собі.

Оскільки всі точки тіла рухаються однаково, його можна розглядати як матеріальну точку (рис. 1, б).

Абсолютно тверде тіло (фізична модель) — тіло, яке за жодних умов не може деформуватися, і за всіх умов відстань між двома точками тіла залишається сталою.

Будь-який процес може описуватися лише в певній системі відліку.

Система відліку (СВ) — це тіло відліку, пов'язана з ним система координат і засіб вимірювання часу (годинник) (рис. 2, а).

Траєкторія — лінія, вздовж якої рухається тіло. Траєкторія буває прямолінійною і криволінійною.

Пройдений шлях (l) — довжина ділянки траєкторії.

Переміщенням тіла ($\vec{S}$) називають напрямлений відрізок прямої, який з'єднує початкове (1) і кінцеве (2) положення тіла (рис. 2, б).

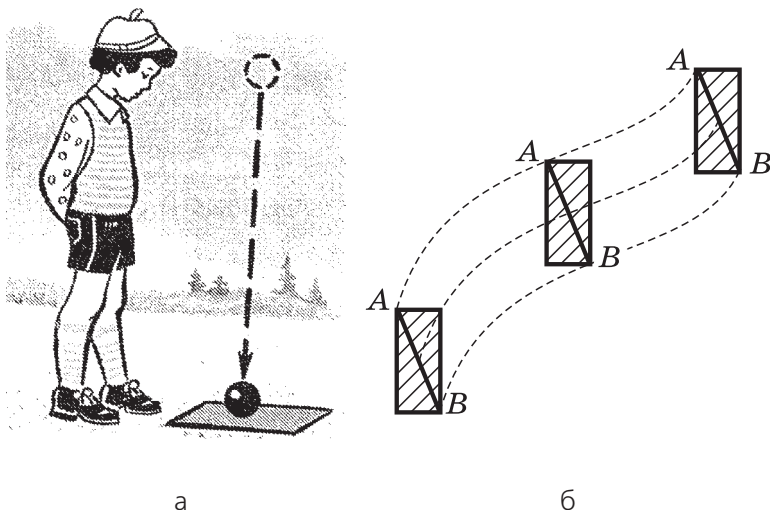


Рис. 1

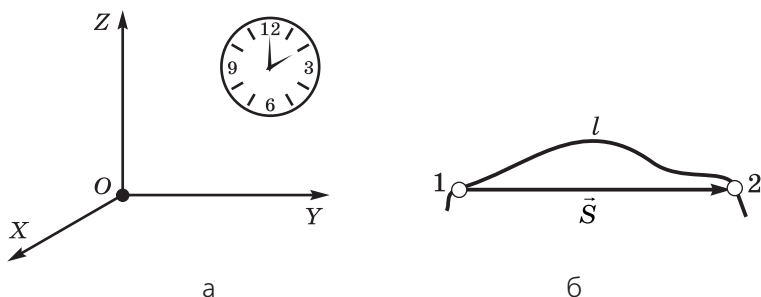


Рис. 2

1.2. ОПЕРАЦІЇ З ВЕКТОРНИМИ ВЕЛИЧИНАМИ

Вектор — напрямлений відрізок. Векторні величини мають числове значення (модуль), напрям, точку прикладання (рис. 3).

Проекція вектора $\vec{a}$ на вісь Ox — довжина відрізка, який сполучає проекцію початку вектора на вісь Ox з проекцією кінця вектора на ту саму вісь. Вона дорівнює добутку модуля цього вектора на косинус кута між напрямом осі та вектора.

$$\frac{a_x}{a} = \cos \alpha, \quad a_x = a \cos \alpha.$$

Проекція вектора може бути додатною, від'ємною і дорівнювати нулю.

Якщо кут між напрямом вектора і віссю гострий, то $\cos \alpha > 0 \Rightarrow a_x > 0$ (рис. 4, а).

Якщо кут між напрямом вектора і віссю тупий, то $\cos \alpha < 0 \Rightarrow a_x < 0$ (рис. 4, б).

Якщо кут між напрямом вектора і віссю прямий ($\alpha = 90^\circ$), то $\cos 90^\circ = 0 \Rightarrow a_x = 0$ (рис. 4, в).

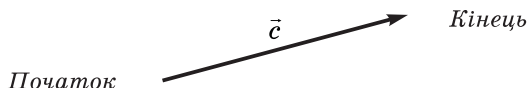


Рис. 3

Модуль векторної величини можна визначити через проекції вектора на осі Ox і Oy (рис. 4, з):

$$a_x = a \cos \alpha, \quad a_y = a \sin \alpha, \quad a = \sqrt{a_x^2 + a_y^2}.$$

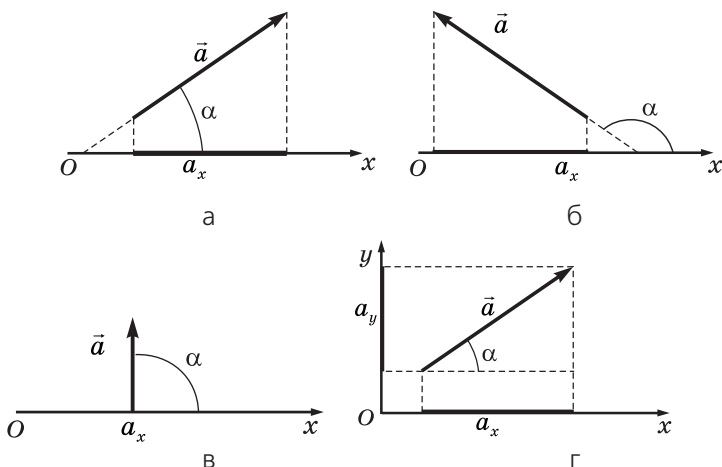


Рис. 4

При **множенні векторної величини на скаляр** одержуємо вектор, колінеарний даному:

$$\vec{a} = k\vec{b}.$$

Додавання векторів за правилом трикутника: паралельним перенесенням суміщується початок другого вектора з кінцем першого, початок третього з кінцем другого і т. ін.; тоді сума векторів — це вектор, що сполучає початок першого вектора з кінцем останнього.

На рис. 5, а зображено додавання двох векторів за правилом трикутника:

$$\vec{a} + \vec{b} = \vec{c},$$

на рис. 5, б — додавання трьох векторів за правилом трикутника:

$$\vec{a} + \vec{b} + \vec{c} = \vec{d}.$$

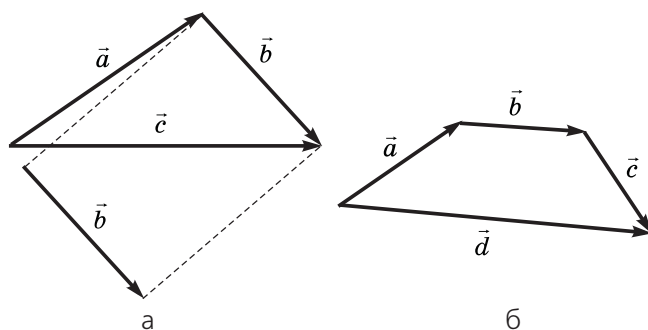


Рис. 5

Додавання векторів за правилом паралелограма: паралельним перенесенням суміщуються початки двох векторів; тоді сума векторів — діагональ, побудована на цих векторах як на сторонах паралелограма.

На рис. 6, а показано додавання двох векторів за правилом паралелограма, на рис. 6, б — додавання трьох векторів за правилом паралелограма.

Віднімання векторів за правилом трикутника: суміщуються початки двох векторів; тоді різниця векторів — це вектор, що з'єднує їх кінці. Він напрямлений у бік зменшуваного вектора.

На рис. 7 показано віднімання двох векторів за правилом трикутника:

$$\vec{m} = \vec{d} - \vec{k}.$$

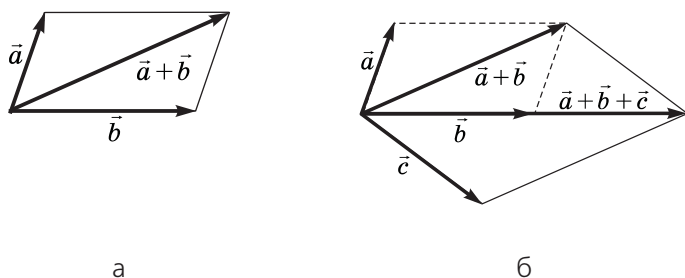


Рис. 6

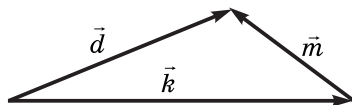


Рис. 7

Проекція суми векторів на координатну вісь дорівнює сумі проекцій складових векторів на ту саму вісь (рис. 8):

$$\vec{a} + \vec{b} = \vec{c}, \quad \begin{cases} Ox \left\{ a_x + b_x = c_x, \right. \\ Oy \left\{ a_y + b_y = c_y. \right. \end{cases}$$

1.3. ВІДНОСНІСТЬ РУХУ. КЛАСИЧНИЙ ЗАКОН ДОДАВАННЯ ШВИДКОСТЕЙ

Відносність механічного руху полягає в тому, що вид траєкторії, шлях і переміщення залежать від вибору системи відліку.

Класичний закон додавання швидкостей: швидкість тіла відносно системи, яку вважають нерухомою, дорівнює геометричній сумі швидкості тіла в рухомій системі відліку й швидкості власне рухомої системи відліку (рис. 9):

$$\vec{v} = \vec{v}_1 + \vec{v}_2.$$

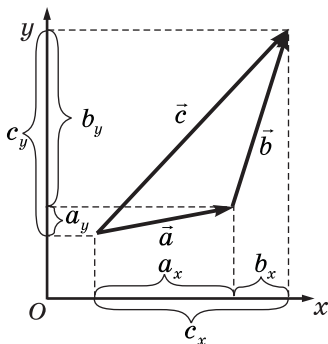


Рис. 8

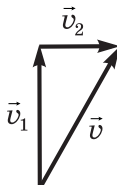


Рис. 9

1.4. ПРЯМОЛІНІЙНИЙ РУХ

1.4.1. РІВНОМІРНИЙ РУХ

Прямолінійним рівномірним рухом називають рух, при якому тіло (матеріальна точка) за будь-які рівні проміжки часу здійснює однакове переміщення, або рух зі сталою швидкістю вздовж прямої:

$$\vec{v} = \text{const} \quad (\vec{a} = 0).$$

Рівняння рівномірного прямолінійного руху тіла $x = x(t)$:

$$x = x_0 + v_x t.$$

Рівняння руху в скалярному вигляді:

$$x = x_0 \pm vt.$$

Якщо тіло рухається вздовж осі Ox , то $v_x = v$, якщо проти, то $v_x = -v$.

Проекція переміщення при рівномірному прямолінійному русі:

$$S_x = v_x t = x - x_0.$$

Графік проекції переміщення при рівномірному прямолінійному русі зображений на рис. 10, а.

Графік проекції швидкості рівномірного прямолінійного руху ($v_x = \text{const}$) зображений на рис. 10, б.

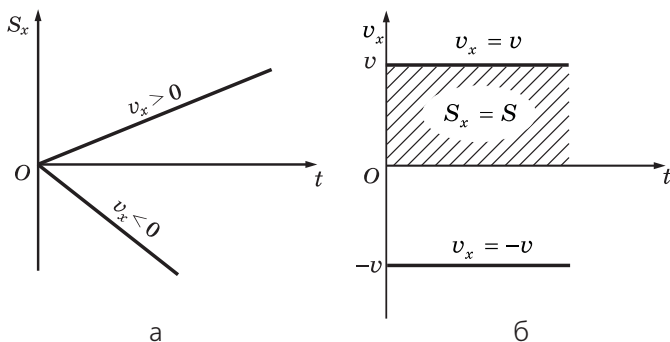


Рис. 10

Геометричне тлумачення переміщення

За графіком швидкості можна визначити проекцію переміщення як площу фігури, обмежену графіком швидкості, віссю часу та двома ординатами, що відповідають початковому і кінцевому значенням часу. Це твердження є справедливим і для рівноприскореного прямолінійного руху.

Графік рівномірного прямолінійного руху ($x = x_0 + v_x t$) зображений на рис. 11.

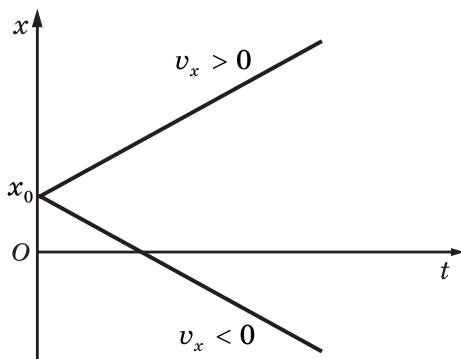


Рис. 11

Миттєва швидкість тіла — швидкість тіла в даний момент часу в даній точці траєкторії:

$$v_x = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta x}{\Delta t} = x'.$$

Середня швидкість — це величина, яка дорівнює відношенню переміщення до часу, протягом якого воно відбулося:

$$\vec{v}_{\text{сеп}} = \frac{\vec{S}}{t}.$$

Середня шляхова швидкість — величина, яка дорівнює відношенню шляху до часу, за який він пройдений:

$$v_{\text{сеп}} = \frac{l}{t}.$$

1. КІНЕМАТИКА МАТЕРІАЛЬНОЇ ТОЧКИ

При **прямолінійному однапрямленому русі** середня шляхова швидкість дорівнює модулю середньої швидкості:

$$v_{\text{сер. шлях}} = v_{\text{сер}}.$$

При **рівноприскореному прямолінійному русі** модуль середньої швидкості визначається за формулою:

$$v_{\text{сер}} = \frac{v_0 + v}{2}.$$

Одиниця швидкості — метр за секунду (1 м/с):

$$[v] = \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Метр за секунду дорівнює швидкості прямолінійного рівномірного руху точки, при якому точка переміщується за 1 с на 1 м.

1.4.2. РІВНОПРИСКОРЕНИЙ РУХ

Рівноприскореним прямолінійним рухом тіла називають такий рух, при якому його швидкість за будь-які однакові інтервали часу змінюється на однакові величини, або рух, який відбувається із сталим прискоренням вздовж прямої:

$$\vec{a} = \text{const}.$$

Прискорення тіла при рівноприскореному русі характеризує швидкість зміни швидкості.

Прискорення рівноприскореного прямолінійного руху — це величина, що дорівнює відношенню зміни швидкості тіла до інтервалу часу, протягом якого ця зміна відбулася:

$$\vec{a} = \frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{\Delta t}.$$

Одиниця прискорення — метр у секунду за секунду (1 м/с²):

$$[a] = 1 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}.$$

1 м/с² дорівнює прискоренню такого рівноприскореного руху тіла, при якому за 1 с швидкість тіла змінюється на 1 м/с.

Проекція кінцевої миттєвої швидкості на вісь Oх при рівноприскореному прямолінійному русі:

$$v_x = v_{0x} + a_x t.$$

Рівняння миттєвої швидкості в скалярному вигляді:

$$v = v_0 = at.$$

У рівнянні $a_x = a$ (рис. 12, а), якщо тіло прискорюється; $a_x = -a$ (рис. 12, б), якщо тіло уповільнюється.

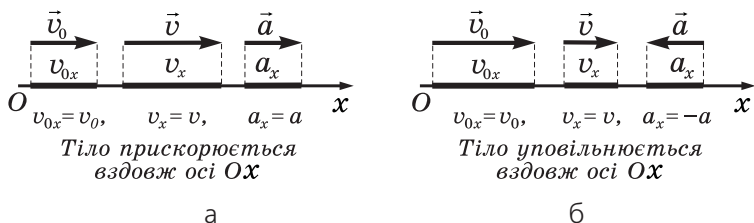


Рис. 12

Проекція переміщення при рівноприскореному прямолінійному русі має вигляд:

$$S_x = \frac{(v_x + v_{0x})}{2} t,$$

$$S_x = v_{0x} t + \frac{a_x t^2}{2},$$

$$S_x = \frac{v^2 - v_{0x}^2}{2a_x}.$$

Рівняння миттєвої швидкості в скалярному вигляді:

$$v = v_0 \pm at; v^2 = v_0^2 + 2aS;$$

$$S = v_0 t \pm \frac{at^2}{2}; S = \frac{(v + v_0)}{2} t.$$

Графік швидкості рівноприскореного прямолінійного руху: тіло I прискорює свій рух уздовж осі Ox , тіло II — уповільнює; у момент часу t_0 воно зупиняється і рухається прискорено в напрямку, протилежному осі Ox (рис. 13, а).

Графік руху при рівноприскореному прямолінійному русі — парабола (рис. 13, б).

Рівняння руху при рівноприскореному прямолінійному русі:

$$x = x_0 + v_{0x}t + \frac{a_x t^2}{2}.$$

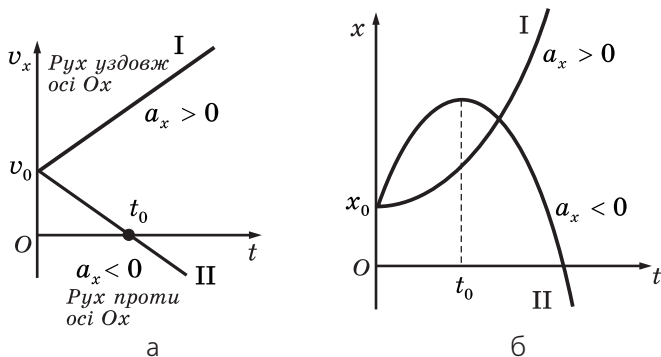


Рис. 13

Графіки руху відповідають графікам швидкості (рис. 13, а).

Тут t_0 — момент часу, що відповідає зупинці тіла, є вершиною параболи II.

Графік прискорення рівноприскореного прямолінійного руху зображений на рис. 14.

Шляхи, які пройшло тіло зі стану спокою ($v_0 = 0$) за однакові послідовні проміжки часу відносяться як ряд послідовних непарних чисел:

$$S_1 : S_2 : S_3 = 1 : 3 : 5.$$

Шлях, який пройшло тіло в останню секунду руху зі стану спокою ($v_0 = 0$):

$$S_n = \frac{a}{2}(2n-1),$$

де n — число секунд.

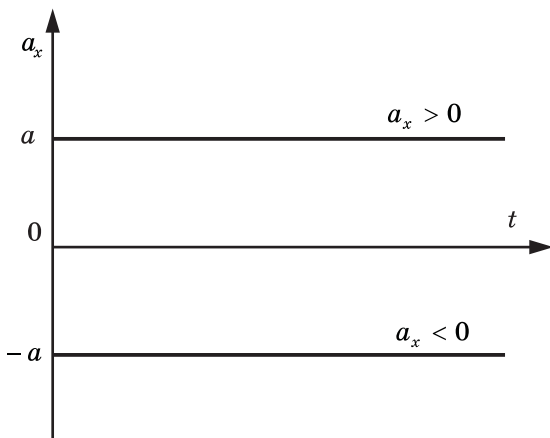


Рис. 14

Вільним падінням називають рух тіла під дією лише сили тяжіння. Воно є рівноприскореним рухом з прискоренням, яке не залежить від маси.

Біля поверхні Землі **прискорення вільного падіння** приблизно дорівнює $9,81 \text{ м/с}^2$.

Рівняння вільного падіння:

$v_0 \neq 0$	$v_0 = 0$
$v = v_0 + gt$	$v = gt$
$h = v_0 t + \frac{gt^2}{2}$	$h = \frac{gt^2}{2}$
$h = \frac{(v + v_0)}{2} t$	$h = \frac{v}{2} t$
$v = \sqrt{2gh + v_0^2}$	$v = \sqrt{2gh}$
$x = x_0 + v_0 t + \frac{gt^2}{2}$	$x = x_0 + \frac{gt^2}{2}$

1.5. КРИВОЛІНІЙНИЙ РУХ. РІВНОМІРНИЙ РУХ ПО КОЛУ

Миттєва швидкість при криволінійному русі напрямлена по дотичній до траєкторії в кожній її точці (рис. 15, а).

Якщо тілу надати прискорення $\vec{a}$, направленого під кутом до його швидкості, то вектор прискорення буде мати дві складові: **дотичне**, або **тангенціальне**, прискорення $\vec{a}_\tau$, напрямлене по дотичній до траєкторії (колінеарно вектору швидкості), і **нормальне** прискорення $\vec{a}_n$, напрямлене перпендикулярно (нормально) до вектора швидкості (рис. 15, б).

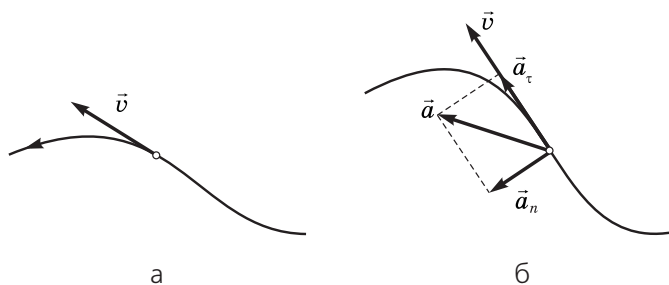


Рис. 15

Якщо розбити криволінійну траєкторію на достатньо маленькі відрізки, то кожний відрізок можна розглядати як дугу кола відповідного радіуса. Тоді нормальне прискорення $\vec{a}_n$ напрямлено до центра кола і тому називається доцентровим $\vec{a}_d$ (рис. 16).

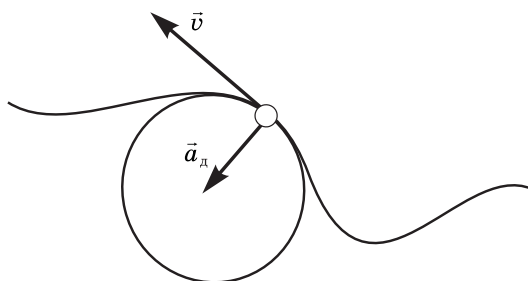


Рис. 16

Тангенціальне прискорення $\vec{a}_\tau$ визначає зміну швидкості за величиною.

Нормальне прискорення $\vec{a}_n$ визначає зміну швидкості за напрямом.

Рух по колу є прикладом криволінійного руху.

Рівномірний рух по колу характеризується кутовою швидкістю ω , лінійною швидкістю v , періодом T , частотою n .

Швидкість $\vec{v}$ напрямлена дотично до кола.

Лінійна швидкість дорівнює модулю миттєвої швидкості.

Під час руху матеріальної точки по колу модуль її миттєвої швидкості з часом не змінюється: $v = \text{const}$ ($v_A = v_B$) (рис. 17).

Лінійна швидкість дорівнює довжині дуги l , пройденої точкою за одиницю часу t :

$$v = \frac{l}{t}, \quad [v] = \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Тангенціальне прискорення при рівномірному русі точки по колу дорівнює нулю:

$$a_\tau = 0.$$

У кожній точці траєкторії доцентрове прискорення напрямлене вздовж радіуса до центра кола, а його модуль дорівнює (рис. 18):

$$a_n = \frac{v^2}{R} = \omega^2 R, \quad [a_n] = \frac{\text{м}}{\text{с}^2}.$$

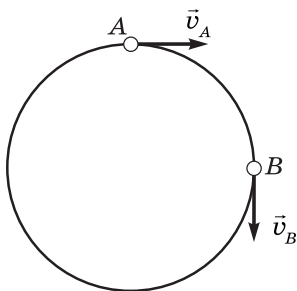


Рис. 17

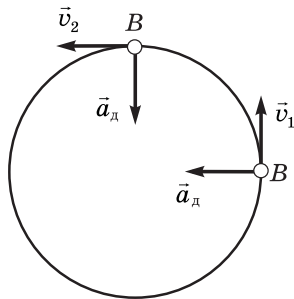


Рис. 18

Кутова швидкість ω рівномірного руху по колу дорівнює куту повороту $\Delta\varphi$ радіуса R за одиницю часу:

$$\omega = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t}, \quad [\omega] = \frac{\text{рад}}{\text{с}}.$$

1 радіан дорівнює центральному куту, який опирається на дугу, довжина якої дорівнює радіусу (рис. 19):

$$\varphi = 1 \text{ рад}.$$

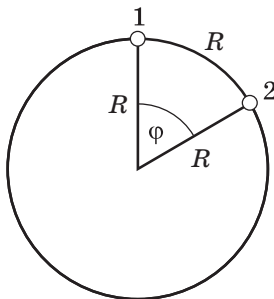


Рис. 19

Повний центральний кут:

$$\varphi_0 = \frac{2\pi R}{R} = 2\pi \text{ рад},$$

$$2\pi \text{ рад} = 360^\circ,$$

$$1 \text{ рад} = \frac{360^\circ}{2\pi} \approx 57^\circ 32'.$$

Період обертання T — це час, за який точка здійснює один повний оберт по колу.

Частота обертання n — кількість повних обертів, здійснюваних точкою при рівномірному русі по колу за одиницю часу.

Зв'язок між періодом і частотою — зворотний:

$$T = \frac{1}{n}, \quad n = \frac{1}{T},$$

$$[T] = \text{с}, \quad [n] = \frac{1}{\text{с}} = \text{с}^{-1}.$$

Секунда мінус першого ступеня (с^{-1}) — це частота обертання, при якій за одну секунду здійснюється один оберт.

Лінійна швидкість визначається так:

$$v = \frac{2\pi R}{T} = 2\pi R n.$$

Кутова швидкість ω визначається так:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi n.$$

Зв'язок між лінійною та кутовою швидкостями:

$$v = \omega R.$$

Кутове прискорення ϵ визначається відношенням зміни кутової швидкості за проміжок часу до тривалості цього проміжку:

$$\epsilon = \frac{\omega - \omega_0}{\Delta t}, [\epsilon] = \frac{\text{рад}}{\text{с}^2}.$$

При зростанні кутової швидкості обертальний рух називається прискореним, а при зменшенні — уповільненим.

1.6. ПРИКЛАДИ РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧ

Вдалиий вибір системи відліку (СВ) спрощує розв'язання задач з кінематики.

Задача 1.

Ескалатор метро піднімає пасажирів, що стоїть нерухомо на ньому, протягом 1 хв. По нерухомому ескалатору пасажир піднімається пішки протягом 3 хв. Скільки часу витратить пасажир на підйом пішки по ескалатору, який рухається?

		Розв'язання:
Дано:	СІ:	СВ «Земля».
$t_2 = 1 \text{ хв}$	$t_2 = 60 \text{ с}$	$\vec{v} = \vec{v}_1 + \vec{v}_2$ — швидкість пасажирів
$t_1 = 3 \text{ хв}$	$t_1 = 180 \text{ с}$	в СВ «Земля» дорівнює сумі швидкості його руху по ескалатору і швидкості ескалатора.
$t = ?$		

Для цієї СВ можна скласти такі рівняння:

$$S = v_1 t_1, \quad (1)$$

$$S = v_2 t_2, \quad (2)$$

$$S = (v_1 + v_2) t. \quad (3)$$

Виражаємо t із (3):

$$t = \frac{S}{v_1 + v_2}, \text{ де } v_1 = \frac{S}{t_1} \text{ із (1), } v_2 = \frac{S}{t_2} \text{ із (2).}$$

Підставляємо:

$$t = \frac{S}{\frac{S}{t_1} + \frac{S}{t_2}} = \frac{S}{S \left(\frac{1}{t_1} + \frac{1}{t_2} \right)} = \frac{1}{\frac{1}{t_1} + \frac{1}{t_2}} = \frac{t_1 t_2}{t_1 + t_2}.$$

Обчислення:

$$[t] = \frac{\text{с} \cdot \text{с}}{\text{с}} = \text{с}, \quad \{t\} = \frac{60 \cdot 80}{60 + 180} = 45.$$

Відповідь: $t = 45$ с.

Задача 2.

Рибалка плыв за течією річки і, пропливаючи під мостом, згубив запасне весло. Через 1 год він помітив утрату і, повернувшись назад, знайшов весло на 6 км нижче від моста. Яка швидкість течії річки, якщо рибалка, рухаючись за і проти течії, докладав однакових зусиль?

Дано:	<i>Розв'язання:</i>
$S = 6$ км	СВ «Вода».
$t = 1$ год	У цій СВ весло нерухоме, оскільки його несе
$v_{\text{теч}}$ — ?	зі швидкістю течії відносно Землі. Отже, наскільки човен віддаляється від весла, настільки ж він
	до нього і наближається. Тому час руху човна до зустрічі з веслом:
	$t_{\text{рух}} = 2t = 2$ год.

Для того щоб визначити швидкість течії, переходимо в СВ «Земля». У цій СВ весло переміщується на 6 км за

2 год. Звідси визначається швидкість течії як швидкість весла відносно Землі:

$$v_{\text{теч}} = \frac{S}{2t}.$$

Обчислення:

$$[v_{\text{теч}}] = \text{км/год}, \{v\} = \frac{6}{2} = 3.$$

Відповідь: $v_{\text{теч}} = 3 \text{ км/год}$.

Задачі на сумісний рух тіл зручно розв'язувати в СВ, пов'язаній з одним із рухомих тіл.

Задача 3.

Два брати вийшли в школу з певним часовим проміжком, причому другий вийшов пізніше, у той час як перший віддалився на 100 м по прямій дорозі. Швидкість першого брата 1 м/с, другого — 2 м/с. Разом із другим братом вискочив собака, який бігав від другого брата до першого і назад із швидкістю 5 м/с. Через який час другий брат дожене першого, і який шлях пробіг собака?

Розв'язання:

Дано:

$$v_1 = 1 \text{ м/с}$$

$$v_2 = 2 \text{ м/с}$$

$$v_3 = 5 \text{ м/с}$$

$$S = 100 \text{ м}$$

Виберемо СВ «1-й брат».

У цій СВ другий брат до зустрічі з першим здійснить переміщення $S = 100 \text{ м}$. Швидкість 2-го брата буде $v = v_2 - v_1$. Тоді час зближення:

$$t \text{ — ?}$$

$$l_3 \text{ — ?}$$

$$t = \frac{S}{v} = \frac{S}{v_2 - v_1}.$$

Шлях, пройдений за цей час собакою, дорівнює:

$$l_3 = v_3 t.$$

Обчислення:

$$[t] = \frac{\text{м}}{\text{м/с}} = \text{с}, \{t\} = \frac{100}{2-1} = 100,$$

$$[l_3] = \frac{\text{м}}{\text{с}} \cdot \text{с} = \text{м}, \quad \{l_3\} = 5 \cdot 100 = 500.$$

Відповідь: $t = 100$ с, $l_3 = 500$ м.

Задача 4.

Поїзд їхав 2 год зі швидкістю 50 км/год, потім 0,5 год не рухався, потім їхав 1 год зі швидкістю 100 км/год. Побудуйте графіки залежності пройденого шляху та швидкості від часу.

Дано:

$$v_1 = 50 \text{ км/год}$$

$$t_1 = 2 \text{ год}$$

$$v_2 = 0$$

$$t_2 = 0,5 \text{ год}$$

$$v_3 = 100 \text{ км/год}$$

$$t_3 = 1 \text{ год}$$

Розв'язання:

Графік залежності шляху від часу — ламана, оскільки на кожному з етапів руху швидкість поїзда стала. Кожний відрізок ламаної можна побудувати за двома точками. Наприклад, за перші 2 год поїзд проїхав 100 км, тому, якщо вимірювати час у годинах, а відстань в кілометрах, координати кінців відповідного відрізка (0; 0) і (2; 100) (рис. 20).

Графіки $l(t)$ і $v(t)$ — ?

Увесь час руху розіб'ємо на проміжки, протягом яких поїзд рухався рівномірно. На кожному такому проміжку графік залежності швидкості від часу є відрізком, паралельним осі t (рис. 21).

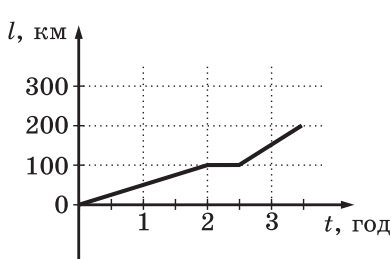


Рис. 20

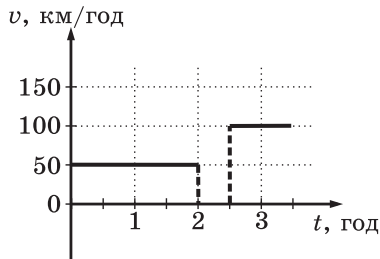


Рис. 21

Задача 5.

Автомобіль першу половину шляху рухався зі швидкістю 40 км/год, а другу — зі швидкістю 60 км/год. Яка середня швидкість на всьому шляху?

Дано:

$$v_1 = 40 \text{ км/год}$$

$$v_2 = 60 \text{ км/год}$$

$$l_1 = l_2 = \frac{l}{2}$$

$$v_{\text{сеп}} \text{ — ?}$$

Розв'язання:

Аналізуючи умову задачі, треба звернути увагу на поняття «половина шляху». Воно означає, що весь шлях l можна подати як суму двох рівних шляхів l_1 і l_2 ,

$$\text{тобто } l_1 = l_2 = \frac{l}{2}.$$

Оскільки рух є нерівномірним, застосуємо формулу середньої швидкості для двох ділянок шляху відповідно до умови задачі:

$$v_{\text{сеп}} = \frac{l}{t} = \frac{l_1 + l_2}{t_1 + t_2}.$$

Аналізуючи умову задачі й формулу середньої швидкості, бачимо, що відсутні t_1 і t_2 . Знайдемо їх за відомими l_1 , v_1 і l_2 , v_2 :

$$t_1 = \frac{l_1}{v_1}, \quad t_2 = \frac{l_2}{v_2}.$$

У формулі середньої швидкості замість t_1 підставимо його значення $\frac{l_1}{v_1}$, а замість t_2 — $\frac{l_2}{v_2}$.

$$\text{Дістанемо: } v_{\text{сеп}} = \frac{l_1 + l_2}{\frac{l_1}{v_1} + \frac{l_2}{v_2}}.$$

Виконаємо підстановку у формулу середньої швидкості значень l_1 і l_2 відповідно до умови задачі $\left(l_1 = \frac{l}{2}, l_2 = \frac{l}{2} \right)$:

$$v_{\text{сеп}} = \frac{\frac{l}{2} + \frac{l}{2}}{\frac{l}{2v_1} + \frac{l}{2v_2}} = \frac{l}{\frac{l}{2} \left(\frac{1}{v_1} + \frac{1}{v_2} \right)}.$$

Скорочуючи на l чисельник і знаменник, отримаємо:

$$v_{\text{сер}} = \frac{1}{\frac{1}{2} \left(\frac{1}{v_1} + \frac{1}{v_2} \right)}.$$

Виконуючи дії над дробами, дістанемо такі співвідношення:

$$v_{\text{сер}} = \frac{2}{\frac{1}{v_1} + \frac{1}{v_2}} = \frac{2}{\frac{v_1 + v_2}{v_1 v_2}} = \frac{2v_1 v_2}{v_1 + v_2}.$$

Обчислення:

$$v_{\text{сер}} = \frac{2 \cdot 40 \cdot 60}{60 + 40} \text{ км/год} = 48 \text{ км/год}.$$

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

Задача 6.

Одне тіло вільно падає з висоти $h_1 = 80 \text{ м}$. Одночасно з ним друге тіло кинуте вертикально вгору з висоти 20 м над Землею. Якою має бути початкова швидкість другого тіла, щоб обидва тіла впали одночасно?

Дано:

$$h_1 = 80 \text{ м}$$

$$h_2 = 20 \text{ м}$$

$$v_{0_1} = 0 \text{ м/с}$$

$$g = 9,8 \text{ м/с}^2$$

$$v_{0_2} = ?$$

Розв'язання:

Перше тіло вільно падало ($v_{0_1} = 0$) з висоти h_1 , отже:

$$h_1 = \frac{gt_{\text{пад}}^2}{2} \Rightarrow t_{\text{пад}} = \sqrt{\frac{2h_1}{g}}.$$

Для визначення початкової швидкості другого тіла зручно вибрати СВ, зв'язану з першим тілом. У цій СВ перше тіло нерухоме, а друге наближається з постійною швидкістю $v = v_{0_2}$, оскільки $v_{0_1} = 0$ і прискорення обох тіл однакове (g). За час ($t_{\text{пад}}$) переміщення другого тіла відносно першого складатиме:

$$S = h_1 - h_2.$$

Тоді

$$S = vt_{\text{пад}} = v_{0_2} t_{\text{пад}}.$$

Звідси

$$v_{0_2} = \frac{S}{t_{\text{пад}}} = \frac{h_1 - h_2}{\sqrt{\frac{2h_1}{g}}} = (h_1 - h_2) \sqrt{\frac{g}{2h_1}},$$

$$v_{0_2} = (h_1 - h_2) \sqrt{\frac{g}{2h_1}}.$$

Обчислення:

$$[v_{0_2}] = \text{м} \cdot \sqrt{\frac{\text{м}}{\text{с}^2 \cdot \text{м}}} = \text{м} \cdot \sqrt{\frac{1}{\text{с}^2}} = \frac{\text{м}}{\text{с}},$$

$$\{v_{0_2}\} = (80 - 20) \cdot \sqrt{\frac{9,8}{2 \cdot 80}} = \frac{60}{4} = 15.$$

Відповідь: $v_{0_2} = 15 \text{ м/с}$.

Такі міркування правомірні, оскільки в класичній механіці час інваріантний у відношенні до вибору системи відліку, і якщо обидва тіла рухаються з однаковим прискоренням, то в СВ одного з тіл друге рухається без прискорення.

Задача 7.

З балкона, який розташований на висоті 25 м над поверхнею Землі, кинуто вгору м'яч зі швидкістю 20 м/с. Написати формулу залежності координати x від часу, вибравши за початок відліку Землю. Через який час м'яч упаде на Землю?

Розв'язання:

Дано:

$v_0 = 20 \text{ м/с}$

$g = 9,8 \text{ м/с}^2$

$h = 25 \text{ м}$

$x = x(t) - ?$

$t_{\text{рух}} - ?$

СВ «Земля».

Направимо вісь Ox уздовж початкової швидкості тіла, тобто протилежно його прискоренню.

Тоді висота балкона h буде початковою координатою тіла x_0 . Рівняння руху тіла буде таким (рис. 22):

$$x = x_0 + v_{0x}t + \frac{g_x t^2}{2} \quad (x_0 = h, \quad v_{0x} = v_0, \quad g_x = -g).$$

$$\text{Тоді } x = h + v_0 t - \frac{gt^2}{2}.$$

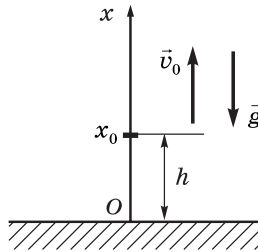


Рис. 22

Під час приземлення $x = 0$, $t = t_{\text{пук}}$;

$$0 = h + v_0 t_{\text{пук}} - \frac{gt_{\text{пук}}^2}{2}, \text{ або } \frac{gt_{\text{пук}}^2}{2} - v_0 t_{\text{пук}} - h = 0.$$

Підставивши значення, розв'яжемо рівняння:

$$5t_{\text{пук}}^2 - 20t_{\text{пук}} - 25 = 0, \quad t_{\text{пук}}^2 - 4t_{\text{пук}} - 5 = 0.$$

Корені рівняння можна знайти за теоремою Вієта: $t_1 = 5$, $t_2 = -1$ (не підходить).

Відповідь: $t_{\text{пук}} = 5$ с.

Задача 8.

За графіком швидкості рівноприскореного прямолінійного руху побудувати графік прискорення $a_x = a_x(t)$ і графік руху $x = x(t)$, якщо $x_0 = 0$ (рис. 23, а):

$$a_x = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{v_x - v_{0x}}{t - t_0},$$

$$a_{1x} = \frac{(3-1)}{(1-0)} = 2 \frac{\text{м}}{\text{с}^2} \text{ (рух прискорений);}$$

$$a_{2x} = \frac{(0-3)}{(4-1)} = -1 \frac{\text{м}}{\text{с}^2} \text{ (рух уповільнений).}$$

Побудуємо графік прискорення (рис. 23, б).

Рівняння руху при рівноприскореному русі має вигляд:

$$x = x_0 + v_{0x}t + \frac{a_x t^2}{2}.$$

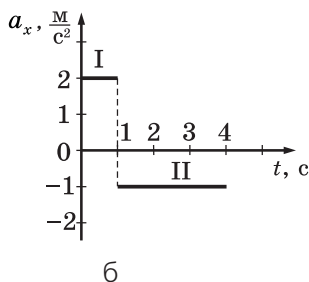
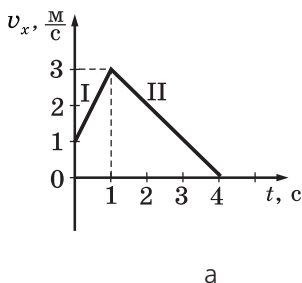


Рис. 23

Для відрізка I:

$$x_1 = 1 \cdot t + \frac{2 \cdot t^2}{2} = t + t^2,$$

оскільки $x_{0_1} = 0$, $v_{0_{1x}} = 1 \text{ м/с}$, $a_{1x} = 2 \text{ м/с}^2$.

Кінцева координата на відрізку I є початковою на відрізку II:

$$x_1(1) = 1 + 1^2 = 2 \text{ м}, \quad x_{0_2} = 2 \text{ м}.$$

Для відрізка II:

$$x_2 = 2 + 3 \cdot t - \frac{t^2}{2}$$

$$(x_{0_2} = 2 \text{ м}, \quad x_{0_{2x}} = 3 \text{ м/с}, \quad a_{2x} = -1 \text{ м/с}^2).$$

Кінцева координата на відрізку II:

$$x(3) = 2 + 3 \cdot 3 - \frac{3^2}{2} = 2 + 9 - 4,5 = 6,5 \text{ м}$$

$$(\Delta t_2 = 3 \text{ с}).$$

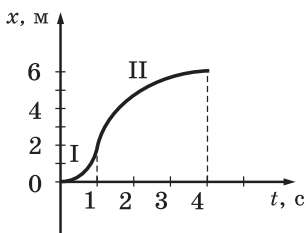


Рис. 24

Побудуємо графік $x = x(t)$ (рис. 24).

Момент часу $t = 4 \text{ с}$ відповідає $v_{2x} = 0$ (зупинці тіла). На графіку $x = x(t)$ це відповідає вершині параболи.

2. ДИНАМІКА МАТЕРІАЛЬНОЇ ТОЧКИ

2.1. ОСНОВНІ ЗАКОНИ ДИНАМІКИ. СИЛА. РІВНОДІЙНА СИЛА

Динаміка — це розділ механіки, який вивчає причини зміни швидкості руху тіл під впливом інших тіл.

Сила (у фізиці) є міра взаємодії тіл, частинок або частинок і поля.

Сила (в механіці) є причина прискорення тіл або частинок тіла.

Сила $\vec{F}$ — векторна величина.

Якщо до матеріальної точки прикладено декілька сил $\vec{F}_1, \vec{F}_2, \dots, \vec{F}_n$ (рис. 25), то їх дію можна замінити дією однієї сили $\vec{F}_p$, яка називається рівнодіюною силою:

$$\vec{F}_p = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_n.$$

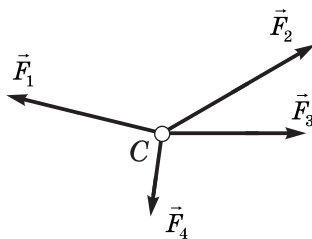


Рис. 25

2.1.1. ПЕРШИЙ ЗАКОН НЬЮТОНА — ЗАКОН ІНЕРЦІЇ

Існують такі системи відліку, відносно яких поступально рухоме тіло зберігає свою швидкість сталою, якщо на нього не діють інші тіла (або вплив інших тіл компенсується).

Такі системи відліку називаються **інерціальними**.

Інерціальна система відліку зв'язана з далекими зорями. Будь-яка система, яка рухається відносно зір рівномірно і прямолінійно, також інерціальна. У зв'язку з тим, що Земля, рухаючись відносно зір (Сонця), мало змінює швидкість, система «Земля» практично інерціальна. Отже, інерціальною буде також СВ, яка рухається відносно Землі рівномірно і прямолінійно.

Явище збереження сталої швидкості (зокрема швидкості, що дорівнює нулю) називають **інерцією**.

Тому і СВ, відносно яких тіла рухаються зі сталою швидкістю за умови компенсації зовнішніх впливів, називаються **інерціальними**, а **перший закон Ньютона називають законом інерції**.

2.1.2. ПРИНЦИП ВІДНОСНОСТІ В КЛАСИЧНІЙ МЕХАНІЦІ (ПРИНЦИП ВІДНОСНОСТІ ГАЛІЛЕЯ)

Принцип відносності в класичній механіці: для будь-яких механічних явищ усі інерціальні СВ є рівноправними.

Це зумовлено тим, що маса m , довжина l , проміжок часу Δt в усіх інерціальних СВ мають однакове значення (**є інваріантними**).

2.1.3. МІЖНАРОДНА СИСТЕМА ОДИНИЦЬ У МЕХАНІЦІ

Основні одиниці у механіці:

кг — кілограм,

м — метр,

с — секунда.

Усі інші одиниці фізичних величин є похідними на підставі фізичних закономірностей (м/с , м/с^2) (табл. 1).

2.1.4. МАСА. ЦЕНТР МАСИ

Маса — фізична величина, яка кількісно характеризує інертні властивості тіла.

Інертність полягає в тому, що для зміни швидкості руху тіла даною силою потрібен деякий час. Чим більшим є цей час, тим інертнішим є тіло.

Одиницею маси в СІ є 1 кг.

Еталон маси, виготовлений зі сплаву іридія та платини, зберігається в м. Севр поблизу Парижа.

Масу можна визначити:

1. За взаємодією тіла масою m_t з еталоном (тілом відомої маси):

$$\frac{m_t}{m_{\text{ет}}} = \frac{a_{\text{ет}}}{a_t}.$$

2. ДИНАМІКА МАТЕРІАЛЬНОЇ ТОЧКИ

Маса як **міра інертності** тіла визначається відношенням модуля прискорення еталона до модуля прискорення тіла при його взаємодії з еталоном:

$$m_t = \frac{a_{\text{ет}}}{a_t} m_{\text{ет}}.$$

2. Зважуванням на важільних терезах, де порівнюється взаємодія тіла і важків із Землею.

3. Розрахунком її за відомою густиною речовини і об'ємом тіла:

$$m = \rho V.$$

4. Вираженням її через масу однієї молекули m_0 та кількість молекул N :

$$m = m_0 N.$$

Таблиця 1

Одиниці фізичних величин в СІ			
Величини		Одиниці	
Найменування	Позначення	Найменування	Позначення
Основні			
Довжина	l	Метр	м
Маса	m	Кілограм	кг
Час	t	Секунда	с
Температура	T	Кельвін	К
Сила струму	I	Ампер	А
Сила світла	J	Кандела	кд
Кількість речовини	ν	Моль	моль
Додаткові одиниці			
Плоский кут	φ	Радіан	рад
Тілесний кут	Ω	Стерадіан	ср

У механіці Ньютона вважається, що:

- маса тіла не залежить від швидкості його руху;
- для тіла виконується закон збереження маси.

У релятивістській механіці (механіці великих швидкостей $v \approx c$) маса тіла залежить від швидкості його руху:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}},$$

де m_0 — маса спокою тіла; $c = 3 \cdot 10^8$ м/с.

Центр маси — точка, через яку повинна проходити лінія дії сили, щоб тіло рухалось поступально.

На рис. 26 точка C — центр маси тіла.

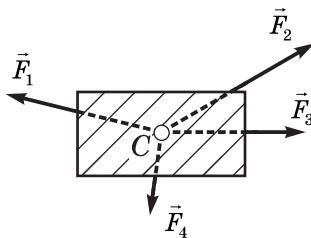


Рис. 26

Центр маси системи рухається як матеріальна точка, у якій зосереджена маса всієї системи і на яку діє сила, що дорівнює геометричній сумі всіх зовнішніх сил, що діють на тіло.

2.1.5. ДРУГИЙ ЗАКОН НЬЮТОНА В КЛАСИЧНІЙ І РЕЛЯТИВІСТСЬКІЙ МЕХАНІЦІ

Сила, яка діє на тіло, дорівнює добутку маси тіла на прискорення, яке надається даною силою:

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

Ця сила тільки надає тілу прискорення і не залежить від дії інших сил на це тіло.

Основне рівняння динаміки — якщо на тіло діє декілька сил, то геометрична сума всіх зовнішніх сил дорівнює до-

бутку маси тіла на прискорення, з котрим рухається тіло під впливом усіх сил:

$$\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_n = m\vec{a}.$$

Одиницею сили є 1 Н (ньютон).

1 Н — це постійна сила, яка надає тілу масою 1 кг прискорення 1 м/с^2 :

$$1 \text{ Н} = 1 \text{ кг} \frac{\text{м}}{\text{с}^2}.$$

Межі застосування другого закону Ньютона

Цей закон застосовується:

- 1) під час розглядання руху тіл зі швидкостями набагато меншими від швидкості світла ($v \ll c$);
- 2) в інерціальній системі відліку.

Другий закон Ньютона в імпульсній формі застосовується як у класичній механіці (механіці Ньютона), так і в релятивістській (механіці Ейнштейна).

Другий закон Ньютона в імпульсній формі — імпульс сили, що діє на тіло, дорівнює зміні імпульсу тіла:

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

Імпульс тіла — це векторна величина, яка дорівнює добутку маси тіла на його швидкість:

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

Одиницею виміру імпульсу є $1 \text{ кг} \frac{\text{м}}{\text{с}}$.

2.1.6. ТРЕТІЙ ЗАКОН НЬЮТОНА

Тіла діють одне на одне із силами, спрямованими вздовж однієї прямої, рівними за модулем і протилежними за напрямком:

$$\vec{F}_1 = -\vec{F}_2, \quad F_1 = F_2.$$

Сили взаємодії тіл виникають парами і мають однакову природу (рис. 27, а, б):

$$\vec{P} = -\vec{N}, \quad \vec{F}_{\text{тер}} = -\vec{F}'_{\text{тер}}.$$

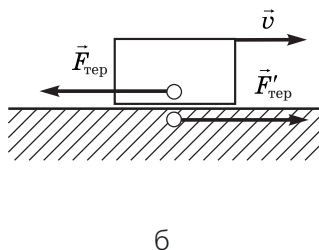
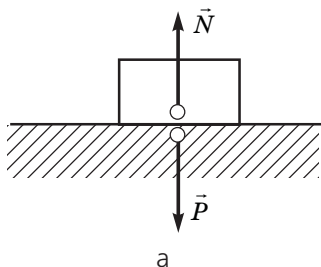


Рис. 27

Сили взаємодії тіл прикладені до різних тіл і тому не мають рівнодійної.

Сила натягу нитки (пружини), яка з'єднує тіла, діє кінцями нитки на кожне тіло з силою натягу (рис. 28):

$$\vec{F} = -\vec{F}_n(\vec{T}).$$



Рис. 28

2.2. СИЛИ В МЕХАНІЦІ

2.2.1. СИЛА ТЕРТЯ. В'ЯЗКЕ ТЕРТЯ

Сила тертя — це сила, яка виникає під час руху одного тіла по поверхні іншого і перешкоджає цьому руху.

Наприклад, двигун автомобіля обертає ведучі колеса. Тертя по землі перешкоджає цьому обертанню, штовхаючи колесо вперед (таким чином, виникає сила тяги автомобіля) (рис. 29, а).

Сила тертя ковзання $\vec{F}_{\text{тер.ковз}}$ виникає при ковзанні одного тіла по поверхні іншого. Її напрям протилежний швидкості руху тіла (рис. 29, б).

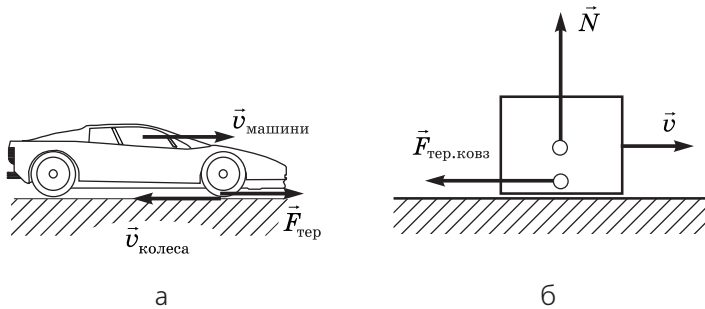


Рис. 29

Модуль сили тертя ковзання прямо пропорційний силі нормальної реакції опори $\vec{N}$:

$$F_{\text{тер. ковз}} = \mu N,$$

де μ — безрозмірна величина.

Коефіцієнт пропорційності μ — **коефіцієнт тертя ковзання**, який залежить від виду речовин тіл, які стикаються, стану їх поверхонь та швидкості ковзання одного тіла відносно іншого.

При розв'язанні багатьох задач можна користуватись деяким середнім значенням коефіцієнта тертя ковзання. При малих швидкостях можна вважати, що він дорівнює коефіцієнту тертя спокою (рис. 30):

$$\mu_{\text{тер. ковз}} = \mu_{\text{тер. сп.}}$$

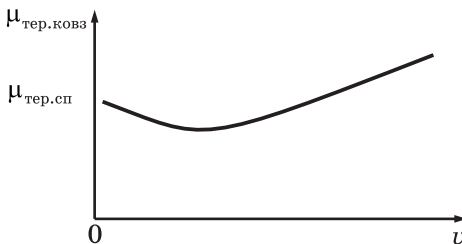


Рис. 30

Модуль сили тертя ковзання під час руху по горизонтальній поверхні:

$$F_{\text{тер. ковз}} = \mu mg, \text{ оскільки } N = mg.$$

Модуль сили тертя ковзання під час руху по поверхні, яка утворює з горизонтом кут α :

$$F_{\text{тер. ковз}} = \mu mg \cos \alpha,$$

тому що

$$N = mg \cos \alpha.$$

Сила тертя спокою $\vec{F}_{\text{тер. сп}}$ однакова за модулем і спрямована протилежно тій зовнішній силі $\vec{F}$, яка викликає ковзання одного тіла по іншому (рис. 31).

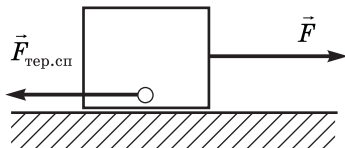


Рис. 31

Максимальне значення модуля сили тертя спокою:

$$F_{\text{тер. сп max}} = \mu_{\text{сп}} N.$$

Тертя кочення виникає при коченні одного тіла по поверхні іншого.

Модуль сили тертя кочення дорівнює відношенню добутку коефіцієнта тертя кочення k , модуля сили нормальної реакції опори N до радіуса R тіла, що котиться:

$$F_{\text{тер. коч}} = \frac{kN}{R}.$$

Для більшості поверхонь сила тертя кочення менша за силу тертя ковзання. Тому широко практикується заміна тертя ковзання тертям кочення (кулькові і роликові підшипники):

$$F_{\text{тер. коч}} \ll F_{\text{тер. ковз}}.$$

При дуже великих швидкостях сухе тертя переходить у в'язке, оскільки між поверхнями утворюється прошарок повітря.

В'язке тертя виникає при русі твердого тіла у рідині або газі. Сила в'язкого тертя $\vec{F}_{\text{тер. в'язк}}$ спрямована проти швидкості руху тіла (рис. 32).

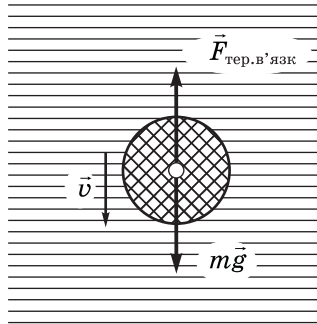


Рис. 32

Особливості в'язкого тертя

1. Сила тертя спокою відсутня:

$$F_{\text{тер. сп}} = 0.$$

2. Модуль сили в'язкого тертя залежить від швидкості руху тіла:

при малих швидкостях:

$$F_{\text{тер. в'язк}} = \beta_1 v,$$

при великих швидкостях:

$$F_{\text{тер. в'язк}} = \beta_2 v^2,$$

де β_1 , β_2 — коефіцієнти пропорційності між модулем сили в'язкого тертя та швидкістю руху тіла. Характеризує обтікання поверхні тіла та в'язкість середовища.

2.2.2. СИЛИ ПРУЖНОСТІ. ЗАКОН ГУКА. МЕХАНІЧНА НАПРУГА

Сили пружності — це сили, які виникають при деформації тіла і перешкоджають цій деформації.

Сили пружності спрямовані перпендикулярно до поверхні деформованого тіла ($\vec{N}$) — наприклад, нормальна реакція опори (сила пружності підставки), або вздовж нитки ($\vec{T}$) (рис. 33, а, б).

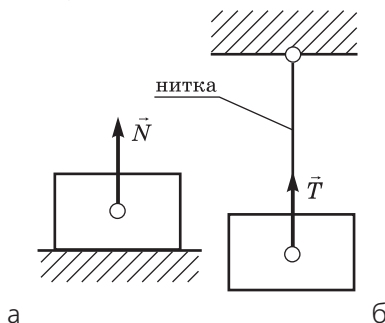


Рис. 33

Деформацією твердого тіла називають зміну форми та об'єму тіла під зовнішнім впливом.

Розрізняють пружну і пластичну деформації.

Пружна деформація повністю зникає після припинення дії зовнішніх сил.

Пластична деформація не зникає після припинення дії зовнішніх сил.

У випадку пружної деформації модуль сили пружності визначається за законом Гука: сила пружності при пружній деформації прямо пропорційна абсолютному подовженню тіла і протилежно до нього напрямлена (рис. 34):

$$F_{\text{пруж } x} = -kx ,$$

$$[x] = \text{м} , [k] = \frac{\text{Н}}{\text{м}} .$$

Абсолютне подовження тіла (x) визначається різницею кінцевої і початкової довжин тіла:

$$x = l - l_0 = \Delta l .$$

Тут k — коефіцієнт пружності, або жорсткості, залежить від геометричних розмірів тіла (S, l_0) та виду речовини (E)

2. ДИНАМІКА МАТЕРІАЛЬНОЇ ТОЧКИ

(S — площа поперечного перерізу, l_0 — початкова довжина тіла, E — модуль пружності, або модуль Юнга):

$$k = \frac{SE}{l_0},$$

$$[S] = \text{м}^2, [l_0] = \text{м}, [E] = \frac{\text{Н}}{\text{м}^2} = \text{Па}.$$

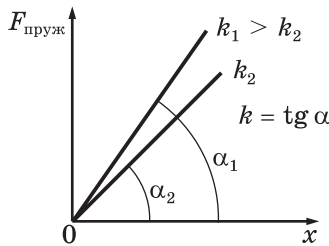


Рис. 34

Одиниця жорсткості — ньютон на метр:

$$[k] = \frac{\text{Н}}{\text{м}}.$$

Модуль Юнга (модуль пружності) чисельно дорівнює механічній напрузі, яка виникає в тілі при подовженні тіла на величину початкової його довжини ($l = 2l_0$).

Модуль Юнга характеризує опірність матеріалу пружної деформації розтягу або стиску.

Види пружної деформації

1. Деформація розтягу або стиску. Закон Гука

в цьому випадку має вигляд:

механічна напруга (σ) при пружній деформації прямо пропорційна відносному подовженню тіла (ϵ) (рис. 35):

$$\sigma = E \cdot |\epsilon|.$$

Максимальна напруга, при якій ще виконується закон Гука, називається межею пропорційності ($\sigma_{\text{п}}$).

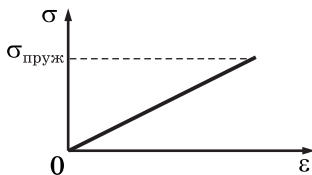


Рис. 35

Відносне подовження тіла (ϵ) — це величина, яка дорівнює відношенню абсолютного подовження (Δl) тіла до його початкової довжини (l_0):

$$\frac{|\Delta l|}{l_0} = |\epsilon|.$$

Механічна напруга (σ) — це відношення модуля сили пружності ($F_{\text{пр}}$) до площі поперечного перерізу (S) тіла (рис. 36):

$$\sigma = \frac{F_{\text{пруж}}}{S}, \quad [\sigma] = \frac{\text{Н}}{\text{м}^2} = \text{Па}.$$

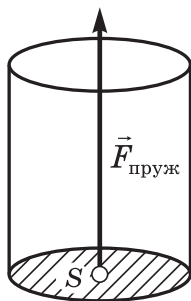


Рис. 36

2. Деформація вигину та кручення (рис. 37, а).

3. Деформація зсуву (рис. 37, б).

Сили пружності й тертя є проявом електромагнітних сил.

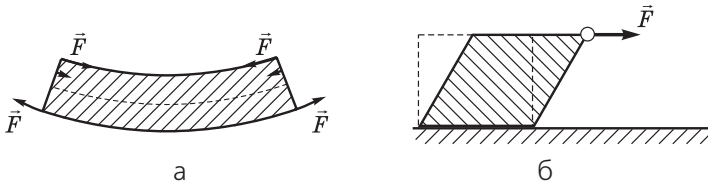


Рис. 37

2.2.3. ГРАВІТАЦІЙНІ СИЛИ

Сила **тяжіння** і **всесвітнього тяжіння** є гравітаційні сили. Вони є виявом гравітаційних полів.

Гравітаційне поле характеризує зміну фізичних і геометричних властивостей простору поблизу масивних тіл і може бути виявлене за силовим впливом на інші фізичні тіла.

Сила всесвітнього тяжіння — сила, яка обумовлює притягання всіх тіл у Всесвіті.

Вона визначається за законом всесвітнього тяжіння, якщо тіла можна прийняти за матеріальні точки або кулі з однорідним чи радіальним розподілом густини (r_{12} — відстань між центрами мас взаємодіючих тіл) (рис. 38).

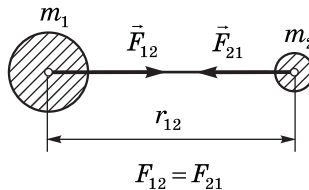


Рис. 38

Закон всесвітнього тяжіння, відкритий Ньютоном: дві матеріальні точки притягуються одна до одної з силами, модуль яких прямо пропорційний добутку їх мас і обернено пропорційний квадрату відстані між ними:

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r_{12}^2}.$$

Коефіцієнт пропорційності називають **гравітаційною сталою** та позначають G .

Гравітаційна стала чисельно дорівнює силі притягання між двома матеріальними точками масою по 1 кг, розташованими на відстані 1 м:

$$G = 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{м}^3}{\text{кг} \cdot \text{с}^2}.$$

Одним із проявів сили всесвітнього тяжіння є сила притягання тіла до Землі, яка називається **силою тяжіння** і за другим законом Ньютона дорівнює mg , де $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ — прискорення вільного падіння біля поверхні Землі:

$$\vec{F}_\tau = m\vec{g}.$$

Прискорення вільного падіння біля поверхні Землі можна обчислити за формулою:

$$g = \frac{GM_3}{R_3^2}.$$

Прискорення вільного падіння на висоті h над поверхнею Землі:

$$g' = \frac{GM_3}{(R_3 + h)^2},$$

де $M_3 = 6 \cdot 10^{24} \text{ кг}$ — маса Землі;

$R_3 = 6400 \text{ км}$ — середній радіус Землі.

2.2.4. ВАГА ТІЛА. ВАГА ТІЛА, ЯКЕ РУХАЄТЬСЯ З ПРИСКОРЕННЯМ. ПЕРЕВАНТАЖЕННЯ. НЕВАГОМИСТЬ

Вага тіла — це сила, з якою тіло діє на опору чи підвіс унаслідок притягання його до Землі.

Якщо опора перебуває в спокої або рухається рівномірно і прямолінійно, то вага тіла за величиною і напрямком збігається з силою тяжіння. Але вага прикладена до опори $\vec{P} = -\vec{N}$ чи підвісу, а сила тяжіння — до центра маси тіла $\vec{N} = -m\vec{g}$, отже, $\vec{P} = -m\vec{g}$.

2. ДИНАМІКА МАТЕРІАЛЬНОЇ ТОЧКИ

Якщо опора горизонтальна, вага тіла є силою пружності, з якою тіло діє на опору (рис. 39).

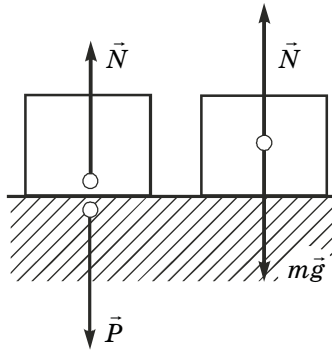


Рис. 39

Якщо опора — похила площина, то вага тіла — рівнодійна сил пружності й тертя спокою, з якими тіло діє на опору (рис. 40):

$$\vec{P} = -\vec{Q} \text{ або } \vec{P} = -(\vec{N} + \vec{F}_{\text{тер.сп}}),$$

де $\vec{Q}$ — сила реакції опори; $\vec{N}$ — нормальна реакція опори.
 $\vec{F}_{\text{н.т}}$ — сила нормального тиску.

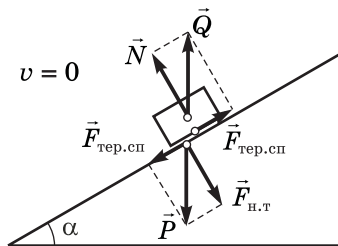


Рис. 40

Вага тіла, яке рухається з прискоренням, змінюється.

Якщо прискорення тіла напрямлене вертикально вгору, то його вага збільшується:

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

Якщо $a = ng$, то виникає перевантаження у $(n + 1)$ разів:

$$P = mg(n + 1).$$

Перевантаження показує, у скільки разів збільшується вага тіла, яке рухається з прискоренням, порівняно з вагою тіла, яке перебуває в спокої на горизонтальній опорі.

Якщо прискорення тіла напрямлене вертикально вниз, то модуль ваги тіла дорівнює:

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

Якщо прискорення тіла дорівнює прискоренню вільного падіння, то вага тіла дорівнює нулю (стан **невагомості**):

$$\vec{a} = \vec{g}, \vec{P} = 0.$$

Невагомість — це такий стан тіла, при якому відсутня внутрішня напруженість, обумовлена силою тяжіння.

Причина невагомості полягає в тому, що сила тяжіння надає тілу і його опорі однакового прискорення. Цей висновок справедливий для всіх тіл, які рухаються тільки під дією сили тяжіння.

Якщо прискорення тіла напрямлене горизонтально, то модуль ваги визначається за формулою:

$$P = m\sqrt{g^2 + a^2}.$$

Вага тіла напрямлена під кутом α до вертикалі (рис. 41):

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{a}{g}.$$

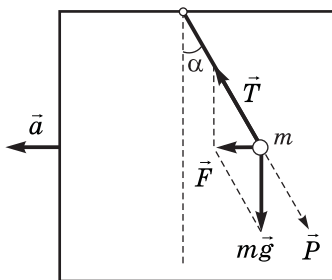


Рис. 41

2.3. РУХ ТІЛА В БЕЗПОВІТРЯНОМУ ПРОСТОРІ (БЕЗ УРАХУВАННЯ СИЛИ ТЕРТЯ)

2.3.1. РУХ ТІЛА, КИНУТОГО ГОРИЗОНТАЛЬНО

Тіло, кинуте горизонтально, рухається по параболічній траєкторії: його рух складається із руху горизонтального зі сталою швидкістю $\vec{v}_0$ і вільного падіння з нульовою початковою швидкістю.

На рис. 42 зображено рух тіла, кинутого горизонтально.

Дальність польоту тіла: $l = v_0 t$.

Висота падіння тіла: $h = \frac{gt^2}{2}$.

Швидкість тіла $\vec{v}$ під час руху по параболі напрямлена по дотичній у будь-якій точці траєкторії і дорівнює геометричній сумі $\vec{v}_0$ і $\vec{g}t$ ($\vec{v}_0$ — початкова швидкість тіла):

$$\vec{v} = \vec{v}_0 + \vec{g}t.$$

Модуль швидкості тіла, кинутого горизонтально, розраховуємо за формулою (рис. 43):

$$v = \sqrt{v_0^2 + (gt)^2}.$$

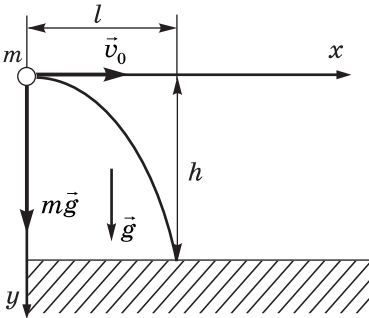


Рис. 42

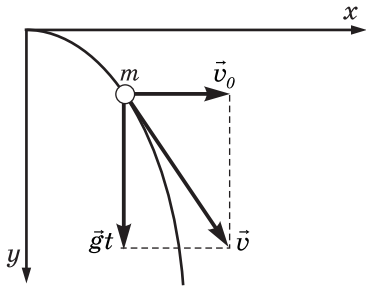


Рис. 43

2.3.2. РУХ ТІЛА, КИНУТОГО ПІД КУТОМ ДО ГОРИЗОНТУ

Траєкторія руху тіла — парабола (рис. 44).

Дальність польоту тіла, кинутого під кутом α до горизонту:

$$l = \frac{v_0^2 \sin 2\alpha}{g}.$$

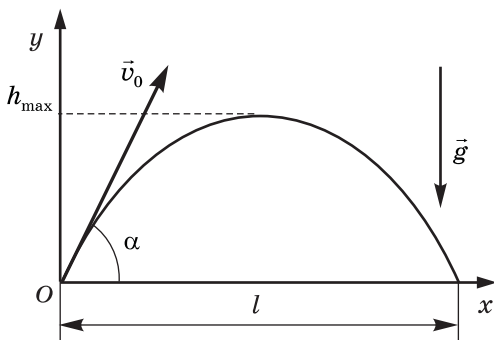


Рис. 44

Максимальна висота піднімання тіла ($\pi > \alpha > 0$):

$$h_{\max} = \frac{v_0^2 \sin^2 \alpha}{2g}.$$

Час руху:

$$t_{\text{рух}} = 2t_{\text{під}} \frac{2v_0 \sin \alpha}{g}.$$

2.3.3. ПЕРША КОСМІЧНА ШВИДКІСТЬ

Перша космічна швидкість — це та швидкість, яку необхідно надати тілу, кидаючи його із Землі, щоб воно стало штучним супутником Землі (на невеликій, порівняно з радіусом Землі, висоті).

Значення цієї швидкості обчислюється за формулою:

$$v = \sqrt{gR_3},$$

де $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ поблизу поверхні Землі;

$R_3 = 6400 \text{ км}$ — радіус Землі.

2.3.4. ОРБІТАЛЬНА ШВИДКІСТЬ

Орбітальна швидкість — це швидкість, яку повинен мати штучний супутник Землі на орбіті висотою h над поверхнею Землі.

Модуль орбітальної швидкості:

$$v = \sqrt{\frac{GM_3}{R_3 + h}},$$

де h — висота над Землею; R_3 — радіус Землі;

M_3 — маса Землі; G — гравітаційна стала.

Орбітальна швидкість напрямлена по дотичній до даної точки траєкторії, тобто перпендикулярно до радіуса орбіти (рис. 45).

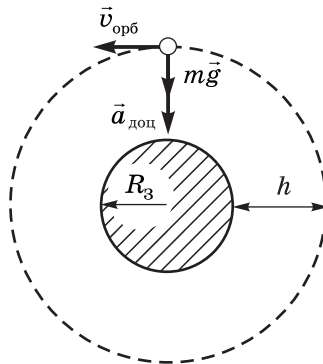


Рис. 45

2.4. АЛГОРИТМ РОЗВ'ЯЗАННЯ КІЛЬКІСНИХ ЗАДАЧ ІЗ ФІЗИКИ

1. Вивчити умову задачі і записати її згідно з прийнятою символікою.
2. Перевести всі дані задачі в СІ.
3. Зробити в разі необхідності рисунок до розв'язку задачі.
4. Використовуючи відомі закономірності та формули, розв'язати задачу в загальному вигляді, якщо це не ускладнює розв'язання.

5. Установити чи перевірити одиниці певних величин:
наприклад, $[m] = \text{кг}$.
6. Розрахувати числові значення певної величини:
наприклад, $\{m\} = 2000$.
7. Записати відповідь і проаналізувати її реальність, відповідність умові задачі.
8. Відповідь записується згідно з умовами Держстандарту: фізична величина виражається числом у межах від 0,1 до 1000, для чого використовуються часткові і кратні приставки:
наприклад, відповідь: $m = 2 \text{ т}$.

2.5. МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧ З ДИНАМІКИ

1. Зробити рисунок до задачі, вказавши всі діючі на тіло сили та вісь, уздовж якої рухається тіло. Вісь раціонально орієнтувати у напрямку прискорення тіла, що рухається.

2. Якщо при проектуванні фізичних величин на вибрану вісь виходить рівняння з двома невідомими, необхідно ввести другу вісь (перпендикулярно до першої) і проектувати величини також на неї.

2.6. ПРИКЛАДИ РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧ

Задача 1.

Автомобіль масою 5 т рушає з місця з прискоренням $0,6 \text{ м/с}^2$. Знайти силу тяги, якщо коефіцієнт тертя становить 0,04.

Дано:

$$v_0 = 0$$

$$a = 0,6 \text{ м/с}^2$$

$$m = 5 \text{ т} = 5000 \text{ кг}$$

$$\mu = 0,04$$

$$g = 9,8 \text{ м/с}^2$$

$$F_{\text{тяги}} \text{ — ?}$$

Розв'язання:

Вивчивши умову задачі, побудуємо рис. 46. Вважаємо, що траєкторія руху прямолінійна. Зобразимо сили, які діють на автомобіль, урахувавши, що прискорення співнаправлене з рівнодійною силою. Отже, модуль сили тяги більший за модуль сили тертя.

2. ДИНАМІКА МАТЕРІАЛЬНОЇ ТОЧКИ

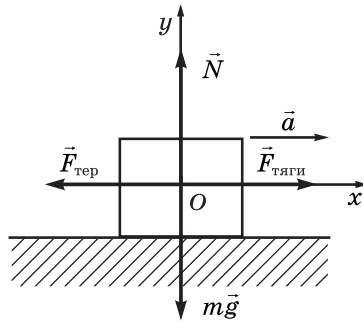


Рис. 46

Згідно з другим законом Ньютона:

$$\vec{F}_{\text{рів}} = \vec{a}m. \quad (1)$$

Розпишемо рівнодійну силу як геометричну суму сил, які діють на тіло:

$$\vec{F}_{\text{рів}} = \vec{F}_{\text{тяги}} + \vec{F}_{\text{тер}} + \vec{N} + m\vec{g}.$$

Підставимо значення рівнодійної сили у вираз (1):

$$\vec{F}_{\text{тяги}} + \vec{F}_{\text{тер}} + \vec{N} + m\vec{g} = \vec{a}m. \quad (2)$$

Виберемо вісь для проектування, яка збігатиметься з напрямом прискорення, і спроекуємо на вісь Ox ліву і праву частини виразу (2):

$$Ox: F_{\text{тяги}x} + F_{\text{тер}x} + N_x + mg_x = a_x m. \quad (3)$$

Розпишемо проекції на вісь Ox :

$$F_{\text{тяги}x} = F_{\text{тяги}} \cos 0^\circ = F_{\text{тяги}} \cdot 1 = F_{\text{тяги}},$$

оскільки $\cos 0^\circ = 1$.

$$F_{\text{тер}x} = F_{\text{тер}} \cos 180^\circ = F_{\text{тер}} (-1) = -F_{\text{тер}},$$

оскільки $\cos 180^\circ = -1$.

$$mg_x = mg \cos 90^\circ = mg \cdot 0 = 0,$$

$$N_x = N \cos 90^\circ = N \cdot 0 = 0,$$

оскільки $\cos 90^\circ = 0$.

$$a_x m = am \cos 0^\circ = am.$$

Підставимо значення проекцій у вираз (2):

$$F_{\text{тяги}} - F_{\text{тер}} = ma.$$

Тобто $F_{\text{тяги}} = ma + F_{\text{тер}}$, де $F_{\text{тер}} = \mu N$.

При горизонтальному русі можна вважати, що $N = mg$,
тобто $F_{\text{тер}} = \mu mg$.

Звідси

$$F_{\text{тяги}} = ma + \mu mg = m(a + \mu g).$$

Обчислення:

$$[F_{\text{тяги}}] = \text{кг} \left(\frac{\text{м}}{\text{с}^2} + \frac{\text{м}}{\text{с}^2} \right) = \text{кг} \frac{\text{м}}{\text{с}^2} = \text{Н},$$

$$\{F_{\text{тяги}}\} = 5 \cdot 10^3 \cdot 0,6 + 0,04 \cdot 5 \cdot 10^3 \cdot 9,8 = 5 \cdot 10^3.$$

Відповідь: $F_{\text{тяги}} = 5 \text{ кН}$.

Задача 2.

Автомобіль масою 2 т проходить по випуклому мосту з радіусом кривини 40 м зі швидкістю 36 км/год. З якою силою автомобіль тисне на міст в його середині?

Дано:

$$m = 2 \text{ т}$$

$$R = 40 \text{ м}$$

$$v = 36 \text{ км/год}$$

$$F_{\text{тяги}} = P \text{ — ?}$$

СІ:

$$m = 2 \cdot 10^3 \text{ кг}$$

$$v = \frac{36 \cdot 1000 \text{ м}}{3600 \text{ с}} = 10 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

Розв'язання:

Вивчивши умову задачі, побудуємо рис. 47.

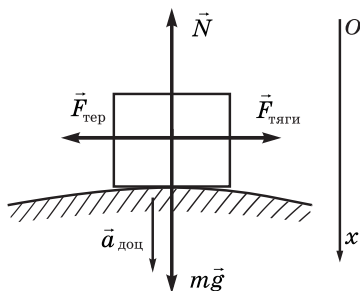


Рис. 47

Оскільки міст випуклий, то траєкторія руху автомобіля криволінійна. Автомобіль рухається зі сталою швидкістю. Тому в задачі присутнє тільки доцентрове прискорення, напрямлене до центра кривини, тобто у верхній точці моста вертикально вниз. Зобразимо сили, що діють на автомобіль у верхній точці моста, ураховуючи, що прискорення співнаправлено з рівнодієюною силою. Отже, модуль сили тяжіння більший за модуль сили реакції опори.

Згідно з II законом Ньютона:

$$\vec{F}_{\text{рів}} = \vec{a}m . \quad (1)$$

Розпишемо рівнодійну силу як геометричну суму сил, що діють на тіло:

$$\vec{F}_{\text{рів}} = \vec{F}_{\text{тяги}} + \vec{F}_{\text{тер}} + \vec{N} + m\vec{g} .$$

Підставимо значення рівнодійної сили у вираз (1):

$$\vec{F}_{\text{тяги}} + \vec{F}_{\text{тер}} + \vec{N} + m\vec{g} = \vec{a}_{\text{доц}}m . \quad (2)$$

Виберемо вісь для проектування, що збігається з напрямом прискорення, і спроектуємо на вісь Ox ліву і праву частини виразу (2):

$$Ox: F_{\text{тяги } x} + F_{\text{тер } x} + N_x + mg_x = a_{\text{доц } x}m . \quad (3)$$

Розпишемо проекції на вісь Ox :

$$F_{\text{тяги } x} = F_{\text{тяги}} \cos 90^\circ = F_{\text{тяги}} 0 = 0 ,$$

оскільки $\cos 90^\circ = 0$.

$$F_{\text{тер } x} = F_{\text{тер}} \cos 90^\circ = F_{\text{тер}} 0 = 0 ,$$

$$N_x = N \cos 180^\circ = N(-1) = -N ,$$

оскільки $\cos 180^\circ = -1$.

$$mg_x = mg \cos 0^\circ = mg ,$$

оскільки $\cos 0^\circ = 1$.

$$a_{\text{доц}}m = a_{\text{доц}}m \cos 0^\circ = a_{\text{доц}}m .$$

Підставимо значення проекцій у вираз (3):

$$mg - N = a_{\text{доц}}m .$$

Звідси

$$N = m(g - a_{\text{доц}}), \text{ де } a_{\text{доц}} = \frac{v^2}{R}.$$

Отже,

$$N = m \left(g - \frac{v^2}{R} \right).$$

Згідно із третім законом Ньютона $P = N$, отже,

$$P = m \left(g - \frac{v^2}{R} \right).$$

Обчислення:

$$[P] = \text{кг} \left(\frac{\frac{\text{м}}{\text{с}^2}}{\frac{\text{с}^2}{\text{м}}} - \frac{\frac{\text{м}^2}{\text{с}^2}}{\text{м}} \right) = \text{кг} \frac{\text{м}}{\text{с}^2} = \text{Н},$$

$$\begin{aligned} \{P\} &= 2 \cdot 10^3 \left(9,8 - \frac{100}{40} \right) = 2 \cdot 10^3 (9,8 - 2,5) = \\ &= 2 \cdot 10^3 \cdot 7,3 = 15 \cdot 10^3. \end{aligned}$$

Відповідь: $P = 15 \text{ кН}$.**Задача 3.**

Хлопчик масою 50 кг гойдається на гойдалці з довжиною підвісу 4 м. З якою силою він тисне на сидіння при проходженні стану рівноваги зі швидкістю 6 м/с?

Дано:

$$m = 50 \text{ кг}$$

$$l = R = 4 \text{ м}$$

$$v_{\text{max}} = 6 \text{ м/с}$$

 $P = ?$ *Розв'язання:*

Рух хлопчика відбувається по дузі кола радіусом l , тіло отримує доцентрове прискорення $\vec{P} = -\vec{N}$ або $P = N$ за третім законом Ньютона (рис. 48).

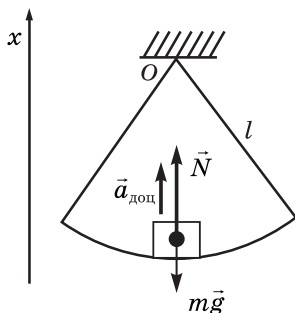


Рис. 48

Застосуємо основне рівняння динаміки, щоб знайти N :

$$\vec{N} + m\vec{g} = m\vec{a}_{\text{доц}}, \quad N - mg = ma_{\text{доц}},$$

$$N = m(a_{\text{доц}} + g), \quad N = P, \quad \text{тоді}$$

$$P = m \left(\frac{v^2}{R} + g \right).$$

Обчислення:

$$[P] = \text{кг} \left(\frac{\text{м}^2}{\text{с}^2 \text{м}} + \frac{\text{м}}{\text{с}^2} \right) = \text{Н},$$

$$\{P\} = 50 \cdot \left(\frac{36}{4} + 9,8 \right) = 940.$$

Відповідь: $P = 940$ Н. Сила, з якою хлопчик тисне на сидіння в момент проходження стану рівноваги (вага тіла), дорівнює 940 Н.

Задача 4.

Маневровий тепловоз масою m_1 тягне два вагони однакової маси ($m_2 = m_3$) з прискоренням a . Визначити силу тяги тепловоза і силу натягу зчеплень, якщо коефіцієнт опору руху дорівнює μ .

Дано:

m_1

$m_2 = m_3$

μ

a

T_1 — ?

T_2 — ?

$F_{\text{тяги}}$ — ?

Розв'язання:

Запишемо основне рівняння динаміки для всього теплового вагона в проекції на вісь Ox (сили $\vec{T}_1$, $\vec{T}_1'$, $\vec{T}_2$, $\vec{T}_2'$ є внутрішніми) (рис. 49):

$$F_{\text{тяги}} - F_{\text{тер}1} - 2F_{\text{тер}2} = a(m_1 + m_2 + m_3).$$

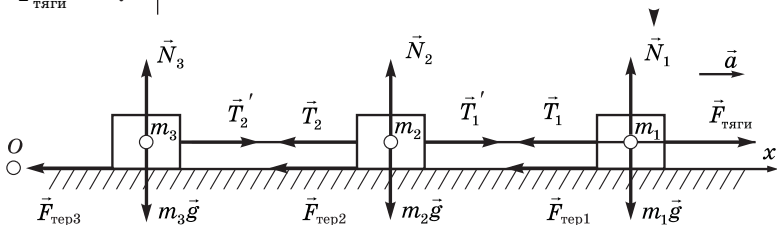


Рис. 49

Оскільки $N_1 = m_1 g$, $N_2 = m_2 g$, $N_3 = m_3 g$ взаємно компенсуються, то

$$F_{\text{тяги}} - \mu m_1 g - 2\mu m_2 g = a(m_1 + 2m_2),$$

$$F_{\text{тяги}} = (m_1 + 2m_2)(a + \mu g).$$

Для знаходження $\vec{T}_1$ запишемо основне рівняння для теплового вагона в проекції на вісь Ox . Для нього $\vec{T}_1$ є зовнішньою силою. Тому:

$$F_{\text{тяги}} - T_1 - F_{\text{тер}1} = am_1,$$

$$F_{\text{тер}1} = \mu m_1 g, \text{ отже, } T_1 = F_{\text{тяги}} - m_1(a + \mu g).$$

Для знаходження $\vec{T}_2$ ($T_2 = T_2'$) запишемо основне рівняння динаміки для другого вагона в проекції на вісь Ox :

$$T_2' - F_{\text{тер}3} = m_3 a,$$

$$F_{\text{тер}3} = \mu m_3 g, \text{ отже, } T_2' = m_3 a + \mu m_3 g,$$

або

$$T_2' = m_3(a + \mu g).$$

$$\text{Відповідь: } F_{\text{тяги}} = (m_1 + 2m_2)(a + \mu g), T_1 = 2m_2(a + \mu g), \\ T_2 = m_3(a + \mu g).$$

Задача 5.

На похилій площині завдовжки 5 м, заввишки 3 м розташовано вантаж масою 50 кг. Яку силу, направлену вздовж похилої площини, треба прикласти, щоб утримувати на ній цей вантаж? зтягувати рівномірно вгору? зтягувати з прискоренням 1 м/с²? Коефіцієнт тертя — 0,2.

Дано:

$$h = 3 \text{ м}$$

$$l = 5 \text{ м}$$

$$m = 50 \text{ кг}$$

$$\mu = 0,2$$

Розв'язання:

$$\frac{h}{l} = \sin \alpha, \text{ отже,}$$

$$\cos \alpha = \frac{\sqrt{l^2 - h^2}}{l} \text{ (рис. 50, а).}$$

$$F_{\text{утр}} \text{ — ? } (a_1 = 0 \text{ м/с}^2)$$

$$F_{\text{тяги } 2} \text{ — ? } (a_2 = 0 \text{ м/с}^2)$$

$$F_{\text{тяги } 3} \text{ — ? } (a_3 = 1 \text{ м/с}^2)$$

Розглянемо перший випадок (рис. 50, б). Сила тяжіння тягне тіло вниз, тому

$$\vec{F}_{\text{утр}} + \vec{F}_{\text{тер}} + m\vec{g} + \vec{N} = 0,$$

$$\begin{cases} F_{\text{утр}} + F_{\text{тер}} - mg \sin \alpha = 0, \\ N - mg \cos \alpha = 0, \end{cases}$$

$$Ox \rightarrow F_{\text{утр}} = mg \sin \alpha - F_{\text{тер}},$$

$$Ox \rightarrow N = mg \cos \alpha,$$

$$F_{\text{тер}} = \mu mg \cos \alpha,$$

$$F_{\text{утр}} = mg \sin \alpha - \mu \cdot mg \cos \alpha,$$

$$F_{\text{утр}} = mg(\sin \alpha - \mu \cdot \cos \alpha).$$

Розглянемо другий і третій випадки разом (рис. 50, в):

$$\vec{F}_{\text{тяги}} + \vec{N} + m\vec{g} + \vec{F}_{\text{тер}} = \vec{a}m.$$

При рівномірному русі:

$$a_2 = 0 ,$$

$$Ox: F_{\text{тяги}_2} - \mu \cdot mg \cos \alpha - mg \sin \alpha = 0 ,$$

$$F_{\text{тяги}_2} = mg(\mu \cos \alpha + \sin \alpha) .$$

При рівноприскореному русі:

$$a_3 \neq 0 ,$$

$$F_{\text{тяги}_3} - \mu \cdot mg \cos \alpha - mg \sin \alpha = a_3 m ,$$

$$F_{\text{тяги}_3} = m(a_3 + \mu g \cos \alpha + g \sin \alpha) .$$

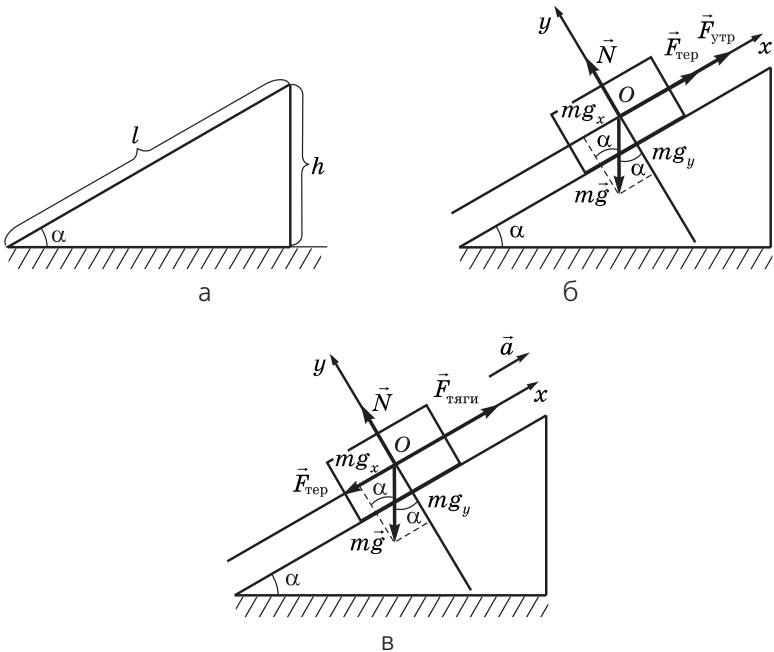


Рис. 50

Обчислення:

$$[F_{\text{утр}}] = \text{кг} \frac{\text{м}}{\text{с}^2} = \text{Н} ,$$

$$\{F_{\text{утр}}\} = 50 \cdot 9,8 \cdot \left[\frac{3}{5} - 0,2 \sqrt{1 - \left(\frac{3}{5} \right)^2} \right] = 216 ,$$

$$\{F_{\text{тяги}_2}\} = 50 \cdot 9,8 \cdot \left[\frac{3}{5} + 0,2 \sqrt{1 - \left(\frac{3}{5} \right)^2} \right] = 372 ,$$

$$\{F_{\text{тяги}_3}\} = 50 \cdot \left[9,8 \cdot \frac{3}{5} + 9,8 \cdot 0,2 \sqrt{1 - \left(\frac{3}{5} \right)^2} \right] = 422 .$$

Відповідь: для утримання тіла на похилій площині необхідно докласти силу 216 Н. Для рівномірного зтягування вантажу вздовж похилої площини необхідно прикласти силу 372 Н. Для зтягування з прискоренням — 422 Н.

Задача 6.

З якою максимальною швидкістю може їхати мотоцикл по горизонтальній площині, описуючи дугу радіусом 100 м, якщо коефіцієнт тертя гуми об ґрунт 0,4? Під яким кутом до горизонту нахилиться мотоцикл?

Дано: $R = 100$ м $\mu = 0,4$	<i>Розв'язання:</i> Траєкторією руху є дуга кола, тому даний рух є прискореним. Доцентрове прискорення напрямлене до центра кола, а його модуль дорівнює: $a_{\text{доц}} = \frac{v^2}{R} .$
v — ? α — ?	

На тіло діють три сили: $\vec{N}$, $\vec{F}_{\text{тер}}$, $m\vec{g}$. Уявімо мотоцикліста у вигляді прямої, що проходить через його центр тяжіння (т. O').

Тоді

$$\vec{N} + m\vec{g} + \vec{F}_{\text{тер}} = \vec{a}_{\text{доц}} m ,$$

$$\text{Ох: } F_{\text{тер}} = a_{\text{доц}} m , \quad a_{\text{доц}} = \frac{v^2}{R} \quad (\text{рис. 51, а}), \quad F_{\text{тер}} = \mu mg \quad \text{при}$$

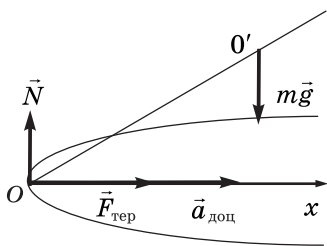
горизонтальному русі.

Тоді $\mu mg = \frac{v^2}{R}m$, $v = \sqrt{\mu g R}$ — максимальна швидкість мотоцикліста під час руху по дузі кола.

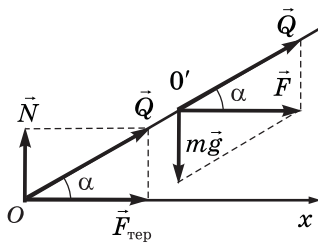
Мотоцикліст має нахилитись так, щоб напрям реакції опори $\vec{Q}$ ($\vec{Q} = \vec{N} + \vec{F}_{\text{тер}}$) проходив через його центр ваги (O'), в іншому випадку він перекидатиметься. Тому

$$\vec{N} + m\vec{g} + \vec{F}_{\text{тер}} = \vec{a}_{\text{доц}} m \quad (\text{рис. 51, б}),$$

$$\vec{N} + \vec{F}_{\text{тер}} = \vec{Q}, \text{ тоді } \vec{Q} + m\vec{g} = \vec{a}_{\text{доц}} m, \text{ або } \vec{Q} + m\vec{g} = \vec{F}.$$



а



б

Рис. 51

Із трикутника сил $\vec{F}$, $\vec{Q}$, $m\vec{g}$:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{mg}{F} = \frac{mg}{ma_{\text{доц}}},$$

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{g}{\frac{v^2}{R}} = \frac{gR}{v^2};$$

$\alpha = \operatorname{arctg} \frac{gR}{v^2}$ — кут нахилу мотоцикліста до горизонту.

Обчислення:

$$[v] = \sqrt{\frac{\text{М}}{\text{с}^2} \cdot \text{М}} = \sqrt{\frac{\text{М}^2}{\text{с}^2}} = \frac{\text{М}}{\text{с}},$$

$$\{v\} = \sqrt{0,4 \cdot 9,8 \cdot 100} \approx 20,$$

$$\{\alpha\} = \operatorname{arctg} \frac{9,8 \cdot 100}{400} = \operatorname{arctg} 2,5 = 68^\circ.$$

Відповідь: $v_{\max} = 20 \frac{\text{м}}{\text{с}}$, $\alpha = 68^\circ$ — кут нахилу мотоцикліста до горизонту.

Задача 7.

Брусок масою 400 г під дією вантажу масою 100 г проходить зі стану спокою 8 см за 2 с. Визначити коефіцієнт тертя.

Дано:	СІ:	Розв'язання:
$m_1 = 400 \text{ г}$	$m_1 = 0,4 \text{ кг}$	$T_1 = T_2$ за третім законом Ньютона.
$m_2 = 100 \text{ г}$	$m_2 = 0,1 \text{ кг}$	Запишемо основне рівняння динаміки для кожного з тіл І і ІІ та спроекуємо на осі Ox , Oy (рис. 52).
$v_{01} = 0 \text{ м/с}$	$v_{01} = 0 \text{ м/с}$	
$S_1 = 8 \text{ см}$	$S_1 = 0,08 \text{ м}$	
$t = 2 \text{ с}$	$t = 2 \text{ с}$	
μ — ?		

Тіло І:

$$\vec{T}_1 + m_1 \vec{g} + \vec{N}_1 + \vec{F}_{\text{тер}1} = \vec{a} m_1, \quad Ox: T_1 - F_{\text{тер}1} = a m_1.$$

Оскільки поверхня горизонтальна, то

$$F_{\text{тер}1} = \mu N_1 = \mu m_1 g.$$

Тоді $T_1 - \mu m_1 g = m_1 a$.

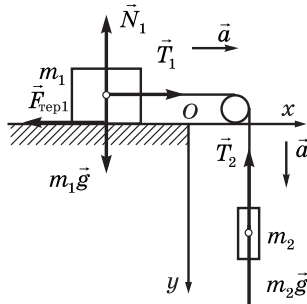


Рис. 52

Виразимо T_1 :

$$T_1 = m_1 a + \mu m_1 g .$$

Тіло II:

$$T_2 = m_2 \vec{g} = \vec{a} m_2 , \text{ Оу: } m_2 g - T_2 = m_2 a .$$

Виразимо T_2 :

$$T_2 = m_2 g - m_2 a .$$

Оскільки $T_1 = T_2$, то $m_1 a + \mu m_1 g = m_2 g - m_2 a$,

$$\mu m_1 g = m_2 g - m_2 a - m_1 a ,$$

$$\mu = \frac{m_2 g - a(m_1 + m_2)}{m_1 g} .$$

Прискорення визначимо з рівняння кінематики:

$$S_1 = \frac{at^2}{2} \quad (v_0 = 0) , \quad a = \frac{2S_1}{t^2} .$$

Підставимо в μ :

$$\mu = \frac{m_2 g - \frac{2S_1}{t^2} (m_1 + m_2)}{m_1 g} .$$

Обчислення:

$$[\mu] = \frac{\frac{\text{кг} \cdot \frac{\text{м}}{\text{с}^2}}{\frac{\text{кг} \cdot \frac{\text{м}}{\text{с}^2}}}{\frac{\text{кг} \cdot \frac{\text{м}}{\text{с}^2}}{\frac{\text{кг} \cdot \frac{\text{м}}{\text{с}^2}}} = 1 ,$$

$$\{\mu\} = \frac{0,1 \cdot 9,8 - \frac{2 \cdot 0,08}{4} \cdot 0,5}{0,4 \cdot 9,8} \approx \frac{0,96}{4} \approx 0,24 .$$

Відповідь: коефіцієнт тертя дорівнює $\mu = 0,24$.

3. ЗАКОНИ ЗБЕРЕЖЕННЯ В МЕХАНІЦІ

3.1. ІМПУЛЬС ТІЛА. ІМПУЛЬС СИЛИ

Імпульсом тіла називають добуток маси тіла на його швидкість:

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

Релятивістський імпульс:

$$\vec{p} = \frac{m_0 \vec{v}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$$

За **одиницю імпульсу** приймається імпульс тіла масою 1 кг, яке рухається зі швидкістю 1 м/с:

$$[p] = 1 \text{ кг} \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Імпульсом сили називають добуток сили на час її дії:

$$\vec{F}\Delta t.$$

Другий закон Ньютона в імпульсній формі: імпульс сили, що діє на тіло, дорівнює зміні імпульсу тіла:

$$\vec{F}\Delta t = m\vec{v} - m\vec{v}_0.$$

3.2. ЗАКОН ЗБЕРЕЖЕННЯ ІМПУЛЬСУ

Геометрична сума імпульсів тіл, які складають замкнену систему, є величина стала:

$$m_1 \vec{v}_1 + \dots + m_n \vec{v}_n = \text{const}.$$

Закон можна застосувати і для системи тіл, на які дія зовнішніх сил є скомпенсованою.

3.3. РЕАКТИВНИЙ РУХ

Реактивним рухом називається рух, що виникає у результаті взаємного відштовхування витікаючого струменя рідини чи газу і корпусу ракети тощо.

Рівняння руху тіла із змінною масою:

$$m \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} = \vec{F} - \vec{u} \frac{\Delta m}{\Delta t}.$$

Реактивна сила тяги:

$$\vec{F}_p = -\vec{u} \frac{\Delta m}{\Delta t},$$

де $\vec{u}$ — швидкість витікання газів відносно ракети.

Якщо $\vec{u}$ є протилежним до напрямку $\vec{v}$, то ракета прискорюється, а якщо збігається з $\vec{v}$, то гальмується.

Формула Ціолковського:

$$v = u \ln \frac{m_0}{m},$$

де m_0 — стартова маса ракети, m — остаточна маса.

Формула справедлива в класичній механіці ($v \ll c$, $u \ll c$).

3.4. ЕНЕРГІЯ. ЗАКОН ЗБЕРЕЖЕННЯ ЕНЕРГІЇ. ВИДИ ЕНЕРГІЇ

Енергія — це єдина міра різних форм руху матерії.

Енергія — одна з характерних властивостей матерії. На практиці механічний рух частково чи повністю перетворюється в інші форми — тепловий, електромагнітний рух.

Енергія характеризує рух системи, а також взаємодію тіл чи частинок у системі з урахуванням можливості переходу з однієї форми руху в іншу.

Енергія — функція стану системи, а робота — функція процесу переходу системи із одного стану в інший.

Закон збереження енергії: енергія не виникає і не зникає, вона тільки перетворюється із одного виду в інший і передається від одного тіла до іншого в рівних кількостях.

Види енергії:

1. Механічна енергія тіла (потенціальна і кінетична).
2. Внутрішня.
3. Електромагнітна (електрична + магнітна).
4. Хімічна.
5. Світлова.
6. Ядерна, або атомна.

Повна енергія тіла:

$$E = mc^2 = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$$

Енергія спокою тіла (внутрішня енергія):

$$E_0 = m_0 c^2.$$

3.5. ВИДИ МЕХАНІЧНОЇ ЕНЕРГІЇ ТА ЇХ ЗВ'ЯЗОК З РОБОТОЮ

Кінетична і потенціальна енергія складають **механічну енергію**. Вона характеризує механічний рух.

Кінетична енергія — це енергія рухомого тіла.

Кінетична енергія в класичній механіці:

$$E_{\text{к}} = \frac{mv^2}{2}.$$

Оскільки швидкість тіла є величиною відносною, тобто залежить від вибору системи відліку, то й кінетична енергія відносна. Кінетична енергія завжди додатна.

Кінетична енергія в релятивістській механіці:

$$E_{\text{к}} = E - E_0 = (m - m_0)c^2.$$

Потенціальна енергія — це енергія, обумовлена взаємодією тіл або частинок тіла.

У механіці розрізняють:

- а) потенціальну енергію тіла, піднятого над Землею, де h — висота над рівнем, на якому потенціальна енергія системи «Земля — тіло» приймається за нуль (нульовий рівень потенціальної енергії):

$$E_{\text{п}} = mgh;$$

- б) потенціальну енергію пружно деформованого тіла:

$$E_{\text{п}} = \frac{kx^2}{2};$$

в) потенціальну енергію гравітаційної взаємодії двох матеріальних точок з масами m_1 і m_2 , що перебувають на відстані r одна від одної:

$$E_{\text{п}} = \frac{Gm_1m_2}{2}.$$

Потенціальна енергія додатна, якщо вона обумовлена силами відштовхування, і від'ємна, якщо обумовлена силами притягання.

Закон збереження механічної енергії: повна механічна енергія системи тіл, у якій діють лише консервативні сили (потенціальні), є величина стала.

Консервативні сили — це сили тяжіння, пружності, кулонівські сили.

Консервативна сила — сила, робота якої при переміщенні тіла залежить тільки від початкового і кінцевого положень тіла в просторі. Наприклад, робота сили тяжіння (рис. 53):

$$A_1 = A_2 = A_3.$$

Робота консервативних сил у будь-якому замкнутому контурі дорівнює нулю (рис. 54).

Потенціальне поле — поле консервативних сил.

Кінетична і потенціальна енергія — функції стану системи, тобто можуть бути точно визначеними, якщо відомі координати і швидкості всіх тіл системи, а також система відліку.

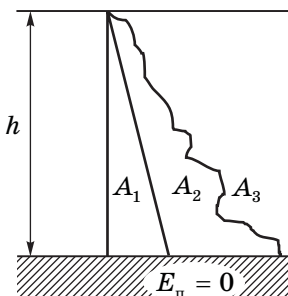


Рис. 53

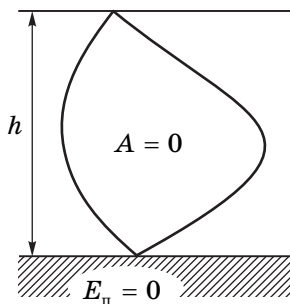


Рис. 54

3.6. МЕХАНІЧНА РОБОТА І ПОТУЖНІСТЬ

Існує **два способи передачі руху** (і відповідно енергії) від одного макротіла до іншого: у формі роботи і у формі теплоти (теплообміну). Зміну енергії першим способом називають механічною роботою.

Робота є міра зміни і перетворення енергії:

$$A = \Delta E.$$

Робота всіх сил, які діють на тіло, дорівнює зміні його кінетичної енергії — **теорема про кінетичну енергію**:

$$A = E_{k_2} - E_{k_1} = \frac{mv^2}{2} - \frac{mv_0^2}{2}.$$

Робота сили тяжіння і пружності дорівнює зміні потенціальної енергії тіла, взятої з протилежним знаком:

$$A = -(E_{п_2} - E_{п_1}).$$

Робота постійної сили — це скалярний добуток сили на переміщення (рис. 55):

$$A = (\vec{F} \cdot \vec{S}), \quad A = FS \cos \alpha.$$

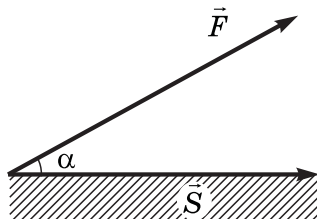


Рис. 55

Якщо $90^\circ > \alpha \geq 0$, то $A > 0$ відповідає збільшенню енергії;

якщо $\alpha = 90^\circ$, то $A = 0$ відповідає незмінності енергії;

якщо $90^\circ < \alpha \leq 180^\circ$, то $A < 0$ відповідає зменшенню енергії.

Робота постійної сили максимальна, якщо $\alpha = 0$:

$$A = FS.$$

Одиниця роботи (енергії) — джоуль (Дж).

Джоуль — робота постійної сили в 1 Н при переміщенні тіла на відстань 1 м у напрямку дії сили:

$$1 \text{ Дж} = 1 \text{ кг} \frac{\text{м}^2}{\text{с}^2}.$$

Потужність — фізична величина, що характеризує швидкість виконання роботи.

Потужність — це величина, що дорівнює відношенню виконаної роботи до проміжку часу, протягом якого вона виконувалась:

$$N = \frac{A}{t} \text{ — у механіці, } P = \frac{A}{t} \text{ — в електриці.}$$

Одиниця потужності в СІ — ват (Вт):

$$1 \text{ Вт} = 1 \frac{\text{Дж}}{\text{с}}.$$

Ват — потужність, при якій за 1 с виконується робота в 1 Дж.

Потужність при постійній силі дорівнює:

$$N = Fv.$$

Іноді ще використовується одиниця потужності 1 к. с. (кінська сила):

$$1 \text{ к. с.} = 736 \text{ Вт.}$$

$A = Nt$, звідки одиниця роботи в техніці — 1 кВт·год :

$$1 \text{ кВт} \cdot \text{год} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ Дж}.$$

Відношення корисної роботи до повної роботи називається **коефіцієнтом корисної дії (ККД)** простого механізму (η).

Коефіцієнт корисної дії (η) визначається за формулами:

$$\eta = \frac{A_{\text{к}}}{A_{\text{п}}}, \eta = \frac{A_{\text{к}}}{Q_{\text{п}}}, \eta = \frac{Q_{\text{к}}}{A_{\text{п}}}, \eta = \frac{Q_{\text{к}}}{Q_{\text{п}}} \text{ або } \eta = \frac{N_{\text{к}}}{N_{\text{п}}},$$

де $\eta < 1$ ($\eta < 100\%$).

Корисна робота — робота, здійснювана двигуном і т. ін.

3.7. МЕХАНІЧНИЙ УДАР

Удар (співудар) — це зіткнення двох або більше тіл, при якому взаємодія триває дуже короткий час.

Механічний удар двох тіл характеризується коефіцієнтом відновлення (ε):

$$\varepsilon = \frac{|v'_1 - v'_2|}{|v_1 - v_2|}.$$

Це відношення відносної швидкості тіл після співудару до відносної швидкості до співудару. Якщо $\varepsilon = 1$, то удар називається абсолютно пружним (рис. 56, а). Якщо $\varepsilon = 0$, то удар називається абсолютно непружним (рис. 56, б). Насправді під час зіткнення удар двох тіл $1 > \varepsilon > 0$. При ударі свинцевих куль ε наближається до 0, тобто удар близький до абсолютно непружного. Під час зіткнення куль із слонової кістки $\varepsilon \approx 0,9$, тобто удар близький до абсолютно пружного.

Центральний удар — це удар, при якому тіла до удару рухаються вздовж прямої, що проходить через їхні центри мас.

При співударі абсолютно пружних тіл зберігається їх сумарна кінетична енергія і сумарний імпульс (рис. 56, в).

Абсолютно непружний удар — зіткнення двох тіл, у результаті якого тіла об'єднуються, рухаючись далі як єдине ціле у напрямку руху тіла, що мало більший імпульс (рис. 56, г).

При непружному співударі закон збереження імпульсу має вигляд:

$$m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2 = (m_1 + m_2) \vec{v}_{\text{заг}}.$$

При непружному співударі частина механічної енергії переходить у внутрішню. Якщо зміна внутрішньої енергії пов'язана тільки зі зміною температури тіла або його агрегатного стану, то:

$$\frac{m_1 v_1^2}{2} + \frac{m_2 v_2^2}{2} = \frac{(m_1 + m_2) v_{\text{заг}}^2}{2} + \Delta U, \quad \Delta U = Q,$$

де $Q = (c_1 m_1 + c_2 m_2) \Delta t$ при нагріванні тіл або $Q = \lambda m_1 + \lambda m_2$ при їх плавленні.

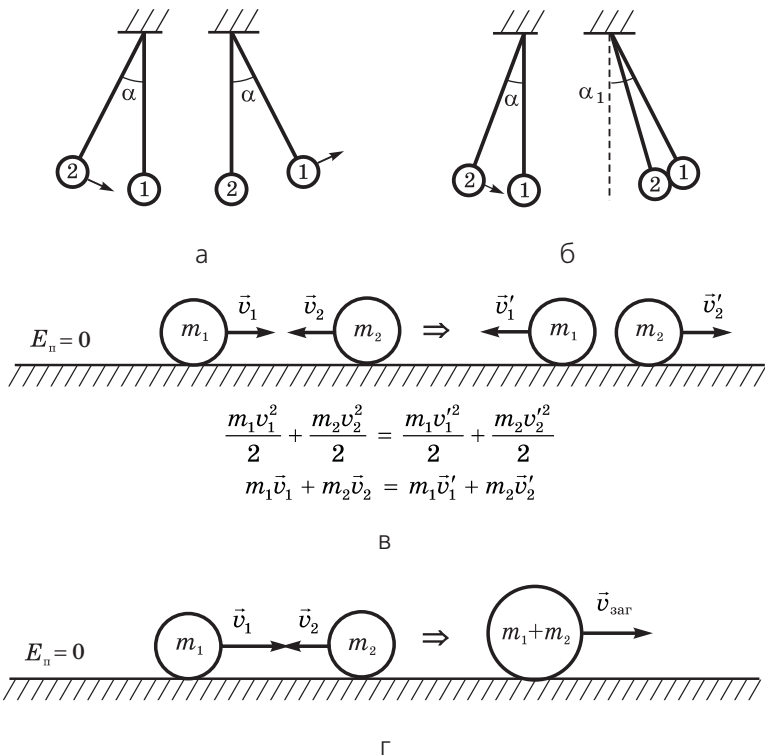


Рис. 56

3.8. ПРОСТІ МЕХАНІЗМИ

Прості механізми змінюють силу, швидкість або напрям руху в процесі здійснення роботи.

Види простих механізмів:

- важіль і його різновиди — блок, коловорот;
- похила площина та її різновиди — клин, гвинт.

«Золоте правило» механіки: жоден із простих механізмів не дає виграшу в роботі. У скільки разів виграємо в силі, у стільки ж разів програємо у відстані.

На практиці здійснена за допомогою механізму повна робота завжди дещо більша від корисної. Частина роботи витрачається на подолання сили тертя.

3.8.1. ВАЖІЛЬ

Важіль — це однорідний стрижень, який має точку опори або підвіс.

Важіль, у якого вісь обертання перебуває в середині важеля,— **важіль першого роду** (рис. 57, а).

Важіль, у якого вісь обертання перебуває на кінці важеля,— **важіль другого роду** (рис. 57, б).

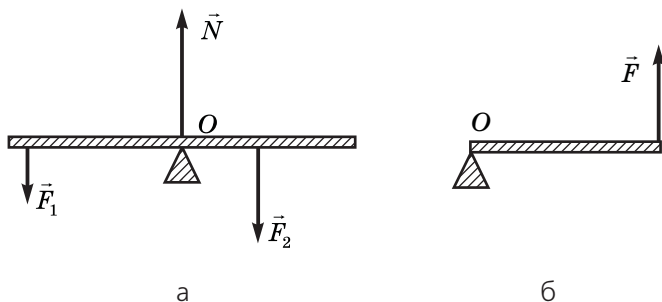


Рис. 57

Правило рівноваги важеля (установлене Архімедом): важіль перебуває в рівновазі, коли діючі на нього сили ($\vec{F}_1$, $\vec{F}_2$) обернено пропорційні плечам сил (d_1 , d_2) (рис. 58):

$$\frac{F_2}{F_1} = \frac{d_1}{d_2}.$$

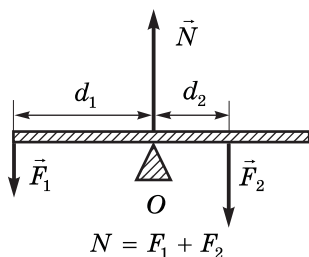


Рис. 58

3.8.2. БЛОК, КОЛОВОРОТ

Блок — це колесо з жолобом, закріплене в обоймі. По жолобу блока пропускають мотузку, трос або ланцюг.

Нерухомим блоком називають такий блок, вісь якого закріплена і при підйомі вантажів не змінює свого положення.

Такий блок не дає виграшу в силі, але дає можливість змінювати напрям дії сили (рис. 59, а).

Рухомий блок піднімається і опускається разом з вантажем.

Рухомий блок дає виграш у силі в два рази (рис. 59, б).

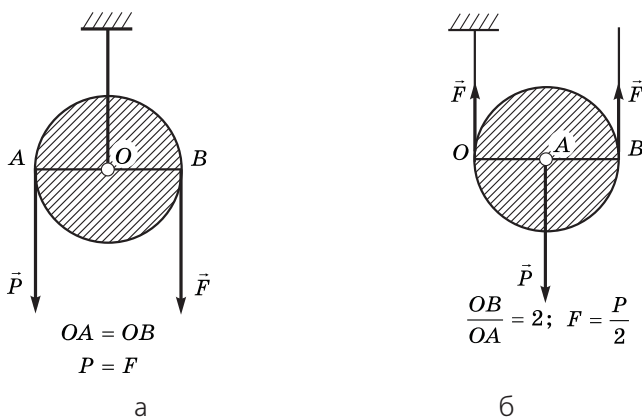


Рис. 59

Коловорот, який складається з двох блоків з радіусами R і r ($R > r$), дає виграш у силі $k = \frac{R}{r}$ (рис. 60).

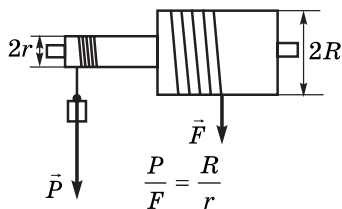


Рис. 60

3.8.3. ПОХИЛА ПЛОЩИНА

Щоб тіло, яке перебуває на похилій площині, було в стані спокою і рівномірного (без тертя) руху, необхідно прикласти силу, паралельну похилій площині і в стільки разів меншу від сили тяжіння, у скільки разів висота похилої площини менша за її довжину (рис. 61):

$$\vec{F}_{\text{тер}} = 0, \quad \vec{v} = \text{const}, \quad F_{\text{т}} h = F_{\text{тяги}} l.$$

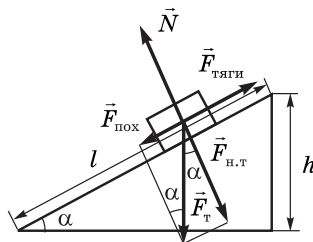


Рис. 61

ККД похилої площини з урахуванням сили тертя при рівномірному переміщенні вантажу вздовж похилої площини:

$$\eta = \frac{1}{1 + \mu \cdot \text{ctg} \alpha} \cdot 100 \%.$$

3.8.4. КЛИН, ГВИНТ

Клин — різновид похилої площини.

Клин є головною частиною, наприклад, ножа, ножиць, сокири, рубанка. Щоб клин перебував у стані спокою чи рівномірного руху (без тертя), необхідно прикласти до нього силу, перпендикулярну до його основи (обуха), у стільки разів меншу за силу, що діє перпендикулярно до бічної грані клина, у скільки разів основа (AB) менша від довжини бічної поверхні клина (AC) (рис. 62).

Гвинт — циліндричне тіло з різьбою, яка наноситься по гвинтовій лінії.

Гвинтовою лінією називається лінія, утворена гіпотенузою прямокутного трикутника, який накручується на циліндр. **Кроком гвинтової лінії** називається відстань, на

яку переміститися гайка при одному повному повороті гвинта (рис. 63).

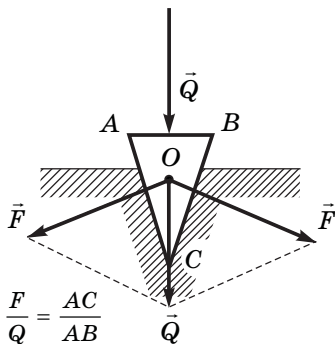


Рис. 62

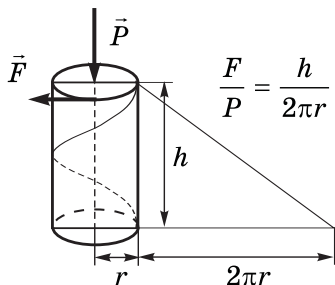


Рис. 63

Сила, яка діє по дотичній до головки гвинта за відсутності сили тертя, у стільки разів менша від сили, що діє на гвинт уздовж його осі, у скільки разів крок гвинта менший за довжину кола головки.

Гвинт застосовують у домкратах — простих пристроях для підйому вантажу.

3.9. ПРИКЛАДИ РОЗВ'ЯЗУВАННЯ ЗАДАЧ

Задача 1.

З човна вікінгів масою 500 кг, який рухається зі швидкістю 1 м/с, стрибає воїн масою 80 кг в горизонтальному напрямі зі швидкістю 7 м/с. Якою буде швидкість човна після стрибка воїна, якщо він стрибає в сторону, протилежну руху човна (рис. 64)?

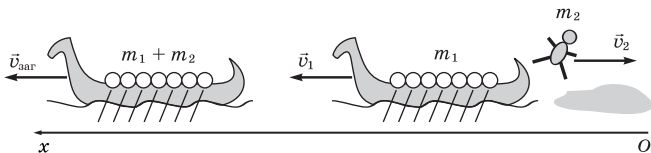


Рис. 64

3. ЗАКОНИ ЗБЕРЕЖЕННЯ В МЕХАНІЦІ

Дано:

$m_1 = 500 \text{ кг}$

$m_2 = 80 \text{ кг}$

$v_{\text{заг}} = 1 \text{ м/с}$

$v_2 = 7 \text{ м/с}$

$v_1 = ?$

Звідси

Розв'язання:

Закон збереження імпульсу:

$$(m_1 + m_2) \vec{v}_{\text{заг}} = m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2. \quad (1)$$

Спроекуємо рівняння (1) на вісь Ox :

$$(m_1 + m_2) v_{\text{заг}} = m_1 v_1 + m_2 v_2.$$

$$m_1 v_1 = (m_1 + m_2) v_{\text{заг}} + m_2 v_2.$$

$$v_1 = \frac{(m_1 + m_2) v_{\text{заг}} + m_2 v_2}{m_1}.$$

Обчислення:

$$[v_1] = \frac{\text{кг} \frac{\text{м}}{\text{с}} + \text{кг} \frac{\text{м}}{\text{с}}}{\text{кг}} = \frac{\text{м}}{\text{с}},$$

$$v_1 = \frac{580 \cdot 1 + 80 \cdot 7}{500} = \frac{1140}{500} = 2,28.$$

Відповідь: $v = 2,28 \text{ м/с}$.

Задача 2.

На кінці дошки масою 10 кг і завдовжки 4 м стоїть хлопчик масою 40 кг. Хлопчик переходить на протилежний кінець дошки, пересуваючись по ній з відносною швидкістю 1 м/с. На яку відстань пересунеться при цьому дошка, якщо тертям дошки об дорогу знехтувати (рис. 65)?

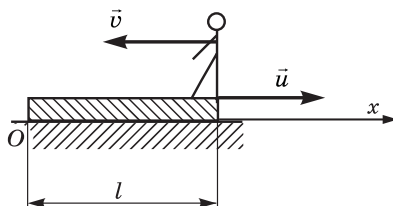


Рис. 65

Дано:

$M = 10 \text{ кг}$

$m = 40 \text{ кг}$

$l = 4 \text{ м}$

$v = 1 \text{ м/с}$

$S = ?$

Розв'язання:

1-й спосіб

Коли людина почне рухатись, у результаті впливу сили тертя між підшвами людини і поверхнею дошки остання почне пересуватися у зворотному напрямку зі швидкістю $\vec{u}$. Тоді швидкість людини відносно Землі дорівнює $(\vec{v} + \vec{u})$.

За законом збереження імпульсу:

$$m(\vec{v} + \vec{u}) + M\vec{u} = 0.$$

У проекції на вісь Ox :

$$m(-v + u) + Mu = 0,$$

$$-mv + mu + Mu = 0,$$

$$u = \frac{mv}{m + M}, \quad S = ut.$$

Час переміщення дошки дорівнює часу пересування хлопчика зі швидкістю v відносно дошки. Отже,

$$t = \frac{l}{v}.$$

Підставимо значення t і u у формулу переміщення S :

$$S = \frac{mv}{(M + m)} \frac{l}{v} = \frac{ml}{M + m} \Rightarrow S = \frac{ml}{M + m}.$$

Обчислення:

$$[S] = \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{кг}} = \text{м}, \quad \{S\} = \frac{40 \cdot 4}{10 + 40} = 3,2.$$

Відповідь: $S = 3,2 \text{ м}$.**2-й спосіб**

Тертям дошки об дорогу нехтують. Взаємодія людини з дошкою — це внутрішні сили, а вони не змінюють положення центра маси в просторі.

Визначимо положення центра маси дошки з людиною на його кінці (O) і запишемо правило моментів відносно нього.

У вихідному стані:

$$Mg\left(\frac{l}{2}-x\right)=mgx, \quad x=\frac{Ml}{2(M+m)}.$$

Після переходу хлопчика x має те саме значення, оскільки положення центра маси людини з дошкою не змінюється (рис. 66, а, б).

Тоді

$$S=l-2x,$$

$$S=l-\frac{2Ml}{2(M+m)},$$

$$S=l\left(1-\frac{M}{M+m}\right)=\frac{lm}{M+m}.$$

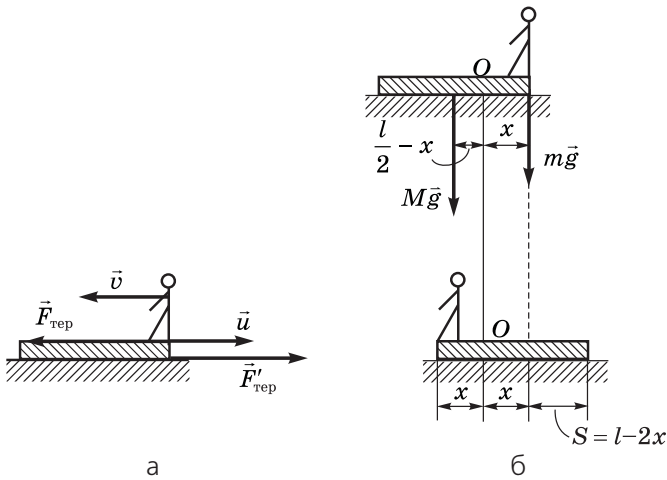


Рис. 66

Обчислення:

$$[S]=\frac{\text{м} \cdot \text{кг}}{\text{кг}}=\text{м}, \quad \{S\}=\frac{40 \cdot 4}{40+10}=3,2.$$

Відповідь: $S = 3,2$ м.

Задача 3.

Яку роботу треба виконати, щоб однорідний стрижень завдовжки 2 м і масою 100 кг, який лежить на землі, поставити вертикально?

Дано:
 $m = 100 \text{ кг}$
 $l = 2 \text{ м}$

 $A = ?$

Розв'язання:
 Робота сили тяжіння:
 $A = mgh,$

де h — висота, на яку піднявся центр тяжіння тіла.

Оскільки стрижень однорідний, то $h = \frac{l}{2}$, звідси

$$A = mg \frac{l}{2}.$$

Обчислення:

$$[A] = \text{кг} \cdot \frac{\text{м}}{\text{с}^2} \cdot \text{м} = \text{Дж},$$

$$\{A\} = 100 \cdot 9,8 \approx 1000.$$

Відповідь: $A = 1 \text{ кДж}$.

Задача 4.

Для розтягнення пружини на 4 мм необхідно виконати роботу 0,02 Дж. Яку роботу треба виконати, щоб розтягнути цю пружину на 4 см?

Дано:
 $x_0 = 0$
 $x_1 = 4 \text{ мм}$
 $A_1 = 0,02 \text{ Дж}$
 $x_2 = 4 \text{ см}$
 $k_1 = k_2 = k$

 $A_2 = ?$

СІ:
 $x_0 = 0$
 $x_1 = 4 \cdot 10^{-3} \text{ м}$
 $A_1 = 0,02 \text{ Дж}$
 $x_2 = 4 \cdot 10^{-2} \text{ м}$

Розв'язання:

$$A_1 = \frac{kx_1^2}{2}.$$

Звідси

$$k = \frac{2A_1}{x_1^2},$$

$$A_2 = \frac{kx_2^2}{2} = \frac{2A_1}{x_1^2} x_2^2 = A_1 \left(\frac{x_2}{x_1} \right)^2,$$

$$A_2 = A_1 \left(\frac{x_2}{x_1} \right)^2.$$

Обчислення:

$$[A_2] = \text{Дж} \left(\frac{\text{м}}{\text{м}} \right)^2 = \text{Дж},$$

$$\{A_2\} = 2 \cdot 10^{-2} \left(\frac{4 \cdot 10^{-2}}{4 \cdot 10^{-3}} \right)^2 = 2 \cdot 10^{-2} \cdot 100 = 2.$$

Відповідь: $A_2 = 2 \text{ Дж}$.**Задача 5.**

Визначити середню потужність насоса, який подає $4,5 \text{ м}^3$ води на висоту 5 м за 5 хв .

Дано:

$$V_{\text{в}} = 4,5 \text{ м}^3$$

$$\rho_{\text{в}} = 1000 \text{ кг/м}^3$$

$$h = 5 \text{ м}$$

$$t = 5 \text{ хв} = 300 \text{ с}$$

$$g = 9,8 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$$

$$N_{\text{сер}} \text{ — ?}$$

Розв'язання:

Щоб розрахувати середню потужність насоса, застосуємо основну формулу потужності:

$$N_{\text{сер}} = \frac{A}{t}.$$

Розпишемо роботу, виконану насосом, як добуток модуля піднімальної сили F насоса на висоту піднімання води h :

$$A = Fh.$$

Піднімальна сила насоса дорівнює за модулем вазі води, що піднімається:

$$F = P_{\text{в}} = m_{\text{в}} g = \rho_{\text{в}} V_{\text{в}} g.$$

Підставимо значення модуля сили у формулу роботи:

$$A = \rho_{\text{в}} V_{\text{в}} gh.$$

Отже, середня потужність насоса:

$$N_{\text{сер}} = \frac{A}{t} = \frac{\rho_{\text{в}} V_{\text{в}} g h}{t}.$$

Обчислення:

$$[N_{\text{сер}}] = \frac{\frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \cdot \text{м}^3 \cdot \frac{\text{м}}{\text{с}^2} \cdot \text{м}}{\text{с}} = \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{с}} = \frac{\text{Дж}}{\text{с}} = \text{Вт},$$

$$\{N_{\text{сер}}\} = \frac{1000 \cdot 4,5 \cdot 9,8 \cdot 5}{300} = 735.$$

Відповідь: $N_{\text{сер}} = 735 \text{ Вт}$.

Задача 6.

Зенітний снаряд, який випущено у вертикальному напрямі, досягнув максимальної висоти і вибухнув. При цьому утворилось три осколки. Перший осколок масою 9 кг відлетів зі швидкістю 60 м/с вертикально вгору, другий, масою 18 кг, — зі швидкістю 40 м/с у горизонтальному напрямі. Третій осколок відлетів зі швидкістю 200 м/с. Визначити графічно напрям польоту третього осколка. Яка його маса?

Дано:

$$\begin{aligned} m_1 &= 9 \text{ кг} \\ v_1 &= 60 \text{ м/с} \\ m_2 &= 18 \text{ кг} \\ v_2 &= 40 \text{ м/с} \\ v_3 &= 200 \text{ м/с} \\ v &= 0 \text{ м/с} \\ v_1 &\perp v_2 \end{aligned}$$

α — ?

m_3 — ?

Розв'язання:

Оскільки снаряд вибухнув на максимальній висоті, будучи випущеним вертикально вгору, то його кінцева швидкість дорівнює нулю.

Закон збереження імпульсу для системи трьох осколків має вигляд (рис. 67):

$$\vec{p}_1 + \vec{p}_2 + \vec{p}_3 = 0.$$

$$\text{Звідси } \vec{p}_3 = -(\vec{p}_1 + \vec{p}_2).$$

Тоді

$$p_3 = \sqrt{p_1^2 + p_2^2}, \text{ або } m_3 v_3 = \sqrt{(m_1 v_1)^2 + (m_2 v_2)^2},$$

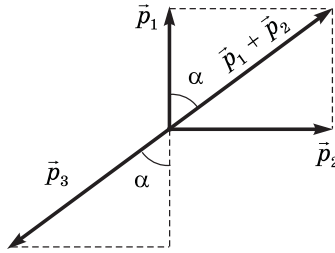


Рис. 67

$$m_3 = \frac{\sqrt{(m_1 v_1)^2 + (m_2 v_2)^2}}{v_3},$$

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{p_2}{p_1} = \frac{m_2 v_2}{m_1 v_1}, \quad \alpha = \operatorname{arctg} \frac{m_2 v_2}{m_1 v_1}.$$

Обчислення:

$$[m_3] = \frac{\sqrt{\frac{\text{кг}^2 \cdot \text{м}^2}{\text{с}^2}}}{\frac{\text{м}}{\text{с}}} = \text{кг},$$

$$\{m_3\} = \frac{\sqrt{(9 \cdot 60)^2 + (18 \cdot 40)^2}}{200} = 4,5.$$

$$\alpha = \operatorname{arctg} \frac{18 \cdot 40}{9 \cdot 60} \approx 53^\circ.$$

Відповідь: маса третього осколка $m_3 = 4,5$ кг, напрям швидкості його руху утворює кут 53° з вертикаллю.

Задача 7.

У «мертвій петлі» вертикальний отвір з центральним кутом 2α , радіус петлі R . Визначити мінімальну висоту, з якої відпускається ковзаюче тіло так, щоб воно здійснило рух по «мертвій петлі». Тертя знехтувати.

Дано:

 2α R h — ?

Розв'язання:

Відстань AB дорівнює $l = 2R \sin \alpha$. Швидкість у точці A дорівнює швидкості у точці B за модулем, що зумовлює дальність польоту тіла, кинутого під кутом α до горизонту в безповітряному просторі (рис. 68):

$$l = \frac{v^2 \sin 2\alpha}{g} = \frac{v^2 2 \sin \alpha \cos \alpha}{g}.$$

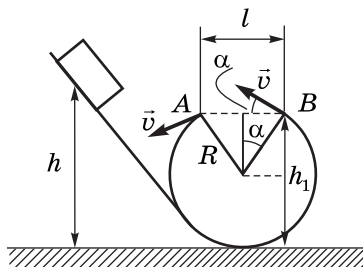


Рис. 68

Прирівнявши l , дістанемо:

$$\frac{v^2 2 \sin \alpha \cos \alpha}{g} = 2R \sin \alpha, \quad v^2 = \frac{gR}{\cos \alpha}.$$

Прийнявши за нульовий рівень потенціальної енергії рівень нижньої точки петлі, запишемо рівняння за законом збереження енергії:

$$mgh = mgh_1 + \frac{mv^2}{2}.$$

Визначимо h_1 :

$$h_1 = R + R \cos \alpha = R(1 + \cos \alpha).$$

Тоді

$$mgh = mgR(1 + \cos \alpha) + \frac{mv^2}{2}.$$

Підставимо $v^2 = \frac{gR}{\cos\alpha}$ й отримаємо:

$$gh = gR(1 + \cos\alpha) + \frac{gR}{2\cos\alpha},$$

$$h = R\left(1 + \cos\alpha + \frac{1}{2\cos\alpha}\right).$$

Відповідь: $h = R\left(1 + \cos\alpha + \frac{1}{2\cos\alpha}\right).$

Задача 8.

Вагон масою M рухається зі швидкістю $\vec{u}$. Його наздоганяє куля масою m , яка рухається зі швидкістю $\vec{v}$ і у вагона зупиняється. Яку роботу при цьому виконує куля, якщо $M \gg m$?

Дано: M u m v $M \gg m$	<i>Розв'язання:</i> Куля виконує роботу у СВ «Вагон», тому й кінетичну енергію кулі необхідно оцінювати в цій системі. Швидкість кулі у СВ «Вагон»: $v_1 = v - u.$
$A = ?$	Тому $E'_k = \frac{m(v-u)^2}{2}.$

Оскільки $M \gg m$, то зміною швидкості вагона нехтуємо.

За теоремою про кінетичну енергію:

$$A = E'_k - E''_k, \quad E''_k = 0 \quad (\text{куля у СВ «Вагон» зупиняється}),$$

$$A = \frac{m(v-u)^2}{2}.$$

Відповідь: $A = \frac{m(v-u)^2}{2}.$

Задача 9.

Тіло масою 5 кг піднято над землею на висоту 20 м. Визначити потенціальну енергію тіла. Яку потенціальну енергію воно матиме на висоті 5 м при вільному падінні? Знайти кінетичну енергію тіла на цій висоті. Тертям знехтувати.

Дано:

$$m = 5 \text{ кг}$$

$$h_{\max} = 20 \text{ м}$$

$$h = 5 \text{ м}$$

$$E_{\text{п max}} \text{ — ?}$$

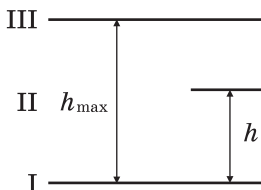
$$E_{\text{п}} \text{ — ?}$$

$$E_{\text{к}} \text{ — ?}$$

Розв'язання:

З умови задачі випливає, що $h_{\max} = 20 \text{ м}$, $h = 5 \text{ м}$. Максимальній висоті піднімання відповідає максимальна потенціальна енергія ($E_{\text{п max}}$), висоті h відповідає потенціальна енергія $E_{\text{п}}$.

Знехтування силою тертя дає можливість застосовувати закон збереження механічної енергії. Розв'язуючи задачу, скористаємося схемою енергетичних рівнів.



$h_{\max},$	$E_{\text{п max}},$	$v = 0,$	$E_{\text{к}} = 0,$	$E_{\text{мех III}} = E_{\text{п max}}$
$h,$	$E_{\text{п}},$	$v,$	$E_{\text{к}},$	$E_{\text{мех II}} = E_{\text{к}} + E_{\text{п}}$
$h = 0,$	$E_{\text{п}} = 0,$	$v_{\max},$	$E_{\text{к max}},$	$E_{\text{мех I}} = E_{\text{к max}}$

За умовою задачі тіло здійснює перехід з енергетичного рівня III на рівень II. У цьому випадку закон збереження механічної енергії має вигляд:

$$E_{\text{мех III}} = E_{\text{мех II}}$$

або

$$E_{\text{п max}} = E_{\text{к}} + E_{\text{п}}. \quad (1)$$

Згідно з умовою задачі можна визначити максимальну потенціальну енергію $E_{\text{п max}}$ на максимальній висоті піднімання h_{max} і потенціальну енергію тіла на висоті h :

$$E_{\text{п max}} = mgh_{\text{max}}, \quad E_{\text{п}} = mgh. \quad (2)$$

Виразимо кінетичну енергію з (1):

$$E_{\text{к}} = E_{\text{п max}} - E_{\text{п}} = mgh_{\text{max}} - mgh = mg(h_{\text{max}} - h).$$

Обчислення:

$$[E_{\text{п max}}] = [E_{\text{п}}] = [E_{\text{к}}] = \text{кг} \frac{\text{Н}}{\text{кг}} \cdot \text{м} = \text{Н} \cdot \text{м} = \text{Дж},$$

$$\{E_{\text{п max}}\} = 5 \cdot 9,8 \cdot 20 = 980,$$

$$\{E_{\text{п}}\} = 5 \cdot 9,8 \cdot 5 = 245,$$

$$\{E_{\text{к}}\} = 5 \cdot 9,8 \cdot (20 - 5) = 735.$$

Відповідь: $E_{\text{п max}} = 980 \text{ Дж}$, $E_{\text{п}} = 245 \text{ Дж}$,

$$E_{\text{к}} = 735 \text{ Дж}.$$

Задача 10.

Важіль перебуває в рівновазі під дією двох сил: 10 Н і 5 Н. Знайти довжину важеля, якщо плече більшої сили 4 см.

Дано:	Сі:
$F_1 = 5 \text{ Н}$	$F_1 = 5 \text{ Н}$
$F_2 = 10 \text{ Н}$	$F_2 = 10 \text{ Н}$
$d_2 = 4 \text{ см}$	$d_2 = 0,04 \text{ м}$
$d = ?$	

Розв'язання:

Позначимо меншу силу, яка прикладена до довшого плеча важеля, через $\vec{F}_1$. Відповідно плече цієї сили — d_1 , силу, яка прикладена до короткого плеча важеля, — $\vec{F}_2$, плече цієї сили — d_2 , довжину всього важеля — d (рис. 69).

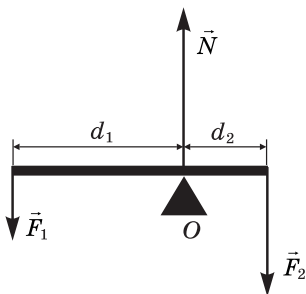


Рис. 69

Важіль перебуває в рівновазі, коли модулі сил, які діють на нього, обернено пропорційні плечам сил:

$$\frac{F_2}{F_1} = \frac{d_1}{d_2}. \quad (1)$$

Довжина важеля дорівнює сумі його плечей:

$$d = d_1 + d_2. \quad (2)$$

Виразимо значення d_1 з (1) і підставимо його в (2):

$$F_1 d_1 = F_2 d_2,$$

$$d_1 = \frac{F_2 d_2}{F_1},$$

$$d = \frac{F_2 d_2}{F_1} + d_2 = d_2 \left(\frac{F_2}{F_1} + 1 \right).$$

Обчислення:

$$[d] = \text{м} \frac{\text{Н}}{\text{Н}} = \text{м},$$

$$\{d\} = 0,04 \left(\frac{10}{5} + 1 \right) = 0,12.$$

Відповідь: $d = 12$ см.

Задача 11.

До кінців важеля завдовжки 1 м підвішені вантажі масою 50 і 150 г. Де треба розмістити опору, щоб важіль перебував у стані рівноваги (рис. 70)?

Дано:

$$m_1 = 50 \text{ г}$$

$$m_2 = 150 \text{ г}$$

$$d = 1 \text{ м}$$

СІ:

$$m_1 = 0,05 \text{ кг}$$

$$m_2 = 0,15 \text{ кг}$$

$$d = 1 \text{ м}$$

$$d_1 = ?$$

$$d_2 = ?$$



Рис. 70

Розв'язання:

На важіль, який перебуває у стані рівноваги, діють сили $(\vec{F}_1, \vec{F}_2)$, модулі яких обернено пропорційні плечам (d_1, d_2) цих сил:

$$\frac{F_2}{F_1} = \frac{d_1}{d_2}. \quad (1)$$

Сила, з якою вантаж діє на важіль, є вагою тіла.

Тоді

$$F_1 = P_1 = m_1 g,$$

$$F_2 = P_2 = m_2 g. \quad (2)$$

Зобразимо важіль, що перебуває в рівновазі під дією цих сил (рис. 71):

Підставимо значення F_1 і F_2 з (2) в (1):

$$\frac{m_2 g}{m_1 g} = \frac{d_1}{d_2}$$

або

$$\frac{m_2}{m_1} = \frac{d_1}{d_2}. \quad (3)$$

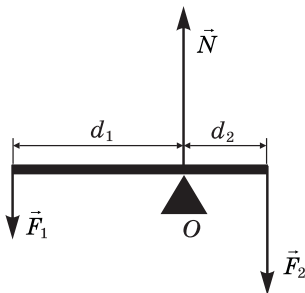


Рис. 71

Довжина важеля дорівнює сумі довжин його плечей:

$$d = d_1 + d_2. \quad (4)$$

Виразимо значення d_1 з (3) і підставимо його в (4):

$$m_1 d_1 = m_2 d_2, \quad d_1 = \frac{m_2 d_2}{m_1},$$

$$d = \frac{m_2 d_2}{m_1} + d_2 = d_2 \left(\frac{m_2}{m_1} + 1 \right).$$

Звідси знаходимо шукане значення d_2 :

$$d_2 = \frac{d}{\frac{m_2}{m_1} + 1}.$$

Обчислення:

$$[d_2] = \frac{\frac{\text{м}}{\text{кг}}}{\frac{\text{кг}}{\text{кг}}} = \text{м}, \quad \{d_2\} = \frac{1}{\frac{0,15}{0,05} + 1} = 0,25.$$

Відповідь: точку опори важеля необхідно встановити на відстані 25 см від вантажу більшої маси.

Задача 12.

За допомогою нерухомого блока рівномірно підняли вантаж масою 25 кг, прикладаючи до вільного кінця шнура силу 270 Н. Визначити ККД блока.

Дано:

$$m = 25 \text{ кг}$$

$$g = 9,8 \text{ Н/кг}$$

$$F_{\text{тяги}} = 270 \text{ Н}$$

$$\eta = ?$$

Розв'язання:

Позначимо масу вантажу, що піднімається, через m , силу, що прикладена до вільного кінця, — $\vec{F}_{\text{тяги}}$, коефіцієнт корисної дії механізму — η .

Силою тертя в осі блока знехтувати не можна, оскільки ККД блока може відрізнятись від 100 %. Розв'язуючи задачу, мусимо ввести величини, що не фігурують в умові: висоту піднімання вантажу h і переміщення вільного кінця шнура s . У ході розв'язування задачі ці величини скоротяться і в кінцевій формулі не присутні, звідки випливає, що ККД блока не залежить від висоти піднімання вантажу (рис. 72).

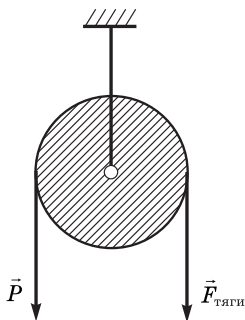


Рис. 72

Коефіцієнт корисної дії:

$$\eta = \frac{A_{\text{кор}}}{A_{\text{повна}}} \cdot 100 \%.$$

Корисна робота при підніманні тіла масою m на висоту h дорівнює добутку модуля його ваги на висоту:

$$A_{\text{кор}} = Ph.$$

При рівномірному підніманні вантажу його вага дорівнює модулю сили тяжіння:

$$P = mg.$$

Таким чином,

$$A_{\text{кор}} = mgh.$$

Підставимо значення $A_{\text{кор}}$ у формулу для ККД:

$$\eta = \frac{mgh}{A_{\text{повна}}} 100 \%.$$

Повна робота, або робота сили тяги $F_{\text{тяги}}$ на шляху S :

$$A_{\text{повна}} = F_{\text{тяги}} S.$$

Вільний кінець шнура рухомого блока здійснює переміщення, яке дорівнює висоті піднімання вантажу: $S = h$. Тому

$$A_{\text{повна}} = F_{\text{тяги}} h.$$

Підставимо значення $A_{\text{повна}}$ у формулу для ККД:

$$\eta = \frac{mgh}{F_{\text{тяги}} h} 100 \% = \frac{mg}{F_{\text{тяги}}} 100 \%.$$

Обчислення:

$$[\eta] = \frac{\text{кг} \cdot \frac{\text{Н}}{\text{кг}} \%}{\text{Н}} = \%,$$

$$\{\eta\} = \frac{25 \cdot 9,8 \cdot 100}{270} = 90,7.$$

Відповідь: $\eta \approx 90,7 \%$.

Задача 13.

За допомогою рухомого блока рівномірно підняли вантаж масою 100 кг, прикладаючи до вільного кінця шнура силу 700 Н. Визначити ККД блока.

Дано:

$$m = 100 \text{ кг}$$

$$g = 9,8 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$$

$$F_{\text{тяги}} = 700 \text{ Н}$$

$$\eta = ?$$

Розв'язання:

Позначимо масу вантажу, що піднімається, через m ; силу, прикладену до вільного кінця шнура, — $\vec{F}_{\text{тяги}}$; коефіцієнт корисної дії механізму — η .

3. ЗАКОНИ ЗБЕРЕЖЕННЯ В МЕХАНІЦІ

Вагою блока і силою тертя в його осі знехтувати не можна, оскільки ККД блока може відрізнятись від 100 %. Розв'язуючи задачу, нам доведеться ввести величини, що не фігурують в умові: висоту піднімання вантажу h і переміщення вільного кінця шнура S . У ході розв'язування задачі ці величини скоротяться і в кінцевій формулі не присутні, звідки видно, що ККД блока не залежить від висоти піднімання вантажу (рис. 73).

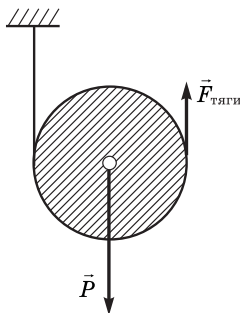


Рис. 73

Коефіцієнт корисної дії:

$$\eta = \frac{A_{\text{кор}}}{A_{\text{повна}}} 100 \% .$$

Корисна робота при підніманні тіла масою m на висоту h дорівнює добутку модуля його ваги на висоту:

$$A_{\text{кор}} = Ph .$$

При рівномірному підніманні вантажу його вага дорівнює модулю сили тяжіння:

$$P = mg .$$

Таким чином,

$$A_{\text{кор}} = mgh .$$

Підставимо значення $A_{\text{кор}}$ у формулу для ККД:

$$\eta = \frac{mgh}{A_{\text{повна}}} 100 \% .$$

Повна робота, або робота сили тяги $F_{\text{тяги}}$ на шляху S :

$$A_{\text{повна}} = F_{\text{тяги}} S.$$

Вільний кінець шнура рухомого блока здійснює переміщення S , вдвічі більше за переміщення вантажу h , що підвішений до блока: $S = 2h$. Тому

$$A_{\text{повна}} = F_{\text{тяги}} 2h.$$

Підставимо значення $A_{\text{повна}}$ у формулу для ККД:

$$\eta = \frac{mgh}{F_{\text{тяги}} 2h} 100\% = \frac{mg}{2F_{\text{тяги}}} 100\%.$$

Обчислення:

$$[\eta] = \frac{\text{кг} \frac{\text{Н}}{\text{кг}} \%}{\text{Н}} = \%,$$

$$\{\eta\} = \frac{100 \cdot 9,8 \cdot 100}{2 \cdot 700} = 70.$$

Відповідь: $\eta = 70\%$.

Задача 14.

При рівномірному переміщенні вантажу масою 15 кг уздовж похилої площини динамометр, прив'язаний до вантажу, показував силу 40 Н. Обчислити ККД похилої площини, якщо її довжина 1,8 м, висота — 30 см.

Дано:
 $m = 15 \text{ кг}$
 $F_{\text{тяги}} = 40 \text{ Н}$
 $l = 1,8 \text{ м}$
 $h = 30 \text{ см}$

СІ:
 $m = 15 \text{ кг}$
 $F_{\text{тяги}} = 40 \text{ Н}$
 $l = 1,8 \text{ м}$
 $h = 0,3 \text{ м}$

η — ?

Розв'язання:

Позначимо масу вантажу, що піднімається, через m ; вимірювану динамометром силу, прикладену до вантажу, — $\vec{F}_{\text{тяги}}$; довжину похилої площини — l ; її висоту — h (рис. 74).

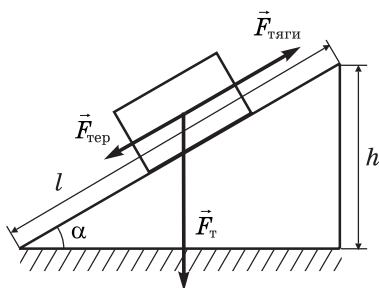


Рис. 74

Коефіцієнт корисної дії:

$$\eta = \frac{A_{\text{кор}}}{A_{\text{повна}}} 100 \% .$$

Корисна робота при підніманні тіла на висоту h :

$$A_{\text{кор}} = Ph = mgh.$$

Повна робота, або робота сили тяги на шляху l :

$$A_{\text{повна}} = F_{\text{тяги}} l.$$

Отже, ККД (η) похилої площини з урахуванням сили тертя при рівномірному русі вантажу вздовж похилої площини:

$$\eta = \frac{mgh}{F_{\text{тяги}} l} 100 \% .$$

Обчислення:

$$[\eta] = \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{кг} \cdot \text{м}} \% = \% ,$$

$$\{\eta\} = \frac{15 \cdot 9,8 \cdot 0,3}{40 \cdot 1,8} 100 = 62,5.$$

Відповідь: $\eta = 62,5 \% .$

4. МЕХАНІКА ТВЕРДОГО ТІЛА

4.1. ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ

Найпростішими видами механічного руху твердого тіла є поступальні й обертальні рухи.

Поступальний рух тіла може бути охарактеризований рухом однієї будь-якої його точки, наприклад центра мас.

При **обертальному русі** твердого тіла його точки описують кола, розташовані в паралельних площинах. Центри всіх кіл містяться на одній прямій, перпендикулярній до площин кіл і названій віссю обертання. Вісь обертання в даній системі відліку може бути або рухомою, або нерухомою.

Кутова швидкість ($\vec{\omega}$) — векторна величина, яка характеризує швидкість обертання тіла:

$$\vec{\omega} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{\phi}}{\Delta t} = \frac{d\vec{\phi}}{dt}.$$

Кутова швидкість — відношення кута повороту радіуса обертання до часу, за який поворот відбувся:

$$\omega = \frac{\phi}{t}.$$

Вектор кутової швидкості $\vec{\omega}$ напрямлений уздовж осі обертання за правилом правого гвинта, тобто так само, як і вектор $d\vec{\phi}$ (рис. 75).

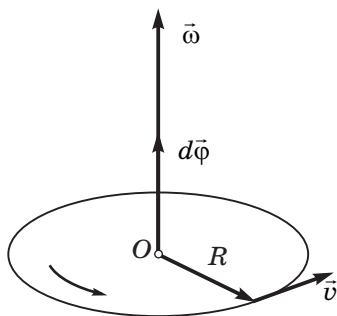


Рис. 75

Кутова швидкість рівномірного обертального руху (T — період обертання, n — частота обертання):

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi n.$$

Одиниця кутової швидкості — **радіан за секунду** (рад/с).

Радіан за секунду дорівнює кутовій швидкості рівномірно обертового тіла, всі точки якого за 1 с повертаються відносно осі на кут 1 рад.

Кутове прискорення ($\vec{\varepsilon}$) визначається відношенням зміни кутової швидкості обертання до проміжку часу обертання:

$$\vec{\varepsilon} = \frac{\Delta \vec{\omega}}{\Delta t}.$$

При обертанні тіла навколо нерухомої осі вектор кутового прискорення напрямлений уздовж осі обертання в бік вектора елементарного приросту кутової швидкості.

При прискореному русі вектор $\vec{\varepsilon}$ співнаправлений із вектором $\vec{\omega}$, при уповільненому — протилежний йому (рис. 76, а, б).

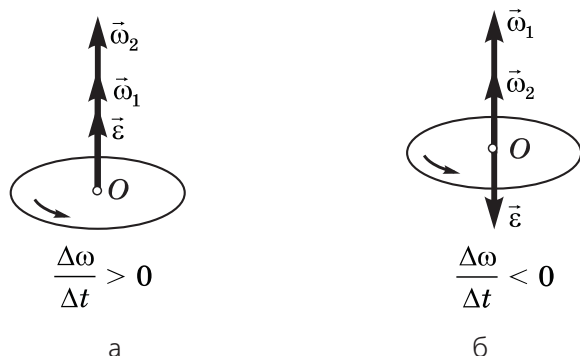


Рис. 76

4.2. УМОВИ І ВИДИ РІВНОВАГИ ТВЕРДОГО ТІЛА

Загальна умова рівноваги тіла: для того щоб тіло перебувало в рівновазі, необхідно, щоб дорівнювали нулю

геометрична сума прикладених до нього сил і алгебраїчна сума моментів сил відносно можливої осі обертання:

$$\begin{cases} \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_n = 0, \\ M_1 + M_2 + \dots + M_n = 0. \end{cases}$$

Виконання цих умов не заважає, проте, тілу виконувати рівномірний прямолінійний поступальний рух або обертання з постійним періодом обертання.

Види рівноваги:

- стійка,
- нестійка,
- байдужа.

Рівновага тіла стійка, якщо при малому відхиленні від положення рівноваги рівнодійна сил, прикладених до тіла, повертає його до положення рівноваги (рис. 77, а).

Рівновага тіла нестійка, якщо при малому відхиленні тіла від положення рівноваги рівнодійна сил, прикладених до тіла, віддаляє його від цього положення (рис. 77, б).

Рівновага називається байдужою, якщо тіло, виведене з певного стану рівноваги, залишається в рівновазі в новому положенні (рис. 77, в).

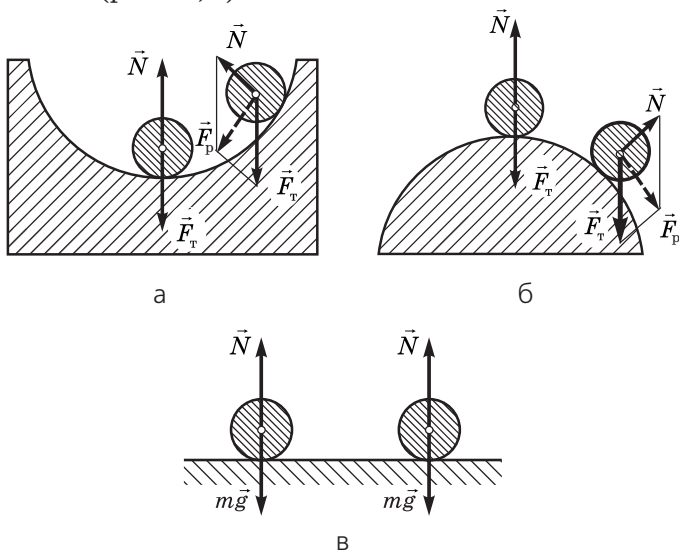


Рис. 77

Рівновага тіла, яке має вісь обертання, стійка за умови, що його центр тяжіння розташований нижче від осі обертання. Для максимально стійкої рівноваги центр тяжіння має перебувати в найбільш низькому із можливих для нього положень (рис. 78).

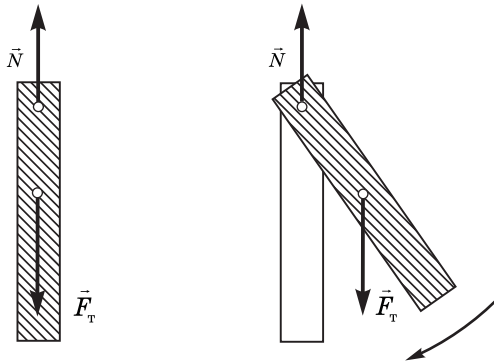


Рис. 78

Пара сил — дві паралельні сили, однакові за модулем, але напрямлені в протилежні боки.

Пара сил не має рівнодійної і тому зумовлює тільки обертання тіла відносно центра маси. Пара сил характеризується її вектором моменту ($\vec{M}$), що чисельно дорівнює площі паралелограма, побудованого на цих силах. Вектор моменту можна переміщувати в будь-якому паралельному йому напрямку (рис. 79).

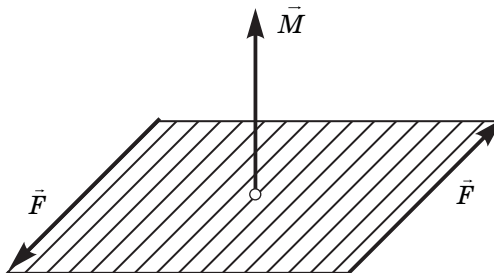


Рис. 79

4.3. МОМЕНТ ІМПУЛЬСУ. ЗАКОН ЗБЕРЕЖЕННЯ МОМЕНТУ ІМПУЛЬСУ

Момент імпульсу матеріальної точки $\vec{L}$ з масою m , яка рівномірно обертається зі швидкістю $\vec{v}$ по колу радіусом r (рис. 80):

$$\vec{L}[\vec{r} \times m\vec{v}].$$

Закон збереження моменту імпульсу для ізольованої системи тіл:

$$\sum_{i=1}^N J_i \omega_i = \text{const},$$

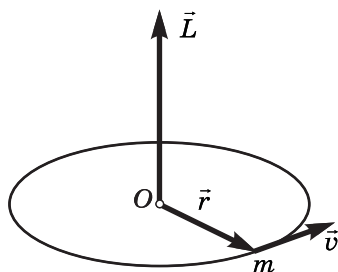


Рис. 80

Робота постійного моменту сили, яка діє на тіло, що обертається:

$$A = M\varphi,$$

де M — момент сили; φ — кут обертання.

Потужність при рівномірному обертальному русі:

$$N = M\omega.$$

Кінетична енергія обертального руху:

$$E_k = \frac{J\omega^2}{2}.$$

Кінетична енергія поступального руху центра мас і обертального руху тіла:

$$E_k = \frac{mv^2}{2} + \frac{J\omega^2}{2}.$$

4.4. ЗІСТАВЛЕННЯ РІВНЯНЬ МЕХАНІКИ ПОСТУПАЛЬНОГО Й ОБЕРТАЛЬНОГО РУХІВ (табл. 2)

Таблиця 2

Поступальний рух	Обертальний рух
Маса m	Момент інерції J
Сила $\vec{F}$	Момент сили $\vec{M}$
Імпульс $\vec{p} = m\vec{v}$	Момент імпульсу $\vec{L} = J\vec{\omega}$
Перший закон Ньютона	
$\vec{v} = \text{const}$, якщо $\sum_{i=1}^N \vec{F}_i = 0$	$\vec{\omega} = \text{const}$, якщо $\sum_{i=1}^N \vec{M}_i = 0$
Другий закон Ньютона	
$\sum_{i=1}^N \vec{F}_i = m\vec{a}$	$\sum_{i=1}^N \vec{M}_i = J\vec{\varepsilon}$
Третій закон Ньютона	
$\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}$	$\vec{M}_{12} = -\vec{M}_{21}$
Закон збереження	
імпульсу	моменту імпульсу
$\sum_{i=1}^N m_i \vec{v}_i = \text{const}$	$\sum_{i=1}^N J_i \vec{\omega}_i = \text{const}$
Робота	
$A = FS$	$A = M\varphi$
Кінетична енергія	
$E_{\text{к}} = \frac{mv^2}{2}$	$E_{\text{к}} = \frac{J\omega^2}{2}$
Потужність	
$N = \frac{A}{t} = Fv$	$N = \frac{A}{t} = M\omega$

4.5. ПРИКЛАДИ РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧ

Задача 1.

Тонкий обруч радіусом r без проковзування скочується в яму, яка має форму напівсфери з $R \gg r$. На якій глибині сила тиску обруча на стінку дорівнює його вазі спокою на Землі?

Дано:

 r R $R \gg r$ h — ?

Розв'язання:

$h = R \cos \alpha$, оскільки розмірами обруча r можна знехтувати за умовою задачі. За третім законом Ньютона $P = N$, але $P = mg$ в спокої на Землі.

Запишемо основне рівняння динаміки для обруча (рис. 81):

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

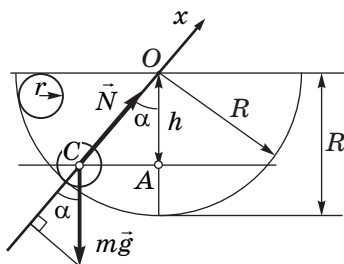


Рис. 81

У проекції на вісь Ox :

$$N - mg \cos \alpha = ma_{\text{доц}}. \quad (1)$$

Оскільки $a_{\text{доц}} = \frac{v^2}{R}$ і $N = mg$, то $mg - mg \cos \alpha = \frac{mv^2}{R}$,

$$g(1 - \cos \alpha) = \frac{v^2}{R}. \quad (2)$$

Прийmemo за нульовий рівень потенціальної енергії рівень, який проходить через точку A .

Запишемо закон збереження механічної енергії:

$$mgh = \frac{mv^2}{2} + \frac{J\omega^2}{2}. \quad (3)$$

Для кільця момент інерції дорівнює:

$$J_{\text{кільця}} = mr^2, \text{ а } \omega = \frac{v}{r}.$$

Тоді

$$mgh = \frac{mv^2}{2} + \frac{mr^2v^2}{2r^2} = \frac{mv^2}{2} + \frac{mv^2}{2} = mv^2,$$

$$mgh = mv^2, \quad v^2 = gh.$$

Підставимо значення v^2 в рівняння (2):

$$g(1 - \cos\alpha) = \frac{gh}{R}, \quad 1 - \cos\alpha = \frac{h}{R}.$$

Із $\triangle OAC$:

$$\cos\alpha = \frac{h}{R} \Rightarrow 1 - \frac{h}{R} = \frac{h}{R}, \quad 1 = \frac{2h}{R}.$$

$$\text{Звідси: } h = \frac{R}{2}.$$

Відповідь: сила тиску обруча на стінку напівсфери дорівнює вазі спокою відносно Землі на висоті, що дорівнює половині її радіуса.

Задача 2.

Стовп заввишки l падає із вертикального положення. Визначити швидкість падіння верхнього кінця при ударі об землю, якщо нижній кінець при падінні не переміщується.

Дано:

l

v — ?

Розв'язання:

Потенціальна енергія стовпа у вертикальному положенні ($E_{\text{п}} = mgh$) дорівнює кінетичній енергії при ударі об Землю ($E_{\text{к}} = \frac{J\omega^2}{2}$, оскільки $E_{\text{к}}$ поступального руху центра маси дорівнює нулю):

$$mgh = \frac{J\omega^2}{2}.$$

Оскільки $h = \frac{l}{2}$ (рис. 82) і момент інерції стрижня задовжки l відносно осі, яка перпендикулярна до стрижня і проходить через його кінець, дорівнює:

$$J = \frac{ml^2}{3}, \text{ а } \omega = \frac{v}{R} = \frac{v}{l},$$

отже,

$$mg \frac{l}{2} = \frac{ml^2}{3} \cdot \frac{v^2}{l^2 2}.$$

Звідси

$$v = \sqrt{3gl}.$$

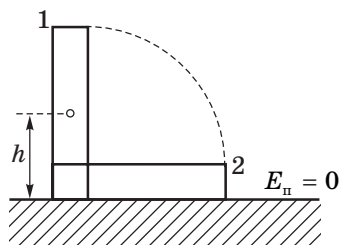


Рис. 82

Відповідь: швидкість верхнього кінця стовпа при ударі об землю $v = \sqrt{3gl}$.

Задача 3.

На яку максимальну висоту може піднятися людина масою m по драбині масою M і завдовжки l , приставленій до гладенької стіни? Кут між драбиною і підлогою дорівнює α , коефіцієнт тертя об підлогу дорівнює μ .

Дано:

m

M

l

α

μ

h — ?

Розв'язання:

Запишемо умови рівноваги драбини:

1) алгебраїчна сума моментів сил відносно точки B дорівнює нулю (рис. 83):

$$M_1 + M_2 + M_3 + M_4 + M_5 = 0,$$

$$-N_2 l \sin \alpha + mgx \cos \alpha + Mg \frac{l \cos \alpha}{2} = 0. \quad (1)$$

Моменти сил $\vec{N}_1$ і $\vec{F}_{\text{тер}}$ дорівнюють нулю, оскільки дорівнюють нулю плечі цих сил відносно точки B ;

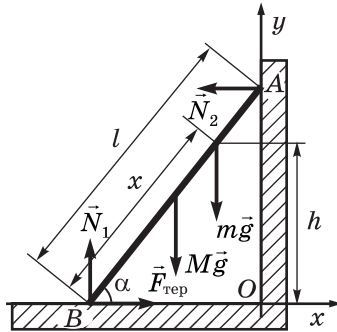


Рис. 83

2) векторна сума сил, які діють на драбину, дорівнює нулю:

$$m\vec{g} + M\vec{g} + \vec{N}_2 + \vec{F}_{\text{тер}} + \vec{N} = 0.$$

Проекція цього рівняння на вісь Ox :

$$F_{\text{тер}} - N_2 = 0 \Rightarrow F_{\text{тер}} = \mu N_1,$$

отже,

$$N_2 = \mu N_1. \quad (2)$$

Проекція рівняння на вісь Oy :

$$\begin{aligned} N_1 - Mg - mg &= 0, \\ N_1 &= g(M + m). \end{aligned} \quad (3)$$

Підставимо значення N_1 в N_2 , дістанемо:

$$N_2 = \mu g(M + m).$$

Підставимо значення N_2 в рівняння (1):

$$-\mu g(M+m)l \sin \alpha + mgx \cos \alpha + Mg \frac{l \cos \alpha}{2} = 0,$$

$$mx \cos \alpha = \mu(M+m)l \sin \alpha - \frac{Ml \cos \alpha}{2},$$

$$x = \frac{\left[\mu(M+m) \sin \alpha - \frac{M \cos \alpha}{2} \right] l}{m \cos \alpha}.$$

Шукана висота:

$$h = x \sin \alpha = \frac{\left[\mu(M+m) \sin \alpha - \frac{M \cos \alpha}{2} \right] l}{m \cos \alpha} \sin \alpha,$$

$$h = \frac{\left[(M+m) \mu \sin \alpha - \frac{M \cos \alpha}{2} \right]}{m} l \cdot \operatorname{tg} \alpha.$$

Відповідь: максимальна висота, на яку піднімається людина, дорівнює:

$$h = \frac{\left[(M+m) \mu \sin \alpha - \frac{M \cos \alpha}{2} \right]}{m} l \cdot \operatorname{tg} \alpha.$$

Задача 4.

В однорідній тонкій круглій пластинці радіусом r вирізано круг радіусом $\frac{r}{2}$. Визначити положення центра маси пластини.

Дано:

$$R = r$$

$$R_1 = \frac{r}{2} = OO_1$$

$$x = ?$$

$$x = OC$$

Розв'язання:

Вкладемо круг у виріз пластини.

Тоді сила тяжіння великого диска

$$mg = m_1 g + m_2 g.$$

За правилом моментів сил (відносно точки O):

$$M_1 + M_2 + M_3 = 0 ,$$

$$M_1 = -m_1 g R_1 = -m_1 g \frac{r}{2}$$

Оскільки сила тяжіння великого диска ($m\vec{g}$) проходить через точку O , то момент цієї сили (M_2) дорівнює нулю: $M_3 = m_2 g x$ (рис. 84).

$$\text{Тоді } -m_1 g \frac{r}{2} + m_2 g x = 0 .$$

Звідси випливає:

$$m_2 g x = m_1 g \frac{r}{2} ,$$

$$x = \frac{m_1 r}{2m_2} .$$

Виразимо маси і об'єми тіл:

$$m_1 = \rho V_1 , \quad m_2 = \rho V_2 ,$$

$$V_1 = S_1 h , \quad V_2 = S_2 h .$$

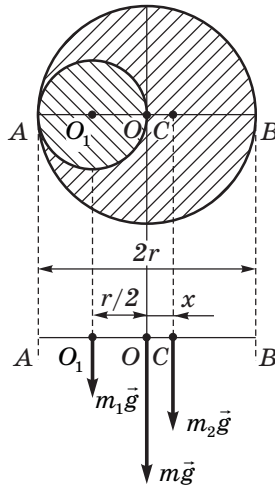


Рис. 84

Тоді

$$x = \frac{\rho S_1 h r}{2\rho S_2 h} = \frac{S_1 r}{2S_2}, \quad (1)$$

де S_1 — площа малого круга; S_2 — площа, яка дорівнює площі великого круга з відніманням площі малого круга: $S_2 = S - S_1$.

Розпишемо S :

$$S_1 = \pi R_1^2 = \pi \frac{r^2}{4},$$

$$S = \pi R^2 = \pi r^2.$$

Тоді

$$S_2 = \pi r^2 - \frac{\pi r^2}{4} = \frac{3}{4} \pi r^2.$$

Підставимо значення S_1 і S_2 в формулу (1) й дістанемо:

$$x = \frac{\frac{\pi r^2}{4} r}{2 \frac{3}{4} \pi r^2} = \frac{r}{6}, \quad x = \frac{r}{6}.$$

Відповідь: центр мас пластинки з вирізаним кругом змістився вправо на $x = \frac{r}{6}$.

5. ГІДРОСТАТИКА І АЕРОСТАТИКА

5.1. ТИСК

Гідроаеростатика — розділ механіки, який вивчає рівноважний стан рідини або газу.

Величина, яка дорівнює відношенню сили, що діє перпендикулярно поверхні, до площі цієї поверхні, називається **тиском**:

$$p = \frac{F_{\perp}}{S}.$$

Одиниця тиску — **паскаль** (Па):

$$[p] = 1 \text{ Па} = 1 \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}.$$

Паскаль — тиск, який створює нормальна сила 1 Н на площину 1 м².

5.2. ЗАКОН ПАСКАЛЯ

Тиск, здійснюваний на рідину або газ, які замкнуті в закритій посудині, передається у всіх напрямках без змін.

5.3. ГІДРОСТАТИЧНИЙ ТИСК

Гідростатичний тиск — тиск, обумовлений вагою стовпа рідини. Збільшується з глибиною і залежить від густини рідини:

$$p = \rho_p g h.$$

Якщо рідина перебуває під зовнішнім тиском p_0 (наприклад під тиском повітря), то тиск усередині рідини на глибині h дорівнює (рис. 85):

$$p = p_0 + \rho_p g h.$$

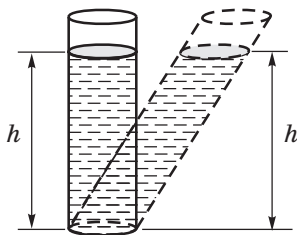


Рис. 85

5.4. СПОЛУЧЕНІ ПОСУДИНИ

— При будь-якій формі посудин, які містять однорідну рідину, поверхні рідини устанавлюються на одному рівні (рис. 86).

— У посудинах з різномірними незмішуваними рідинами висота стовпів над рівнем розділу цих рідин обернено пропорційна їхнім густинам. Рідина з більшою густиною завжди опускається на дно (рис. 87):

$$\frac{h_1}{h_2} = \frac{\rho_2}{\rho_1}.$$

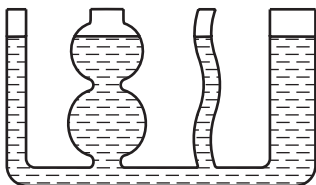


Рис. 86

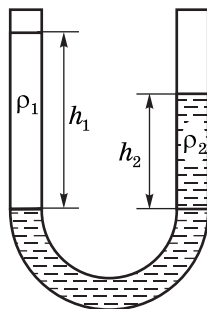


Рис. 87

5.5. ГІДРОСТАТИЧНИЙ ПАРАДОКС

Тиск на дно в посудинах (рис. 88) однаковий:

$$p = \rho_p g h,$$

але вага води в першій посудині більша, ніж у третій; у другій — менша, ніж у третій. Чому?

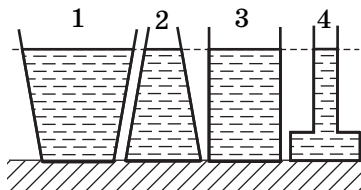


Рис. 88

У першій посудині сила реакції опори стінок урівноважує частину ваги рідини, а у другій посудині сила реакції опори стінок збільшує силу тиску на дно.

5. ГІДРОСТАТИКА І АЕРОСТАТИКА

У четвертій посудині тиск тонкого вертикального стовпа за законом Паскаля передається на дно (рис. 89):

$$p = \rho_p g h_1 + \rho_p g h_2 .$$

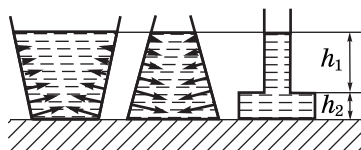


Рис. 89

5.6. ГІДРАВЛІЧНА МАШИНА

Гідравлічна машина дає вигреш у силі у стільки разів, у скільки площа її більшого поршня більша за площу меншого поршня (рис. 90):

$$\frac{F_2}{F_1} = \frac{S_2}{S_1} .$$

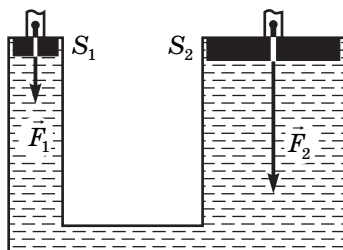


Рис. 90

5.7. ЗАКОН АРХІМЕДА

На тіло, занурене у рідину або газ, діє виштовхувальна сила, яка за модулем дорівнює силі тяжіння рідини (або газу), зайнятої тілом.

Виштовхувальна сила називається **архімедовою силою**:

$$F_A = \rho_p g V_{\text{занур. тіла}} .$$

Архімедова сила прикладена до центра ваги (маси) витісненої тілом рідини. Вона зумовлена різницею тисків на верхню та нижню поверхню тіла, при цьому атмосферний тиск взаємно компенсується.

5.8. УМОВИ ПЛАВАННЯ ТІЛ (табл. 3)

Таблиця 3

Поведінка тіла	Тіло	
	неоднорідне	однорідне
Тоне	$F_A < mg$	$\rho_t > \rho_p$
Спливає	$F_A > mg$	$\rho_t < \rho_p$
Плаває всередині рідини	$F_A = mg$	$\rho_t = \rho_p$
Плаває на поверхні рідини (часткове занурення)	$F_A = mg$	$\rho_t < \rho_p$

Плавання суден

Важкі вантажі та двигуни розташовуються у нижній частині судна, щоб центр ваги (2) був нижче від точки прикладення архімедової сили (1), що забезпечує стійкість судна

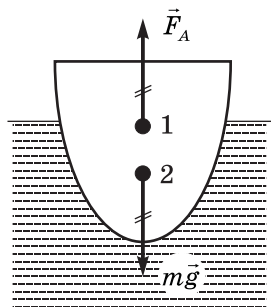


Рис. 91

(при нахилі судна $\vec{F}_A$ і $m\vec{g}$ стають парою сил, які повертають судно у вертикальне положення) (рис. 91).

Вага води, витискувана судном до **ватерлінії** (найбільша допустима осадка, відзначена на корпусі червоною лінією), яка дорівнює силі тяжіння, що діє на судно з вантажем, називається **водотоннажністю** судна.

Якщо від водотоннажності відняти вагу самого судна, то дістанемо **вантажопідйомність** судна:

$$P_{\text{водотон}} - P_{\text{с}} = P_{\text{вант}}.$$

Різниця між вагою 1 м^3 повітря і вагою того самого об'єму іншого газу називається **підйомною силою** 1 м^3 газу:

$$F_{\text{під}} = P_{\text{пов}} - P_{\text{газу}},$$

$$F_{\text{під}} = (\rho_{\text{пов}} - \rho_{\text{газу}}) g V_{\text{газу}}.$$

Визначення густини тіла **методом гідростатичного зважування**:

$$\rho_{\text{т}} = \frac{P}{P - P'} \rho_{\text{рід}},$$

де P — вага тіла в повітрі; P' — вага тіла в рідині.

5.9. АТМОСФЕРНИЙ ТИСК, ЙОГО ВИМІРЮВАННЯ

Особливість атмосферного тиску (тиску газів): для визначення атмосферного тиску формула $p = \rho gh$ неприйнятна, оскільки густина повітря з висотою зменшується.

Уперше атмосферний тиск був виміряний **Торричеллі**. У досліді Торричеллі атмосферний тиск урівноважується тиском стовпа ртуті у скляній трубці (рис. 92). Над ртуттю утворюються насичені пари ртуті, тиск яких дуже малий, і ним нехтують.

Атмосферний тиск, який дорівнює тиску стовпа ртуті заввишки $h_{\text{рт}} = 760$ мм за температури 0°C , називається **нормальним атмосферним тиском**:

$$1 \text{ мм рт. ст.} = 133,3 \text{ Па},$$

$$p_{\text{атм}} \approx 10^5 \text{ Па}.$$

Нормальному атмосферному тиску відповідає тиск стовпа води заввишки 10,2 м.

Атмосферний тиск із висотою зменшується на 1 мм рт. ст. у середньому на кожні 12 м підйому (відносно Землі).

Прилади для вимірювання атмосферного тиску називаються барометрами. Вони бувають рідинними (трубка Торричеллі) і металевими (барометр-анероїд). Барометр-анероїд складається з металевій герметичної гофрованої коробочки 1, яка стискується при збільшенні атмосферного тиску і розширюється при його зменшенні (рис. 93).

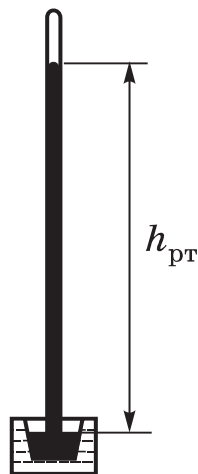


Рис. 92

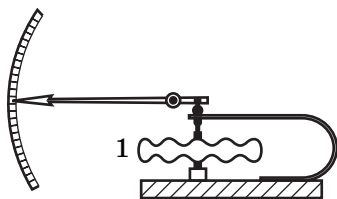


Рис. 93

Для вимірювання тисків, більшого чи меншого від атмосферного, використовують рідинні або металеві **манометри**. Рідинні манометри являють собою сполучені посудини, заповнені однорідною рідиною. Один кінець манометра з'єднаний з посудиною, в якій вимірюється тиск газу, а інший перебуває під атмосферним тиском (рис. 94).

Основна частина металевого манометра — зігнута в дугу пружна металева трубочка (1), один кінець якої закритий, а інший за допомогою крана (2) сполучений з посудиною, в якій вимірюється тиск (рис. 95).

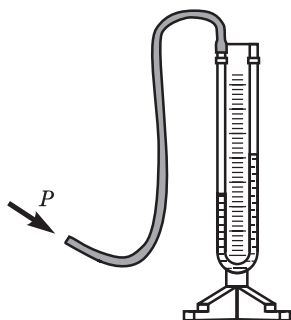


Рис. 94

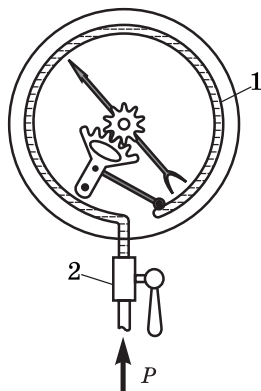


Рис. 95

5.10. ПРИКЛАДИ РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧ

Задача 1.

Посудина, яка має форму зрізаного конуса з приставним дном, занурена у воду. Якщо в посудину налити ≥ 200 г води, дно відривається. Чи відпаде дно, якщо на нього поставити гирю масою 200 г (рис. 96)?

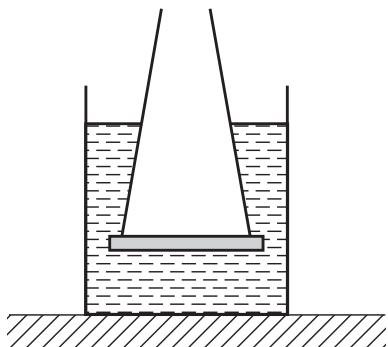


Рис. 96

Відповідь: форма даної посудини сприяє збільшенню сили тиску на дно на величину сили реакції опори стінок, тому дія гирі тієї самої маси, що і вода, не призведе до відриву дна посудини.

Задача 2.

До вертикальної стінки посудини впритул приставлений кубик з ребром h . Як напрямлена сила тиску води на кубик (рис. 97, а)?

Розв'язання:

Сила тиску води на кубик дорівнює геометричній сумі $\vec{F}_A$ і $\vec{F}_{\text{тиск}}$ води на бічну поверхню. Модуль архімедової сили дорівнює:

$$F_A = \rho_p g h^3.$$

Модуль сили тиску на бічну поверхню:

$$F_{\text{тиск}} = (p_{\text{атм}} + \rho g H) \cdot h^2.$$

Архімедова сила напрямлена вгору, а сила тиску води — ліворуч. Рівнодійна сила дорівнює їхній геометричній сумі (рис. 97, б):

$$\vec{F} = \vec{F}_A + \vec{F}_{\text{тиск}}, \quad F = \sqrt{F_A^2 + F_{\text{тиск}}^2}.$$

$F_{\text{тиск}} \gg F_A$, тому рівнодійна сила напрямлена під малим кутом (α) до горизонту.

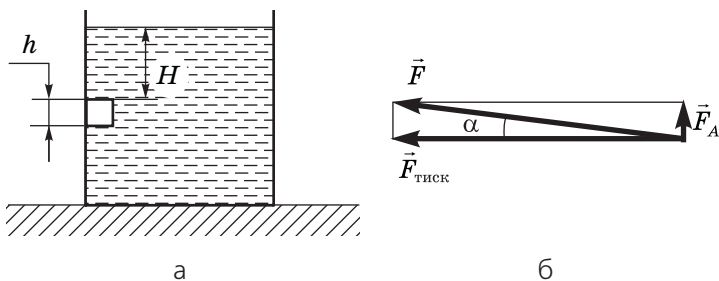


Рис. 97

Відповідь: рівнодійна сила направлена під малим кутом (α) до горизонту.

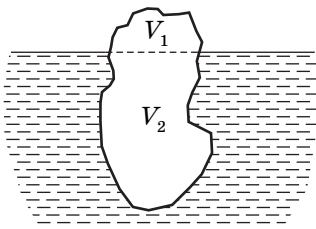


Рис. 98

Задача 3.

Айсберг плаває в морі, виступаючи на 150 м^3 над поверхнею води. Визначити об'єм підводної частини айсберга (рис. 98).

Дано:

$$V_1 = 150 \text{ м}^3$$

$$\rho_{\text{в}} = 1,03 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$$

$$\rho_{\text{л}} = 0,9 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$$

$$V_2 = ?$$

Розв'язання:

Умова плавання тіл: $F_A = mg$.

Розпишемо F_A і m :

$$F_A = \rho_{\text{в}} g V_2, \quad m = \rho_{\text{л}} (V_1 + V_2),$$

$$\rho_{\text{в}} g V_2 = \rho_{\text{л}} (V_1 + V_2) g,$$

$$V_2 = \frac{\rho_{\text{л}} V_1}{\rho_{\text{в}} - \rho_{\text{л}}}.$$

Обчислення:

$$[V_2] = \frac{\frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \cdot \text{м}^3}{\frac{\text{кг}}{\text{м}^3} - \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}} = \text{м}^3,$$

$$\{V_2\} = \frac{0,9 \cdot 10^3 \cdot 150}{(1,03 - 0,9) \cdot 10^3} = 1038.$$

Відповідь: $V_2 = 1038 \text{ м}^3$.

Задача 4.

Визначити масу атмосфери Землі, якщо $R_3 = 6400 \text{ км}$,
 $p_{\text{атм}} = 760 \text{ мм рт. ст.}$

Дано:

$$R_3 = 6400 \text{ км}$$

$$p_{\text{атм}} = 760 \text{ мм рт. ст.}$$

$$m_{\text{атм}} \text{ — ?}$$

СІ:

$$R_3 = 6 \cdot 10^6 \text{ м}$$

$$p_{\text{атм}} = 10^5 \text{ Па}$$

Розв'язання:

Тиск атмосфери на поверхню Землі дорівнює:

$$p_{\text{атм}} = \frac{m_{\text{атм}} \cdot g}{S}, \quad S = 4\pi \cdot R_3^2, \quad p_{\text{атм}} = \frac{m_{\text{атм}} \cdot g}{4\pi \cdot R_3^2}$$

$$\text{Звідси } m_{\text{атм}} = \frac{p_{\text{атм}} \cdot 4\pi \cdot R_3^2}{g}.$$

Обчислення:

$$[m] = \frac{\text{Па} \cdot \text{м}^2 \text{с}^2}{\text{м}} = \frac{\frac{\text{Н}}{\text{м}^2} \cdot \text{м}^2 \text{с}^2}{\text{м}} = \frac{\text{кг} \cdot \frac{\text{м}}{\text{с}^2} \cdot \text{с}^2}{\text{м}} = \text{кг},$$

$$\{m\} = \frac{10^5 \cdot 4 \cdot 3,14 \cdot (6,4 \cdot 10^6)^2}{9,8} = 5 \cdot 10^{18}.$$

Відповідь: $m_{\text{атм}} = 5 \text{ Екг (екса (Е)} \rightarrow 10^{18} \text{)}.$

Задача 5.

На яку висоту можна підняти воду з колодязя за допомогою поршня, який уприти до внутрішніх стінок довгої циліндричної трубки? На яку висоту підніметься кипляча вода? ($p_{\text{атм}} = 760 \text{ мм рт. ст.}$) (рис. 99)?

Дано:

$$\rho_{\text{в}} = 1000 \text{ кг/м}^3$$

$$p_{\text{атм}} = 760 \text{ мм рт. ст.}$$

$$h_{\text{в}} = ?$$

СІ:

$$\rho_{\text{в}} = 10^3 \text{ кг/м}^3$$

$$p_{\text{атм}} = 760 \cdot 133,3 \text{ Па} = 10^5 \text{ Па}$$

Розв'язання:

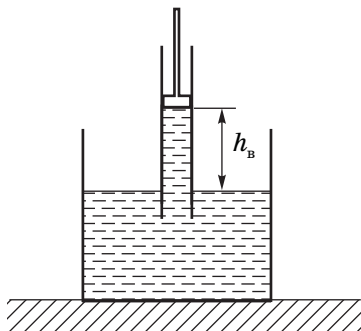


Рис. 99

Під поршнем вакуум заповнюється водою, доки тиск стовпа води не врівноважить атмосферний тиск:

$$p_{\text{атм}} = \rho_{\text{в}} \cdot g h_{\text{в}}.$$

$$\text{Звідси } h_{\text{в}} = \frac{p_{\text{атм}}}{\rho_{\text{в}} g}.$$

Якщо вода кипить, то вакуум заповнюється насиченими парами води, а вони мають тиск, що дорівнює атмосферному, тому кипляча вода за поршнем не підніметься.

Обчислення:

$$[h_{\text{в}}] = \frac{\text{Па} \cdot \text{м}^3 \cdot \text{с}^2}{\text{кг} \cdot \text{м}} = \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с}^2}{\text{кг} \cdot \text{м}} = \text{м},$$

$$\{h_{\text{в}}\} = \frac{10^5}{10^3 \cdot 9,8} \approx 10,2.$$

Відповідь: $h_{\text{в}} = 10,2 \text{ м}$.

Задача 6.

Акваріум, який має форму прямокутного паралелепіпеда, заповнений водою. З якою силою тисне вода на стінку акваріума, якщо її довжина a , висота b ? Атмосферним тиском знехтувати.

Дано:

$$a$$

$$h = b$$

$$\rho_{\text{в}}$$

$$F_{\text{т}} = ?$$

Розв'язання:

$$\text{Площа бічної стінки акваріума } S = a \cdot b = a \cdot h.$$

Гідростатичний тиск води на стінку лінійно змінюється від $p_1 = 0$ до $p_2 = \rho g h$. Тоді

$$p_{\text{сеп}} = \frac{p_1 + p_2}{2} = \frac{\rho g h}{2}.$$

Сила тиску на стінку дорівнює:

$$F_{\tau} = p_{\text{сеп}} S = \frac{\rho_{\text{в}} g h}{2} a h = \frac{\rho_{\text{в}} g a h^2}{2}.$$

Відповідь: $F_{\tau} = \frac{\rho_{\text{в}} g a h^2}{2}.$

Задача 7.

У посудину, зображену на рис. 100, налито три незмішувані рідини. Знаючи густини ρ_1 і ρ_2 , а також вагу третьої рідини P_3 , визначити різницю рівнів другої рідини Δh_2 , якщо кут α , площа поперечного перерізу правої трубки S і висота стовпа першої рідини h_1 відомі. Зовнішній тиск на поверхні рідин однаковий.

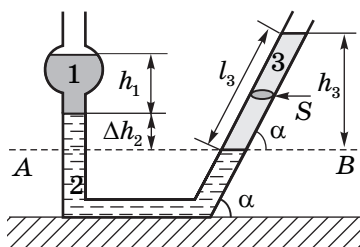


Рис. 100

Дано:

ρ_1

ρ_2

P_3

α

S

h_1

$p_{\text{атм}} = \text{const}$

Δh_2 — ?

Розв'язання:

Оскільки рідини перебувають у рівновазі в сполучених посудинах, на рівні, нижче від якого рідина однорідна (лінія AB), тиск однаковий: $p_1 = p_2$.

$$p_1 = p_{\text{зовн}} + \rho_3 g h_3,$$

$$p_2 = p_{\text{зовн}} + \rho_1 g h_1 + \rho_2 g \Delta h_2,$$

$$\Delta h_2 = \frac{g(\rho_3 h_3 - \rho_1 h_1)}{g \rho_2} = \frac{\rho_3 h_3 - \rho_1 h_1}{\rho_2}.$$

Виразимо $h_3 = l_3 \cdot \sin \alpha$, $l_3 = \frac{V_3}{S}$, тоді $h_3 = \frac{V_3}{S} \sin \alpha$,

де V_3 — об'єм третьої рідини; S — площа перерізу правої трубки.

Підставимо h_3 у вираз для Δh_2 , дістанемо:

$$\Delta h_2 = \frac{\rho_3 \frac{V_3}{S} \sin \alpha - \rho_1 h_1}{\rho_2}.$$

Виразимо V_3 через вагу третьої рідини:

$$V_3 = \frac{P_3}{\rho_3 \cdot g}.$$

Підставимо у вираз для Δh_2 :

$$\Delta h_2 = \frac{\frac{P_3}{gS} \sin \alpha - \rho_1 h_1}{\rho_2} = \frac{P_3 \sin \alpha - \rho_1 h_1 g S}{\rho_2 g S}.$$

Відповідь: $\Delta h_2 = \frac{P_3 \sin \alpha - \rho_1 h_1 g S}{\rho_2 g S}.$

Задача 8.

З якою силою тиснуть одне на одного дно посудини і цеглина густиною $\rho_{\text{ц}}$, якщо площа основи цеглини S , її висота h , а в посудину налита рідина густиною $\rho_{\text{рід}}$ до висоти H ? Прийняти $h \ll H$.

Дано:

$\rho_{\text{ц}}$

$\rho_{\text{рід}}$

S

h

H

N_1 — ?

N_2 — ?

Розв'язання:

Можливі два випадки:

1) цеглина нещільно прилягає до дна посудини;

2) цеглина «прилипла» до дна так, що рідини між нею і дном посудини нема.

Розпишемо усі сили, які діють на цеглину в обох випадках.

1) На цеглину діє сила тяжіння, сила реакції опори $\vec{N}_1$, архімедова сила, яка обумовлена різницею сил тиску на нижню і верхню грані цеглини (рис. 101, а).

Цеглина перебуває у рівновазі, тому

$$\vec{F}_A + \vec{N}_1 + m\vec{g} = 0.$$

У проекції на Ox :

$$F_A + N_1 - mg = 0.$$

Виразимо N_1 :

$$N_1 = mg - F_A, \text{ де } F_A = \rho_{\text{рід}} \cdot g \cdot S \cdot h.$$

2) На цеглину діє сила тяжіння, сила реакції опори $\vec{N}_2$ і сила тиску на верхню грань (сила тиску на нижню грань відсутня, оскільки між цеглиною і дном немає прошарку рідини) (рис. 101, б).

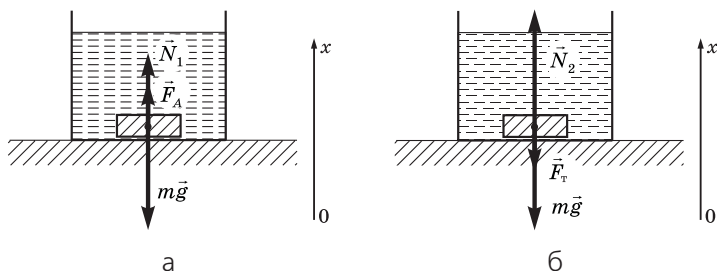


Рис. 101

Цеглина перебуває у рівновазі, тому

$$\vec{N}_2 + m\vec{g} + \vec{F}_t = 0.$$

У проекції на Ox :

$$N_2 - mg - F_t = 0,$$

$$N_2 = mg + F_t,$$

$$\text{де } F_t = (\rho_{\text{атм}} + \rho_{\text{рід}} g H) S.$$

Порівнявши N_1 і N_2 , дістанемо $N_2 > N_1$.

Відповідь: сила, з якою цеглина і дно посудини тиснуть одне на одного, більша у випадку, коли цеглина «прилипає» до дна.

Задача 9.

До якої висоти треба налити воду в циліндричну посудину, щоб сили тиску води на дно і стінки посудини були однакові? Радіус дна посудини R .

Дано:	<i>Розв'язання:</i>
R	Знаходимо модуль сили тиску $F_{\perp_1}$ рідини на бічні стінки, урахувуючи, що середній тиск дорівнює половині максимального $\left(p_{\text{сеп}} = \frac{\rho gh}{2} \right)$,
ρ_p	
$F_{\perp_1} = F_{\perp_2}$	
h — ?	$F_{\perp_1} = p_{\text{сеп}} S_{\text{біч}} = \frac{\rho gh}{2} S_{\text{біч}}.$

Площу бічних стінок визначаємо за формулою $S_{\text{біч}} = hl$, де l — довжина кола, яка дорівнює $2\pi R$. Тоді площа бічних стінок

$$S_{\text{біч}} = h2\pi R.$$

Підставимо значення площі в формулу для $F_{\perp_1}$:

$$F_{\perp_1} = \frac{\rho gh}{2} h2\pi R = \rho gh^2 \pi R.$$

Знаходимо модуль сили тиску $F_{\perp_2}$ рідини на дно посудини, урахувуючи, що площа дна дорівнює площі круга ($S_{\text{к}} = \pi R^2$), а тиск на дно $p = \rho gh$:

$$F_{\perp_2} = pS_{\text{дна}} = \rho gh\pi R^2.$$

За умовою задачі сили тиску на бічну поверхню і дно посудини однакові:

$$\begin{aligned} F_{\perp_1} &= F_{\perp_2}; \\ \rho gh^2 \pi R &= \rho gh\pi R^2. \end{aligned}$$

Звідси $h = R$.

Відповідь: $h = R$.

Задача 10.

У сполучених посудинах містяться ртуть, вода і гас (рис. 102). Яка висота шара гасу в лівому коліні, якщо висота стовпа води в правому коліні 20 см і в лівому коліні рівень ртуті нижчий, ніж у правому, на 0,5 см?

Дано:

$$\rho_1 = 800 \text{ кг/м}^3$$

$$h_2 = 20 \text{ см}$$

$$\rho_2 = 1000 \text{ кг/м}^3$$

$$\rho_3 = 13600 \text{ кг/м}^3$$

$$h_3 = 0,5 \text{ см}$$

$$h_1 = ?$$

СІ:

$$\rho_1 = 800 \text{ кг/м}^3$$

$$h_2 = 0,2 \text{ м}$$

$$\rho_2 = 1000 \text{ кг/м}^3$$

$$\rho_3 = 13600 \text{ кг/м}^3$$

$$h_3 = 0,005 \text{ м}$$

Розв'язання:

Оскільки рідини перебувають у рівновазі в сполучених посудинах, то на рівні, нижче від якого рідина однорідна (лінія OO_1), тиск у лівому ($p_{\text{л}}$) і правому ($p_{\text{п}}$) колінах однаковий: $p_{\text{л}} = p_{\text{п}}$.

На рівні OO_1 тиск у лівому коліні складається із зовнішнього тиску на газ (атмосферного тиску) і тиску стовпа газу:

$$p_{\text{л}} = p_{\text{зовн}} + \rho_1 g h_1.$$

На цьому самому рівні тиск у правому коліні складається із зовнішнього, тиску стовпа води і тиску стовпа ртуті:

$$p_{\text{п}} = p_{\text{зовн}} + \rho_2 g h_2 + \rho_3 g h_3.$$

Оскільки $p_{\text{л}} = p_{\text{п}}$, то

$$p_{\text{зовн}} + \rho_1 g h_1 = p_{\text{зовн}} + \rho_2 g h_2 + \rho_3 g h_3.$$

Після спрощення дістанемо:

$$h_1 = \frac{g(\rho_2 h_2 + \rho_3 h_3)}{g\rho_1} = \frac{\rho_2 h_2 + \rho_3 h_3}{\rho_1}.$$

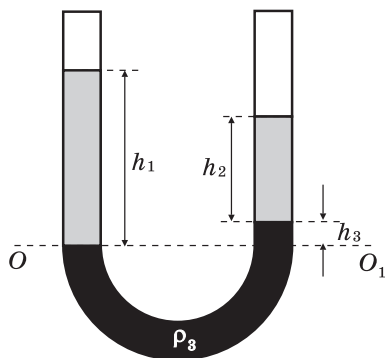


Рис. 102

Обчислення:

$$[h_1] = \frac{\frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \cdot \text{м}}{\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}} = \text{м},$$

$$\{h_1\} = \frac{0,2 \cdot 10^3 + 0,005 \cdot 13\,600}{8 \cdot 10^2} = 0,335.$$

Відповідь: $h_1 = 33,5$ см.

6. ГІДРОДИНАМІКА І АЕРОДИНАМІКА

Гідроаеродинаміка — розділ механіки, що вивчає рух (течію) рідин або газів, а також їхню взаємодію з тілами, що рухаються через них.

6.1. СТРУМИННА ТЕЧІЯ РІДИН І ГАЗІВ

Закон сталості потоку: при стаціонарній течії ідеальної (нестисної) рідини через будь-який переріз потоку проходить однакова кількість рідини:

$$\theta = \frac{m}{t} = \text{const}, \quad \theta = \rho S v.$$

Рівняння нерозривності струменя: для двох довільних перерізів потоку добуток швидкості течії (v) нестисної рідини на поперечний переріз (S) трубки є величина стала для даної трубки течії (рис. 103):

$$S_1 v_1 = S_2 v_2, \text{ або } S v = \text{const}.$$

Трубка течії — частина рідини, обмежена лініями течії.

Лінія течії — це лінія, у кожній точці якої дотична до неї збігається за напрямом з вектором швидкості рідини в даний момент часу (рис. 104).

Ламінарна (шарувата) течія — це течія рідини (газу), при якій уздовж потоку кожний виділений тонкий шар ковзає відносно сусідніх, не перемішуючись з ними.

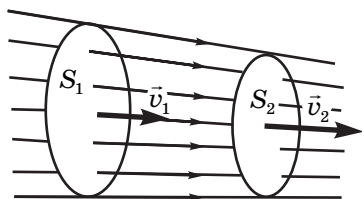


Рис. 103

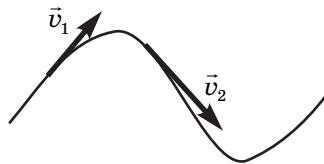


Рис. 104

Турбулентна (вихрова) течія — це течія рідини (газу), при якій уздовж потоку відбувається інтенсивне вихроутворення і змішування рідини (газу).

6.2. РІВНЯННЯ БЕРНУЛЛІ

Для стаціонарного ламінарного потоку рідини є дійсним **рівняння Бернуллі**:

$$p + \rho gh + \frac{\rho v^2}{2} = \text{const} ,$$

де p — статичний тиск;

ρgh — гідростатичний тиск;

$\frac{\rho v^2}{2}$ — динамічний тиск.

Питома потенціальна енергія:

$$p + \rho gh = \frac{W_{\text{п}}}{V} .$$

Питома кінетична енергія:

$$\rho \frac{v^2}{2} = \frac{W_{\text{к}}}{V} ,$$

де V — об'єм рідини.

Закон Бернуллі — це закон збереження механічної енергії ($F_{\text{тер}} = 0$): тиск рідини, що тече по трубі, більший там, де швидкість менша.

Рівняння Бернуллі для горизонтального стаціонарного ламінарного потоку рідини чи газу: **сума статичного і динамічного тиску є величина стала**:

$$p + \frac{\rho v^2}{2} = \text{const} .$$

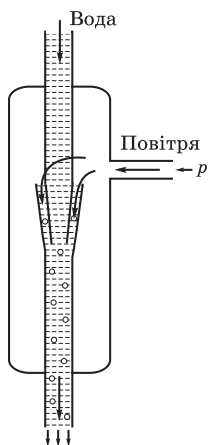


Рис. 105

На цьому ґрунтується всмоктувальна дія струменя (пульверизатори, карбюратори, водоструменевий насос).

Схема водоструменевого насоса показана на рис. 105.

Статичний тиск у струмені рідини або газу вимірюється за допомогою зонда (рис. 106).

Повний тиск вимірюється за допомогою трубки Піто (рис. 107).

За допомогою трубки Піто і зонда, приєднаних до двох колін манометра, визначають швидкість потоку (рис. 108):

$$\rho + \frac{\rho v^2}{2} = \text{const}.$$

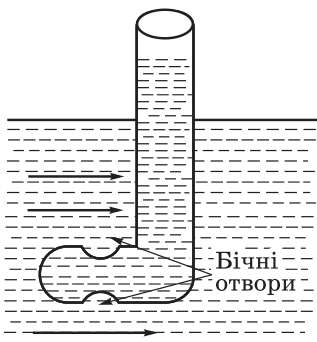


Рис. 106

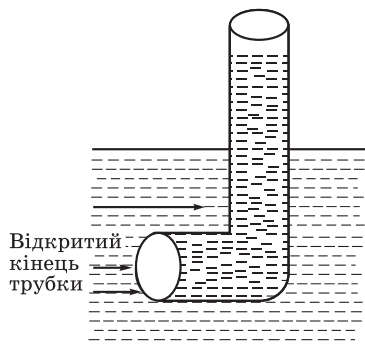


Рис. 107

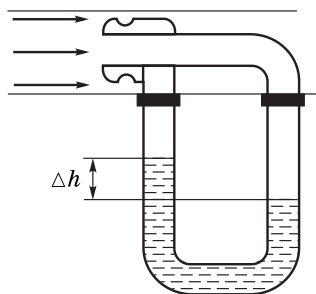


Рис. 108

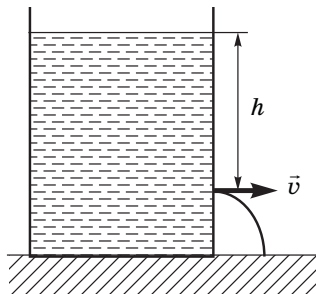


Рис. 109

Теорема Торричеллі: швидкість витікання струменя рідини з малого отвору великої посудини дорівнює швидкості вільного падіння з висоти рівня рідини в широкій посудині над отвором (рис. 109):

$$v = \sqrt{2gh}.$$

Внутрішнім тертям (в'язкістю) називається явище виникнення сил, які перешкоджають відносному переміщенню рідини або газу. Сили внутрішнього тертя напрямлені вздовж стичних шарів.

Опір при пересуванні тіла у в'язкому середовищі складається з опору тертя й опору перепаду тиску.

За **законом Стокса** визначають силу опору, що діє на кулю з радіусом r , яка повільно пересувається зі сталою швидкістю v :

$$F = 6\pi\eta rv,$$

де η — коефіцієнт внутрішнього тертя, або в'язкість.

У СІ одиниця в'язкості — $[\eta] = 1 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$.

Опір перепаду тиску визначається за формулою

$$F = c \frac{\rho}{2} v^2 S,$$

де c — коефіцієнт лобового тиску (безрозмірна величина);
 S — площа найбільшого поперечного перерізу тіла в напрямі, що є перпендикулярним до руху.

Швидкість v рівномірного падіння малої кульки радіусом r і густиною ρ у в'язкій рідині з густиною $\rho_{\text{рід}}$ і в'язкістю η обчислюється за формулою

$$v = \frac{2r^2 g (\rho - \rho_{\text{рід}})}{9\eta}.$$

Аеродинамічна сила ($\vec{F}_{\text{а.д}}$) — це сила, що діє на тіло в потоці й зумовлена перепадом тиску.

6.3. ПІДЙОМНА СИЛА КРИЛА ЛІТАКА

Профіль крила літака опуклий зверху і ввігнутий знизу (рис. 110).

Під час зіткнення потоків, які обтікають крило літака, біля задньої кромки крила літака виникає потужний вихор

проти годинникової стрілки (1). Цей вихор (за законом збереження моменту імпульсу) зумовлює виникнення вихору — циркуляції, що обтікає крило літака за годинниковою стрілкою (2) (рис. 111).

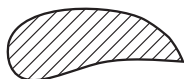


Рис. 110

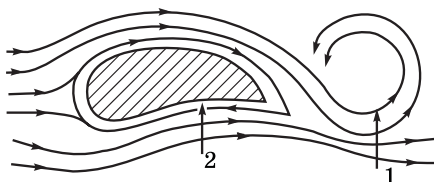


Рис. 111

Перепад тиску, що виникає, зумовлює аеродинамічну силу, направлену перпендикулярно до дотичної до нижньої площини крила.

Аеродинамічна сила розкладається на дві складові: підйомну силу і силу лобового опору (рис. 112).

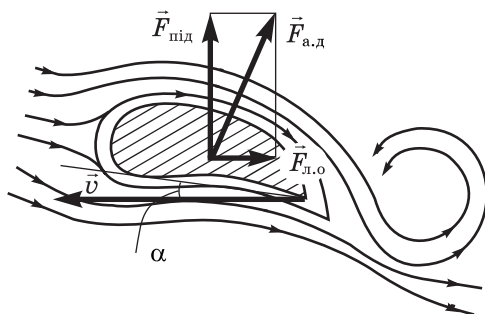


Рис. 112

Зміна **кута атаки** α і швидкості літака $\vec{v}$ зумовлює зміну аеродинамічної сили $\vec{F}_{а.д}$, а отже, $\vec{F}_{під}$ і $\vec{F}_{л.о}$.

На літак, який летить, діють чотири сили (рис. 113):

$$\vec{F}_{тяги} + \vec{F}_{під} + m\vec{g} + \vec{F}_{л.о} = 0.$$

Умови бриючого польоту:

$$F_{тяги} = F_{л.о}, \quad F_{під} = mg.$$

Аеродинамічний парадокс. Легка кулька «зависає» в похилому струмені повітря. Чому? В основному потоці швид-

кість більша. Це зумовлює аеродинамічну силу, напрямлену до центра потоку $\vec{F}_{\text{а.д}}$. За кулькою виникають повітряні вихори (тиск падає). Це зумовлює аеродинамічну силу $\vec{F}'_{\text{а.д}}$.

Кулька «зависає» — перебуває в стані рівноваги і не падає на землю, оскільки

$$\vec{F}_{\text{а.д}} + \vec{F}'_{\text{а.д}} + m\vec{g} = 0 \quad (\text{рис. 114}).$$

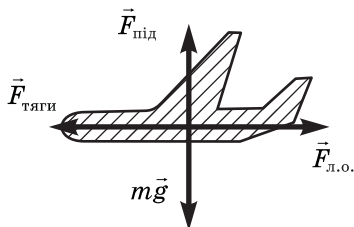


Рис. 113

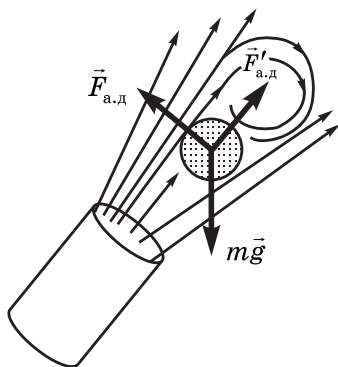


Рис. 114

6.4. КОЕФІЦІЄНТ ЛОБОВОГО ОПОРУ ДЛЯ ТІЛ РІЗНОЇ ФОРМИ (табл. 4)

Таблиця 4

	Круглий диск невеликої товщини, площа якого перпендикулярна до напрямку потоку	$c = 1$
	Куля	0,48
	Напівсфера, що рухається вперед своїм увігнутим боком	1,49
	Обтічне тіло	0,05

6.5. ПРИКЛАДИ РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧ

Задача 1.

По горизонтальній трубі А тече вода. На яку висоту підніметься вода через бічну трубку К, яку впаiano у вузьку частину В труби А діаметром 2 см і занурено в посудину з водою, якщо в широкій частині труби А діаметром 6 см швидкість води 30 см/с за тиску 1 атм?

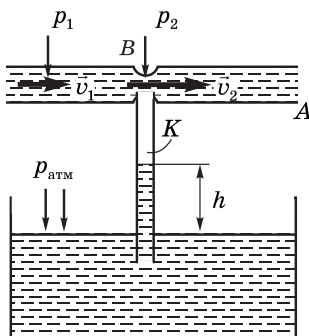


Рис. 115

Дано:

$$d_1 = 6 \text{ см}$$

$$d_2 = 2 \text{ см}$$

$$v_1 = 30 \text{ см/с}$$

$$p_{\text{атм}} = 1 \text{ атм}$$

$$\rho_{\text{в}} = 10^3 \text{ кг/м}^3$$

$$h = ?$$

СІ:

$$d_1 = 6 \cdot 10^{-2} \text{ м}$$

$$d_2 = 2 \cdot 10^{-2} \text{ м}$$

$$v_1 = 0,3 \text{ м/с}$$

$$p_{\text{атм}} = 10^5 \text{ Па}$$

$$\rho_{\text{в}} = 10^3 \text{ кг/м}^3$$

Розв'язання:

Рівняння нерозривності струменя дозволяє визначити швидкість води у вузькій частині трубки (рис. 115):

$$v_2 = v_1 \frac{S_1}{S_2}. \quad (1)$$

Розпишемо площі S_1 і S_2 :

$$S_1 = \frac{\pi d_1^2}{4}, \quad S_2 = \frac{\pi d_2^2}{4}, \quad \text{тоді} \quad \frac{S_1}{S_2} = \frac{d_1^2}{d_2^2}.$$

Підставивши відношення площ у формулу (1), дістанемо:

$$v_2 = v_1 \left(\frac{d_1}{d_2} \right)^2. \quad (2)$$

Із рівняння Бернуллі для горизонтального потоку

$$p_1 + \frac{\rho v_1^2}{2} = p_2 + \frac{\rho v_2^2}{2}$$

$$\text{отримаємо: } p_1 - p_2 = \frac{\rho}{2} (v_2^2 - v_1^2).$$

На рівні рідини в широкій посудині $p_{\text{атм}} = p_2 + \rho gh$.

$$\text{Звідси } h = \frac{p_{\text{атм}} - p_2}{\rho g}.$$

$$\text{Але } p_{\text{атм}} - p_2 = p_1 - p_2.$$

$$\text{Отже, } g = \frac{\rho(v_2^2 - v_1^2)}{2\rho g} = \frac{v_2^2 - v_1^2}{2g}.$$

Обчислення:

$$[v_2] = \frac{\text{м}}{\text{с}} \left(\frac{\text{м}}{\text{м}} \right)^2 = \frac{\text{м}}{\text{с}}, \quad [h] = \frac{\left(\frac{\text{м}}{\text{с}} \right)^2}{\frac{\text{м}}{\text{с}^2}} = \text{м},$$

$$\{v_2\} = 0,3 \cdot \left(\frac{6 \cdot 10^{-2}}{2 \cdot 10^{-2}} \right)^2 = 2,7,$$

$$\{h\} = \frac{2,7^2 - 0,3^2}{2 \cdot 9,8} \approx 0,36.$$

Відповідь: $h = 0,36$ м.

Задача 2.

Швидкість повітря можна виміряти приладом, зображеним на рис. 116. Яка швидкість повітря, якщо різниця рівнів води в манометрі $\Delta h = 65$ см?

Дано:

$$\Delta h = 0,65 \text{ м}$$

$$\rho_{\text{рід}} = 10^3 \text{ кг/м}^3$$

$$\rho_{\text{пов}} = 1,29 \text{ кг/м}^3$$

Розв'язання:

Тиск у правому коліні манометра, з'єднаному з трубою Піто, дорівнює повному тиску повітряного потоку, а в лівому — статичному, оскільки тиск вимірюється зондом.

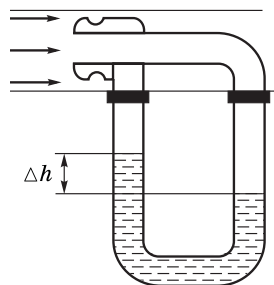


Рис. 116

v — ?

За законом Бернуллі

$$p_{\text{ст}} + \rho_{\text{пов}} \frac{v^2}{2} = p_{\text{повн}} ,$$

звідки

$$v = \sqrt{\frac{2(p_{\text{повн}} - p_{\text{ст}})}{\rho_{\text{пов}}}} = \sqrt{\frac{2\rho_{\text{рід}} g \Delta h}{\rho_{\text{пов}}}}$$

(тут ураховано, що $p_{\text{повн}} - p_{\text{ст}} = \rho_{\text{рід}} g \Delta h$).

$$v = \sqrt{\frac{2\rho_{\text{рід}} g \Delta h}{\rho_{\text{пов}}}} .$$

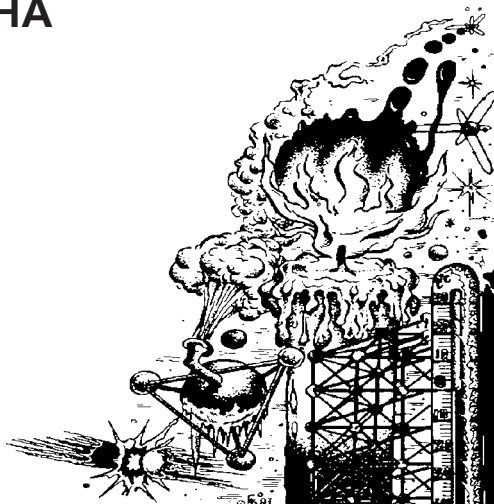
Обчислення:

$$[v] = \sqrt{\frac{\frac{\text{КГ}}{\text{М}^3} \cdot \frac{\text{М}}{\text{С}^2} \cdot \text{М}}{\frac{\text{КГ}}{\text{М}^3}}} = \frac{\text{М}}{\text{С}} ,$$

$$\{v\} = \sqrt{\frac{2 \cdot 10^3 \cdot 9,8 \cdot 0,65}{1,29}} = 99,4 .$$

Відповідь: $v = 99,4$ м/с.

МОЛЕКУЛЯРНА ФІЗИКА



1. ОСНОВИ МОЛЕКУЛЯРНО-КІНЕТИЧНОЇ ТЕОРІЇ БУДОВИ РЕЧОВИНИ

1.1. ОСНОВНІ ПОЛОЖЕННЯ МОЛЕКУЛЯРНО-КІНЕТИЧНОЇ ТЕОРІЇ ТА ЇХ ДОСЛІДНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ

Розділ фізики, у якому розглядаються закономірності атомно-молекулярної будови макроскопічних тіл (систем), називається **молекулярною фізикою**.

Основоположниками молекулярно-кінетичної теорії є **Демокріт** (V—IV ст. до н. е.), **М. В. Ломоносов** (XVIII ст.).

Основні положення молекулярно-кінетичної теорії:

I положення. Усі речовини складаються з молекул або інших структурних одиниць (атомів, іонів і електронів), розділених проміжками.

Доказом дискретної побудови речовини є фотографії, одержані за допомогою іонного, електронного і тунельного мікроскопів. Про наявність проміжків між молекулами свідчить зміна об'єму твердих тіл і рідини при змінюванні їхньої температури.

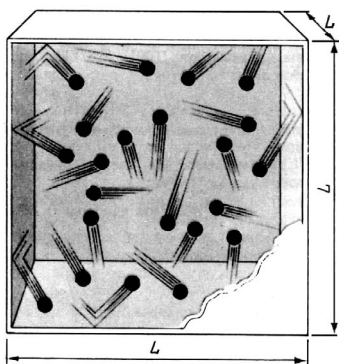
II положення. Молекули або інші структурні частинки перебувають у неперервному хаотичному русі. Підтвердженням

цього положення є явища дифузії, броунівського руху, осмосу (рис. 117, а).

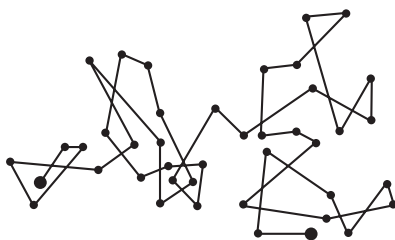
Дифузія — це процес перерозподілу концентрації атомів у просторі шляхом хаотичної, тобто теплової, міграції.

Осмос — одностороння дифузія.

Броунівський рух — хаотичний рух частинок твердого тіла, що зависли у рідині або в газі (рис. 117, б). Відкритий у 1827 р. англійським ботаніком **Р. Броуном**. Спостерігається в оптичний мікроскоп із збільшенням $\Gamma \approx 500$. Пояснюється поштовхами молекул, які оточують частинку, внаслідок їх неупорядкованого теплового руху.



а



б

Рис. 117

III положення. Молекули або атоми одночасно притягуються і відштовхуються, а рівнодія на цих сил називається силою молекулярної взаємодії. Доказом є виникнення пружних сил при деформації тіл, виникнення сил поверхневого натягу.

1.2. СИЛИ МОЛЕКУЛЯРНОЇ ВЗАЄМОДІЇ

Сили молекулярної взаємодії є силами притягання й відштовхування, залежать від відстані між молекулами і виникають унаслідок взаємодії електричних зарядів, які входять до їх складу. Ці сили є короткодійними.

1. ОСНОВИ МОЛЕКУЛЯРНО-КІНЕТИЧНОЇ ТЕОРІЇ БУДОВИ РЕЧОВИНИ

Графік залежності сили молекулярної взаємодії $F_{м.в}$ від відстані між молекулами для найпростіших молекул має такий вигляд (рис. 118).

Якщо $r = r_0 \approx d_m$ (d_m — діаметр молекули), молекули перебувають у рівновазі.

Якщо $r < r_0$, переважають сили відштовхування.

Якщо $10r_0 > r > r_0$, переважають сили притягання.

Якщо $r \approx 10r_0$, сили притягання мізерно малі, так що ними можна знехтувати. Отже, відстань дії молекулярних сил близько $\sim 10^{-9}$ м.

Найпростіші молекули — це одно-, триатомні молекули, які можна уявити як кульку певного діаметра $d_0 \approx 10^{-10}$ м.

Молекула — найменша стійка частинка речовини, яка зберігає її основні хімічні властивості. Вона складається з атомів однакових або різних хімічних елементів, наприклад H_2 , $NaCl$, $C_6H_{12}O_6$.

Сукупність молекул зберігає фізичні властивості речовини.

Речовина є те, із чого складається фізичне тіло.

Атом — найменша частинка речовини, яка не ділиться при хімічних реакціях, наприклад H , Na , Cl , C , O .

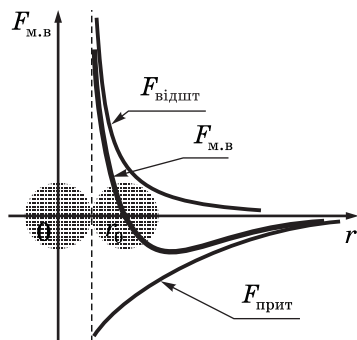


Рис. 118

1.3. МАСА АТОМІВ І МОЛЕКУЛ

Маси атомів і молекул прийнято порівнювати з 1/12 маси атома ізотопу Карбону $^{12}_6C$. Відносною молекулярною масою M_r називають відношення маси молекули m_0 до 1/12 маси атома Карбону m_{0c} (**атомної одиниці маси, а. о. м.**):

$$M_r = \frac{m_0}{\frac{1}{12} m_{0c}},$$

M_r — безрозмірна величина.

Маса молекули визначається за допомогою періодичної системи Менделєєва, де вказані відносні атомні маси речовин M_r .

1.4. МОЛЯРНА МАСА. КІЛЬКІСТЬ РЕЧОВИНИ

Один моль — кількість речовини, у якій міститься стільки ж молекул або атомів, скільки в Карбоні $^{12}_6\text{C}$ масою 0,012 кг.

Стала Авогадро (N_A) — число атомів або молекул в 1 молі будь-якої речовини:

$$N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}.$$

Згідно із **законом Авогадро** 1 моль ідеального газу займає за нормальних умов

$$(p_0 = 1,01 \cdot 10^5 \text{ Па}, T = 273 \text{ К})$$

об'єм

$$V_m = 22,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 \cdot \text{моль}^{-1}.$$

Кількість речовини (ν) дорівнює відношенню числа молекул (N) у даному тілі до сталої Авогадро (N_A), тобто до числа молекул в 1 молі речовини:

$$\nu = \frac{N}{N_A}.$$

Одиниця кількості речовини — 1 моль.

Маса одного моля речовини називається **молярною масою**:

$$M = m_0 N_A,$$

або

$$M = M_r \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{моль}}.$$

Одиниця молярної маси — 1 кг/моль.

Маса молекули (в кг) виражена через молярну масу:

$$m_0 = \frac{M}{N_A}.$$

1. ОСНОВИ МОЛЕКУЛЯРНО-КІНЕТИЧНОЇ ТЕОРІЇ БУДОВИ РЕЧОВИНИ

Маса тіла (в кг) виражена через масу однієї молекули і число молекул:

$$m = m_0 N.$$

Кількість речовини (в молях) дорівнює відношенню маси речовини до її молярної маси:

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

1.5. ІДЕАЛЬНИЙ ГАЗ. ОСНОВНЕ РІВНЯННЯ МОЛЕКУЛЯРНО-КІНЕТИЧНОЇ ТЕОРІЇ ІДЕАЛЬНОГО ГАЗУ (РІВНЯННЯ КЛАУЗІУСА)

Ідеальний газ — це газ, у якому середня відстань між молекулами набагато більша від розмірів молекул, і тому в ньому потенціальною енергією молекул нехтують (рис. 119).

Середня квадратична швидкість молекул ($\bar{v}_{\text{кв}}$) — це корінь квадратний із середнього квадрата швидкості:

$$\bar{v}_{\text{кв}} = \sqrt{\bar{v}^2}.$$

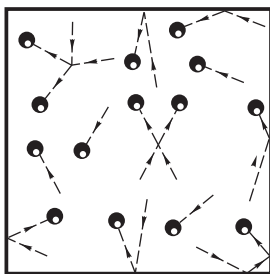


Рис. 119

Основне рівняння молекулярно-кінетичної теорії газу (рівняння Клаузіуса) зв'язує мікропараметри ($m_0, n, \bar{v}$) і макророботи (p, V, T):

$$p = \frac{1}{3} m_0 n \bar{v}^2,$$

де m_0 — маса молекули, n — концентрація молекул, $\bar{v}$ — середня квадратична швидкість руху молекул.

Якщо $\bar{E}_\kappa = \frac{m_0 \bar{v}^2}{2}$ — середня кінетична енергія поступального руху молекули, то основне рівняння молекулярно-кінетичної теорії (МКТ) можна записати у вигляді

$$p = \frac{2}{3} n \bar{E}_\kappa.$$

1.6. ТЕМПЕРАТУРА. ТЕРМОДИНАМІЧНА ШКАЛА ТЕМПЕРАТУР І ЇЇ ЗВ'ЯЗОК З ТЕМПЕРАТУРОЮ ЗА МІЖНАРОДНОЮ ШКАЛОЮ

Температура — це величина, яка характеризує теплову рівновагу системи. У всіх частинах системи, що перебуває в тепловій рівновазі, температура однакова.

У молекулярно-кінетичній теорії температура — це величина, зумовлена середньою кінетичною енергією частинок, із яких складається система:

$$\bar{E}_k = \frac{3}{2} kT \quad \text{— для одноатомних молекул,}$$

$$\bar{E}_k = \frac{5}{2} kT \quad \text{— для двоатомних молекул.}$$

$k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К — стала Больцмана, яка зв'язує температуру в енергетичних одиницях з температурою в кельвінах (T):

$$\theta = kT.$$

Основне рівняння МКТ, яке виражає залежність тиску газу (p) від концентрації молекул (n) і температури (T):

$$p = nkT.$$

Закон Авогадро: у рівних об'ємах газів при однакових температурах і тиску міститься однакова кількість молекул:

$$p = nkT, \quad n = \frac{N}{V}, \quad \text{отже,} \quad p = \frac{N}{V} kT.$$

Концентрація (n) дорівнює числу частинок в одиниці об'єму:

$$n = \frac{N}{V}, \quad [n] = \text{м}^{-3}.$$

Температура вимірюється рідинними або газовими термометрами, відповідним чином градуйованими. Висока температура вимірюється оптичними термометрами (за спектром випромінювання) або електричними (напівпровідникові термістори, термопари).

У міжнародній шкалі температур за нуль прийнято температуру танення льоду при нормальному атмосферному тиску, за 100°C — температуру пари киплячої води при нор-

1. ОСНОВИ МОЛЕКУЛЯРНО-КІНЕТИЧНОЇ ТЕОРІЇ БУДОВИ РЕЧОВИНИ

мальному атмосферному тиску. $1/100$ цього інтервалу — це 1°C (Цельсія). Позначається $t^\circ\text{C}$.

У **термодинамічній шкалі температур** за нуль прийнята температура, при якій припинився б тепловий рух частинок, із яких складається тіло.

Ця температура називається **абсолютним нулем температур**. Одиниця термодинамічної шкали температур у системі СІ — кельвін (К). Позначається Т ($1\text{ К} = 1^\circ\text{C}$) (рис. 120).

Формула зв'язку термодинамічної температури (Т) і температури за міжнародною шкалою температур:

$$T = (273,15 + t) \text{ К}.$$

За міжнародною шкалою **абсолютний нуль** відповідає температурі $-273,15^\circ\text{C}$.

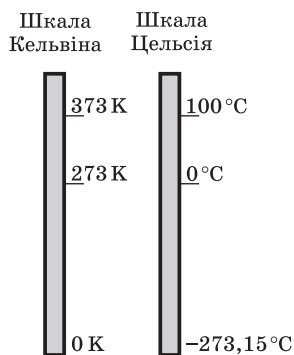


Рис. 120

1.7. СЕРЕДНЯ ШВИДКІСТЬ ТЕПЛОВОГО РУХУ ОДНОАТОМНИХ МОЛЕКУЛ. ДОСЛІД ШТЕРНА

Середня швидкість теплового руху одноатомних молекул:

$$\bar{v} = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}} = \sqrt{\frac{3RT}{M}},$$

$R = 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{К} \cdot \text{моль}}$ — **універсальна газова стала**, що дорівнює добутку сталої Больцмана і сталої Авогадро:

$$R = k \cdot N_A.$$

Дослід Штерна (1920) дає змогу визначити середню швидкість руху молекул експериментально за формулою

$$\bar{v} = \frac{2\pi n(R_B - R_A)R_B}{S},$$

де n — частота обертання циліндрів;

R_B — радіус більшого циліндра;
 R_A — радіус меншого циліндра;
 S — ширина розмитості смуги срібла.

1.8. ПРИКЛАДИ РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧ

Задача 1.

У посудині міститься суміш азоту і водню. При температурі T , коли азот повністю дисоційований на атоми, тиск дорівнює p (дисоціацією водню знехтувати). При температурі $3T$, коли обидва гази дисоційовані, тиск у посудині дорівнює $4p$. Яке відношення мас водню й азоту в суміші?

Дано:

$$M(N_2) = 28 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$$

$$M(H_2) = 2 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$$

$$M(N) = 14 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$$

$$M(H) = 1 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$$

$$p_1 = p_2$$

$$T_1 = T$$

$$T_2 = 3T$$

$$p_2 = 4p$$

$$\frac{m_{\text{азоту}}}{m_{\text{водню}}} \text{ — ?}$$

Розв'язання:

Тиск суміші дорівнює сумі парціальних тисків азоту та водню згідно із законом Дальтона:

$$p_1 = p_{1a} + p_{1b}.$$

Запишемо рівняння Клапейрона — Менделєєва для кожного газу:

$$p_{1a} V = \frac{m_a}{M(N)} \cdot RT_1,$$

$$p_{1b} V = \frac{m_b}{M(H_2)} \cdot RT_1.$$

Виразимо p_{1a} і p_{1b} :

$$p_{1a} = \frac{m_a RT_1}{M(N)V}, \quad p_{1b} = \frac{m_b RT_1}{M(H_2)V}.$$

Підставимо значення p_{1a} і p_{1b} у закон Дальтона:

$$p_1 = \frac{RT_1}{V} \left(\frac{m_a}{M(N)} + \frac{m_b}{M(H_2)} \right). \quad (1)$$

Якщо T_2 , коли обидва гази дисоційовані, їх тиск можна подати у вигляді:

$$p_2 = \frac{RT_2}{V} \left(\frac{m_a}{M(N)} + \frac{m_b}{M(H)} \right). \quad (2)$$

2. ВЛАСТИВОСТІ ГАЗІВ (ГАЗОВІ ЗАКОНИ)

Спростимо вирази (1) і (2) підстановкою значень і знайдемо відношення маси азоту до маси водню:

$$4 \left(\frac{m_a}{M(\text{N})} + \frac{m_b}{M(\text{H}_2)} \right) = 3 \left(\frac{m_a}{M(\text{N})} + \frac{m_b}{M(\text{H})} \right),$$

$$M(\text{H}_2) = 2M(\text{H}),$$

$$4 \frac{m_a}{M(\text{N})} + 4 \frac{m_b}{2M(\text{H})} = 3 \frac{m_a}{M(\text{N})} + 3 \frac{m_b}{M(\text{H})},$$

$$\frac{m_a}{M(\text{N})} = \frac{m_b}{M(\text{H})}.$$

$$\text{Отже, } \frac{m_a}{m_b} = \frac{M(\text{N})}{M(\text{H})}.$$

Обчислення:

$$\left\{ \frac{m_a}{m_b} \right\} = \frac{14}{1} = 14.$$

Відповідь: маса азоту в 14 разів більша за масу водню.

2. ВЛАСТИВОСТІ ГАЗІВ (ГАЗОВІ ЗАКОНИ)

- Гази не зберігають ні форми, ні об'єму.
- Характер молекулярного руху в газах — безладний (хаотичний) рух.

2.1. РІВНЯННЯ СТАНУ ІДЕАЛЬНОГО ГАЗУ (РІВНЯННЯ КЛАПЕЙРОНА—МЕНДЕЛЄЄВА)

Рівняння стану ідеального газу зв'язує макроскопічні параметри p , V , T , які характеризують стан даної маси тіла.

Рівняння стану ідеального газу (**рівняння Клапейрона—Менделєєва**), яке зв'язує макропараметри одного стану газу:

$$pV = \frac{m}{M} RT, \text{ або } pV = \nu RT.$$

Рівняння стану ідеального газу (**рівняння Клапейрона**), яке зв'язує макроскопічні стани системи даної маси газу при переході із стану 1 у стан 2:

$$(p_1, V_1, T_1) \xrightarrow{m = \text{const}} (p_2, V_2, T_2),$$

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}.$$

2.2. ГАЗОВІ ЗАКОНИ

Газові закони визначають кількісну залежність між двома параметрами даної маси газу при фіксованому значенні третього параметру.

Процеси, перебіг яких відбувається при незмінному значенні одного із параметрів, називаються **ізопроцесами**.

2.2.1. ЗАКОН БОЙЛЯ—МАРІОТТА (ІЗОТЕРМІЧНИЙ ПРОЦЕС)

$$T = \text{const}, \Delta T = 0, m = \text{const}.$$

Ізотермічний процес описується законом **Бойля—Маріотта**: для даної маси газу добуток тиску газу на його об'єм є сталим, якщо температура газу не змінюється:

$$p_1 V_1 = p_2 V_2, \text{ або } pV = \text{const}.$$

Ізотерма — графік залежності між параметрами даної маси газу при постійній температурі (рис. 121).

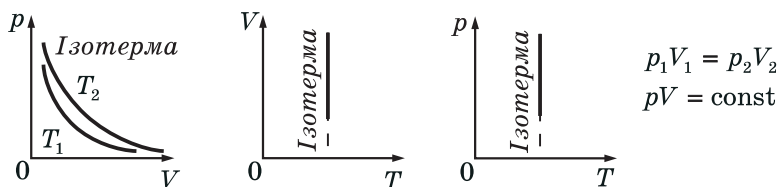


Рис. 121

Ізотермічний процес проходить повільно, оскільки він зумовлений теплообміном з навколишнім середовищем.

2.2.2. ЗАКОН ГЕЙ-ЛЮССАКА (ІЗОБАРНИЙ ПРОЦЕС)

$$p = \text{const}, \Delta p = 0, m = \text{const}.$$

Ізобарний процес описується **законом Гей-Люссака**: для даної маси газу відношення об'єму і температури є сталим, якщо тиск газу не змінюється:

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}, \text{ або } \frac{V}{T} = \text{const}.$$

Закон Гей-Люссака можна подати у вигляді

$$V = V_0(1 + \beta t), \text{ або } \frac{\Delta V}{V_0} = \beta \Delta T,$$

де t — температура за міжнародною шкалою;

V_0 — об'єм при 0°C ;

β — коефіцієнт об'ємного розширення газу;

$\beta = \frac{1}{273} \text{ K}^{-1}$ — при сталому тиску для ідеального газу.

Ізобара — графік залежності між параметрами стану даної маси газу при сталому тиску (рис. 122, 123).

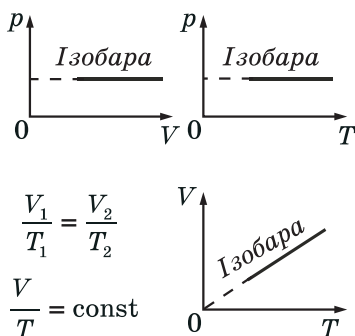


Рис. 122

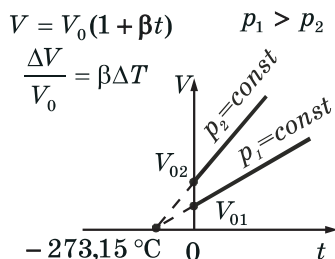


Рис. 123

2.2.3. ЗАКОН ШАРЛЯ (ІЗОХОРНИЙ ПРОЦЕС)

$$V = \text{const}, \Delta V = 0, m = \text{const}.$$

Ізохорний процес описується **законом Шарля**: для даної маси газу відношення тиску до температури є сталим, якщо об'єм не змінюється:

$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}, \text{ або } \frac{P}{T} = \text{const}.$$

Закон Шарля можна подати у вигляді

$$p = p_0(1 + \gamma t), \text{ або } \frac{\Delta p}{p_0} = \gamma \Delta T,$$

де p — тиск газу при температурі t ;

p_0 — тиск газу при температурі 0°C ;

γ — термічний коефіцієнт тиску;

для всіх газів $\gamma = \frac{1}{273} \text{ K}^{-1}$.

Ізохора — графік залежності між параметрами стану даної маси газу при сталому об'ємі (рис. 124; 125).

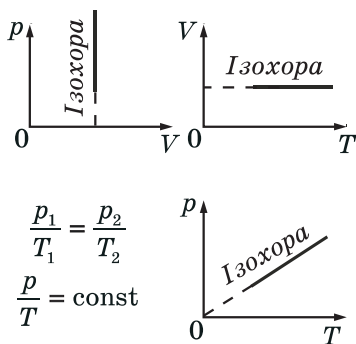


Рис. 124

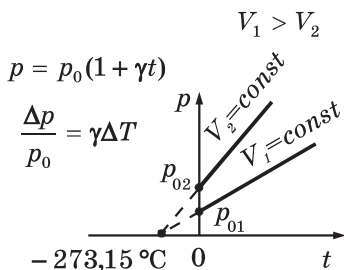


Рис. 125

2.3. ЗАКОН ДАЛЬТОНА

Закон Дальтона: тиск суміші газів дорівнює сумі парціальних тисків складових газів:

$$p = p_1 + p_2 + \dots + p_n.$$

Парціальний тиск — це тиск, який створював би газ, якби він займав даний об'єм сам.

2.4. РОЗПОДІЛ МОЛЕКУЛ ІДЕАЛЬНОГО ГАЗУ ЗА ШВИДКОСТЯМИ (РОЗПОДІЛ МАКСВЕЛЛА)

Розподіл молекул ідеального газу за швидкостями зображено на рис. 126.

$\frac{\Delta N}{N}$ — частка молекул, модуль швидкості яких міститься в інтервалі від v до $v + \Delta v$.

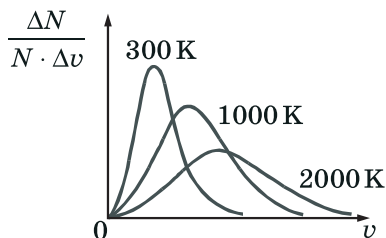


Рис. 126

2.5. СЕРЕДНЯ ДОВЖИНА ВІЛЬНОГО ПРОБІГУ МОЛЕКУЛ

Середня довжина вільного пробігу молекул — середня відстань між двома послідовними зіткненнями молекул:

$$\bar{l} = \frac{1}{\sqrt{2} \pi d^2 n} = \frac{kT}{\sqrt{2} p \pi d^2},$$

де $p = nkT$;

d — ефективний діаметр молекули (мінімальна відстань, на яку зближуються центри двох молекул при їх зіткненні);

n — концентрація молекул.

2.6. ПРИКЛАДИ РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧ

Задача 1.

Для деякої маси газу залежність тиску від температури має такий вигляд, як на рис. 127, а. Як змінюється об'єм газу?

Розв'язання:

Виконуємо додаткові побудови (рис. 127, б).

Проводимо дві ізохори через точку 1 ($V_1 = \text{const}$) і точку 2 ($V_2 = \text{const}$) і одну ізотерму, яка перетинає дві ізохори. Точки перетину ізохор з ізотермою дають можливість визначити графічно p_1 і p_2 .

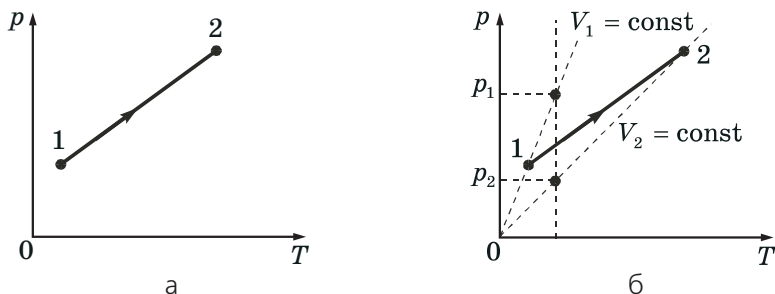
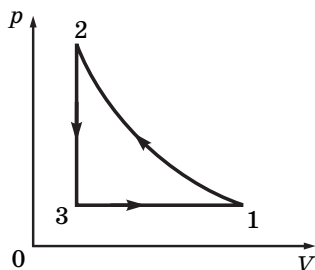


Рис. 127

Застосовуємо закон Бойля—Маріотта:

$$p_1 V_1 = p_2 V_2, \text{ якщо } T = \text{const}, m = \text{const}.$$

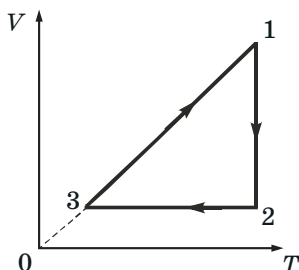
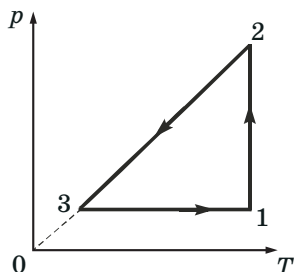
Із графіка видно, що $p_1 > p_2$, отже, $V_1 < V_2$, тобто об'єм збільшується.



Задача 2.

Дано графік циклу $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3$ для ідеального газу даної маси в координатах p, V . Побудувати графік у координатах p, T і V, T .

Розв'язання:



Задача 3.

За скільки помахів поршневого насоса ємністю V_0 можна відкачати газ у скляному балоні ємністю V до тиску p ,

якщо спочатку тиск у балоні дорівнював атмосферному p_0 ?
Процес ізотермічний.

Дано:	<i>Розв'язання:</i>
V_0	У балоні газ у стані p_0, V . При підключенні насоса — об'єм $(V_0 + V)$, тиск p . За законом Бойля—Маріотта після першого помаху
V	
p_0	
p	
$T = \text{const}$	
n — ?	$p_0 V = p_1 (V_0 + V).$

$$\text{Звідси } p_1 = \frac{p_0 V}{V_0 + V}.$$

$$\text{Після другого помаху } p_1 V = p_2 (V_0 + V).$$

$$\text{Звідси } p_2 = \frac{p_1 V}{V + V_0} = \frac{p_0 V^2}{(V + V_0)^2} = p_0 \left(\frac{V}{V + V_0} \right)^2.$$

$$\text{Після } n \text{ помахів } p_n = p_0 \left(\frac{V}{V + V_0} \right)^n.$$

$$\text{Прологарифмуємо вираз: } \lg \frac{p_n}{p_0} = n \lg \left(\frac{V}{V + V_0} \right).$$

$$\text{Звідси } n = \frac{\lg \frac{p_n}{p_0}}{\lg \left(\frac{V}{V + V_0} \right)}.$$

$$\text{Відповідь: } n = \frac{\lg \frac{p_n}{p_0}}{\lg \left(\frac{V}{V + V_0} \right)}.$$

Задача 4.

Компресор засмоктує з атмосфери щосекунди 4 л повітря, які подаються в балон ємністю 120 л. Через який час тиск у балоні буде перевищувати атмосферний у 9 разів? Початковий тиск у балоні дорівнює атмосферному.

Дано:

$$V = 120 \text{ л}$$

$$\frac{\Delta V_0}{\Delta t} = 4 \text{ л/с}$$

$$\frac{p}{p_0} = 9$$

$$p_0 = p_{\text{атм}}$$

$$p_0 = p_{\text{атм}}$$

$$\Delta t = 1 \text{ с}$$

$$t = ?$$

СІ:

$$V = 0,12 \text{ м}^3$$

$$\frac{\Delta V_0}{\Delta t} = 4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$$

$$\frac{p}{p_0} = 9$$

$$p_0$$

$$p_0 = p_{\text{атм}}$$

$$\Delta t = 1 \text{ с}$$

Розв'язання:

Процес ізотермічний, застосовуємо закон Бойля—Мариотта. Об'єм повітря при тиску p_0 дорівнює $\left(V + t \frac{\Delta V_0}{\Delta t} \right)$.

Це саме повітря в балоні V має тиск p :

$$p_0 \left(V + t \frac{\Delta V_0}{\Delta t} \right) = pV.$$

$$V \left(\frac{p}{p_0} - 1 \right) \Delta t$$

Виразимо t :
$$t = \frac{V \left(\frac{p}{p_0} - 1 \right) \Delta t}{\Delta V_0}.$$

Обчислення:

$$[t] = \frac{\text{м}^3 \cdot \text{Па} \cdot \text{с}}{\text{м}^3 \cdot \text{Па}} = \text{с}, \quad \{t\} = \frac{0,12 \cdot (9-1) \cdot 1}{4 \cdot 10^{-3}} = 240.$$

Відповідь: $t = 4 \text{ хв}$.

Задача 5.

У трубці, закритій з одного кінця, стовпчик повітря замкнтий стовпчиком ртуті завдовжки $h = 20 \text{ см}$. Коли трубка розміщена відкритим кінцем униз, довжина стовпчика повітря дорівнює $l_1 = 10 \text{ см}$. Якщо ж трубку нахилити під кутом $\alpha = 30^\circ$ до горизонту отвором униз, довжина повітряного стовп-

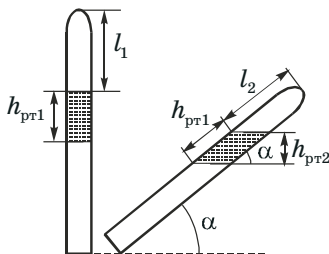


Рис. 128

чика дорівнюватиме $l_2 = 8,46$ см. Визначити атмосферний тиск (рис. 128).

Дано:	СІ:
$\rho_{\text{рт}} = 13\,600 \text{ кг/м}^3$	$\rho_{\text{рт}} = 13,6 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$
$h_{\text{рт}1} = 20 \text{ см}$	$h_{\text{рт}1} = 0,2 \text{ м}$
$l_1 = 10 \text{ см}$	$l_1 = 0,1 \text{ м}$
$l_2 = 8,46 \text{ см}$	$l_2 = 8,46 \cdot 10^{-2} \text{ м}$
$\alpha = 30^\circ$	$\alpha = 30^\circ$
$p_{\text{атм}} \text{ — ?}$	

Розв'язання:

Процес ізотермічний, $m = \text{const}$.

Застосовуємо закон Бойля—Маріотта:

$$p_1 V_1 = p_2 V_2, \\ V_1 = S l_1, \quad V_2 = S l_2, \quad p_1 S l_1 = p_2 S l_2 \Rightarrow p_1 l_1 = p_2 l_2. \quad (1)$$

Визначимо p_1 і p_2 :

$$p_1 + \rho_{\text{рт}} g h_{\text{рт}1} = p_{\text{атм}} \Rightarrow p_1 = p_{\text{атм}} - \rho_{\text{рт}} g h_{\text{рт}1},$$

$$p_2 + \rho_{\text{рт}} g h_{\text{рт}2} = p_{\text{атм}} \Rightarrow p_2 = p_{\text{атм}} - \rho_{\text{рт}} g h_{\text{рт}2}.$$

Підставимо значення p_1 і p_2 в (1):

$$(p_{\text{атм}} - \rho_{\text{рт}} g h_{\text{рт}1}) l_1 = (p_{\text{атм}} - \rho_{\text{рт}} g h_{\text{рт}2}) l_2,$$

$$h_{\text{рт}2} = h_{\text{рт}1} \cdot \sin \alpha,$$

$$(p_{\text{атм}} - \rho_{\text{рт}} g h_{\text{рт}1}) l_1 = (p_{\text{атм}} - \rho_{\text{рт}} g h_{\text{рт}1} \cdot \sin \alpha) l_2.$$

$$\text{Звідки } p_{\text{атм}} = \frac{\rho_{\text{рт}} g h_{\text{рт}1} (l_1 - l_2 \sin \alpha)}{l_1 - l_2}.$$

Обчислення:

$$[p_{\text{атм}}] = \frac{\text{кг} \cdot \text{м} \cdot \text{м} \cdot \text{м}}{\text{м}^3 \cdot \text{с}^2 \cdot \text{м}} = \text{Па},$$

$$\{p_{\text{атм}}\} = \frac{13\,600 \cdot 9,8 \cdot 0,2 \cdot \left(0,1 - 0,0846 \cdot \frac{1}{2}\right)}{(0,1 - 0,0846)} = 10^5.$$

Відповідь: $p_{\text{атм}} = 100 \text{ кПа}$.

Задача 6.

Із даною кількістю ідеального газу проводять коловий процес (цикл), зображений на діаграмі у вигляді кола. На якій ділянці циклу тиск газу збільшується, а на якій — зменшується (рис. 129)?

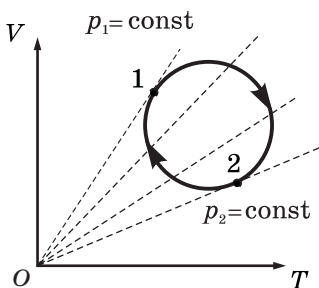


Рис. 129

Розв'язання:

Проведемо ряд ізобар через коловий процес. Оскільки нахил ізобар тим більший, чим менший тиск газу (це витікає із $p = \text{const}$ ізобарного процесу), то $p_1 < p_2$. Таким чином, на ділянці циклу $1 \rightarrow 2$ тиск газу збільшується, а на ділянці $2 \rightarrow 1$ — зменшується.

Задача 7.

У повітряній кулі об'ємом 1400 м^3 міститься водень при температурі 7°C і тиску 720 мм рт. ст. Визначити силу тяжіння цього водню.

Дано:

$$V = 1400 \text{ м}^3$$

$$T = (7 + 273) \text{ К} = 280 \text{ К}$$

$$p = 720 \text{ мм рт. ст.}$$

$$M(\text{H}_2) = 2 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$$

$$R = 8,31 \frac{\text{Дж}}{(\text{К} \cdot \text{моль})}$$

$$g = 9,8 \text{ м/с}^2$$

$$mg = ?$$

СІ:

$$V = 1,4 \cdot 10^3 \text{ м}^3$$

$$T = (7 + 273) \text{ К} = 280 \text{ К}$$

$$p \approx 9,6 \cdot 10^4 \text{ Па}$$

$$M(\text{H}_2) = 2 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$$

$$R = 8,31 \frac{\text{Дж}}{(\text{К} \cdot \text{моль})}$$

$$g = 9,8 \text{ м/с}^2$$

Розв'язання:

Рівняння Клапейрона—Менделєєва:

$$pV = \frac{m}{M} RT, \quad m = \frac{pVM}{RT},$$

$$\text{тоді } mg = \frac{pVMg}{RT}.$$

Обчислення:

$$[mg] = \frac{\text{Па} \cdot \text{м}^3 \cdot \text{кг} \cdot \text{К} \cdot \text{моль} \cdot \text{м}}{\text{Дж} \cdot \text{моль} \cdot \text{с}^2 \cdot \text{К}} = \text{Н},$$

$$\{mg\} = \frac{9,6 \cdot 10^4 \cdot 1400 \cdot 2 \cdot 10^{-3} \cdot 9,8}{8,31 \cdot 280} = 1132.$$

Відповідь: $mg = 1,13$ кН.**Задача 8.**

У циліндричній посудині з площею основи 250 см^2 міститься 10 г азоту, стисненого поршнем, на якому лежить ги́ря масою $12,5 \text{ кг}$. Визначити роботу газу при його нагріванні від 25 до 625°C . Атмосферний тиск 760 мм рт. ст. Чи залежить робота від маси ги́рі?

Дано:

$$S = 250 \text{ см}^2$$

$$m = 10 \text{ г}$$

$$m_1 = 12,5 \text{ кг}$$

$$t_1 = 25^\circ\text{C}$$

$$t_2 = 625^\circ\text{C}$$

$$p_0 = 760 \text{ мм рт. ст.}$$

$$M(\text{N}_2) = 28 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$$

А — ?

СІ:

$$S = 250 \cdot 0,0001 \text{ м}^2 = 2,5 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2$$

$$m = 10 \cdot 0,001 \text{ кг} = 10^{-2} \text{ кг}$$

$$m_1 = 12,5 \text{ кг}$$

$$T_1 = (273 + 25) \text{ К} = 298 \text{ К}$$

$$T_2 = (273 + 625) \text{ К} = 898 \text{ К}$$

$$p_0 = 760 \cdot 133,3 \text{ Па} = 10^5 \text{ Па}$$

$$M(\text{N}_2) = 28 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$$

Розв'язання:

$A = p\Delta V$, оскільки процес ізобарний.

$$\text{Знайдемо } p: p = p_{\text{атм}} + \frac{m_1 g}{S}.$$

За рівнянням Клапейрона—Менделєєва визначимо V_1 , V_2 , $V_2 - V_1$:

$$pV_1 = \frac{m}{M}RT_1 \Rightarrow V_1 = \frac{mRT_1}{Mp}, \quad pV_2 = \frac{m}{M}RT_2 \Rightarrow V_2 = \frac{mRT_2}{Mp}.$$

Тоді

$$A = \frac{mR}{Mp}(T_2 - T_1)p = \frac{mR}{M}(T_2 - T_1),$$

$$A = \frac{mR}{M}(T_2 - T_1).$$

Робота не залежить від маси гирі й від площі основи посудини.

Обчислення:

$$[A] = \frac{\text{кг} \cdot \text{моль} \cdot \text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К} \cdot \text{моль}} = \text{Дж},$$

$$\{A\} = \frac{10^{-2} \cdot 8,31 \cdot (898 - 298)}{28 \cdot 10^{-3}} = 1780.$$

Відповідь: $A = 1,78 \text{ кДж}$.

Задача 9.

Після того як у кімнаті протопили піч, температура підвищилася з 15 до 27 °С. На скільки процентів зменшилось число молекул у кімнаті?

Дано:

$$t_1 = 15^\circ \text{C}$$

$$t_2 = 27^\circ \text{C}$$

$$p_1 = p_2 = p$$

$$\frac{\Delta N}{N_1} \cdot 100\% \text{ — ?}$$

СІ:

$$T_1 = (273 + 15) \text{ К} = 288 \text{ К}$$

$$T_2 = (273 + 27) \text{ К} = 300 \text{ К}$$

Розв'язання:

$$p = nkT, \quad \left. \begin{array}{l} p = n_1 k T_1 \\ p = n_2 k T_2 \end{array} \right\} \text{ тиск газу сталий;}$$

$$n_1 = \frac{N_1}{V}, \quad n_2 = \frac{N_2}{V}, \quad p = \frac{N_1}{V} k T_1, \quad p = \frac{N_2}{V} k T_2,$$

$$N_1 = \frac{pV}{kT_1}, \quad N_2 = \frac{pV}{kT_2},$$

$$\frac{\Delta N}{N_1} = \frac{N_1 - N_2}{N_1} = \frac{\frac{pV}{kT_1} - \frac{pV}{kT_2}}{\frac{pV}{kT_1}} = \frac{\frac{pV}{k} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right)}{\frac{pV}{k} \cdot \frac{1}{T_1}} = \frac{T_2 - T_1}{T_2},$$

$$\frac{\Delta N}{N_1} \cdot 100\% = \frac{T_2 - T_1}{T_2} \cdot 100\%.$$

Обчислення:

$$\frac{\Delta N}{N_1} \cdot 100 \% = \frac{(300 - 288) \text{ К}}{300 \text{ К}} \cdot 100 \% = 4 \% .$$

Відповідь: $\frac{\Delta N}{N_1} \cdot 100 \% = 4 \% .$

Задача 10.

Процеси, зображені на рис. 130, ізохорні. Поясніть їх.

Аналіз і розв'язання:

На графіку 1 — ізохорний процес ($V = \text{const}$). На графіку 2 показано, що при нагріванні тиск не змінюється ($p = \text{const}$), що може бути лише при витіканні газу, яке компенсує зростання тиску, зумовлене нагріванням. На графіку 3 витікання газу спричиняє падіння тиску.

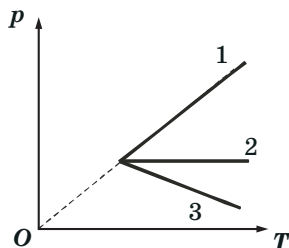


Рис. 130

3. ВЛАСТИВОСТІ ПАРИ

3.1. ПАРА. ВИПАРОВУВАННЯ І КОНДЕНСАЦІЯ

Пара — це газоподібний стан речовини, у який можуть переходити як рідини (**випаровування**) (рис. 131), так і тверді тіла (**сублімація**).

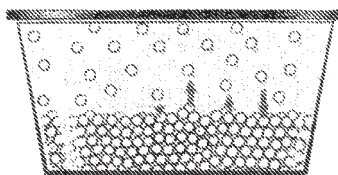


Рис. 131

Випаровування — процес перетворення рідини на пару. Відбувається при будь-якій температурі. Рідина при випаровуванні охолоджується, оскільки її покидають «найшвидкіші» молекули, які розташовані ближче до поверхневого шару. Значна частина кінетичної енергії руху молекул витрачається на роботу виходу ($E_k > A_{\text{вих}}$).

Для того щоб температура рідини при випаровуванні не знижувалась, до неї треба підводити тепло.

Швидкість випаровування залежить від:

- 1) виду рідини;
- 2) температури рідини;
- 3) площі вільної поверхні;
- 4) наявності вітру.

Конденсація — процес перетворення пари на рідину.

3.2. НАСИЧЕНА І НЕНАСИЧЕНА ПАРА

Пара, яка перебуває в динамічній (рухомій) рівновазі із своєю рідиною, називається **насиченою парою**.

Динамічна рівновага настає тоді, коли швидкість паротворення стає однаковою зі швидкістю конденсації. Якщо випаровування переважає над конденсацією — пара ненасичена.

Графік залежності тиску від температури для насиченої і ненасиченої пари зображений на рис. 132, а.

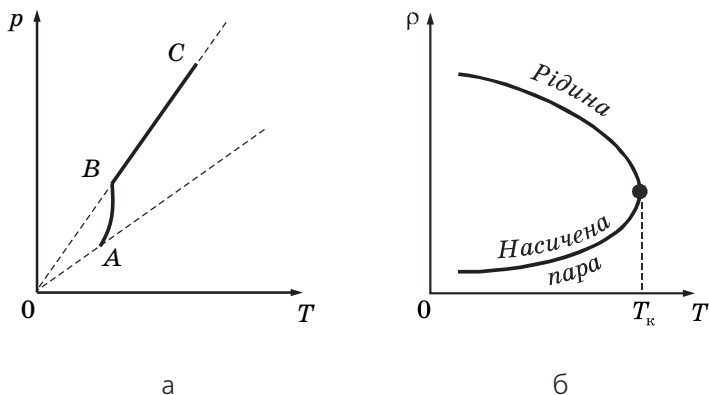


Рис. 132

AB — насичена пара; залежність p від T нелінійна, оскільки від T залежить концентрація молекул насиченої пари.

BC — ненасичена пара, або ідеальний газ;

$$p \sim T(p = nkT).$$

Графік залежності густини рідини і її насиченої пари від температури зображений на рис. 132, б.

Криві зливаються, якщо $T = T_k$, де T_k — критична температура.

3.3. ВОЛОГІСТЬ ПОВІТРЯ (ВІДНОСНА Й АБСОЛЮТНА). ТОЧКА РОСИ

Вологість повітря характеризує кількість водяної пари в повітрі. Розрізняють абсолютну і відносну вологість.

Абсолютна вологість — це парціальний тиск водяної пари (p), наявної в повітрі при даній температурі (або густина водяної пари ρ).

Відносна вологість (φ) показує, наскільки близька водяна пара до насиченості. Відносна вологість вимірюється в процентах і може бути визначена за формулами:

$$\varphi = \frac{p}{p_n} \cdot 100\% \quad \text{або} \quad \varphi = \frac{\rho}{\rho_n} \cdot 100\%.$$

Відносна вологість — це відношення абсолютної вологості до густини ρ_n або тиску p_n насиченої пари при даній температурі.

Найбільш сприятливі умови для життєдіяльності людини — при відносній вологості повітря 40—60%.

При охолодженні повітря з'являється туман, випадає роса ($\varphi = 100\%$).

Точкою роси називається та температура, при якій дана водяна пара стає насиченою. Точка роси характеризує вологість повітря (рис. 133, а).

Психрометр (рис. 133, а) разом з психрометричною таблицею (табл. 5)

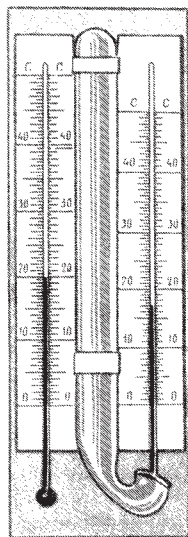


Рис. 133, а

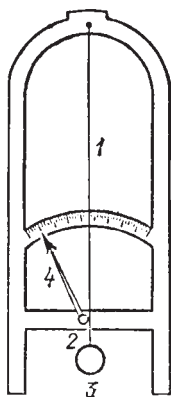


Рис. 133, б

і **гігрометр** — прилади для вимірювання відносної вологості повітря. Психрометр складається з двох термометрів, один із яких зволожується. За психрометричною таблицею за показаннями сухого термометра і різницею температур сухого та вологого термометрів визначають відносну вологість повітря. У найпростішому (волосному) гігрометрі використана властивість знежиреної людської волосини видовжуватись при збільшенні вологості повітря. Застосовують також гігрометри, за допомогою яких визначається точка роси (1 — волосина, 2 — ролик, 3 — тягар, 4 — стрілка) (рис. 133, б).

Таблиця 5

Показання сухого тер- мометра, °C	Різниця показань сухого та вологого термометрів, °C											
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
	Відносна вологість, %											
0	100	81	63	45	28	11	—	—	—	—	—	
2	100	84	68	51	35	20	—	—	—	—	—	
4	100	85	70	56	42	28	14	—	—	—	—	
6	100	86	73	60	47	35	23	10	—	—	—	
8	100	87	75	63	51	40	29	18	7	—	—	
10	100	88	76	65	54	44	34	24	14	4	—	
12	100	89	78	68	57	48	38	29	20	11	—	
14	100	90	79	70	60	51	42	34	25	17	9	
16	100	90	81	71	62	54	45	37	30	22	15	
18	100	91	82	73	65	56	49	41	34	27	20	
20	100	91	83	74	66	59	51	44	37	30	24	
22	100	92	83	76	68	61	54	47	40	34	28	
24	100	92	84	77	69	62	56	49	43	37	31	
26	100	92	85	78	71	64	58	51	46	40	34	
28	100	93	85	78	72	65	59	53	48	42	37	
30	100	93	86	79	73	67	61	55	50	44	39	

3.4. КИПІННЯ. ПЕРЕГРІТА РІДИНА

Кипінням називається процес швидкого утворення і збільшення бульбашок насиченої пари, які прориваються крізь вільну поверхню.

Або:

Кипіння — пароутворення, яке відбувається як у всьому об'ємі рідини, так і з її поверхні при сталій температурі, названій температурою кипіння.

Умова кипіння:

— Рідина кипить, коли тиск насиченої пари дорівнює зовнішньому тиску на рідину. Температура кипіння води дорівнює $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ при нормальному атмосферному тиску:

$$p_{\text{насич } 100} = p_{\text{атм}} \approx 10^5 \text{ Па},$$

$$p_{\text{н. п}} = p_{\text{зовнішн}}, \quad p_{\text{н. п}} = p_{\text{атм}}.$$

— **Температура кипіння** рідини залежить від виду рідини, наявності домішок, зовнішнього тиску на рідину.

— При зменшенні зовнішнього тиску температура кипіння знижується, і навпаки. Якщо з рідини видалити розчинене повітря (багатократним кип'ятінням) і можливі центри пароутворення (пилінки, іони тощо), то можна підняти температуру рідини дещо вище від температури кипіння. Такий стан називається **перегрітою рідиною**. Перегріту рідину також можна одержати за умови, якщо зовнішній тиск стане меншим порівняно з тиском насиченої пари при даній температурі.

3.5. ПРИКЛАДИ РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧ

Задача 1.

На вулиці цілий день мрячить холодний осінній дощ. У теплій кімнаті розвішана випрана білизна. Чи висохне швидше білизна, якщо відкрити квартиру?

Аналіз і розв'язання:

У кімнаті й на вулиці водяна пара є насиченою. Тиск насиченої пари збільшується зі збільшенням температури. За умовою задачі температура вища в кімнаті, отже, насичена пара в ній перебуває під вищим тиском, ніж на вулиці.

Отже, при відкритій кватирці водяна пара виходитиме на вулицю, оскільки там її тиск менший.

Відповідь: білизна висохне скоріше, якщо кватирка відчинена.

Задача 2.

Відносна вологість повітря ввечері при $14\text{ }^{\circ}\text{C}$ дорівнює 80% . Уночі температура повітря знизилась до $6\text{ }^{\circ}\text{C}$ і випала роса. Скільки водяної пари сконденсувалося з 1 м^3 повітря?

Дано:

$$V = 1\text{ м}^3$$

$$t_1 = 14\text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\phi_1 = 80\%$$

$$t_2 = 6\text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\rho_{\text{H14}} = 12,1 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

$$\rho_{\text{H6}} = 7,3 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

$$m_{\text{в}} = ?$$

Розв'язання:

При конденсації водяної пари маса води визначається як різниця маси пари на початку процесу остигання і під кінець:

$$m_{\text{в}} = m_{n_1} - m_{n_2}.$$

Масу пари можна знайти через густину й об'єм:

$$m_{n_1} = \rho_{n_1} V,$$

$$m_{n_2} = \rho_{n_2} V.$$

Оскільки пара стала насиченою, то $\rho_{n_2} = \rho_{\text{H6}}$. Таким чином, $m_{n_2} = \rho_{\text{H6}} V$.

Тоді маса води дорівнює:

$$m_{\text{в}} = V(\rho_{n_1} - \rho_{\text{H6}}).$$

Визначимо ρ_{n_1} за формулою відносної вологості повітря:

$$\phi_1 = \frac{\rho_{n_1}}{\rho_{\text{H14}}} \cdot 100\%, \quad \rho_{n_1} = \frac{\phi_1 \rho_{\text{H14}}}{100\%}.$$

Тоді масу води можна розрахувати за такою формулою:

$$m_{\text{в}} = V \left(\frac{\phi_1 \rho_{\text{H14}}}{100\%} - \rho_{\text{H6}} \right).$$

Обчислення:

$$[m_{\text{в}}] = \text{м}^3 \left(\frac{\% \cdot \text{кг}}{\text{м}^3 \cdot \%} - \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \right) = \text{кг},$$

$$\{m_b\} = 1 \cdot \left(\frac{80 \cdot 12,1 \cdot 10^{-3}}{100} - 7,3 \cdot 10^{-3} \right) = 2,38 \cdot 10^{-3}.$$

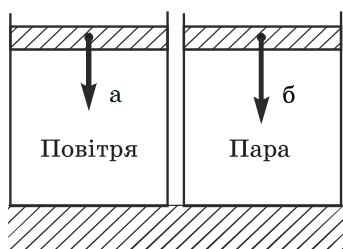
Відповідь: $m_b = 2,38 \text{ г}$.

Задача 3.

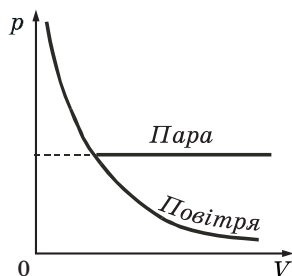
На рис. 134, а показані циліндри а і б, у яких ізотермічно стискають повітря і насичену пару води. Накресліть і поясніть графіки залежності тиску повітря і насиченої пари від об'єму.

Розв'язання:

Для повітря графік являє собою гіперболу (1), а для насиченої пари — пряму, паралельну осі V . Тиск насиченої пари не залежить від об'єму (рис. 134, б).



а



б

Рис. 134

Задача 4.

Яка густина насиченої пари води при температурі 100°C ?

Дано:

$$M(\text{H}_2\text{O}) = 18 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$$

$$t = 100^\circ\text{C}$$

$$p_{\text{H}100} = p_{\text{атм}} = 10^5 \text{ Па}$$

$$\rho_{\text{H}100} = ?$$

Сі:

$$M(\text{H}_2\text{O}) = 18 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$$

$$T = 373 \text{ К}$$

$$p_{\text{H}100} = 10^5 \text{ Па}$$

Розв'язання:

$$pV = \frac{m}{M}RT, \quad p_{\text{Н100}} = \frac{\rho_{\text{Н100}}}{M}RT, \quad \rho_{\text{Н100}} = \frac{p_{\text{Н100}}M}{RT}.$$

Обчислення:

$$[\rho_{\text{Н100}}] = \frac{\text{Па} \cdot \text{кг} \cdot \text{К} \cdot \text{моль}}{\text{Дж} \cdot \text{К} \cdot \text{моль}} = \frac{\text{кг}}{\text{м}^3},$$

$$\{\rho_{\text{Н100}}\} = \frac{10^5 \cdot 18 \cdot 10^{-3}}{8,31 \cdot 373} = 0,581.$$

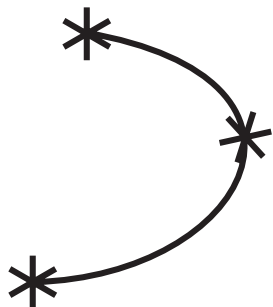
$$\text{Відповідь: } \rho_{\text{Н100}} = 0,581 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}.$$

4. ВЛАСТИВОСТІ РІДИН

— Рідини зберігають об'єм, але не зберігають форму (набувають форми посудини, у яку їх поміщають).

— Основна властивість рідини — плинність.

Характер молекулярного руху: молекули коливаються відносно положення рівноваги і «перестрибують» в інші позиції (рис. 135). Час «осідлого» життя більший за час переміщення. Молекули розташовані на порівняно невеликих відстанях, тому властивості рідини зумовлюються силами взаємодії молекул.



Під дією сил поверхневого натягу рідина в стані невагомості чи в малій кількості (крапля) набуває форми кулі, оскільки при цьому є мінімальною площа вільної поверхні, а отже, і поверхневої енергії — адже будь-яка система прагне до стану з мінімальною потенціальною енергією.

Рис. 135

4.1. ОСОБЛИВОСТІ ПОВЕРХНЕВОГО ШАРУ РІДИНИ

Найбільш характерною властивістю рідкого стану є наявність різкої межі, яка розділяє рідину та її пару.

Молекули рідини, що містяться на її поверхні, притягуються молекулами, які є всередині рідини. Притягання молекул пари, які містяться над поверхнею, є мізерно малим. Під впливом рівнодійної сили притягання молекули поверхневого шару втягуються всередину рідини, кількість молекул на поверхні зменшується, і площа поверхні скорочується. На поверхні залишається така кількість молекул, при якій її площа виявляється мінімальною для даного об'єму рідини (рис. 136, а).

Сила поверхневого натягу — це сила, яка діє на межі стикання рідини з твердим тілом перпендикулярно до межі по дотичній до поверхні рідини (рис. 136, б).

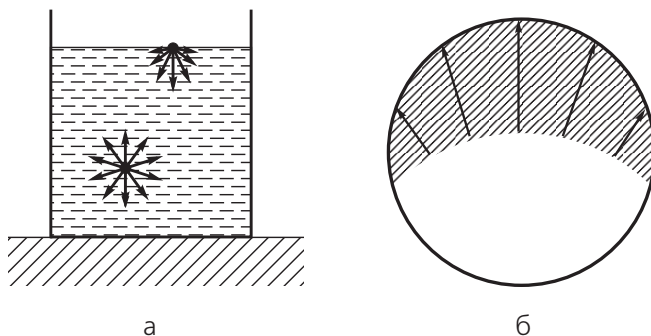


Рис. 136

4.2. ПОВЕРХНЕВА ЕНЕРГІЯ. ПОВЕРХНЕВИЙ НАТЯГ

Поверхневим натягом називається величина, вимірювана відношенням модуля сили поверхневого натягу до довжини межі поверхні плівки:

$$\sigma = \frac{F_{\text{н}}}{l_{\text{межі}}}.$$

У СІ **поверхневий натяг виражається в ньютонях на метр**: $[\sigma] = \frac{\text{Н}}{\text{м}}.$

Величина поверхневого натягу залежить від виду рідини і температури.

Енергія поверхневого шару рідини площею S :

$$\Pi = \sigma \cdot S.$$

Робота при зміні площі поверхневого шару плівки:

$$A = \sigma \Delta S = \Delta \Pi.$$

Величину поверхневого натягу можна визначити методом відриву крапель:

$$\sigma = \frac{m_{\kappa} g}{l},$$

де m_{κ} — маса краплі;

g — прискорення вільного падіння;

l — довжина межі поверхневого шару.

4.3. ЯВИЩЕ ЗМОЧУВАННЯ. КАПІЛЯРНІ ЯВИЩА

Рідина, яка розтікається по твердому тілі, називається **змочуючою** дане тверде тіло (вода по склу і т. п.). При цьому рівнодійна сил притягання молекул на межі зіткнення з молекулами рідини менша, ніж з молекулами твердого тіла (рис. 137, а).

Рідина, що не розтікається, а стягується міжмолекулярними силами в краплі, називається **незмочуючою** дане тверде тіло (вода на жирній поверхні і т. п.). Рівнодійна сила притягання молекул на межі зіткнення з молекулами рідини більша, ніж з молекулами твердого тіла (рис. 137, б).

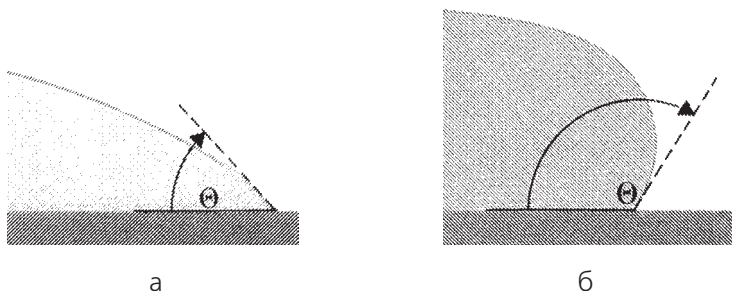


Рис. 137

θ — крайовий кут.

Якщо повне змочування, $\theta = 0$.

Якщо повне незмочування, $\theta = \pi$.

Змочування — це трифазне явище, оскільки воно відбувається на межі трьох фаз: твердої, рідкої і газоподібної.

У тонкій трубці — капілярі — у разі змочування рідина піднімається по стінці, утворюється увігнута поверхня рідини (увігнутий меніск) (рис. 138, а).

Висота підйому рідини в трубці:

$$h = \frac{2\sigma \cos \theta}{\rho g r}.$$

де σ — поверхневий натяг;

r — радіус трубки;

ρ — густина рідини.

Незмочуюча рідина опускається в капілярі на h , меніск при цьому є опуклим (рис. 138, б).

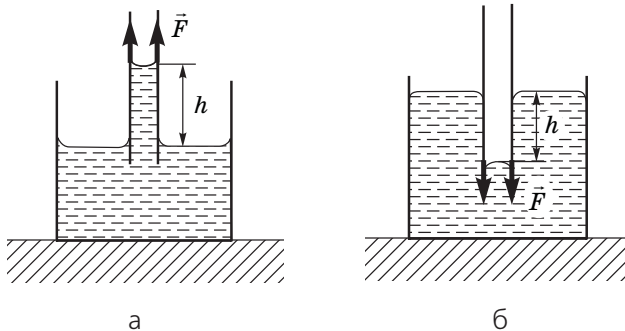


Рис. 138

4.4. ФОРМУЛА ЛАПЛАСА

Формула Лапласа

Додатковий тиск, який зумовлений кривиною поверхні рідини, визначається так:

$$\Delta p = \pm \sigma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right),$$

де R_1 і R_2 — радіуси кривини двох взаємно перпендикулярних перетинів поверхні рідини; знак «+» — для опуклого меніска, «-» — увігнутого.

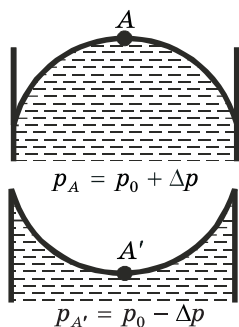


Рис. 139

Тиск у точках A і A' зазначений на рис. 139:

p_0 — тиск на вільну поверхню.

Якщо $R_1 = R_2 = R$ (сферична поверхня), то

$$\Delta p = \frac{2\sigma}{R}.$$

Для тонкостінної порожньої сфери (бульбашки), що має дві поверхні — зовнішню і внутрішню — лапласів тиск дорівнює:

$$\Delta p = 2 \cdot \frac{2\sigma}{R} = \frac{4\sigma}{R}.$$

4.5. ПРИКЛАДИ РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧ

Задача 1.

Корковий кубик із ребром 2 см плаває у воді. Визначити глибину його занурення у воду, вважаючи змочування повним.

Дано:

$$\rho_{\text{пр}} = 240 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

$$\sigma_{\text{в}} = 7,2 \cdot 10^{-2} \frac{\text{Н}}{\text{м}}$$

$$\rho_{\text{рід}} = 1000 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

$$\theta = 0$$

$$a = 2 \cdot 10^{-2} \text{ м}$$

$$\Delta h \text{ — ?}$$

Розв'язання:

Розглянемо сили, які діють на кубик. Сила натягу піднімає воду на поверхню кубика (змочування), діючи на нього вертикально вниз. Сила тяжіння напрямлена вниз, а архімедова сила — угору.

Оскільки кубик перебуває у рівновазі, то геометрична сума сил, діючих на кубик, дорівнює нулю (рис. 140):

$$\vec{F}_A + m\vec{g} + \vec{F}_H = 0.$$

У проекції на Ox :

$$F_A - F_H - mg = 0. \quad (1)$$

Розпишемо діючі на кубик сили. Сила Архімеда:

$$F_A = \rho_{\text{рід}} g \Delta h \cdot a^2.$$

Сила поверхневого натягу:

$$F_H = \sigma l,$$

де l — периметр куба.

Оскільки $l = 4a$, то $F_H = 4\sigma a$.

Розпишемо силу тяжіння кубика:

$$mg = \rho_{\text{пр}} g a^3.$$

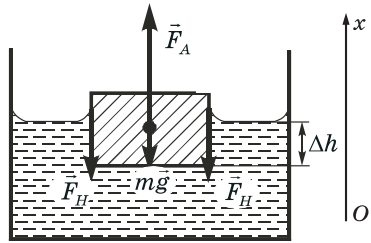


Рис. 140

Підставимо значення сил у рівняння (1):

$$\rho_{\text{рід}} g \Delta h \cdot a^2 - 4\sigma a - \rho_{\text{пр}} g a^3 = 0.$$

Виразимо шукану глибину занурення кубика в рідину Δh :

$$\Delta h = \frac{\rho_{\text{пр}} g a^3 + 4\sigma a}{\rho_{\text{рід}} g a^2}. \quad (2)$$

Скорочуючи на a чисельник і знаменник виразу (2), дістанемо:

$$\Delta h = \frac{\rho_{\text{пр}} g a^2 + 4\sigma}{\rho_{\text{рід}} g a}.$$

Обчислення:

$$[\Delta h] = \frac{\left(\frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \cdot \frac{\text{м}}{\text{с}^2} \cdot \text{м}^2 + \frac{\text{Н}}{\text{м}} \right) \cdot \text{м}^3 \cdot \text{с}^2}{\text{кг} \cdot \text{м} \cdot \text{м}} = \text{м},$$

$$\{\Delta h\} = \frac{240 \cdot 9,8 \cdot (2 \cdot 10^{-2})^2 + 4 \cdot 7,2 \cdot 10^{-2}}{1000 \cdot 9,8 \cdot 2 \cdot 10^{-2}} \approx 6,2 \cdot 10^{-3}.$$

Відповідь: $\Delta h = 0,62$ см.

Задача 2.

На протилежних кінцях трубки-трійника видули дві мильні бульбашки A і B різних діаметрів, після чого вихідний отвір трубки закрили (рис. 141). Що станеться з бульбашками, якщо залишити їх самих, захистивши від зовнішніх впливів (відкрити крани 1 і 3)?

Аналіз і розв'язання:

Об'єм бульбашки A зменшуватиметься, а об'єм бульбашки B — збільшуватиметься, оскільки лапласів тиск

$p_1 = \frac{4\sigma}{R_1}$ більший від лапласового тиску $p_2 = \frac{4\sigma}{R_2}$ (більшому радіусу відповідає менший лапласів тиск).

Рівновага настане, коли тиск есередині бульбашок (лапласові тиски) зрівняється, тобто коли поверхні обох плівок (радіус кульового сегмента першої плівки R'_1 і радіус кулі другої плівки R'_2) матимуть однакову кривину: $R'_1 = R'_2$ (рис. 142).

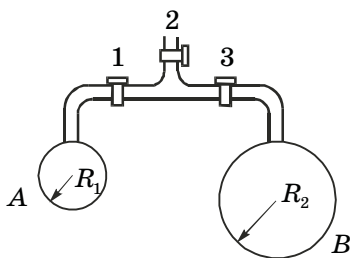


Рис. 141

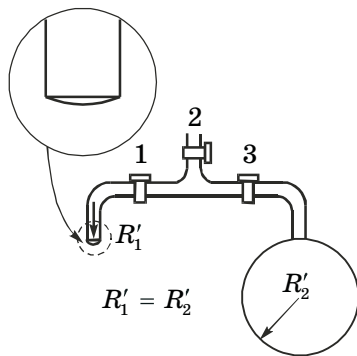


Рис. 142

Задача 3.

Під час посухи на поверхні землі утворюється тверда кірка. Чи треба зберігати її, щоб запобігти висиханню нижніх шарів землі?

Аналіз і розв'язання:

Ні, ґрунт слід розрихлювати, щоб перешкодити підйому ґрунтової води по капілярах, які утворюються у верхніх затверділих шарах ґрунту.

Задача 4.

У капілярній трубці, зануреній вертикально у воду на глибину l , вода піднялась на висоту h (рис. 143). Трубку закривають знизу пальцем, виймають із води і знову відкривають. Визначити довжину x стовпчика води, який залишився в трубці. Кривину верхнього ввігнутого і нижнього опуклого менісків вважати однаковою.

Дано:

капіляр

 l h

$$\rho_{\text{рід}} = 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

змочування

 x — ?

Розв'язання:

Оскільки скляна трубка є капіляром, то з'являється надлишковий лапласів тиск, зумовлений кривиною меніска:

$$p_{\text{л}} = \frac{2\sigma}{R}, \quad (1)$$

де R — радіус капіляра.Для визначення R використовуємо закон капілярності:

$$h = \frac{2\sigma}{\rho g R}. \quad (2)$$

Виразимо R із формули (2) і підставимо у формулу (1):

$$R = \frac{2\sigma}{\rho g h} \Rightarrow p_{\text{л}} = \frac{2\sigma}{2\sigma} \rho g h = \rho g h. \quad (3)$$

Лапласів тиск дорівнює гідростатичному тиску стовпчика рідини заввишки h . Коли трубку виймаємо з води, утворюється два меніски. Лапласів тиск збільшується, а отже, збільшується висота стовпчика води в капілярі. Визначимо цю висоту. Коли трубку відкриваємо, вода з капіляра виливається доти, поки вниз не утвориться опуклий меніск. Лапласів тиск напрямлений угору і дорівнює:

$$p_{\text{л}} = p_{\text{л}_1} + p_{\text{л}_2};$$

а) якщо $l > h$, то (рис. 144, а)

$$p_{\text{л}} = 2p_{\text{л}} = \rho g x_1, \quad 2\rho g h = \rho g x_1,$$

$$x_1 = 2h;$$

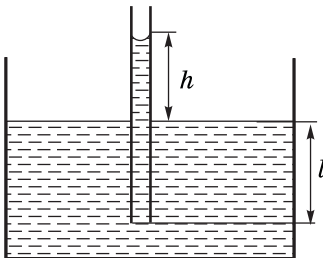
б) якщо $l < h$, то (рис. 144, б)

Рис. 143

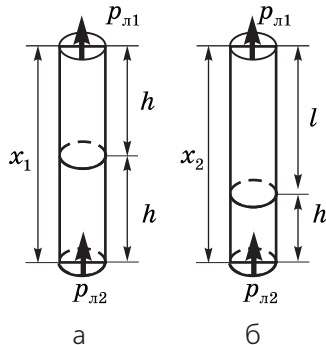


Рис. 144

$$\begin{aligned}
 p_{л_1} + p_{л_2} &= \rho g x_2, \\
 \rho g h + \rho g l &= \rho g x_2, \\
 x_2 &= l + h.
 \end{aligned}$$

Відповідь: $x_1 = 2h$, якщо $l > h$; $x_2 = l + h$, якщо $l < h$.

Задача 5.

Яку роботу треба виконати, щоб розтягнути на відстань $d = 10$ см мильну плівку на дротяній рамці з рухомою перекладиною завдовжки $l = 5$ см?

Дано:	СІ:
$d = 10$ см	$d = 0,1$ м
$l = 5$ см	$l = 0,05$ м
$\sigma = 40 \cdot 10^{-3} \frac{\text{Н}}{\text{м}}$	$\sigma = 40 \cdot 10^{-3} \frac{\text{Н}}{\text{м}}$
$A = ?$	

Розв'язання:

Робота A дорівнює збільшенню енергії вільної поверхні рідини:

$$A = \sigma \Delta S.$$

Оскільки треба враховувати збільшення поверхні з обох боків плівки, то $\Delta S = 2dl$.

$$\text{Тоді } A = 2\sigma dl.$$

Обчислення:

$$[A] = \frac{\text{Н}}{\text{м}} \cdot \text{м} \cdot \text{м} = \text{Н} \cdot \text{м} = \text{Дж},$$

$$\{A\} = 2 \cdot 40 \cdot 10^{-3} \cdot 0,1 \cdot 5 \cdot 10^{-2} = 4 \cdot 10^{-4}.$$

Відповідь: $A = 400$ мкДж.

Задача 6.

Яка кількість теплоти виділиться в навколишнє середовище, якщо при злитті крапельок діаметром 1 мкм вийде 1 кг чистої води при тій самій температурі? На скільки градусів нагрілась би вода, якби не було тепловіддачі?

Дано:

$$m = 1 \text{ кг}$$

$$\rho_{\text{в}} = 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

$$c_{\text{в}} = 4200 \frac{\text{Дж}}{(\text{кг} \cdot \text{К})}$$

$$d = 1 \text{ мм}$$

$$\sigma = 73 \cdot 10^{-3} \frac{\text{Н}}{\text{м}}$$

$$\Delta t = ?$$

Сі:

$$m = 1 \text{ кг}$$

$$\rho_{\text{в}} = 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

$$c_{\text{в}} = 4200 \frac{\text{Дж}}{(\text{кг} \cdot \text{К})}$$

$$d = 10^{-6} \text{ м}$$

$$\sigma = 73 \cdot 10^{-3} \frac{\text{Н}}{\text{м}}$$

Розв'язання:

Краплі, порівняно з водою, яка міститься в одній посудині, мають значно більшу поверхневу енергію. Ця надлишкова енергія

$$\Pi = \sigma_{\text{в}} \Delta S. \quad (1)$$

Визначимо ΔS :

$$\Delta S = S n,$$

де S — поверхня однієї краплі; n — кількість крапель.

$$S = 4\pi R^2, \quad n = \frac{V}{V_1},$$

де V і V_1 — відповідно об'єм 1 кг води і краплі.Підставимо значення ΔS у формулу (1):

$$\Pi = 4\pi R^2 \frac{V}{V_1} \sigma_{\text{в}}.$$

Визначимо V і V_1 :

$$V = \frac{m}{\rho_{\text{в}}}; \quad V_1 = \frac{4}{3} \pi R^3,$$

тоді

$$\Pi = \frac{4\pi R^2 m \sigma_{\text{в}}}{\rho_{\text{в}} \frac{4}{3} \pi R^3} = \frac{3m \sigma_{\text{в}}}{\rho_{\text{в}} R}.$$

Обчислимо, на скільки підвищилася б температура води, якби не було теплообміну з навколишнім середовищем.

$$Q = c_{\text{в}} m \Delta t \Rightarrow \Delta t = \frac{Q}{c_{\text{в}} m}.$$

Згідно із законом збереження енергії $Q = \Pi$, тоді

$$\Delta t = \frac{3m\sigma_{\text{в}}}{\rho_{\text{в}} R c_{\text{в}} m} = \frac{3\sigma_{\text{в}}}{\rho_{\text{в}} R c_{\text{в}}}.$$

Обчислення:

$$[\Delta t] = \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^3 \cdot \text{кг} \cdot \text{К}}{\text{м}^2 \cdot \text{кг} \cdot \text{м} \cdot \text{Дж}} = \text{К},$$

$$\{\Delta t\} = \frac{3 \cdot 73 \cdot 10^{-3}}{10^3 \cdot \frac{1}{2} \cdot 10^{-6} \cdot 4200} = 0,1.$$

Відповідь: $\Delta t = 0,1^\circ\text{C}$, $\Delta T = 0,1\text{ К}$.

Задача 7.

Яку роботу проти сил поверхневого натягу треба виконати, щоб видути мильну бульбашку радіусом R ? Чому дорівнює надлишковий тиск усередині бульбашки?

Розв'язання:

Мильна бульбашка являє собою дуже тонку плівку мильної води приблизно сферичної форми. Ця плівка має дві поверхні — зовнішню і внутрішню. Нехтуючи товщиною плівки і вважаючи тому радіуси обох сфер однаковими, знайдемо їхню спільну площу:

$$S = 4\pi R^2 + 4\pi R^2 = 8\pi R^2. \quad (1)$$

Збільшення поверхневої енергії пов'язане зі збільшенням ΔS :

$$\Delta \Pi = \sigma \Delta S. \quad (2)$$

Виконувана під час видування бульбашки робота проти сил поверхневого натягу іде на збільшення поверхневої енергії на $\Delta \Pi$. Таким чином, із (1) і (2) дістанемо:

$$A = \Delta \Pi = 8\pi R^2 \sigma.$$

Надлишковий (порівняно із зовнішнім) тиск усередині бульбашки дорівнює:

$$\Delta p = \frac{4\sigma}{R}.$$

5. ВЛАСТИВОСТІ ТВЕРДИХ ТІЛ

— Зберігають форму.

— Зберігають об'єм.

Характер молекулярного руху — коливання атомів чи молекул біля положення рівноваги.

5.1. КРИСТАЛІЧНІ ТА АМОРФНІ ТІЛА. ЇХНІ ВЛАСТИВОСТІ

Розрізняють **кристалічні** та **аморфні** тверді тіла.

У **аморфних** тіл зберігається ближній порядок у розташуванні атомів, але відсутній дальній. Звідси впливають **властивості** аморфних тіл:

1. Вони не мають температури плавлення, оскільки немає кристалічної ґратки. При нагріванні вони розм'якшуються.
2. Вони ізотропні: їхні фізичні властивості однакові в усіх напрямках.

До аморфних тіл належать смола, скло, пластмаси.

Кристали — це тверді тіла, атоми й молекули яких займають певне, упорядковане положення в просторі. Наслідком упорядкованого розміщення атомів у кристалі є геометрична правильність його внутрішньої будови.

Властивості кристалів:

1. **Анізотропія** фізичних властивостей (їх залежність від вибраного в кристалі напрямку).
2. Наявність **температури плавлення**. Кристалічне тіло, досягаючи температури плавлення, починає плавитись. Уся енергія, що підводиться до тіла, витрачається на збільшення потенціальної енергії взаємодії молекул при руйнуванні кристалічних ґраток, а кінетична енергія молекул стабільна, тому **температура тіла при плавленні не змінюється**.
3. Властивості кристала зумовлюються не лише тим, із яких атомів він складається, але й видом кристалічних ґраток. Наприклад, з тих самих атомів вуглецю складаються алмаз (145, а) і графіт (рис. 145, б), але фізичні властивості у них різні.

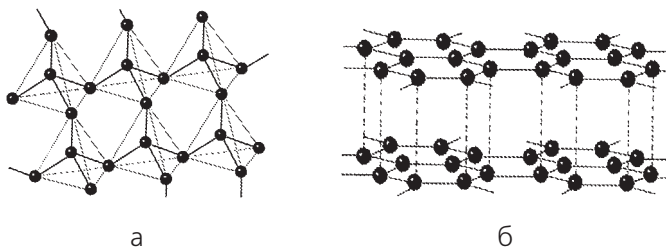


Рис. 145

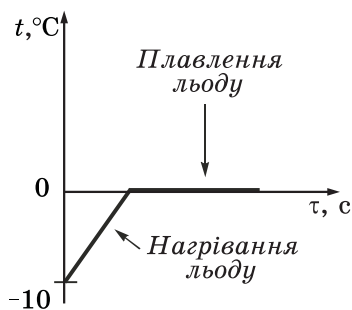


Рис. 146

Графік залежності температури від часу для кристалічного тіла (наприклад льоду, якщо $p_{\text{атм}} = 10^5$ Па) зображений на рис. 146.

Одиночні кристали — **монокристали**. Тверде тіло, яке складається з великої кількості маленьких кристалів, називають полікристалом (наприклад, метали, цукор). Полікристалам властива ізотропія.

Вузол кристалічної ґратки — точка, відносно якої атом (молекула) здійснює коливання.

5.2. ТИПИ ТВЕРДИХ КРИСТАЛІВ

Залежно від виду частинок, які розміщені у вузлах кристалічних ґраток, і характеру сил взаємодії між ними, тверді кристали поділяються на чотири типи:

1. **Іонні** кристали: у вузлах ґраток розміщуються по чергово іони з протилежними зарядами, наприклад NaCl (рис. 147, а).
2. **Атомні** (ковалентні) кристали: у вузлах ґраток — нейтральні атоми, які утримуються ковалентними зв'язками квантово-механічного походження (у сусідніх атомів узагальнені валентні електрони). Таку будову має, наприклад, кристалічна ґратка алмазу (рис. 145, а).

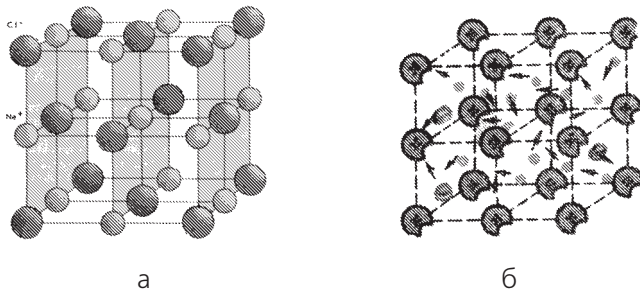


Рис. 147

3. **Металічні** кристали: у вузлах ґраток розташовуються позитивні іони, а в міжвузлах — електронний газ (узагальнені електрони) (рис. 147, б). Таку будову мають метали з доброю електропровідністю.
4. **Молекулярні** кристали: у вузлах ґраток розміщуються нейтральні молекули, сили взаємодії між якими зумовлені зміщенням електронних оболонок атомів. Ці сили називають **вандерваальсовими**. Молекулярні кристали — Br_2 , CH_4 , парафін.

5.3. РІДКІ КРИСТАЛИ

Рідкі кристали — речовини в стані, проміжному між твердим кристалічним та ізотропним рідким. Зберігаючи основні особливості рідини, наприклад плинність, вони мають характерну властивість твердих кристалів — анізотропію фізичних властивостей.

5.4. ДЕФЕКТИ КРИСТАЛІЧНИХ ҐРАТОК

Дефекти кристалічних ґраток — відхилення від упорядкованого розташування частинок у вузлах ґратки кристала:

1. **Точкові дефекти:** вакансії, міжвузлові атоми, домішані атоми тощо.
2. **Лінійні дефекти:** дислокації (крайові, гвинтові, змішані та ін.).
3. **Двомірні дефекти:** межі зерен у полікристалах, міжфазні межі в багатофазних сплавах тощо.

4. **Тримірні дефекти:** пори, тріщини, макроскопічні вклюдження та ін.

5.5. МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ТВЕРДИХ ТІЛ

Див. розділ «Механіка», п.2.2.2.

5.5.1. ДІАГРАМА РОЗТЯГУ ТВЕРДИХ ТІЛ

Діаграма показана на рис. 148.

Ділянка OA : при малих деформаціях напруга σ прямо пропорційна відносному подовженню ε . Виконується **закон Гука**: $\sigma = |\varepsilon|E$. Деформація пружна.

Ділянка AB : закон Гука не виконується, але деформація пружна. Максимальна напруга, при якій ще не виникає помітна залишкова деформація, називається **межею пружності** $\sigma_{\text{пруж}}$.

Ділянка BC : пластична деформація.

Ділянка CD : ділянка плинності матеріалу. Видовження відбувається практично без збільшення навантаження.

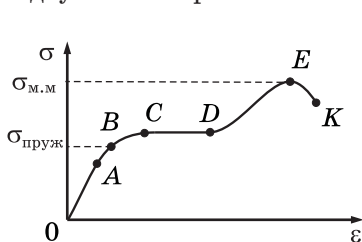


Рис. 148

Ділянка DE : зміцнення матеріалу: видовження відбувається при значному збільшенні навантаження.

При досягненні максимального значення механічної напруги $\sigma_{\text{м.м}}$ (**межа міцності**) матеріал розтягується без збільшення зовнішнього навантаження до самого зруйнування в точці K .

5.5.2. ЗАПАС МІЦНОСТІ. ПРУЖНІСТЬ І ПЛАСТИЧНІСТЬ

Запас міцності n дорівнює відношенню межі міцності до допустимої механічної напруги $\sigma_{\text{доп}}$:

$$n = \frac{\sigma_{\text{м.м}}}{\sigma_{\text{доп}}}.$$

Матеріали, у яких незначні навантаження викликають пластичну деформацію, називають **пластичними** (наприклад свинець, смола).

Матеріали, що виявляють властивості пружності під час значної деформації, називаються **пружними** (наприклад гума, сталь).

5.6. ПРИКЛАДИ РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧ

Задача 1.

До сталевого стрижня перерізом 2 см^2 і завдовжки $0,5 \text{ м}$ підвішено вантаж масою 5 т . Який запас міцності має стрижень, якщо межа міцності (руйнуюча напруга) при розтягу для сталі $1,25 \cdot 10^9 \text{ Па}$? Яке відносне подовження стрижня? Яка енергія пружної деформації стрижня? (Масою стрижня знехтувати.)

Дано:

$$S = 2 \text{ см}^2$$

$$l_0 = 0,5 \text{ м}$$

$$m = 5 \text{ т}$$

$$m_{\text{стрижня}} = 0$$

$$E_{\text{сталі}} = 2,2 \cdot 10^{11} \text{ Па}$$

$$\sigma_{\text{м. м}} = 1,25 \cdot 10^9 \text{ Па}$$

СІ:

$$S = 2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$$

$$l_0 = 0,5 \text{ м}$$

$$m = 5 \cdot 10^3 \text{ кг}$$

$$m_{\text{стрижня}} = 0$$

$$E_{\text{сталі}} = 2,2 \cdot 10^{11} \text{ Па}$$

$$\sigma_{\text{м. м}} = 1,25 \cdot 10^9 \text{ Па}$$

$$n \text{ — ?}$$

$$|\epsilon| \text{ — ?}$$

$$W_{\text{П}} \text{ — ?}$$

Розв'язання:

Допустима механічна напруга:

$$\sigma_{\text{доп}} = \frac{F}{S}, \text{ а } F = mg,$$

отже,

$$\sigma_{\text{доп}} = \frac{mg}{S}, \quad (1)$$

$$n = \frac{\sigma_{\text{м. м}}}{\sigma_{\text{доп}}} = \frac{\sigma_{\text{м. м}} S}{mg} \text{ — запас міцності.} \quad (2)$$

Відносне подовження стрижня визначимо із закону Гука:

$$|\epsilon| = \frac{\sigma_{\text{доп}}}{E_{\text{ст}}}, \quad (3)$$

оскільки деформація пружна.

Підставивши у формулу (3) значення допустимої механічної напруги, дістанемо:

$$|\varepsilon| = \frac{mg}{SE_{\text{ст}}} . \quad (4)$$

Енергію пружно деформованої сталі обчислимо за формулою

$$W_{\Pi} = \frac{k\Delta l^2}{2} = \frac{F_{\text{пр}}\Delta l}{2} .$$

Оскільки $F_{\text{пр}} = mg$, а $\Delta l = l_0 |\varepsilon|$, то

$$W_{\Pi} = \frac{mgl_0 |\varepsilon|}{2} . \quad (5)$$

Підставивши в (5) значення $|\varepsilon|$ із (4), дістанемо:

$$W_{\Pi} = \frac{(mg)^2 l_0}{2SE_{\text{ст}}} .$$

Обчислення:

$$[n] = \frac{\text{Па}}{\text{Па}} = 1 \text{ — безрозмірна величина,}$$

$$\{n\} = \frac{1,25 \cdot 10^9 \cdot 2 \cdot 10^{-4}}{5 \cdot 10^3 \cdot 9,8} \approx 5,1 ,$$

$$[\varepsilon] = \frac{\text{кг} \cdot \text{м} \cdot \text{м}^2}{\text{м}^2 \cdot \text{с}^2 \cdot \text{Н}} = 1 \text{ — безрозмірна величина,}$$

$$\{\varepsilon\} = \frac{5 \cdot 10^3 \cdot 9,8}{2,2 \cdot 10^{11} \cdot 2 \cdot 10^{-4}} \approx 1,1 \cdot 10^{-3} ,$$

$$[W_{\Pi}] = \frac{\text{кг}^2 \cdot \text{м}^2 \cdot \text{м} \cdot \text{м}^2}{\text{м}^2 \cdot \text{с}^2 \cdot \text{Н}} = \text{Дж} ,$$

$$\{W_{\Pi}\} = \frac{(5 \cdot 10^3 \cdot 9,8)^2 \cdot 0,5}{2 \cdot 2,2 \cdot 10^{11} \cdot 2 \cdot 10^{-4}} \approx 14 .$$

Відповідь: $n \approx 5,1$, $|\varepsilon| \approx 1,1 \cdot 10^{-3}$, $W_{\Pi} \approx 14$ Дж.

Задача 2.

Межа пружності сталі $5,72 \cdot 10^8$ Па. Якою буде деформація (пружною або пластичною), якщо сталевий дріт завдовжки 3 м з перерізом $1,2 \text{ мм}^2$ під дією розтягуючої сили

подовжується на 8 мм? Під дією якої сили відбувається така деформація? Модуль Юнга для сталі $E = 1,96 \cdot 10^{11}$ Па.

Дано:

$$S = 1,2 \text{ мм}^2$$

$$\sigma_{\text{пр}} = 5,72 \cdot 10^8 \text{ Па}$$

$$l_0 = 3 \text{ м}$$

$$\Delta l = 8 \text{ мм}$$

$$E_{\text{сталі}} = 1,96 \cdot 10^{11} \text{ Па}$$

СІ:

$$S = 1,2 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$$

$$\sigma_{\text{пр}} = 5,72 \cdot 10^8 \text{ Па}$$

$$l_0 = 3 \text{ м}$$

$$\Delta l_0 = 8 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

$$E_{\text{сталі}} = 1,96 \cdot 10^{11} \text{ Па}$$

Якою буде ця деформація (пружною або пластичною)?

F — ?

Розв'язання:

Для визначення виду деформації в дроті обчислимо напругу σ за законом Гука:

$$\sigma = |\epsilon| E = \frac{|\Delta l|}{l_0} E ,$$

σ порівнюємо з межею пружності $\sigma_{\text{пр}}$ і доводимо висновок, якою є деформація.

Для визначення сили, що спричиняє деформацію, скористаємося формулою механічної напруги:

$$\sigma = \frac{F}{S} \Rightarrow F = \sigma S = \frac{|\Delta l|}{l_0} E S ,$$

$$F = \frac{|\Delta l|}{l_0} E \cdot S \text{ — сила, яка спричиняє деформацію.}$$

Обчислення:

$$[\sigma] = \frac{\text{М}}{\text{м}} \text{ Па} = \text{Па} ,$$

$$\{\sigma\} = \frac{8 \cdot 10^{-3}}{3} \cdot 1,96 \cdot 10^{11} \approx 5,23 \cdot 10^8 .$$

$\sigma < \sigma_{\text{пр}}$, отже, деформація пружна:

$$[F] = \frac{\text{М}}{\text{м}} \text{ Па} \cdot \text{м}^2 = \text{Н} ,$$

$$\{F\} = 5,23 \cdot 10^8 \cdot 1,2 \cdot 10^{-6} \approx 6,27 \cdot 10^2 .$$

Відповідь: деформація дроту пружна; сила F , яка спричиняє деформацію дроту, приблизно дорівнює 627 Н.

6. ТЕПЛОВЕ РОЗШИРЕННЯ ТВЕРДИХ І РІДКИХ ТІЛ

6.1. ГРАФІК ЗАЛЕЖНОСТІ ПОТЕНЦІАЛЬНОЇ ЕНЕРГІЇ ВЗАЄМОДІЇ НАЙПРОСТІШИХ МОЛЕКУЛ ВІД ВІДСТАНИ МІЖ НИМИ (ПОТЕНЦІАЛЬНА ЯМА)

У рідинах і твердих тілах при збільшенні температури збільшується амплітуда коливального руху молекул біля положення, що відповідає мінімуму потенціальної енергії взаємодії між ними (дну потенціальної ями).

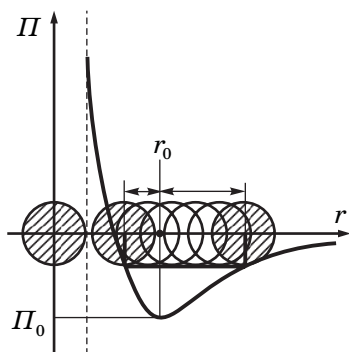


Рис. 149

Оскільки потенціальна крива несиметрична, перехід молекул на більш високий енергетичний рівень зумовлює не тільки зростання амплітуди, а й збільшення середньої відстані між молекулами: відбувається зміщення центра коливань молекули. Тому і рідини, і тверді тіла розширюються при зростанні їхньої температури (рис. 149).

6.2. ЛІНІЙНЕ Й ОБ'ЄМНЕ РОЗШИРЕННЯ ТВЕРДИХ І РІДКИХ ТІЛ

Лінійне розширення:

$$l = l_0 (1 + \alpha t),$$

де l_0 — довжина тіла при температурі $0\text{ }^{\circ}\text{C}$;

l — довжина тіла при температурі t ;

α — коефіцієнт лінійного розширення; $[\alpha] = \text{K}^{-1}$.

$\sigma_{\text{води}} \approx 2 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$; $\sigma_{\text{ефіру}} \approx 16 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$.

Об'ємне розширення:

$$V = V_0 (1 + \beta t),$$

де V_0 — об'єм тіла при температурі $0\text{ }^{\circ}\text{C}$;

V — об'єм тіла при температурі t ;

β — коефіцієнт об'ємного розширення; $[\beta] = \text{K}^{-1}$.

Зв'язок між коефіцієнтами об'ємного і лінійного розширення для твердих тіл:

$$\beta_{\text{т.т}} \approx 3\alpha.$$

Щоб визначити коефіцієнт об'ємного розширення рідини ($\beta_{\text{рід}}$), що міститься в скляній колбі, треба до експериментально визначеного коефіцієнта ($\beta_{\text{к}}$) додати коефіцієнт об'ємного розширення скла ($3\alpha_{\text{ск}}$):

$$\beta_{\text{рід}} = \beta_{\text{к}} + 3\alpha_{\text{ск}},$$

де $\beta_{\text{к}} = \frac{\Delta V_{\text{к}}}{V_{0t}}$; $\Delta V_{\text{к}}$ — уявна зміна об'єму.

6.3. ОСОБЛИВОСТІ ТЕПЛОВОГО РОЗШИРЕННЯ ВОДИ

— Вода при нагріванні від 0 до 4 °С зменшується в об'ємі (її густина максимальна при 4 °С). Подальше нагрівання води спричиняє збільшення її об'єму.

— Густина води зменшується при замерзанні, внаслідок чого лід плаває на її поверхні. Ці особливості пояснюються тим, що в твердому стані кристалічна структура має менш щільну упаковку, ніж у рідкому. А максимум густини упаковки молекул води буде при 4 °С.

Особливість теплового розширення води має важливе значення для збереження живих організмів у водоймах узимку. Охолоджувані повітрям верхні шари води опускаються вниз, а теплі піднімаються вгору. Таке змішування води відбувається доти, поки температура води не опуститься до 4 °С. При подальшому охолодженні верхні шари не опускаються, і при 0 °С зверху утворюється лід, який плаває на поверхні й оберігає водойму від повного промерзання.

6.4. ПРИКЛАДИ РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧ

Задача 1.

Якої величини силу треба докласти до мідного дроту перерізом 10 мм², щоб розтягнути його на стільки, на скільки він подовжується при нагріванні на 20 К?

Дано:

$$S = 10 \text{ мм}^2$$

$$\Delta T = 20 \text{ К}$$

$$E_{\text{міді}} = E = 1,2 \cdot 10^{11} \text{ Па}$$

$$\alpha_{\text{міді}} = \alpha = 1,7 \cdot 10^{-5} \text{ К}^{-1}$$

F — ?

СІ:

$$S = 10^{-5} \text{ м}^2$$

$$\Delta T = 20 \text{ К}$$

$$E_{\text{міді}} = E = 1,2 \cdot 10^{11} \text{ Па}$$

$$\alpha_{\text{міді}} = \alpha = 1,7 \cdot 10^{-5} \text{ К}^{-1}$$

Розв'язання:

При нагріванні дроту відбувається подовження його на $\Delta l = l_2 - l_1$.

$$l_1 = l_0 (1 + \alpha t_1),$$

де l_0 — довжина дроту при 0°C ;

$$l_2 = l_0 (1 + \alpha t_2); \quad \Delta l = l_0 \alpha (t_2 - t_1) = l_0 \alpha \Delta t = l_0 \alpha \Delta T. \quad (1)$$

За умовою задачі дріт має отримати таке саме подовження при деформації. За законом Гука:

$$\sigma = E |\varepsilon| = E \frac{|\Delta l|}{l_0}, \quad \Delta l = \frac{\sigma l_0}{E}. \quad (2)$$

Розпишемо механічну напругу: $\sigma = \frac{F}{S}$ і підставимо її в (2):

$$\Delta l = \frac{F l_0}{SE}. \quad (3)$$

Прирівнявши праві частини рівнянь (1) і (3), дістанемо:

$$\frac{F l_0}{SE} = l_0 \alpha \Delta T, \quad \text{звідки} \quad F = \alpha \Delta T \cdot SE.$$

Обчислення:

$$[F] = \text{К}^{-1} \cdot \text{К} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{Па} = \text{Н},$$

$$\{F\} = 1,7 \cdot 10^{-5} \cdot 20 \cdot 10^{-5} \cdot 1,2 \cdot 10^{11} \approx 410.$$

Відповідь: $F \approx 410 \text{ Н}$.

Задача 2.

Чому при нагріванні та охолодженні залізобетонних конструкцій залізо в них не відділяється від бетону?

Аналіз і розв'язання:

Тому що їхні коефіцієнти лінійного розширення майже однакові.

Тепловим рухом називається хаотичний рух атомів і молекул.

ОСНОВИ ТЕРМОДИНАМІКИ



Термодинаміка — розділ фізики, який вивчає загальні властивості макроскопічних систем, що перебувають у стані термодинамічної рівноваги. Термодинаміка вивчає найбільш загальні закономірності перетворення енергії, але не розглядає молекулярної будови речовини.

Будь-яка система, що складається з великої кількості частинок — атомів, молекул, іонів та електронів, які здійснюють хаотичний тепловий рух і при взаємодії між собою обмінюються енергією, називається **термодинамічною системою**. Такими системами є гази, рідини й тверді тіла (їх ще називають макроскопічними тілами).

Стан термодинамічної системи зумовлюється температурою, об'ємом, зовнішнім тиском та іншими термодинамічними параметрами.

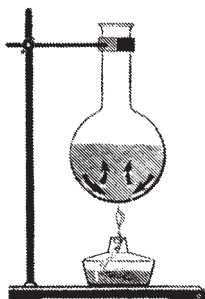
1. ВНУТРІШНЯ ЕНЕРГІЯ І ЇЇ ЗМІНА ПРИ ТЕПЛОПЕРЕДАЧІ ТА ВИКОНАННІ РОБОТИ

Внутрішня енергія макроскопічного тіла дорівнює сумі кінетичних енергій безладного руху всіх молекул (або

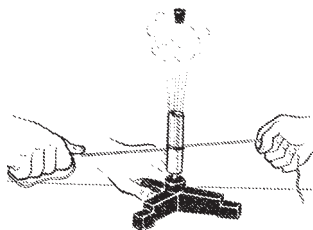
атомів) відносно центра мас тіла і потенціальних енергій взаємодії всіх молекул одна з одною.

Внутрішня енергія змінюється при:

- теплопередачі (рис. 150, а);
- виконанні роботи над тілом або самим тілом, (наприклад, при терті пробірки виділяється тепло, і розігрітий газ виштовхує пробку (рис. 150, б).



а



б

Рис. 150

1.1. ВНУТРІШНЯ ЕНЕРГІЯ ІДЕАЛЬНОГО ГАЗУ

Внутрішня енергія ідеального газу обумовлюється лише кінетичною енергією руху молекул; потенціальною енергією їх взаємодії можна знехтувати. Для ідеального газу масою m внутрішня енергія розраховується за формулою

$$U = \frac{i}{2} \frac{m}{M} RT ,$$

де i — число ступенів свободи молекули.

Числом ступенів свободи називають число незалежних величин, за допомогою яких може бути задане положення тіла або частинки. Для одноатомного газу $i = 3$, двоатомного — $i = 5$, триатомного і більше — $i = 6$.

1.2. РОБОТА ІДЕАЛЬНОГО ГАЗУ. ЇЇ ГЕОМЕТРИЧНЕ ТЛУМАЧЕННЯ

Термодинамічна робота виконується тілами при зміні їхнього об'єму.

Оскільки тверді й рідкі тіла при нагріванні розширюються незначною мірою, то незначною є і виконувана ними термодинамічна робота. Роботу в термодинаміці може виконувати лише газ, який значно змінює свій об'єм при нагріванні.

Робота ідеального газу при ізобарному процесі:

$$A' = p(V_2 - V_1) = \frac{m}{M} R(T_2 - T_1).$$

Робота ідеального газу при ізотермічному процесі:

$$A' = \frac{m}{M} RT \ln \frac{V_2}{V_1}.$$

Геометричне тлумачення роботи газу.

Робота газу чисельно дорівнює площі фігури, обмеженої графіком залежності p від V , віссю V та ординатами початкового і кінцевого стану (рис. 151, а, б).

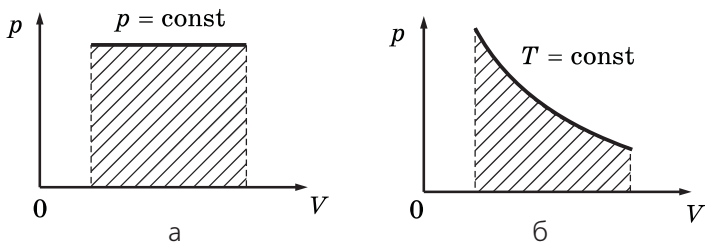


Рис. 151

1.3. ТЕПЛОПЕРЕДАЧА ТА ЇЇ ВИДИ

Теплопередачею або **теплообміном** називається процес передавання енергії від одного тіла до іншого без виконання роботи.

Існує **три способи теплопередачі**:

- 1) теплопровідність;
- 2) конвекція;
- 3) випромінювання.

Теплопровідність — вид теплопередачі, при якій передавання внутрішньої енергії від одних тіл до інших відбувається при їх безпосередньому контакті й зумовлене взаємодією атомів і молекул. Висока теплопровідність, наприклад, у металів. Шерсть, поролон та інші пористі тіла мають низьку теплопровідність. Вакуум теплопровідністю не наділений.

Конвекція — вид теплопередачі, при якій внутрішня енергія від одних тіл до інших передається рухомими струменями рідини чи газу. Конвекція приводить до виникнення вітру (бриз) на березі моря.

При **випромінюванні** теплообмін зумовлений передачею енергії світловим потоком (здебільшого інфрачервона ділянка шкали електромагнітних хвиль). Цей вид теплопередачі відрізняється від інших тим, що може здійснюватися в повному вакуумі. Випромінюванням передається на Землю і сонячна енергія.

1.4. КІЛЬКІСТЬ ТЕПЛОТИ. РІВНЯННЯ ТЕПЛООВОГО БАЛАНСУ

Та частина внутрішньої енергії, яку тіло втрачає чи отримує при теплопередачі, називається **кількістю теплоти (Q)**:

$$[Q] = \text{Дж}.$$

При теплообміні не відбувається перетворення енергії з однієї форми на іншу: частина внутрішньої енергії гарячого тіла передається холодному; теплообмін припиняється при вирівнюванні їхніх температур.

Теплообмін у замкненій системі описується **рівнянням теплового балансу**:

$$Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n = 0 ,$$

$$Q_{\text{одерж}} = Q_{\text{від}} ,$$

де $Q_{\text{одерж}}$ — сумарна кількість теплоти, одержана тілом при теплообміні;

$Q_{\text{від}}$ — сумарна кількість теплоти, віддана тілом при теплообміні.

1.5. ПИТОМА ТЕПЛОЄМНІСТЬ РЕЧОВИНИ

Питома теплоємність речовини (c) — це величина, яка чисельно дорівнює кількості теплоти, що отримує або віддає 1 кг речовини при зміні її температури на 1 К:

$$c = \frac{Q}{m\Delta T} .$$

Одиниця питомої теплоємності — «джоуль на кілограм-кельвін»:

$$[c] = \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

Кількість теплоти, яка необхідна для нагрівання тіла і яка виділяється при охолодженні тіла, розраховується за формулами:

$$\text{при нагріванні: } Q = cm(t_{\text{к}} - t_{\text{п}});$$

$$\text{при охолодженні: } Q = cm(t_{\text{п}} - t_{\text{к}}),$$

де $t_{\text{п}}$ — початкова температура, $t_{\text{к}}$ — кінцева температура.

Питома теплоємність речовини залежить від виду речовини, її агрегатного стану та інтервалу температур, у якому проходить теплопередача.

Рідкі й тверді речовини розширюються при нагріванні незначною мірою, їхні питомі теплоємності при сталому об'ємі й сталому тиску залишаються сталими і наведені в таблицях.

Якщо нагрівати газ при сталому об'ємі, його молярну теплоємність (C_v) і питому теплоємність (c_v) можна обчислити за формулами:

$$C_v = \frac{iR}{2},$$

$$c_v = \frac{C_v}{M} = \frac{iR}{2M},$$

де M — молярна маса речовини.

Якщо нагрівати газ при сталому тиску, його молярну теплоємність (C_p) і питому теплоємність (c_p) можна обчислити за формулами:

$$C_p = C_v + R = \frac{(i+2)}{2}R, \quad c_p = \frac{(i+2)R}{2M}.$$

Молярна теплоємність речовини — величина, яка визначається кількістю теплоти, необхідної для нагрівання 1 моля речовини на 1 К.

Одиниця молярної теплоємності — «джоуль на моль-кельвін»:

$$[c] = \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}.$$

Для калориметричних вимірювань використовується прилад — калориметр. Найпростіший калориметр являє собою посудину з покриттям, яка має форму склянки. Посудину ставлять на пробкову підставку, вміщену в іншу, більшу, посудину так, що між ними залишається шар повітря, який є теплоізолятором.

1.6. ПИТОМА ТЕПЛОТА ЗГОРЯННЯ ПАЛИВА. ККД НАГРІВАЧА

Питомою теплою згоряння палива називається величина, яка вимірюється кількістю теплоти, що виділяється при повному згорянні одного кілограма палива:

$$q = \frac{Q}{m}.$$

Одиницею питомої теплоти згоряння палива є «джоуль на кілограм»:

$$[q] = \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}.$$

Пристрої, у яких відбувається згоряння палива, називаються **нагрівачами**. Це печі, топки і горілки різної конструкції або камери згоряння в **теплових машинах**.

При оцінюванні ефективності нагрівача вводиться поняття **коефіцієнта корисної дії (ККД)** нагрівача η , який визначає, яка частина виділеної при нагріванні енергії використовується з користю:

$$\eta = \frac{Q_{\text{кор}}}{Q_{\text{пов}}} = \frac{Q_{\text{кор}}}{q_m}.$$

1.7. ЗМІНЮВАННЯ АГРЕГАТНОГО СТАНУ РЕЧОВИНИ

Процес перетворення твердого кристалічного тіла на рідину називається **плавленням**; процес перетворення рідини на тверде кристалічне тіло — **кристалізацією**.

Питома теплота плавлення (кристалізації) (λ) — це величина, яка чисельно дорівнює кількості теплоти, необхідної для перетворення 1 кг кристалічної речовини при температурі плавлення на рідину тієї самої температури:

$$\lambda = \frac{Q}{m}.$$

2. ПЕРШИЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМІКИ. АДІАБАТИЧНИЙ ПРОЦЕС

При кристалізації тіла **виділяється** така сама кількість теплоти, яка була витрачена на його плавлення.

Питома теплота пароутворення (конденсації) (L) — це величина, яка чисельно дорівнює кількості теплоти, яку необхідно витратити для перетворення 1 кг рідини на пару при незмінній температурі:

$$L = \frac{Q}{m}.$$

Одиниця питомої теплоти плавлення і пароутворення — «джоуль на кілограм» (Дж/кг). При конденсації пари у рідину виділяється така сама кількість теплоти, яка була витрачена на її випаровування.

Внутрішня енергія тіла змінюється при нагріванні або охолодженні, пароутворенні або конденсації, плавленні або кристалізації. У всіх випадках тілу передається або від нього віднімається деяка кількість теплоти.

Графік залежності температури від часу для кристалічного тіла при зміні його агрегатного стану (т. т. $\rightarrow$ р. $\rightarrow$ п.) зображений на рис. 152.

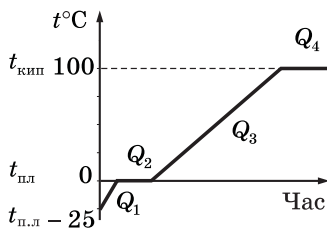


Рис. 152

Наприклад, лід $\rightarrow$ вода $\rightarrow$ водяна пара при нормальному атмосферному тиску:

$$Q_1 = c_{\text{л}} m (t_{\text{пл}} - t_{\text{п.л}}), \quad Q_2 = \lambda m,$$

$$Q_3 = c_{\text{в}} m (t_{\text{кип}} - t_{\text{пл}}), \quad Q_4 = Lm.$$

2. ПЕРШИЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМІКИ. АДІАБАТИЧНИЙ ПРОЦЕС

Закон збереження і перетворення енергії, поширений на теплові явища, називається **першим законом (першим началом) термодинаміки**.

Зміна внутрішньої енергії ΔU при переході її із одного стану в інший дорівнює сумі роботи зовнішніх сил A і кількості теплоти Q , переданої системі:

$$\Delta U = Q + A.$$

Якщо система сама виконує роботу A' над зовнішніми тілами, то (оскільки $A' = -A$) перший закон термодинаміки зручно формулювати так: *кількість теплоти Q , передана системі, витрачається на зміну її внутрішньої енергії ΔU і на здійснення системою роботи A' над зовнішніми тілами:*

$$Q = \Delta U + A'.$$

Застосування першого закону термодинаміки до різних ізопроеців у газі подано в табл. 6.

Адіабатичний процес — процес у теплоізолюваній системі (рис. 153, а):

$$Q = 0.$$

Рівняння Пуассона для адіабатичного процесу в ідеальному газі:

$$pV^\gamma = \text{const},$$

$\gamma = \frac{C_p}{C_v} = \frac{i+2}{i}$ — це відношення молярних (чи питомих) теплоємностей газу при сталому тиску й об'ємі.

Таблиця 6

Ізотермічний $T = \text{const},$ $m = \text{const}$	Ізохоричний $V = \text{const},$ $m = \text{const}$	Ізобаричний $p = \text{const},$ $m = \text{const}$	Адіабатичний $Q = 0$
$\Delta T = 0$	$\Delta V = 0$	$\Delta p = 0$	$Q = 0$
$\Delta U = 0$	$A' = 0$	$Q = \Delta U + A'$	$\Delta U + A' = 0$
$Q = A'$	$Q = \Delta U$		$\Delta U = -A'$
			$\Delta U = A$

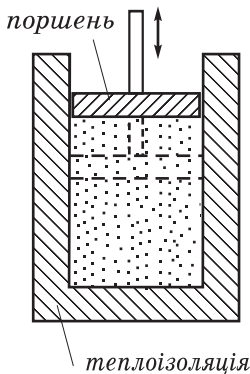
Діаграма адіабатичного процесу в координатах p, V .

Адіабата ($pV^\gamma = \text{const}$) розміщується більш круто, ніж ізотерма ($T = \text{const}, pV = \text{const}$). Це пояснюється тим, що при

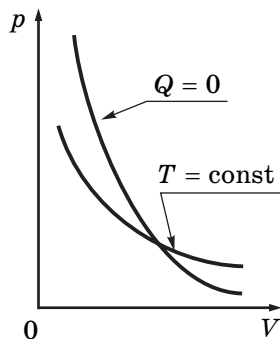
3. ДРУГИЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМІКИ. ЕНТРОПІЯ

адіабатичному стисненні збільшення тиску газу зумовлено не тільки зменшенням його об'єму, як при ізотермічному стисненні, а й підвищенням температури. При адіабатичному розширенні температура знижується ($\Delta U = -A'$), при стисненні — підвищується ($\Delta U = A$) (рис. 153, б).

Оскільки ідеальної теплоізолюючої оболонки бути не може, адіабатичний процес у природі може бути тільки швидкоплинним: $Q \rightarrow 0$.



а



б

Рис. 153

3. ДРУГИЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМІКИ. ЕНТРОПІЯ

Другий закон (друге начало) термодинаміки:

- Неможливо здійснити такий періодичний процес, єдиним наслідком якого було б повне перетворення на роботу теплоти, отримуваної від нагрівача (формулювання Кельвіна).
- Неможливий процес, єдиним результатом якого є передача енергії у формі теплоти від менш нагрітого тіла до більш нагрітого (формулювання Клаузіуса).

- *Вічний двигун другого роду неможливий, тобто двигун, ККД якого при перетворенні теплоти на роботу дорівнює 100 % (формулювання Карно).*

Упорядкований рух може переходити в неупорядкований спонтанно (природний процес) — це, наприклад, перетворення механічної енергії на теплову. Зворотний процес спонтанно відбуватися не може (необоротний процес), але він можливий за умови виконання роботи зовнішніми силами.

Друге начало термодинаміки визначає направленість процесу, його ймовірність. Імовірність події вимірюється відношенням кількості способів її здійснення до кількості способів здійснення всіх можливих подій.

Ентропія (S) — це функція, що характеризує міру хаотичності в системі, яка перебуває у стані, ймовірність здійснення якого w . При цьому ентропія пропорційна логарифму ймовірності: $S = k \cdot \ln w$. Якщо стан системи установлюється єдиним способом, його ймовірність $w = 1$, а ентропія $S = k \cdot \ln 1 = 0$.

У такій термінології друге начало термодинаміки формулюється так:

- *Можливі лише такі процеси, при яких ентропія не змінюється або зростає:*

$$\Delta S \geq 0 \quad (\text{нерівність Клаузіуса}).$$

4. ТЕПЛОВІ ДВИГУНИ

Тепловий двигун — машина, що перетворює внутрішню енергію палива на механічну енергію.

Тепловий двигун має працювати циклічно; після розширення газу настає стиснення.

Три основні частини теплового двигуна (рис. 154, а):

- 1) нагрівач (T_1) — джерело внутрішньої енергії;
- 2) робоче тіло (газ або пара), що виконує механічну роботу за рахунок внутрішньої енергії, отриманої від нагрівача;

3) холодильник ($T_2 < T_1$), що забезпечує природний процес передачі тепла від більш нагрітого тіла до більш холодного, чим здійснює компенсацію процесу перетворення теплової енергії на механічну. Холодильником може бути оточуюче середовище (так охолоджується радіатор побутового кондиціонера, радіатор двигуна внутрішнього згоряння).

Цикл Карно — схема ідеальної теплової машини (з найвищим ККД).

Робота газу, що здійснюється, повністю відбувається за рахунок кількості теплоти, відданої нагрівачем. При стисненні газу робота зовнішніх сил повністю перетворюється на теплоту, що віддається холодильнику (рис. 154, б).

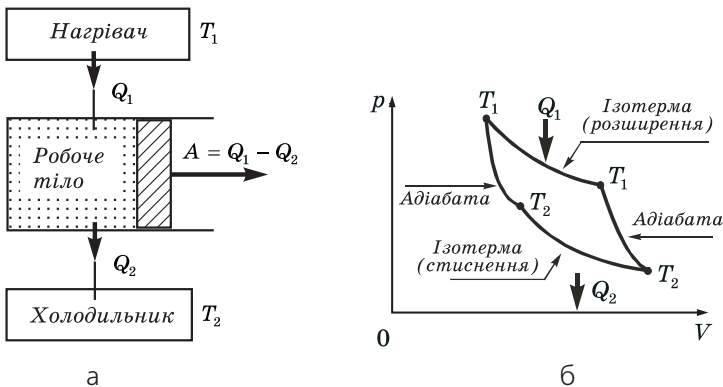


Рис. 154

Термодинамічний (термічний) ККД теплового двигуна:

$$\eta_{\tau} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}, \text{ де } Q_1 - Q_2 = A_{\text{робочого тіла}}.$$

Теорема Карно: термічний ККД циклу Карно не залежить від природи робочого тіла і є лише функцією температур нагрівача (T_1) і холодильника (T_2):

$$\eta_i = \frac{T_1 - T_2}{T_1}.$$

ККД реальних теплових машин менший від ККД ідеальної машини. У реальній тепловій машині завжди наявні

втрати на нагрівання, механічну роботу в механізмі машини; таким чином, корисна робота є меншою за роботу робочого тіла:

$$A_{\text{кор}} < Q_1 - Q_2.$$

Економічний ККД теплової машини — це відношення корисної роботи двигуна ($A_{\text{кор}} = N \cdot t$) до кількості теплоти, виділеної при згорянні палива:

$$\eta_{\text{ек}} = \frac{A_{\text{кор}}}{qm}.$$

Деякі види теплових машин:

1. Парова і газова турбіни.
2. Парові машини.
3. Поршневі двигуни внутрішнього згорання:
 - а) карбюраторні (бензинові),
 - б) дизелі.
4. Безпоршневі двигуни внутрішнього згорання (реактивні двигуни).

ККД сучасних дизелів досягає 40 %. Принцип роботи дизельного двигуна: 1-й такт — всмоктується повітря, 2-й такт — відбувається швидке стиснення повітря (отже, його розігрів), 3-й такт — через форсунку впорскується паливе, від високої температури воно самозапалюється. Продукти згорання, розширюючись, виконують роботу з переміщення поршня, 4-й такт — вихід (вихлоп) продуктів згорання. Потім процес повторюється (рис. 155).

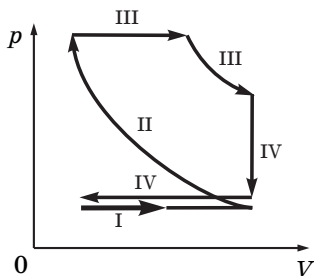


Рис. 155

5. ПРИКЛАДИ РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧ

Задача 1.

Об'єм 160 г водню, температура якого 27 °С, при ізобарному нагріванні збільшився вдвічі. Визначити роботу газу

5. ПРИКЛАДИ РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧ

при розширенні, кількість теплоти, що пішла на його нагрівання, зміну внутрішньої енергії.

Дано:

$$t_1 = 27^\circ \text{C}$$

$$m = 160 \text{ г}$$

$$M(\text{H}_2) = 2 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{моль}}$$

$$p = \text{const}$$

$$V_2 = 2V_1$$

$$i = 5$$

$$A' = ?$$

$$\Delta U = ?$$

$$Q = ?$$

Сі:

$$T_1 = 300 \text{ К}$$

$$m = 0,16 \text{ кг}$$

$$M(\text{H}_2) = 2 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{моль}}$$

$$p = \text{const}$$

$$V_2 = 2V_1$$

$$i = 5$$

Розв'язання:

При ізобарному нагріванні робота газу дорівнює:

$$A' = p\Delta V.$$

За рівнянням Клапейрона—Менделєєва:

$$p\Delta V = \frac{m}{M} R\Delta T,$$

отже, робота газу при ізобарному процесі:

$$A' = \frac{m}{M} R\Delta T. \quad (1)$$

Зміна внутрішньої енергії двоатомного ідеального газу дорівнює:

$$\Delta U = \frac{i}{2} \frac{m}{M} R\Delta T = \frac{5}{2} \frac{m}{M} R\Delta T. \quad (2)$$

За другим законом термодинаміки визначимо кількість теплоти:

$$Q = \Delta U + A'.$$

Тоді

$$Q = \frac{5}{2} \frac{m}{M} R\Delta T + \frac{m}{M} R\Delta T = \frac{7}{2} \frac{m}{M} R\Delta T. \quad (3)$$

Кінцеву температуру T_2 визначимо за законом Гей-Люссака:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2}, \quad T_2 = \frac{V_2 T_1}{V_1} = \frac{2V_1 T_1}{V_1} = 2T_1.$$

Зміна температури ΔT дорівнює:

$$\Delta T = T_2 - T_1 = 2T_1 - T_1 = T_1.$$

Підставимо значення ΔT у формули (1), (2), (3) і отримаємо:

$$A' = \frac{m}{M} RT_1, \quad \Delta U = \frac{5}{2} \frac{m}{M} RT_1, \quad Q = \frac{7}{2} \frac{m}{M} RT_1.$$

Обчислення:

$$A' = [\Delta U] = [Q] = \frac{\text{кг} \cdot \text{моль} \cdot \text{Дж} \cdot \text{К}}{\text{кг} \cdot \text{К} \cdot \text{моль}} = \text{Дж},$$

$$\{A'\} = \frac{0,16 \cdot 8,31 \cdot 300}{2 \cdot 10^{-3}} = 199\,440,$$

$$\{\Delta U\} = \frac{5 \cdot 0,16 \cdot 8,31 \cdot 300}{2 \cdot 2 \cdot 10^{-3}} = 498\,600,$$

$$\{Q\} = \frac{7 \cdot 0,16 \cdot 8,31 \cdot 300}{2 \cdot 2 \cdot 10^{-3}} = 698\,040.$$

Відповідь: $A' = 199,4$ кДж, $\Delta U = 498,6$ кДж, $Q = 698,04$ кДж.

Задача 2.

Один моль ідеального газу здійснює замкнений процес, що складається з двох ізохор і двох ізобар. Визначити роботу, здійснювану газом за один цикл, якщо точки 2 і 4 лежать на одній ізотермі.

Дано:
T_1
T_3
$T_2 = T_4 = T$
$\nu = 1$ моль
$A' \text{ — ?}$

Розв'язання:

Робота при замкненому циклі дорівнює площі фігури (1—2—3—4) у координатах pV :

$$\begin{aligned} A' &= (p_2 - p_1) \cdot (V_4 - V_1) = \\ &= p_2 V_4 - p_2 V_1 - p_1 V_4 + p_1 V_1. \end{aligned}$$

Застосуємо рівняння Клапейрона—Менделєєва для одного моля у кожному стані газу:

$$p_1 V_1 = RT_1, \quad p_2 V_2 = RT_2, \quad p_3 V_3 = RT_3, \quad p_4 V_4 = RT_4.$$

Із рис. 156 випливає:

$$p_4 = p_1, \quad p_3 = p_2, \quad V_2 = V_1, \quad V_3 = V_4.$$

Підставимо відповідні значення у рівняння Клапейрона—Менделєєва:

$$p_1 V_1 = RT_1, \quad (1)$$

$$p_2 V_1 = RT_2, \quad (2)$$

$$p_2 V_4 = RT_3, \quad (3)$$

$$p_1 V_4 = RT_4. \quad (4)$$

Підставимо рівняння (1) — (4) у формулу для роботи газу:

$$\begin{aligned} A' &= RT_3 - RT_2 - RT_4 + RT_1 = \\ &= R(T_3 - 2T + T_1), \end{aligned}$$

оскільки $T_2 = T_4 = T$.

Перетворивши рівняння (1) — (4), виявимо зв'язок T з T_1 і T_3 :

$$\left\{ \begin{array}{l} p_1 V_1 = RT_1, \quad T_1 = \frac{p_1 V_1}{R}, \\ p_2 V_2 = RT, \quad T = \frac{p_2 V_2}{R}, \end{array} \right\} \frac{T}{T_1} = \frac{p_2 V_2 R}{p_1 V_1 R} = \frac{p_2}{p_1},$$

$$\left\{ \begin{array}{l} p_2 V_4 = RT_3, \quad T_3 = \frac{p_2 V_4}{R}, \\ p_1 V_4 = RT, \quad T = \frac{p_1 V_4}{R}, \end{array} \right\} \frac{T_3}{T} = \frac{p_2 V_4 R}{p_1 V_4 R} = \frac{p_2}{p_1}.$$

$$\text{Отже: } \frac{T}{T_1} = \frac{T_3}{T} \Rightarrow T = \sqrt{T_1 T_3}.$$

Відповідь: робота газу $A' = R(T_3 - 2\sqrt{T_1 T_3} + T_1)$.

Задача 3.

У калориметрі масою m_1 , питома теплоємність якого c_1 , міститься вода масою m_2 , нагріта до температури t_1 . У калориметр опускають суміш мідних і алюмінієвих ошурків масою m , які мають температуру t_2 . У результаті температура води підвищується до θ . Визначити масу мідних і алюмінієвих ошурків.

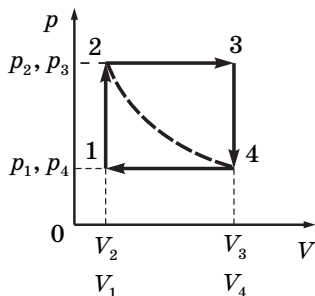


Рис. 156

Дано:

$$m_{\text{к}} = m_1 \quad m_{\text{суміші}} = m = m_3 + m_4$$

$$c_{\text{к}} = c_1 \quad c_{\text{Al}} = c_3$$

$$t_{\text{п.к}} = t_1 \quad c_{\text{Cu}} = c_4$$

$$m_{\text{в}} = m_2 \quad t_{\text{п Al}} = t_{\text{п Cu}} = t_2$$

$$c_{\text{в}} = c_2 \quad \theta$$

$$t_{\text{п.в}} = t_1$$

$$m_3 \text{ — ?}$$

$$m_4 \text{ — ?}$$

Розв'язання:

Закон збереження енергії для теплових процесів має вигляд:

$$Q_{\text{одерж}} = Q_{\text{від}},$$

$$Q_{\text{одерж}} = Q_1 + Q_2 =$$

$$= c_{\text{к}} m_{\text{к}} (\theta - t_1) + c_{\text{в}} m_{\text{в}} (\theta - t_1),$$

$$Q_{\text{одерж}} = c_1 m_1 (\theta - t_1) + c_2 m_2 (\theta - t_1),$$

$$Q_{\text{від}} = m_3 c_3 (t_2 - \theta) + m_4 c_4 (t_2 - \theta).$$

Прирівняємо $Q_{\text{одерж}}$ і $Q_{\text{від}}$ і спростимо:

$$(\theta - t_1) \cdot (c_1 m_1 + c_2 m_2) = (t_2 - \theta) \cdot (c_3 m_3 + c_4 m_4).$$

Оскільки $m = m_3 + m_4$, то отримуємо два рівняння з двома невідомими. Знайдемо m_4 і m_3 :

$$m_4 = \frac{(\theta - t_1) \cdot (c_1 m_1 + c_2 m_2) - c_3 m (t_2 - \theta)}{(t_2 - \theta) \cdot (c_4 - c_3)},$$

$$m_3 = m - m_4 = \frac{m(t_2 - \theta) \cdot c_4 - (\theta - t_1) \cdot (c_1 m_1 + c_2 m_2)}{(t_2 - \theta) \cdot (c_4 - c_3)}.$$

$$\text{Відповідь: } m_3 = \frac{m(t_2 - \theta) \cdot c_4 - (\theta - t_1) \cdot (c_1 m_1 + c_2 m_2)}{(t_2 - \theta) \cdot (c_4 - c_3)},$$

$$m_4 = \frac{(\theta - t_1) \cdot (c_1 m_1 + c_2 m_2) - c_3 m(t_2 - \theta)}{(t_2 - \theta) \cdot (c_4 - c_3)}.$$

Задача 4.

На електроплитці з ККД 78 % нагрівалась мідна каструля з водою. Маса каструлі 800 г, маса води 2,1 кг. Яка потужність електроплитки, якщо процес нагрівання до кипіння тривав 40 хв і при цьому 15 % води випарувалось? Початкова температура води 15 °С.

5. ПРИКЛАДИ РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧ

Дано:

$$\eta = 78 \%$$

$$m_1 = 800 \text{ г} = 0,8 \text{ кг}$$

$$c_1 = c_{\text{Cu}} = 380 \frac{\text{Дж}}{(\text{кг} \cdot \text{К})}$$

$$m_2 = 2,1 \text{ кг}$$

$$c_2 = c_{\text{в}} = 4200 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

$$\tau = 40 \text{ хв} = 2400 \text{ с}$$

$$t_{\text{п}1} = t_{\text{п}2} = t_{\text{п}} = 15^\circ \text{C}$$

$$m_3 = m_{\text{п}} = 0,15 m_{\text{в}} = 0,15 m_2$$

$$L_{\text{в}} = 2,3 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$$

$$N_{\text{затр}} \text{ — ?}$$

Розв'язання:

$$\eta = \frac{Q_{\text{кор}}}{Q_{\text{затр}}} \cdot 100 \%,$$

$$Q_{\text{кор}} = Q_1 + Q_2 + Q_3 =$$

$$= c_1 m_1 (\theta - t_{\text{п}}) + c_2 m_2 (\theta - t_{\text{п}}) + L m_{\text{п}},$$

$$Q_{\text{затр}} = N_{\text{затр}} \cdot \tau.$$

ККД електроплитки дорівнює:

$$\eta = \frac{c_1 m_1 (\theta - t_{\text{п}}) + c_2 m_2 (\theta - t_{\text{п}}) + L m_{\text{п}}}{N_{\text{затр}} \cdot \tau} \cdot 100 \%.$$

Звідси

$$N_{\text{затр}} = \frac{c_1 m_1 (\theta - t_{\text{п}}) + c_2 m_2 (\theta - t_{\text{п}}) + L m_{\text{п}}}{\eta \cdot \tau} \cdot 100 \%.$$

Обчислення:

$$[N_{\text{затр}}] = \frac{\text{Дж} \cdot \text{К} \cdot \text{кг}}{\text{кг} \cdot \text{К} \cdot \text{с}} = \frac{\text{Дж}}{\text{с}} = \text{Вт},$$

$$\{N_{\text{затр}}\} = \frac{380 \cdot 0,8 \cdot (100 - 15) \cdot 100}{78 \cdot 2400} +$$

$$+ \frac{4200 \cdot 2,1 \cdot (100 - 15) \cdot 100}{78 \cdot 2400} + \frac{2,3 \cdot 10^6 \cdot 0,15 \cdot 2,1 \cdot 100}{78 \cdot 2400} \approx 800.$$

Відповідь: $N_{\text{затр}} \approx 800 \text{ Вт}$.

Задача 5.

Свинцева куля, що летить зі швидкістю v_0 , пробивши дошку, зменшує свою швидкість до v . Початкова температура t . Визначити, яка частина кулі розплавиться, якщо вважати, що на нагрівання пішла k -та частина втраченої кінетичної енергії ($k < 1$).

Дано:

$t_{\text{п}} = t$

$t_{\text{к}} = t_{\text{пл}}$

v_0

v

c

$Q = k\Delta E_{\text{к}}$

$$\frac{m_{\text{рід}}}{m} \text{ — ?}$$

Розв'язання:

Зміна кінетичної енергії кулі дорівнює:

$$\Delta E_{\text{к}} = \frac{mv^2}{2} - \frac{mv_0^2}{2} = \frac{m}{2}(v^2 - v_0^2).$$

Кількість теплоти, отриманої кулею на нагрівання й часткове плавлення:

$$Q = cm(t_{\text{пл}} - t) + \lambda m_{\text{рід}}.$$

Ця величина є k -ю частиною втраченої енергії кулі:

$$Q = k\Delta E_{\text{к}},$$

отже,

$$cm(t_{\text{пл}} - t) + \lambda m_{\text{рід}} = k \frac{m}{2}(v^2 - v_0^2).$$

Розділивши обидві частини рівняння на λ , отримаємо шукану величину:

$$\frac{m_{\text{рід}}}{m} = \frac{k(v^2 - v_0^2) - 2c(t_{\text{пл}} - t)}{2\lambda}.$$

$$\text{Відповідь: } \frac{m_{\text{рід}}}{m} = \frac{k(v^2 - v_0^2) - 2c(t_{\text{пл}} - t)}{2\lambda}.$$

Задача 6.

Що станеться, якщо в посудину з водою при 0°C покласти кусок льоду при 0°C ($p = p_{\text{атм}}$)?

Розв'язання:

Лід тане при 0°C при $p_{\text{атм}} = 10^5$ Па лише тоді, коли він отримує кількість теплоти, необхідної для перетворення його на рідину. Вода буде кристалізуватися при 0°C тільки в тому випадку, коли вона віддаватиме таку ж кількість теплоти (якщо маси води і льоду однакові). Лід і вода перебувають у термодинамічній рівновазі, яка виключає теплообмін. Отже, ніяких змін у посудині не станеться.

Задача 7.

У посудині з водою швидко відкачують повітря при 0°C . Що станеться в посудині?

Розв'язання:

За рахунок інтенсивного випаровування частини води з посудини станеться поступове заморожування частини води, що залишилася:

$$Q_{\text{від}} = Q_{\text{одерж}}, \quad Lm_{\text{парі}} = \lambda m_{\text{льоду}}.$$

Температура у посудині під час цього процесу не змінюється.

Задача 8.

Тверда ртуть масою 15 г при -40°C поміщена у воду масою 6 г при 7°C . Визначити температуру суміші й масу кінцевих продуктів.

Дано:

$$m_1 = 6 \text{ г} = 6 \cdot 10^{-3} \text{ кг}$$

$$c_1 = 4200 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

$$t_{\text{п}_1} = 7^\circ\text{C}$$

$$m_2 = 15 \text{ г} = 15 \cdot 10^{-3} \text{ кг}$$

$$t_{\text{п}_2} = -40^\circ\text{C}$$

$$c_2 = 138 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

$$\lambda_{\text{рт}} = \lambda_2 = 11,7 \cdot 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$$

$$\lambda_{\text{льоду}} = 3,34 \cdot 10^5 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$$

$$c_{\text{льоду}} = 2100 \frac{\text{Дж}}{(\text{кг} \cdot \text{К})}$$

$$t_{\text{пл}_2} = -39^\circ\text{C}$$

$$t_{\text{кр}_1} = 0^\circ\text{C}$$

$$\theta \text{ — ?}, \quad m'_\text{в} \text{ — ?},$$

$$m_\text{л} \text{ — ?}$$

Розв'язання:

Вихідна суміш складається з двох компонентів — ртуті й води. Оскільки температура ртуті нижча точки кристалізації води, то можлива поява третього компонента — льоду. Це залежить від стану системи в момент, коли температура суміші знизиться до 0°C .

Обчислимо кількість теплоти Q_1 , відданої водою при охолодженні до 0°C :

$$Q_{\text{від}} = Q_1 = c_1 m_1 (t_{\text{п}_1} - t_{\text{кр}_1}) = 4200 \cdot 6 \cdot 10^{-3} (7 - 0) \approx 176 \text{ Дж}.$$

Графік залежності температури від часу для води зображений на рис. 157, а.

Обчислимо кількість теплоти Q_2 , яка пішла на нагрівання ртуті до температури плавлення (від -40 до -39°C),

при плавленні ртуті Q_3 і нагріванні рідкої ртуті (від -39 до 0°C) Q_4 . Приймаємо питому теплоємність ртуті як незмінну у твердій і рідкій фазах:

$$Q_{\text{одерж}} = Q_2 + Q_3 + Q_4 = c_2 m_2 (t_{\text{пл}_2} - t_{\text{п}_2}) + \lambda_2 m_2 + c_2 m_2 (t_{\text{кр}_1} - t_{\text{пл}_2}),$$

$$Q_{\text{одерж}} = 138 \cdot 15 \cdot 10^{-3} \cdot (-39 + 40) +$$

$$+ 11,7 \cdot 10^3 \cdot 15 \cdot 10^{-3} + 138 \cdot 15 \cdot 10^{-3} (0 + 39) \approx 258 \text{ Дж.}$$

Графік залежності температури від часу для ртуті показаний на рис. 157, б.

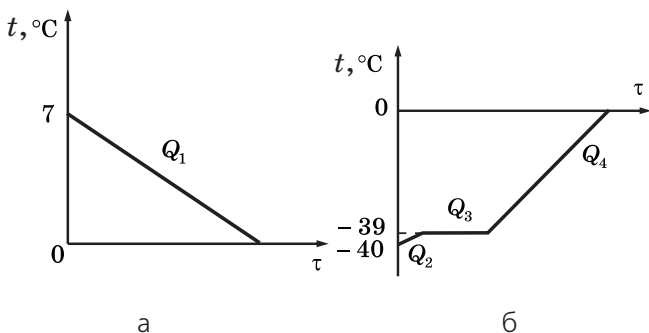


Рис. 157

Порівняємо $Q_{\text{від}}$ і $Q_{\text{одерж}}$. Якщо $Q_{\text{від}} = Q_{\text{одерж}}$, то температура суміші дорівнювала б 0°C . Якщо $Q_{\text{від}} > Q_{\text{одерж}}$, то ртуть мала б температуру вище 0°C . В обох випадках було б два компоненти суміші — рідка ртуть і вода.

У нашому випадку $Q_{\text{від}} < Q_{\text{одерж}}$, отже, вода перетворюватиметься на лід (повністю або частково), і температура суміші може стати нижчою 0°C (при повному замерзанні води). Масу утвореного льоду можна визначити за формулою:

$$m_{\text{л}} = \frac{Q_{\text{одерж}} - Q_{\text{від}}}{\lambda_{\text{льоду}}},$$

$$m_{\text{л}} = \frac{(258 \text{ Дж} - 176 \text{ Дж}) \text{ кг}}{3,34 \cdot 10^5 \text{ Дж}} \approx 24,55 \cdot 10^{-5} \text{ кг},$$

$$m_{\text{л}} \approx 0,25 \text{ г} < m_{\text{в}}.$$

Маса води дорівнюватиме:

$$m'_B = 6 \text{ г} - 0,25 \text{ г} = 5,75 \text{ г}.$$

Відповідь: температура суміші, у яку входять лід, вода і ртуть, дорівнюватиме 0°C . Суміш міститиме в собі 0,25 г льоду, 5,75 г води і 15 г ртуті.

Задача 9.

Двигун внутрішнього згоряння має ККД 28 % при температурі згоряння палива 927°C і температурі відхідних газів 447°C . На скільки ККД двигуна менший від ККД ідеальної теплової машини?

Дано:

$$t_1 = 927^\circ\text{C}$$

$$t_2 = 447^\circ\text{C}$$

$$\eta = 28\%$$

$$\Delta\eta \text{ — ?}$$

Сі:

$$T_1 = 1200 \text{ К}$$

$$T_2 = 720 \text{ К}$$

$$\eta = 28\%$$

Розв'язання:

$$\eta_i = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \cdot 100\%, \quad \Delta\eta = \eta_i - \eta.$$

Обчислення:

$$\eta_i = \frac{1200 - 720}{1200} \cdot 100\% = 40\%,$$

$$\Delta\eta = (40 - 28)\% = 12\%.$$

Відповідь: ККД двигуна менший від ККД ідеальної теплової машини на 12 %.

Задача 10.

Яку середню потужність розвиває двигун мотоцикла, якщо при швидкості 108 км/год витрачається бензину 3,7 л на 100 км шляху, а ККД двигуна 25 %? Густина бензину 700 кг/м^3 .

ОСНОВИ ТЕРМОДИНАМІКИ

Дано:

$$v = 108 \frac{\text{км}}{\text{год}}$$

$$V = 3,7 \text{ л}$$

$$S = 100 \text{ км}$$

$$\eta = 25 \%$$

$$\rho = 700 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

$$q = 46 \cdot 10^6 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$$

 $N = ?$

СІ:

$$v = 30 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

$$V = 3,7 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$$

$$S = 1 \cdot 10^5 \text{ м}$$

$$\eta = 0,25$$

$$\rho = 700 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

$$q = 46 \cdot 10^6 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$$

Розв'язання:

Економічний ККД:

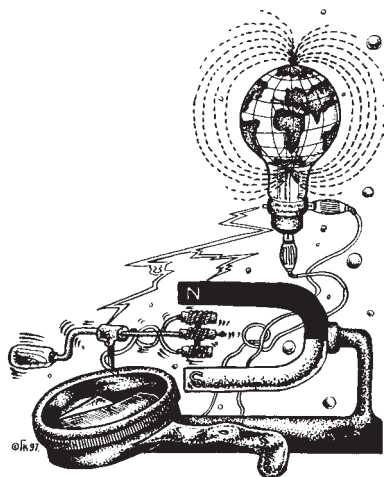
$$\left. \begin{aligned} \eta &= \frac{A}{Q} \\ A &= N \cdot t \\ t &= \frac{S}{v} \\ Q &= mq \\ m &= V\rho \end{aligned} \right\} \begin{aligned} \eta &= \frac{N \cdot S}{V \cdot \rho \cdot q \cdot v}, \\ N &= \frac{\eta \cdot V \cdot \rho \cdot q \cdot v}{S}. \end{aligned}$$

Обчислення:

$$N = \frac{0,25 \cdot 3,7 \cdot 10^{-3} \cdot 700 \cdot 46 \cdot 10^6}{10^5} \text{ Вт} \approx 8,9 \cdot 10^3 \text{ Вт}.$$

Відповідь: $N \approx 8,9 \text{ кВт}$.

ЕЛЕКТРОДИНАМІКА



1. ЕЛЕКТРОСТАТИКА

1.1. ЕЛЕКТРИЧНИЙ ЗАРЯД. ЗАКОН ЗБЕРЕЖЕННЯ ЗАРЯДУ

Електричний заряд (q) — фізична величина, яка характеризує властивість тіл і частинок вступати в електромагнітну взаємодію. Розрізняють **позитивні** та **негативні** заряди.

Мінімальний електричний заряд, що існує у природі, — це **заряд елементарних частинок** — електронів (e). Електричний заряд будь-якого тіла дорівнює цілому числу **елементарних зарядів** (e).

Одиниця виміру заряду в СІ — 1 Кл (1 кулон):

$$1 \text{ Кл} = 1 \text{ А} \cdot \text{с} ,$$

$$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}.$$

1 кулон — це заряд, що протікає через поперечний переріз провідника протягом 1 с при силі постійного струму в 1 А.

Закон збереження заряду: алгебраїчна сума зарядів усіх тіл ізольованої системи залишається незмінною при будь-яких процесах чи явищах усередині системи:

$$q_1 + q_2 + \dots + q_n = \text{const} .$$

1.2. ВЗАЄМОДІЯ ЗАРЯДІВ. ЗАКОН КУЛОНА

Різнойменно заряджені тіла і частинки притягуються, однойменно заряджені — відштовхуються.

Закон Кулона: модуль сили електростатичної взаємодії між двома точковими зарядами q_1 і q_2 , які містяться у вакуумі, прямо пропорційний добутку модулів їхніх зарядів і обернено пропорційний квадрату відстані r між ними (рис. 158):

$$F = k \cdot \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{r^2},$$

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

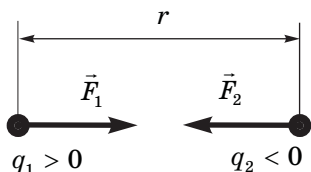


Рис. 158

Ідеться про взаємодію заряджених тіл або частинок, а не власне зарядів.

Електричні заряди називаються **точковими**, якщо розподілені на тілах, лінійні розміри яких значно менші, ніж будь-які інші розміри в даній задачі.

Коефіцієнт пропорційності в законі Кулона (k) — величина, яка чисельно дорівнює силі взаємодії двох точкових зарядів по 1 Кл кожний, що розташовані на відстані 1 м один від одного у вакуумі:

$$k = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2}.$$

У діелектриках сила взаємодії зменшується в ϵ разів:

$$F = k \cdot \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{\epsilon \cdot r^2},$$

де ϵ — діелектрична проникність середовища.

У теорії електрики k замінюється на $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$:

$$F = \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{4\pi \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon \cdot r^2},$$

$$\epsilon_0 = \frac{1}{4\pi k} = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Кл}^2}{\text{Н} \cdot \text{м}^2},$$

де ϵ_0 — **електрична стала**.

1.3. ЕЛЕКТРИЧНЕ ПОЛЕ. ЕЛЕКТРОСТАТИЧНЕ ПОЛЕ. НАПРУЖЕНІСТЬ ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ. ПРИНЦИП СУПЕРПОЗИЦІЇ ПОЛІВ

Електричне поле — це вид матерії (частковий випадок електромагнітного поля), основною особливістю якої є дія на тіла й частинки, що мають електричний заряд.

Розрізняють два основних види електричних полів: **електростатичне і вихрове (індукційне)**.

Електростатичні поля — це електричні поля, які існують навколо нерухомих (у даній системі відліку) тіл або частинок, що мають електричний заряд.

Напруженість електричного поля ($\vec{E}$) — силова характеристика поля. Це векторна величина, що дорівнює відношенню сили, з якою поле діє на пробний заряд, до величини цього заряду:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}, \quad [E] = 1 \frac{\text{Н}}{\text{Кл}}.$$

Пробний заряд — це точковий позитивний заряд, що вноситься в поле.

Сила, з якою діє електростатичне поле, називається **кулонівською силою**:

$$\vec{F} = q \cdot \vec{E}.$$

Лінії напруженості (силові лінії) електричного поля — неперервні лінії, дотичні до яких у кожній точці, через яку вони проходять, збігаються з вектором напруженості поля.

Лінії напруженості електростатичного поля починаються на позитивно зарядженому тілі і закінчуються на негативно зарядженому тілі (рис. 159, а, б).

Принцип суперпозиції (накладання): напруженість поля системи зарядів дорівнює векторній сумі напруженостей полів, створюваних кожним із зарядів окремо:

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \dots + \vec{E}_n.$$

Поля не взаємодіють, а накладаються. Заряди взаємодіють, оскільки поле одного заряду діє на інший, і навпаки (рис. 160, а).

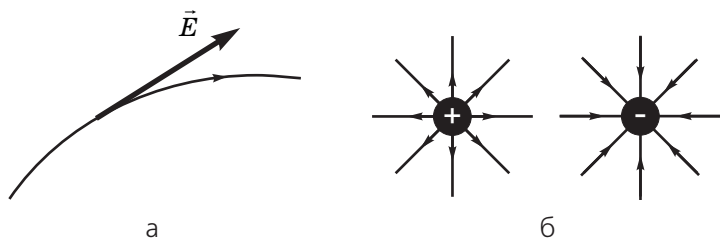


Рис. 159

Напруженість поля точкового заряду:

$$E_1 = k \cdot \frac{|q|}{\epsilon r_2} = \frac{|q|}{4\pi\epsilon_0\epsilon r^2}.$$

Такий же вигляд має напруженість поля зарядженої сфери, де r — відстань від центра сфери (рис. 160, б).

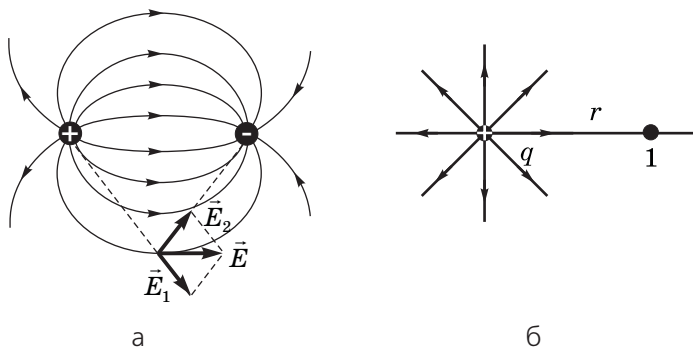


Рис. 160

Напруженість поля нескінченної зарядженої плоскої поверхні (однорідне поле):

$$E = \frac{|\sigma|}{2\epsilon_0\epsilon}.$$

Поверхнева густина заряду (σ) — це величина, що дорівнює електричному заряду, який припадає на одиницю площі поверхні (рис. 161):

$$\sigma = \frac{q}{S}.$$

Для рівномірно різнойменно заряджених паралельних нескінченних площин напруженість подвоюється (рис. 162):

$$E = 2E_{\text{пл}} = \frac{|\sigma|}{\epsilon_0 \epsilon}.$$

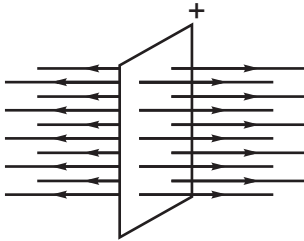


Рис. 161

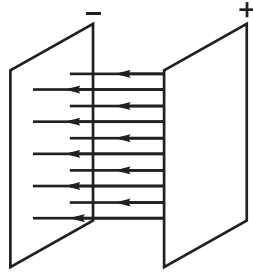


Рис. 162

В навколишньому просторі $E = 0$.

Потік вектора напруженості (N) (рис. 163):

$$N = ES \cos \alpha,$$

де α — кут між $\vec{E}$ і нормаллю $\vec{n}$ до площини S .

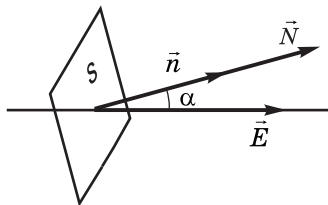


Рис. 163

Теорема Остроградського—Гаусса: потік вектора напруженості через будь-яку замкнену поверхню, яка оточує електричні заряди, дорівнює:

$$N = \frac{1}{\epsilon_0 \epsilon} \sum q.$$

1.4. ЕЛЕКТРИЧНЕ ПОЛЕ У РЕЧОВИНІ

За здатністю проводити електричні заряди всі речовини умовно поділяються на провідники, діелектрики (непровідники), напівпровідники.

Речовини, де електричні заряди вільно пересуваються, називаються **провідниками**. Ними є ґрунт, тіло людини, всі метали у твердому та рідкому станах, водні розчини солей, кислот, лугів, розплавлені солі та іонізовані гази.

В інших речовинах, названих **діелектриками**, електричні заряди, надані їм, залишаються на тих самих місцях. Діелектриками є янтар, ебоніт, каучук, фарфор, повітря, сухе дерево, капрон тощо.

Є група речовин, які називаються **напівпровідниками**. При кімнатній температурі напівпровідники мають хоч і дуже малу, проте помітну електропровідність, тобто здатні проводити електричний струм. З підвищенням температури (або при опромінюванні) їхня електропровідність зростає. Напівпровідники займають проміжне місце між провідниками і діелектриками. До напівпровідників належать селен, кремній, германій, закис міді.

1.4.1. ПРОВІДНИКИ В ЕЛЕКТРОСТАТИЧНОМУ ПОЛІ (ЕЛЕКТРОСТАТИЧНА ІНДУКЦІЯ)

Розглянемо металевий провідник в електричному полі.

Металевий провідник складається із позитивних іонів, закріплених у вузлах кристалічної ґратки, і вільних електронів, які хаотично рухаються в ґратці.

Під впливом зовнішнього електричного поля $\vec{E}_0$ вільні електрони переміщуються в напрямку, протилежному напрямку $\vec{E}_0$. На кінцях провідника виникають заряди: уздовж поля — позитивні (надлишкові іони), проти поля — негативні (надлишок вільних електронів), які утворюють внутрішнє поле $\vec{E}_1$. Процес урівноважується, коли $E_1 = E_0$. Усередині провідника $E = E_0 - E_1 = 0$, а на його кінцях виникають різнойменні заряди, однакові за модулем (рис. 164):

$$\begin{aligned} F_1 &= F_0 ; E_1 = E_0 , \\ \vec{E} &= \vec{E}_0 + \vec{E}_1 \Rightarrow E = E_0 - E_1 = 0 , \\ q_{\text{електрона}} &= -e = -1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл.} \end{aligned}$$

Електростатичний захист — ізоляція від електростатичного поля металевою сіткою і т. п., яка оточує, наприклад, тіло людини, електролампу (рис. 165).

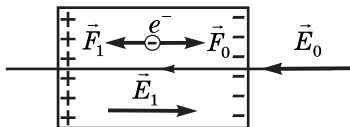


Рис. 164

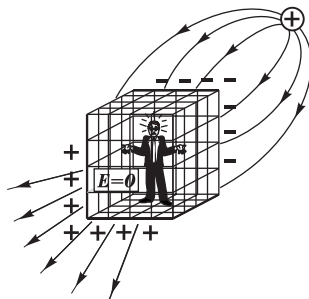


Рис. 165

1.4.2. ДІЕЛЕКТРИКИ В ЕЛЕКТРОСТАТИЧНОМУ ПОЛІ (ПОЛЯРИЗАЦІЯ ДІЕЛЕКТРИКА)

Якщо діелектрик складається із полярних молекул (тобто молекули є **диполями**: на одному кінці переважає позитивний заряд, на другому — негативний), то зовнішнім електричним полем вони орієнтуються вздовж ліній поля (рис. 166, а).

У зовнішньому полі у всіх діелектриків відбувається **поляризація молекул** (електронні оболонки в атомах і молекулах зміщуються в напрямку, протилежному $\vec{E}_0$). При цьому всередині діелектрика різнойменні заряди диполів взаємно компенсуються, а на поверхні утворюються **нескомпенсовані зв'язані заряди диполів**. Вони утворюють поле $E_1 < E_0$ (рис. 166, б):

$$\vec{E} = \vec{E}_0 + \vec{E}_1,$$

$$E = E_0 - E_1 < E_0.$$

Поляризація діелектрика — це виникнення в ньому поля $\vec{E}_1$ зв'язаних зарядів, яке послаблює зовнішнє поле $\vec{E}_0$.

Діелектрична проникність (ϵ) середовища — це число, яке визначає, у скільки разів напруженість зовнішнього

поля $\vec{E}_0$ більша від напруженості поля в діелектрику. Її величина залежить від виду матеріалу середовища:

$$\varepsilon = \frac{E_0}{E}.$$

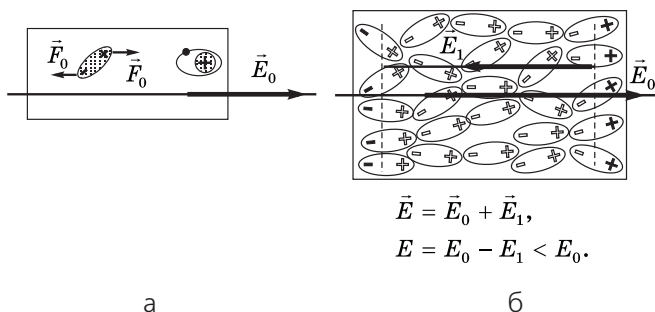


Рис. 166

1.5. РОБОТА В ЕЛЕКТРОСТАТИЧНОМУ ПОЛІ. ПОТЕНЦІАЛ ПОЛЯ. РІЗНИЦЯ ПОТЕНЦІАЛІВ ДВОХ ТОЧОК ПОЛЯ

Робота в електростатичному полі:

- не залежить від шляху, а визначається координатами точок, між якими переноситься заряд;
- у будь-якому замкненому контурі дорівнює нулю.

Такі поля називаються **потенціальними**.

Потенціал поля (ϕ) у даній точці є величина, що чисельно дорівнює роботі кулонівських сил при переміщенні одиничного позитивного заряду з даної точки у нескінченність:

$$\phi_1 = \frac{A_{\kappa 1-\infty}}{q}.$$

Іншими словами:

Потенціал поля в даній точці є величина, яка чисельно дорівнює потенціальній енергії одиничного позитивного заряду, поміщеного в дану точку, якщо його потенціальну енергію в нескінченності вважати рівною нулю:

$$\phi_1 = \frac{W_{\pi_1}}{q}, \text{ якщо } W_{\infty} = 0.$$

Потенціал електричного поля точкового заряду q , якщо вважати W_{∞} в нескінченності рівною нулю:

$$\varphi_1 = k \frac{q}{\epsilon r}, \text{ в теорії } \varphi_1 = \frac{q}{4\pi\epsilon_0\epsilon r}.$$

Еквіпотенціальна поверхня — це поверхня, всі точки якої мають однаковий потенціал (рис. 167).

Еквіпотенціальна поверхня і лінії напруженості поля в кожній точці поля взаємно перпендикулярні.

Поверхня електропровідного зарядженого тіла еквіпотенціальна.

Робота з переміщення заряду по еквіпотенціальній поверхні дорівнює нулю.

Напруженість у будь-якій точці електростатичного поля дорівнює зміні потенціалу ($\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$), який припадає на одиницю довжини ліній напруженості поля (l):

$$E_x = -\frac{\Delta\varphi}{l}, \quad [E] = \frac{\text{В}}{\text{м}}.$$

Вектор напруженості поля завжди напрямлений у бік зменшення потенціалу.

Різниця потенціалів двох точок поля — це величина, яка чисельно дорівнює роботі кулонівських сил при переміщенні одиничного позитивного заряду з першої точки у другу:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{A_{\kappa 1-2}}{q}, \quad [\varphi] = 1 \frac{\text{Дж}}{\text{Кл}} = 1 \text{ В}.$$

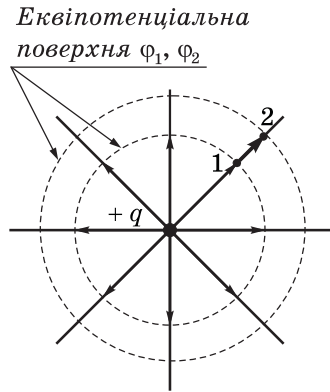


Рис. 167

1.6. ЕЛЕКТРИЧНА НАПРУГА

Сторонні сили — це будь-які сили, крім кулонівських, які діють на заряд.

Напруга — це величина, яка чисельно дорівнює роботі всіх (кулонівських і сторонніх) сил при перенесенні одиничного позитивного заряду через дану ділянку:

$$U = \frac{A_k + A_{\text{ст}}}{q}, \left(\frac{A}{q} \right), [U] = \text{В.}$$

Якщо діють тільки кулонівські сили, то

$$A = A_k \Rightarrow U = \phi_1 - \phi_2.$$

Робота на переміщення заряду q в електростатичному полі:

$$A = qU, \quad A = qEd,$$

де d — проекція переміщення заряду на лінію E .

1.7. ЕЛЕКТРИЗАЦІЯ ТІЛ

Якщо створити надлишок (або нестачу) електричних зарядів того чи іншого знака, то тіло буде **наелектризованим**.

Розрізняють **три види електризації**:

1. Електризація від дотику (тертя) різномірних тіл, наприклад скла і шовку. При контакті різномірних речовин невелика частина електронів атомів однієї з речовин (тієї, де зв'язок електронів з атомом відносно слабкий) переходить в іншу речовину. Тіло з надлишком електронів заряджається негативно (шовк), з нестачею (скло) — позитивно (рис. 168).
2. Електризація провідників через дотик до наелектризованого тіла. При дотику провідника до негативно зарядженого тіла частина вільних електронів під впливом електричного поля переходить на провідник. При дотику до позитивно зарядженого тіла частина вільних електронів залишає провідник. При цьому провідник електризується, а наелектризоване тіло частково розряджається (рис. 169).

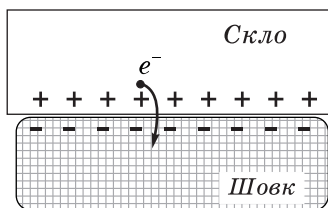


Рис. 168

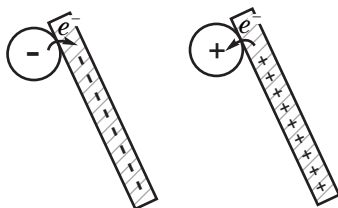
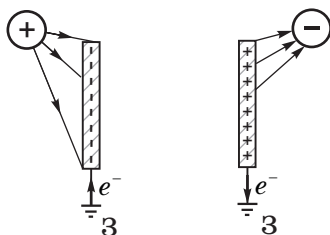


Рис. 169

3. Електризація через вплив. Провідник вноситься в електричне поле і на короткий час заземляється (достатньо доторкнути руки). При цьому залежно від напрямку ліній напруженості електричне поле або виштовхує із провідника в Землю, або притягує із Землі в провідник вільні електрони. Провідник виявляється зарядженим різноманітним з тілом, яке утворює електричне поле (рис. 170).



З – Земля

Рис. 170

Електризація тіл при тісному контакті застосовується в електрокопіювальних пристроях («Ера», «Ксерокс»).

1.8. ЕЛЕКТРИЧНА ЄМНІСТЬ. ПЛОСКИЙ КОНДЕНСАТОР. ЕНЕРГІЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ

Електрична ємність — це властивість двох провідників накопичувати заряд відповідно до різниці потенціалів, що виникає:

$$C = \frac{q}{U}, \text{ де } U = \varphi_1 - \varphi_2.$$

Фарад — це електрична ємність двох таких провідників, між якими при наданні кожному з них заряду 1 Кл (+1 Кл і -1 Кл) виникає різниця потенціалів 1 В:

$$[C] = 1 \frac{\text{Кл}}{\text{В}} = 1 \text{ Ф}.$$

Оскільки ємність 1 Ф дуже велика, то часто використовують 1 мкФ, 1 пФ.

Плоский конденсатор — це конструкція із плоских пластин провідника, розділених діелектриком (повітря, слюда, парафін та ін.) (рис. 171, а):

$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon \cdot S}{d}.$$

Електрична енергія конденсатора:

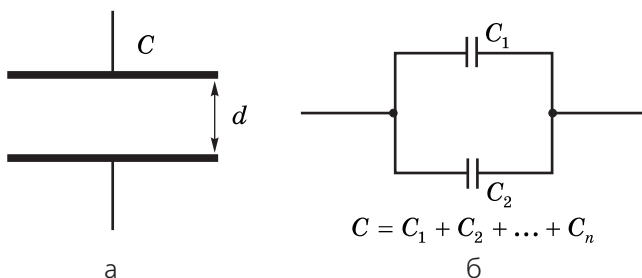
$$W_{\text{ел}} = \frac{CU^2}{2} = \frac{q^2}{2C} = \frac{qU}{2}.$$

При паралельному з'єднанні конденсаторів сумарна ємність зростає (рис. 171, б):

$$C = C_1 + C_2 + \dots + C_n,$$

а при послідовному з'єднанні конденсаторів зменшується (рис. 171, в):

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n}.$$



$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n}$$

в

Рис. 171

1.9. ПРИКЛАДИ РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧ

Задача 1.

Заряди 40 і -10 нКл закріплені на відстані 10 см один від одного. Який треба взяти третій заряд і де його

розмістити, щоб система перебувала в рівновазі? Якою буде ця рівновага?

Дано:

$$q_1 = 40 \text{ нКл}$$

$$q_2 = -10 \text{ нКл}$$

$$l = 10 \text{ см}$$

$$r_1 = 10 \text{ см}$$

$$q = ?$$

$$x = ?$$

СІ:

$$q = 4 \cdot 10^{-8} \text{ Кл}$$

$$q_1 = -1 \cdot 10^{-8} \text{ Кл}$$

$$l = 0,1 \text{ м}$$

$$r_1 = 10^{-1} \text{ м}$$

Розв'язання:

Третій заряд може бути розміщений тільки на лінії, яка проходить через заряди q_1 і q_2 , за меншим за модулем зарядом; тільки тоді буде виконуватись умова рівноваги: $\vec{F}_1 + \vec{F}_2 = 0$ (рис. 172).

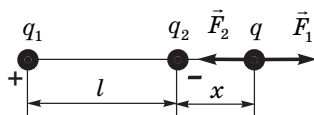


Рис. 172

У проекції на вісь Ox : $F_1 - F_2 = 0$, отже, $F_2 = F_1$.

$$k \frac{|q| \cdot |q_2|}{x^2} = k \frac{|q| \cdot |q_1|}{(l+x)^2}, \quad \frac{|q_2|}{x^2} = \frac{|q_1|}{(l+x)^2},$$

$$\frac{(l+x)^2}{x^2} = \frac{|q_1|}{|q_2|}, \quad \frac{l+x}{x} = \sqrt{\frac{|q_1|}{|q_2|}}, \quad \frac{l+x}{x} = 2,$$

$$l+x=2x, \quad x=l.$$

Відповідь: $x = 10$ см. Заряд q будь-який (він скорочується). Рівновага нестійка.

Задача 2.

У точці A поміщено заряд $q > 0$. Як зміниться напруга і потенціал поля в точці B , якщо в точці C помістити діелектричну кульку?

Розв'язання:

Відбудеться поляризація кульки, тобто на її поверхні виникнуть поляризаційні заряди q_1 і q_2 однакової величини.

Напруженість поля в точці B збільшиться, оскільки

$$\vec{E}_B = \vec{E} + \vec{E}_1 + \vec{E}_2 \Rightarrow E_B = E + E_1 - E_2, \text{ але } E_1 > E_2.$$

Потенціал поля в точці B зменшиться, тому що $\varphi_B = \varphi + \varphi_1 + \varphi_2$, але $\varphi_1 < 0$, $\varphi_2 > 0$, а $|\varphi_1| > |\varphi_2|$ (рис. 173).

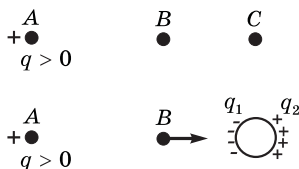


Рис. 173

Відповідь: напруженість поля в точці B збільшиться, а потенціал зменшиться.

Задача 3.

Визначити кількість електронів, які утворюють заряд пилінки масою $5 \cdot 10^{-9}$ г, якщо остання перебуває у стані рівноваги в електричному полі, створюваному двома зарядженими пластинами. Різниця потенціалів між пластинами $\varphi_1 - \varphi_2 = \Delta\varphi = 3000$ В, відстань між ними 2 см.

Дано:

$$m = 5 \cdot 10^{-9} \text{ г}$$

$$\varphi_1 - \varphi_2 = 3000 \text{ В}$$

$$d = 2 \text{ см}$$

$$e = -1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$$

СІ:

$$m = 5 \cdot 10^{-12} \text{ кг}$$

$$\varphi_1 - \varphi_2 = 3000 \text{ В}$$

$$d = 2 \cdot 10^{-2} \text{ м}$$

$$e = -1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$$

n — ?

Розв'язання:

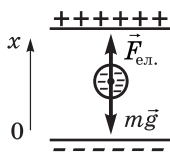


Рис. 174

Аналізуючи умову задачі, побудуємо рисунок. Зобразимо сили, що діють на пилінку (рис. 174). Оскільки пилінка перебуває в рівновазі, якщо рівнодійна сил, які діють на неї, дорівнює нулю, то $\vec{F}_{\text{рівн}} = 0$, або $\vec{F}_{\text{ел}} + m\vec{g} = 0$.

У проекції на вісь Ox : $F_{\text{ел}} - mg = 0$, $F_{\text{ел}} = mg$. Нехай заряд пилінки q , тоді електрична сила, яка діє на неї, дорівнює $F_{\text{ел}} = qE$.

Оскільки $E = \frac{\Delta\phi}{d}$, то $F = q \frac{\Delta\phi}{d}$.

З умови рівноваги знаходимо

$$q \frac{\Delta\phi}{d} = mg, \text{ звідки } q = \frac{mgd}{\Delta\phi}.$$

Кількість електронів, які утворюють заряд пилінки, можна визначити, розділивши її заряд на заряд одного електрона:

$$n = \frac{q}{|e|}, \text{ тобто } n = \frac{mgd}{\Delta\phi \cdot |e|}.$$

Обчислення:

$$[n] = \frac{\text{кг} \cdot \frac{\text{м}}{\text{с}^2} \cdot \text{м}}{\text{В} \cdot \text{Кл}} = \frac{\text{Дж}}{\text{Дж}} = 1 \text{ (безрозмірна величина);}$$

$$\{n\} = \frac{5 \cdot 10^{-12} \cdot 9,8 \cdot 0,02}{3000 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}} = 2,04 \cdot 10^3.$$

Відповідь: $n = 2040$ електронів.

Задача 4.

У вершинах квадрата зі стороною $a = 10$ см розміщено три однакові позитивні заряди й один негативний по $5 \cdot 10^{-7}$ Кл. Визначити напруженість електричного поля у центрі квадрата, якщо заряди містяться у повітрі.

Дано:

$$q_1 = q_2 = q_3 = 5 \cdot 10^{-7} \text{ Кл}$$

$$q_4 = -5 \cdot 10^{-7} \text{ Кл}$$

$$a = 10 \text{ см} = 0,1 \text{ м}$$

$$\epsilon = 1$$

$$k = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2}$$

$$E_{\text{рівн } O} \text{ — ?}$$

Розв'язання:

Аналізуючи умову задачі, будемо рисунок (рис. 175). Напруженість поля у центрі квадрата O дорівнює векторній сумі напруженостей електричних полів, створюваних кожним зарядом окремо

$$\vec{E}_{\text{рівн } O} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3 + \vec{E}_4.$$

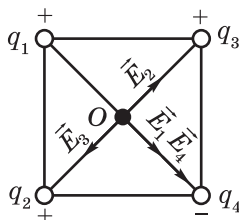


Рис. 175

Оскільки всі заряди однакові за величиною і розташовані на однаковій відстані від точки O , то числові значення напруженостей E_1 , E_2 , E_3 і E_4 теж однакові. Вони визначаються за формулою

$$E_1 = \frac{k|q_1|}{r^2},$$

де r — відстань від вершини квадрата до його центра.

Виражаючи r через сторону квадрата a , знайдемо $r^2 = \frac{a^2}{2}$.

Підставивши значення r^2 у вираз для E_1 , одержимо:

$$E_1 = \frac{2k|q_1|}{a^2}.$$

Оскільки напруженості $\vec{E}_3$ і $\vec{E}_2$ рівні за величиною, але протилежні за напрямом, то напруженість результуючого поля $E_{\text{рівн } O}$ визначається як сума напруженостей $\vec{E}_1$ і $\vec{E}_4$, тобто в скалярному вигляді $E_{\text{рівн } O} = E_1 + E_4$, оскільки $\vec{E}_1$ і $\vec{E}_4$ напрямлені в одну сторону. Беручи до уваги, що $E_1 = E_4$, одержимо

$$E_{\text{рівн } O} = 2 \frac{2k|q_1|}{a^2} = \frac{4k|q_1|}{a^2}.$$

Обчислення:

$$[E_{\text{рівн } O}] = \frac{\frac{\text{Н} \cdot \cancel{\text{м}^2}}{\cancel{\text{Кл}}^2} \cdot \cancel{\text{Кл}}}{\cancel{\text{м}^2}} = \frac{\text{Н}}{\text{Кл}}.$$

$$\{E_{\text{рівн}O}\} = \frac{4 \cdot 9 \cdot 10^9 \cdot 5 \cdot 10^{-7}}{(0,1)^2} = 1,8 \cdot 10^6.$$

$$\text{Відповідь: } E_{\text{рівн}O} = 1,8 \cdot 10^6 \frac{\text{Н}}{\text{Кл}} = 1,8 \frac{\text{МН}}{\text{Кл}}.$$

2. ПОСТІЙНИЙ СТРУМ

2.1. ЕЛЕКТРИЧНИЙ СТРУМ. СИЛА СТРУМУ. ГУСТИНА СТРУМУ

Електричний струм — це впорядкований (напрямлений) рух вільних носіїв заряду.

За **напря́м струму** прийнято вважати напрям, у якому рухався б позитивний заряд.

Речовини, у яких можливий такий рух, називаються **провідниками електрики**.

Струм, який виникає у провідниках, називається **струмом провідності**.

Умови існування струму

1. Наявність вільних носіїв заряду.
2. Наявність електричного поля.
3. Замкнене електричне коло (рис. 176).

У металах вільні носії заряду — це вільні електрони (напря́м руху електронів протилежний до напря́му струму).

Сила струму (I) — скалярна величина, яка чисельно дорівнює кількості електрики (заряду q), що переноситься за одиницю часу крізь площу поперечного перерізу:

$$I = \frac{q}{t}, \quad [I] = 1 \text{ А},$$

$$q = It, \quad 1 \text{ Кл} = 1 \text{ А} \cdot \text{с}.$$

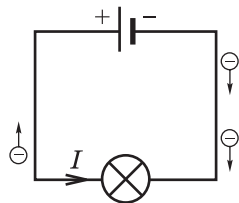


Рис. 176

Постійний струм — це струм, сила і напря́м якого з часом не змінюються.

Ампер — сила постійного струму, який, проходячи по двох паралельних провідниках нескінченної довжини і зовсім малого поперечного перерізу, розміщених на відстані 1 м один від одного у вакуумі, викликав би між ними силу взаємодії, яка дорівнювала б $2 \cdot 10^{-7}$ Н на кожний метр їхньої довжини.

Густина струму ($\vec{j}$) — векторна величина, модуль якої дорівнює відношенню сили струму до площі перерізу, через яку проходить струм:

$$j = \frac{I}{S}.$$

Вектор густини струму напрямлений уздовж струму.

Якщо заряд вільного носія заряду (q_0), концентрація носіїв у провіднику n (їхня кількість на одиницю об'єму), середня швидкість упорядкованого руху $\vec{v}$, а площа поперечного перерізу провідника S , то сила струму I у провіднику дорівнює:

$$I = q_0 n \vec{v} S.$$

Густина струму провідності в металах:

$$j = ne\vec{v}.$$

2.2. ЗАКОН ОМА ДЛЯ ДІЛЯНКИ КОЛА.

ОПІР МЕТАЛЕВИХ ПРОВІДНИКІВ. НАДПРОВІДНІСТЬ

Закон Ома для ділянки кола (рис. 177): сила струму I в ділянці кола прямо пропорційна прикладеній напрузі U і обернено пропорційна опору провідника R :

$$I = \frac{U}{R}.$$

Опір провідника (R) — це властивість провідника чинити опір струму, який проходить по ньому.

Опір металевго провідника залежить від його розмірів, матеріалу і температури:

$$R = \rho \frac{l}{S}, \quad \rho = \rho_0 (1 + \alpha t),$$

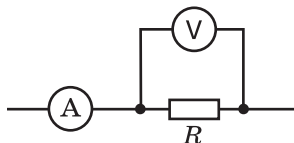


Рис. 177

де ρ — **питомий опір провідника**. Це величина, яка чисельно дорівнює опору провідника завдовжки 1 м з поперечним перерізом 1 м² (рис. 178):

$$[\rho] = 1 \frac{\text{Ом} \cdot \text{м}^2}{\text{м}} = 1 \text{ Ом} \cdot \text{м}$$

Одиниця опору встановлена на підставі закону Ома:

$$[R] = 1 \frac{\text{В}}{\text{А}} = 1 \text{ Ом}.$$

Термічний коефіцієнт опору (α) — відносна зміна опору провідника при нагріванні його на один градус.

$$\text{Для чистих металів } \alpha \approx \frac{1}{273} \text{ К}^{-1}.$$

У деяких металів і сплавів при температурах T_c , близьких до абсолютного нуля (0,2 ... 23 К), питомий опір дорівнює нулю — надпровідність (рис. 179).

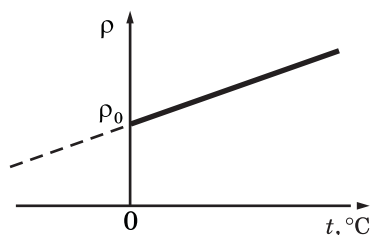


Рис. 178

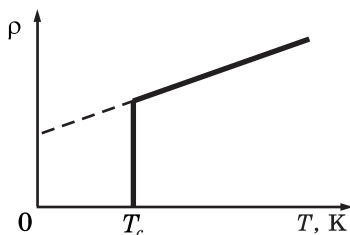


Рис. 179

Електропровідність провідника (G) — це величина, обернена опору провідника:

$$G = \frac{1}{R}.$$

Одиниця електропровідності — сименс (См):

$$[G] = \frac{1}{\text{Ом}} = 1 \text{ См}.$$

Закон Ома у векторній формі: $\vec{j} = \gamma \vec{E}$,

де γ — питома електропровідність, величина, обернена питомому опору провідника:

$$\gamma = \frac{1}{\rho}.$$

Напруга (спадання напруги) (див. «Електростатика»):

$$U = \frac{A}{q}.$$

Під час дії тільки кулонівських сил ($A = A_k$):

$$U = \varphi_1 - \varphi_2.$$

Під час дії тільки сторонніх сил ($A = A_{\text{стор}}$):

$$U = \mathcal{E} \text{ — електрорушійна сила (ЕРС).}$$

Під час дії кулонівських і сторонніх сил ($A = A_k + A_{\text{стор}}$):

$$U = (\varphi_1 - \varphi_2) + \mathcal{E}.$$

2.3. ПОСЛІДОВНЕ І ПАРАЛЕЛЬНЕ З'ЄДНАННЯ ПРОВІДНИКІВ

При послідовному з'єднанні провідників:

1. Сила струму однакова, оскільки $I = \frac{q}{t}$.
2. Напруга на з'єднанні провідників дорівнює сумі напруг на кожному провіднику, оскільки

$$A = A_1 + A_2 + \dots + A_n:$$

$$U = U_1 + U_2 + \dots + U_n \text{ (рис. 180).}$$

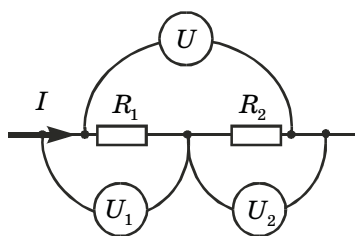


Рис. 180

Напруга на провідниках прямо пропорційна їхнім опорам:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1}{R_2}.$$

3. Опір з'єднання дорівнює сумі опорів провідників:

$$R = R_1 + R_2 + \dots + R_n.$$

При паралельному з'єднанні провідників:

1. Напруга на провідниках однакова, бо

$$U = \frac{A}{q}.$$

2. Сила струму в нерозгалуженій частині кола дорівнює сумі струмів у провідниках (рис. 181):

$$I = I_1 + I_2 + \dots + I_n.$$

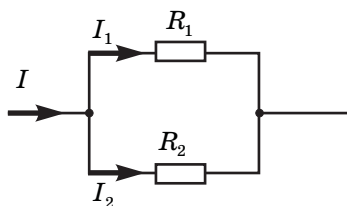


Рис. 181

Сила струму у провідниках обернено пропорційна опорів провідників:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1}.$$

3. Електропровідність з'єднання дорівнює сумі електропровідностей провідників:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}.$$

Провідник, носій опорів у колі, називається **резистор**. Резистори бувають із постійним опором (постійні резистори) і регульовані (реостати, потенціометри).

Реостат — прилад для регулювання сили струму в колі шляхом зміни опорів кола:

реостат з ковзаючим контактом — рис. 182, а;

реостат штепсельний (магазин опорів) — рис. 182, б.

Потенціометр — прилад для регулювання напруги (рис. 182, в).

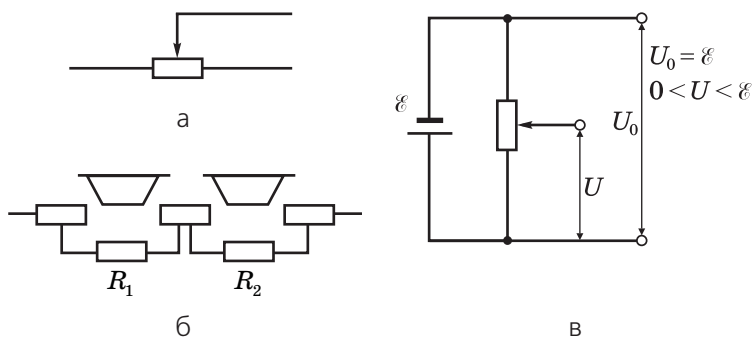


Рис. 182

2.4. ЕРС. ЗАКОН ОМА ДЛЯ ПОВНОГО КОЛА. З'ЄДНАННЯ ЕЛЕМЕНТІВ

Джерело струму — це пристрій, у якому діють сторонні сили, які розділяють заряди (рис. 183).



Рис. 183

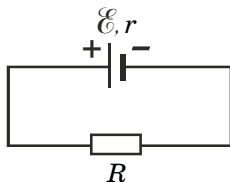


Рис. 184

Кулонівські сили завжди з'єднують різноименні заряди.

У замкненому колі діють сторонні сили в джерелі й кулонівські сили у всьому колі, але робота кулонівських сил у замкненому контурі дорівнює нулю (рис. 184).

Електрорушійна сила джерела ($\mathcal{E}_{\text{дж}}$) є величина, що чисельно дорівнює роботі сторонніх сил у джерелі, затраченій на переміщення одиничного позитивного заряду через усе коло:

$$\mathcal{E}_{\text{дж}} = \frac{A}{q}.$$

Робота, затрачена на переміщення заряду через усе коло, дорівнює сумі робіт на зовнішній ділянці кола і всередині

джерела (ділянка кола з опором r , де r — власний, внутрішній опір джерела):

$$A = A_{\text{зовн}} + A_{\text{внутр}} .$$

$$\mathcal{E}_{\text{дж}} = U_{\text{зовн}} + U_{\text{внутр}} , \quad \mathcal{E}_{\text{дж}} = IR + Ir .$$

Закон Ома для повного кола: сила струму в замкненому колі дорівнює електрорушійній силі джерела, поділеній на повний опір кола:

$$I = \frac{\mathcal{E}_{\text{дж}}}{R + r} .$$

Наслідки закону Ома для повного кола

— Напруга на полюсах замкненого джерела струму (рис. 185, а):

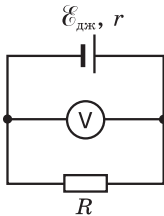
$$U = \mathcal{E}_{\text{дж}} - Ir .$$

— Напруга на полюсах незамкненого джерела струму (рис. 185, б):

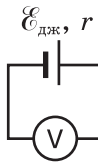
$$U = \mathcal{E}_{\text{дж}} \text{ при } R_{\text{вольтметра}} \gg r .$$

— Коротке замикання джерела струму, тобто $R \rightarrow 0$ (рис. 185, в):

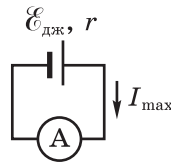
$$I_{\text{max}} = \frac{\mathcal{E}_{\text{дж}}}{r} .$$



а



б



в

Рис. 185

ККД джерела струму:

$$\eta = \frac{U}{\mathcal{E}_{\text{дж}}} ,$$

де U — напруга на зовнішній ділянці кола.

З'єднання елементів у батарею

1. При послідовному з'єднанні елементів у батарею електрорушійна сила батареї дорівнює алгебраїчній сумі ЕРС елементів (рис. 186, а):

$$\mathcal{E}_6 = \mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2 + \dots \mathcal{E}_n .$$

2. При паралельному з'єднанні елементів з однаковою ЕРС електрорушійна сила батареї дорівнює ЕРС одного елемента (рис. 186, б):

$$\mathcal{E}_6 = \mathcal{E}_1 .$$

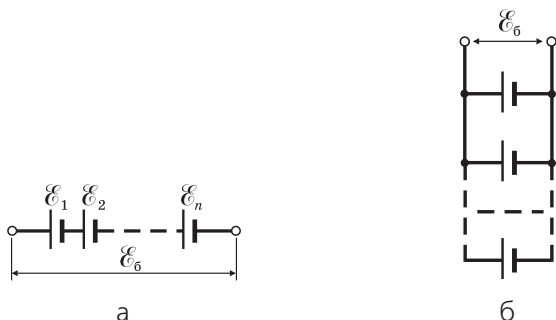


Рис. 186

2.5. РОБОТА І ПОТУЖНІСТЬ СТРУМУ.**ЗАКОН ДЖОУЛЯ—ЛЕНЦА**

Робота струму $A = qU$, де $q = It$;

$$A = IUt.$$

Потужність струму

$$P = \frac{A}{t} ; P = IU , [P] = 1 \text{ А} \cdot \text{В} = 1 \text{ Вт} .$$

Закон Джоуля—Ленца про кількість теплоти, яка виділяється при проходженні струму:

$$Q = I^2 R t .$$

Якщо в провіднику струм справляє тільки теплову дію, то $A = Q$:

$$A = Q = IUt = I^2 R t = \frac{U^2}{R} t , P = IU = I^2 R = \frac{U^2}{R} .$$

2.6. ПРИКЛАДИ РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧ

Задача 1.

Дано електричне коло (рис. 187). Визначити силу струму в провіднику. Елементи однакові з $\mathcal{E} = 1,5$ В і $r = 0,5$ Ом кожний. Опір провідників: $R_1 = R_4 = 2$ Ом, $R_2 = 1$ Ом, $R_3 = 3$ Ом.

Дано:

$$\mathcal{E} = 1,5 \text{ В}$$

$$r = 0,5 \text{ Ом}$$

$$R_1 = R_4 = 2 \text{ Ом}$$

$$R_2 = 1 \text{ Ом}$$

$$R_3 = 3 \text{ Ом}$$

$$I_3 \text{ — ?}$$

Розв'язання:

Провідники R_2 і R_3 з'єднані паралельно, отже:

$$\frac{I_3}{I} = \frac{\frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3}}{R_3}, \quad I_3 = I \frac{R_2}{R_2 + R_3}.$$

Сила струму в колі:

$$I = \frac{\mathcal{E}_{\text{дж}}}{R_1 + \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3} + R_4 + r_{\text{дж}}}.$$

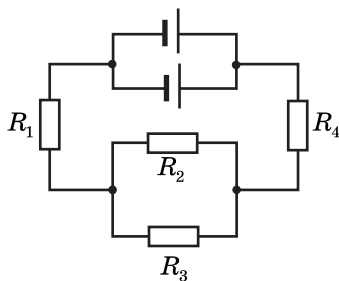


Рис. 187

Оскільки однакові елементи з'єднані паралельно, то

$$\mathcal{E}_{\text{дж}} = \mathcal{E}, \quad r_{\text{дж}} = \frac{r}{2}.$$

Тоді сила струму в колі:

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R_1 + \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3} + R_4 + \frac{r}{2}}.$$

Обчислення:

$$I = \frac{1,5}{2 + \frac{3}{4} + 2 + 0,25} A = 0,3 \text{ A},$$

$$I_3 = 0,3 \cdot \frac{1}{4} A = 0,075 \text{ A}.$$

Відповідь: $I_3 = 75 \text{ мА}$.**Задача 2.**

Два елементи з ЕРС 2 В і 1,5 В, внутрішнім опором $r_1 = r_2 = 0,5 \text{ Ом}$ з'єднані паралельно. Опір зовнішнього кола $R = 2 \text{ Ом}$. Визначити силу струму у зовнішньому колі, силу струму в батареї.

Дано:

$$\mathcal{E}_1 = 2 \text{ В}$$

$$\mathcal{E}_2 = 1,5 \text{ В}$$

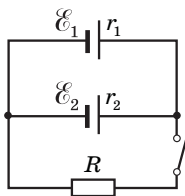
$$r_1 = r_2 = 0,5 \text{ Ом}$$

$$R = 2 \text{ Ом}$$

$$I = ?$$

$$I_1 = ?$$

Розв'язання:



За законом Ома для всього кола:

$$I = \frac{\mathcal{E}_{\text{дж}}}{R + \frac{r_1}{2}},$$

де $\mathcal{E}_{\text{дж}} = U$ на незамкненому джерелі;

$$U = U_1 = U_2 \text{ (на кожному елементі)}.$$

$\mathcal{E}_1 > \mathcal{E}_2$, виходить, у батареї перший елемент є джерелом струму, отже: $U_1 = \mathcal{E}_1 - I_1 r$,

$$I_1 = \frac{(\mathcal{E}_1 + (-\mathcal{E}_2))}{r_1 + r_2} \text{ (сила струму в батареї)}.$$

Обчислення:

$$I_1 = \frac{2 - 1,5}{0,5 + 0,5} A = 0,5 A,$$

$$\epsilon_{\text{дж}} = (2 - 0,5 \cdot 0,5) \text{ В} = 1,75 \text{ В},$$

$$I = \frac{1,75}{2 + 0,25} \text{ А} \approx 0,78 \text{ А}.$$

Відповідь: $I \approx 0,78 \text{ А}$, $I_1 = 0,5 \text{ А}$.

З'єднання резисторів й обчислення їхнього опору

При розв'язанні задач цього типу потрібно пам'ятати, що точки з однаковим потенціалом можна з'єднувати і роз'єднувати (за умови, що роз'єднання не приводить до розриву кола). Робота кола від цього не порушиться.

Задача 3.

На скільки рівних частин треба розрізати дріт опором 100 Ом, щоб при паралельному з'єднанні цих частин отримати опір 1 Ом?

Аналіз й розв'язання:

Нарізаний провідник можна уявити собі як складовий з n частин. Тоді його опір $R_1 = nR$. При паралельно-

му з'єднанні опір n рівних частин дорівнює $R_2 = \frac{R}{n}$. Тоді

$$R = R_2 n, \quad R_1 = n^2 R_2, \quad \text{звідки } n = \sqrt{\frac{R_1}{R_2}} = 10.$$

Задача 4.

Знайти загальний опір кола, якщо струм входить у вузол 1 (вузлом називають точку, де з'єднуються не менше трьох провідників) і виходить з вузла 4. Опір кожної сторони квадрата R , діагоналі $2R$ (рис. 188, а).

Аналіз й розв'язання:

Ділянки кола 12 і 23 з'єднані послідовно, отже, опір ділянки 123 дорівнює $2R$ (рис. 188, б).

Ділянка 123 включена паралельно ділянці 13. Загальний опір цих двох ділянок дорівнює $\frac{2R}{2} = R$ (рис. 188, в).

Ділянки 13 і 34 з'єднані послідовно, отже, їхній загальний опір дорівнює $2R$. У той же час ділянка 134 включена паралельно ділянці 14 (рис. 188, з), отже,

$$\frac{1}{R_{\text{заг}}} = \frac{1}{R} + \frac{1}{2R} = \frac{3}{2R}; R_{\text{заг}} = \frac{2R}{3}.$$

Таким чином, послідовно переходячи за допомогою еквівалентних схем до більш простої, ми розв'язали задачу.

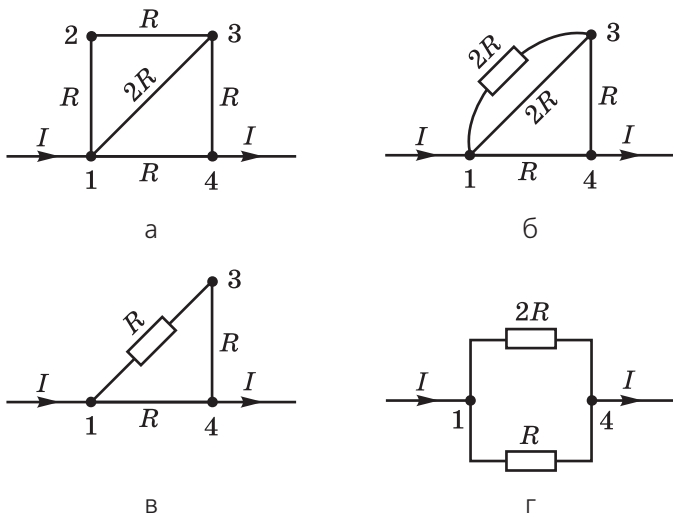


Рис. 188

Задача 5.

Даний дротяний каркас у вигляді куба. Опір кожного ребра R . Знайти загальний опір (рис. 189, а).

Аналіз й розв'язання:

Точки 1, 2, 3 мають однаковий потенціал, оскільки точка А загальна, а опори сторін куба однакові, аналогічно $\varphi_4 = \varphi_5 = \varphi_6$. З'єднаємо точки однакового потенціалу. Режим кола не порушиться. Сторони куба будуть з'єднані паралельно, оскільки мають однакові потенціали на початку і кінці провідника. Накреслимо еквівалентну схему (рис. 189, б).

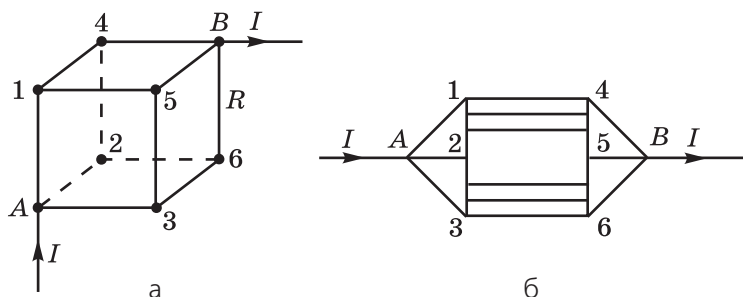


Рис. 189

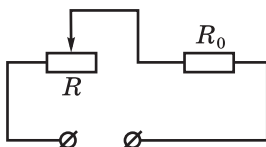
$$\text{Загальний опір } R_{\text{зар}} = \frac{R}{3} + \frac{R}{6} + \frac{R}{3} = \frac{5}{6} R .$$

Задача 6.

Знайти опір R такого реостата, щоб можна було зменшувати силу струму в n разів.

Аналіз й розв'язання:

Накреслимо схему:



Максимальний струм буде при знаходженні движка реостата в крайньому лівому положенні: $I_{\text{max}} = \frac{U}{R_0}$.

Мінімальний струм буде при знаходженні движка реостата в крайньому правому положенні: $I_{\text{min}} = \frac{U}{(R_0 + R)}$. За умо-

вою $I_{\text{min}} = \frac{I_{\text{max}}}{n}$, отже, $I_{\text{min}} = \frac{U}{R_0 n}$. Тоді $R = R_0 (n - 1)$.

Задача 7.

На кожний атом міді припадає 1 електрон провідності. Яка середня швидкість електронів провідності, якщо через мідний дріт діаметром $2 \cdot 10^{-4}$ м протікає струм 10 А?

Дано:

$$I = 10 \text{ А}$$

$$d = 2 \cdot 10^{-4} \text{ м}$$

$$\vec{v} \text{ — ?}$$

$$A_{\text{Cu}} = 64 \text{ а. о. м.}$$

$$\rho_{\text{Cu}} = 8,9 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$$

$$1 \text{ а. о. м.} = 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$$

$$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$$

Розв'язання:

Сила струму в металі:

$$I = e \cdot n \cdot \vec{v} \cdot S, \text{ звідки}$$

$$\vec{v} = \frac{I}{e \cdot n \cdot S}.$$

Виразимо концентрацію електронів.

За умовою задачі вона дорівнює концентрації атомів міді: $n = \frac{\rho}{m_0}.$

$$\text{Маса атома } m_0 = A_{\text{а. о. м.}} \cdot 1,67 \cdot 10^{-27} \frac{\text{кг}}{\text{а. о. м.}}.$$

$$\text{Площа поперечного перерізу дроту } S = \frac{\pi d^2}{4}$$

$$\vec{v} = \frac{4Im_0}{e\pi d^2} = \frac{4IA \cdot 1,67 \cdot 10^{-27}}{e\pi d^2}.$$

Обчислення:

$$\vec{v} = \frac{4 \cdot 10 \cdot 64 \cdot 1,67 \cdot 10^{-27}}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 8,9 \cdot 10^3 \cdot 3,14 \cdot (2 \cdot 10^{-4})^2} \frac{\text{м}}{\text{с}} \approx 2,38 \cdot 10^{-2} \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Відповідь: $\vec{v} \approx 2,38 \text{ см/с}.$

3. СТРУМИ ПРОВІДНОСТІ

3.1. ЕЛЕКТРИЧНИЙ СТРУМ У МЕТАЛАХ.

КОНТАКТНА РІЗНИЦЯ ПОТЕНЦІАЛІВ. ЯВИЩЕ ПЕЛЬТЬЄ

Струм у металах — упорядковане переміщення вільних електронів під дією електричного поля:

$$I = en\vec{v}S,$$

де e — заряд електрона; n — концентрація вільних електронів; $\vec{v}$ — швидкість дрейфу електронів.

Вольт-амперна характеристика струму в металах впливає із закону Ома (рис. 190).

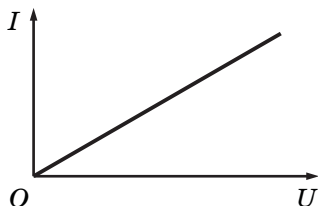


Рис. 190

Контактна різниця потенціалів виникає при контакті різних металів (рис. 191) і близька до лінійної функції абсолютної температури.

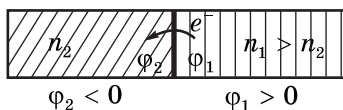


Рис. 191

Термопара — електричне коло із двох різних металів (сплавів), у якому виникає термоелектрорушійна сила, прямо пропорційна різниці температур $(T_2 - T_1)$ у контактах A, B (рис. 192):

$$\mathcal{E}_{\text{терм}} = U_{1,2} + U_{2,1},$$

$$I = \frac{\mathcal{E}_{\text{терм}}}{R}.$$

Приклади термопар: мідь — константан, платина — залізо.

Термобатарея — послідовне з'єднання кількох термопар.

Явище Пельтьє — нагрівання або охолодження контакту термопари A, B при проходженні струму (рис. 193). Контакт A охолоджується, а контакт B нагрівається.

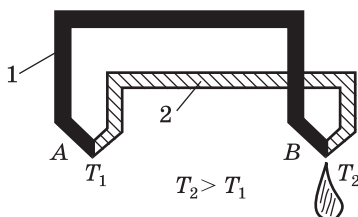


Рис. 192

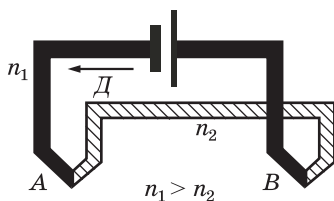


Рис. 193

3.2. СТРУМ В ЕЛЕКТРОЛІТАХ

Електроліти — це водні розчини солей, кислот і основ, а також їхні розплави, у яких носіями струму є іони.

Наприклад, це розчин NaCl , CuSO_4 , розплав NaOH .

3.2.1. ЕЛЕКТРОЛІТИЧНА ДИСОЦІАЦІЯ

При розчиненні солей, кислот і основ у воді йонний зв'язок у них стає слабкішим в ϵ разів, і при теплових співударах їхні молекули розпадаються на йони — **електролітична дисоціація** (рис. 194):



Рекомбінація — об'єднання йонів різних знаків у нейтральні молекули — процес, протилежний дисоціації.

Механізм іонної провідності: під дією електричного поля позитивні йони рухаються до катода (катіони), а негативні — до анода (аніони) і замикають електричне коло. При цьому разом з зарядом переноситься речовина (рис. 195).



Рис. 194

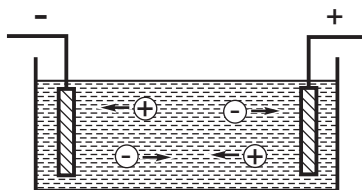


Рис. 195

3.2.2. ЗАКОН ЕЛЕКТРОЛІЗУ. ЗАСТОСУВАННЯ ЕЛЕКТРОЛІЗУ

Електроліз — виділення речовини на електродах при проходженні струму через електроліт. Електроліз супроводжується окисно-відновними реакціями.

Закон електролізу (закон Фарадея): маса виділеної на електроді речовини прямо пропорційна заряду, що пройшов через електроліт:

$$m = kq .$$

Тут k — електрохімічний еквівалент речовини:

$$[k] = \frac{\text{кг}}{\text{Кл}}, \quad k = \frac{M}{neN_A},$$

де n — валентність.

Стала Фарадея (F) чисельно дорівнює електричному заряду, який треба пропустити через електроліт для виділення на електроді маси будь-якої речовини, що дорівнює в kg відношенню $\frac{M}{n}$, де n — валентність речовини;

$$eN_A = F \text{ — стала Фарадея;}$$

$$F = 9,648 \cdot 10^7 \text{ Кл/кмоль.}$$

Електричний заряд (q) будь-якого йона:

$$q = \pm \frac{nF}{N_A} .$$

Заряд одновалентного йона дорівнює за абсолютною величиною значенню заряду електрона:

$$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл.}$$

ЕРС поляризації

Металеві електроди частково дисоціюють в електроліт у вигляді позитивних іонів. При цьому на електродах звільняються електрони. У результаті виникають сторонні сили, протилежні стороннім силам джерела струму. Мірою питомої роботи $\frac{A_{\text{ст}}}{q}$ цих сил є величина, що називається ЕРС поляризації (рис. 196):

$$I = \frac{\mathcal{E} - \mathcal{E}_{\text{п}}}{R + r_e + r} .$$

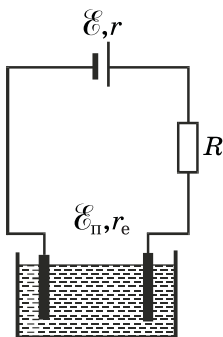


Рис. 196

Застосування електролізу

I. Гальванотехніка:

- а) **гальваностегія** — покриття деталей тонким шаром металу (позолота, нікелювання, хромування тощо);
- б) **гальванопластика** — відкладення товстого шару металу, який відшаровується і використовується самостійно (отримання матриць для друкарських пластинок, барельєф і т. п.).

II. Електрометалургія — виділення чистих металів із природних сумішей та промислових відходів (міді із мідного колчедану, алюмінію із розплавленого бокситу, срібла із відходів фотовиробництва).

III. Очищення металевих деталей (деталь є анодом).

3.3.ЕЛЕКТРИЧНИЙ СТРУМ У ГАЗАХ (ГАЗОВИЙ РОЗРЯД)

За нормальних умов газу майже повністю складаються із нейтральних атомів (молекул) і є діелектриками.

Унаслідок нагрівання або впливу випромінювання частина атомів іонізується — поділяється на позитивно заряджені йони й електрони (рис. 197, а). При з'єднанні електронів з нейтральними атомами утворюються і негативно заряджені йони (крім інертних газів та азоту). У йонізованому газі, як і в електролітах, також відбувається рекомбінація атомів (рис. 197, б).

Провідність іонізованого газу йонно-електронна.

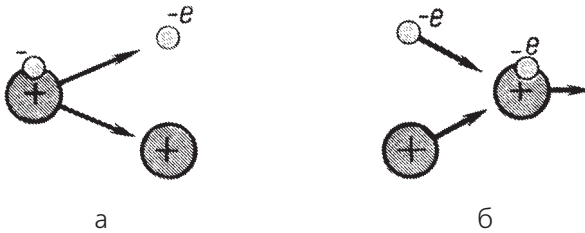


Рис. 197

Вольт-амперна характеристика газового розряду
(рис. 198).

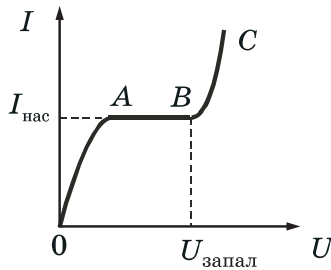


Рис. 198

При $I = I_{\text{насыщения}}$ ($I_{\text{нас}}$) іони й електрони, які утворюються під дією іонізатора, досягають електродів (відсутня рекомбінація). Ділянка графіка $0AB$ — несамоістний розряд, ділянка BC відповідає самоістному розряду в газах.

3.3.1. САМОІСТНИЙ РОЗРЯД

Самоістний розряд відбувається внаслідок іонізації електронним ударом (рис. 199) й електронної емісії.

При виникненні самоістного розряду кінетична енергія електронів, які прискорюються електричним полем, переважає роботу виходу електронів із атомів. Число електронів і позитивних іонів різко зростає — виникає лавина електронів і йонів. Позитивні йони, розігнані електричним

полем, бомбардують катод і вибивають з його поверхні нові електрони (**електронна емісія**):

$$\frac{mv^2}{2} = eEl, \quad \frac{mv^2}{2} \geq A_{\text{виходу}},$$

де l — довжина вільного пробігу.

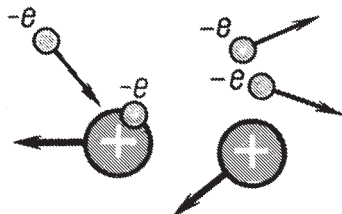


Рис. 199

3.3.2 ЕЛЕКТРИЧНА ДУГА

Електрична дуга є формою самостійного розряду, який виникає при великій густині струму і порівняно невеликій напрузі між електродами.

При з'єднанні двох електродів (рис. 200, а) контакт (якщо його площа невелика) має великий опір й інтенсивно нагрівається. Основною причиною дугового розряду є інтенсивна термоелектронна емісія розжареного катода. Анод бомбардується електронами — утворюється заглиблення (кратер), і температура анода збільшується. Між електродами виникає стовп яскравого світлого газу: випромінювання

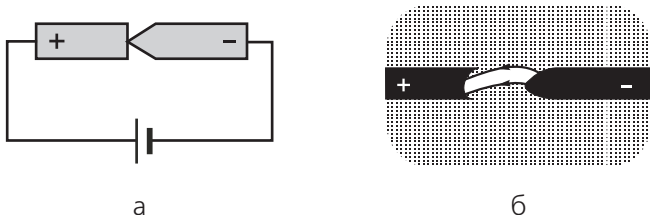


Рис. 200

світла атомами газу, збуджуваними при зіткненні з позитивними йонами газу і електронами. Температура газу в каналі дуги досягає $5000\text{—}6000^\circ\text{C}$, виникає конвекційний потік, що відхиляє дугу вгору (рис. 200, б).

Застосування електричної дуги: електрозварювання, електрорізка, потужні джерела світла.

3.3.3. РОЗРЯД У РОЗРІДЖЕНИХ ГАЗАХ — ТЛІЮЧИЙ РОЗРЯД. БЛИСКАВКА. ПЛАЗМА

Розряд в розріджених газах (рис. 201) — приклад самостійного розряду.

При тиску до:

- 50 мм рт. ст.— спостерігається іскровий розряд;
- 0,5 мм рт. ст.— плазмовий шнур;
- 0,02 мм рт. ст.— тліючий розряд (суцільний потік електронів і йонів);
- 10^{-4} мм рт. ст.— катодні промені (потік електронів із катода).

При тиску нижче ніж 10^{-4} мм рт. ст. (високий вакуум) розряд припиняється, тому що довжина вільного пробігу електрона перевищує розміри трубки.

Плазма — частково або повністю йонізований газ. Виникає при всіх видах розрядів у газах.

Плазмою оточена наша планета. Верхній шар атмосфери на висоті 100—300 км являє собою йонізований газ — іоносферу. У плазменому стані перебуває 99 % речовини у Всесвіті.

Плазма виникає при всіх видах газових розрядів: тліючому, дуговому, іскровому.

У лампах денного освітлення та інших світних трубках використовують плазму позитивного стовпа тліючого розряду.

Газорозрядну плазму використовують у газових лазерах — квантових джерелах світла.

Найбільш значні перспективи фізики вбачають у застосуванні високотемпературної плазми (з температурою

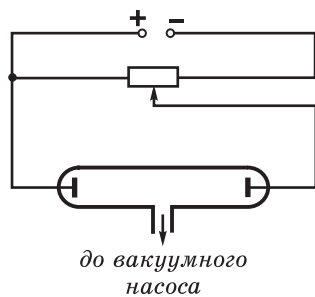


Рис. 201

десятків мільйонів градусів) у керованих термоядерних реакціях. Розв'язок цієї грандіозної задачі дасть людству невичерпне джерело енергії.

Блискавка — це плазмовий шнур, що замикає наелектризовані хмари або наелектризовану хмару і Землю. Сила струму у блискавці досягає 500 000 А, а різниця потенціалів між хмарою і Землею 100 000 000 В.

3.4. СТРУМ У НАПІВПРОВІДНИКАХ

Напівпровідники — це речовини, питомий опір яких дуже швидко зменшується з підвищенням температури (Ge, Si, Te та ін.). Із графіка (рис. 202) видно, що при температурах, близьких до абсолютного нуля, питомий опір дуже великий. Це означає, що при низьких температурах напівпровідник веде себе як діелектрик.

Щоб зрозуміти механізм виникнення провідності напівпровідників з підвищенням температури, необхідно знати будову напівпровідникових кристалів і природу зв'язку, що утримує атоми кристала один навколо одного. Для прикладу розглянемо кристал кремнію. Кремній — чотиривалентний елемент. Це означає, що на зовнішній оболонці міститься чотири електрони, що порівняно слабо пов'язані з ядром. Кількість найближчих сусідів кожного атома кремнію також дорівнює чотирьом. Двовимірна структура кристала кремнію зображена на рис. 203.

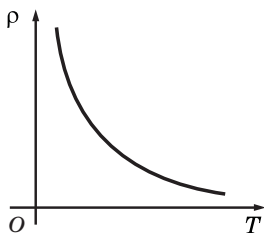


Рис. 202

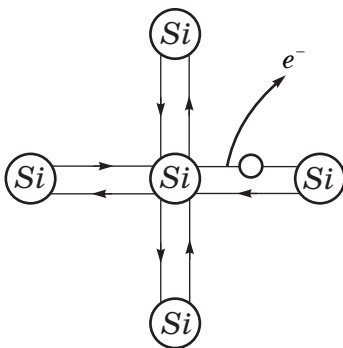


Рис. 203

У чистих напівпровідниках між атомами діє ковалентний зв'язок. Кожний атом обмінюється валентними електронами з чотирма сусідами. При теплових співударах атомів якийсь із електронів, отримавши порцію енергії, може покинути зв'язок з атомом — утворюється вільний електрон, а відсутній міжатомний зв'язок називається «дірка», яка є еквівалентною позитивному заряду. При кімнатних температурах концентрація вільних електронів і дірок мала. Таким чином, у чистих напівпровідниках є носії зарядів двох типів: електрони і дірки. Провідність при цих умовах називають власною провідністю напівпровідників.

3.4.1. ВЛАСНА І ДОМІШКОВА ПРОВІДНІСТЬ НАПІВПРОВІДНИКІВ

Провідність чистих напівпровідників електронно-діркова (**власна провідність**).

За наявності в напівпровідниковому матеріалі мало-го процента (одна десятиміліонна доля) п'ятивалентної домішки, наприклад As, кожний атом домішки оточений атомами основного напівпровідника. При одержанні невеликої порції енергії електрон домішки покидає свій атом — утворюється вільний електрон, а домішковий атом стає позитивним іоном, закріпленим у вузлі кристалічної ґратки (рис. 204, а).

Провідність таких напівпровідників електронно-діркова зі значною перевагою електронної (**домішкова провідність електронного типу**).

Така домішка називається донором («той, що дає»), а напівпровідник — домішковим напівпровідником *n*-типу (негативний).

За наявності в напівпровіднику тривалентної домішки (наприклад In) атом домішки захоплює в атома основного напівпровідника валентний електрон, тим самим поповнюючи недостатній ковалентний зв'язок. При цьому він стає негативним іоном, закріпленим у вузлі кристалічної ґратки, а в основному напівпровіднику утворюється рухома дірка (рис. 204, б).

Така домішка називається акцептором («беручий»), а напівпровідник — домішковим напівпровідником *p*-типу (позитивний).

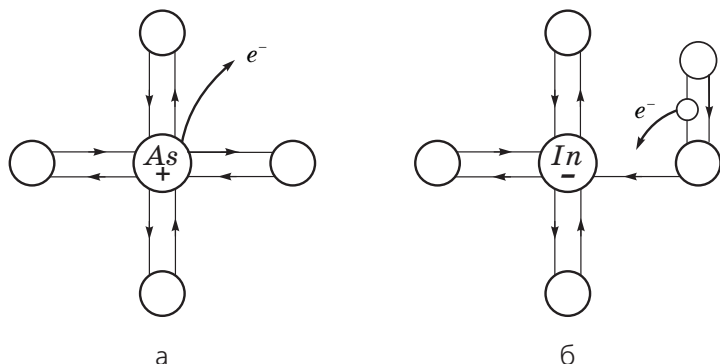


Рис. 204

Провідність напівпровідників *p*-типу електронно-діркова з явною перевагою діркової (**домішкова провідність діркового типу**).

При створенні в напівпровіднику електричного поля вільні електрони рухаються до анода, а зв'язані електрони переходять від атома до атома, заповнюючи дірки. Дірки при цьому переміщуються до катода (як позитивний заряд) і замикають коло (рис. 205):

$$I = I_e + I_d.$$

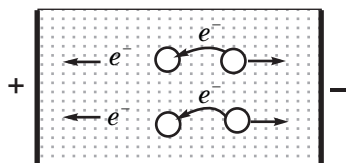


Рис. 205

3.4.2. ЗАСТОСУВАННЯ НАПІВПРОВІДНИКІВ

Термістори (терморезистори) — напівпровідники, які різко змінюють опір при зміні температури (використовуються як термометри, термореле).

Фоторезистори — напівпровідники, які різко змінюють опір при освітленні (використовуються як люксметри, фотореле) (рис. 206).

Контакт домішкових напівпровідників p - і n -типу (p — n -перехід)

У контакті напівпровідників p - і n -типу відбувається взаємна дифузія електронів і дірок та їх нейтралізація, в результаті чого виникає **запірний шар**: шар, збіднений вільними носіями заряду. У запи́рному шарі створюється електричне поле $\vec{E}$, спрямоване від n до p , і контактна різниця потенціалів $\phi_1 - \phi_2$ (рис. 207).

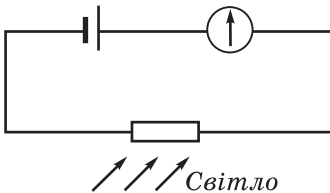


Рис. 206

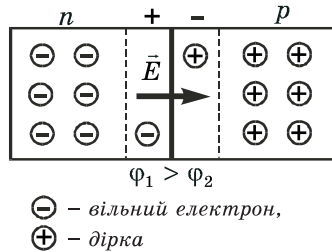


Рис. 207

Одностороння провідність p — n -переходу

Якщо створити поле $\vec{E}$, спрямоване від p - до n -типу напівпровідника, то запи́рний шар ліквідується, опір зменшується, струм збільшується (рис. 208).

Якщо створити поле $\vec{E}$, спрямоване від n - до p -типу напівпровідника, то запи́рний шар збільшується, опір збільшується, сила струму зменшується (рис. 209).

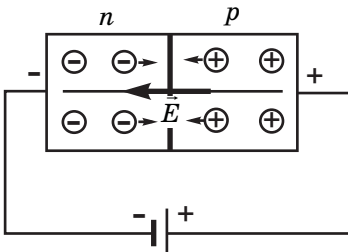


Рис. 208

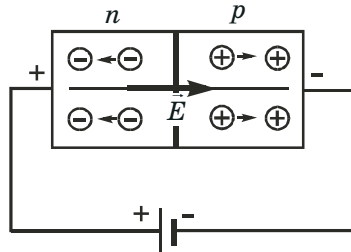


Рис. 209

p — n -перехід у колі змінного струму діє як випрямляч: пропускається струм тільки в одному напрямку.

Напівпровідниковий **діод** — пристрій з p — n -переходом (випрямляч) (рис. 210). Вольт-амперна характеристика напівпровідникового діода показана на рис. 211.

Напівпровідниковий **тріод** (транзистор) — пристрій з p — n — p - або n — p — n -переходом (p — n — p -транзистор, рис. 212).

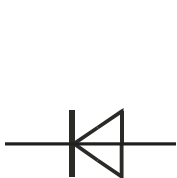


Рис. 210

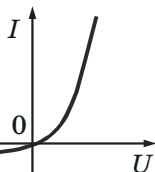


Рис. 211

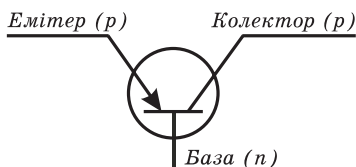


Рис. 212

Напівпровідникові елементи (діоди, транзистори) є головною частиною сучасних електронних пристроїв (від калькулятора чи комп'ютера до систем керування супутниками).

3.5. СТРУМ У ВАКУУМІ (СТРУМ ПЕРЕНОСУ)

Вакуум — розріджений до такої міри газ, що середня довжина вільного пробігу молекул перебільшує лінійні розміри посудини.

У вакуумі практично відсутні вільні носії заряду.

Струм у вакуумі можливий тільки завдяки зарядженим частинкам, що виникають при емісійних явищах.

Термоелектронна емісія — випромінювання електронів твердими та рідкими тілами при їх нагріванні. Вилітають електрони, кінетична енергія яких більша або дорівнює роботі виходу їх із металу (роботі на подолання зв'язку електрона з металом) (рис. 213).

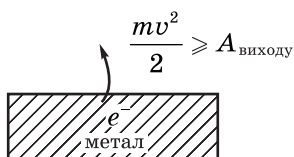


Рис. 213

Фотоелектронна емісія — вивільнення електронів з поверхні тіла під дією світла.

Вторинна емісія — вибивання електронів з металу у вакуумі при його бомбардуванні зарядженими частинками.

3.5.1. ЕЛЕКТРОННІ ЛАМПИ

Електронні лампи — пристрої, засновані на явищі термоелектронної емісії.

Діод прямого розжарення заснований на випромінюванні електронів розжареним катодом. Термоелектрони, що вилітають, під впливом поля $\vec{E}$, обумовленого анодною напругою, перелітають на анод і замикають анодне коло (рис. 214).

Вольт-амперна характеристика діода прямого розжарення.

Струм насичення досягається тоді, коли всі термоелектрони переносяться від катода до анода (рис. 215).

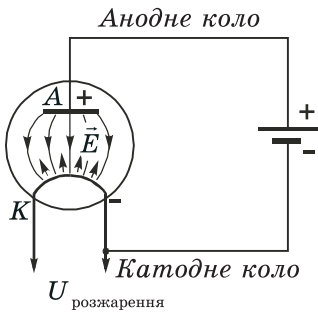


Рис. 214

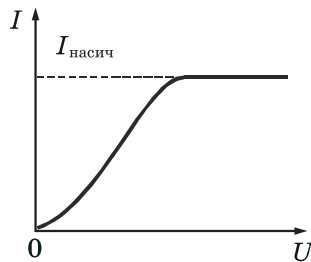


Рис. 215

Діод з підігрівальним катодом: нитка розжарення покрита шаром оксидів лужних металів, які мають малу роботу виходу електронів (рис. 216).

Вольт-амперна характеристика діода з підігрівальним катодом. Струм насичення практично не досягається (рис. 217).

У діодах закон Ома не виконується (вольт-амперна характеристика нелінійна).

Триелектродна лампа — триод. Між катодом і анодом розташований третій електрод — керувальна сітка. Сітка (у формі спіралі) близько розташована до катода, тому

невеликі зміни напруги на сітці викликають великі зміни анодного струму (рис. 218, а, б).

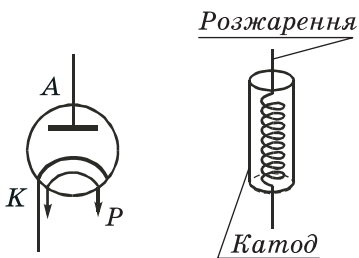


Рис. 216

Рис. 217

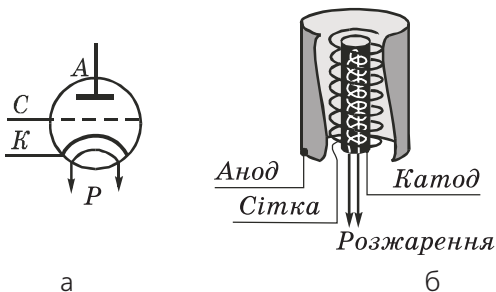


Рис. 218

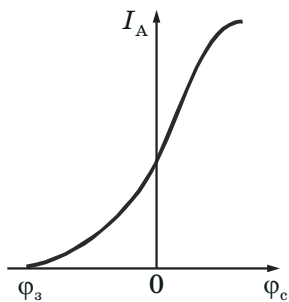


Рис. 219

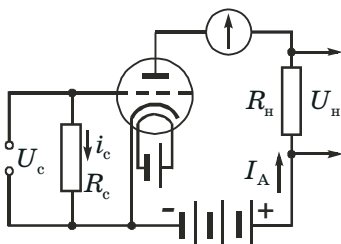


Рис. 220

Вольт-амперна сіткова характеристика тріода.

При певному негативному потенціалі (ϕ_a) лампа закривається — анодний струм дорівнює нулю. Сітка — керуючий електрод тріода (рис. 219).

Тріод — підсилювач слабких струмів та напруг, які наявні в колі сітки (рис. 220).

3.5.2. ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВА ТРУБКА

Електронно-променева трубка — основний елемент телевізора, монітора в комп'ютері.

Електронно-променева трубка з електростатичним керуванням (рис. 221) — основний елемент **осцилографа** — приладу для дослідження швидкозмінних процесів в електричних колах.

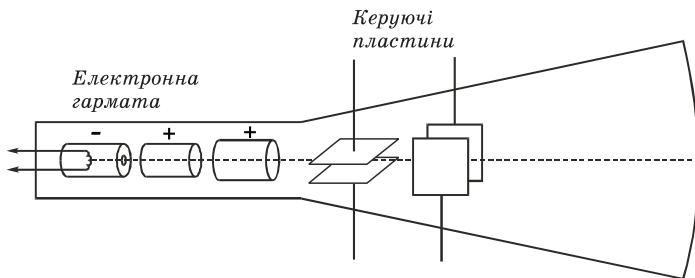


Рис. 221

З електронної гармати, де електрони випромінюються ниткою розжарення і прискорюються електричним полем електродів, сфокусований і прискорений пучок електронів направляється до центра екрана і в місці влучення спричиняє його світіння. На вертикальні керуючі пластини подається пилкоподібна напруга (рис. 222, а), завдяки якій електронний пучок відхиляється та прописує на екрані горизонтальну світну лінію. Якщо при цьому на горизонтальні відхильні пластини подається змінна напруга, то лінія на екрані згинається відповідно до форми напруги. Наприклад, якщо на горизонтальні пластини подають синусоїдну напругу, то на екрані бачимо синусоїдну криву (рис. 222, б).

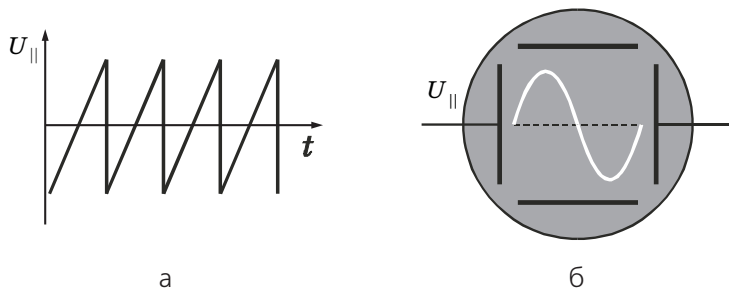


Рис. 222

У телевізійних трубках керування електромагнітне: відхилення пучка відбувається під дією сили Лоренца. Замість керуючих пластин використовують котушки дроту.

3.6. ПРИКЛАДИ РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧ

Задача 1.

Чи однакова кількість міді виділиться на 1-му, 2-му і 3-му катодах?

Розв'язання:

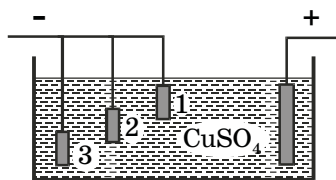


Рис. 223

На катоді 3 міді виділиться найменше, оскільки напруга U на всіх електродах однакова, час електролізу однаковий, але анод і катод 3 замикає найбільш товстий шар електроліту (найбільший опір), отже, між ними найменша сила струму, а $m = k \cdot I \cdot t$ (рис. 223).

Задача 2.

Деталь потрібно покрити шаром хрому завтовшки 50 мкм. Скільки часу потрібно для процесу покриття, якщо норма густини струму при хромуванні 2 кА/м²?

Густина хрому 7200 кг/м³. Електрохімічний еквівалент хрому $0,18 \cdot 10^{-6}$ кг/Кл.

Дано:

$$h = 50 \text{ мкм} = 5 \cdot 10^{-5} \text{ м}$$

$$J = 2 \text{ кА/м}^2 = 2 \cdot 10^3 \text{ А/м}^2$$

$$\rho = 7200 \text{ кг/м}^3$$

$$k = 0,18 \cdot 10^{-6} \text{ кг/Кл}$$

 Δt — ?

Розв'язання:

Згідно із законом електролізу $m = kI\Delta t$, тобто

$$\Delta t = \frac{m}{kI}.$$

Згідно з визначенням густини струму

$$J = \frac{I}{S},$$

тобто

$$I = JS,$$

$$\Delta t = \frac{m}{kJ S}.$$

Масу шару хрому можна також розписати через густину речовини та об'єм.

$$m = \rho V = \rho Sh.$$

Виконавши підстановку маси у формулу часу, отримаємо

$$\Delta t = \frac{\rho Sh}{kJ S} = \frac{\rho h}{kJ}.$$

Обчислення:

$$[\Delta t] = \frac{\text{кг} \cdot \text{м} \cdot \text{Кл} \cdot \text{м}^2}{\text{кг} \cdot \text{А} \cdot \text{м}^3} = \frac{\text{А} \cdot \text{с}}{\text{А}} = \text{с},$$

$$\{\Delta t\} = \frac{7,2 \cdot 10^3 \cdot 5 \cdot 10^{-5}}{1,8 \cdot 10^{-7} \cdot 2 \cdot 10^3} = 1000.$$

Відповідь: $\Delta t = 1000 \text{ с} = 16,7 \text{ хв}$.

Задача 3.

Визначте вартість отримання 10 кг рафінованої міді при напрузі 10 В, ККД установки 75 %, тарифі 11 $\frac{\text{к}}{\text{кВт} \cdot \text{год}}$; ЕРС поляризації не враховувати.

Дано:

$$m = 10 \text{ кг}$$

$$U = 10 \text{ В}$$

$$B = 11 \frac{\text{к}}{(\text{кВт} \cdot \text{год})}$$

$$\eta = 0,75$$

 $S = ?$

Розв'язання:

Рафінована мідь отримується при електролізі CuSO_4 , тобто мідь двовалентна. Для неї $k = 3,3 \cdot 10^{-7} \frac{\text{кг}}{\text{Кл}}$.

Тариф

$$B = 11 \frac{\text{к}}{\text{кВт} \cdot \text{год}} = 11 \frac{\text{к}}{3,6 \cdot 10^6 \text{ Дж}} \approx 3 \cdot 10^{-6} \frac{\text{к}}{\text{Дж}}.$$

$$\text{Вартість } S = BW_{\text{затр}} = \frac{BW_{\text{кор}}}{\eta}, \quad W_{\text{кор}} = I \cdot U \cdot t.$$

$$\text{За законом Фарадея } I \cdot t = \frac{m}{k}, \quad S = \frac{B \cdot U \cdot m}{\eta \cdot k}.$$

Обчислення:

$$[S] = \frac{\text{к} \cdot \text{В} \cdot \text{кг} \cdot \text{Кл}}{\text{Дж} \cdot \text{кг}} = \text{к},$$

$$\{S\} = \frac{3 \cdot 10^{-6} \cdot 10 \cdot 10}{3,3 \cdot 10^{-7} \cdot 0,75} \approx 1224.$$

Відповідь: $S = 12,24$ грн.

4. МАГНЕТИЗМ

4.1. МАГНІТНЕ ПОЛЕ. МАГНІТНА ІНДУКЦІЯ ПОЛЯ

Магнітне поле — це вид матерії (вид електромагнітного поля), основною особливістю якої є дія на рухомі тіла або частинки, які мають електричний заряд, та на частинки, які мають магнітний момент.

Силова характеристика магнітного поля — **магнітна індукція** ($\vec{B}$).

Лінії магнітної індукції — неперервні лінії, дотичні до яких у кожній точці збігаються за напрямком із вектором магнітної індукції. Ці лінії завжди замкнені, оскільки магнітне поле вихрове (рис. 224).

Модуль магнітної індукції дорівнює відношенню максимальної сили, з якою магнітне поле діє на рухомий позитивний заряд (сила Лоренца), до величини цього заряду та швидкості його руху (рис. 225):

$$B = \frac{F_{\text{Л max}}}{qv}.$$

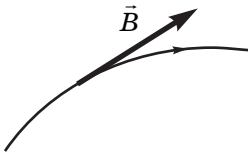


Рис. 224

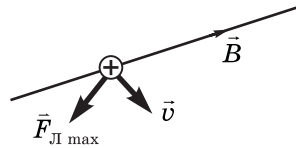


Рис. 225

Або:

Модуль магнітної індукції дорівнює відношенню максимальної сили, з якою магнітне поле діє на провідник з постійним струмом (сила Ампера), до величини сили струму та довжини провідника (рис. 226):

$$B = \frac{F_{\text{А max}}}{Il}.$$

Або:

Модуль магнітної індукції дорівнює відношенню максимального моменту сил, якими магнітне поле обертає рамку з постійним струмом, до сили струму в рамці й площі, обмеженої рамкою (рис. 227):

$$B = \frac{M_{\text{max}}}{IS}.$$

Одиниця магнітної індукції в СІ — тесла (Тл):

$$[B] = 1 \text{ Тл} = 1 \frac{\text{Н} \cdot \text{с}}{\text{Кл} \cdot \text{м}} = 1 \frac{\text{Н}}{\text{А} \cdot \text{м}}.$$

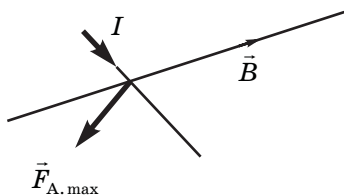


Рис. 226

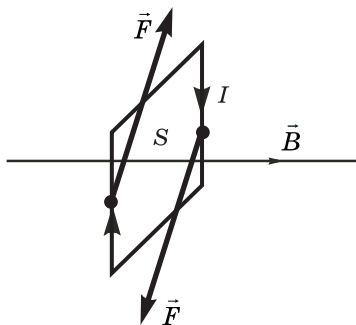


Рис. 227

4.2. МАГНІТНЕ ПОЛЕ СТРУМУ

4.2.1. МАГНІТНА ІНДУКЦІЯ ПРЯМОГО КОЛОВОГО СТРУМУ І СОЛЕНОЇДА

Магнітна індукція прямолінійного провідника нескінченної довжини зі струмом (рис. 228):

$$B = \mu\mu_0 \frac{I}{2\pi r}.$$

Лінії магнітної індукції замкнені в площині, перпендикулярній до струму.

Напрямок ліній визначається за **правилом гвинта (правої руки)**: якщо відігнутий великий палець правої руки напрямлений за струмом, то зігнуті чотири пальці вказують напрям ліній магнітної індукції.

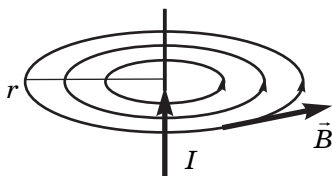


Рис. 228

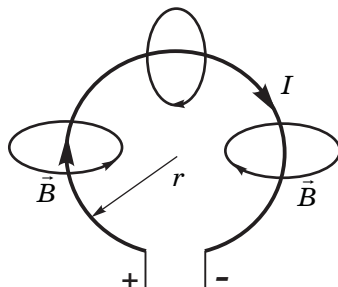


Рис. 229

Магнітне поле колового струму (рис. 229):

$$B = \mu\mu_0 \frac{I}{2r} \quad (\text{у центрі витка}).$$

Магнітний момент ($\vec{p}_{\text{маг}}$) колового струму — це вектор, модуль якого $p_{\text{маг}} = I \cdot S$ напрямлений перпендикулярно до площини колового струму за правилом гвинта (рис. 230).

Магнітне поле соленоїда (катушки провідника з постійним струмом) (рис. 231).

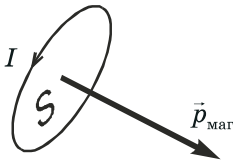


Рис. 230

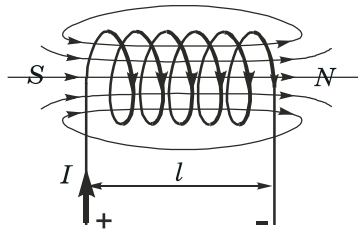


Рис. 231

Якщо довжина соленоїда значно перевищує його діаметр, магнітне поле у його середній частині практично однорідне і його модуль дорівнює

$$B = \mu\mu_0 \frac{IN}{l} \quad (N — \text{кількість витків}).$$

Ділянку, де лінії $\vec{B}$ напрямлені із соленоїда, приймають за **північний полюс соленоїда** (N), ділянку, де лінії входять у соленоїд, — за **південний полюс** (S).

Магнітні полюси — площини поділу однорідної і неоднорідної ділянок магнітного поля соленоїда (рис. 232).

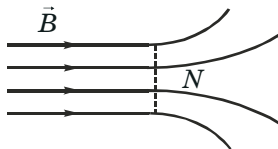


Рис. 232

4.3. ДІЯ МАГНІТНОГО ПОЛЯ НА РУХОМИЙ ЗАРЯД (СИЛА ЛОРЕНЦА) І ПРОВІДНИК ЗІ СТРУМОМ (СИЛА АМПЕРА). ПРАВИЛО ЛІВОЇ РУКИ

Напрямок сили Лоренца визначається мнемонічним **правилом лівої руки**: якщо ліву руку розташувати так, щоб лінії $\vec{B}$ були напрямлені в долоню, чотири пальці показували напрям руху позитивного заряду, то відігнутий великий палець вказує напрям сили Лоренца (рис. 233). Якщо рухається негативний заряд, то чотири пальці напрямлені назустріч його руху:

$$\begin{aligned}\vec{F}_L &= q[\vec{v} \cdot \vec{B}], \\ F_L &= Bqv \sin \alpha [\widehat{\vec{B}}, \widehat{\vec{v}}], \\ F_{L\max} &= Bqv.\end{aligned}$$

$\vec{F}_L$ напрямлена перпендикулярно до швидкості руху заряду $\vec{v}$, тому:

- надає зарядженій частинці доцентрового прискорення;
- робота $\vec{F}_L$ дорівнює нулю.

Якщо $\vec{v} \perp \vec{B}$, заряджена частинка рухається по колу певного радіуса (рис. 234):

$$R = \frac{m}{q} \frac{v}{B} \left(\begin{aligned} F_L &= m \frac{v^2}{R} \\ F_L &= Bqv \end{aligned} \right).$$

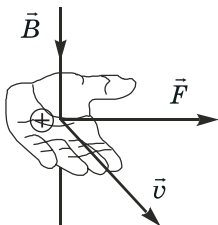


Рис. 233

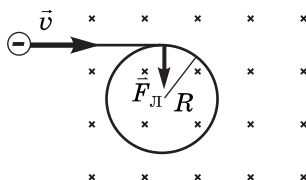


Рис. 234

Якщо $\vec{v}$ напрямлена під кутом α до $\vec{B}$, то згідно з перпендикулярною складовою $v_{\perp}$ частинка описує коло

радіусом R , згідно з паралельною складовою $v_{\parallel}$ — рухається вперед ($v_{\parallel} \cdot T = h$), тобто в результаті рухається по гвинтовій лінії з кроком h (рис. 235).

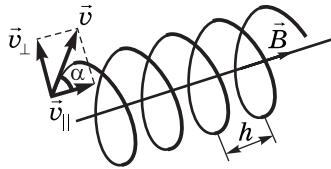


Рис. 235

Дія магнітного поля на струм (сила Ампера).

Напрямок сили Ампера визначається за правилом лівої руки. Модуль сили Ампера:

$$F_A = BIl \cdot \sin \alpha,$$

$$F_{A \max} = BIl.$$

4.4. ДІЯ МАГНІТНОГО ПОЛЯ НА РАМКУ ЗІ СТРУМОМ. МАГНІТНИЙ ПОТІК

Магнітне поле діє на протилежні сторони рамки зі струмом з силами Ампера — виникає пара сил, яка повертає рамку. Якщо рамка не закріплена, вона орієнтується магнітним полем $\vec{B}$ так, щоб її магнітний момент $\vec{P}_{\text{маг}}$ був співнаправлений з $\vec{B}$ зовнішнього поля. Сили Ампера при цьому врівноважуються (рис. 236, а, б):

$$M_{\max} = BIS = BI l_1 l_2,$$

$$M_{\max} = p_{\text{маг}} B,$$

$$M = M_{\max} \sin \alpha.$$

Магнітний потік Φ (потік магнітної індукції), що проникає поверхню площею S (рис. 237):

$$\Phi = BS \cos \alpha,$$

де $\alpha = (\widehat{\vec{n}, \vec{B}})$.

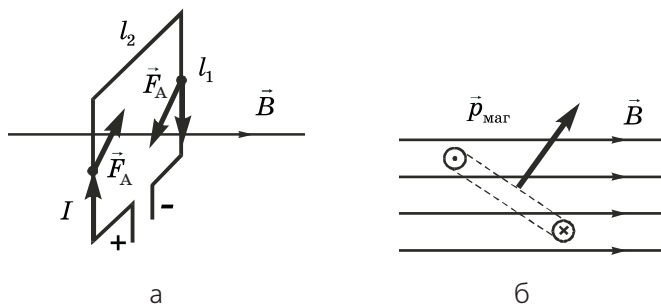


Рис. 236

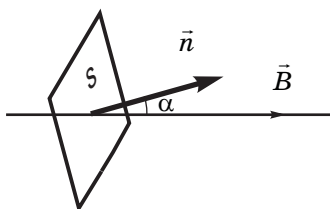


Рис. 237

Одиниця магнітного потоку в СІ — вебер (Вб):

$$[\Phi] = 1 \text{ Вб} = 1 \text{ Тл} \cdot \text{м}^2.$$

4.5. ЗАКОН ВЗАЄМОДІЇ ПАРАЛЕЛЬНИХ СТРУМІВ

Принцип суперпозиції магнітних полів: магнітні поля не взаємодіють, а тільки накладаються:

$$\vec{B} = B_1 + B_2 + \dots + \vec{B}_n.$$

Струми взаємодіють, оскільки магнітне поле одного струму діє на інший струм і навпаки.

Взаємодія паралельних струмів нескінченної довжини (рис. 238):

$$F_{\parallel} = \mu\mu_0 \frac{I_1 I_2 l}{2\pi r}.$$

Магнітне поле другого струму

$$B_2 = \mu\mu_0 \frac{I_2}{2\pi r}$$

діє на перший струм із силою Ампера

$$F_{\parallel} = B_2 I_1 l,$$

і навпаки.

Сила Ампера на одиницю довжини провідника:

$$\frac{F_{\parallel}}{L} = \mu\mu_0 \frac{I_1 I_2}{2\pi r}.$$

Провідники, по яких паралельні струми йдуть в одному напрямі, притягуються, якщо в протилежному — відштовхуються.

4.6. МАГНІТНЕ ПОЛЕ У РЕЧОВИНІ

Магнетики — усі речовини, які здатні намагнічуватись у зовнішньому магнітному полі, тобто створювати власні (внутрішні) магнітні поля $\vec{B}_1$ самої речовини (рис. 239):

$$\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}_1, \quad \mu = \frac{B}{B_0}.$$

4.6.1. МАГНІТНИЙ МОМЕНТ АТОМА

Внутрішнє магнітне поле $\vec{B}_1$ обумовлюється магнітними властивостями атомів. Електрони, що обертаються навколо

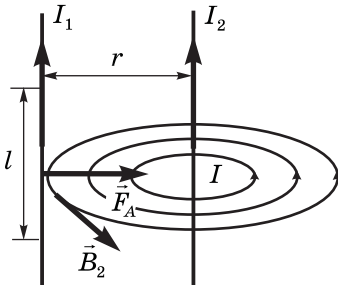


Рис. 238

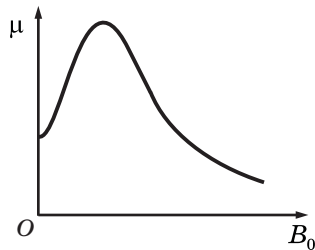


Рис. 239

ядра, створюють магнітне поле, яке відповідає магнітному полю колового струму, — **магнітний момент** орбітального струму $\vec{p}_{\text{орб}}$.

Електрони, окрім маси m , заряду q , мають власне магнітне поле — **спіновий магнітний момент** $\vec{p}_{\text{спін}}$ спінового «струму» (рис. 240), який зумовлений обертанням електрона навколо своєї осі, від «spin» — обертання.

Магнітний момент атома $\vec{p}_{\text{ат}}$ — векторна сума орбітальних і спінових магнітних моментів усіх його електронів:

$$\vec{p}_{\text{ат}} = \sum \vec{p}_{\text{орб}} + \sum \vec{p}_{\text{спін}} ;$$

$\vec{p}_{\text{ат}} = 0$, коли магнітні моменти електронів в атомі скомпенсовані (наприклад атом He) (рис. 241).

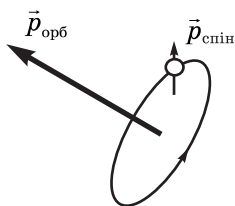


Рис. 240

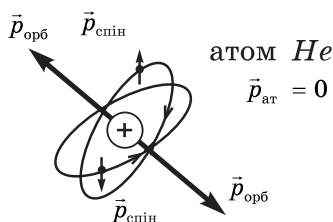


Рис. 241

Якщо в атомі ряд магнітних моментів електронів не скомпенсований, $\vec{p}_{\text{ат}} \neq 0$ — навколо атома є магнітне поле з певним магнітним моментом, що відповідає магнітному полю колового струму (рис. 242).

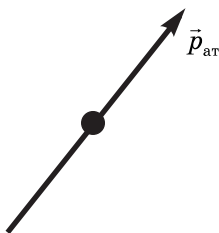


Рис. 242

4.6.2. ПАРА-, ДІА- І ФЕРОМАГНЕТИКИ

У зовнішньому магнітному полі $\vec{B}_0$ некомпенсовані магнітні моменти атомів орієнтуються за полем, створюючи внутрішнє поле $\vec{B}_1$ (**парамагнітний ефект**), але цьому перешкоджає тепловий рух атомів (рис. 243).

В атомах усіх речовин під впливом зовнішнього магнітного поля $\vec{B}_0$ обертання електронів видозмінюється таким чином, що в атомів з'являється магнітний момент, спрямований проти зовнішнього поля (**діамагнітний ефект**) (рис. 244).

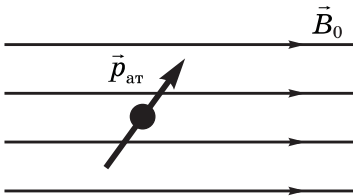


Рис. 243

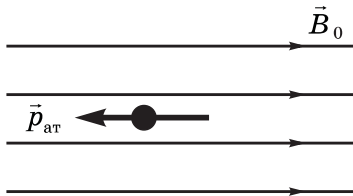


Рис. 244

Парамагнітні речовини (Na, Al та ін.) — це речовини, атоми яких мають $\vec{p}_{\text{ат}} \neq 0$. Парамагнітний ефект переважає діамагнітний. Усередині парамагнетиків поле трохи підсилюється: $\mu > 1$.

Діамагнітні речовини (He, Cu та ін.) — це речовини, атоми яких не мають магнітного моменту $\vec{p}_{\text{ат}} = 0$. У них наявний тільки діамагнітний ефект. Усередині діамагнетиків поле трохи слабшає: $\mu < 1$.

Феромагнітні речовини — особлива група магнетиків (Fe, Ni, Co та деякі сплави). У феромагнетиках існують окремі ділянки, які називаються **доменами**, усередині яких магнітні моменти атомів в основному зумовлені некомпенсованими спіновими магнітними моментами електронів. Магнітні моменти атомів усередині доменів спонтанно орієнтуються в певному напрямку, утворюючи магнітний момент домена $\vec{p}_{\text{домена}}$ (рис. 245).

Магнітні моменти доменів хаотично орієнтовані в різних напрямках і, як правило, компенсують один одного.

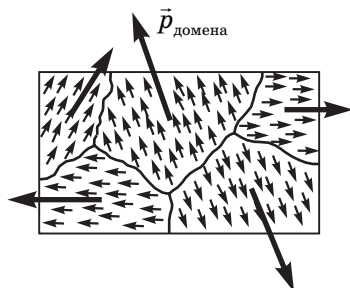


Рис. 245

4.6.3. МАГНІТНИЙ ГІСТЕРЕЗИС. ТОЧКА КЮРІ

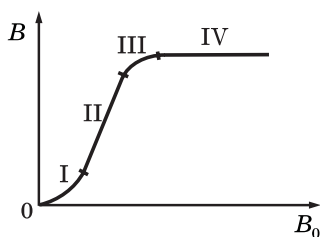
Намагнічування феромагнетиків (відкрив Столетов, пояснив Ландау):

I — ріст доменів, спочатку орієнтованих за зовнішнім полем B_0 , унаслідок приєднання (переорієнтації) атомів сусідніх доменів;

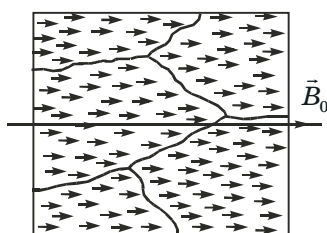
II — поворот доменів — орієнтація $\vec{p}_{\text{домена}}$ за полем;

III — парапроцес — строга орієнтація $\vec{p}_{\text{ат}}$ за полем частинок усередині доменів;

IV — магнітне насичення (повна орієнтація) (рис. 246, а, б).



а



б

Рис. 246

Магнітострикція — зміна розмірів феромагнетиків при їх намагнічуванні. Застосування — магнітострикційне ультразвукове випромінювання.

Явище гістерезису — відставання зміни $\vec{B}$ від зміни $\vec{B}_0$ при розмагнічуванні феромагнетика. Якщо намагнітити феромагнетик до насичення у зовнішньому полі $\vec{B}_0$, а потім B_0 зменшити до 0, то певною мірою орієнтація магнітних моментів атомів зберігається — спостерігаємо залишкову намагніченість $B_{\text{залиш}}$ (рис. 247).

Щоб забрати $B_{\text{залиш}}$, треба прикласти деяке зворотне поле, яке називається $B_{\text{затримуюче}}$ (рис. 248).

При намагнічуванні й перемагнічуванні спостерігаємо **гістерезисну петлю** (рис. 248).

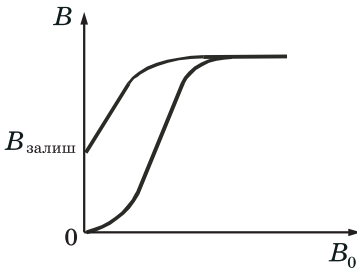


Рис. 247

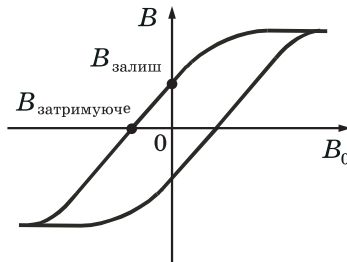
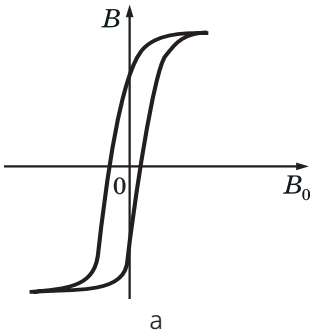
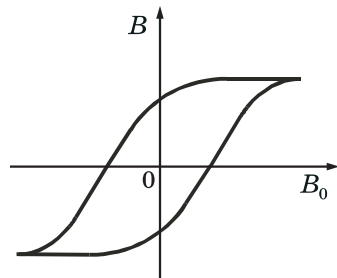


Рис. 248

Феромагнітні речовини з вузькою гістерезисною петлею (малою остаточною намагніченістю) (рис. 249, а) називаються **магнітном'якими** (наприклад сталь Армко — майже чисте залізо; електротехнічна сталь); речовини з широкою петлею — **магнітнотверді (магнітножорсткі)**, наприклад вуглецева сталь (рис. 249, б).



а



б

Рис. 249

Постійний штучний магніт — це смуга вуглецевої сталі, яку при виробництві довели до магнітного насичення. При цьому зберігається значною мірою орієнтація магнітних моментів атомів (рис. 250).

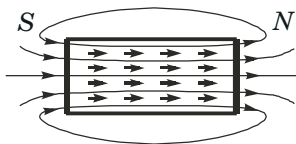


Рис. 250

Магнітне поле постійного магніту — це сукупність полів мікрострумів (орбітальних і спінових).

Нагрівання феромагнетиків призводить до їх розмагнічування, оскільки тепловий рух призводить до порушення орієнтації магнітних моментів атомів і доменів.

Точка Кюрі — температура, при якій повністю втрачається остаточна намагніченість: Fe — 768 °C, Ni — 365 °C, Co — 1140 °C.

4.7. ПРИКЛАДИ РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧ

Задача 1.

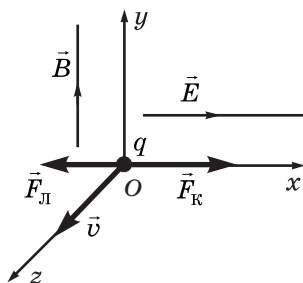


Рис. 251

У ділянці простору створено однорідне електростатичне поле $E = 10\,000$ В/см, напрямлене вздовж осі Ox , а також однорідне магнітне поле B , напрямлене вздовж осі Oy . Через цю ділянку в напрямі осі Oz по прямій лінії рухається пучок мезонів зі швидкістю $c/3$. Чому дорівнює індукція магнітного поля? Чи можливо за допомогою такого експерименту визначити знак заряду мезона? Релятивістським ефектом знехтувати (рис. 251).

Дано:	Розв'язання:
$E = 10\,000 \frac{\text{В}}{\text{см}} = 10^6 \frac{\text{В}}{\text{м}}$ $v = \frac{c}{3}$	Якщо вважати заряд мезона позитивним, то за правилом лівої руки сила Лоренца F_L напрямлена проти осі Ox .
$B = ?$ $c = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$	За умовою рівномірного прямолінійного руху $\vec{F}_k + \vec{F}_L = 0$.

У проекціях на вісь Ox

$$F_k - F_L = 0, \quad F_k = F_L;$$

$$F_k = q \cdot E, \quad F_L = b \cdot q \cdot v, \quad \text{оскільки } \alpha = 90^\circ;$$

$$q \cdot E = B \cdot q \cdot v, \quad B = \frac{E}{v} = \frac{E \cdot 3}{c}.$$

Обчислення:

$$[B] = T_L, \quad \{B\} = \frac{3 \cdot 10^6}{3 \cdot 10^8} = 10^{-2}.$$

Відповідь: $B = 10$ мТл. Якщо мезони мають негативний заряд, $\vec{F}_k$ і $\vec{F}_L$ змінять напрямок на протилежний. Визначити знак заряду мезонів у цьому експерименті неможливо, оскільки заряд не входить до умови рівноваги (скорочується).

Задача 2.

Протон та електрон влітають в однорідне магнітне поле з однаковою швидкістю, перпендикулярно до вектора магнітної індукції. У скільки разів радіус кривини траєкторії руху протона R_p більший за радіус кривини траєкторії руху електронів R_e ?

Дано:	Розв'язання:
$q_{\text{пр}} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$ $q_{\text{ел}} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$ $v_{\text{ел}} = v_{\text{пр}}$ $\alpha = 90^\circ$ $m_{\text{ел}} = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$ $m_{\text{пр}} = 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$	Зобразимо рух заряджених частинок у магнітному полі з урахуванням правила лівої руки (рис. 252).
$\frac{R_{\text{пр}}}{R_{\text{ел}}} \text{ — ?}$	На рухому заряджену частинку діє сила Лоренца, модуль якої
	$F_L = qvB \sin \alpha.$

У даному випадку

$$|q_{\text{пр}}| = |q_{\text{ел}}| = q = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл},$$

$\alpha = 90^\circ$, тобто $\sin 90^\circ = 1$.

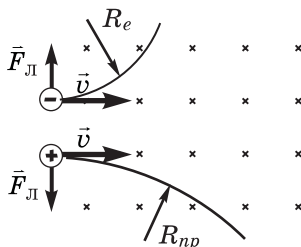


Рис. 252

Тобто на протон та електрон діють однакові за модулем сили Лоренца

$$F_{\text{Л}} = qvB.$$

Ці сили Лоренца відіграють роль доцентрових сил

$$F_{\text{Л}} = a_{\text{доц}} m,$$

оскільки $\vec{F}_{\text{Л}}$ та $\vec{a}_{\text{доц}}$ збігаються за напрямом. Виконавши підстановку модуля сили Лоренца та доцентрового прискорення, отримаємо:

$$qvB = \frac{v^2}{R} m.$$

Виразимо радіус кола

$$R = \frac{mv}{qB}.$$

Застосуємо цю формулу для протона та електрона

$$R_{\text{пр}} = \frac{m_{\text{пр}} v}{qB}, \quad R_{\text{ел}} = \frac{m_{\text{ел}} v}{qB}.$$

Звідси

$$\frac{R_{\text{пр}}}{R_{\text{ел}}} = \frac{m_{\text{пр}}}{m_{\text{ел}}}.$$

Обчислення:

$$\left[\frac{R_{\text{пр}}}{R_{\text{ел}}} \right] = \frac{\text{кГ}}{\text{кГ}} = 1, \left\{ \frac{R_{\text{пр}}}{R_{\text{ел}}} \right\} = \frac{1,67 \cdot 10^{-27}}{9,1 \cdot 10^{-31}} = 1800.$$

Відповідь: $\frac{R_{\text{пр}}}{R_{\text{ел}}} = 1800$ разів.

Задача 3.

α -частинка, пройшовши прискорюючу різницю потенціалів U , влітає в однорідне магнітне поле, вектор магнітної індукції якого перпендикулярний до її швидкості. Знайти силу, що діє на частинку в магнітному полі, радіус кола та період обертання частинки.

Дано:

α -частинка

$\alpha = 90^\circ$

U

B

$q_\alpha = q$

$v_0 = 0$

m_α

$F_{\text{л}} - ?$

$R - ?$

$T - ?$

Розв'язання:

Зобразимо в електричному та магнітному полях рух α -частинки (рис. 253).

Згідно із законом збереження енергії робота кулонівських сил в електричному полі дорівнює зміні кінетичної енергії α -частинки.

$$A_{\text{кул}} = \Delta W_{\text{к}}.$$

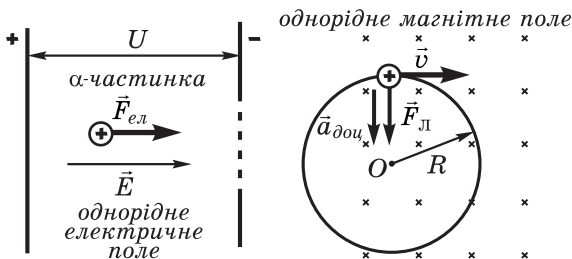


Рис. 253

Оскільки $A_{\text{кул}} = q_\alpha U$,

$$\Delta W_{\text{к}} = W_{\text{к}_2} - W_{\text{к}_1} = \frac{m_\alpha v^2}{2} - \frac{m_\alpha v_0^2}{2} = \frac{m_\alpha v^2}{2},$$

$$\text{то } q_{\alpha}U = \frac{m_{\alpha}v^2}{2}.$$

Звідси модуль кінцевої швидкості частинки в електричному полі

$$v = \sqrt{\frac{2q_{\alpha}U}{m}} = \sqrt{\frac{2qU}{m}}.$$

При русі частинки в однорідному магнітному полі діє сила Лоренца, модуль якої

$$F_{\text{Л}} = qvB \sin \alpha.$$

Оскільки $\alpha = 90^\circ$, $\sin \alpha = 1$, то

$$F_{\text{Л}} = qvB = qB \sqrt{\frac{2qU}{m}} = B \sqrt{\frac{2q^3U}{m}}.$$

Траєкторія руху частинки — коло. Сила Лоренца відіграє роль доцентрової сили

$$F_{\text{Л}} = a_{\text{доц}} \cdot m.$$

Виконавши підстановку модуля сили Лоренца та доцентрового прискорення, отримаємо

$$qvB = \frac{v^2}{R} m.$$

Виразимо радіус кола

$$R = \frac{mv}{qB} = \frac{m}{qB} \sqrt{\frac{2qU}{m}} = \frac{1}{B} \sqrt{\frac{2mU}{q}}.$$

Період обертання частинки по колу можна визначити з формули модуля лінійної швидкості.

$$v = \frac{2\pi R}{T},$$

тобто

$$T = \frac{2\pi R}{v} = \frac{2\pi \frac{1}{B} \sqrt{\frac{2mU}{q}}}{\sqrt{\frac{2qU}{m}}} = \frac{2\pi}{B} \sqrt{\frac{2mU \cdot m}{q \cdot 2qU}} = \frac{2\pi m}{Bq}.$$

$$\text{Відповідь: } F_{\text{Л}} = B \sqrt{\frac{2q^3U}{m}}, \quad R = \sqrt{\frac{2mU}{q}} \cdot \frac{1}{B}, \quad T = \frac{2\pi m}{Bq}.$$

Задача 4.

Електрон влітає в однорідне магнітне поле зі швидкістю $\vec{v}$ під кутом α до вектора індукції магнітного поля $\vec{B}$. Визначити радіус і крок гвинтової лінії, уздовж якої буде рухатися електрон.

Дано:

 v α B R — ? h — ?

Розв'язання:

Рух електрона в однорідному магнітному полі проходить уздовж гвинтової лінії, оскільки $\vec{v}$ і $\vec{B}$ створюють кут α . Це стає очевидним, якщо розкласти вектор швидкості на дві складові: паралельну вектору індукції $\vec{v}_{\parallel}$ і перпендикулярну до вектора індукції $\vec{v}_{\perp}$ (рис. 254).

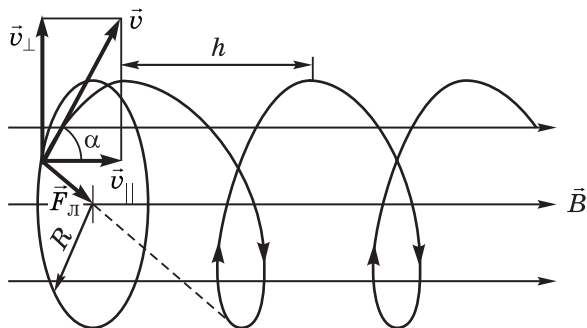


Рис. 254

Із рисунка видно, що $v_{\parallel} = v \cos \alpha$, $v_{\perp} = v \sin \alpha$. Сила Лоренца діє на електрон в площині, яка перпендикулярна до вектора $\vec{B}$, і надає йому доцентрового прискорення. При цьому електрон описує в цій площині коло радіусом R , тому що $\vec{B} = \text{const}$, $v_{\perp} = \text{const}$.

Визначимо модуль сили Лоренца:

$$F_{\text{Л}} = ev_{\perp} B = evB \sin \alpha.$$

Оскільки $F_{\text{Л}} = a_{\text{доц}} \cdot m$, то

$$eBv \sin \alpha = \frac{v_{\perp}^2 \cdot m}{R},$$

$$eBv \sin \alpha = \frac{mv^2 \sin^2 \alpha}{R},$$

тобто

$$R = \frac{mv \sin \alpha}{eB}.$$

Уздовж магнітного поля електрон рухається зі сталою швидкістю $v_{\parallel} = v \cos \alpha$, оскільки в цьому напрямку сила не діє.

У результаті складання двох рухів — руху по колу та прямолінійного рівномірного руху за інерцією — траєкторією результуючого руху буде гвинтова лінія (рис. 254). Визначимо шаг гвинтової лінії як відстань, на яку переміщується частинка вздовж поля за один оберт:

$$h = v_{\parallel} \cdot T = v \cos \alpha \cdot T.$$

Ураховуючи, що $T = \frac{2\pi R}{v_{\perp}} = \frac{2\pi R}{v \sin \alpha}$, отримаємо

$$h = \frac{2\pi R v \cos \alpha}{v \sin \alpha} = \frac{2\pi R \cos \alpha}{\sin \alpha}.$$

Виконавши підстановку R , отримаємо

$$h = \frac{2\pi \cos \alpha}{\sin \alpha} \cdot \frac{mv \sin \alpha}{eB} = \frac{2\pi m v \cos \alpha}{eB}.$$

Відповідь: $h = \frac{2\pi m v \cos \alpha}{eB}.$

5. ЕЛЕКТРОМАГНІТНА ІНДУКЦІЯ

5.1. ЯВИЩЕ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ ІНДУКЦІЇ. ВИХРОВЕ ЕЛЕКТРИЧНЕ ПОЛЕ

Електромагнітна індукція — це явище виникнення електрорушійної сили індукції у провіднику, контур якого перетинається змінним магнітним потоком:

$$\mathcal{E}_{\text{інд}} = \frac{A_{\text{стор}}}{q}.$$

Якщо провідник замкнений, то відповідно до ЕРС індукції виникає індукційний струм:

$$I_{\text{інд}} = \frac{\mathcal{E}_{\text{інд}}}{R}.$$

Якщо провідник розімкнений, то на його кінцях виникає різниця потенціалів:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = U = \mathcal{E}_{\text{інд}}.$$

За теорією Максвелла навколо будь-якого змінного магнітного потоку виникає електричне поле, лінії напруженості якого замкнені навколо потоку і напрямлені за правилом лівого гвинта, якщо потік зростає (рис. 255, а); якщо потік зменшується, — за правилом правого гвинта (рис. 255, б).

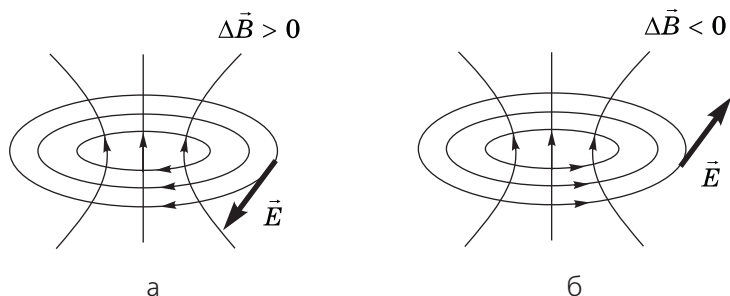


Рис. 255

Таке електричне поле називається **вихровим електричним полем** (його лінії напруженості замкнені) або **індукційним**. У контурі, який перетинається змінним магнітним потоком, вільні носії заряду переміщуються під дією вихрового електричного поля, здійснюють роботу, що означає виникнення ЕРС індукції:

$$\mathcal{E}_{\text{інд}} = \frac{A_{\text{вихр. ел. п}}}{q}, \quad E = \frac{\mathcal{E}_{\text{інд}}}{l}.$$

У контурі П, який магнітним потоком не перетинається, робота дорівнює нулю (рис. 256).

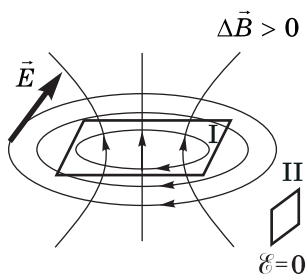


Рис. 256

5.2. ОСНОВНИЙ ЗАКОН ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ ІНДУКЦІЇ (ЗАКОН ФАРАДЕЯ). ПРАВИЛО ЛЕНЦА. ПРАВИЛО ПРАВОЇ РУКИ

ЕРС індукції прямо пропорційна швидкості зміни магнітного потоку, який перетинає контур провідника:

$$\mathcal{E}_{\text{інд}} = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}.$$

У разі руху провідника з постійною швидкістю в постійному магнітному полі роботу здійснює паралельна провіднику складова сили Лоренца:

$$\begin{aligned}\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} &= Bvl\sin\alpha, \\ \mathcal{E}_{\text{інд}} &= \frac{A_{\parallel\text{Л}}}{q}, \\ \mathcal{E}_{\text{інд}} &= Bvl\sin\alpha \left(\widehat{\vec{B}}, \widehat{\vec{v}} \right).\end{aligned}$$

Щоб переміщати провідник у постійному магнітному полі, необхідно витратити механічну енергію при подоланні перпендикулярної до провідника складової сили Лоренца. Ця механічна енергія перетворюється на електричну відповідно до роботи паралельної складової сили Лоренца (рис. 257).

Правило Ленца: індукційний струм, що виникає у замкненому контурі, має такий напрямок, що створюваний ним потік магнітної індукції через площу, обмежену контуром, намагається компенсувати ту зміну магнітної індукції, яка викликає цей струм.

Узагальнене правило Ленца: поля, струми і сили, що виникають у процесах індукції, завжди протидіють тому процесу, який викликає індукція (рис. 258).

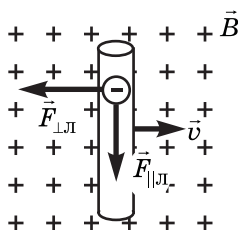


Рис. 257

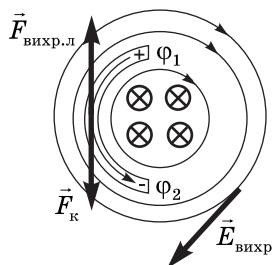


Рис. 258

Правило правої руки: якщо праву руку розташувати так, щоб лінії магнітної індукції були напрямлені в долоню, відігнутий великий палець указував напрямок швидкості руху провідника, то чотири витягнуті пальці вказують напрямок індукційного струму (рис. 259).

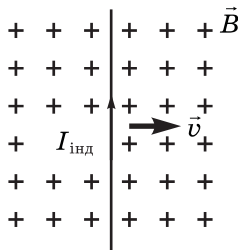


Рис. 259

5.3. ІНДУКЦІЙНІ СТРУМИ В СУЦІЛЬНИХ ПРОВІДНИКАХ

Індукційні струми в суцільних провідниках — **вихрові струми (струми Фуко)**.

У масивних провідниках, розташованих у змінному магнітному полі, вихрове електричне поле, що виникає, спричиняє появу індукційних струмів у деяких замкнених лініях. На їх утворення витрачається енергія, провідник

вихровими струмами нагрівається. Для послаблення вихрових струмів виготовляють магнітне осердя (генераторів, трансформаторів тощо) із тонких ізолюваних пластин феромагнетиків, розташованих перпендикулярно до напрямку можливого виникнення вихрових струмів.

5.4. САМОІНДУКЦІЯ. ІНДУКТИВНІСТЬ. ЕНЕРГІЯ МАГНІТНОГО ПОЛЯ

Самоіндукція — це явище виникнення електрорушійної сили індукції у провіднику при зміні сили струму в ньому самому.

1. Якщо в провіднику сила струму збільшується, магнітний потік навколо провідника зростає. Тому виникає вихрове електричне поле, яке протидіє зростанню струму і здійснює при цьому відповідну роботу. Це означає виникнення ЕРС індукції, протилежної за знаком ЕРС джерела.
2. Якщо в провіднику сила струму зменшується, виникає ЕРС індукції, яка збігається за знаком з ЕРС джерела.

Закон самоіндукції:

$$\mathcal{E}_{\text{с. і}} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t},$$

$$\Delta I > 0 \Rightarrow \mathcal{E} < 0, \quad \Delta I < 0 \Rightarrow \mathcal{E} > 0.$$

L — **індуктивність** провідника, власна характеристика провідника, яка чисельно дорівнює відношенню магнітного потоку, що виникає навколо провідника, до сили струму в ньому:

$$L = \frac{\Phi}{I} = \frac{\Delta \Phi}{\Delta I}.$$

Індуктивність провідника чисельно дорівнює ЕРС самоіндукції у провіднику за одиницю часу при зміні сили струму в ньому на одиницю:

$$L = \mathcal{E}_{\text{с. і}} \cdot \frac{\Delta t}{|\Delta I|}.$$

Одиниця виміру індуктивності в СІ — генрі (Гн).

Генрі — це індуктивність провідника, навколо якого магнітний потік змінюється на 1 Вб при зміні в ньому сили струму на 1 А:

$$[L] = 1 \text{ Гн}, 1 \frac{\text{Вб}}{\text{А}} = 1 \frac{\text{В} \cdot \text{с}}{\text{А}}.$$

Або:

Генрі — це індуктивність провідника, у якому виникає ЕРС самоіндукції 1 В при зміні сили струму в ньому на 1 А за 1 с.

Індуктивність провідника залежить від його розмірів та форми, наявності феромагнітного осердя. Індуктивність тору (замкненого у вигляді кільця соленоїда) максимально залежить від кількості витків (N) і магнітних властивостей осердя μ :

$$L = \mu \mu_0 \cdot \frac{N^2 S}{l}.$$

Генрі — це величезна індуктивність. Індуктивність звичайних обмоток з осердями становить кілька мГн.

Енергія магнітного поля провідника із струмом:

$$W_{\text{магн}} = \frac{LI^2}{2}.$$

Густина енергії магнітного поля:

$$w_{\text{магн}} = \frac{B^2}{2\mu\mu_0}.$$

5.5. ЕЛЕКТРОМАГНІТНЕ ПОЛЕ. ТЕОРІЯ МАКСВЕЛЛА В ЯКІСНОМУ ВИГЛЯДІ

Електромагнітне поле — це вид матерії, якому властиві:

- неперервність розподілу в просторі;
- дискретність структури;
- здатність поширюватися у просторі зі швидкістю, наближеною до швидкості світла c :

$$c \approx 3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}};$$

- силова дія на електрично заряджені частинки або тіла, яка залежить від швидкості їхнього руху.

Електромагнітне поле описується двома основними векторами: $\vec{E}$ — напруженість електричного поля:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}_{\text{ел}}}{q},$$

$\vec{B}$ — магнітна індукція магнітного поля:

$$B = \frac{F_{\text{магн max}}}{q \cdot v}.$$

Сила, з якою електромагнітне поле діє на електричний заряд, — **узагальнена сила Лоренца**:

$$\vec{F}_{\text{у. л}} = \vec{F}_{\text{ел}} + \vec{F}_{\text{магн}},$$

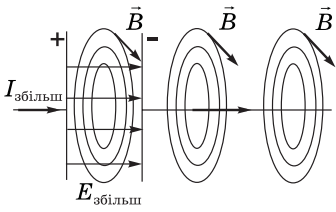
$$\vec{F}_{\text{у. л}} = q\vec{E} + q[\vec{v} \times \vec{B}].$$

Теорія електромагнітного поля (**теорія Максвелла**) — це теорія, що встановлює зв'язок між векторами, які описують електромагнітне поле, з одного боку, і джерелами та вихорами цих векторів — з другого. Ці зв'язки кількісно виражає **рівняння Максвелла**.

Джерела вектора — об'єкти, на яких лінії вектора починаються або закінчуються. **Вихори вектора** — об'єкти, навколо яких лінії вектора замикаються.

Якісно ці зв'язки показує табл. 7.

Таблиця 7

Вектори	Джерела	Вихори
$\vec{E}$	Вільні і зв'язані заряди	Змінні магнітні поля (електромагнітна індукція)
$\vec{B}$	Джерела не має — магнітне поле завжди вихрове	 Макро- і мікроструми («струми зміщення»). Змінні електричні поля (магнітоелектрична індукція)

У певних системах відліку не виявляється магнітна або електрична складова електромагнітного поля, і тоді поле відповідно називається електричним або магнітним.

Навколо зарядженої кульки, що перебуває у спокої в системі «Земля» (джерело $\vec{E}$), електромагнітне поле називається електричним (немає вихорів $\vec{B}$) (рис. 260).

Навколо постійного магніту, що перебуває у спокої в системі «Земля» (мікроструми — вихори $\vec{B}$), електромагнітне поле називається магнітним полем (немає джерел і вихорів $\vec{E}$) (рис. 261).

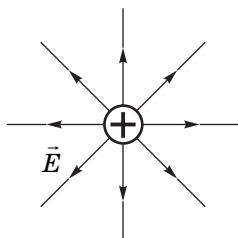


Рис. 260

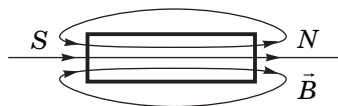


Рис. 261

У системі, що рухається відносно системи «Земля», поля $\vec{E}$ і $\vec{B}$ змінюються (вихори $\vec{B}$ і $\vec{E}$) — поле електромагнітне.

5.6. ПРИКЛАДИ РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧ

Задача 1.

Виток провідника по центру пронизується змінним з постійною швидкістю магнітним потоком. Чому дорівнює різниця потенціалів точок A і B ? Що покажуть вольтметри 1 і 2, підключені до точок A і B (рис. 262)?

Розв'язання:

У провіднику проходить індукційний струм під дією вихрового електричного струму:

$$I = \frac{\mathcal{E}_{\text{інд}}}{R}, \text{ отже, } \varphi_1 - \varphi_2 = 0.$$

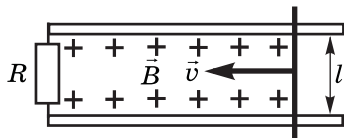


Рис. 262

У тому ж вихровому електричному полі перебувають вольтметри, в них проходить струм. Контур AV_1B1A поточно не перетинається, отже, ЕРС в контурі дорівнює 0, але за законом Ома:

$$\left. \begin{aligned} \mathcal{E} &= U_v + U_1 \\ \mathcal{E} &= 0 \end{aligned} \right\} |U_v| = |U_1|,$$

тобто вольтметр 1 фіксує напругу (падіння напруги) на ділянці $A1B$. Аналогічно вольтметр 2 — на ділянці $A2B$.

Задача 2.

Чи можна вибрати таку систему відліку, у якій магнітна індукція в просторі навколо провідника зі струмом дорівнювала б нулю?

Відповідь: не можна, оскільки в такій системі відліку електромагнітне поле було б відсутнім, а воно матеріальне і не існувати не може. Тільки в різних системах відліку його прояв різний.

Якщо взяти систему відліку, що рухається вздовж провідника зі швидкістю упорядкованого руху електронів у ньому, то в цій системі відліку електронний струм дорівнює 0 (відсутній), але назустріч рухається ґратка позитивних іонів. Струм позитивних іонів створює такий самий вихор $\vec{B}$. Тому в такій системі відліку є магнітне поле з тим же $\vec{B}$. Якщо ж у провіднику не іонний струм, а напрямлено рухомий пучок електронів, то в системі відліку, що рухається вздовж пучка з тією ж швидкістю, $B = 0$, але є поле $\vec{E}$ (джерело $\vec{E}$ — об'ємний заряд пучка).

Задача 3.

У магнітному полі, індукція якого $5 \cdot 10^{-2}$ Тл, обертається стрижень завдовжки 1 м зі сталою кутовою швидкістю $20 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$. Вісь обертання проходить через кінець стрижня і паралельна силовим лініям магнітного поля. Визначте ЕРС індукції, що виникає у стрижні.

Дано:

$$B = 5 \cdot 10^{-2} \text{ Тл}$$

$$l = 1 \text{ м}$$

$$\omega = 20 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$$

$$\mathcal{E}_{\text{інд}} = ?$$

Розв'язання:

Стрижень, обертаючись, перетинає лінії магнітної індукції. При кожному оберті він перетинає магнітний потік $\Phi_1 = BS = B\pi l^2$.

Протягом однієї секунди, за яку стрижень обернеться ν разів, він перетинає магнітний потік у ν разів більший, ніж Φ_1 .

Оскільки зміна потоку відбувається за 1 с, то вона і визначає ЕРС індукції, яка дорівнює

$$\mathcal{E}_{\text{інд}} = -B\pi l^2 \nu.$$

Частота обертання ν і кутова швидкість ω пов'язані між собою співвідношенням

$$\omega = 2\pi\nu, \text{ звідки } \nu = \frac{\omega}{2\pi}.$$

Отже, маємо

$$\mathcal{E}_{\text{інд}} = -B\pi l^2 \frac{\omega}{2\pi} = -\frac{Bl^2\omega}{2}.$$

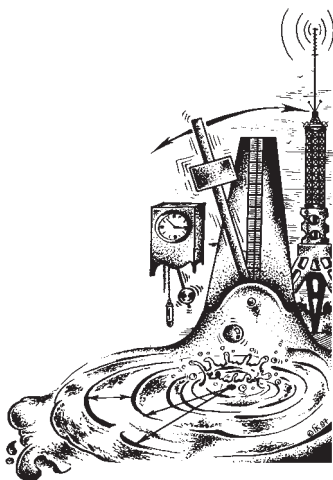
Обчислення:

$$[\mathcal{E}_{\text{інд}}] = \frac{\text{Тл} \cdot \text{м}^2}{\text{с}} = \frac{\text{Н}}{\text{А} \cdot \text{м}} \cdot \frac{\text{м}^2}{\text{с}} = \frac{\text{Дж}}{\text{Кл}} = \text{В},$$

$$\{\mathcal{E}_{\text{інд}}\} = -\frac{5 \cdot 10^{-2} \cdot 1^2 \cdot 20}{2} = -0,5.$$

Відповідь: $\mathcal{E}_{\text{інд}} = -0,5 \text{ В}.$

ФІЗИКА КОЛИВАНЬ



1. КОЛИВАЛЬНИЙ РУХ

1.1. ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ

Коливання — це рух або зміна стану, що має той чи інший ступінь повторюваності в часі (рис. 263, а, б).

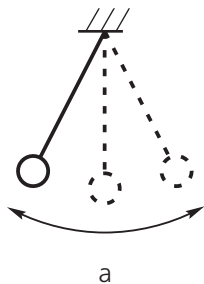


Рис. 263

Коливальний рух здійснюють маятники годинників, мембрани телефонів, поршні двигунів внутрішнього згоряння тощо.

Періодичні коливання — це коливання, при яких значення фізичної величини повторюються через однакові проміжки часу. Період коливання (T) — це проміжок часу, протягом якого тіло здійснює повне коливання, тобто повторюються значення всіх величин, які характеризують коливальний рух.

$$[T] = 1 \text{ с.}$$

Частота коливання (ν) — це число повних коливань за одиницю часу.

$$\nu = \frac{1}{T}, \quad [\nu] = \frac{1}{\text{с}} = 1 \text{ Гц (герц).}$$

Циклічна (колова) частота (ω) — це число повних коливань за 2π одиниць часу:

$$\omega = 2\pi\nu = \frac{2\pi}{T}, \quad [\omega] = \frac{1}{\text{с}}.$$

1.2. ГАРМОНІЧНІ КОЛИВАННЯ

1.2.1. РІВНЯННЯ ГАРМОНІЧНИХ КОЛИВАНЬ

При гармонічних коливаннях зміна коливальної величини з часом відбувається за законом синуса чи косинуса (рис. 264):

$$x = x_{\max} \sin(\omega t + \varphi_0),$$

$$x = x_{\max} \cos(\omega t + \varphi_0),$$

де x — миттєве значення коливальної величини (зміщення від положення рівноваги);

$x_{\max}$ — максимальне значення коливальної величини або **амплітуди коливання** (A);

ωt — **фаза коливання**. Це кутова величина, яка визначає частку періоду (в градусах чи радіанах), що минула від початку коливання: при описі коливання через синус — від найближчого моменту, коли величина мала нульове значення; при описі коливання через косинус — від найближчого моменту, коли величина мала максимальне значення:

$$\omega t = 2\pi\nu t = \frac{2\pi}{T} t, \quad \omega t = \frac{t}{T} 2\pi;$$

φ_0 — **початкова фаза**, тобто значення фази коливання в момент початку відліку часу (t_0).

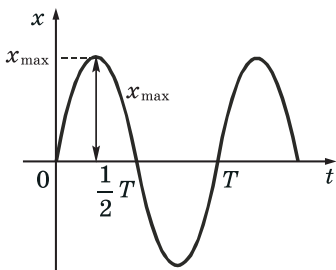


Рис. 264

Вільні коливання зручніше описувати функцією косинуса, оскільки $\cos 0^\circ = 1$.

Вимушені коливання зручніше описувати функцією синуса, оскільки $\sin 0^\circ = 0$:

$$x = x_{\max} \sin \omega t .$$

Швидкість гармонічних коливань — перша похідна координати за часом:

$$v = x'_t = x_{\max} \omega \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right),$$

$$v_{\max} = x_{\max} \omega .$$

Прискорення гармонічних коливань — перша похідна швидкості за часом, друга похідна координати за часом:

$$a = v'_t = x''_t ,$$

$$a = x_{\max} \omega^2 \sin(\omega t + \pi) = -x_{\max} \omega^2 \sin \omega t ,$$

$$a = -\omega^2 x .$$

Гармонічне коливання — таке коливання, прискорення якого пропорційне величині зміщення x і має протилежний йому напрям:

$$a = -\omega^2 x$$

Загальна закономірність: якщо якась величина змінюється за законом синуса чи косинуса, то швидкість її зміни відбувається за тим самим законом, але з амплітудою (максимальним значенням) у ω разів більшою і з фазою на $\frac{\pi}{2}$ більшою.

Сила, що зумовлює гармонічні коливання, прямо пропорційна абсолютному зміщенню тіла від положення рівноваги і напрямлена протилежно зміщенню:

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

$$F_x = -m\omega^2 x.$$

1.2.2. ВІЛЬНІ КОЛИВАННЯ МАЯТНИКІВ

Пружинний маятник — коливальна система, в якій коливання відбуваються під впливом сил пружності в межах пружності тіла (пружини) (рис. 265):

$$F_{\text{пруж}x} = -kx, \quad a_x = -\frac{k}{m}x.$$

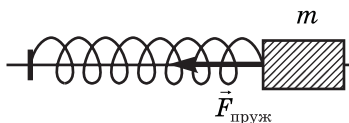


Рис. 265

Період вільних коливань пружинного маятника:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}, \quad \omega^2 = \frac{k}{m}.$$

Перетворення енергії при коливаннях пружинного маятника: енергія пружної деформації перетворюється в кінетичну енергію:

$$\frac{kx_{\text{max}}^2}{2} = \frac{mv_{\text{max}}^2}{2} = \frac{kx^2}{2} + \frac{mv^2}{2}.$$

Математичний маятник — це матеріальна точка, яка підвішена на невагомій нерозтяжній нитці.

Коливання математичного маятника відбуваються під дією тангенціальної складової сили тяжіння (рис. 266):

$$F_{T_x} = \frac{mg}{l} x ,$$

$$a_x = -\frac{g}{l} x .$$

При малих кутах коливання гармонічні.

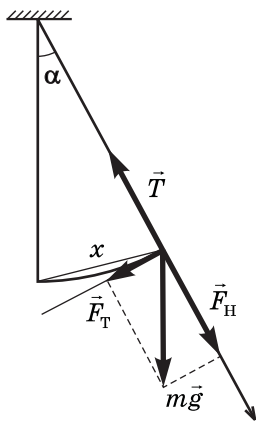


Рис. 266

Період вільних коливань математичного маятника:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}} .$$

При малих кутах відхилення період коливання математичного маятника не залежить від амплітуди (**ізохронність коливань**).

Перетворення енергії при коливаннях математичного маятника: потенціальна енергія тіла перетворюється в кінетичну енергію (рис. 267, а):

$$mgH = \frac{mv_{\max}^2}{2} = mgh + \frac{mv^2}{2} .$$

Фізичний маятник — це будь-яке тіло, здатне вільно обертатись навколо нерухомої горизонтальної осі, яка не проходить через його центр тяжіння (рис. 267, б).

При невеликих кутах відхилення від положення рівноваги він здійснює гармонічні коливання подібно до математичного маятника.

Зведеною довжиною ($l_{зв}$) фізичного маятника називають довжину такого математичного маятника, який має такий самий період коливань, як і даний фізичний маятник.

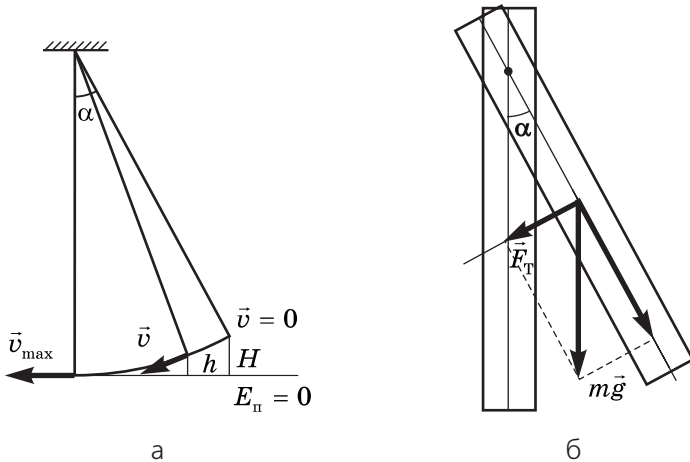


Рис. 267

Період коливання фізичного маятника:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{J_i}{mgl_{зв}}},$$

де J_i — момент інерції тіла.

Коливання фізичного маятника згасають, оскільки в реальних умовах завжди діють сили тертя; частина механічної енергії переходить у теплову при кожному коливанні.

Згасання коливань — це зменшення їхньої амплітуди і збільшення періоду коливань (негармонічні коливання) (рис. 268).

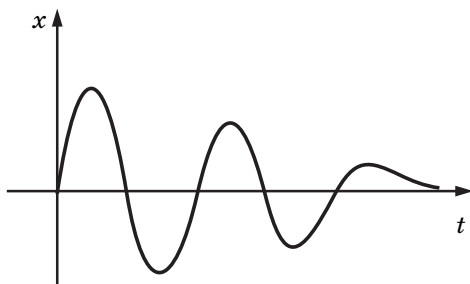


Рис. 268

1.3. ПРИКЛАДИ РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧ

Задача 1.

Вантаж масою 400 г здійснює коливання на пружині з жорсткістю 250 Н/м. Амплітуда коливань 15 см. Знайти повну механічну енергію коливань і найбільшу швидкість руху вантажу. Тертям знехтувати.

Дано:

$$m = 400 \text{ г}$$

$$k = 250 \text{ Н/м}$$

$$x_{\max} = 15 \text{ см}$$

$$E_{\text{мех}} = ?$$

$$v_{\max} = ?$$

Сі:

$$m = 0,4 \text{ кг}$$

$$x_{\max} = 0,15 \text{ м}$$

Розв'язання:

Згідно із законом збереження механічної енергії

$$E_{\text{мех}} = E_{\text{п max}} = E_{\text{к max}},$$

За означенням

$$E_{\text{п max}} = \frac{kx_{\max}^2}{2}, \quad E_{\text{к max}} = \frac{mv_{\max}^2}{2},$$

$$\text{тобто } \frac{kx_{\max}^2}{2} = \frac{mv_{\max}^2}{2}.$$

Звідси

$$v_{\max} = x_{\max} \sqrt{\frac{k}{m}}.$$

Обчислення:

$$[v_{\max}] = M \sqrt{\frac{H}{M \cdot K\Gamma}} = M \sqrt{\frac{\frac{M}{c^2} \cdot K\Gamma}{M \cdot K\Gamma}} = M \sqrt{\frac{1}{c^2}} = \frac{M}{c},$$

$$\{v_{\max}\} = 0,15 \sqrt{\frac{250}{0,4}} = 0,15 \cdot 25 \approx 3,8,$$

$$E_{\text{мех}} = E_{\text{п max}} \approx 2,8 \text{ Дж.}$$

Відповідь: $v_{\max} \approx 3,8 \text{ м/с}$, $E_{\text{мех}} \approx 2,8 \text{ Дж}$.

Задача 2.

Тіло здійснює гармонічні коливання за законом

$$x = 0,1 \cos\left(20\pi t + \frac{\pi}{3}\right) \text{ м.}$$

Визначити амплітуду, період, частоту, зміщення, фазу, швидкість та прискорення в момент часу 0,05 с. У який момент часу прискорення буде максимальним?

Дано:

$$x = 0,1 \cos\left(20\pi t + \frac{\pi}{3}\right) \text{ м}$$

$$t_1 = 0,05 \text{ с}$$

$$A — ?$$

$$T — ?$$

$$v — ?$$

$$x_1 — ?$$

$$\varphi_1 — ?$$

$$v_1 — ?$$

$$a_1 — ?$$

$$t_2 — ?$$

Розв'язання:

1) Досліджуючи дане рівняння гармонічних коливань і порівнюючи його з рівнянням гармонічних коливань у загальному вигляді $x = A \cos(\omega t + \varphi_0)$, знаходимо значення A , ω , φ_0 .

$$A = 0,1 \text{ м}; \quad \omega = 20\pi \frac{1}{\text{с}}; \quad \varphi_0 = \frac{\pi}{3} \text{ рад.}$$

Формула зв'язку циклічної частоти з періодом дозволяє визначити період коливань:

$$T = \frac{2\pi}{\omega}; \quad T = \frac{2\pi}{20\pi} \cdot c = 0,1 \text{ с.}$$

Із формули $T = \frac{1}{\nu}$ визначимо: $\nu = \frac{1}{T} = \frac{1}{0,1 \text{ с}} = 10 \text{ Гц.}$

2) Для визначення зміщення тіла від положення рівноваги необхідно в дане рівняння підставити значення часу $t_1 = 0,05 \text{ с}$:

$$x_1 = 0,1 \cos\left(20\pi \cdot 0,05 + \frac{\pi}{3}\right) \text{ м} = -0,05 \text{ м.}$$

Фазу коливань в момент часу $t_1 = 0,05 \text{ с}$ знаходимо за формулою

$$\varphi = \omega t + \varphi_0; \quad \varphi = 20\pi \cdot 0,05 + \frac{\pi}{3} = \frac{4}{3}\pi.$$

Швидкість в момент часу $t_1 = 0,05 \text{ с}$ знаходимо як першу похідну координати за часом:

$$v = x'_t = -A\omega \sin(\omega t + \varphi_0).$$

Виконавши підстановку значень A , ω , t_1 , φ_0 , отримаємо:

$$v = -0,1 \cdot 20\pi \sin\left(20\pi \cdot 0,05 + \frac{\pi}{3}\right) = 5,44 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Прискорення в момент часу $t_1 = 0,05 \text{ с}$ знаходимо як першу похідну швидкості за часом:

$$\begin{aligned} a &= -A\omega^2 \cos(\omega t_1 + \varphi_0) = \\ &= -20^2 \cdot 3,14^2 \cdot 0,1 \cos\left(20\pi \cdot 0,05 + \frac{\pi}{3}\right) = 197 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}. \end{aligned}$$

3) Прискорення тіла буде максимальним, якщо $\cos(\omega t_2 + \varphi_0) = 1$.

Розв'яжемо рівняння відносно t_2 :

$$t_2 = \frac{\arccos 1 - \varphi_0}{\omega}, \quad t_2 = \frac{2\pi - \frac{\pi}{3}}{20\pi} = 0,083 \text{ (с).}$$

Відповідь: $A = 0,1$ м, $\omega = 20\pi \frac{1}{\text{с}}$, $\varphi_0 = \frac{\pi}{3}$ рад, $\nu = 10$ Гц,

$x_1 = -0,05$ м, $\varphi = \frac{4}{3}\pi$, $v_1 = 5,44 \frac{\text{м}}{\text{с}}$, $a_1 = 197 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$,

$t_2 = 0,083$ с = 83 мс.

Задача 3.

За графіком гармонічних коливань, поданим на рис. 269, записати рівняння цього коливання. Знайти швидкість точки в момент часу, коли зміщення дорівнює 0,05 м.

Розв'язання:

Запишемо в загальному вигляді рівняння гармонічних коливань

$$x = A \sin \omega t.$$

За графіком визначимо амплітуду A , період T , початкову фазу коливань φ_0 :

$$x_m = A = 0,1 \text{ м}, T = 0,4 \text{ с}.$$

Обчислимо циклічну частоту коливань:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = \frac{2\pi}{0,4} = 5\pi \frac{1}{\text{с}}.$$

Тоді отримаємо рівняння гармонічного коливання, поданого на рис. 269:

$$x = 0,1 \sin 5\pi t.$$

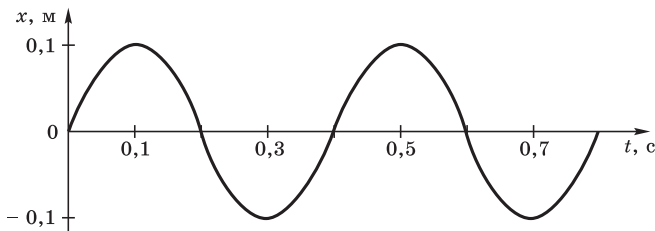


Рис. 269

Для визначення швидкості точки знайдемо залежність швидкості від часу

$$v = x'_t = 0,5\pi \cos 5\pi t,$$

а також момент часу, коли зміщення точки від положення рівноваги дорівнює 0,05 м:

$$0,05 = 0,1 \sin 5\pi t.$$

$$\text{Звідси } \sin 5\pi t \approx 0,5, \text{ тобто } 5\pi t = \frac{\pi}{6}.$$

$$\text{Визначимо момент часу } t: t = \frac{1}{30} \text{ с.}$$

Виконаємо підстановку моменту часу t у рівняння для швидкості тіла, отримуємо:

$$v = 0,5\pi \cos 5\pi \cdot \frac{1}{30} \approx 1,36 \left(\frac{\text{м}}{\text{с}} \right).$$

$$\text{Відповідь: } x = 0,1 \sin 5\pi t, \quad v = 1,36 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

2. ЗМІННИЙ СТРУМ

2.1. ОДЕРЖАННЯ ЗМІННОГО СИНУСОЇДНОГО СТРУМУ. ЗАКОНОМІРНОСТІ ЗМІННОГО СТРУМУ

При обертанні рамки зі сталою швидкістю в постійному магнітному полі $\vec{B}$ у рамці виникає синусоїдна ЕРС (рис. 270, а):

$$e = BS\omega \sin \omega t, \quad e = \mathcal{E}_{\max} \sin \omega t, \quad \mathcal{E}_{\max} = BS\omega.$$

Якщо N витків, то

$$\mathcal{E}_{\max} = BS\omega N.$$

У генераторах змінного струму обертається постійний електромагніт (ротор), а рамка (обмотка) розміщена в пазах статора, який складається з окремих пластин (щоб зменшити струми Фуко) магнітном'якого феромагнетика (щоб зменшити втрати енергії на перемагнічування).

На кінцях рамки (обмотки генератора) виникає синусоїдна напруга, яка збігається за фазою з ЕРС (рис. 270, б):

$$u = U_{\max} \sin \omega t .$$

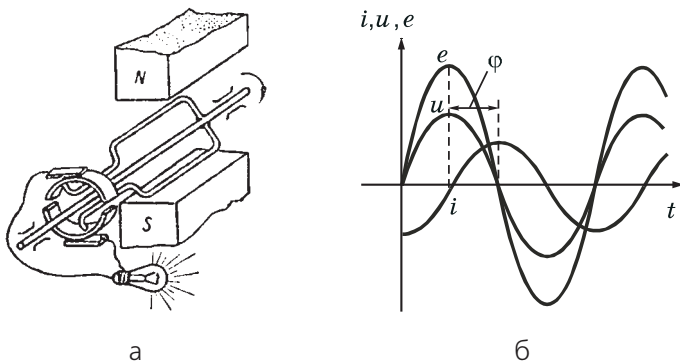


Рис. 270

При двополюсному електромагніті частота змінного струму (частота ЕРС) дорівнює частоті обертання електромагніта (частоті обертання ротора генератора).

Для одержання промислового змінного струму використовують генератори з багатополюсними магнітами. При N пар полюсів частота обертання турбіни в N разів менша від частоти одержаного струму.

У зовнішньому колі виникають **вимушені електричні коливання заряду — змінний синусоїдний струм**, який за фазою відрізняється від ЕРС і напруги на величину φ , яка залежить від властивостей кола:

$$i = I_{\max} \sin(\omega t \pm \varphi),$$

$$I_{\max} = \frac{\mathcal{E}_{\max}}{R} .$$

2.2. ДІЮЧЕ ЗНАЧЕННЯ ЗМІННОГО СТРУМУ

Діюче значення змінного синусоїдного струму — це величина, яка дорівнює квадратному кореню із середнього квадрата сили струму за період:

$$I = \sqrt{i^2} = \frac{I_{\max}}{\sqrt{2}},$$

$$U = \frac{U_{\max}}{\sqrt{2}},$$

де I, U — діючі значення.

Це значення такої сили постійного струму, при якому виділялося б стільки енергії на певній ділянці, як і при змінному струмі.

У промислових колах змінного струму його частота — 50 Гц:

$$\nu_{\text{промисл}} = 50 \text{ Гц},$$

$$T = \frac{1}{50} \text{ с}, \quad \omega = 2\pi\nu = 100\pi \text{ с}^{-1}.$$

2.3. ОПІР ЗМІННОМУ СТРУМУ. ЗАКОН ОМА ДЛЯ ЗМІННОГО СТРУМУ

Опір змінному струму:

R — активний опір (опір провідника);

X_L — індуктивний опір:

$$X_L = \omega L;$$

X_C — ємнісний опір:

$$X_C = \frac{1}{\omega C};$$

X_L і X_C — реактивні опори;

Z — повний опір кола змінному струму:

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}.$$

Зсув фаз у колах змінного струму. При наявності в колі індуктивності (L) сила струму відстає за фазою від напруги. При наявності в колі ємності (C) сила струму випереджає напругу за фазою. **Зсув фаз** визначається співвідношенням між активним і повним опором кола:

$$\cos\varphi = \frac{R}{Z}.$$

Імпеданс кола — це сума тільки активного та індуктивного опору:

$$\sqrt{R^2 + X_L^2}.$$

Закон Ома для змінного струму:

$$I = \frac{U}{Z}, \quad I_{\max} = \frac{U_{\max}}{Z}.$$

2.4. ЕЛЕКТРИЧНИЙ РЕЗОНАНС. РЕЗОНАНС НАПРУГ. РЕЗОНАНС СТРУМІВ

Електричний струм у колі змінного струму — це вимушені електричні коливання з частотою ЕРС джерела. Будь-яке електричне коло — контур, який має певну частоту власних коливань ω_0 .

$$\text{Якщо } R \rightarrow 0, \quad \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}.$$

Електричний резонанс — явище різкого зростання амплітуди вимушених коливань сили струму в колі $I_{\max}$ при наближенні циклічної частоти зовнішньої змінної ЕРС ω до частоти власних коливань ω_0 кола (рис. 271).

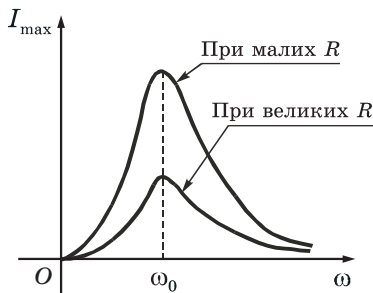


Рис. 271

Резонанс напруг: при послідовному з'єднанні R, C, L при електричному резонансі амплітуда напруги на індуктивності та ємності однакова, а фази протилежні. Повне падіння напруги в колі дорівнює напрузі на активному опорі. Зсув

фаз між коливаннями зовнішньої ЕРС та силою струму в колі дорівнює нулю (рис. 272):

$$U_L = -U_C, U_L + U_C = 0, I_{\max} = \frac{\mathcal{E}_{\max}}{R}.$$

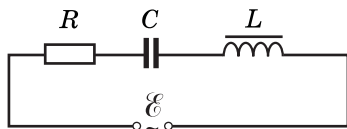


Рис. 272

При паралельному з'єднанні L і C (R_1 і $R_2 \rightarrow 0$) відбувається **резонанс струмів**. Сила струму в розгалуженнях однакова, а фази протилежні, якщо однакові X_L і X_C . Струм у нерозгалуженій частині кола наближається до нуля (рис. 273):

$$I_{\max} = |I_{\max_1} - I_{\max_2}| = \mathcal{E}_{\max} \left| \frac{1}{\omega L} - \omega C \right|.$$

$$\text{Якщо } \omega = \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}},$$

$$I_{\max_1} = I_{\max_2} \text{ і } I_{\max} = 0 \text{ (резонанс струмів).}$$

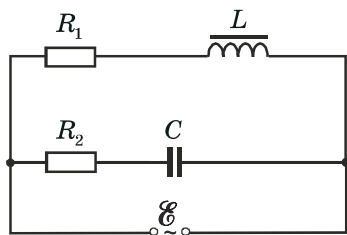


Рис. 273

2.5. ВИПРЯМЛЕННЯ ЗМІННОГО СТРУМУ

При однонапівперіодному випрямленні споживач і діод з'єднуються послідовно. При цьому струм у споживачі

змінний, пульсуючий, перервний (діод пропускає струм тільки півперіоду кожного з коливань напруги) (рис. 274, а).

При двонапівперіодному випрямленні струм у споживачі змінний, пульсуючий (кожні півперіоду коливань працює один із діодів від полярності напруги) (рис. 274, б).

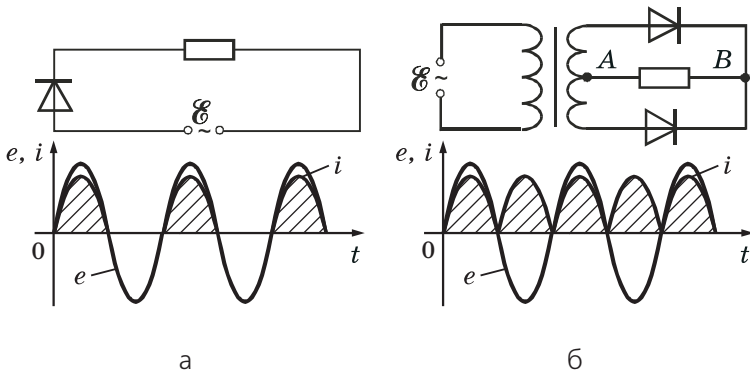


Рис. 274

2.6. ТРАНСФОРМАЦІЯ ЗМІННОГО СТРУМУ

Трансформатор напруги базується на явищі взаємної індукції двох обмоток на одному спільному осерді. Перетворює напругу, збільшуючи чи зменшуючи її до необхідних значень (рис. 275).

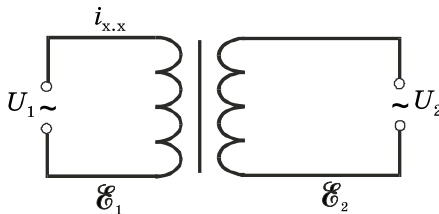


Рис. 275

Коефіцієнт трансформації (K) — це число, що визначає, у скільки разів відрізняється напруга, подана на первинну

обмотку, від напруги, яку дістають на вторинній обмотці на холостому ході:

$$K = \frac{U_1}{U_2} \text{ на холостому ході.}$$

Оскільки ЕРС ($\mathcal{E}$) в кожному витку однакова:

$$\frac{\mathcal{E}_1}{\mathcal{E}_2} = \frac{eN_1}{eN_2} = \frac{N_1}{N_2}, \quad K \approx \frac{N_1}{N_2}.$$

При підключенні споживачів (навантаження) виникають навантажувальні струми, обернено пропорційні числу витків обмоток:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1}.$$

ККД трансформатора:

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + P_{\text{Cu}} + P_{\text{сталі}}}.$$

Тут P_{Cu} — втрати в міді. Це втрати на нагрівання обмоток, вони дуже малі, оскільки мідний дріт має достатньо великий переріз і низьке значення ρ_{Cu} .

$P_{\text{сталі}}$ — втрати в сталі на перемагнічування осердя і струми Фуко теж мізерні, оскільки осердя складається із окремих ізольованих пластин магнітнотякого феромагнітного матеріалу;

P_2 — потужність споживача.

ККД трансформатора дуже високий: $\approx 98\%$.

У лініях передачі електричної енергії на великі відстані потужні трансформатори підвищують напругу до мільйонів вольт, а в споживача знижують напругу до необхідних значень (у побутових лініях 380/220 В).

2.7. ЗМІННИЙ СТРУМ ВИСОКОЇ ЧАСТОТИ

При струмі високої частоти біля осі провідника індукується електричне поле, яке напрямлене у бік, протилежний основному полю (правило Ленца), та послаблює струм до нуля. Струм високої частоти протікає тільки по поверхні

провідника. Це називається поверхневим ефектом або **скін-ефектом** (рис. 276).

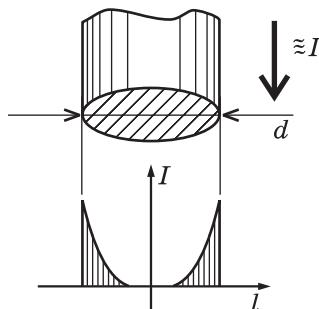


Рис. 276

2.8. ПРИКЛАДИ РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧ

Задача 1.

Неонова лампа починає світитись, коли напруга на її електродах досягає певного значення (потенціал запалювання). Скільки часу за період буде світитись лампа, якщо її ввімкнули в промислову мережу, діюче значення в якій дорівнює потенціалу запалювання лампи?

Дано:

$$u = U$$

$$\nu = 5 \text{ Гц}$$

$$t_{\text{світ}} = ?$$

Розв'язання:

Лампа не загоряється протягом часу t .

Унаслідок симетрії синусоїди час світіння за період $t_{\text{світ}} = T - 4t$ (рис. 277).

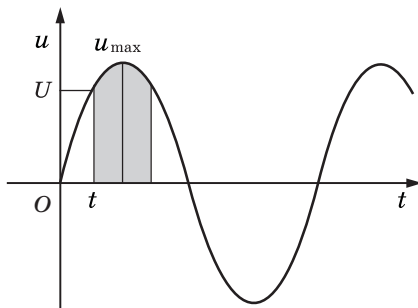


Рис. 277

У мережі $\nu = 50 \text{ Гц} \Rightarrow T = (1 / 50) \text{ с}$.

Необхідно визначити t із рівняння

$$u = U_{\max} \sin \omega t .$$

За умовою

$$u = U, \text{ а } U = \frac{U_{\max}}{\sqrt{2}} \Rightarrow U_{\max} = U\sqrt{2} ,$$

$$U = U\sqrt{2} \sin \omega t ,$$

$$\sin \omega t = \frac{U}{U\sqrt{2}} = \frac{1}{\sqrt{2}} = \frac{\sqrt{2}}{2} \Rightarrow \omega t = 45^\circ = \frac{\pi}{4} ;$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T} , \quad \frac{2\pi}{T} t = \frac{\pi}{4} , \quad t = \frac{T}{8} ,$$

$$t_{\text{світ}} = T - 4 \frac{T}{8} = \frac{T}{2} = \frac{1}{2\nu} .$$

Обчислення:

$$[t_{\text{світ}}] = \text{с}, \quad \{t_{\text{світ}}\} = \frac{1}{50 \cdot 2} = 0,01 \text{ с}.$$

Відповідь: $t_{\text{світ}} = 0,01 \text{ с}$.

Задача 2.

За графіком, зображеним на рис. 278, визначити амплітуду ЕРС, період. Напишіть рівняння миттєвого значення ЕРС.

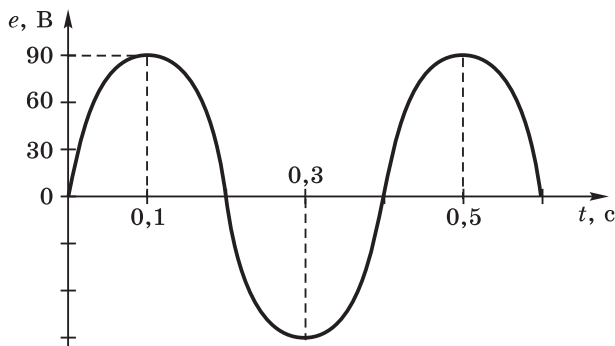


Рис. 278

Дано:

Графік $e = e(t)$

Розв'язання:

Із графіка визначаємо амплітудне значення ЕРС і період.

$$\mathcal{E}_{\max} = 90 \text{ В}, T = 0,4 \text{ с.}$$

Циклічна частота

$$\omega = \frac{2\pi}{T}.$$

 $\mathcal{E}_{\max}$ — ? T — ?Рівняння $e = e(t)$ — ?

$$[\omega] = \text{с}^{-1}, \quad \omega = \frac{2\pi}{0,4 \text{ с}} = 5\pi \text{ с}^{-1}.$$

Підставляємо знайдені значення $\mathcal{E}_{\max}$ і ω у рівняння миттєвого значення ЕРС $e = \mathcal{E}_{\max} \sin \omega t$. Отже, маємо $e = 90 \sin 5\pi t$.

Відповідь: $\mathcal{E}_{\max} = 90 \text{ В}; T = 0,4 \text{ с}; e = 90 \sin 5\pi t$.

Задача 3.

Первинна обмотка знижувального трансформатора з коефіцієнтом трансформації $k = 10$ увімкнена в коло з напругою $U_1 = 120 \text{ В}$. Опір вторинної обмотки трансформатора $R_2 = 1,2 \text{ Ом}$ струму у вторинному колі трансформатора $I_2 = 5 \text{ А}$. Визначити напругу на затискачах вторинної обмотки трансформатора. Втрати в первинному колі трансформатора не враховувати.

Дано:

 $k = 10$ $U_1 = 120 \text{ В}$ $R_2 = 1,2 \text{ Ом}$ $I_2 = 5 \text{ А}$

Розв'язання:

Згідно з умовою задачі втратами енергії у первинному колі можна знехтувати, тому $\mathcal{E}_1 \approx U_1$.

Напруга на затискачах вторинної обмотки

 $U_2 = ?$

$$U_2 = \mathcal{E}_2 - I_2 R_2,$$

де $I_2 R_2$ — спад напруги на вторинній обмотці.

$$\text{Коефіцієнт трансформації } k = \frac{\mathcal{E}_1}{\mathcal{E}_2} = \frac{U_1}{\mathcal{E}_2},$$

звідки $\mathcal{E}_2 = \frac{U_1}{k}$, тоді:

$$U_2 = \frac{U_1}{k} - I_2 R_2.$$

Обчислення:

$$[U_2] = \text{В} - \text{А} \cdot \text{Ом} = \text{В}; \{U_2\} = \frac{120}{10} - 1,2 \cdot 5 = 6.$$

Відповідь: $U_2 = 6 \text{ В}$.

3. ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ КОЛИВАННЯ

3.1. КОЛИВАЛЬНИЙ КОНТУР.

ВІЛЬНІ ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ КОЛИВАННЯ

Електромагнітні коливання — це коливання електричного заряду (q), сили струму (I), напруги (U), пов'язані з ними коливання напруженості електричного поля ($\vec{E}$) та індукції магнітного поля ($\vec{B}$), а також самостійні коливання $\vec{E}$ і $\vec{B}$ в електромагнітній хвилі.

Збудниками електромагнітних коливань є електричні заряди, що рухаються з прискоренням.

Електричні коливання — це коливання q , I та U .

Гармонічні електромагнітні коливання виникають у коливальному контурі. **Коливальний контур** — це електричне коло, яке складається з конденсатора, замкненого на котушку індуктивності. Такий контур називається **замкненням**, оскільки майже не випромінює енергії в простір. Контур називають ідеальним, якщо його активний опір $R \rightarrow 0$.

При наданні конденсатору заряду q виникає електричне поле $\vec{E}$, а на його пластинах — різниця потенціалів $\phi_1 - \phi_2 = U$. Виникає струм, який збільшується поступово, оскільки його збільшенню протидіє вихрове електричне поле, що виникає внаслідок збільшення магнітного потоку котушки. Струм зростає, поки вся енергія електричного поля конденсатора не перейде в енергію магнітного поля котушки. З цього моменту струм у колі продовжує проти-

3. ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ КОЛИВАННЯ

кати внаслідок самоіндукції, перезаряджаючи конденсатор і створюючи між його пластинами зростаюче електричне поле, яке заважає протіканню струму. Струм зменшується поступово, оскільки його підтримує вихрове електричне поле, що виникає внаслідок зменшення магнітного поля котушки. Струм припиняється, коли вся енергія магнітного поля котушки перейде в енергію електричного поля конденсатора. Потім процес повторюється.

Якщо проводити аналогію між електромагнітними коливаннями в контурі й механічними коливаннями математичного маятника, то q — аналог x , $W_{\text{ел}}$ — аналог $E_{\text{п}}$, $W_{\text{маг}}$ — аналог $E_{\text{к}}$ (рис. 279, а—г).

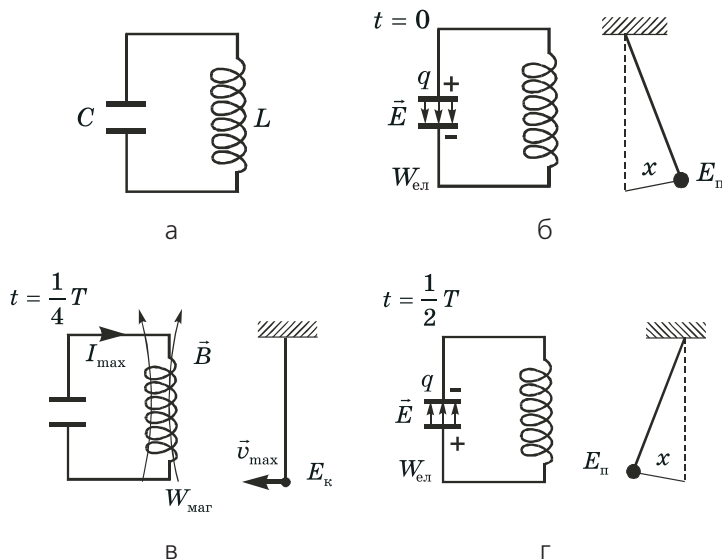


Рис. 279

3.2. ЗАКОНОМІРНОСТІ ВІЛЬНИХ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ КОЛИВАНЬ. ЗГАСАЮЧІ КОЛИВАННЯ

Період вільних незгасаючих електромагнітних коливань у коливальному контурі (установив У. Томсон):

$$T = 2\pi\sqrt{LC}, \text{ якщо } R = 0.$$

Перетворення енергії в ідеальному коливальному контурі (закон збереження енергії):

$$\frac{CU_m^2}{2} = \frac{LI_m^2}{2} = \frac{Cu}{2} + \frac{Li^2}{2}.$$

Коливання в ідеальному контурі є гармонічними — з циклічною частотою:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = \frac{1}{\sqrt{LC}},$$

$$q = q_m \cos \omega t,$$

$$i = I_m \cos \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right),$$

$$u = U_m \cos \omega t, \quad E = E_m \cos \omega t, \quad B = B_m \cos \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right).$$

При наявності в коливальному контурі активного опору R період коливань у ньому визначається за **формулою Томсона для повного опору контура**:

$$T = \frac{2\pi\sqrt{LC}}{\sqrt{1 - \frac{R^2 C}{4L}}}.$$

Коливання в такому контурі **згасаючі**, тобто амплітуда коливань зменшується, а період дещо збільшується. Коливання згасають, оскільки частина енергії електромагнітного поля при кожному коливанні перетворюється у внутрішню (теплову) енергію активного опору R (рис. 280).

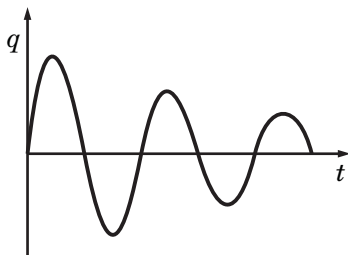


Рис. 280

$$\text{Якщо } R = R_{\text{кр}} = 2\sqrt{\frac{L}{C}} \quad (\text{критичний опір}),$$

то $T \rightarrow \infty$ — коливання неможливі.

$$\frac{R}{2L} \quad \text{— коефіцієнт згасання.}$$

Згасаючі коливання негармонічні.

3.3. ОТРИМАННЯ НЕЗГАСАЮЧИХ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ КОЛИВАНЬ

Для отримання незгасаючих електромагнітних коливань у неідеальному контурі необхідно протягом кожного періоду коливань передавати контуру порцію енергії. Так працює генератор незгасаючих електромагнітних коливань. У ньому енергія джерела струму порціями передається контуру за допомогою транзистора (рис. 281).

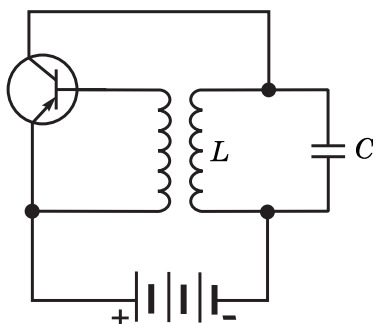


Рис. 281

3.4. ПРИКЛАДИ РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧ

Задача 1.

Конденсатор ємністю C , що має заряд q , увімкнений у коло (рис. 282). Визначити максимальну силу струму, що йде через котушку індуктивністю L , після замикання ключа K .

Дано:

 q C L $I_{\max} \text{ — ?}$

Розв'язання:

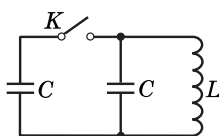


Рис. 282

Електрична ємність контуру після замикання ключа дорівнює $2C$, тому що конденсатори з'єднані паралельно. Оскільки в контурі немає активного опору, вважаємо контур ідеальним. У ньому енергія електричного поля конденсатора повністю перетворюється в енергію магнітного поля котушки:

$$\frac{q^2}{2 \cdot 2C} = \frac{LI_{\max}^2}{2} \Rightarrow I_{\max} = \frac{q}{\sqrt{2LC}}.$$

Відповідь: $I_{\max} = \frac{q}{\sqrt{2LC}}.$

Задача 2.

Конденсатор ємністю 10 мкФ зарядили до напруги $U_1 = 400 \text{ В}$ і приєднали до котушки. Після цього в контурі виникли згасаючі коливання. Яка кількість теплоти виділиться в коливальному контурі за час, протягом якого амплітуда напруги зменшиться вдвічі?

Дано:

 $C = 10 \text{ мкФ}$ $U_1 = 400 \text{ В}$ $U_2 = 200 \text{ В}$ $Q \text{ — ?}$

СІ:

 $C = 1 \cdot 10^{-5} \text{ Ф}$

Розв'язання:

Оскільки виникають згасаючі коливання в коливальному контурі завдяки перетворенню енергії електричного поля у внутрішню (нагрівання провідника), то із закону збереження енергії випливає:

$$W_1 = Q + W_2; \quad \frac{CU_1^2}{2} = Q + \frac{CU_2^2}{2},$$

$$Q = \frac{C}{2}(U_1^2 - U_2^2).$$

Обчислення:

$$[Q] = \Phi \cdot B^2 = \text{Дж},$$

$$\{Q\} = \frac{1 \cdot 10^5}{2}(400^2 - 200^2) = 0,6.$$

Відповідь: $Q = 0,6$ Дж.

4. МЕХАНІЧНІ ХВИЛІ. ЗВУК

4.1. ПОЗДОВЖНІ І ПОПЕРЕЧНІ ХВИЛІ. ПРОМІНЬ. ДОВЖИНА ХВИЛІ. ФРОНТ ХВИЛІ

Механічні хвилі — це процес поширення коливань у пружних середовищах.

Промінь — напрям поширення коливань.

При поширенні пружних хвиль частинки середовища не переміщуються разом із хвилею, а лише здійснюють коливання навколо своїх положень рівноваги.

Якщо коливання частинок відбувається перпендикулярно до променя, хвиля називається **поперечною** (рис. 283).

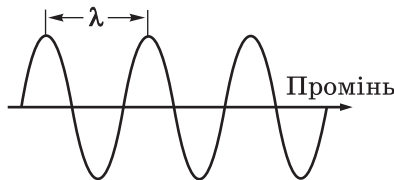


Рис. 283

Поперечні хвилі виникають у середовищах, які проявляють пружність при змінюванні форми — у твердих тілах і на поверхні рідин.

Якщо частинки коливаються вздовж променя, хвиля називається **поздовжньою** (рис. 284).

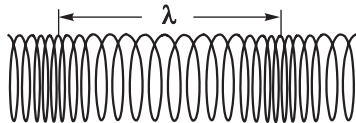


Рис. 284

Поздовжні хвилі виникають у середовищах, які проявляють пружність при зміні об'єму, тобто в усіх середовищах.

Поздовжні хвилі складаються із ряду згущень і розріджень.

Довжина хвилі (λ) — це відстань, на яку поширюється хвиля протягом одного періоду коливань:

$$\lambda = vT, v = \lambda \nu.$$

Точки середовища, які розташовані одна від одної на відстані, що дорівнює довжині хвилі λ , коливаються в однакових фазах.

Швидкість поширення поздовжніх хвиль у твердих тілах:

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}},$$

де E — модуль Юнга, ρ — густина середовища.

В ізотропному середовищі від точки, яка коливається, коливання поширюються у всіх напрямках зі сталою швидкістю.

Фронт хвилі — геометричне місце точок, до яких на даний момент часу дійшли коливання. Фронт хвилі від точкового вібратора в однорідному середовищі — сфера (рис. 285, а). **Плоска хвиля** — хвиля, фронтом якої є площина (промені паралельні) (рис. 285, б).

4.2. ПРИНЦИП ГҮЙГЕНСА

Хвильова поверхня нормальна до променів. Побудова нового фронту хвилі, пояснення законів відбивання і заломлення хвиль описуються **принципом ГҮЙГЕНСА**: кожна точка

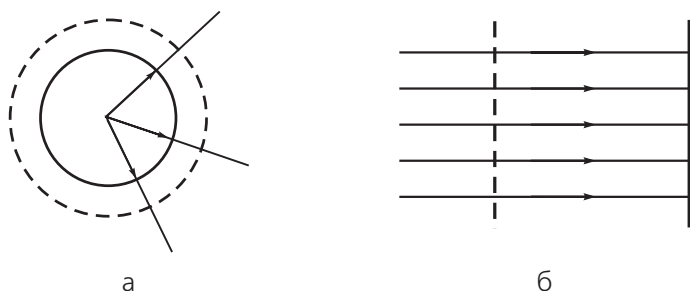


Рис. 285

фронту хвилі є точкою елементарних хвиль (поширюється з тією ж швидкістю). Обвідна всіх цих елементарних хвиль — це новий фронт хвилі (рис. 286).

Відбивання хвилі за Гюйгенсом показано на рис. 287.

Заломлення хвилі за Гюйгенсом зображено на рис. 288.

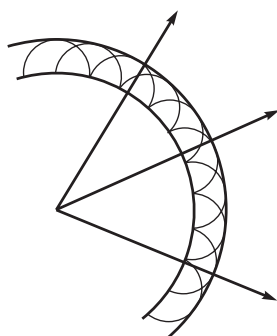


Рис. 286

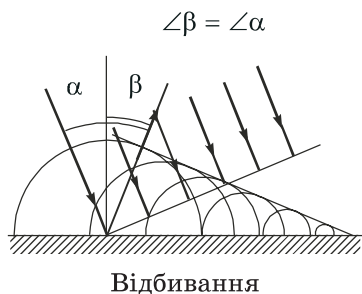


Рис. 287

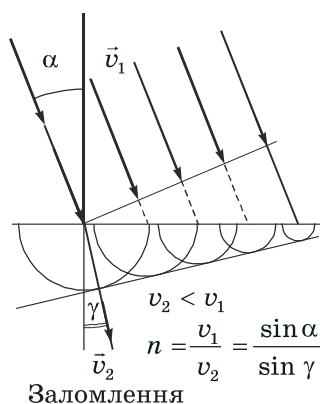


Рис. 288

4.3. ІНТЕРФЕРЕНЦІЯ ХВИЛЬ

Накладання хвиль. Інтерференція хвиль.

Хвилі поширюються незалежно одна від одної.

Додаються (геометрично) зміщення частинок середовища, до яких доходять хвилі від кількох джерел хвиль (**принцип суперпозиції**).

Якщо джерела хвиль когерентні, створюється стійка інтерференційна картина. **Когерентні джерела** — це такі джерела, що мають однакові частоту і фази коливань або у яких різниця фаз коливань залишається сталою. Хвилі від декількох когерентних джерел когерентні. Якщо джерела когерентні й **синфазні**, тобто збігаються у фазі, то в точках середовища, куди хвилі приходять, збігаючись у фазі, створюється **максимум інтерференційної картини** ($A = A_1 + A_2$):

$$\max A = A_1 + A_2, \quad r_1 - r_2 = n\lambda,$$

де $n = 0, 1, 2, \dots$

Якщо **хвильова різниця ходу**, тобто різниця ходу, що виміряна в довжинах хвиль (геометрична різниця ходу вимірюється в одиницях довжини), дорівнює нулю або цілому числу довжин хвиль, спостерігається максимум інтерференційної картини.

Мінімум інтерференційної картини ($A = A_1 - A_2$) спостерігається в точках, до яких хвильова різниця ходу дорівнює непарному числу півхвиль:

$$\min A = A_1 - A_2, \quad r_1 - r_2 = (2n + 1) \frac{\lambda}{2},$$

де $n = 0, 1, 2, \dots$

Стоячі хвилі — постійна інтерференційна картина під час накладання відбитої і падаючої хвиль. Точки максимальних коливань ($A = A_1 + A_2$) називаються пучністю стоячої хвилі, а точки з мінімальними коливаннями називаються вузлами стоячої хвилі. Відстань між найближчими вузлами або пучностями називається довжиною стоячої хвилі (рис. 289).

4.4. ДИФРАКЦІЯ ХВИЛЬ

В однорідному середовищі хвилі поширюються прямолінійно. При проходженні повз перешкоди чи крізь отвори хвилі

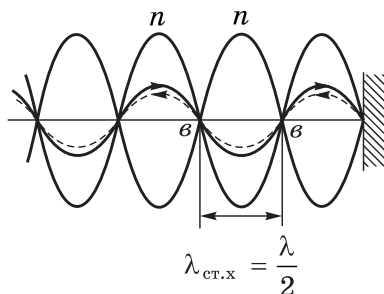


Рис. 289

відхиляються від попереднього напрямку — порушується їхнє прямолінійне поширення. Заходження хвиль в зону геометричної тіні називається **дифракцією хвиль**. Якщо лінійні розміри перешкоди сумірні з довжиною хвиль, то хвилі їх відразу огинають.

Якщо лінійні розміри перешкоди (h) більші за довжину хвилі (λ), то за перешкодою утворюється хвильова тінь (простір, куди хвилі не потрапляють). Якщо $h \gg \lambda$, то хвильова тінь простягається від перешкоди на більшу відстань, а за хвильовою тінню хвилі, які обігнули перешкоду, інтерферують.

4.5. ЗВУК. ЗВУКОВІ ХВИЛІ. ІНТЕНСИВНІСТЬ, ВИСОТА І ТЕМБР ЗВУКУ

Звук — це механічні коливання з частотою від 16 до 20 000 Гц, які сприймаються органами слуху людини. Коливання з частотою, більшою від 20 кГц, — **ультразвук**, меншою від 16 Гц — **інфразвук**.

Звукові хвилі в повітрі — хвилі поздовжні.

Інтенсивність звуку — це енергія, яку звукова хвиля переносить за 1 с через одиницю площі поверхні, розміщеної нормально відносно напрямку поширення:

$$I = \frac{W}{St}, \quad [I] = 1 \frac{\text{Дж}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}} = 1 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

Інтенсивність звуку прямо пропорційна квадрату амплітуди звукових коливань A^2 :

$$I = \frac{1}{2} \rho v \omega^2 A^2,$$

де ρ — густина середовища; v — швидкість поширення хвилі; ω — циклічна частота хвилі.

Гучність звуку — суб'єктивна характеристика. Вона залежить від інтенсивності звуку, зумовленої амплітудою коливань, а також частотою коливань (слух людини найбільш чутливий до коливань діапазону 1000—4000 Гц). Звукові хвилі, як правило, мають складну форму. Але кожне коливання можна подати як суму синусоїдних хвиль. Кожна синусоїдна звукова хвиля називається **тоном**.

Висота тону залежить від частоти: чим більша частота, тим вищий тон. **Музикальні звуки** — це періодичні коливання, що є сумою синусоїдних коливань (тонів). Тон із найменшою частотою називається **основним тоном**. Останні тони, що супроводжують основний, називаються **обертонами** або вищими гармоніками.

Тембр звуку — це характеристика музикального звуку, яка залежить від кількості обертонів, які супроводжують основний тон, від їхніх частот, амплітуд.

Швидкість поширення звукових хвиль збільшується при нагріванні пружного середовища. Швидкість поширення звукової хвилі у повітрі — **формула Ньютона—Лапласа**:

$$v = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}}, \text{ де } \gamma = \frac{c_p}{c_v}.$$

4.6. ЛУНА. ЗВУКОВИЙ РЕЗОНАНС

Луна — це сприймання звукової хвилі, відбитої від перешкод, окремо від звукової хвилі джерела звуку. Якщо перешкода, яка відбиває звук, ближча за 17 м, то хвилі зливаються (протяжний звук) — **явище реверберації**.

Звуковий резонанс — це явище різкого зростання амплітуди вимушених коливань тіла A (струни, стовпа повітря тощо), якщо частота вимушених коливань ν , зумовлених звуковою хвилею, наближається до частоти власних коливань тіла ν_0 або дорівнює їй (рис. 290).

Чим сила тертя середовища більша, тим амплітуда вимушених коливань менша, тобто якщо $F_{\text{тер}2} > F_{\text{тер}1}$, то $A_2 < A_1$.

Мовлення і слух людини зумовлені звуковим резонансом. Гортаний звук — стовп повітря в гортані резонує з коливаннями голосової зв'язки. Слух — слухова «струна» в завитку внутрішнього вуха резонує зі звуковою хвилюю, що дійшла.

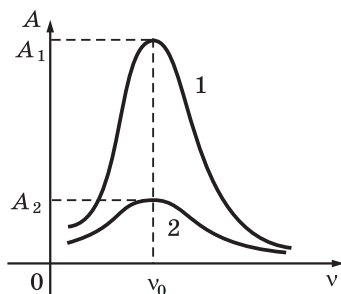


Рис. 290

4.7. ПРИКЛАДИ РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧ

Задача 1.

Точкове джерело звуку з частотою 680 Гц перебуває в точці А (рис. 291) над відбиваючою поверхнею. Амплітуда звукової хвилі поблизу джерела дорівнює a . Чому дорівнює вона в точці В, якщо швидкість звуку в повітрі 340 м/с?

Дано:

$$\nu = 680 \text{ Гц}$$

$$\nu = 340 \text{ м/с}$$

$$A_A = a$$

$$A_B = ?$$

Розв'язання:

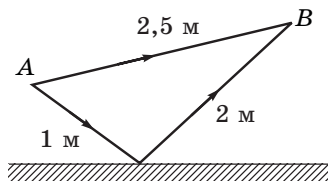


Рис. 291

Довжина хвилі:

$$\lambda = \frac{v}{\nu}, \quad \lambda = \frac{340}{680} \text{ м} = 0,5 \text{ м}.$$

Геометрична різниця ходу:

$$\Delta l = (1 \text{ м} + 2 \text{ м}) - 2,5 \text{ м} = 0,5 \text{ м}.$$

Хвильова різниця ходу:

$$\frac{\Delta l}{\lambda} - \frac{1}{2} = \frac{0,5}{0,5} - 0,5 = 0,5 \quad (\text{втрата півхвилі при відбиванні}).$$

Відповідь: хвильова різниця ходу 1/2, отже, A_B наближається до нуля.

Задача 2.

Чому людина, яка стоїть біля стінки будівлі в точці B , добре чує розмову, що відбувається в точці A , а людина, що стоїть далі, у точці C , її не чує або чує дуже слабо (рис. 292, a)?

Розв'язання:

Хвилі, відхиляючись від прямолінійного поширення (дифракція хвиль), досягнуть вуха людини в точці B . Точка C розташована в хвильовій тіні, куди хвилі від джерела не досягають,— людина може чути слабкий звук, оскільки її вуха досягають хвилі, які пройшли крізь товщу будівлі (рис. 292, b).

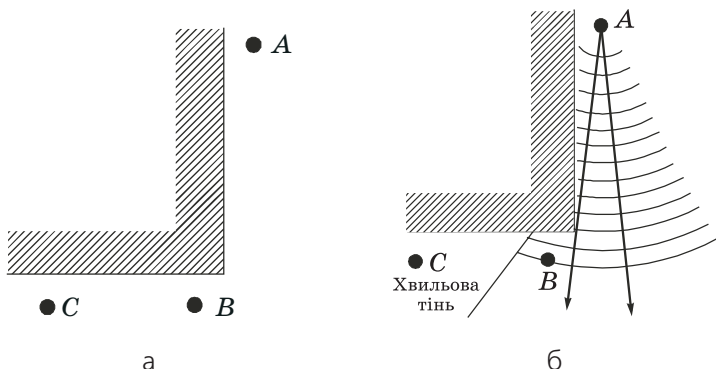


Рис. 292

5. ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ХВИЛІ

5.1. ВИПРОМІНЮВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ХВИЛЬ ВІДКРИТИМ КОЛИВАЛЬНИМ КОНТУРОМ

Електромагнітні хвилі — це поширення в просторі вільного електромагнітного поля. Електромагнітні хвилі випромінюються електричними зарядами, що рухаються з прискоренням.

Відкритий коливальний контур випромінює електромагнітні хвилі, оскільки в процесі коливань у контурі електрони рухаються з прискоренням.

При збудженні у відкритому коливальному контурі коливань із великою амплітудою навколо контуру виникають поля $\vec{E}$ і $\vec{B}$, пов'язані із зарядами і струмом у контурі. Змінні поля $\vec{E}$ і $\vec{B}$ індукують відповідно поля $\vec{B}$ і $\vec{E}$. Далі поля $\vec{E}$ і $\vec{B}$, взаємно індукуючи одне одного, утворюють **вільне електромагнітне поле** (рис. 293).

В електромагнітній хвилі $\vec{E}$ і $\vec{B}$ змінюються у взаємно перпендикулярних площинах, які перпендикулярні до напрямку поширення, і збігаються у фазі (рис. 294):

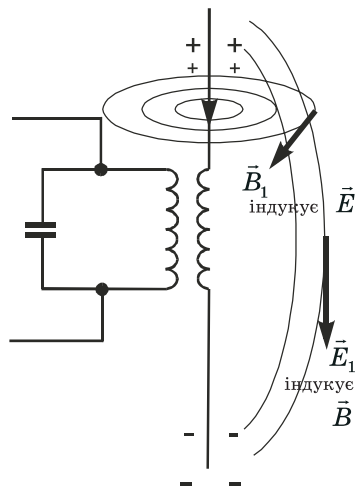


Рис. 293

$$\epsilon_0 \epsilon E^2 = \frac{B^2}{\mu_0 \mu}.$$

Електромагнітні хвилі — це поперечні хвилі.

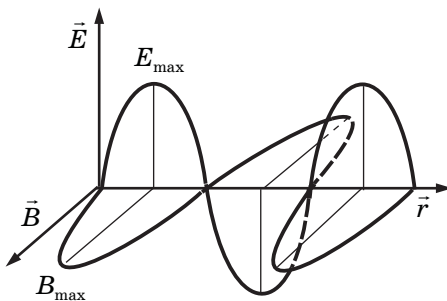


Рис. 294

5.2. ШВИДКІСТЬ ПОШИРЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ХВИЛЬ

Швидкість поширення електромагнітних хвиль у вакуумі:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}, \quad c \approx 3 \cdot 10^8 \text{ м/с.}$$

У діелектрику швидкість електромагнітної хвилі зменшується (хвиля гальмується):

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon \mu}}.$$

На межі поділу середовища з вакуумом хвиля заломлюється; **абсолютний показник заломлювання** n_c — число, що визначає, у скільки разів швидкість хвилі в середовищі v менша за c :

$$n_c = \frac{c}{v} = \sqrt{\epsilon \mu}.$$

Довжина електромагнітної хвилі (λ) — це відстань, на яку поширюється хвиля за один період коливань $\vec{E}$ і $\vec{B}$.

У повітрі $c = \lambda_{\text{п}} \nu$, у діелектрику $v = \lambda \nu$.

Об'ємна густина енергії електромагнітної хвилі (ω):

$$\omega = \frac{W}{V} = \frac{EB}{v \mu_0 \mu}.$$

Інтенсивність електромагнітної хвилі (I):

$$I = \bar{\omega} v = \frac{EB}{\mu_0 \mu}.$$

5.3. ПРИНЦИП РАДІОЗВ'ЯЗКУ. МОДУЛЯЦІЯ І ДЕТЕКТУВАННЯ (ДЕМОДУЛЯЦІЯ)

Електромагнітні хвилі, що зумовлюють радіозв'язок, називають **радіохвилями**.

Радіохвилі — це електромагнітні хвилі високої (несучої) частоти, модульовані за звуковим (радіо) або світловим (телебачення) сигналом.

Модуляція — зміна параметрів несучої хвилі.

Амплітудна модуляція — це зміна амплітуди коливань несучої частоти з частотою низьких коливань (звукової частоти); здійснюється в передавальному пристрої (рис. 295).

Демодуляція — процес, протилежний модуляції; здійснюється в приймальному пристрої (детектування з подальшим виділенням коливань звукової частоти) (рис. 296).

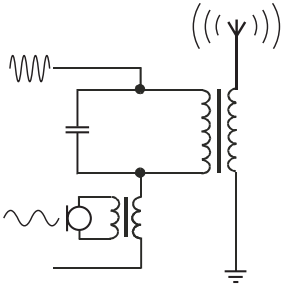


Рис. 295

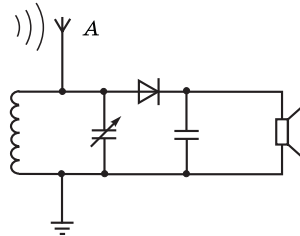


Рис. 296

5.4. КЛАСИФІКАЦІЯ РАДІОХВИЛЬ І ОСОБЛИВОСТІ ЇХ ПОШИРЕННЯ

Радіохвилі поділяються на довгі, середні, короткі та ультракороткі (рис. 297).

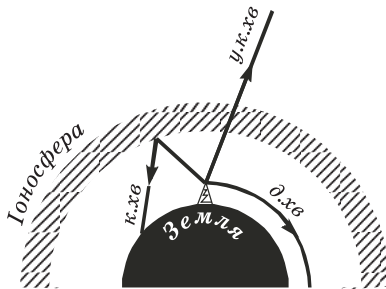


Рис. 297

Довгі хвилі (від 1 до 10 км) зазнають відчутної дифракції біля земної поверхні й притягуються до Землі наведеними ними індукційними струмами в земній корі; поширюються далеко за горизонт.

Середні хвилі (від 100 до 1000 м) обумовлюють стійкий радіозв'язок між віддаленими пунктами на земній поверхні поза межами прямої видимості завдяки відбиванню радіохвиль від іоносфери і здатності радіохвиль огинати опуклу земну поверхню. Саме тому радіозв'язок в діапазоні середніх хвиль є найбільш надійним уночі та взимку.

Короткі хвилі (10—100 м) поширюються прямолінійно від випромінювальної антени (зазнаючи незначної дифракції) і, відбиваючись від іоносфери Землі, повертаються до її поверхні; поширюються далеко за горизонт.

Ультракороткі хвилі (менш ніж 10 м) пронизують іоносферу (космічний зв'язок), а також розповсюджуються вздовж поверхні Землі, у зоні прямої видимості (УКХ радіостанції, телебачення, мобільний телефон).

5.5. ПРИКЛАДИ РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧ

Задача 1.

На рис. 298 зображено приймальну антену телевізора. Що можна сказати про орієнтацію коливань вектора магнітної індукції хвилі, яка йде від телецентру?

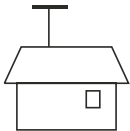


Рис. 298

Відповідь: антена приймає хвилю, отже, у ній виникають коливання електронів, зумовлені коливаннями $\vec{E}$ в хвилі, що прибуває. З орієнтації антени видно, що $\vec{E}$ коливається у горизонтальній площині. Отже, $\vec{B}$ коливається у вертикальній площині.

Задача 2.

Електричне поле заряду кульки q в точці A , віддаленій від неї на відстань l , має напруженість $\vec{E}$. Миттєво або через деякий час Δt зміниться напруженість у точці A , якщо кульку зрушити з місця?

Розв'язання:

При зміщенні кульки (рис. 299) модуль напруженості поля в точці A зменшиться, але напрям $\vec{E}$ зміниться не миттєво, а через час Δt .

5. ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ХВИЛІ

Зміщення кульки — це рух електричного заряду з прискоренням (електромагнітне збурення), що супроводжується виникненням електромагнітної хвилі.

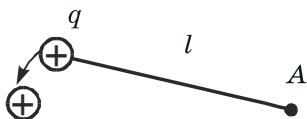
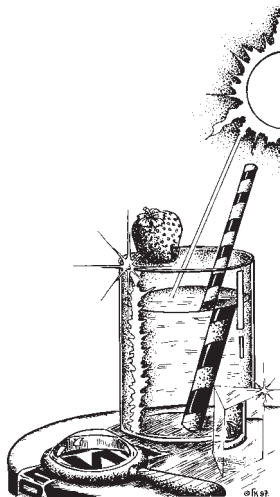


Рис. 299

Напруженість поля в точці A зміниться, коли до неї дійде хвиля, тобто через час $\Delta t = \frac{l}{c}$ (μ і ε повітря дорівнює 1).

ОПТИКА



1. ХВИЛЬОВА ОПТИКА

Світло — це електромагнітні хвилі високої частоти, що випромінюються атомами речовини, а також частинками, які мають електричний заряд і рухаються з величезним прискоренням.

1.1. МОНОХРОМАТИЧНЕ СВІТЛО. ЗАЛОМЛЕННЯ СВІТЛА

Світлові хвилі за їхньою частотою (довжиною хвилі у вакуумі) і сприйманням органами зору людини поділяються на видиме випромінювання, інфрачервоні та ультрафіолетові промені.

λ у вакуумі:

видиме випромінювання: 0,76 мкм — 0,4 мкм;

інфрачервоні промені: 0,76 мкм — 1 мм;

ультрафіолетові промені: 0,4 мкм — 10 нм.

Світло однієї певної частоти (довжини хвилі) називається **монохроматичним світлом**.

На межі поділу двох середовищ світло частково відбивається, а частково заломлюється, переходячи в інше середовище.

Заломлення світла — це зміна напрямку його поширення відповідно до зміни швидкості поширення. Середовище, яке більшою мірою гальмує поширення світла ($v < c$), називається середовищем **оптично більшої густини**.

Відношення швидкості поширення світла у вакуумі до швидкості світла в даному середовищі називається **абсолютним показником заломлювання середовища**:

$$n_c = \frac{c}{v}$$

Відносний показник заломлювання:

$$\frac{v_1}{v_2} = n.$$

Із збільшенням кута відбивання світла збільшується частка світлової енергії, яка відбивається, і зменшується частка світлової енергії, що переходить в інше середовище.

1.2. ДИСПЕРСІЯ СВІТЛА

Дисперсія світла — це залежність швидкості світла в речовині від частоти світла, що проходить (залежність v від ν). При заломленні білого світла в скляній призмі видиме випромінювання розкладається на частини відповідно до змін частоти світла: червоний, оранжевий, жовтий, зелений, голубий, синій, фіолетовий кольори (рис. 300).

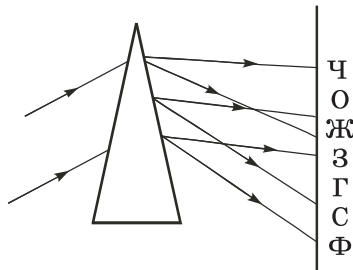


Рис. 300

Спостережувана картина називається **дисперсійним спектром**.

1.3. РОЗПОДІЛ ЕНЕРГІЇ В СПЕКТРІ БІЛОГО СВІТЛА. ТЕПЛОВЕ ВИПРОМІНЮВАННЯ

Білим світлом називають світло, у якому представлено випромінювання всіх частот видимої частини спектра. Під час потрапляння білого світла на яке-небудь тіло, частина його відбивається («колір тіла»), а частина поглинається. Якщо поглинається все світло, тіло має вигляд чорного.

У фізиці **чорним тілом** (застаріла назва — **абсолютно чорне тіло**) називається тіло, що поглинає всі випромінювання, які потрапили на нього, незалежно від довжини хвилі, напрямку падіння, стану поляризації випромінювання.

Теплове випромінювання — це випромінювання, причиною якого є тільки нагрівання тіла.

Теплове випромінювання — це випромінювання чорного тіла. Чорним тілом можна вважати, наприклад, невеликий отвір у порожнистій кулі, покритій усередині сажею.

Розподіл енергії в неперервному спектрі чорного тіла за довжиною хвиль при різних температурах зображено на рис. 301.

Частота, що відповідає максимальному значенню випромінювальної здатності, прямо пропорційна абсолютній температурі.

При нагріванні до температури 700°C випромінюються практично тільки інфрачервоні промені.

При температурі 750°C починають випромінюватись червоні промені (тіло стає червоного кольору).

При температурі 1500°C спостерігається весь спектр видимого випромінювання, але максимум випромінювання залишається в інфрачервоних променях.

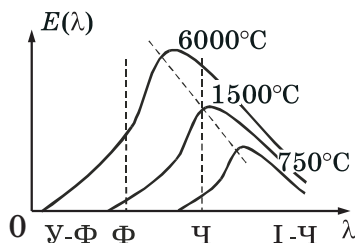


Рис. 301

За розподілом енергії в неперервному спектрі можна зробити висновок про температуру віддалених об'єктів, наприклад Сонця, зірок.

1.4. ІНТЕРФЕРЕНЦІЯ БІЛОГО СВІТЛА ЗА ФРЕНЕЛЕМ

Інтерференція світла (див. «Механічні хвилі. Звук»).

За допомогою різних пристроїв (дзеркала Френеля, біпризми Френеля, дзеркала Ллойда) світло розкладається на два когерентні світлові пучки, які накладаються й інтерферують. Два уявних зображення джерела світла в бідзеркалах або біпризмі еквівалентні двом синфазним джерелам світла (рис. 302, а, б).

У дзеркалі Ллойда (рис. 302, в) джерело світла і його уявне зображення в дзеркалі еквівалентні двом антисинфазним джерелам, оскільки біля поверхні дзеркала відбувається зміна фази хвилі на протилежну.

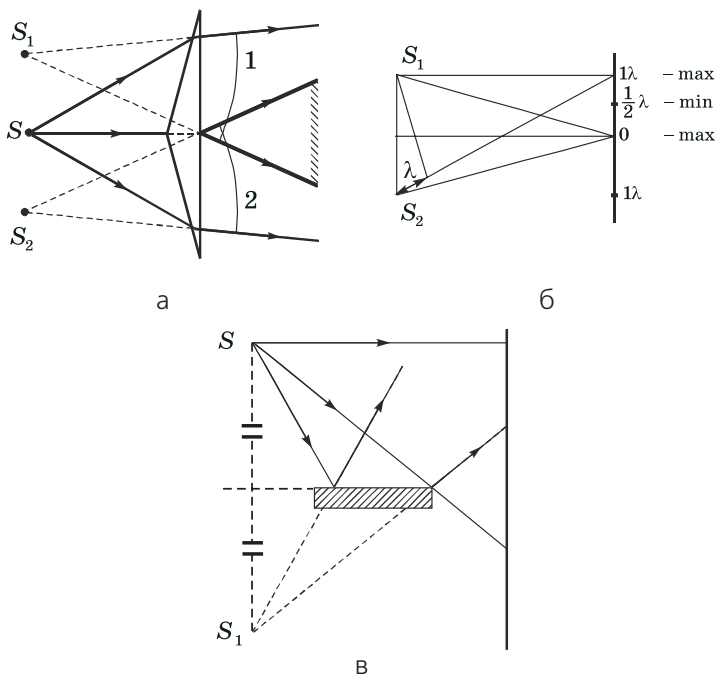


Рис. 302

1.5. ІНТЕРФЕРЕНЦІЯ БІЛОГО СВІТЛА ЗА НЬЮТОНОМ. КІЛЬЦЯ НЬЮТОНА

Інтерференція білого світла в тонких плівках

При відбиванні світла від верхньої і нижньої поверхні плівки виникає різниця ходу світлових хвиль, яка обумовлює інтерференцію при подальшому їх накладанні.

У відбитому світлі (рис. 303):

— геометрична різниця ходу

$$(AB + BC) - AD,$$

— хвильова різниця ходу

$$\frac{AB + BC}{\lambda_2} - \frac{AD}{\lambda_1} - \frac{1}{2},$$

де $\frac{1}{2}\lambda$ — втрата півхвилі при відбиванні від більш густого середовища.

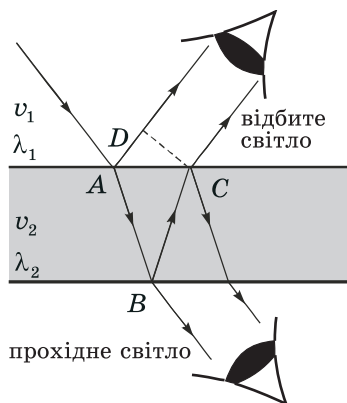


Рис. 303

У прохідному світлі втрати півхвилі не буває. Отже, якщо у відбитому світлі відбувається ослаблення світла (хвильовою різницею ходу є непарне число півхвиль), то у прохідному світлі посилюється світло (парне число півхвиль), або навпаки.

Спостереження інтерференції білого світла за Ньютоном:

1. Якщо тонку плівку з плоскопаралельними гранями освітити монохроматичним світлом і змінювати нахил, вона матиме вигляд то темної, то яскраво забарвленої (хвильова різниця ходу залежить від кута падіння світла).
2. Якщо тонка плівка рівна за нахилом (клин), то вздовж плівки різниця ходу рівномірно змінюється і спостерігається ряд світлих і темних смуг. При освітленні білим світлом інтерференційні смуги забарвлені всіма кольорами спектра видимого випромінювання відповідно до збільшення довжини хвилі світла — **інтерференційний спектр** (рис. 304).

Кільця Ньютона — це інтерференція білого світла в тонкому шарі повітря між скляними пластинками — плоскою та опуклою сферичною. Спостерігаємо інтерференційні смуги, забарвлені всіма кольорами райдуги, у вигляді кілець (кільця Ньютона) (рис. 305).

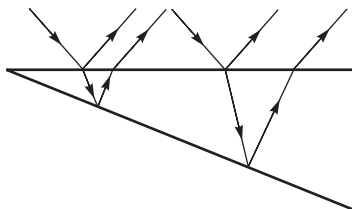


Рис. 304

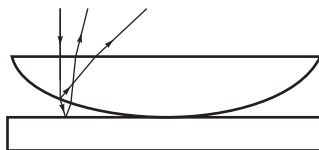


Рис. 305

Інтерференція білого світла в плівках на воді, мильних бульбашках тощо дає хаотичне забарвлення, оскільки нахил і товщина плівки хаотично змінюються.

1.6. ДИФРАКЦІЯ БІЛОГО СВІТЛА

Дифракція світла (див. «Механічні хвилі. Звук»).

Дифракція світла — це явище відхилення прямолінійного поширення світла в однорідному середовищі при його проходженні повз перешкоди чи крізь отвори, проникнення світла в зону геометричної тіні (див. рис. 306).

Оскільки довжина світлової хвилі дуже мала (долі міліметрів), то навіть за людською волосиною утворюється

хвильова тінь завдовжки кілька метрів; за столовою тарілкою — кілька кілометрів.

За хвильовою тінню світло, яке обігнуло перешкоду, інтерферує.

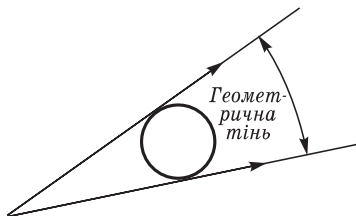


Рис. 306

Поблизу перешкоди спостерігаємо тільки розмитість країв геометричної тіні на екрані.

1.6.1. ДИФРАКЦІЙНА ҐРАТКА

Дифракційна ґратка — це скляна тонка пластинка, на яку нанесені паралельні штрихи з проміжками між ними. Ширина щілини і штриха позначається d і називається **сталою ґратки**, або **періодом ґратки**.

При падінні на ґратку пучка паралельних променів перпендикулярно до площини ґратки (плоскої хвилі), світло від кожної щілини завдяки дифракції піде пучком, розсіяним у всіх напрямках (рис. 307).

$$AC = d,$$

AB — різниця ходу.

$$AB = d \sin \varphi, \quad AB = n\lambda, \quad \lambda = \frac{d \sin \varphi}{n}.$$

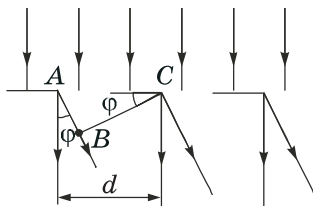


Рис. 307

Оскільки відстань до екрана порівняно зі сталою ґратки надзвичайно велика, то всі промені з різних щілин, які відхилені від початкового напрямку на кут φ і падають в одну точку екрана, можна вважати паралельними.

1.6.2. ДИФРАКЦІЙНИЙ СПЕКТР

Із формули дифракційної ґратки випливає, що біле світло розкладається на складові частини у суворій відповідності до довжини хвилі світла. Маємо спектр, який називається **дифракційним (нормальним)**: n — порядок спектра (якщо $n = 1$ — спектр першого порядку, різниця ходу 1λ).

При дифракції з подальшою інтерференцією відбувається перерозподіл інтенсивності світла в просторі. Графік для світлової хвилі відповідно до різниці ходу хвилі до екрана від дифракційної ґратки показаний на рис. 308 (ч — червоний, ф — фіолетовий, б — білий).

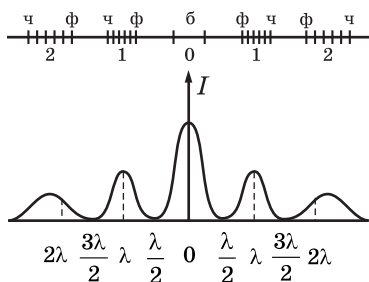


Рис. 308

1.7. ПОЛЯРИЗАЦІЯ СВІТЛА

Електромагнітна світлова хвиля називається природною (неполяризованою), оскільки вздовж променя коливання $\vec{E}$ і $\vec{B}$ відбувається у всіх площинах, перпендикулярних до напрямку променя (рис. 309, а).

Виділення коливань $\vec{E}$ і $\vec{B}$ в певних площинах, перпендикулярних до променя, називається **поляризацією світла**, а хвилі називаються плоскополяризованими. Пристрій, який перетворює природне світло в поляризоване,

називається **поляризатором** (рис. 309, б). Поляризатором є кристал турмаліну, який пропускає світло з коливаннями $\vec{E}$ і $\vec{B}$ тільки в певних площинах, перпендикулярних до осі кристала.

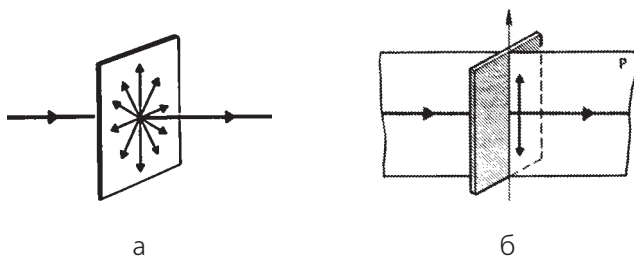


Рис. 309

Виявляється поляризація за допомогою аналізатора (другого кристала турмаліну).

Якщо осі кристалів розташовані взаємно перпендикулярно, світло не проходить.

При відбиванні й заломленні світла відбувається часткова поляризація світла — коливання $\vec{E}$ і $\vec{B}$ в одній площині перевищують коливання в інших площинах.

Тангенс кута падіння світлової хвилі, при якому відбувається максимальна часткова поляризація заломленого променя, дорівнює абсолютному показнику заломлювання відбиваючого середовища (**закон Брюстера**):

$$\operatorname{tg} i_0 = n.$$

Поляризація світла — важливий доказ поперечності світлових хвиль, їхньої електромагнітної природи.

1.8. ЯВИЩЕ ДОПЛЕРА

Частота сприйманих спостерігачем світлових хвиль зростає при наближенні до нього джерела світла і зменшується при віддаленні від нього джерела світла. Оскільки швидкість джерела світла (v) завжди мала порівняно зі швидкістю світла (c), то реальний прояв явища Доплера на практиці є незначним:

$$v' = v \sqrt{\frac{1 \pm \frac{v}{c}}{1 \mp \frac{v}{c}}}.$$

1.9. ПРИКЛАДИ РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧ

Задача 1.

Довжина хвилі світла, яка відповідає червоній лінії у вакуумі, становить 656,3 нм. Визначити довжину хвилі цього світла у склі, якщо показник заломлювання світла у склі для цих променів 1,51. Який колір матиме це світло у склі?

Дано:

$$c = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

$$\lambda_0 = 6,563 \cdot 10^{-7} \text{ м}$$

$$n_{\text{вакууму}} = 1$$

$$n_{\text{скла}} = 1,51$$

$$\lambda = ?$$

Розв'язання:

При переході світла з одного середовища в інше змінюється довжина світла, а частота лишається без змін. Оскільки колір світла залежить від його частоти, а не від довжини хвилі, то колір світла при заломленні червоних променів не змінюється.

$$\text{Для вакууму } \lambda_0 = \frac{c}{\nu}, \text{ а для скла } \lambda = \frac{v}{\nu},$$

де ν — частота світла, c і v — швидкості світла відповідно у вакуумі і склі. Поділивши перше рівняння на друге, одержимо:

$$\frac{\lambda_0}{\lambda} = \frac{c}{v}.$$

$$\text{Оскільки } \frac{c}{v} = \frac{n_{\text{скла}}}{n_{\text{вакууму}}}, \text{ то } \frac{\lambda_0}{\lambda} = n_{\text{скла}},$$

$$\text{оскільки } n_{\text{вакууму}} = 1.$$

$$\text{Звідси } \lambda = \frac{\lambda_0}{n_{\text{скла}}}.$$

Обчислення:

$$[\lambda] = \text{м},$$

$$\{\lambda\} = \frac{656,3 \cdot 10^{-9}}{1,51} = 435 \cdot 10^{-9}.$$

Відповідь: $\lambda = 435$ нм. Колір світла червоний.

Задача 2.

При спостереженні інтерференції світла в мильній плівці на вертикальному каркасі інтерференційні смуги плывуть униз. Перед тим як плівка лопне, у її верхньому куті спостерігається поява чорної плями. Чому?

Відповідь: мильна плівка під вагою опускається і при цьому стоншується, отже, інтерференційні смуги зміщуються вниз. Перед тим як плівка розірветься, її товщина у верхній частині наближається до нуля (геометрична різниця ходу наближається до нуля) і залишається тільки різниця ходу в $\frac{\lambda}{2}$ для всіх частинок світла. Світло всіх частот гаситься у відбитому світлі (чорна пляма).

Задача 3.

Яка ширина спектра першого порядку (довжини хвиль містяться в межах $0,38 \dots 0,76$ мкм), отриманого на екрані, який розташований на відстані 3 м від дифракційної ґратки з періодом $0,01$ мм?

Дано:	СІ:
$d = 0,01$ мм	$d = 1 \cdot 10^{-5}$ м
$k = 1$	$k = 1$
$AO = L = 3$ м	$L = 3$ м
$\lambda_1 = 0,38$ мкм	$\lambda_1 = 0,38 \cdot 10^{-6}$ м
$\lambda_2 = 0,76$ мкм	$\lambda_2 = 0,76 \cdot 10^{-6}$ м
Δb — ?	

Розв'язання:

Нехай хвиля λ_1 дає максимум першого порядку в точці C , а хвиля λ_2 — в точці B (рис. 310).

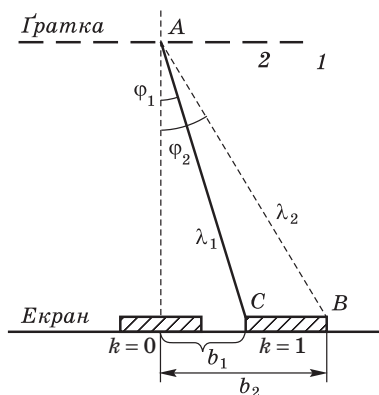


Рис. 310

Запишемо для кожної довжини хвилі умову максимуму в дифракційній ґратці (дифракційний спектр):

$$d \sin \varphi_1 = k \lambda_1 ,$$

$$d \sin \varphi_2 = k \lambda_2 .$$

Ширина спектра першого порядку визначається відстанню $\Delta b = OB - OC$.

Визначимо OB з $\triangle AOB$ і OC з $\triangle AOC$:

$$OB = AO \cdot \operatorname{tg} \varphi_2, \quad OC = AO \cdot \operatorname{tg} \varphi_1.$$

$$\text{Тоді } \Delta b = AO (\operatorname{tg} \varphi_2 - \operatorname{tg} \varphi_1) .$$

При малих кутах φ_1 і φ_2 можна вважати, що

$$\operatorname{tg} \varphi_2 \approx \sin \varphi_2 = \frac{k \lambda_2}{d}, \quad \operatorname{tg} \varphi_1 \approx \sin \varphi_1 = \frac{k \lambda_1}{d} .$$

$$\text{Отже, } \Delta b = AO \cdot \frac{k}{d} (\lambda_2 - \lambda_1) = \frac{L \cdot k}{d} (\lambda_2 - \lambda_1) .$$

Обчислення:

$$[\Delta b] = \frac{\text{м} \cdot \text{м}}{\text{м}} = \text{м} ,$$

$$\{\Delta b\} = \frac{3 \cdot 1(0,76 - 0,38) \cdot 10^{-6}}{10^{-5}} \approx 0,114 .$$

Відповідь: $\Delta b \approx 11,4$ см.

Задача 4.

Під впливом сильного нагрівання сталь вкривається яскраво забарвленою плівкою (кольори мінливості). Пояснити причину появи цих кольорів.

Розв'язання:

Райдужні смуги в тонких плівках виникають в результаті інтерференції світлових хвиль, відбитих від верхньої і нижньої меж плівки окислів заліза на поверхні сталі. Хвиля, відбита від нижньої межі, відстає за фазою від хвилі, відбитої від верхньої межі. Величина цього відставання залежить від товщини плівки і довжини світлових хвиль у плівці. Унаслідок інтерференції відбувається гасіння одних кольорів спектра і підсилення інших.

2. ГЕОМЕТРИЧНА ОПТИКА

Геометрична оптика розглядає закони поширення світла в прозорих середовищах тільки на підставі уявлень про світло як сукупність світлових променів.

2.1. ПРЯМОЛІНІЙНЕ ПОШИРЕННЯ СВІТЛА В ОДНОРІДНОМУ СЕРЕДОВИЩІ

Світловий промінь — лінія, уздовж якої поширюється енергія світлових електромагнітних хвиль.

Світловий пучок — це пучок світлових променів (рис. 311).

В оптично однорідному середовищі світло поширюється **прямолінійно**. Один із доказів цього — утворення тіні та напівтіні за перешкодою (рис. 312).

2.2. ЗАКОНИ ВІДБИВАННЯ СВІТЛА

1. Падаючий і відбитий промені та перпендикуляр, опущений у точку падіння, лежать в одній площині.

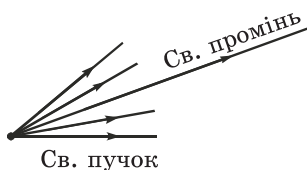


Рис. 311

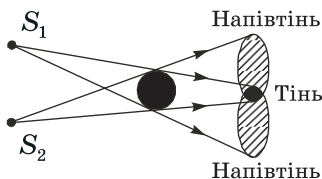


Рис. 312

2. Кут відбивання дорівнює куту падіння $\angle\alpha = \angle\beta$ (рис. 313).

Наслідок: промінь відбитий і падаючий взаємно обернені.

Дзеркальне відбивання — відбивання від оптично гладкої плоскої поверхні (рис. 314).

Дифузне відбивання — відбивання від шорсткої поверхні; промені світлового пучка, який падає, хаотично розсіюються (рис. 315).

Дійсне зображення точкового джерела світла — це точка перетину відбитих (або заломлених) променів.

Уявне зображення — точка перетину продовжень відбитих (або заломлених) променів від джерела світла.

Зображення у плоскому дзеркалі:

— Зображення точки уявне і симетричне.

— Зображення тіла уявне і симетричне (зображення суми точок) (рис. 316, а, б).

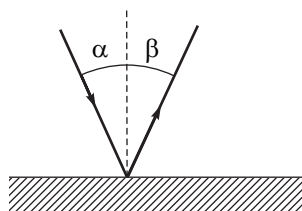


Рис. 313

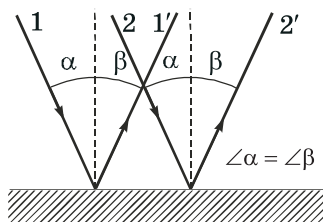


Рис. 314

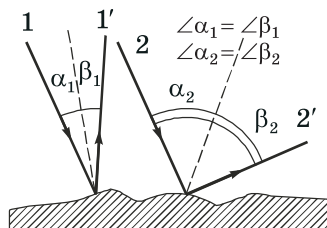


Рис. 315

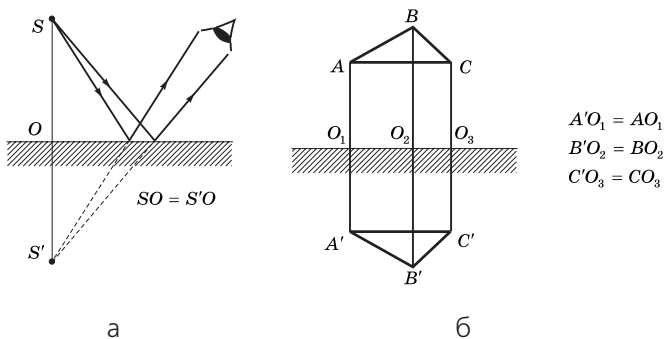


Рис. 316

Уявне зображення сприймається очима людини, але в дійсності не існує.

2.3. ЗАКОНИ ЗАЛОМЛЕННЯ СВІТЛА. ПОВНЕ ВІДБИВАННЯ СВІТЛА

Закони заломлення світла:

1. Промінь падаючий, промінь заломлений і перпендикуляр, опущений у точку падіння променя, лежать в одній площині (рис. 317).
2. Відношення синуса кута падіння до синуса кута заломлювання світла є величина стала, яка дорівнює **відносному показнику заломлювання** двох середовищ (середовища, куди світло переходить, і середовища, з якого падає):

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = n_{2-1}.$$

Наслідок: промені заломлений і падаючий взаємно обернені. Показник заломлювання середовища відносно вакууму називається **абсолютним показником заломлювання** середовища:

$$n_1 = \frac{c}{v_1}, \quad n_2 = \frac{c}{v_2}.$$

При переході світла із оптично більш густого середовища в оптично менш густе кут заломлювання більший за кут падіння.

Повне відбивання світла

При падінні світла із оптично більш густого середовища на межу поділу з оптично менш густим середовищем, коли кут заломлювання має стати 90° , світло повністю відбивається і вже не заломлюється. Мінімальний кут падіння, при якому відбувається повне відбивання світла, називається **граничним кутом повного відбивання** (α_0). Повне відбивання світла відбувається, коли кут падіння променя, що падає на межу з оптично менш густим середовищем, $\geq \alpha_0$ (рис. 318):

$$\frac{\sin \alpha_0}{\sin \gamma} = n_{2-1}, \quad \gamma = 90^\circ \Rightarrow \sin \alpha_0 = n_{2-1} = \frac{1}{n_{1-2}}.$$

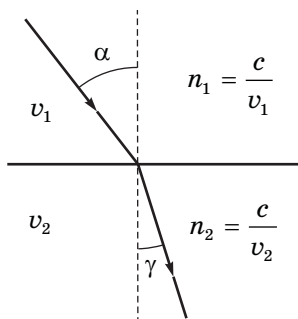


Рис. 317

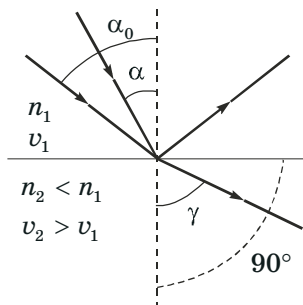


Рис. 318

Для алмазу $\alpha_0 \approx 24^\circ$. Діамант — це алмаз, який оброблений (огранований) таким чином, щоб для максимально можливої кількості променів світла, що на нього впали, відбулося повне відбивання світла — світова «гра» діаманта.

Причина міражів — у повному відбиванні світла від оптично менш густих шарів нагрітого повітря, які містяться поблизу розігрітої Сонцем поверхні Землі.

Повне відбивання світла використовують у світловоді. Світловод — це пучки прозорих гнучких ниток. Їх використовують для передавання світла і зображення.

2.4. ХІД ПРОМЕНІВ ЧЕРЕЗ ПЛОСКОПАРАЛЕЛЬНУ ПЛАСТИНКУ, ПРИЗМУ

Хід світлових променів у плоскопаралельній пластинці

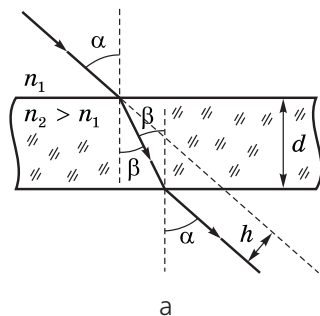
Після проходження через плоскопаралельну пластинку промені виходять під тим самим кутом, під яким вони на неї падають. При цьому пластинка зміщує промінь світла паралельно йому самому на відстань h (рис. 319, а):

$$h = d \sin \alpha \left(1 - \sqrt{\frac{1 - \sin^2 \alpha}{n^2 - \sin^2 \alpha}} \right).$$

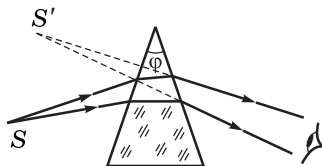
Хід променів у призмі

Промінь світла після заломлення на гранях призми відхиляється до основи призми, якщо $n_{\text{п}} > n_{\text{навк.сер.}}$.

Зображення точки в призмі — уявне, зміщене у бік заломлюючого кута (φ) призми (рис. 319, б).



а



б

Рис. 319

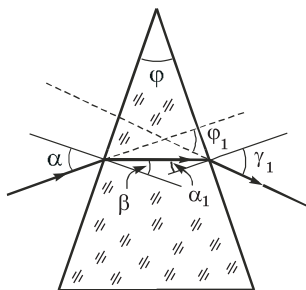


Рис. 320

Якщо $n_{\text{п}} > n_{\text{навк.сер.}}$, то промінь відхиляється від основи, а уявне зображення зміщується до основи.

Кут відхилення після проходження променя через призму $\varphi_1 = \alpha + \gamma_1 - \varphi$. (рис. 320).

2.5. СФЕРИЧНІ ЛІНЗИ

2.5.1. ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ

Хід променів у лінзах

Лінза — оптично прозоре тіло, обмежене сферичними поверхнями (одна з поверхонь може бути плоскою).

Головна оптична вісь лінзи — це пряма, проведена через центри кривини (C_1, C_2) обох поверхонь лінзи (рис. 321, а, б).

Оптичний центр лінзи — це точка на головній оптичній осі лінзи, яка має властивість не заломлювати світлові промені, що проходять через цю точку (точка O , див. рис. 327).

Для **опуклих** лінз:

- якщо $n_{\text{лінзи}} > n_{\text{оточ.сер}}$, це лінза, яка збирає потік світла (збиральна лінза);
- якщо $n_{\text{лінзи}} < n_{\text{оточ.сер}}$, це лінза розсіювальна.

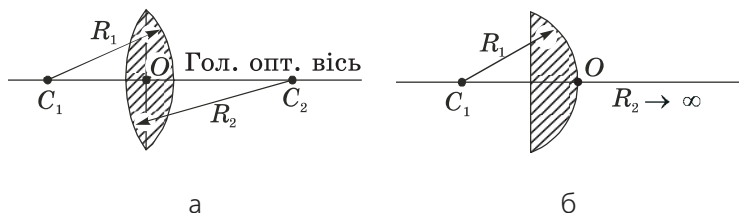


Рис. 321

Для **ввігнутих** лінз — навпаки.

Тонка сферична лінза — це лінза, товщина якої набагато менша від радіусів кривини її поверхонь. Оптичний центр (точка O) тонкої сферичної лінзи міститься посередині лінзи.

Умове зображення тонких лінз подано на рис. 322.



Рис. 322

Пучок **параксіальних** (приосьових) променів, які поширюються паралельно головній оптичній осі, після заломлення в збиральній лінзі перетинає головну оптичну вісь лінзи в одній точці, що називається **головним фокусом лінзи** (рис. 323, а).

У розсіювальній лінзі пучок променів, паралельних головній оптичній осі, після заломлення розсіюється так, що продовження заломлених променів перетинаються в головному фокусі лінзи.

$OF = f$ — фокусна відстань розсіювальної лінзи (рис. 323, б).

Оптична сила лінзи (D) — це величина, обернена її фокусній відстані:

$$D = \frac{1}{f}.$$

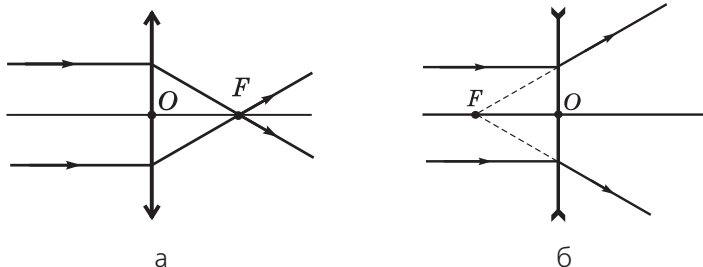


Рис. 323

Одиниця оптичної сили лінзи — **діоптрія** (дптр). Це оптична сила лінзи з фокусною відстанню 1 м:

$$1 \text{ дптр} = \frac{1}{\text{м}} = \text{м}^{-1};$$

f і D збиральних лінз — додатні,
 f і D розсіювальних лінз — від'ємні.

2.5.2. ФОРМУЛА СФЕРИЧНОЇ ЛІНЗИ

Формула лінзи:

$$D = (n_{2,1} - 1) \cdot \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right).$$

Фокальна площина лінзи — площина, проведена через головний фокус лінзи перпендикулярно до головної оптичної осі.

Побічна оптична вісь — пряма, проведена через оптичний центр лінзи, не збіжна з головною оптичною віссю.

Промінь, який падає на збиральну лінзу паралельно побічній оптичній осі, заломившись, перетинає побічну вісь у фокальній площині (рис. 324, а). У розсіювальній лінзі побічну вісь у фокальній площині перетинає продовження заломленого променя (рис. 324, б).

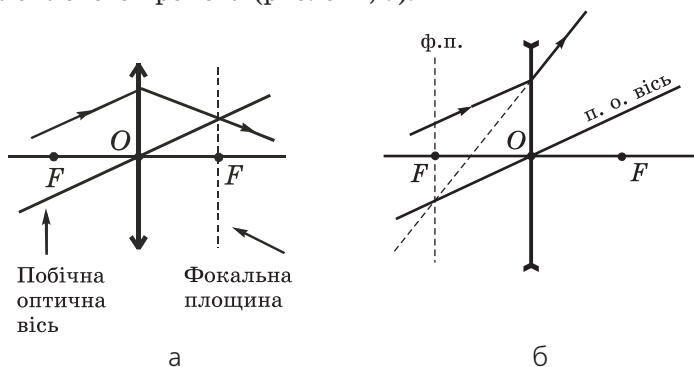


Рис. 324

2.5.3. ФОРМУЛА СПРЯЖЕНИХ ТОЧОК

Світна точка і її зображення в лінзі S_1 є взаємно оберненими — **спряженими точками** (рис. 325).

Рівняння спряжених точок (S і S_1) збиральної лінзи:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{d} + \frac{1}{d_1}.$$

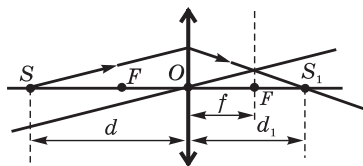


Рис. 325

Відстань від центра лінзи до зображення $OS_1 = d_1$ береться зі знаком «плюс», якщо зображення дійсне, і зі знаком «мінус», якщо зображення уявне.

2.5.4. ЗОБРАЖЕННЯ В ТОНКИХ ЛІНЗАХ

Зображення предмета в тонкій збиральній лінзі

Для побудови точки достатньо двох променів:

— променя, який проходить через оптичний центр O (не заломлюється);

— променя, паралельного головній або побічній оптичній осі (рис. 326).

Якщо предмет розташований перпендикулярно до головної оптичної осі, то його зображення також є перпендикулярним до осі.

Лінійне збільшення (Γ) — відношення лінійних розмірів зображення до лінійних розмірів предмета:

$$\Gamma = \frac{H}{h}, \quad \Gamma = \frac{d_1}{d}.$$

Зображення предмета в розсіювальній лінзі завжди уявне, зменшене, пряме (рис. 327).

Зображення в тонких збиральних лінзах

d	d_1	Γ	Вид зображення
$d \rightarrow \infty$	$d_1 \approx f$	$\Gamma < 1$	Дійсне обернене
$d > 2f$	$2f > d_1 > f$	$\Gamma < 1$	Таке саме
$d = 2f$	$d_1 = 2f$	$\Gamma = 1$	«
$2f > d > f$	$d_1 > 2f$	$\Gamma > 1$	«
$d \approx f$	$d_1 \rightarrow \infty$	$\Gamma \rightarrow \infty$	«
$d < f$	$d_1 < 0$	$\Gamma > 1$	Уявне пряме

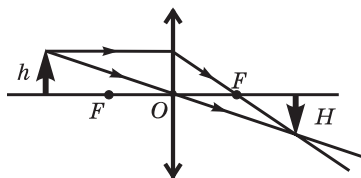


Рис. 326

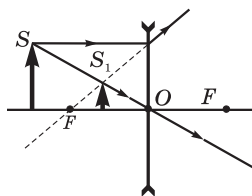


Рис. 327

2.6. ОКО ЯК ОПТИЧНА СИСТЕМА

Око являє собою оптичну систему, яка дає зображення на світлочутливій сітчастій оболонці очного яблука — сітківці.

Око як оптичний прилад складається з чотирьох лінз (рис. 328):

- 1) рогова оболонка — основна за оптичною силою лінза;
- 2) опукло-ввігнута рідка лінза (передня камера) — розсіювальна лінза, основний компенсатор аберації в оптичній системі ока;
- 3) кришталик — лінза, яка забезпечує акомодацию ока;
- 4) скловидне тіло.

Оптичний центр ока 5 міститься біля задньої стінки кришталика. Перед кришталиком є так звана райдужна оболонка 7, в якій посередині є отвір — зіниця; він може змінювати свій діаметр залежно від того, яка кількість світла потрапляє в око. При більшій інтенсивності світла зіниця звужується (≈ 2 мм), при малій (0,01 лк) — розширюється (≈ 8 мм). За кришталиком міститься очне яблуко, заповнене скловидним тілом (4). На дні очного яблука розташована сітківка 6, яка сприймає зображення. Через оболонку ока в задній його частині входить зоровий нерв.

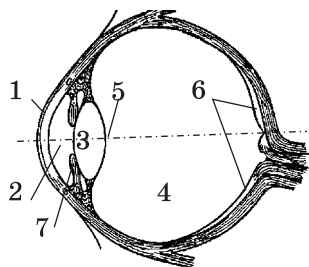


Рис. 328

Акомодація ока — фокусування зображення різновіддалених предметів на сітківці ока. Відбувається за допомогою стиснення чи розтягування кришталика очними м'язами (змінювання фокусної відстані ока).

Межі акомодатії для нормального ока від 15—20 см до ∞ .

Здатність ока до акомодатії забезпечує зображення предметів на поверхні сітківки.

Відстань найкращого зору (L_0) — це відстань до предмета, що розглядається, коли око акомодує при ненапруженому кришталику. Для нормального зору $L_0 = 25\text{—}30$ см.

До вад ока належить короткозорість (зображення отримуємо перед сітківкою) і далекозорість (зображення отримуємо за сітківкою). Для компенсації короткозорості застосовують окуляри із розсіювальних лінз, а далекозорості — окуляри із збиральних лінз.

Оптична вісь ока — пряма, що проходить через оптичний центр ока і центр жовтої плями сітківки.

Редуковане око — схематично зображене око із здійсненою акомодатією (без дотримання масштабів) (рис. 329):

$$h = a \operatorname{tg} \varphi,$$

$$h \sim \operatorname{tg} \varphi$$

де φ — кут зору на предмет;

a — оптична база ока (стала величина).

Лінійні розміри зображення на сітківці ока прямо пропорційні тангенсу кута зору.

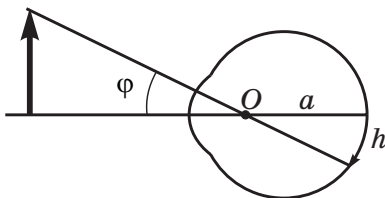


Рис. 329

2.7. ОПТИЧНІ ПРИЛАДИ. КУТОВЕ ЗБІЛЬШЕННЯ

Оптичні прилади, що збільшують кут зору на розгляданий предмет:

- лупа, мікроскоп — на мікрооб'єкти;
- бінокль, телескоп — на віддалені предмети.

Лупа — збиральна лінза з певною фокусною відстанню f ; предмет розташовують відразу за фокусом ($d = f$):

$$\Gamma_{\text{лупи}} = \frac{L_0}{f_{\text{л}}}.$$

Застосовують лупи, що дають збільшення від 2,5 до 25 разів.

Фотоапарати, проекційні апарати — це прилади для отримання дійсних зображень: фотоапарати — зменшеного, проекційні апарати — збільшеного.

Об'єктиви — системи із кількох лінз, які компенсують аберації; тому об'єктиви еквівалентні тонким лінзам.

Зображення у фотоапараті: предмет розташований далеко за фокусом об'єктива ($d \gg f$), зображення — одразу за фокусом ($d_1 \approx f$), дійсне, обернене (рис. 330, а). У цій площині розміщують фотоплівку (фотопластинку).

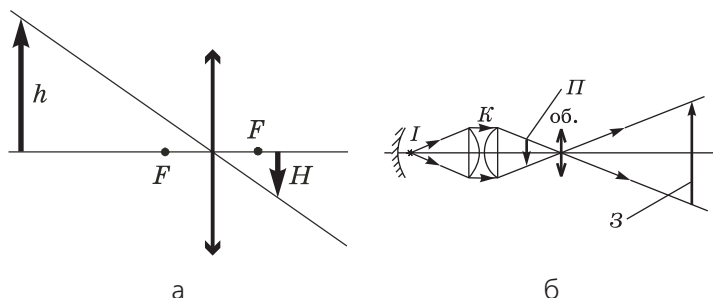


Рис. 330

Зображення в проекційному апараті: предмет Π розміщений відразу за фокусом об'єктива ($d \approx f$), зображення $З$ — далеко за $2f$, дійсне, збільшене, обернене. Між просвічуванним предметом і джерелом світла I розташований конденсор K , який збільшує світловий потік від джерела світла на предмет і перетворює пучок світла, який розходить від джерела, в паралельний пучок, який рівномірно освітлює предмет Π . Зображення $З$ на екрані утворюється за допомогою об'єктива (рис. 330, б).

Мікроскоп — прилад, який складається з двох основних оптичних систем: об'єктива (об.) і окуляра (ок.). Об'єктив створює збільшене зображення, а окуляр збільшує кут зору на це зображення (рис. 331, а).

Δ — відстань між фокусами об'єктива і окуляра:

$$\Gamma_{\text{м}} = \frac{L_0 \Delta}{f_{\text{об}} f_{\text{ок}}}.$$

Збільшення мікроскопа дорівнює добутку збільшення окуляра на збільшення об'єктива. Сучасні оптичні мікроскопи дають збільшення до 1500—2000 разів.

Телескоп (зорова труба Кеплера) — прилад для збільшення кута зору на віддалені предмети ($d \rightarrow \infty$, $d_1 = f_{\text{об'єктива}}$) (рис. 331, б):

$$\Gamma_{\text{т}} = \frac{f_{\text{об}}}{f_{\text{ок}}}.$$

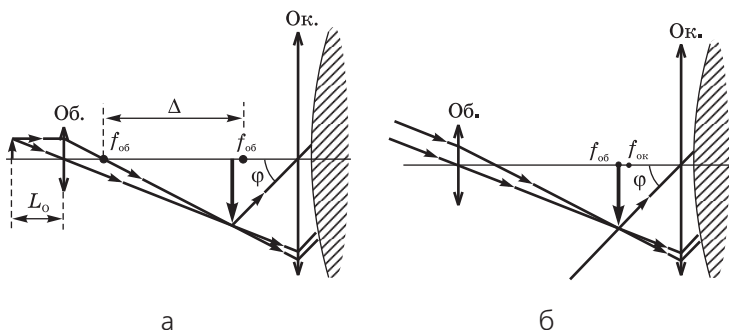


Рис. 331

Залежно від будови телескопи поділяються на телескопи-рефрактори і телескопи-рефлектори. У телескопі-рефракторі збільшення кута зору досягається за допомогою системи лінз, а головною частиною телескопа-рефлектора є параболічне дзеркало.

Бінокль призмовий — це зорова труба Кеплера, між об'єктивом і окуляром якої розташовані дві взаємно перпендикулярні призми повного відбивання, що збільшують оптичну базу об'єктива ($f_{\text{об}}$) і перевертають хід променів у двох взаєм-

но перпендикулярних площинах. У трубці Кеплера спостерігається обернене зображення, а в біноклі — пряме.

Кутове збільшення (γ) — це відношення лінійних розмірів зображення на сітківці, отриманого озброєним оком (h), до лінійних розмірів зображення цього самого предмета, що розташований на відстані найкращого зору при неозброєному оці (h_0) (рис. 332):

$$\gamma = \frac{h}{h_0} = \frac{\operatorname{tg} \varphi}{\operatorname{tg} \varphi_0}.$$

У випадку дуже малих кутів $\gamma = \frac{\varphi}{\varphi_0}$.

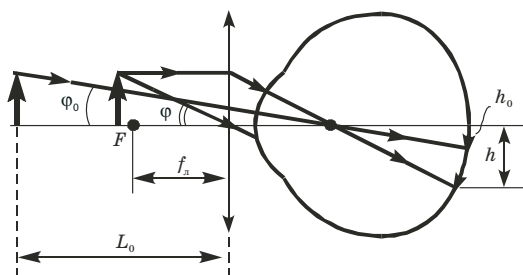


Рис. 332

2.8. СФЕРИЧНІ ДЗЕРКАЛА

Увігнуте дзеркало — збирає пучок світла після відбивання, опукле — розсіює.

Формула сферичного дзеркала:

$$f = \frac{R}{2}.$$

Рівняння спряжених точок і зображення предмета у сферичних дзеркалах за умови параксiальностi променiв такi самi, як для сферичних лiнз.

Промiнь, який падає в оптичний центр сферичного дзеркала, вiдбивається вiд дзеркала пiд кутом, рiвним куту падiння. Хiд променiв для випадку вiгнутого дзеркала (паралельний оптичнiй осi пучок променiв — параксiальнi променi) зображений на рис. 333, а; для опуклого дзеркала — на рис. 333, б.

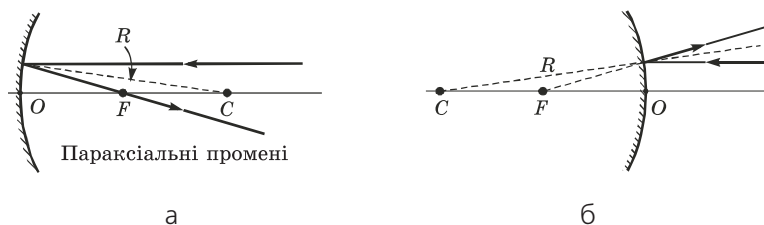


Рис. 333

2.9. ПРИКЛАДИ РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧ

Задача 1.

На одному березі невеличкого водоймища стоїть дерево, а на другому — людина. Знайти шляхом побудови положення точки на поверхні води, у якій відбивається промінь світла, що потрапляє в око людини від вершини дерева.

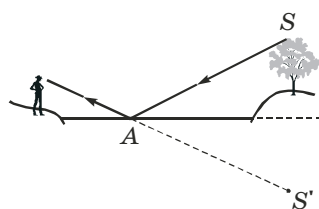
Розв'язання:

Зображення вершини дерева S у воді — уявне і симетричне відносно площини поверхні води (S'). Провівши пряму від ока людини до точки S' , знаходимо потрібну точку (A).

Задача 2.

Побудувати зображення світної точки S у двогранному плоскому дзеркалі з $\alpha = 90^\circ$.

Розв'язання:



Розбіжний пучок світла, що виходить із точки S , після відбивання від дзеркала 1 падає і відбивається від дзеркала 2. На перетині продовження відбитих променів розташовані уявні зображення S^I у першому дзеркалі і S^{II} — у другому. Промені від точки S , які відбиваються від

дзеркала 2 і потім падають на дзеркало 1, дають уявні зображення S^{III} і S^{IV} відповідно. Зображення S^{III} і S^{IV} збігаються (рис. 334).

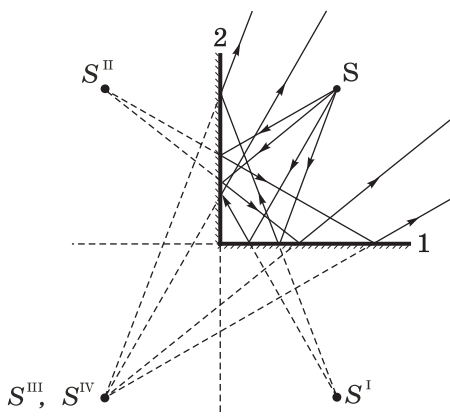


Рис. 334

Відповідь: світна точка у двогранному плоскому дзеркалі з $\alpha = 90^\circ$ має три уявних зображення.

Задача 6.

Визначити оптичну силу об'єктива фотоапарата, який фотографує місцевість із літака на висоті 5 км у масштабі 1 : 20 000.

Дано:	СІ:	Розв'язання:
$d = 5 \text{ км}$	$d = 5 \cdot 10^3 \text{ м}$	$d^1 \approx f$
$\frac{H}{h} = \frac{1}{20\,000}$	$\frac{H}{h} = \frac{1}{20\,000}$	$D = \frac{1}{f},$
$D - ?$		$\frac{H}{h} = \Gamma$

$$\Gamma_{\text{ф.а}} = \frac{f}{d} \Rightarrow f = d \cdot \Gamma_{\text{ф.а}}; \quad D = \frac{1}{d \cdot \Gamma_{\text{ф.а}}}.$$

Обчислення:

$$[D] = \frac{\text{м}}{\text{м} \cdot \text{м}} = \text{дптр}, \quad \{D\} = \frac{1 \cdot 2}{5 \cdot 10^3 \cdot 10^{-4}} = 4.$$

Відповідь: $D = 4$ дптр.

3. ВИПРОМІНЮВАННЯ ТА СПЕКТРИ

Теплове випромінювання, видиме випромінювання (див. «Хвильова оптика»).

3.1. ЛЮМІНЕСЦЕНЦІЯ

Люмінесценція — випромінювання світла джерелом за рахунок надходження до нього енергії, яка приводить атоми джерела до збудженого стану в результаті нетеплових процесів.

Катодолюмінесценція — світіння тіл, зумовлене бомбардуванням речовини зарядженими частинками.

Електролюмінесценція — світіння речовини при проходженні через нього струму (світіння газового розряду, полярне сяйво).

Хемілюмінесценція — світіння, яке супроводжує хімічні реакції (світіння бактерій, комах, риб).

Фотолюмінесценція — світіння тіл під впливом опромінення їх видимим випромінюванням, ультрафіолетовим світлом, рентгенівськими променями, гамма-променями.

3.2. ІНФРАЧЕРВОНІ ТА УЛЬТРАФІОЛЕТОВІ ПРОМЕНІ

Інфрачервоні промені — випромінювання з довжиною хвилі $\lambda_{i.ч}$, більшою, ніж довжина хвилі $\lambda_{ч}$ червоного видимого випромінювання:

$$\lambda_{i.ч} > \lambda_{ч}, 1 \text{ мм} \mid \lambda_{i.ч} \mid 0,76 \text{ мкм.}$$

Джерело інфрачервоних променів — будь-яке нагріте тіло.

Основна дія інфрачервоних променів — тепла: нагрівання тіл, на які вони потрапляють. Фотохімічна дія — на спеціальні фотоматеріали (фотографія в інфрачервоних променях).

Ультрафіолетові промені — випромінювання з меншою довжиною хвилі $\lambda_{у.ф}$ (більшої частоти $\nu_{у.ф}$), ніж довжина хвилі $\lambda_{ф}$ фіолетового видимого випромінювання:

$$\lambda_{у.ф} < \lambda_{ф}, 0,4 \text{ мкм} \mid \lambda_{у.ф} \mid 8 \text{ нм.}$$

Джерела ультрафіолетових променів: тіло, нагріте понад 1500°C , електричний розряд у парах ртуті та ін.

Основний вплив ультрафіолетових променів — хімічний та біологічний (руйнування сітківки ока, вироблення в шкірі вітаміну D , руйнування бактерій).

3.3. РЕНТГЕНІВСЬКІ ПРОМЕНІ

Рентгенівські промені — випромінювання з довжиною хвилі, яка менша, ніж в ультрафіолетових хвилях:

$$\lambda_{\text{р. п.}} = 8 \text{ нм} \div 1 \text{ пм.}$$

Джерела рентгенівських променів:

1. **Основне рентгенівське випромінювання** — **гальмівні рентгенівські промені**, які випромінюються **швидкими електронами** при різкому їх гальмуванні. У рентгенівській трубці (рис. 335) — гальмування електронів при їх зіткненні з антикатодом (А) призводить до випромінювання рентгенівських променів (р. п.).

Енергія електрона

$$W = h\nu_{\text{max}}, W = eU, \lambda_{\text{min}} = \frac{c}{\nu_{\text{max}}} = \frac{ch}{eU}.$$

Гальмівне випромінювання має неперервний спектр — **рентгенівський суцільний спектр**.

2. **Характеристичне рентгенівське випромінювання** — випромінювання суворо певних частот атомами антикатода внаслідок їх збудження при бомбардуванні швидкими електронами.

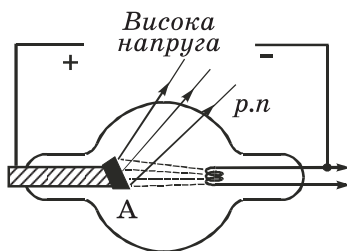


Рис. 335

Основні властивості рентгенівських променів — їхня велика проникна здатність в речовини, іонізація атомів, фотохімічний і біологічний вплив.

У медицині використовуються рентгенівські промені з великою довжиною хвилі — м'яке рентгенівське випромінювання: рентгенодіагностика — $U \sim 60$ кВ.

У техніці для просвічування рентгенівськими променями деталей машин і механізмів, дослідження будови кристалів (рентгено-структурний аналіз) використовуються рентгенівські промені більш високих частот — жорсткі рентгенівські промені: рентгенодефектоскопія U до 2000 кВ.

Іонізація атомів живого організму рентгенівськими променями викликає променеву хворобу. Захист від рентгенівських променів — товстий шар свинцю, просвинцьованої гуми.

3.4 СПЕКТРИ ВИПРОМІНЮВАННЯ. СПЕКТРИ ПОГЛИНАННЯ

Дисперсні спектри (див. «Хвильова оптика»).

Спектр випромінювання розжареним тілом у твердому чи рідкому стані **суцільний**.

Якщо речовину розжарити до газоподібного атомарного стану, спектр випромінювання **лінійчастий** (окремі лінії, які відповідають певним частотам випромінювання світла).

При пропусканні білого світла крізь «холодний» не випромінюючий або слабо випромінюючий газ спостерігається суцільний спектр, пронизаний темними лініями, — **спектр поглинання**.

Газ поглинає найбільш інтенсивно світло такої довжини хвиль, які сам випромінює в сильно нагрітому стані.

Лінії поглинання повністю відповідають лініям у спектрі випромінювання для даного хімічного елемента.

Спектр Сонця — це спектр поглинання: суцільний спектр від дуже розжарених надр Сонця, пронизаний темними лініями поглинання, обумовленими поглинанням світла у фотосфері Сонця. Темні лінії в спектрі Сонця називаються **фраунгоферові лінії** (за прізвиськом винахідника).

3.5. СПЕКТРАЛЬНИЙ АНАЛІЗ

За наявністю ліній у лінійчастому спектрі випромінювання чи в спектрі поглинання визначають наявність елементів у досліджуваній речовині — виконують **якісний спектральний аналіз**.

За розподілом інтенсивності ліній у спектрі визначається відсоток змісту елементів у складній речовині — виконується **кількісний спектральний аналіз**.

При дослідженні ультрафіолетових випромінювань, яких не сприймає око, призму спектрографа виготовляють із кварцу (скло затримує такі промені), а екран покривають фотолюмінесціюючою речовиною.

3.6. ПРИКЛАДИ РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧ

Задача 1.

При переході світла з повітря в будь-яке тверде тіло або рідину довжина світлової хвилі змінюється, але колір світла залишається попереднім. Чому?

Розв'язання:

Колір світла пов'язаний з частотою, яка в даному випадку не змінюється, тому що із зміною швидкості поширення хвиль в даному середовищі в стільки ж разів змінюється

і довжина світлових хвиль $\left(v = \frac{c}{\lambda} \right)$.

Задача 2.

Чи може червоне проміння викликати люмінесценцію?

Розв'язання:

Згідно з основним законом люмінесценції довжина хвилі випромінюваного світла завжди більша від довжини хвилі світла, яке поглинається. Отже, червоні промені не можуть викликати видиму люмінесценцію, тому що вони є крайніми у видимій частині спектра.

СУЧАСНА ФІЗИКА



1. СПЕЦІАЛЬНА ТЕОРІЯ ВІДНОСНОСТІ (ЧАСТКОВА ТЕОРІЯ ВІДНОСНОСТІ)

Спеціальна теорія відносності (часткова теорія відносності, СТВ) — сучасне вчення про простір і час.

1.1. ПОНЯТТЯ ПРО ПРОСТІР І ЧАС

Простір — форма існування матерії, яка характеризує взаємоположення матеріальних об'єктів; має три виміри, однорідна (всі точки рівноправні) та ізотропна (усі напрями рівноправні).

Час — форма існування матерії, яка характеризує послідовність ходу подій; має один вимір, необоротна, однорідна (усі миттєвості рівноправні), ізотропна (рівноправний відлік уперед і назад).

1.2. ПОСТУЛАТИ СТВ. ПЕРЕТВОРЕННЯ ЛОРЕНЦА

1. Усі закони фізики в усіх інерціальних системах відліку однакові (**принцип відносності Ейнштейна**).

2. Швидкість світла у вакуумі (c) не залежить від швидкості руху джерела, тобто c однакова в усіх інерціальних системах відліку (c — інваріант).

Відповідно до постулатів СТВ між координатами x та x' і часом t та t' у двох інерціальних системах відліку існують співвідношення, які називаються перетвореннями Лоренца:

$$x' = \frac{x \pm vt}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, y, z, \quad t' = \frac{t \pm \frac{v}{c^2} x}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$$

1.3. ВИСНОВКИ СТВ

1.3.1. ВІДНОСНІСТЬ ДОВЖИНИ (ВІДСТАНЕЙ)

Довжина тіла в системі відліку, відносно якої воно перебуває в спокої, називається власною довжиною l_0 .

Лоренцієве скорочення довжини — зменшення довжини в напрямку руху:

$$l = l_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}.$$

При $v \ll c$ маємо $l = l_0$ — класична механіка,

$$\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \text{ — кінематичний ефект.}$$

1.3.2. ВІДНОСНІСТЬ ПРОМІЖКУ ЧАСУ

Час, виміряний у системі відліку, де точки системи нерухомі, називається власним часом (t_0). Час у рухомій системі відліку:

$$t = \frac{t_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$$

Якщо $v \ll c$, то $t = t_0$ — класична механіка.

Релятивістське уповільнення часу в рухомій системі відліку в

$$\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

експериментально підтверджено.

1.3.3. ВІДНОСНІСТЬ ОДНОЧАСНОСТІ

Події, одночасні в одній інерціальній системі відліку, не одночасні в інших інерціальних системах, рухомих відносно першої.

Розрізняють події просторово-часові і причинно-наслідкові.

Якщо подія причинно-наслідкова, то неможлива система відліку, в якій наслідкова подія випередила б подію причинову.

1.3.4. РЕЛЯТИВІСТСЬКИЙ ЗАКОН ДОДАВАННЯ ШВИДКОСТЕЙ

Релятивістський закон додавання швидкостей:

$$u = \frac{u' + v}{1 + \frac{u'v}{c^2}}.$$

Якщо $u' = c$, $v = c$, то $u = c$. Якщо $u' \ll c$, $v \ll c$, то $u = u' + v$ — класична механіка.

Швидкість світла у вакуумі (c) — гранична швидкість у нашому Всесвіті.

1.3.5. ІМПУЛЬС ТІЛА І МАСА В СТВ.

ДРУГИЙ ЗАКОН НЬЮТОНА В СТВ

Імпульс тіла, як і в класичній механіці, пропорційний швидкості ($\vec{p} = m\vec{v}$), де m — релятивістська маса тіла:

$$\vec{p} = m\vec{v} = \frac{m_0\vec{v}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \quad m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$$

Якщо $v \rightarrow c$, то $m \rightarrow \infty$.

Власна маса — m_0 (маса спокою).

Жодна частинка (тіло) з масою спокою m_0 , відмінною від нуля, не може рухатися зі швидкістю, яка дорівнює чи перевищує швидкість світла у вакуумі (тільки менше c).

Другий закон Ньютона в імпульсній формі такий самий, як у класичній механіці:

$$\vec{F}\Delta t = \Delta\vec{p},$$

$$\vec{F}\Delta t = \frac{\Delta(m\vec{v})}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$$

1.3.6. ЗАКОН ВЗАЄМОЗВ'ЯЗКУ МАСИ ТА ЕНЕРГІЇ

Закон взаємозв'язку маси та енергії:

$$E = mc^2,$$

$$E_0 = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$$

Енергія спокою тіла (власна енергія тіла) — це його внутрішня енергія:

$$E_0 = m_0 c^2.$$

Зміні енергії тіла відповідає зміна маси тіла, і навпаки:

$$\Delta E = \Delta m c^2,$$

$$\Delta m = \frac{\Delta E}{c^2}.$$

У релятивістській фізиці енергія тіла складається із енергії спокою тіла і його кінетичної енергії:

$$mc^2 = m_0 c^2 + E_k.$$

При зміні температури тіла змінюється його внутрішня енергія, відповідно змінюється і його маса.

Масі спокою в 1 а. о. м. (атомну одиницю маси) відповідає енергія 931 МеВ:

$$1 \text{ а. о. м.} = 931 \text{ МеВ},$$

$$1 \text{ а.о.м.} = 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ кг},$$

$$1 \text{ еВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}.$$

1.4. ПРИКЛАДИ РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧ

Задача.

При якій швидкості кінетична енергія частинки дорівнює її енергії спокою?

Дано:

$$E_{\text{к}} = E_0$$

v — ?

Розв'язання:

$$E = E_0 + E_{\text{к}}, \quad E = 2E_0.$$

$$\text{Отже, } \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = 2m_0 c^2,$$

$$\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = 0,5, \quad v = c \sqrt{\frac{3}{4}}.$$

Відповідь: $v \approx 0,9 c$.

2. КВАНТОВА ОПТИКА

2.1. ТЕОРІЯ ПЛАНКА. ІМПУЛЬС ФОТОНА

Теорія Планка: світло випромінюється, поширюється і поглинається окремими порціями, які називаються квантами.

Енергія кванта прямо пропорційна частоті світла:

$$\varepsilon = h\nu,$$

де h — стала Планка; $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ Дж·с.

Квант світла — це частинка світла, яку називають **фотоном**.

Фотон не має маси спокою ($m_0 = 0$), а існує, лише рухаючись із швидкістю, яка дорівнює швидкості світла.

Фотон має певний імпульс ($\vec{p}$):

$$p_{\text{ф}} = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda_0}.$$

Квантові властивості світла зумовлені тим, що енергія, імпульс і маса електромагнітного випромінювання зосереджені у фотонах.

2.2. ФОТОЕФЕКТ

2.2.1. ЗОВНІШНІЙ І ВНУТРІШНІЙ ФОТОЕФЕКТ

Зовнішній фотоэффект — виривання електронів із твердих тіл і рідин за їхні межі під дією падаючого на них потоку фотонів.

Тіло втрачає частину електронів (фотоелектронів) — набуває позитивного заряду.

Внутрішній фотоэффект — виривання з атомів, молекул або іонів електронів, які залишаються всередині речовини.

2.2.2. ЗАКони ЗОВНІШНЬОГО ФОТОЕФЕКТУ. СПІВВІДНОШЕННЯ ЕЙНШТЕЙНА

Закони зовнішнього фотоэффекту:

1. Максимальна початкова швидкість фотоелектронів залежить лише від частоти світла і властивостей поверхні металу.
2. Число електронів n , які вириваються світлом за одиницю часу, прямо пропорційне освітленості металу ($n \propto E$).
3. Для кожної речовини існує **поріг фотоэффекту** (довгохвильова межа фотоэффекту). Це така довжина хвилі світла $\lambda_{\max}$, більше від якої (або частота світла $\nu_{\min}$, менше від якої) фотоэффект не відбувається.

Фотоэффект відбувається, якщо тіло освітлюється світлом з

$$\nu \geq \nu_{\min} \quad (\lambda \leq \lambda_{\max}).$$

Кожний фотон взаємодіє лише з одним електроном.

Рівняння Ейнштейна для зовнішнього фотоэффекту: енергія фотона витрачається на здійснення роботи виходу електрона з металу ($A_{\text{вих}}$) і на надання електрону, що вилітає, кінетичної енергії $\left(\frac{mv_{\max}^2}{2} \right)$:

$$h\nu = A_{\text{вих}} + \frac{mv_{\max}^2}{2}.$$

Поріг фотоефекту:

$$h\nu_{\min} = A_{\text{вих}} ,$$

$$\nu_{\min} = \frac{A_{\text{вих}}}{h} ,$$

$$\lambda_{\max} = \frac{c}{\nu_{\min}} = \frac{ch}{A_{\text{вих}}} .$$

Поріг фотоефекту цезію міститься в зоні червоних променів (мала $A_{\text{вих}}$).

Поріг фотоефекту вольфраму, золота міститься в зоні ультрафіолетових променів (велика $A_{\text{вих}}$).

2.3. ФОТОЕЛЕМЕНТИ ТА ЇХ ЗАСТОСУВАННЯ

Фотоелементи із зовнішнім фотоефектом — вакуумні безінерційні прилади для одержання фотострумів.

Потік фотоелектронів, які світло вириває із катода, під дією електричного поля утворює фотострум, що замикає електричне коло:

$$I_{\text{нас}} = k\Phi .$$

Фотоелементи із внутрішнім фотоефектом — фотоелементи із запираючим шаром (див. Струм у напівпровідниках).

Кремнієві фотоелементи перетворюють енергію світла в електричну (сонячні батареї).

Фоторезистори — напівпровідники, в яких під дією світла відбувається внутрішній фотоефект і різко змінюється їхній опір.

Фотоелементи із зовнішнім фотоефектом застосовуються у фотореле, у звукозапису кіно тощо.

2.4. СВІТЛОВИЙ ТИСК

Світловий тиск — це тиск, який створює електромагнітна хвиля, що падає на поверхню тіла (теоретично обґрунтував Максвелл, уперше установив і дослідив на практиці П. Н. Лебедєв).

Формула Максвелла:

$$p_{\text{світла}} = (1 + r)\omega$$

де r — коефіцієнт відбиття; ω — густина енергії електромагнітної хвилі.

Тиск світла на дзеркальну поверхню у два рази більший, ніж на чорну (поглинаючу) поверхню. Імпульс фотона передається атомам чи молекулам тіла з чорною поверхнею.

При відбиванні від дзеркальної поверхні імпульс фотона $\frac{h\nu}{c}$ змінюється на протилежний, а частинкам речовини передається імпульс $2\frac{h\nu}{c}$ (рис. 336):

$$\Delta \vec{p}_{\text{фот}} = \vec{p}'_{\text{фот}} - \vec{p}_{\text{фот}}.$$

Проекція на вісь X :

$$\Delta p_{\text{фот}} = -p'_{\text{фот}} - p_{\text{фот}} = -2p_{\text{фот}}.$$

Існування світлового тиску передбачено електромагнітною теорією світла Максвелла. При падінні електромагнітної хвилі на метал під дією електричної складової ($\vec{E}$) електрони металу будуть рухатись у напрямі, протилежному вектору $\vec{E}$. Магнітна складова електромагнітного поля ($\vec{B}$) діє на рухомі електрони із силою Лоренца в напрямі, перпендикулярному до поверхні металу, — створює тиск на поверхню металу (рис. 337).

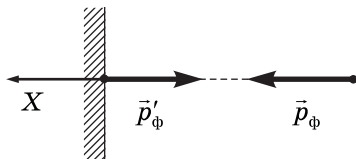


Рис. 336

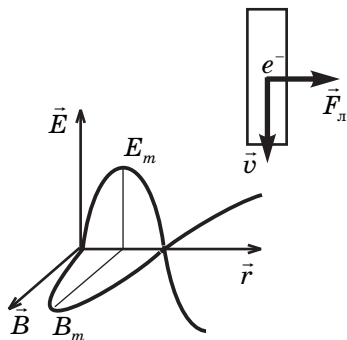


Рис. 337

2.5. КОРПУСКУЛЯРНО-ХВИЛЬОВИЙ ДУАЛІЗМ

У явищі світлового тиску наочно виявляється **корпускулярно-хвильовий дуалізм** (двоякість) **світла**.

Світло має хвильові властивості (інтерференція, дифракція, поляризація світла), а з іншого боку, світло — це потік фотонів — квантів, які є частинками.

Світловий тиск якісно і кількісно пояснюється як квантовими, так і хвильовими властивостями світла.

Енергія фотона прямо пропорційна частоті світла.

При малих частотах переважають хвильові властивості, при великих частотах — квантові властивості світла.

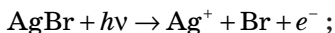
Квантові і хвильові властивості світла взаємно доповнюють одна одну і відображають взаємопов'язані закономірності поширення світла та його взаємодію з речовиною.

2.6. ХІМІЧНИЙ ВПЛИВ СВІТЛА. ЧОРНО-БІЛА ФОТОГРАФІЯ. ФОТОСИНТЕЗ. ЛАНЦЮГОВІ РЕАКЦІЇ

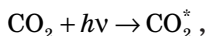
Хімічний вплив світла — розщеплення й активізація молекул і атомів при поглинанні ними квантів світла.

Приклади фотохімічної дії світла:

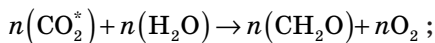
1) фотографія:



2) фотосинтез:



* — знак активізованої молекули;

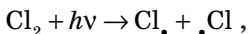


↓
органічна
сполука

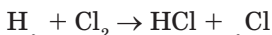
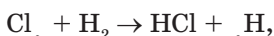
3) молекули H_2 і Cl_2 у темноті не сполучаються.

Під впливом світла:

сполука HCl (ланцюгова реакція):



• — знак активізованого атома.



2.7. ПРИКЛАДИ РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧ

Задача 1.

До якого виду слід віднести промені, енергія фотонів яких дорівнює $4 \cdot 10^{-19}$ Дж?

Дано: $\varepsilon = 4 \cdot 10^{-19}$ Дж	Розв'язання:
λ — ?	$\varepsilon = h\nu \Rightarrow \nu = \frac{\varepsilon}{h}, \lambda = \frac{c}{\nu},$ $\lambda = \frac{ch}{\varepsilon}.$

Обчислення:

$$\lambda = \frac{3 \cdot 10^8 \cdot 6,62 \cdot 10^{-34}}{4 \cdot 10^{-19}} \text{ м} = 5 \cdot 10^{-7} \text{ м}.$$

Відповідь: $\lambda = 0,5$ мкм. Видиме випромінювання світла.

Задача 2.

Який імпульс фотона, енергія якого дорівнює $6 \cdot 10^{-19}$ Дж?

Дано: $c = 3 \cdot 10^8$ м/с	Розв'язання:
$\varepsilon = 6 \cdot 10^{-19}$ Дж	Імпульс фотона
p — ?	$p = mc. \quad (1)$

Масу фотона визначаємо за формулою:

$$m = \frac{h\nu}{c^2} \quad (2)$$

(впливає з рівнянь: $\varepsilon = h\nu$ і $E = mc^2$).

Підставимо значення маси (2) в (1):

$$p = \frac{h\nu c}{c^2} = \frac{h\nu}{c} = \frac{\varepsilon}{c}, \quad p = \frac{\varepsilon}{c}.$$

Обчислення:

$$[p] = \frac{\frac{\text{Дж}}{\text{м}}}{\text{с}} = \frac{\text{Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}}{\text{м}} = \text{кг} \cdot \frac{\text{м} \cdot \text{с}}{\text{с}^2} = \text{кг} \cdot \frac{\text{м}}{\text{с}},$$

$$\{p\} = \frac{6 \cdot 10^{-19}}{3 \cdot 10^8} = 2 \cdot 10^{-27}.$$

Відповідь: $p = 2 \cdot 10^{-27} \text{ кг} \cdot \text{м/с}$.

Задача 3.

З якою найбільшою швидкістю будуть рухатися фотоелектрони при їх звільненні із цезію, якщо він освітлюється монохроматичним світлом з довжиною хвилі $\lambda = 0,5 \text{ мкм}$? (Роботу виходу із цезію вважати рівною $A_{\text{вих}} = 1 \text{ еВ}$).

Дано:	СІ:
$\lambda = 0,5 \text{ мкм}$	$\lambda = 0,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}$
$A_{\text{вих}} = 1 \text{ еВ}$	$A_{\text{вих}} = 1 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$
$m = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$	$m = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$
$h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$	$h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$
$c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$	$c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$
$v_{\text{max}} — ?$	

Розв'язання:

Спочатку слід установити, відбудеться фотоефект чи ні. Обчислимо енергію кванта і зіставимо його з роботою виходу:

$$\varepsilon = \frac{ch}{\lambda},$$

$$\varepsilon = \frac{3 \cdot 10^8 \cdot 6,62 \cdot 10^{-34}}{0,5 \cdot 10^{-6}} \text{ Дж} = 4 \cdot 10^{-19} \text{ Дж};$$

$\varepsilon > A_{\text{вих}}$ — фотоефект відбудеться.

Згідно із рівнянням Ейнштейна:

$$h\nu = A_{\text{вих}} + \frac{mv_{\text{max}}^2}{2}, \quad \frac{mv_{\text{max}}^2}{2} = \frac{ch}{\lambda} - A_{\text{вих}},$$

звідки

$$v_{\text{max}} = \sqrt{\frac{2\left(\frac{ch}{\lambda} - A_{\text{вих}}\right)}{m}},$$

$$\frac{ch}{\lambda} - A_{\text{вих}} = (4 \cdot 10^{-19} - 1,6 \cdot 10^{-19}) \text{ Дж} \approx 2,4 \cdot 10^{-19} \text{ Дж},$$

$$v_{\max} = \sqrt{2 \cdot \frac{2,4 \cdot 10^{-19}}{9,1 \cdot 10^{-31}}} \approx 7,3 \cdot 10^5.$$

Відповідь: $v_{\max} \approx 0,73 \frac{\text{Мм}}{\text{с}}.$

3. ФІЗИКА АТОМА

3.1. ПЛАНЕТАРНА МОДЕЛЬ АТОМА РЕЗЕРФОРДА

Планетарна (ядерна) модель атома Резерфорда

Резерфорд на підставі спостережень за розсіюванням α -частинок при проходженні їх через золоту фольгу обґрунтував модель атома (рис. 338, а, б).

Атом складається з ядра, яке займає дуже малий об'єм порівняно з об'ємом атома. Навколо нього по певних орбітах рухаються електрони (рис. 338, в).

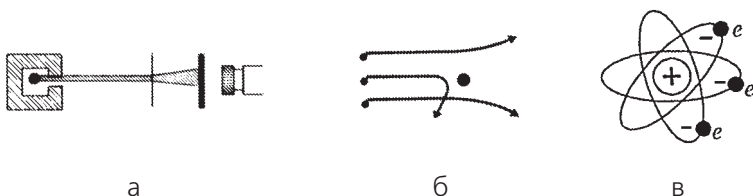


Рис. 338

Лінійні розміри ядра 10^{-15} — 10^{-14} м; лінійні розміри атома $\approx 10^{-10}$ м.

Маса електронів, які обертаються навколо ядра, значно менша від маси ядра, тобто майже вся маса атома зосереджена в ядрі атома.

Маса ядра атома Гідрогену (протона) у 1840 разів більша за масу електрона.

Електричний заряд ядра позитивний і дорівнює за чисельним значенням негативному заряду усіх електронів, що

обертаються навколо ядра, внаслідок чого атом електрично нейтральний.

Кількість електронів (e) в атомі дорівнює кількості протонів (p) в ядрі і збігається з порядковим номером (атомним номером) Z атома в періодичній системі Менделєєва.

3.2. ПОСТУЛАТИ БОРА. БОРІВСЬКІ ОРБІТИ

Постулати Бора

1. Електрони в атомах рухаються по орбітах визначеного радіуса, які називаються стаціонарними (або дозволеними). Момент імпульсу електронів, які рухаються стаціонарними орбітами, кратний величині

$$\frac{h}{2\pi} = \hbar : mvr = n \frac{h}{2\pi} \quad (mvr = n\hbar),$$

де $n = 1, 2, 3 \dots$ — головне квантове число.

2. Рух електрона по стаціонарній орбіті не супроводжується випромінюванням або поглинанням енергії.
3. При переході з однієї стаціонарної орбіти з енергією E_n на іншу з енергією E_m випромінюється або поглинається квант енергії $h\nu$:

$$h\nu = E_m - E_n.$$

Радіус **борівської орбіти** збільшується в міру того, як віддаляється від ядра:

$$r_n = \frac{\epsilon_0 n^2 \hbar^2}{\pi Z e^2 m}.$$

Теорія Бора описує атом Гідрогену, ізотопи Гідрогену і водневоподібні йонізовані атоми, тобто атоми з одним електроном, що обертається навколо ядра.

Значення повної енергії електрона в атомі складається із суми потенціальної енергії притягання електрона до ядра і кінетичної енергії обертання його навколо ядра:

$$E = E_n + E_k, \quad E_n = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Ze^2}{r}, \quad E_k = \frac{1}{2} \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Ze^2}{r}.$$

Енергетичний рівень атома:

$$E_n = -\frac{1}{8\pi\epsilon_0} \frac{Ze^2}{r}$$

Орбіта електрона в атомі (борівська орбіта) — це геометричне місце точок, у яких імовірність знаходження електрона найбільша, бо електрон в атомі виявляє як корпускулярні властивості, так і хвильові.

3.3. АТОМ ГІДРОГЕНУ ЗА Н. БОРОМ

Спектр випромінювання атома Гідрогену лінійчастий.

Нормальному (стаціонарному) стану атома відповідає рух електрона найближчою до ядра орбітою. Енергетичний рівень електрона при цьому $E_1 = -13,55$ еВ. Всі інші рівні ($n = 2, 3, 4, \dots$) називаються **збудженими**.

Перехід атома зі збудженого стану (збуджений рівень) у нормальний стан (на перший рівень) супроводжується випромінюванням певного кванта (з певними ν і λ).

Серії названі іменами їх першовідкривачів (рис. 339).

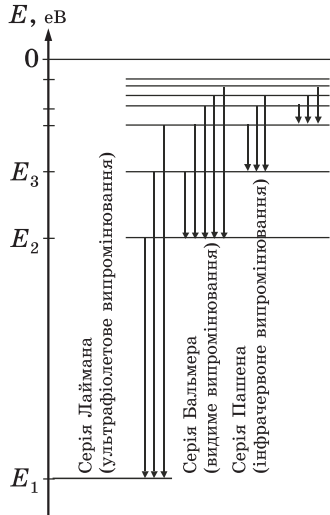


Рис. 339

3.4. ПРИКЛАДИ РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧ

Задача 1.

Обчислити радіус першої борівської орбіти та швидкість електрона атома Гідрогену на ній.

Дано:

$$n = 1$$

$$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$$

$$m = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$$

$$h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$$

$$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$$

$$r \text{ — ?}$$

$$v \text{ — ?}$$

Розв'язання:

Кулонівська сила притягання до ядра надає електрону доцентрового прискорення:

$$F_{\kappa} = m a_{\text{доц}},$$

$$\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r^2} = m \frac{v^2}{r}.$$

З першого постулату Бора $mvr_1 = \frac{h}{2\pi}$ ($n = 1$).

$$\text{Звідси } v = \frac{h}{2\pi mr_1}.$$

Підставимо значення v :

$$\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r_1^2} = m \frac{h^2}{4\pi^2 m^2 r^3}, \quad \frac{e^2}{\epsilon_0} = \frac{h^2}{\pi m r}.$$

Звідси одержуємо радіус першої борівської орбіти:

$$r_1 = \frac{\epsilon_0 h^2}{e^2 \pi m}.$$

Швидкість електрона на цій орбіті буде:

$$v = \frac{he^2 \pi m}{2\pi m \epsilon_0 h^2}, \quad v = \frac{e^2}{2\epsilon_0 h}.$$

Обчислення:

$$r_1 = \frac{8,85 \cdot 10^{-12} \cdot (6,62 \cdot 10^{-34})^2}{(1,6 \cdot 10^{-19})^2 \cdot 3,14 \cdot 9,1 \cdot 10^{-31}} \text{ м} = 0,53 \cdot 10^{-10} \text{ м},$$

$$v = \frac{(1,6 \cdot 10^{-19})^2}{2 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 6,62 \cdot 10^{-34}} \frac{\text{м}}{\text{с}} = 2,2 \cdot 10^6 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Відповідь: $r_1 = 53 \text{ пм}$; $v = 2,2 \text{ Мм/с}$.

Задача 2.

Електрон, що розташований на n -й стаціонарній орбіті атома Гідрогену ^1H , має енергію $E_n = -1,097 \cdot 10^7 \text{ м}^{-1} \cdot \frac{ch}{n^2}$.

Визначити довжину електромагнітної хвилі, яка випромінюється атомом Гідрогену при переході його електрона з третьої на другу стаціонарну орбіту.

Дано:

$$E_n = -1,097 \cdot 10^7 \text{ м}^{-1} \cdot \frac{ch}{n^2}$$

$$i = 3$$

$$k = 2$$

Розв'язання:

Довжина електромагнітної хвилі та її частота пов'язані залежністю:

$$\lambda = \frac{c}{\nu},$$

λ_{ik} — ?

де c — швидкість поширення світла у вакуумі.

Енергія фотона $h\nu$ (h — стала Планка), який випромінюється при переході його електрона з однієї стаціонарної орбіти на іншу, пов'язана з енергіями електронів на цих орбітах залежністю:

$$h\nu_{ik} = E_i - E_k.$$

Отже,

$$\begin{aligned}\lambda_{ik} &= \frac{hc}{E_i - E_k} = \frac{hc}{\left(-1,097 \cdot 10^7 \cdot \frac{ch}{i^2} - \left(-1,097 \cdot 10^7 \cdot \frac{ch}{k^2}\right)\right)} \text{ м} = \\ &= \frac{hc}{1,097 \cdot 10^7 ch \left(\frac{1}{k^2} - \frac{1}{i^2}\right)} \text{ м} = \frac{k^2 i^2}{1,097 \cdot 10^7 (i^2 - k^2)} \text{ м}.\end{aligned}$$

Обчислення:

$$[\lambda_{ik}] = \text{м},$$

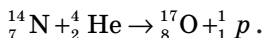
$$\{\lambda_{ik}\} = \frac{4 \cdot 9}{1,097 \cdot 10^7 (9 - 4)} = 6,56 \cdot 10^{-7}.$$

Відповідь: $\lambda_{ik} = 0,656 \text{ мкм.}$

4. ФІЗИКА АТОМНОГО ЯДРА

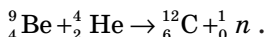
4.1. ВІДКРИТТЯ ПРОТОНА І НЕЙТРОНА

1919 р. **Е. Резерфорд** здійснює першу ядерну реакцію і відкриває протон (p):



Протон — елементарна частинка з масою спокою, трохи більшою за 1 а. о. м. ($1,67 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$) й елементарним позитивним зарядом $+e$ ($1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$).

1932 р. **Д. Чедвік** відкриває нейтрон (n):



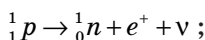
Нейтрон — елементарна частинка з масою спокою, трохи більшою від маси спокою протона, проте електричний заряд відсутній.

4.2. ТЕОРІЯ БУДОВИ ЯДРА

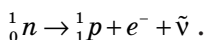
Теорія будови ядра (Д. Іваненко, В. Гейзенберг та ін.):

Ядро кожного атома складається тільки з протонів та нейтронів (нуклонів). У ядрах деяких атомів вони можуть перетворюватися один в одного:

- при перетворенні протона в нейтрон випромінюються позитрон і нейтрино:



- при перетворенні нейтрона в протон випромінюються електрон й **антинейтрино** — нейтральна частинка з дуже малою масою спокою:



У ядрі протони і нейтрони міцно зв'язані внутрішньоядерними силами, які є проявом сильних взаємодій.

Ядерні сили спостерігаються на відстані 10^{-14} — 10^{-15} м. Ядерні сили між двома протонами в атомному ядрі в 100 разів більші за кулонівські.

Протони і нейтрони в ядрі безперервно обмінюються частинками π -мезонами (π^+ , π^- , π^0) — так звана обмінна взаємодія.

A — **масове число атома** (заокруглена до цілого відносна атома маса), що дорівнює числу нуклонів у ядрі.

Z — **число протонів у ядрі** (порядковий номер елемента в таблиці Менделєєва).

$$N = A - Z \text{ — число нейтронів у ядрі.}$$

4.3. ЕНЕРГІЯ ЗВ'ЯЗКУ ЯДРА. ДЕФЕКТ МАСИ

Енергія ядра:

$$E = m_{\text{ядра}} c^2.$$

Енергія зв'язку ядра — це енергія, яка потрібна, щоб розщепити ядро на окремі нуклони, або це енергія, яка виділиться при утворенні ядра з вільних нуклонів.

Енергія зв'язку ядра визначається за дефектом маси ядра:

$$E_{\text{зв. ядра}} = \Delta m_{\text{ядра}} c^2.$$

Дефект маси ядра дорівнює різниці між сумою мас спокою нуклонів у вільному стані й масою спокою ядра:

$$\Delta m_{\text{ядра}} = Zm_p + Nm_n - m_{\text{ядра}}.$$

Енергія зв'язку ядра вимірюється в МеВ:

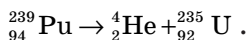
$$1 \text{ МеВ} = 10^6 \text{ еВ} = 10^6 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} = 1,6 \cdot 10^{-13} \text{ Дж}.$$

Наприклад, енергія зв'язку ядра ${}^4_2\text{He}$ дорівнює 28 МеВ.

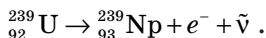
4.4. ПРИРОДНА РАДІОАКТИВНІСТЬ

Природна радіоактивність (три види):

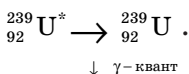
1. **α -розпад.** У деяких важких ядрах два протони і два нейтрони вступають у замкнуту взаємодію і виштовхуються з ядра. Первинне ядро випромінює α -частку (ядро ${}^4_2\text{He}$) і перетворюється в нове ядро елемента, який розташований на дві клітинки ближче до початку таблиці Менделєєва:



2. **β^- -розпад.** У деяких ядрах нейтрон довільно (спонтанно) перетворюється в протон з випромінюванням електрона і антинейтрино. Утворюється нове ядро елемента, який розташований у таблиці Менделєєва слідом за елементом до випромінювання, тобто зміститься на одну клітинку до кінця таблиці Менделєєва. Потік електронів, що виникає, називають β -випромінюванням:



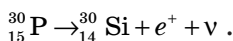
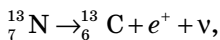
3. **γ -випромінювання.** Ядра, що опинилися в збудженому стані, переходячи в стаціонарний стан, випромінюють квант електромагнітного випромінювання високої частоти (γ -квант):



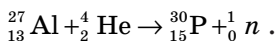
4.5. ШТУЧНА РАДІОАКТИВНІСТЬ

Деякі штучно одержані радіоактивні речовини зазнають β^+ -розпаду.

В ядрах цих атомів один з протонів перетворюється в нейтрон з випромінюванням позитрона і нейтрино. Новий елемент зміщується на одну клітинку до початку таблиці Менделєєва:



Ізотоп ${}_{15}^{30}\text{P}$ отримують бомбардуванням Al α -частинками:



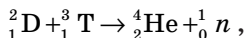
Ядерними реакціями називаються перетворення ядер при взаємодії з елементарними частинками або одне з одним.

Ядерна реакція протікає так: ядро захоплює бомбардуючу частинку, поглинає її енергію, переходить у нестійкий стан та розпадається. Реакція, що протікає з поглинанням енергії,— ендотермічна, з виділенням енергії — екзотермічна.

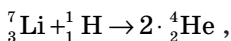
4.6. ЧАСТКОВЕ ЗВІЛЬНЕННЯ ВНУТРІШНЬОЯДЕРНОЇ ЕНЕРГІЇ ПРИ ЕКЗОТЕРМІЧНИХ ЯДЕРНИХ РЕАКЦІЯХ

Елементи, розташовані у середній частині таблиці Менделєєва, мають більшу питому енергію зв'язку ядер. Енергія звільнюється при з'єднанні легких ядер або при поділі важких (рис. 340).

I. Термоядерний синтез легких ядер (відбувається при температурах в десятки мільйонів градусів). Енергія, що виділяється при цьому (екзотермічна ядерна реакція),— це кінетична енергія утворених ядер і частинок і супроводжується γ -випромінюванням:



виділяється 17,6 МеВ;



виділяється 14,6 МеВ.

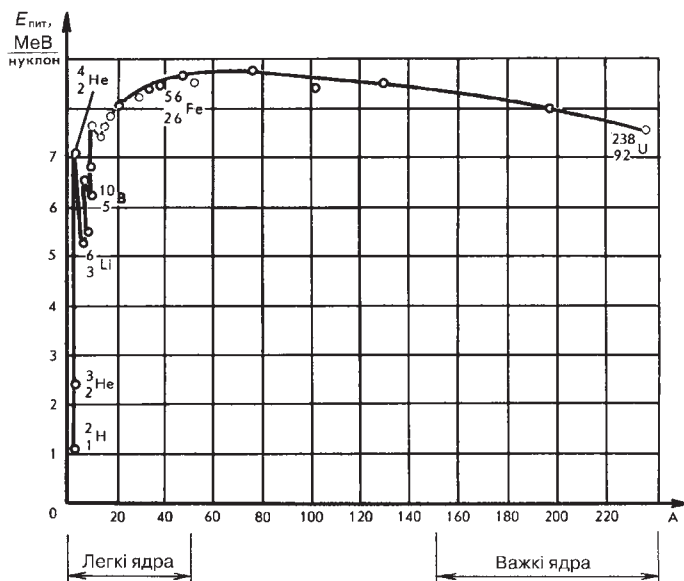


Рис. 340

Енергія, що виділяється, дорівнює добутку величини дефекту маси ядерної реакції на квадрат швидкості світла:

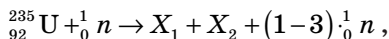
$$\Delta E = m_{\text{я.р}} c^2.$$

Дефект маси ядерної реакції — це різниця між сумою мас спокою ядер і частинок до і після ядерної реакції. При ендотермічній ядерній реакції дефект мас від'ємний $\Delta m < 0$ (поглинання енергії), при екзотермічній — $\Delta m > 0$.

II. Ділення важких ядер.

Ядерні реакції особливо легко зумовлюються повільними нейтронами, які через відсутність заряду вільно проникають в атомні ядра та спричиняють їх перетворення.

Наприклад, ядро Урану-235 при захопленні нейтрона розщеплюється на два осколки X_1 і X_2 ; утворюються 1—3 нейтрони:



виділяється приблизно 200 MeV енергії.

Тут X_1 і X_2 — радіоактивні ізотопи.

Осколки — це різні ядра радіоактивних ізотопів. При розпаді (діленні) певного елемента можливе утворення будь-якої пари різних осколків з різним числом нейтронів:

Zr і Te, Xe і Sr, Sb і Nb та інші.

$^{235}_{92}\text{U}$ захоплює тільки повільні (теплові) нейтрони.

Ланцюгові ядерні реакції.

За певних умов кожний звільнений в результаті розщеплення важкого ядра нейтрон може бути захоплений ядром $^{235}_{92}\text{U}$ і звільнити ще 2—3 нейтрони. Якщо процес повторюється, може виникнути самопідтримуюча ядерна реакція.

Коефіцієнт розмноження нейтронів — це відношення числа нейтронів, звільнених при поділі ядра, до числа нейтронів, які спричиняють поділ у даній масі ядерного пального.

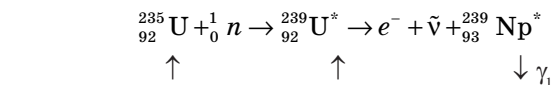
Для протікання ланцюгової реакції необхідно, щоб коефіцієнт розмноження нейтронів у даній масі урану був $k \geq 1$.

Ланцюгова реакція в $^{235}_{92}\text{U}$ та $^{239}_{94}\text{Pu}$ здійснюється в атомних бомбах, де критична маса радіоактивної речовини обумовлює $k \geq 1,01$, тобто **ядерний вибух**.

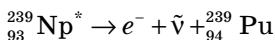
У реакторах на атомних електростанціях здійснюється **керована ядерна реакція** ($k = 1$). Сповільнювачем нейтронів в урано-графітовому реакторі є графіт (або важка вода).

Енергія виділяється при розщепленні $^{235}_{92}\text{U}$.

У **паливі** ядерних реакторів кількість $^{235}_{92}\text{U}$ менша, ніж кількість $^{238}_{92}\text{U}$, який, захоплюючи повільний нейтрон, перетворюється в Плутоній $^{239}_{94}\text{Pu}$:



$T = 4,5$ млрд років $T = 23$ хв



$T = 2$ діб $T = 24\,000$ років

Керують реакцією введені в реактор стрижні з бору або кадмію, які поглинають теплові нейтрони.

У реакторі-розмножувачі на швидких нейтронах з 1 кг $^{235}_{92}\text{U}$ отримують 1,5 кг плутонію.

4.7. ЗАКОН РАДІОАКТИВНОГО РОЗПАДУ

Закон радіоактивного розпаду (рис. 341):

де N — число радіоактивних атомів в даний момент часу;
 N_0 — число радіоактивних атомів в початковий момент часу;

T — **період напіврозпаду** — час, упродовж якого розпадається половина радіоактивних атомів.

$$N = N_0 2^{-\frac{t}{T}},$$

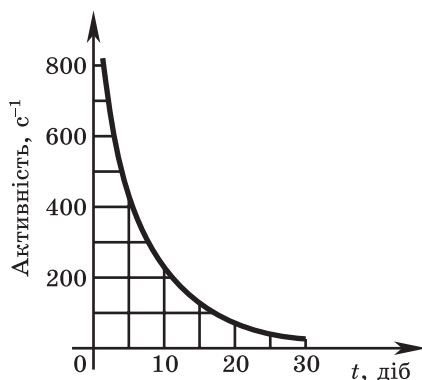


Рис. 341

4.8. ПРИКЛАДИ РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧ

Задача 1.

Ядро ${}_{90}^{232}\text{Th}$ зазнає 4 α -розпади і 2 β^- -розпади. Ядро якого атома утворюється?

Розв'язання:

Після 4 α -розпадів ядро Торію покинуть 4_2^4He , тобто 8 протонів і 8 нейтронів (16 нуклонів).

Після 2 β^- -розпадів 2 нейтрони перетворюються у 2 протони, тобто число нуклонів не змінюється, а число протонів збільшується на 2.

Таким чином, утворюється ядро із $Z = 84$ і масовим числом $A = 216$.

За таблицею Менделєєва визначаємо, що це ядро ізотопу Полонію $^{216}_{84}\text{Po}$.

Відповідь: ядро $^{216}_{84}\text{Po}$.

Задача 2.

Визначити, виділяється чи поглинається енергія у ядерній реакції $^{14}_7\text{N} + ^4_2\text{He} \rightarrow ^{17}_8\text{O} + ^1_1\text{H}$?

Дано:

$$m_{0\text{N}} = 14,003\,07 \text{ а. о. м.}$$

$$m_{0\text{He}} = 4,002\,66 \text{ а. о. м.}$$

$$m_{0\text{O}} = 16,999\,91 \text{ а. о. м.}$$

$$m_{0\text{H}} = 1,007\,83 \text{ а. о. м.}$$

$$\Delta E = ?$$

Розв'язання:

$$\Delta m = m_1 - m_2,$$

$$m_1 = m_{0\text{N}} + m_{0\text{He}} \approx 18,0056,$$

$$m_2 = m_{0\text{O}} + m_{0\text{H}} = 18,007,$$

$$m_2 > m_1,$$

отже,

$$\Delta m < 0.$$

Відповідь: енергія поглинається.

5. ЕЛЕМЕНТАРНІ ЧАСТИНКИ

5.1. ФІЗИКА ЕЛЕМЕНТАРНИХ ЧАСТИНОК

Частинки, яким на сьогоднішній день наука не може приписати певної внутрішньої будови, називають **елементарними**.

Відкрито 38 елементарних частинок і більше 300 **резонанс-частинок** (короткоживучі частинки із середнім часом життя 10^{-22} — 10^{-23} с).

5.1.1. КЛАСИФІКАЦІЯ ЕЛЕМЕНТАРНИХ ЧАСТИНОК

1. **Фотони** ($m_0 = 0$): γ .

2. **Лептони** (легкі): e^- , e^+ , ν , $\tilde{\nu}$, μ^+ , μ^- , ν_μ , $\tilde{\nu}_\mu$.

3. **Мезони** (середні): π^+ , π^- , π^0 , k^+ , k^- , $k^0(k_1^0, k_2^0)$.

4. **Баріони** (важкі): нуклони p , n і гіперони.

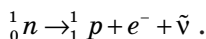
Кожна частинка має свою античастинку, тобто частинку тієї ж маси спокою, але з деякими протилежними квантовими властивостями (e^- і e^+ , ν і $\bar{\nu}$, p і p^- тощо).

Фотон та π^0 -мезон античастинок не мають.

5.1.2. СТАБІЛЬНІ І НЕСТАБІЛЬНІ ЧАСТИНКИ

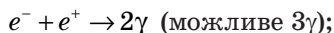
Стабільні частинки (їх дев'ять) — живуть у вільному стані як завгодно довго: γ , e^- , e^+ , p , p^- , ν , $\bar{\nu}$, ν_μ , $\bar{\nu}_\mu$. Інші нестабільні.

Наприклад, 1_0n стабільний у ядрі, а у вільному стані його середній час життя 15 хв, після чого нейтрон перетворюється в стабільні частинки:



При будь-якому перетворенні елементарних частинок виконуються **закони збереження** маси, енергії, електричного заряду, імпульсу, моменту імпульсу.

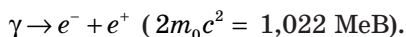
Анігіляція частинок:



кожний фотон забирає енергію

$$h\nu = m_0 \cdot c^2 = 0,511 \text{ MeV}.$$

Фотонародження (утворення пар): γ -квант з енергією $\geq 1,022 \text{ MeV}$ утворює пару:



5.2. ПРИКЛАДИ РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧ

Задача.

При зіткненні γ -кванта жорсткого випромінювання з ядром атома відбулося фотонародження. Визначити кіне-

тичну енергію утвореної пари — електрона і позитрона, якщо частота γ -кванта $7 \cdot 10^{20}$ Гц.

Дано:

$$\nu = 7 \cdot 10^{20} \text{ Гц}$$

$$m_0 = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$$

$$c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$$

$$h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$$

$$E'_\kappa \text{ — ?}$$

Розв'язання:

За законом збереження і перетворення енергії:

$$h\nu = 2m_0c^2 + E_\kappa.$$

Кінетична енергія утвореної пари:

$$E_\kappa = h\nu - 2m_0 \cdot c^2.$$

Кінетична енергія електрона чи позитрона:

$$E'_\kappa = \frac{E_\kappa}{2}.$$

Обчислення:

$$h\nu = \frac{6,62 \cdot 10^{-34} \cdot 7 \cdot 10^{20} \text{ Дж}}{1,6 \cdot 10^{-13} \frac{\text{Дж}}{\text{МеВ}}} \approx 3 \text{ МеВ},$$

$$2m_0 \cdot c^2 = 1,022 \text{ МеВ},$$

$$E'_\kappa = \frac{3 - 1,022}{2} \text{ МеВ} \approx 1 \text{ МеВ} = 1,6 \cdot 10^{-13} \text{ Дж}.$$

Відповідь: кінетична енергія електрона і протона дорівнює $\approx 0,16$ пДж.

ПРЕДМЕТНИЙ ПОКАЖЧИК

А

Абсолютний нуль температури 143
 Аеродинамічний парадокс 132
 Адіабата 192
 Акомодація 342
 Ампер 224
 Амплітуда коливань 288, 304
 Анігіляція 375
 Анізотропія 175
 Антинейтрино 369
 Античастинка 374
 Атом 139

Б

Баріон 374
 Барометр 116
 Бінокль 342
 Блок 78
 — нерухомий 78
 — рухомий 78
 Борівська орбіта 364

В

Вага тіла 50
 Важіль 77
 Вакуум 248
 Вантажопідйомність 116
 Ват 69
 Вектор 15
 Випромінювання 188
 — видиме 320
 — теплове 159
 Випаровування 159
 Вільне падіння 24

Вольт-амперна характеристика газового розряду 241
 — — діода 248
 — — з підігрівальним катодом 249
 — — прямого розжарення 249
 — — струму в металах 237

Г

Газ ідеальний 241
 Гальванопластика 240
 Гальванотехніка 239
 Гвинт 79
 Генератор 292
 — електромагнітних коливань 305
 Гідравлічна машина 115
 Гідроаеродинаміка 128
 Гідроаеростатика 112
 Гідравлічна машина 115
 Головна оптична вісь лінзи 337
 Головний фокус лінзи 338
 Графік руху 23

Д

Демодуляція 315
 Деформація 46
 — пластична 46
 — твердого тіла 46
 — пружна 46
 Джерело когерентне 311
 — рентгенівських променів 349
 — струму 228

Демодуляція 316
 Дефекти кристалічної ґратки 177
 — лінійні 177
 — маси 368
 — — ядерної реакції 371
 Джоуль 69
 Динаміка 37
 Диполь 212
 Дисперсія світла 321
 Дифракційна ґратка 327
 Дифракція хвиль 310
 Дифузія 127
 Діелектрик 212
 Діод 249
 Довжина хвилі 306, 348
 — — електромагнітної 316

Е

Електрична дуга 242
 Електричний резонанс 295
 Електродинаміка 223
 Електроліз 239
 Електроліт 238
 Електролітична дисоціація 238
 Електролюмінесценція 348
 Електромагнітна індукція 272
 Електронна емісія 242, 248
 Електронно-променева трубка 251
 Електропровідність 220
 Енергія 70
 — внутрішня 185
 — електрона 349
 — кванта 355
 — кінетична 71
 — магнітного поля
 провідника зі струмом 276
 — механічна 70

З

— поверхневого шару рідини 166
 — потенціальна 71
 — спокою тіла 66, 353
 — зв'язку ядра 368
 Ентропія 187
 Еталон маси 38
 Ефект діамантний 262
 — парамагнітний 262
 — скін- 299
 Закон Авогадро 140
 — Архімеда 115
 — Бернуллі 129
 — Бойля—Маріотта 136
 — Брюстера 326
 — взаємозв'язку маси і енергії 355
 — додавання швидкостей 18
 — заломлення світла 320
 — збереження енергії 70
 — — заряду 207, 66
 — — моменту імпульсу 104
 — зовнішнього фотоефекту 357
 — всесвітнього тяжіння 49
 — газовий 147
 — Гей-Люссака 147
 — Гука 169
 — Дальтона 138
 — Джоуля—Ленца 230
 — електролізу (закон Фарадея) 239
 — Кулона 208
 — Ома
 — — для ділянки кола 224
 — — для змінного струму 292
 — — для повного кола 229
 — — у векторній формі 225
 — Паскаля 113

-
- радіоактивного розпаду 373
 - самоіндукції 276
 - сталості потоку 128
 - Стокса 121
 - термодинаміки 191, 193
 - Шарля 147
- З**
- Заряд електричний 207
 - елементарний 207
 - пробний 209
 - точковий 209
 - Звук 309
 - Звуковий резонанс 310
 - З'єднання провідників паралельне 227
 - — послідовне 226
 - Зображення 333
 - дійсне 333
 - уявне 333
 - «Золоте правило» механіки 76
- І**
- Ізобара 147
 - Ізотерма 136
 - Ізохора 149
 - Імпульс сили 64
 - тіла 41
 - Індукція електромагнітна 273
 - магнітна 251
 - Інертність 38
 - Інерція 37
 - Інтенсивність звуку 311
 - Інтерференція 323
 - Інфразвук 311
- К**
- Калориметр 191
 - Капіляр 166
 - Катіон 238
- Квант 356
 - Кипіння 161
 - Кільця Ньютона 324
 - Кінематика 13
 - Клин 79
 - Коефіцієнт відновлення 70
 - джерела струму 229
 - затухання 305
 - корисної дії (ККД) 74
 - розмноження нейтронів 372
 - тертя ковзання 42
 - трансформації 297
 - Коливальний контур 300
 - Коливання 282
 - вимушені 284
 - вільні 284
 - гармонічні 283, 284
 - затухаючі 286
 - електричні 302
 - періодичні 283
 - Конвекція 189
 - Конденсація 191
 - Корпускулярно-хвильовий дуалізм 360
 - Кристал 175
 - Кристалізація 190
 - Кристалічна ґратка 177
- Л**
- Лінії магнітної індукції 255
 - напруженості 202
 - Лінза 337
 - Луна 312
 - Лупа 343
 - Люмінесценція 348
- М**
- Магнетики 261
 - Магнітна індукція 251
 - Магнітне поле 251
 - колового струму 253
 - постійного магніту 262

— соленоїда 257
 Магнітний полюс 257
 Магнітний потік 259
 Магніт 266
 Манометр 119
 Маса 38
 — атома 139
 — молярна 140
 Маятник математичний 285
 — пружний 285
 — фізичний 287
 Мікроскоп 344
 Модуль магнітної індукції 255
 — Югна 47
 Молекула 139
 Монокристал 176

Н

Напівпровідник 212, 244
 Напруга 215, 226
 Напруженість поля
 — електричного 209
 — — нескінченної
 зарядженої площини 210
 — — точкового заряду 210
 Напрямок струму 223
 — сили Лоренца 255, 259
 Невагомість 52

О

Обертання 27
 — період 27
 — частота 27
 Одиниця електропровідності 225
 — жорсткості 47
 — заряду 200
 — імпульсу 69
 — індуктивності 276
 — кількості речовини 140

— кутової швидкості 27, 100
 — магнітної індукції 255
 — магнітного потоку 260
 — маси 38
 — молярної маси 129
 — — теплоємності 189
 — опору 219
 — питомої теплоємності 138
 — — теплоти згоряння 190
 — потужності 69
 — прискорення 21
 — роботи (енергії) 69
 — сили 41
 — швидкості 21
 Опір 295
 — провідника 224
 Оптика 363
 Оптична сила лінзи 338
 Оптичний центр лінзи 337
 Осциллограф 251

П

Пара 157
 Парабола 23
 Період вільних коливань в контурі 285
 — коливання 286
 — обертання 27
 — піврозпаду 377
 Плазма 243
 Поле гравітаційне 49
 — електричне 209
 — електромагнітне 277
 — електростатичне 209
 — індуктивне 209
 — магнітне 254
 Поляризація 313
 — діелектрика 213
 — молекул 207
 — світла 327
 Постулати Бора 364

Потенціометр 227
 Потужність 70
 — струму 230
 Правило буравчика 254, 275
 — Ленца 275
 — лівої руки 258
 — рівноваги важеля 77
 Принцип відносності 352
 — Гюйгенса 308
 — суперпозиції 209
 Прискорення 21
 — вільного падіння 23
 — кутове 28
 — нормальне 25
 — тангенціальне 25
 Промінь 307
 — інфрачервоний 343
 — рентгенівський 349
 — світловий 348
 — ультрафіолетовий 318
 Процес адіабатичний 192
 — ізобарний 147
 — ізотермічний 146
 — ізохорний 147
 Протон 367
 Провідник 212
 Провідність електрична 225
 — електронно-діркова 245
 Протон 367
 Психрометр 159

Р

Радіан 93
 Радіохвиля 316
 Радіоактивність 369
 Резистор 227
 Резонанс напруг 295
 — струмів 293, 295
 Реостат 227
 Рекомбінація 238
 Рефлектор 344
 Речовина 139, 263

Рівняння Бернуллі 112
 — гармонічних коливань 283
 — вільного падіння 24
 — Ейнштейна для зовнішнього фотоефекту 357
 — Клапейрона 161
 — Клапейрона—Менделєєва 134
 — Максвелла 278
 — миттєвої швидкості 22
 — Пуассона 192
 — теплового балансу 188
 Рівновага байдужа 102
 — динамічна 148
 — нестійка 102
 — стійка 102
 Робота 73
 — ідеального газу 186
 — з переміщення заряду 215
 — корисна 74
 — сили 95
 — сталої сили 73
 — струму 230
 — струму 225
 Розряд самостійний 215
 — тліючий 243
 Розширення 182
 Рух 65
 — броунівський 127
 — механічний 13
 — обертальний 104
 — поступальний 14, 100, 105
 — прямолінійний рівномірний 19
 — рівноприскорений прямолінійний 21
 — тепловий 179
 — тіла, кинутого під кутом до горизонту 53

- тіла, кинутого горизонтально 53
- реактивний 215

С

- Самоіндукція 276
- Світло 320
- Сила 36
 - аеродинамічна 131
 - Ампера 255
 - Архімеда 115
 - всесвітнього тяжіння 49
 - консервативна 72
 - кулонівська 209
 - Лоренца 254
 - піднімальна 116
 - поверхневого натягу 165
 - пружності 45
 - стороння 215
 - струму 223
 - термодинамічна 195
 - тертя 42
 - — ковзання 42
 - — кочення 44
- Система відліку 14, 352
 - інерціальна 37
- Спектр дисперсний 321
 - інтерференційний 323
 - лінійчастий 350
 - поглинання 350
 - Сонця 350
- Сполучені посудини 113
- Стала Авогадро 140
 - Больцмана 131
 - гравітаційна 50
 - електрична 208
 - Фарадея 239
 - універсальна газова 143
- Струм електричний 223
 - постійний 223

Т

- Телескоп 344

- Тембр звуку 312
- Температура 142
 - кипіння 161
 - плавлення 175
- Теорема Карно 195
 - Остроградського—Гаусса 211
 - Торрічеллі 131
 - Максвелла 276
 - Планка 356
- Теплова машина 196
- Тепловий двигун 194
- Теплообмін 187
- Теплопередача 187
- Теплопровідність 187
- Термодинаміка 185
- Термопара 237
- Тон 312
- Точка Кюрі 267
 - матеріальна 13
 - роси 159
- Тиск 112
 - атмосферний 307
 - гідростатичний 103
 - парціальний 148
 - світловий 358
- Траєкторія 14, 54
- Транзистор 248
- Тріод 248

У

- Удар 75
 - непружний 75
 - центральний 75
- Ультразвук 311

Ф

- Фарад 217
- Формула Лапласа 167
 - лінзи 338
 - Максвелла 359
 - Ньютона—Лапласа 312
 - Томсона 304

-
- сферичного дзеркала 343
 - Ціолковського 70
 - Фотоелемент 357
 - Фотоэффект 357
 - Фотон 356
 - Фоторезистор 246, 258
- Х**
- Хемілюмінесценція 348
 - Хвиля електромагнітна 314
 - довга 317
 - коротка 318
 - механічна 307
 - плоска 308
 - поперечна 307
 - світлова 320
 - середня 318
- Ц**
- Центр маси 40
 - Цикл Карно 195
- Ч**
- Частинка 374
 - елементарна 374
 - стабільна 374
 - нестабільна 375
 - Частота коливання 283
 - обертання 27
 - циклічна 283
- Ш**
- Швидкість 121
 - гармонічних коливань 283
 - кутова 27, 100
 - лінійна 20
 - миттєва 27
 - перша космічна 54
 - тіла 50
 - середня 20
 - — поширення звукової хвилі в повітрі 310
 - — електромагнітних хвиль у вакуумі 310
 - середня шляхова
 - — при прямолінійному однапрявленому русі 21
 - — прирівноприскореному прямолінійному русі 21
 - світла у вакуумі 352
- Я**
- Явище гістерезису 265
 - Доплера 328
 - Пельтье 237
 - ревербації 312
 - Ядерна реакція 370
 - Ядро 368

Навчальне видання

СОКОЛОВИЧ Юрій Анатолійович
БОГДАНОВА Ганна Семенівна

ФІЗИКА
Навчально-практичний довідник

Редактор *Г. Ю. Вепрік*. Технічний редактор *А. П. Твердохліб*

Код Т10849Р. Підписано до друку 28.09.2009.

Формат 84×108/32. Папір друкарський.

Гарнітура Шкільна. Друк офсетний. Ум. друк. арк. 20,6.

ТОВ Видавництво «Ранок». Свідоцтво ДК № 3322 від 26.11.2008.

61071 Харків, вул. Кібальчича, 27, к. 135.

Адреса редакції: 61145 Харків, вул. Космічна, 21а.

Тел. (057) 719-48-65, тел./факс (057) 719-58-67.

Для листів: 61045 Харків, а/с 3355. E-mail: office@ranok.kharkov.ua

З питань реалізації звертатися за тел.: у Харкові — (057) 712-91-44, 712-90-87;

Києві — (044) 599-14-53, 417-20-80; Донецьку — (062) 345-98-24;

Житомирі — (0412) 41-27-95, 41-83-29; Дніпропетровську — (056) 785-01-74;

Львові — (032) 244-14-36, (067) 340-36-60; Сімферополі — (0652) 22-87-01, 22-95-30;

Тернополі — (0352) 49-58-36, (067) 395-33-05; Миколаєві — (0512) 35-40-39,

Рівному — (0362) 3-78-64, (067) 689-19-05; Сумах — (0542) 21-07-35;

Черкасах — (0472) 64-41-07, 36-72-14.

E-mail: commerce@ranok.kharkov.ua

«Книга поштою»: 61045 Харків, а/с 3355. Тел. (057) 717-74-55, (067) 546-53-73.

E-mail: pochta@ranok.kharkov.ua

www.ranok.com.ua

ДОСТУПНО ПРО СКЛАДНЕ

Фізика

- Англійська мова
- Біологія
- Географія
- Інформатика
- Історія України
- Математика
- Німецька мова
- Правознавство
- Українська мова
- Фізика
- Хімія

Посібник полегшить підготовку до уроків, поточного контролю та контрольних робіт, заліків, іспитів, ЗНО!

ПОСІБНИК ДОПОМОЖЕ:

- засвоїти основні поняття й закономірності фізики
- відпрацювати алгоритми розв'язування основних типів задач
- повторити й систематизувати вивчене
- поглибити отримані знання
- підготуватися до олімпіад і різних конкурсів

www.ranok.com.ua

На сайті видавництва «Ранок» можна:

- придбати літературу за цінами видавництва
- ознайомитися з повним асортиментом видань
- пройти пробне тестування
- узяти участь в акціях, розіграшах та отримати подарунки

ВИДАВНИЦТВО
РАНОК

ISBN 978-611-54-0200-7



9 786115 402007

«Книга — поштою»

61045 Харків, а/с 3355, «Ранок-пошта»

☎ (057) 717-74-55

✉ pochta@ranok.kharkov.ua

Каталог надсилається безкоштовно