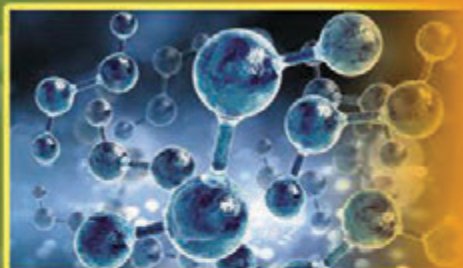


# ФІЗИКА

РІВЕНЬ  
СТАНДАРТУ

10



В. Д. СИРОТЮК

# ФІЗИКА

(РІВЕНЬ СТАНДАРТУ,  
за навчальною  
програмою авторського колективу  
під керівництвом Ляшенка О.І.)

Підручник для 10 класу закладів  
загальної середньої освіти

*Рекомендовано  
Міністерством освіти і науки України*



Київ  
«ГЕНЕЗА»  
2018

УДК 53(075.3)  
С40

*Рекомендовано Міністерством освіти і науки України*  
(Наказ Міністерства освіти і науки України від 31.05.2018 № 551)

**Видано за рахунок державних коштів. Продаж заборонено**

**Сиротюк В.Д.**

**С40** Фізика (рівень стандарту, за навч. програмою авт. колективу під керівництвом Ляшенка О.І.) : підруч. для 10-го кл. закл. заг. серед. освіти / В.Д. Сиротюк. — Київ : Генеза, 2018. — 256 с. : іл.

ISBN 978-966-11-0109-7.

Пояснення навчального матеріалу супроводжується прикладами спостережень, дослідів та практичних завдань. У підручнику є роботи фізичного практикуму, деякі з них запропоновано для виконання у двох варіантах. У рубриці «Фізичні задачі навколо нас» підібрано задачі з проблемними ситуаціями з повсякденного життя. Рубрика «Чи знаєте ви, що...» сприятиме підвищенню інтересу учнів до предмета. Словник фізичних термінів допоможе зорієнтуватися у формулюванні фізичних явищ та величин.

**УДК 53(075.3)**

ISBN 978-966-11-0109-7

© Сиротюк В.Д., 2018  
© Видавництво «Генеза»,  
оригінал-макет, 2018

## ДОРОГІ ДЕСЯТИКЛАСНИЦІ ТА ДЕСЯТИКЛАСНИКИ!

Ви щойно розгорнули підручник, з яким працюватимете протягом навчального року. Сподіваємося, що він буде добрим помічником у вашій подорожі в Країну знань про все багатство явищ навколишнього світу.

Із самого початку налаштуйтеся на те, що вивчення фізики – це нелегка праця. Адже шлях у науку завжди важкий. Радість пізнання дається тільки як нагорода за перемогу над труднощами, її можна порівняти з радістю альпініста, який підкорив вершину.

Намагайтеся бути максимально самостійними в засвоєнні матеріалу. Частіше обмінюйтеся думками щодо прочитаного зі своїми друзями. Для з'ясування важких і спірних питань звертайтеся, у першу чергу, до вчителя чи вчительки, а також використовуйте довідники, енциклопедії, Інтернет. Для перевірки правильності розуміння вивченого матеріалу корисно обговорювати повідомлення, доповіді учнів та учениць, розв'язки задач.

У 10-му класі ви вивчатимете основи кінематики і динаміки, молекулярно-кінетичну теорію й термодинаміку, ознайомитеся з основними законами й теоріями механіки, молекулярної фізики й термодинаміки. Теоретичний матеріал цього підручника допоможе вам зрозуміти й пояснити відповідні процеси та явища, закони і теорії. Звертайте увагу на текст, виділений **жирним шрифтом**. Це фізичні терміни, означення, важливі правила і закони, які треба запам'ятати і вміти застосовувати.

У підручнику є досліді, які ви можете виконати самостійно або з допомогою вчителя або вчительки. Виконавши їх, ви глибше зрозумієте фізичний зміст явищ, що вивчаються. Рубрика  «**Чи знаєте ви, що...**» містить цікаві факти, вона не лише розширить ваш кругозір, а й допоможе переконатися, що в природі все відбувається за законами фізики.

Наприкінці кожного параграфа є  «**Запитання до вивченого**», відповіді на які допоможуть вам перевірити, як ви засвоїли матеріал, а також закріпити свої знання. Деякі з них мають творчий характер і для відповіді потребують умінь аналізувати умови завдання, а також простежувати логічну послідовність і зв'язки в перебігу фізичних явищ. Також є завдання для роботи в групах, завдання для дослідження та виконання навчальних проектів.

У рубриці  «**Розв'язуємо разом**» наведено алгоритми та зразки розв'язування найважливіших видів задач. У підручнику є задачі, вправи і запитання різних рівнів складності: **А** – на закріплення, **Б** – творчого характеру, а також задачі підвищеного рівня складності, над якими треба поміркувати.

Розв'язування фізичних задач – це одне з важливих умінь, що формується у процесі навчання фізики, тому наприкінці підручника подано **Практикум з розв'язування задач**. Там наведено загальні алгоритми розв'язування задач із кінематики, динаміки, задач на закони збереження



імпульсу та енергії, з молекулярної фізики і термодинаміки. Ці поради допоможуть вам скласти план розв'язання задачі.

Зверніть особливу увагу на завдання з рубрики **«Перевір свою компетентність»**. Виконуючи їх, ви будете вчитися бачити й розуміти навколишній світ; зможете пояснити перебіг явищ у природі; принцип дії та будову сучасної техніки, приладів. Усі ці навички допоможуть вам у майбутньому розв'язувати в повсякденному житті реальні проблеми, також використовувати отримані знання для зменшення негативного впливу сучасної техніки на довкілля, забезпечення здорового способу життя.

**Роботи фізичного практикуму** сприятимуть поглибленому розумінню закономірностей фізичних явищ та навчатъ виконувати досліді й безпечно користуватися вимірювальними приладами. Деякі роботи фізичного лабораторного практикуму запропоновано для виконання у двох варіантах.

Якщо виникне потреба дізнатися про якийсь фізичний термін або правило, скористайтесь **«Словником фізичних термінів»** та *предметно-іменним покажчиком*, що містяться в кінці підручника.

У рубриці **«Фізичні задачі навколо нас»** підібрано задачі з проблемними ситуаціями з повсякденного життя. Розв'язуючи такі задачі, ви зможете застосувати фізичні знання в життєвих ситуаціях.

Виконуючи спостереження і досліді з фізики, будьте уважними, дотримуйтеся правил безпеки життєдіяльності.

*Щасливої вам дороги до знань!*



# ВСТУП

## § 1. СВІТОГЛЯДНИЙ ПОТЕНЦІАЛ ПРИРОДНИЧИХ НАУК

Сьогодні людина користується різноманітними приладами (смартфонами, комп'ютерами, рідкокристалічними телевізорами тощо), знає, що таке нанотехнології. Це є свідченням світоглядного розвитку суспільства, який забезпечується природничими науками. Тому ми розглянемо в історичному аспекті, як змінювався світогляд людини.

5

Народи Вавилону, Єгипту, Ассирії, Індії, Китаю упродовж років нагромадили значні природничо-наукові і технічні знання. Свідченням цього є величні споруди Вавилону, унікальні єгипетські піраміди, іригаційні системи, різного роду військові колісниці, металеві машини і пристрої.

Новий етап у розвитку науки почався із середини I тис. до н. е. зі Стародавньої Греції. **Фалес із Мілета** (бл. 625–547 до н. е.) описав властивості натертого об вогню бурштину притягувати легкі тіла і властивості магніту притягувати залізо. **Анаксимандр** (610–546 до н. е.) стверджував, що матеріальний світ єдиний.

**Геракліт з Ефеса** (535–475 до н. е.) стверджував, що все існує і водночас не існує, бо все тече, усе постійно змінюється, усе перебуває в постійному процесі виникнення і зникнення. Світ не створений ніким з богів і ніким з людей, а був, є і буде вічно живим вогнем, який закономірно займається і закономірно згасає.

**Ксенофан** (580–488 до н. е.), **Парменід** (V ст. до н. е.), **Зенон** (V ст. до н. е.) поділяли думку про єдність світу, але разом із цим стверджували про незмінність і нерухомість усього існуючого. Зокрема, відомо, що Зенон рух заперечував.

Засновник школи атомістів **Демокріт** (460–370 до н. е.) є основоположником атомістичного вчення. Він перший пояснив, що всі тіла складаються з найдрібніших матеріальних частинок – атомів, що немає нічого, крім атомів і пустоти. Демокріт обстоював вічність і незнищенність матерії.

Погляди античних атомістів поділяв і **Епікур** (341–270 до н. е.), який стверджував, що всі тіла є поєднанням неподільних, щільних частинок, які різняться формою, вагою, величиною. Він також визнавав існування

атомів і пустоти, стверджував, що матерія вічна. Епікур узагальнив усі наукові досягнення свого часу, виклавши їх у своїх творах «Фізика», «Метафізика», «Метеорологія» тощо.

Аналогічно вважав і **Арістотель** (384–322 до н. е.). Він говорив, що об'єктивно існують конкретні речі, побудовані з матерії. **Архімед** (бл. 287–212 до н. е.) значного розвитку надав статиці.

До розвитку давньої науки активно долучалися й жінки. Зокрема, **Гіпатія Александрійська** (бл. 350–370–415) відома як винахідниця-астроном (мал. 1). Вона створила *пласку астролябію* – прилад для визначення широт і довгот в астрономії, який використовували для визначення поло-



Мал. 1. Гіпатія Александрійська

ження Сонця, зірок та планет; а також *планісферу* – зображення небесної сфери на площині, на якій можна обчислювати захід і схід небесних світил. Гіпатія обчислювала астрономічні таблиці, написала коментарі до наукових творів Аполлонія та Діофанта. Вона ж винайшла й *ареометр* – прилад для визначення густини рідини.

Таким чином, античний період характерний не тільки первісним нагромадженням природничо-наукових знань, а й тим, що в ньому зародилися майже всі основні

6

форми і системи фізичних розвитку науки.

Епоху феодалізму можна поділити на дві фази. Характерною рисою першої (від VI до кінця XI ст.) є те, що освіта стає монополією церкви. У той час існували лише монастирські школи.

У другій фазі (від XII до кінця XIV ст.) нагромаджується природничо-науковий матеріал. Провісник експериментальної науки **Роджер Бекон** (1214–1294) (мал. 2) стверджував, що



Мал. 2. Роджер Бекон – провісник експериментальної науки

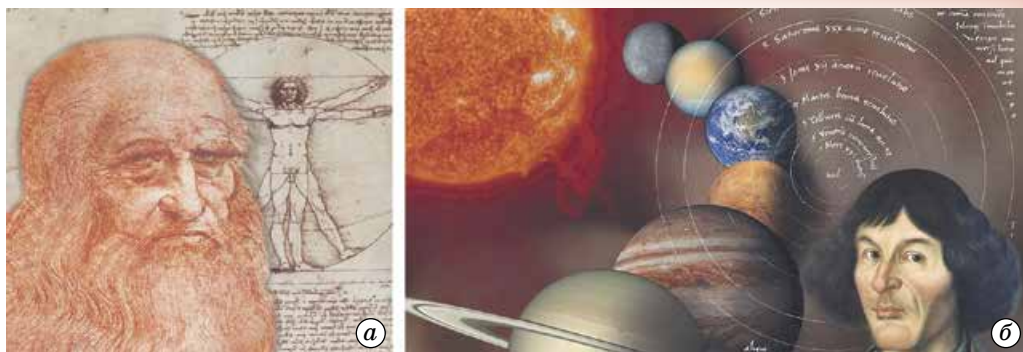
істинне знання здобувається дослідно. Він багато експериментував, зокрема розкрив склад пороху, досліджував властивості пари, винайшов способи здобувати в чистому вигляді фосфор, магній, вісмут тощо.

Одним з перших провісників нового світогляду був німецький теолог **Микола Кузанський** (1401–1464). Він висловив ідею про матеріальну єдність світу, підкреслюючи, що між земним і небесним світами немає ніякої відмінності, що Земля таке саме тіло, як і Місяць, Сонце та інші планети. Кузанський провів досліди з вимірювання часу падіння різних тіл: дерева, каміння, свинцевої кулі тощо. Пізніше ці

досліди повторив й узагальнив Галілео Галілей, у результаті чого сформулював закони падіння тіл.

Італійський мислитель **Леонардо да Вінчі** (1452–1519) (мал. 3, а) закликав до дослідного вивчення природи, стверджуючи, що дослід був учителем тих, які добре писали, і що мудрість – дочка досліду, бо тільки ґрунтуючись на досліді можна отримати позитивні результати в дослідженні природи.





Мал. 3. а) Леонардо да Вінчі; б) Міколай Коперник

Польський учений-астроном **Міколай Коперник** (1473–1543) (мал. 3, б) у своїх працях запропонував нову – геліоцентричну – систему світу.

Італійський мислитель і вчений **Джордано Бруно** (1548–1600) стверджував про матеріальність природи й обґрунтовував думку, що у природі все змінюється.

Один з основоположників нового природознавства **Галілео Галілей** (1564–1642) (мал. 4), досліджуючи падіння різноманітних тіл, відкинув хибне твердження Арістотеля про залежність швидкості падіння тіл від їхньої ваги, доповнив і далі розвинув його вчення про рух і розробив основи динаміки.

Галілей заклав підвалини нового уявлення про природу та її закономірності, про матерію і рух; розробив і взяв за основу науки експериментальний



Мал. 4. Галілео Галілей

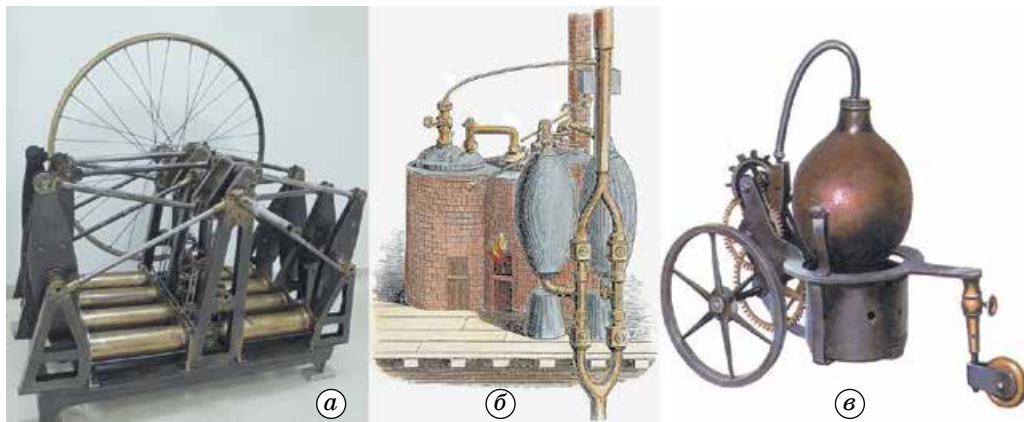
метод. Це стало початком нового періоду в розвитку природознавства – періоду, у якому фізика сформувалась як самостійна наука.

Видатний англійський філософ **Френсіс Бекон** (1561–1626) піддав глибокій критиці стару схоластичну науку (тип релігійної філософії, для якого характерне принципове панування теології над усіма іншими формами пізнання, знання). Зробив аналіз причин її відірваності від практики, від життєвих потреб. Він виклав основний метод пізнання природи – метод індукції і значну увагу приділив експерименту як абсолютно необхідній умові для справжнього наукового дослідження природи. Теоретичні і методологічні принципи розвитку науки, які розробив Бекон, його настанови про дослідне пізнання природи позитивно вплинули на розвиток фізики і на звільнення її від ідеалізму, сприяли розвитку саме експериментальних фізичних досліджень.

Індуктивний метод, який розробив Бекон, потребував доповнення. Треба було навчитися узагальнювати закони, що виводилися з експериментів, і отримувати з них за допомогою правильних міркувань окремі висновки, які можна було б перевірити на досліді. Це було можливо за допомогою математики, а сам метод одержання висновків отримав назву «дедукція» (дедуктивний метод – спосіб дослідження, за допомогою якого окремі положення логічно виводяться із загальних положень (аксіом, постулатів, законів)). Основоположником цього методу був видатний французький філософ **Рене Декарт** (1596–1650).

8

На початок другої половини XVIII ст. вчені розробили питання термометрії і калориметрії, створили теоретичні основи теплоти. Проте теоретичні знання про теплоту ще не давали можливості вивчити теплоту до кінця. Треба було знайти практичне застосування для цих теоретичних даних, тобто потрібно було побудувати таку теплову машину, яка перетворювала б теплоту в корисну механічну енергію. Так, у 1690 р. французький фізик **Дені Папен** (1647–1714), у 1698 р. англійський інженер **Томас Севері** (1650–1712) і у 1705 р. англійський винахідник **Томас Ньюкомен** (1663–1729) створили вогнедійні парові машини. Ці пристрої не могли задовольнити потреби суспільства через свою технічну недосконалість (мал. 5). У цих машинах парові двигуни були в комбінації з водяними колесами, які відігравали роль передавального механізму; машини були надто громіздкі, неекономічні й використовувалися лише для відкачування води із шахт.



Мал. 5. Парові машини: а) Папена; б) Севері; в) Ньюкомена



Теплотехнік **Іван Ползунов** (1728–1766) в 1763 р. розробив проект нової універсальної парової машини потужністю 1,8 кінських сил. Це був перший у світі проект теплового поршневого двигуна, безперервність роботи якого забезпечувалася двома циліндрами. У 1784 р. універсальну парову машину сконструював англійський винахідник **Джеймс Ватт** (1736–1819), який уперше запровадив у ній відцентровий регулятор з дросельною заслінкою для підтримування сталої кількості обертів вала. Універсальна машина Ватта завдяки значній економічності набула великого поширення.

Виникнення термодинаміки було тісно пов'язане з практичними вимогами знайти раціональні основи для будівництва теплових двигунів. Цим і був зумовлений розвиток двох напрямів у термодинаміці, а саме: а) вивчення робочих циклів теплових машин, що привело до встановлення першого і другого начал термодинаміки; б) вивчення властивостей газів і парів, що привело до встановлення рівнянь стану, які визначають основні властивості конкретних реальних речовин. Ці два напрями в термодинаміці розвивалися у взаємозв'язку, бо застосування першого і другого начал для розв'язання конкретних задач можливе тільки за наявності рівнянь стану.



### ЗАПИТАННЯ ДО ВИВЧЕНОГО

1. Укажіть, як впливає наука на світогляд людини.
2. Наведіть приклади, як змінювався світогляд людини у процесі зміни знань у фізиці й астрономії.

## § 2. РОЛЬ ФІЗИЧНОГО ТА АСТРОНОМІЧНОГО ЗНАННЯ В ЖИТТІ ЛЮДИНИ ТА СУСПІЛЬНОМУ РОЗВИТКУ

9

Фізика – це фундаментальна наука про природу, про властивості матерії та закони її руху. Вона вивчає та досліджує елементарні частинки, атомні ядра, атоми та молекули, тверді тіла, рідини й гази, плазму, фізичні поля – гравітаційні, електромагнітні. Фізика вивчає механічні, теплові, електричні, магнітні, світлові, акустичні та інші явища природи.

Джерелами фізичного пізнання навколишнього світу є спостереження, вимірювання, експерименти (досліди), обмірковування (наукові передбачення – гіпотези, фантазія, інтуїція тощо), математичні розрахунки.

Фізичні теорії та методи широко використовуються під час вивчення інших природничих наук (хімії, астрономії, біології).

Фізика є теоретичною основою сучасної техніки. На базі фізичних відкриттів виникли електротехніка, радіотехніка, електроніка, ядерна енергетика, напівпровідникова, лазерна і кріогенна техніка, нанофізика (створення матеріалів із заздалегідь заданими властивостями).

Основна мета фізичної науки – досягнення істини про природу.

Навчившись прогнозувати фізичні явища й керувати ними, людина стала «велетнем»: вона створила двигуни, у мільйони разів потужніші за людські руки, комп'ютери, які розширили можливості науки, техніки й мистецтва, об'єднала всіх жителів Землі надійними системами зв'язку. Відбулися глибокі, якісні зміни в багатьох галузях науки й техніки, пов'язані з важливими відкриттями в галузі фундаментальної фізики. Відкриття радіоактивності, електромагнітних хвиль, ультразвуку, реактивного руху тощо сприяло розвитку техніки. Людина навчилася передавати на відстань не лише звук, а й зображення. Вона вийшла в космос, висадилася на Місяці, побачила його зворотний бік. За допомогою

унікальних оптичних приладів стало можливим дізнатися, з яких речовин складаються далекі планети. Отримувані дані коли-небудь дадуть змогу людині зробити нові надзвичайні відкриття, що приведуть до подальших досягнень у науці й техніці. Наука стала безпосередньою продуктивною силою. Знання фізики потрібні кожній людині, щоб задовольнити природну цікавість у розумінні навколишнього світу. Фізичні знання і методи народжують нові науки, наприклад біофізику, геофізику, астрофізику.

Астрономія та її методи мають велике значення в житті сучасного суспільства. Без її участі стало неможливим вирішувати фундаментальні питання, пов'язані з перебігом найважливіших природних процесів.

Найширше розповсюджуються астрономічні методи навігації в мореплавстві й авіації, а останнім часом – і в космонавтиці.

Обчислення ефемерид (таблиць положень) найважливіших об'єктів і складання календарів, потрібних у господарстві будь-якої країни, також ґрунтуються на астрономічних даних. Складання географічних і топографічних карт, розрахування настання морських припливів і відпливів, визначення сили тяжіння в різних точках земної поверхні для виявлення покладів корисних копалин – усе це спирається на астрономічні методи. Дослідження процесів, що проходять на різних небесних тілах, дають змогу астрономам вивчати речовини в таких їхніх станах, які ще не досягнуто в земних лабораторіях.

10

Астрономія і частково астрофізика тісно пов'язані з фізикою, хімією, математикою. Вони сприяють розвитку цих наук, котрі є основою всієї сучасної техніки. Питання про роль внутріатомної енергії вперше поставили астрофізики, а велике досягнення сучасної техніки – створення небесних тіл (супутників, космічних станцій і апаратів) – узагалі було б немислиме без астрономічних знань. Одні лише спостереження небесних явищ не дають змогу виявити їх істинні причини. Тому відсутність наукових знань часто призводить до неправильних їх тлумачень і забобонів. Наприклад, у давнину Сонце, Місяць і планети вважались божествами, і їм поклонялись. Багато забобонів у людей було пов'язано із сонячними і місячними затемненнями, з появою комет, з явищем метеорів і болідів, падінням метеоритів тощо. Наприклад, у деяких народів комети вважались віщунками різних бід, яких зазнає людство на Землі (пожежі, епідемії, війни): явище метеору нерідко пов'язували зі смертю окремої людини тощо.

Астрономія, вивчаючи небесні явища, природу, будову і розвиток небесних тіл, доводить, що Всесвіт підкоряється єдиним законам природи і згідно з ними розвивається в часі та просторі. Тому висновки астрономії мають глибоке філософське значення. Нині проблеми астрономії в основному торкаються загальних поглядів на будову матерії і Всесвіту, на виникнення, розвиток і подальшу долю як окремих частин, так і всього Всесвіту в цілому.



### ЗАПИТАННЯ ДО ВИВЧЕНОГО

1. Як впливають знання з фізики та астрономії на суспільний розвиток?
2. Наведіть приклади, де людина застосовує знання з фізики й астрономії.



Знайдіть в додаткових джерелах, Інтернеті відомості про видатних фізиків – наших співвітчизників та співвітчизниць. Створіть мультимедійну презентацію та презентуйте її класу.

### § 3. ФУНДАМЕНТАЛЬНІ ФІЗИЧНІ ТЕОРІЇ – ОСНОВА СУЧАСНОЇ ФІЗИЧНОЇ НАУКИ

За об'єктами дослідження фізику поділяють на фізику елементарних частинок, фізику атомного ядра, атомну фізику, молекулярну фізику, фізику твердих тіл, рідин і газів, фізику плазми і фізику космічних тіл. З іншого боку, поділ фізики можна робити за процесами, що вивчаються, або формами руху матерії: механічний рух; тепловий рух; електромагнітні процеси; гравітаційні явища; процеси, спричинені сильними і слабкими взаємодіями. Більшість процесів розглядають на макро- і мікроскопічному рівнях.

Поділ фізики за процесами, що вивчаються, показує, що в сучасній фізиці мають справу з малим числом фундаментальних законів або фундаментальних фізичних теорій, що охоплюють величезну кількість явищ. У цих теоріях у найповнішій формі відображаються об'єктивні процеси природи.

У фізиці доцільно, у першу чергу, спиратися на аналіз фундаментальних фізичних теорій. Зокрема, аналізуючи співвідношення між динамічними і статистичними закономірностями у фізиці, слід передусім звернути увагу на фундаментальні теорії динамічного й статистичного характеру.

До фундаментальних теорій динамічного типу належать: класична механіка Ньютона, механіка суцільних середовищ, термодинаміка, макроскопічна електродинаміка Максвелла, теорія гравітації, класична релятивістська (неквантова) механіка.

До статистичних теорій належать: класична статистична механіка, квантова механіка, квантова статистика, квантова електродинаміка і релятивістські квантові теорії інших полів.

Усі вони вводять як основне поняття – поняття **стану фізичної системи**. Поняття стану у фізиці було вперше чітко виокреслене під час побудови класичної механіки. Закони фізики визначають поведінку об'єктів, що вивчаються у класичній механіці, лише за деяких цілком певних умов. Є елементи поведінки, які не визначаються законами природи, їх називають початковими умовами. Останні разом із законами природи визначають поведінку об'єкта в тій мірі, у якій це взагалі можливо. Відкриттям епохи Ньютона стало чітке відокремлення законів природи від початкових умов.

Загальними структурними елементами **механіки Ньютона** вважають: **сукупність фізичних величин** (спостережуваних), за допомогою яких описують об'єкти цієї теорії; **характеристику станів системи**; **рівняння руху**, що описують еволюцію стану.

У **термодинаміці** теплові процеси розглядають без урахування молекулярної будови тіл. Основними величинами, які задають стан системи, є **тиск, об'єм і температура** – термодинамічні параметри. Між ними існує зв'язок, що виражається рівнянням стану.

В **електродинаміці Максвелла** об'єктом дослідження є електромагнітне поле.

**Спеціальна теорія відносності (СТВ)**, що виникла у процесі розвитку електродинаміки, не належить до фундаментальних теорій. Вона не вводить нового поняття стану, що характеризує які-небудь специфічні об'єкти.

В усіх статистичних теоріях відсутній однозначний зв'язок між фізичними величинами, але не між станами.

У **класичній статистичній механіці** рівноважних систем і фізичній кінетиці (статистичній теорії нерівноважних процесів) стан системи задається функцією розподілу, залежною від координат та імпульсів усіх частинок системи і часу.

У статистичній теорії нерівноважних процесів еволюцію функції розподілу із часом описують за допомогою того або іншого кінетичного рівняння. Воно дає змогу однозначно визначити функцію розподілу в будь-який момент часу за заданим початковим значенням цієї функції.

Попри те що **квантова механіка** помітно відрізняється від класичних теорій, у ній все ж лишається структура, загальна для фундаментальних теорій. Уводиться й нове поняття – вектори стану.

Розроблені в класичній статистиці методи майже в повному об'ємі було використано під час створення **квантової статистики**. Істотна відмінність класичної і квантової статистик пов'язана з тим, що квантова механіка, на відміну від класичної, сама є статистичною теорією.

Найістотніша відмінність квантової статистики від класичної пов'язана з принципом тотожності частинок у квантовій механіці.

У **квантовій теорії поля** – релятивістській квантовій теорії руху і взаємодії елементарних частинок – методи квантової механіки поширюються на системи зі змінним числом частинок.



### ЗАПИТАННЯ ДО ВИВЧЕНОГО

1. Які фундаментальні теорії ви знаєте?
2. Що таке стан фізичної системи?
3. Що є загальними структурними елементами механіки Ньютона?
4. Укажіть, що визначає кожна фізична теорія.
5. Що спільного й відмінного в кожній фізичній теорії?

## § 4. АСТРОНОМІЯ ЯК ПРИРОДНИЧА НАУКА

**Астрономія** – наука про Всесвіт, що вивчає розміщення, рух, будову, походження і розвиток небесних тіл і створених ними систем.

В астрономії розв'язують три основні задачі, які потребують послідовного підходу:

1. Вивчення видимих, а потім і дійсних положень небесних тіл та їх руху в просторі, визначення їхніх розмірів і форми.

2. Вивчення будови небесних тіл, дослідження хімічного складу і фізичних властивостей (густини, температури тощо) речовин, з яких вони складаються.

3. Розв'язання проблеми походження і розвитку окремих тіл та їхніх систем.



Ян Матейко.  
«Астроном  
Коперник,  
або Розмова з  
Богом» (1872)



Перша задача розв'язується шляхом тривалих спостережень, розпочатих ще у глибокій давнині, а також на основі законів механіки, відомих уже давно і фактично виведених з астрономічних спостережень. Розв'язання питань другої задачі стало можливе з розвитком космічної техніки. Третя задача найскладніша, оскільки матеріалу для її розв'язання ще недостатньо і знання в цій галузі астрономії обмежуються лише загальними міркуваннями і низкою більш-менш правдоподібних гіпотез.

Астрономія – одна з найстаріших наук, яка виникла з практичних потреб людства. За розташуванням зір і сузір'їв первісні люди, які займалися землеробством, визначали настання пір року. Кочові племена орієнтувалися за Сонцем і зорями. Необхідність у літочисленні привела до створення календаря.

Великого розвитку досягла астрономія у Стародавній Греції. У творі **Птолемея** (127–151) «Альмагест» (II ст. н. е.) викладено так звану геоцентричну систему світу, яка була загальноприйнятою протягом майже півтори тисячі років. У Середньовіччі астрономія досягла значного розвитку у країнах Сходу. У XV ст. **Улугбек** (1394–1449) спорудив поблизу Самарканда обсерваторію, де використовували точні на той час інструменти. Також було складено перший після Гіппарха каталог зір. Із XVI ст. починається розвиток астрономії в Європі. Нові вимоги висувались у зв'язку з розвитком торгівлі та мореплавства і зародженням промисловості, сприяли звільненню науки від впливу релігії і привели до ряду великих відкриттів.



#### ЧИ ЗНАЄТЕ ВИ, ЩО...

Немалий внесок у розвиток науки, зокрема астрономії, зробили жінки.

- **Кароліна Гершель** (1750–1848). У 32 роки, запленившись пристрастю брата (відомого на той час у Німеччині астронома Вільяма Гершеля) до астрономії, вирішує стати його головним асистентом. Кароліна вивчила основи математики і потім самостійно обробляла братові спостереження. У 1786 р. першою серед жінок відкрила нову комету. Завершила в 1828 р. підготовку до друку каталогів відкритих туманностей і зоряних скупчень (понад 2500 об'єктів). Самостійно проводила астрономічні спостереження. Відкрила 8 комет і 14 туманностей. Виконала надзвичайно об'ємну роботу зі складання покажчика зі списком помилок для зоряного каталога Джона Флемстіда і склала новий додатковий каталог, у який включила ще 561 зорю.



*Кароліна Гершель*

Народження сучасної астрономії пов'язують з упровадженням геліоцентричної системи Міколая Коперника, з початком досліджень небесних тіл за допомогою телескопа Галілео Галілея і відкриттям закону всесвітнього тяжіння, яке зробив Ісаак Ньютон. Поява великих телескопів і здійснення систематичних спостережень привели до відкриття, що Сонце входить до складу величезної дископодібної системи, яка складається з багатьох мільярдів зірок – галактик. На початку XX ст. астрономи виявили, що ця система є однією з мільйонів подібних їй галактик. Відкриття інших галактик стало поштовхом для розвитку позагалактичної астрономії. Дослідження спектрив галактик дало змогу **Едвіну Хабблу** (1889–1953) в 1929 р. виявити явище «розбігання галактик», що згодом було пояснено як складова загального розширення Всесвіту.

У XX ст. астрономія поділилася на спостережувальну і теоретичну. Перша зосереджувалася на спостереженнях небесних тіл, які потім аналізували за допомогою основних законів фізики. Теоретична астрономія орієнтувалася на розробку моделей (аналітичних чи комп'ютерних) для опису астрономічних об'єктів і явищ.

Створення оптичних і радіотелескопів з високою роздільною здатністю, застосування ракет і штучних супутників Землі для позаатмосферних астрономічних спостережень привели до відкриття нових видів космічних тіл: радіогалактик, квазарів, пульсарів, джерел рентгенівського випромінювання. Було розроблено основи теорії еволюції зір і космогонії Сонячної системи. Найбільшим досягненням астрофізики стала релятивістська космологія – теорія еволюції Всесвіту в цілому.

До середини XX ст. спостереження були єдиним джерелом знань. Однак перший штучний супутник Землі (1957 р.) відкрив нову еру космічних досліджень, що дало змогу використовувати більш активні методи астрономічних досліджень і розвинути нові напрями в астрономії: інфрачервона астрономія, ультрафіолетова астрономія, радіоастрономія, рентгенівська астрономія, гамма-астрономія, нейтринна астрономія, планетарна астрономія, позагалактична астрономія.



### ЧИ ЗНАЄТЕ ВИ, ЩО...

14



*К.І. Чурюмов*

- Великий внесок у розвиток астрономії зробив видатний український астроном і дослідник комет, член-кореспондент НАН України **Клим Іванович Чурюмов** (1937–2016). Учений зробив безліч відкриттів, більшість з яких пов'язані з вивченням небесних тіл. Досліджував полярні сніга, земні струми та йоносферу. Працював на заводі «Арсенал» у Києві, де брав участь у розробці астронавігаційної апаратури для космічних ракет та її випробуванні. Спостерігав за кометами в Україні та в астрономічних експедиціях у високогірних районах Середньої Азії, Кавказу, Сибіру, на Чукотці й Камчатці.

- У 1969 р. разом з аспіранткою Світланою Герасименко під час спостереження за кометою Комас Сола, учені помітили ще одну комету, яка отримала назву «Комета Чурюмова–Герасименко».

- За ініціативи Кліма Чурюмова Міжнародний астрономічний союз назвав національними іменами-символами малі планети: «2427 Кобзар» – на честь Тараса Шевченка, «2428 Каменярь» – на честь Івана Франка, «2431 Сковорода» – на честь українського філософа XVIII ст. Григорія Сковороди, «4868 Кнушевія» – на честь Київського національного університету імені Тараса Шевченка.



### ЗАПИТАННЯ ДО ВИВЧЕНОГО

1. Що таке астрономія?
2. Якими напрямками розвивається астрономія?
3. Наведіть приклади використання астрономічних знань для вивчення Всесвіту.



### РОБОТА У ГРУПАХ

Об'єднайтеся в групи та виконайте проекти на одну з тем:

- Фізика та астрономія – провідні фундаментальні науки про природу.
- Внесок українських учених у розвиток сучасного природознавства.



# Розділ 1

## МЕХАНІКА

*Усе життя людини пов'язане з механікою: її хода, заняття фізичною культурою або іншою працею, яка супроводжує її на виробництві та в побуті. Це використання різноманітних механізмів і машин, без яких не можна обійтися в різних сферах людської діяльності тощо.*

*У цьому розділі ви дізнаєтеся, які фізичні закони і теорії описують механічні явища та процеси, що оточують людину і які вона використовує для своїх потреб.*

15

### § 5. МЕХАНІЧНИЙ РУХ ТІЛ. ОСНОВНА ЗАДАЧА МЕХАНІКИ

Як ви вже знаєте з попередніх класів, фізика вивчає найрізноманітніші природні явища і процеси. Щоб досконало розібратися в них, варто розпочати з розгляду найпростіших. Найпростішим є механічний рух. Усі тіла навколо нас у певний момент часу мають чітке розташування одне відносно одного. Якщо із часом положення тіл змінюється, то вважається, що тіла рухаються.

**Механічний рух** – це зміна із часом взаємного положення у просторі матеріальних тіл або взаємного положення частин цього тіла.

**Розділ фізики, у якому пояснюються механічний рух матеріальних тіл і взаємодії, які при цьому відбуваються між тілами, називають механікою.**

Слово «механіка», що в перекладі з грецької означає машина або пристрій, уперше ввів Арістотель.

У механіці ставлять і розв'язують таку **основну задачу**: за відомими силами, що діють на рухоме тіло, визначити положення тіла в будь-який момент часу. Задача має єдиний розв'язок тільки за конкретних початкових умов, тобто коли відоме початкове положення (координати) тіла і його початкова швидкість руху. Розв'язок основної задачі механіки математично подається у вигляді залежності координат тіла від часу, тобто у вигляді певних функцій часу.

Щоб розв'язати основну задачу механіки, насамперед треба з'ясувати, які існують різновиди руху та їхні характеристики. Наприклад, астрономи, користуючись законами механіки, можуть обчислювати положення небесних тіл одне відносно одного і з великою точністю передбачати такі небесні явища, як затемнення Сонця або Місяця. І не тільки передбачати! Якби історики не знали точної дати початку походу князя Ігоря проти половців, то її могли б визначити астрономи. У знаменитому «Слові о полку Ігоревім» розповідається про повне сонячне затемнення, що збіглося зі вступом князя Ігоря на половецьку землю. Цього достатньо, щоб установити, що на кордоні половецької землі війська Ігоря були 1 травня 1185 р. Помилитися тут неможливо, оскільки (це також установлено на основі законів механіки) в одному й тому самому місці повне сонячне затемнення буває приблизно раз на 200 років. У XII ст. в районі донських степів могло бути лише одне сонячне затемнення.

Тіла можуть здійснювати найрізноманітніші механічні рухи: рухатися вздовж різних траєкторій, швидше або повільніше тощо.

Отже, щоб розв'язати основну задачу механіки, треба коротко й точно зазначити, як рухається тіло, як змінюється його положення із часом. Інакше кажучи, потрібно знайти математичний опис руху, тобто встановити зв'язки між фізичними величинами, які характеризують механічний рух.



### ЗАПИТАННЯ ДО ВИВЧЕНОГО

1. Що таке механічний рух?
2. Яке завдання механіки як розділу фізики?
3. У чому полягає основна задача механіки та її розв'язання?

## § 6. РІВНОМІРНИЙ ПРЯМОЛІНІЙНИЙ РУХ. ШВИДКІСТЬ РУХУ ТІЛА

У 7-му класі ви вивчали, що прямолінійним рівномірним рухом називають такий рух, при якому тіло за будь-які однакові інтервали часу проходить однаковий шлях. Дамо інше означення названого руху і з'ясуємо певні відмінності.

**Прямолінійним рівномірним рухом називають рух, під час якого тіло за будь-які однакові інтервали часу здійснює однакові переміщення.**

Якщо за деякий інтервал часу  $\Delta t$  здійснюється переміщення  $\Delta \vec{s}$ , то за подвоєний інтервал часу  $2\Delta t$  переміщення буде подвоєним –  $2\Delta \vec{s}$ , за потроєний інтервал часу  $3\Delta t$  воно буде потроєним –  $3\Delta \vec{s}$  і т. д. Іншому значенню  $\Delta t$  відповідає інше  $\Delta \vec{s}$ , але відношення  $\frac{\Delta \vec{s}}{\Delta t}$  переміщення до часу буде таке саме. Отже, з означення рівномірного прямолінійного руху випливає, що відношення  $\frac{\Delta \vec{s}}{\Delta t}$  не залежить від значення інтервалу часу  $\Delta t$ .

У подібних випадках кажуть, що величина  $\frac{\Delta \vec{s}}{\Delta t}$  незмінна щодо зміни  $\Delta t$ . Незмінні в різних розуміннях величини розглядають у фізиці як об'єктивні характеристики фізичних процесів або властивостей.

Оскільки переміщення  $\Delta \vec{s}$  – величина векторна, а час  $\Delta t$  – величина скалярна, відношення  $\frac{\Delta \vec{s}}{\Delta t}$  є вектор. Для даного рівномірного прямоліній-



ного руху вектор  $\frac{\Delta \vec{s}}{\Delta t}$  характеризує переміщення тіла за одиницю часу.

Ця векторна величина є основною характеристикою прямолінійного рівномірного руху, і називають її **швидкістю руху тіла**.

**Отже, швидкість прямолінійного рівномірного руху – це векторна фізична величина, яка характеризує переміщення тіла за одиницю часу і визначається відношенням переміщення тіла до інтервалу часу, протягом якого це переміщення відбулося:  $\vec{v} = \frac{\Delta \vec{s}}{\Delta t}$ .**

Напрямок швидкості рівномірного прямолінійного руху збігається з напрямком переміщення тіла. Зазначимо, що у формулі для обчислення швидкості  $\Delta t$  можна брати будь-яким, а  $\Delta \vec{s}$  має відповідати взятому  $\Delta t$ . Тоді формула матиме такий вигляд:

$$\vec{v} = \frac{\vec{s}}{t},$$

де  $\vec{s}$  – переміщення тіла;  $t$  – час руху тіла.

У фізиці одиницею швидкості руху тіла (відповідно до формули) є швидкість такого рівномірного руху, під час якого тіло за одиницю часу здійснює переміщення, значення якого дорівнює одиниці довжини. У Міжнародній системі одиниць (СІ) незалежними є одиниця довжини метр (1 м) і одиниця часу секунда (1 с). Одиницею швидкості руху тіла в СІ є **метр за секунду (1 м/с)**.

Під час розв'язування задач векторні фізичні величини, що характеризують рух тіла, записують у проекціях на відповідну вісь, тобто:

$$v_x = \frac{s_x}{t}, \quad \text{звідки} \quad s_x = v_x t.$$

Проекція вектора на вісь – це відрізок осі між проекцією початку і кінця вектора на цю саму вісь. Вона може бути додатною, якщо напрямок вектора збігається з напрямком вибраної осі; від'ємною, якщо не збігається; дорівнювати нулю, якщо вектор перпендикулярний до осі.

Отже, знаючи проекцію швидкості руху тіла, за формулою можна знайти проекцію його переміщення за будь-який інтервал часу. Якщо тіло не змінювало напрямку руху, то модуль переміщення (у даному разі його проекція) дорівнює пройденому шляху:  $s_x = l$ .

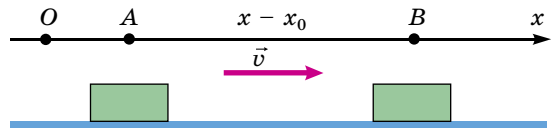
Припустимо, що тіло рухається вздовж певної прямої (мал. 6). Спрямуємо вздовж цієї прямої одну з координатних осей, наприклад вісь  $Ox$ .

Якщо за певний час  $t$  тіло перемістилося з точки  $A$ , координата якої дорівнює  $x_0$ , у точку  $B$  з координатою  $x$ , то можна сказати, що тіло здійснило додатне переміщення, довжина якого  $s_x = x - x_0$ . Проекція швидкості на вісь  $Ox$  у даному випадку також є додатним числом –  $v_x = v$  (швидкість завжди напрямлена в той самий бік, що й переміщення), тому можна записати:

$$x - x_0 = vt, \quad \text{або} \quad x = x_0 + vt.$$

Якщо переміщення напрямлене у протилежний бік, то проекції переміщення і швидкості виражатимуться від'ємними числами, і ми отримаємо:

$$x = x_0 - vt.$$



Мал. 6. Рівномірний прямолінійний рух тіла

З формул  $x = x_0 + vt$  і  $x = x_0 - vt$  бачимо, щоб знайти положення тіла в будь-який момент часу (у даному випадку воно визначається координатою  $x$ ), слід знати початкове положення тіла (координату  $x_0$ ) і швидкість його руху.

Можна зробити висновок: для розв'язання основної задачі механіки (визначення положення тіла в будь-який момент часу) потрібно знати обидві характеристики його швидкості – напрямок і числове значення.

Під час рівномірного прямолінійного руху тіла в один бік довжина його переміщення (числове значення або модуль) дорівнює пройденому шляху. Однак, на відміну від переміщення, довжина пройденного шляху – величина скалярна, яка не може зменшуватися. Саме цю величину вимірює лічильник шляху, який є в кожному автомобілі. Координата ж тіла може змінюватись як зазвичай.

Скалярною величиною є числове значення швидкості. Саме цю скалярну величину показують установлені в автомобілях чи на мотоциклах спідометри. Однак лічильнику, як і спідометру, «байдуже», куди рухається автомобіль.



### ЗАПИТАННЯ ДО ВИВЧЕНОГО

1. Який рух називають рівномірним прямолінійним?
2. Що таке швидкість руху тіла? Чому швидкість руху тіла – векторна величина?
3. Які одиниці швидкості ви знаєте? Які співвідношення між ними?
4. Що таке рівняння руху?

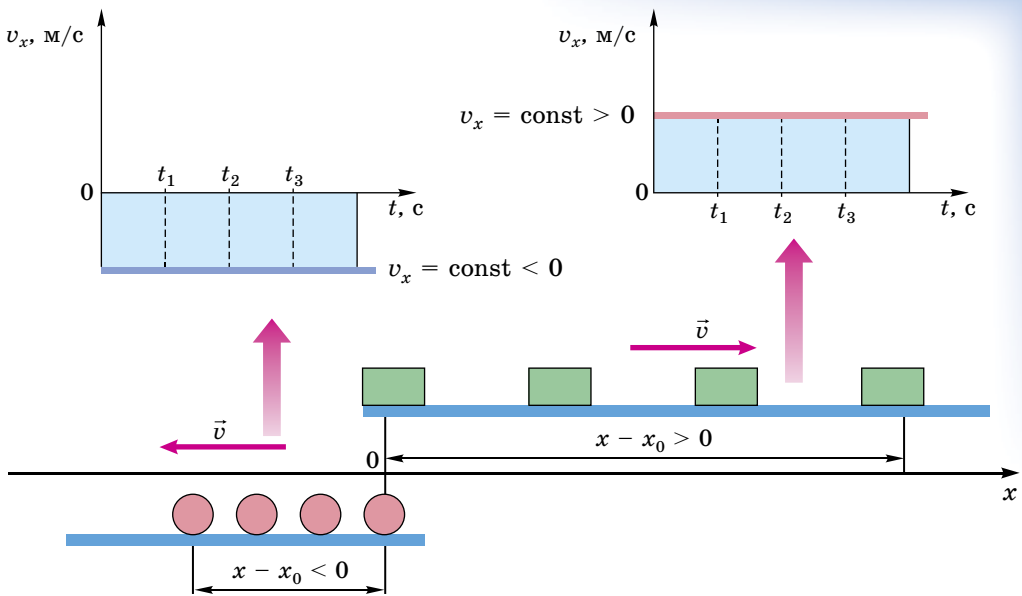
## § 7. ГРАФІЧНЕ ЗОБРАЖЕННЯ РІВНОМІРНОГО ПРЯМОЛІНІЙНОГО РУХУ

Фізика широко використовує графіки як у випадках, коли функціональна залежність величин відома, так і тоді, коли вона ще не відома. Графічний аналіз – один із важливих допоміжних наукових методів дослідження. Графіки будують не для векторів, а для скалярних величин або проекцій векторів.

Розглянемо **графік швидкості прямолінійного рівномірного руху тіла**  $v_x = v(t)$ . Під графіком швидкості руху тіла розуміють графік проекції швидкості на вісь  $Ox$ , тобто залежність  $v_x$  від  $t$  (мал. 7). Під час рівномірного прямолінійного руху проекція швидкості руху тіла стала, і тому швидкість у будь-який момент дорівнює початковій. Якщо по вертикальній осі відкласти проекцію швидкості  $v_x$ , а по горизонтальній осі час  $t$ , то графік складатиметься з точок, рівновіддалених від осі часу, тобто матиме вигляд прямої, яка паралельна осі часу.

Якщо координата тіла збільшується,  $x > x_0$  (тіло рухається в додатному напрямку осі  $Ox$ ), то проекція швидкості руху тіла, як видно з формули  $v_x = \frac{x - x_0}{t}$ , додатна, тобто  $v_x > 0$ . Графік швидкості в цьому випадку зображається лінією, яка лежить вище від осі  $t$  (мал. 7).

Якщо координата тіла зменшується,  $x < x_0$  (тіло рухається у від'ємному напрямку осі  $Ox$ ), то проекція швидкості руху тіла від'ємна:  $v_x < 0$ . Графік швидкості для цього випадку зображається лінією, яка лежить нижче від осі  $t$ .



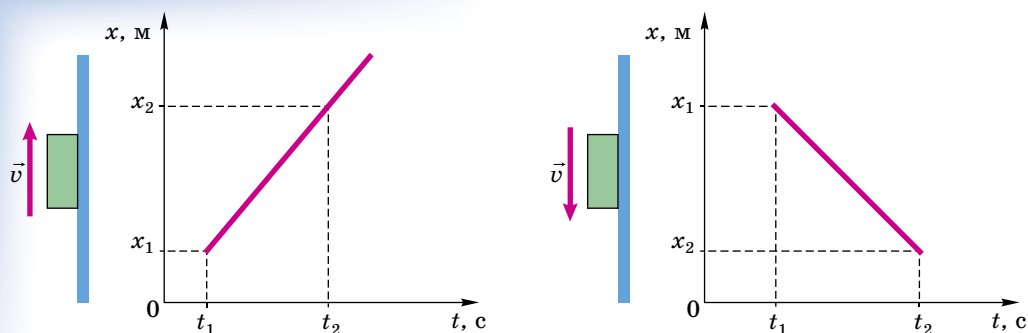
Мал. 7. Графіки проекцій швидкості рівномірного прямолінійного руху тіл

За графіком швидкості можна визначити не тільки швидкість руху тіла в будь-який момент часу, а й зміну координати. Справді, зміна координати дорівнює  $x - x_0 = v_x t$ , тобто вона дорівнює площі прямокутника, узятій з відповідним знаком.

Зауважимо, що зображення зміни координати  $x - x_0$  площею прямокутника зовсім не означає, що одиницею цієї фізичної величини є  $1 \text{ м}^2$ . Зміст методу інший: зміна координати тіла, виміряна в метрах, дорівнює добутку двох сторін прямокутника; довжина однієї сторони має стільки одиниць, скільки одиниць становить час руху, а другої – скільки одиниць становить швидкість руху тіла. Таке зображення фізичних величин площею можна застосовувати у випадках, коли певна фізична величина є добутком двох інших. Цей метод можна використати незалежно від того, які одиниці всіх трьох величин. Важливо тільки, щоб між трьома величинами існував зв'язок типу: добуток двох з них дорівнює третій величині.

**Графік координати  $x = x(t)$  (графік руху тіла).** Якщо по горизонтальній осі (осі абсцис) відкладати в певному масштабі час, що пройшов від початку його відліку, а по вертикальній осі (осі ординат) відкладати в певному масштабі координату тіла, то побудований графік виражатиме залежність координати тіла від часу. Такий графік називають графіком координати, або графіком руху.

Відповідно до залежності  $x = x_0 + v_x t$  графік рівномірного прямолінійного руху тіла зображають прямою лінією, яка може мати більший чи менший кут нахилу до осі часу.



Мал. 8. Графіки прямолінійного рівномірного руху тіл

Нахил прямої визначають, поділивши  $x_2 - x_1$  на  $t_2 - t_1$  для двох довільно взятих точок на прямій; це відношення дорівнює швидкості  $v_x$ :

$$\frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1} = v_x \text{ (мал. 8).}$$

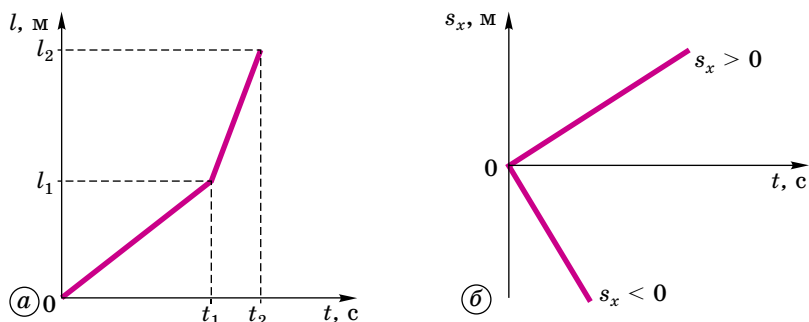
Якщо графіком є горизонтальна пряма, то точка нерухома, а якщо – вертикальна, то швидкість руху точки нескінченно велика (таких випадків не буває). Що ближче напрямок графіка до вертикального, то більша швидкість руху тіла  $v_x$ . При цьому  $v_x > 0$ , якщо графік відхилений вправо (за годинниковою стрілкою від вертикалі), і при  $v_x < 0$ , якщо графік відхилений уліво.

20

Висновки про співвідношення швидкостей можна робити на основі графіків тільки тоді, коли обидва графіки виконано в одному й тому самому масштабі (або коли на графіках відношення одиниць часу таке саме, як відношення одиниць відстані).

**Графік шляху  $l = l(t)$ .** Аналізуючи формулу  $l = vt$ , можна стверджувати, що між пройденим шляхом і часом існує прямо пропорційна залежність, яка графічно зображається прямою, що проходить через початок координат (пройдений шлях не може набувати від'ємних значень). Залежно від значення швидкості руху тіл нахил ліній буде різним: що більша швидкість, то крутіше спрямований графік (мал. 9, а).

**Графік проекції переміщення  $s_x = s(t)$ .** Оскільки проекція переміщення може набувати як додатних, так і від'ємних значень, то графік проекції переміщення (мал. 9, б) може бути спрямований угору (проекція переміщення додатна) або спадати вниз (проекція переміщення від'ємна). Графік проекції переміщення завжди проходить через початок координат. Кут нахилу графіка проекції переміщення, як і у випадку графіка шляху,



Мал. 9. Графік шляху і проекції переміщення тіла під час рівномірного прямолінійного руху



залежить від значення швидкості: що більша швидкість, то швидше змінюється проекція переміщення.

Отже, розглянуті графіки рівномірного прямолінійного руху відображають залежності відповідних параметрів руху (швидкості, координат, пройденого шляху і переміщення) від часу  $t$ . За їх допомогою можна відобразити характер руху тіла і зміни відповідних величин із часом.



### ЗАПИТАННЯ ДО ВИВЧЕНОГО

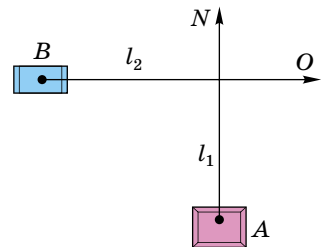
1. Який вигляд має графік швидкості тіла під час рівномірного прямолінійного руху?
2. Як будують графік координати (графік руху тіла) під час рівномірного прямолінійного руху?
3. Який вигляд має графік пройденого шляху? Від чого залежить кут нахилу прямої графіка?
4. Чим відрізняється графік шляху від графіка проекції переміщення?
5. У якому випадку графік рівномірного руху тіла виходить з початку координат?
6. Графік руху перетинає вісь часу, що це означає?

## § 8. ВІДНОСНІСТЬ МЕХАНІЧНОГО РУХУ. ЗАКОН ДОДАВАННЯ ШВИДКОСТЕЙ

Ви вже знаєте, що за тіло відліку можна взяти будь-яке тіло і з кожним із них пов'язати свою систему координат. Для цього через тіло відліку проводять уявні осі координат, створюючи цим окрему систему координат. Це дає можливість одночасно розглядати положення одного тіла в різних системах координат. Зрозуміло, що відносно різних тіл відліку в різних системах координат положення того самого тіла може бути іншим. Наприклад, положення автомобіля на шляху можна визначити, зазначивши, що він перебуває на відстані  $l_1$  на північ від населеного пункту  $A$  (мал. 10). Водночас можна сказати, що автомобіль перебуває на відстані  $l_2$  на схід від пункту  $B$ . Це означає, що **положення тіла відносно: воно різне відносно різних тіл відліку і пов'язаних із ними різних систем координат.**

Проте не тільки положення тіла відносно. **Відносний також його рух.** У чому ж полягає відносність руху?

Відносно інших тіл вибране тіло буде рухатися по-різному: пасажирка, яка їде в поїзді, відносно поверхні землі рухається, а відносно вагона поїзда перебуває у стані спокою. Літаки, які летять групою, один відносно одного перебувають у стані спокою, а відносно поверхні землі рухаються з великою швидкістю, наприклад 900 км/год, а відносно такої самої групи літаків, які рухаються у зворотному напрямку, вони рухаються зі швидкістю 1800 км/год.

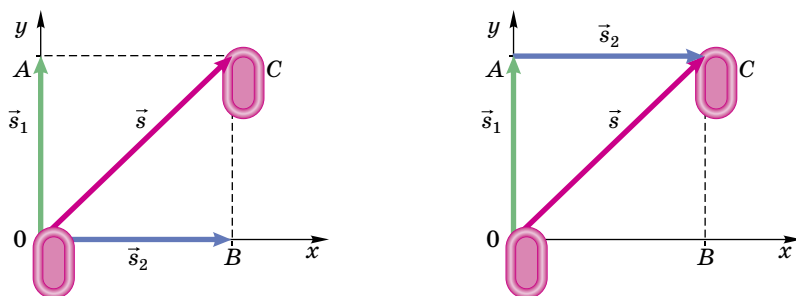


Мал. 10. Положення тіла відносно різних тіл відліку

**Будь-який рух, а також спокій тіла (у деяких окремих випадках) відносні.**

Відповідаючи на запитання, рухається тіло чи перебуває у стані спокою, потрібно вказати, відносно яких тіл розглядається рух даного тіла.

Розглянемо рух, наприклад, човна, що перетинає річку перпендикулярно до течії (мал. 11).



Мал. 11. Додавання переміщень

Якби вода в річці була нерухомою, то човен, рухаючись уздовж осі  $Oy$ , через деякий час опинився б у точці  $A$ . Переміщення вздовж осі  $Oy$  – вектор  $\vec{s}_1$ . Насправді ж вода в річці тече вздовж осі  $Ox$  і зносить човен течією за той самий час у точку  $B$ . Переміщення вздовж осі  $Ox$  – вектор  $\vec{s}_2$ . Яким же буде справжнє переміщення човна? Щоб відповісти на це запитання, слід додати два вектори:  $\vec{s}_1$  і  $\vec{s}_2$ . Додавання векторів, як ви вже знаєте з геометрії, виконується за правилом паралелограма або трикутника.

Згідно з правилом паралелограма сумарний вектор  $\vec{s}$  є діагоналю паралелограма, побудованого на векторах ( $\vec{s}_1$  і  $\vec{s}_2$ ) як на сторонах; при цьому початки всіх трьох векторів ( $\vec{s}_1$ ,  $\vec{s}_2$ ,  $\vec{s}$ ) містяться в одній точці:

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

Це рівняння називають **правилом додавання переміщень**.

Отже, рух човна в річці складається з двох незалежних один від одного рухів – руху човна і руху річки.

Розділивши кожний член попереднього виразу на час руху  $t$  (він був однаковий), одержимо:

$$\frac{\vec{s}}{t} = \frac{\vec{s}_1}{t} + \frac{\vec{s}_2}{t}, \text{ звідки } \vec{v} = \vec{v}_1 + \vec{v}_2.$$

Отже, швидкість човна в річці складається з векторної суми швидкості човна у стоячій воді і швидкості самої течії.

Якщо вважати поверхню землі за нерухому систему відліку, а річку за рухому, то цей висновок для випадку із човном можна подати в загальному вигляді як закон додавання швидкостей:

**швидкість тіла відносно нерухомої системи відліку дорівнює векторній сумі швидкості тіла відносно рухомої системи відліку і швидкості самої рухомої системи відліку відносно нерухомої.**

Таким чином, механічний рух може бути представлений незалежними рухами, тобто його складовими. Це дає нам змогу детальніше аналізувати механічний рух.



### ЗАПИТАННЯ ДО ВИВЧЕНОГО

1. Який рух називають відносним?
2. Як визначити, рухається тіло чи перебуває у стані спокою?
3. Хто перебуває в русі: пасажирка, яка їде в автобусі, чи студент, який стоїть на автобусній зупинці?
4. Що насправді рухається: Земля навколо Сонця чи Сонце навколо Землі?

5. Як додають переміщення тіла? Наведіть приклади.
6. Сформулюйте правило додавання швидкостей руху тіл.
7. Чи заважає течія людині перепливати річку? Чи заважає їй течія перепливати річку найкоротшим шляхом?
- 8\*. Як ви розумієте твердження: «Переміщення і швидкість – поняття відносні»?



## ЗАДАЧІ ТА ВПРАВИ

### Розв'язуємо разом

1. Велосипедистка рухається зі швидкістю 5 м/с. З якою швидкістю рухався хлопчик, який вийшов з того самого місця на 1 год раніше, якщо велосипедистка наздогнала його через 30 хв після початку свого руху?

Дано:

$$v_1 = 5 \text{ м/с}$$

$$t = 1 \text{ год} = 3600 \text{ с}$$

$$t_1 = 30 \text{ хв} = 1800 \text{ с}$$

$$v - ?$$

Розв'язання

Велосипедистка і хлопчик подолали однакову відстань, отже:

$$v_1 t_1 = v(t + t_1), \text{ звідки } v = \frac{v_1 t_1}{t + t_1}.$$

Підставимо значення відомих величин і отримаємо:

$$v = \frac{5 \text{ м/с} \cdot 1800 \text{ с}}{3600 \text{ с} + 1800 \text{ с}} \approx 1,7 \text{ м/с}.$$

**Відповідь:** хлопчик рухався зі швидкістю  $\approx 1,7$  м/с.

2. Залежність від часу координати точки, яка рухається вздовж осі  $Ox$ , має вигляд:  $x = 3 - 0,4t$ , м. Описати характер руху точки. Записати рівняння для проекції швидкості руху точки.

**Відповідь:** точка рухається рівномірно прямолінійно у протилежному напрямку до осі  $Ox$ ; початкова координата точки  $x_0 = 3$  м; точка рухається зі швидкістю  $v = 0,4$  м/с; рівняння проекції швидкості руху точки:  $v_x = -0,4t$ , м/с.

### Рівень А

1. Які тіла рухаються прямолінійно: а) випущений з рук камінь; б) Місяць по своїй орбіті; в) поїзд метро вздовж платформи станції?

2. У суботу до повернення в депо автобус зробив 10 рейсів, а в неділю – 12. У який із цих днів автобус проїхав більший шлях? Здійснив більше переміщення?

3. Якої форми має бути траєкторія точки, щоб пройдений нею шлях дорівнював модулю переміщення?

4. Які потрібно виконати вимірювання, щоб визначити швидкість руху тіла під час рівномірного прямолінійного руху?

5. Автомобіль рухався 0,5 год зі швидкістю 10 м/с. Який шлях він проїхав?

6. Автобус за перші 1,5 год руху проїхав шлях 60 км, а за наступні 0,5 год – 80 км. Яка середня швидкість руху автобуса на всьому шляху?

7. Кулька скочується з похилого жолоба за 3 с. Чи є рух кульки по жолобу рівномірним? Яка середня швидкість руху кульки по жолобу завдовжки 45 см?

8. Про яку швидкість руху тіла – середню чи миттєву – йде мова в таких випадках: а) швидкість руху сокири в момент удару об поліно дорів-

нює 10 м/с; б) поїзд подолав шлях між станціями зі швидкістю 60 км/год; в) швидкість пішохода дорівнює 3 км/год?

9. Матеріальна точка, рухаючись у певному напрямку, пододала шлях 3 м, потім після зупинки і повороту на  $90^\circ$ , рухаючись по прямій, пододала ще 4 м. Визначте весь шлях і модуль повного переміщення точки.

10. Поїзд завдовжки  $l_1 = 300$  м їде через міст, довжина якого  $l_2 = 200$  м зі швидкістю 72 км/год. За який час поїзд переїде через міст?

11. Першу половину часу автомобіль проїхав із середньою швидкістю  $v_1 = 40$  км/год, другу – із середньою швидкістю  $v_2 = 60$  км/год. Визначте середню швидкість руху автомобіля на всьому шляху.

12. З катера, що пливе за течією, кинули рятівний круг. Через 15 хв катер змінив напрямок руху на протилежний. Коли він порівняється з кругом? Як зміниться відповідь, якщо катер спочатку рухатиметься проти течії?

13. Корабель пливе на південь зі швидкістю 42,3 км/год. Спостерігач на палубі побачив у морі катер і визначив, що відносно корабля він пливе на північний схід зі швидкістю 30 км/год. Яка швидкість руху катера відносно поверхні землі і в якому напрямку він пливе?

14. Дві прямі дороги перетинаються під кутом  $60^\circ$ . Від перехрестя віддаляються два автомобілі зі швидкостями 40 км/год та 80 км/год. Визначте швидкість руху першого автомобіля відносно другого.

15. Які з наведених залежностей описують рівномірний рух? а)  $x = 4t + 2$ , м; б)  $x = 3t^2$ , м; в)  $x = 8t$ , м; г)  $v = 4 - t$ , м/с; д)  $v = 6$ , м/с.

24

16. Наведіть два-три приклади тіл, відносно яких земна куля перебуває у спокої та відносно яких вона рухається.

17. Пасажирка подорожує літаком з Києва до Парижа. Відносно яких тіл у літаку пасажирка перебуває у стані спокою? Відносно яких тіл рухається?

18. Під час сильного снігопаду (мал. 12) важко зрозуміти, рухається автомобіль чи ні. Чому?

19. Дитина сидить у салоні автомобіля, що рухається вздовж вулиці: відносно яких тіл дитина перебуває у стані спокою? Відносно яких тіл дитина рухається?

### Рівень Б

20. Першу половину шляху автомобіль проїхав із середньою швидкістю  $v_1 = 60$  км/год, другу – зі швидкістю  $v_2 = 40$  км/год. Визначте середню швидкість руху автомобіля на всьому шляху.

21. Катер проплив першу половину шляху із середньою швидкістю вдвічі більшою, ніж другу. Середня швидкість на всьому шляху дорівнювала 4 км/год. Визначте швидкості катера на першій і другій половинах шляху.

22. Катер, рухаючись за течією, подолав деяку відстань утричі швидше, ніж під час руху проти течії. Середня швидкість катера на всьому шляху  $v_c = 3$  км/год. Визначте швидкість течії і швидкість руху катера відносно води.



Мал. 12

**23.** Велосипедистка і пішохід рухаються назустріч одне одному. Початкова відстань між ними дорівнює 4 км. Велосипедистка рухається зі швидкістю 15 км/год, пішохід – 5 км/год. Через який час вони зустрінуться? Який шлях пройде пішохід до зустрічі? Розв'яжіть задачу в системі відліку, пов'язаній: а) із Землею; б) з пішоходом.

**24.** Розгляньте дану таблицю й складіть за її даними задачі. Розв'яжіть їх.

| № | Тіло         | Швидкість | Час    | Шлях      |
|---|--------------|-----------|--------|-----------|
| 1 | Велосипедист | 12 м/с    | 35 хв  | ?         |
| 2 | Автомобіль   | ?         | 4 год  | ?         |
| 3 | ?            | ?         | 120 хв | 15 000 км |

**25.** Теплохід, довжина якого  $l = 300$  м, рухається у стоячій воді зі швидкістю  $v_1$ . Катер пропливає від корми теплохода до його носа і назад за час  $t = 37,5$  с зі швидкістю  $v_2 = 90$  км/год. Визначте швидкість  $v_1$  теплохода.

**26.** Швидкість поздовжньої подачі різця токарного верстата 12 см/хв, поперечної – 5 см/хв. Яка швидкість у системі відліку, пов'язаній з корпусом верстата?

**27.** Вагон шириною  $b = 3,6$  м рухався зі швидкістю  $v_1 = 15$  м/с. Його стінки пробила куля, що летіла перпендикулярно до напрямку руху вагона. Відносне зміщення дірок у стінках вагона  $s = 9,0$  см. Визначте швидкість руху  $v_2$  кулі.

**28.** Паралімпієць перепливає річку завширшки  $h$ . Під яким кутом  $\alpha$  до напрямку течії треба пливти, щоб якнайшвидше перепливати річку? За який час  $t$  він перепливе річку і на яку відстань  $l$  його віднесе течія? Який шлях  $s$  пропливе, якщо швидкість течії  $u$ , а швидкість плавця відносно води  $v$ ?

**29.** Рівняння руху автомобіля:  $x_1 = -270 + 2t$ , м/с, пішохода:  $x_2 = -15t$ , м/с. Побудуйте графіки їхнього руху, визначте положення автомобіля та пішохода при  $t = 0$ . Коли вони зустрінуться? Який шлях пройде пішохід до зустрічі?

**30.** Швидкість руху тіла в будь-який момент часу задано рівнянням  $v = 5 + 2t$ , м/с. Визначте початкову швидкість і прискорення тіла. Побудуйте графік швидкості руху тіла і визначте його швидкість у кінці п'ятої секунди.

**31.** З кінця в кінець (вправо і вліво) сходинки ескалатора, що рухається, бігає жук. Накресліть траєкторію руху жука відносно поверхні землі. Який шлях подолає жук, коли буде бігти з кінця в кінець сходинки, визначте переміщення жука: якщо ескалатор нерухомий? якщо ескалатор за цей час перемістився вгору на 2 м (довжина сходинки 1 м)?

**32.** Відстань між двома станціями 150 км. Зі станцій назустріч один одному відправилися два поїзди зі швидкостями 30 км/год та 70 км/год. Через який час після відправлення вони зустрінуться?

**33.** Пасажирка іде в поїзді, швидкість якого 60 км/год. Назустріч поїзду рухається товарний поїзд завдовжки 1 км зі швидкістю 40 км/год. Скільки часу товарний поїзд рухатиметься повз пасажирку?

#### Є над чим замислитися

**34.** З двох міст по шосе назустріч один одному виїхали два автобуси: один – о 9 год, а другий – о 9 год 30 хв. Перший рухався зі швидкістю



40 км/год, а другий – зі швидкістю 60 км/год. Довжина маршруту – 120 км. О котрій годині і на якій відстані від міст зустрінуться автобуси?

**35.** Мотоцикл рухається зі швидкістю 20 м/с за вантажним автомобілем, швидкість якого 16,5 м/с. У момент початку обгону мотоцикліст побачив зустрічний автобус, що рухався зі швидкістю 25 м/с. За якої мінімальної відстані до автобуса можна починати обгін, якщо до початку обгону мотоцикліст відставав від вантажного автомобіля на 15 м, а після обгону повинен випереджати його на 20 м?

**36.** Моторний човен, що рухається вгору по річці, порівнявся з плотами, які сплавлялися по річці. Через годину після цього двигун човна заглож. Ремонт двигуна тривав 30 хв. Протягом цього часу човен вільно плыв за течією. Після ремонту човен поплив за течією з попередньою відносно води швидкістю і наздогнав плоти на відстані 7,5 км від місця їх першої зустрічі. Визначте швидкість течії річки, вважаючи її сталою.

**37.** Відомі значення швидкостей  $v_1$  і  $v_2$  ( $v_1 > v_2$ ) і довжини  $l_1, l_2$  ( $l_1 > l_2$ ) двох зустрічних поїздів. Не виконуючи обчислень скажіть, пасажирка якого поїзда довше бачитиме зустрічний поїзд? Чому?

**38.** Річка тече на схід зі швидкістю 2 м/с. Човен перепливає її, дотримуючися курсу на північний захід, але рухається точно на північ. Визначте значення швидкості руху човна відносно течії.

**39.** Два автомобілі наближаються до перехрестя двома взаємно перпендикулярними вулицями зі швидкостями, що відрізняються у 2 рази. Яка швидкість одного автомобіля відносно іншого, якщо менша швидкість дорівнює 30 км/год?

**40.** Ескалатор метро опускає людину, яка йде вниз по ньому, за 1 хв. Якщо людина буде йти вдвічі швидше, то вона опуститься за 45 с. Скільки часу буде опускатися людина, яка стоїть на ескалаторі?

**41.** На малюнках 13 і 14 зображено графіки залежності шляху від часу для прямолінійного рівномірного руху до зупинки в одному напрямі, після зупинки – у зворотному.

1. Накресліть за даними графіками шляху графік залежності координати від часу, вважаючи рух прямолінійним до зупинки в одному напрямку, а після зупинки – у зворотному.

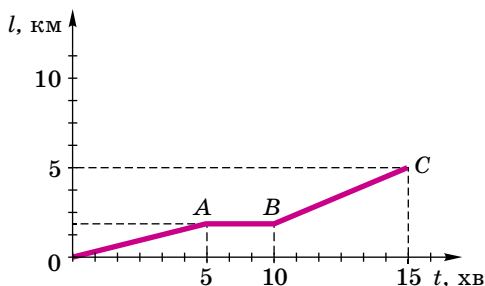
2. Чи довго тіло: а) рухалося вперед; б) стояло; в) рухалося назад?

3. Який загальний шлях пройшло тіло за час спостереження?

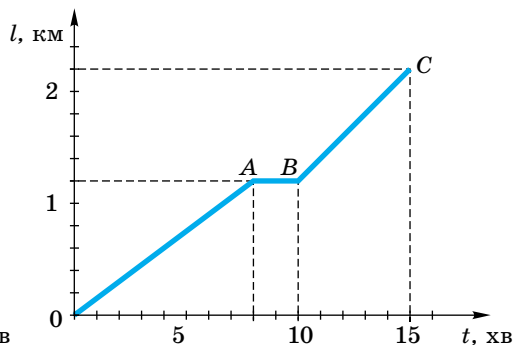
4. Обчисліть середню швидкість тіла упродовж усього часу руху (OABC).

5. Обчисліть швидкість руху тіла: а) до зупинки; б) після зупинки.

6. Який модуль і напрямок результуючого переміщення?



Мал. 13



Мал. 14

## § 9. РІВНОПРИСКОРЕНИЙ РУХ ТІЛА. ПРИСКОРЕННЯ

Прямолінійний рівномірний рух, тобто рух зі сталою швидкістю, – рідкісне явище в навколишньому середовищі. Значно частіше доводиться мати справу з такими рухами, у яких швидкість не є сталою, а із часом змінюється. Такі рухи називають **нерівномірними**.

**Якщо серед інтервалів часу є такі однакові інтервали, за які тіло здійснює неоднакові переміщення, рух називають нерівномірним.**

Нерівномірно рухаються автомобілі, літаки і т. д. Нерівномірно рухаються тіла, що падають, кинуті вгору та під кутом до горизонту. Тому визначати переміщення тіла під час нерівномірного руху за формулою  $\vec{s} = \vec{v}t$  не можна, тому що швидкість руху тіла в різних місцях траєкторії і в різні моменти часу неоднакова, тобто  $\vec{v} \neq \text{const}$ . Перед нами постає запитання: *якою є швидкість руху тіла під час нерівномірного руху?*

Як ви знаєте із 7-го класу, у деяких випадках, коли розглядають нерівномірний рух, користуються **середньою швидкістю руху тіла**.

Під час опису рухів поняттям середньої швидкості руху тіла користуються у двох її значеннях: по-перше, як середньої швидкості переміщення – векторної величини, що визначається відношенням переміщення до інтервалу часу, протягом якого відбувалося це переміщення:

$$\vec{v}_c = \frac{\vec{s}}{t} = \frac{\vec{s}_1 + \vec{s}_2 + \dots + \vec{s}_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n},$$

де  $\vec{s}_1, \vec{s}_2, \dots, \vec{s}_n$  – переміщення тіла за відповідні інтервали часу  $t_1, t_2, \dots, t_n$ . І немає значення, відбувався рух у цей час чи ні; по-друге, як середньої швидкості проходження шляху – скалярної величини, що визначається відношенням пройденого шляху до інтервалу часу руху тіла:

$$v_c = \frac{l_1 + l_2 + \dots + l_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n},$$

де  $l_1, l_2, \dots, l_n$  – ділянки шляху, які пройшло тіло за відповідні інтервали часу  $t_1, t_2, \dots, t_n$ .

**Середня швидкість нерівномірного руху** – векторна фізична величина, яка характеризує переміщення, що його тіло в середньому здійснює за одиницю часу, і визначається відношенням переміщення тіла до інтервалу часу, протягом якого це переміщення відбулося.

Іноді помилково вважають, що середню швидкість руху можна визначити як середнє арифметичне її значень. На підставі математичних міркувань, проаналізувавши розглянуті вище формули, можна стверджувати, що подібні дії можливі лише тоді, коли інтервали часу однакові, тобто  $t_1 = t_2 = \dots = t_n$ .

Отже, увівши середню швидкість руху тіла, ми звели нерівномірний рух до рівномірного, але в окремі моменти часу швидкість має різні значення.

Для того щоб описати рух тіла в будь-який момент часу, швидкість все-таки потрібно знати, але не середню, а так звану **миттєву швидкість**.

Щоб її визначити, потрібно зменшувати інтервал часу, за який здійснюється переміщення. Що менше буде цей інтервал, то менше переміщення

здійснюватиме тіло. Коли швидкість руху тіла визначатиметься за досить короткий інтервал часу і переміщення буде дуже малим (стягуватиметься в точку: при  $t \rightarrow 0$  і  $\vec{s} \rightarrow 0$ ), тоді швидкість практично не змінюватиметься ні за значенням, ні за напрямком. Тобто миттєва швидкість є параметром нерівномірного руху тіла.

**Миттєва швидкість руху тіла, або швидкість у даній точці, – векторна фізична величина, яка характеризує переміщення тіла за одиницю часу, коли швидкість руху тіла, починаючи з даного моменту, перестає змінюватися за напрямком і значенням.**

На всіх сучасних транспортних засобах установлюють спеціальні прилади – спідометри (мал. 15), які показують числове значення швидкості в даний момент часу.

Зрозуміло, що за спідометром не можна визначити напрямок швидкості. Для деяких засобів транспорту, наприклад для морських кораблів і літаків, потрібно знати також напрямок швидкості руху. Тоді, крім спідометра, установлюють ще й інші навігаційні прилади, у найпростішому випадку – компас.

Отже, тепер ми знаємо, що під час нерівномірного руху швидкість руху тіла не є сталою величиною і в різні моменти часу має свій напрямок і значення.

28

Для спрощення розглядатимемо такий нерівномірний рух, під час якого швидкість руху тіла за кожен одиницю часу і взагалі за будь-які однакові інтервали часу змінюється однаково. Такий рух називають **рівноприскоренням**.

Рух тіла, під час якого його швидкість за будь-які однакові інтервали часу змінюється однаково, називають **рівноприскореним рухом**.

Під час такого руху швидкість може змінюватися по-різному – дуже стрімко (рух кулі в рушниці, старт ракети, розбіг літака тощо) і порівняно повільно (початок руху поїзда, гальмування автомобіля тощо).

Якщо за деякий інтервал часу  $\Delta t$  приріст швидкості дорівнює  $\Delta \vec{v}$ , то за подвоєний інтервал часу  $2\Delta t$  приріст швидкості буде подвоєним –  $2\Delta \vec{v}$ , за потроєний інтервал часу  $3\Delta t$  він буде потроєним –  $3\Delta \vec{v}$  і т. д. При цьому, якщо значення  $\Delta t$  змінити, новому  $\Delta t$  відповідатиме вже інше значення  $\Delta \vec{v}$ ,



Мал. 15. Автомобільний спідометр

але відношення  $\frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t}$  приросту швидкості до приросту часу буде таким самим, як і раніше. Отже, у даному рівноприскореному прямолінійному русі відношення  $\frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t}$  незмінне щодо вибору інтервалу часу  $\Delta t$ .

Вектор  $\frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t}$ , який є сталим для кожного даного прямолінійного рівноприскореного руху, характеризує зміну швидкості тіла за одиницю часу. Ця векторна величина – основна характеристика рівноприскореного руху, яку називають **прискоренням** і позначають літерою  $\vec{a}$ .

**Прискоренням тіла в його рівноприскореному прямолінійному русі називають векторну фізичну величину, яка характеризує зміну швидкості за одиницю часу і визначається відношенням зміни швидкості руху тіла до інтервалу часу, протягом якого ця зміна відбулася:**

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

З означення рівноприскореного руху випливає, що його прискорення є сталою величиною ( $\vec{a} = \text{const}$ ).

Якщо у вибраний початковий момент часу  $t = 0$  швидкість руху тіла дорівнює  $\vec{v}_0$ , а в момент часу  $t$  вона дорівнює  $\vec{v}$ , то маємо  $\Delta t = t$ ,  $\Delta \vec{v} = \vec{v} - \vec{v}_0$ . Тоді розглянута вище формула має такий вигляд:

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

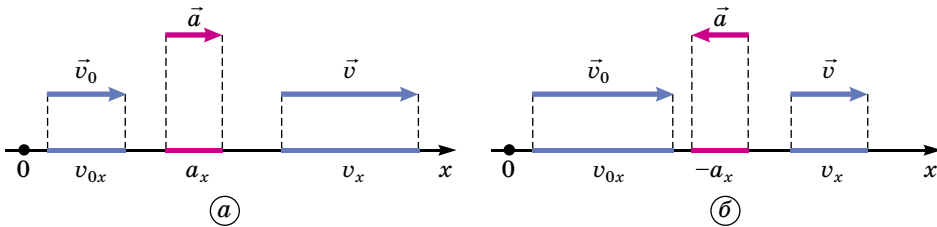
де  $\vec{a}$  – прискорення руху тіла;  $\vec{v}_0$  – початкова швидкість руху тіла;  $\vec{v}$  – його кінцева швидкість руху;  $t$  – час, протягом якого ця зміна відбувалася.

Як видно із цієї формули, за одиницю прискорення слід узяти прискорення такого прямолінійного рівноприскореного руху, у якому за одиницю часу швидкість змінюється також на одиницю. І це означає: прискорення дорівнює одиниці, якщо за 1 с швидкість руху тіла змінюється на 1 м/с. Отже, одиницею прискорення в СІ є  $1 \text{ м/с}^2$ .

Рівноприскорений рух може бути прискореним або сповільненим, залежно від швидкості руху тіла, яка може збільшуватись або зменшуватись із часом відповідно. Визначаючи значення прискорення руху, треба враховувати векторні властивості даної фізичної величини. Розглянемо прискорення та швидкість рівноприскореного руху в проекціях на вісь  $Ox$  (мал. 16), тоді прискорення набуде вигляду:

$$a_x = \frac{v_x - v_{0x}}{t}.$$

Якщо  $v_x > v_{0x}$ , тобто швидкість руху тіла збільшується (мал. 16, а), тоді модуль прискорення  $a_x > 0$ , а його вектор збігається з напрямком руху, то цей рух називають рівноприскореним.



Мал. 16. Проекції початкової і кінцевої швидкостей та прискорення руху тіла

Якщо  $v_x < v_{0x}$ , тоді модуль прискорення  $a_x < 0$ , а його вектор буде протилежним до напрямку руху, то в цьому випадку рух називають рівносповільненим.



### ЗАПИТАННЯ ДО ВИВЧЕНОГО

1. Навіщо вводять поняття середньої і миттєвої швидкостей руху тіла? Коли застосовують кожне з них для опису руху?
2. Чим відрізняється середня швидкість переміщення від середньої швидкості проходження шляху?

3. У якому випадку середня швидкість руху тіла дорівнюватиме середньому арифметичному її значенню?
4. Що розуміють під «малим інтервалом часу» в означенні миттєвої швидкості руху тіла?
5. Який рух називають рівноприскореним? Наведіть приклади.
6. Що таке прискорення руху тіла?
7. У якому випадку проекція прискорення руху тіла має додатне, а в якому – від'ємне значення?

## § 10. ШВИДКІСТЬ ТІЛА І ПРОЙДЕНИЙ ТІЛОМ ШЛЯХ ПІД ЧАС РІВНОПРИСКОРЕНОГО ПРЯМОЛІНІЙНОГО РУХУ ТА ЙОГО ГРАФІЧНЕ ЗОБРАЖЕННЯ

З'ясуємо, як під час рівноприскореного рівномірного руху тіла змінюється його швидкість і як визначати пройдений ним шлях.

З формули прискорення легко визначити миттєву швидкість руху тіла в будь-який момент часу. Оскільки  $\vec{a} = \frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{t}$ , то  $\vec{v} = \vec{v}_0 + \vec{a}t$ .

Якщо спроектувати вектори на вісь  $Ox$ , вираз набуває вигляду:

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

30

Ця формула дає можливість визначити швидкість руху тіла  $v_x$  у момент часу  $t$ , якщо відомо його початкову швидкість  $v_{0x}$  і прискорення  $a_x$ . Вона виражає **закон зміни швидкості рівноприскореного прямолінійного руху**.

За його допомогою ми маємо змогу вивести кінематичне рівняння шляху для рівноприскореного руху. Врахуємо, що швидкість тіла під час такого руху весь час змінюється, наприклад на початку руху вона дорівнює  $\vec{v}_0$ , а в кінці руху вона вже буде  $\vec{v}$ . Тому у формулі для переміщення треба скористатися поняттям середньої швидкості переміщення:

$$\vec{s} = \vec{v}_c t = \frac{\vec{v} + \vec{v}_0}{2} t.$$

Підставивши в цю формулу рівняння миттєвої швидкості і зробивши певні перетворення, одержимо:

$$\vec{s} = \vec{v}_0 t + \frac{\vec{a} t^2}{2},$$

або у проекціях на вісь  $Ox$ :

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

В окремих випадках, коли  $\vec{v}_0 = 0$ , рівняння переміщення набуває спрощеного вигляду:

$$\vec{s} = \frac{\vec{a} t^2}{2} \text{ або у проекціях на вісь } Ox: s_x = \frac{a_x t^2}{2}.$$

Слід пам'ятати, користуючись цими формулами, що  $v_{0x}$  і  $a_x$  проекції векторів  $\vec{v}_0$  і  $\vec{a}$  на вісь  $Ox$ , напрямлену вздовж прямолінійної траєкторії руху тіла, а тому можуть бути як додатними, так і від'ємними.

Якщо врахувати, що  $\vec{s} = x = x_0$ , то рівняння руху тіла в рівноприскореному прямолінійному русі матиме такий вигляд:



$$x = x_0 + \bar{v}_0 t + \frac{\bar{a} t^2}{2}.$$

Під час розв'язування задач, коли потрібно визначити пройдений тілом шлях під час рівноприскореного руху і невідомо, скільки часу минуло від початку руху тіла, а відомо прискорення, початкову швидкість і миттєву швидкість руху тіла в кінці переміщення, то користуються формулою:

$$l = \frac{v_x^2 - v_{0x}^2}{2a_x}.$$

Це рівняння виражає зв'язок між шляхом, пройденим тілом, і його швидкістю руху.

Ви вже знаєте, як графічно зображують рівномірний прямолінійний рух тіла. Спробуємо подібно до нього представити графічно рівноприскорений прямолінійний рух.

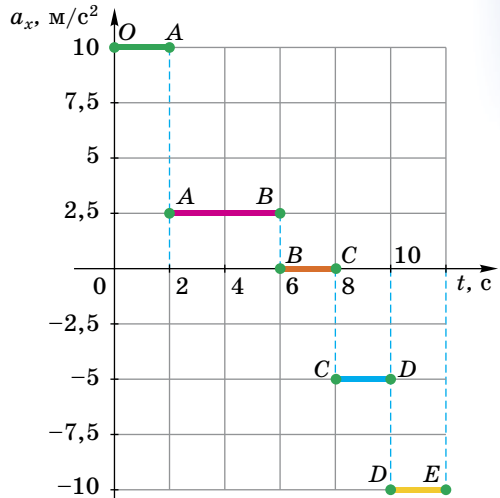
Почнемо з **графіка проекції прискорення руху тіла**  $a_x = a_x(t)$ . Якщо пригадати графік проекції швидкості тіла в рівномірному прямолінійному русі, де  $\bar{v} = \text{const}$ , і порівняти його з випадком, коли  $\bar{a} = \text{const}$ , то стає зрозумілим, що ці графіки ідентичні. Тому графіком проекції прискорення руху тіла від часу буде також пряма, яка паралельна осі часу  $t$ . Залежно від значення проекції прискорення – додатна вона чи від'ємна – ця пряма розташована або над віссю, або під нею (мал. 17).

Наприклад, на ділянці  $OA$  тіло рухалося з прискоренням  $10 \text{ м/с}^2$ ,  $AB$  –  $2,5 \text{ м/с}^2$ ,  $BC$  – тіло рухалося рівномірно прямолінійно,  $CD$  – з прискоренням  $-5 \text{ м/с}^2$ ,  $DE$  – з прискоренням  $-10 \text{ м/с}^2$ .

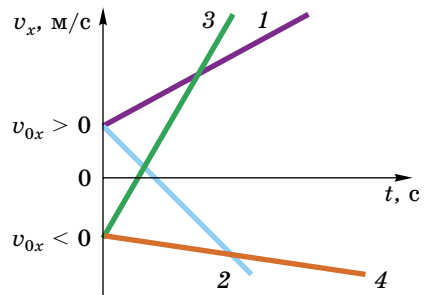
**Графік проекції швидкості руху тіла**  $v_x = v(t)$ . З кінематичного рівняння  $v_x = v_{0x} + a_x t$  видно, що графіком проекції швидкості руху тіла від часу є пряма, як і в рівнянні рівномірного прямолінійного руху. Тоді залишається тільки проаналізувати графік для нашого випадку. Залежно від значень проекцій прискорення і початкової швидкості руху тіла  $v_{0x}$  і  $a_x$  графік матиме різний вигляд (мал. 18), зокрема:

- 1)  $v_{0x} > 0, a_x > 0$ ; 2)  $v_{0x} > 0, a_x < 0$ ;
- 3)  $v_{0x} < 0, a_x > 0$ ; 4)  $v_{0x} < 0, a_x < 0$ .

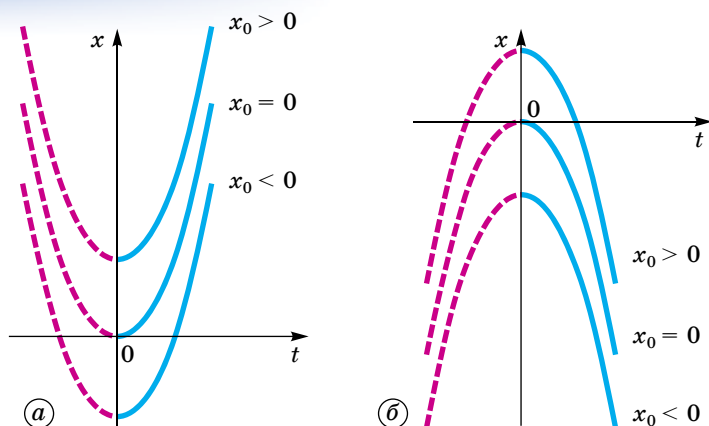
Якщо  $v_{0x} = 0$ , то пряма виходитиме з початку координат і, залежно від значення проекції прискорення руху тіла, буде напрямлена вгору ( $a_x > 0$ ) або опускатиметься вниз ( $a_x < 0$ ). Нахил прямих залежить від значення проекції прискорення: що більше прискорення руху тіла, то крутіше підіймається чи спадає графік.



Мал. 17. Графіки проекцій прискорення руху тіл



Мал. 18. Графіки проекцій швидкостей руху тіл



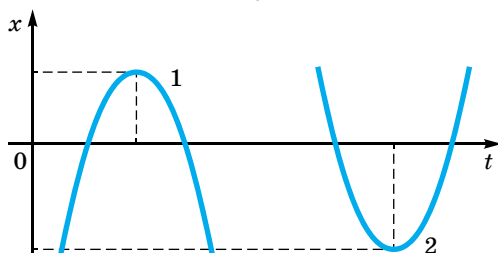
Мал. 19. Графіки рівноприскореного прямолінійного руху тіл

**Графік руху тіла  $x = x(t)$ .** Кінематичні рівняння руху є квадратичною функцією виду  $y = c + bx + ax^2$ :

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

32

Тому графіком залежності координати тіла від часу є парабола, гілки якої згідно з параметрами руху мають різний вигляд. Наприклад, якщо  $v_{0x} = 0$  і  $a_x > 0$ , то графік має вигляд, зображений на малюнку 19, а. Якщо  $x_0 \neq 0$ , вершина параболи зміщується по осі ординат угору або вниз, залежно від значення  $x_0$ .



Мал. 20. Графіки рівноприскореного прямолінійного руху тіл:

1)  $v_{0x} > 0$ ,  $a_x < 0$ ; 2)  $v_{0x} < 0$ ,  $a_x > 0$ .

Якщо  $v_{0x} = 0$  і  $a_x < 0$ , то гілки параболи зорієнтовані вниз (мал. 19, б) і зміщення вершини параболи вгору або вниз по осі ординат так само залежить від значення  $x_0$ .

Якщо  $v_{0x} \neq 0$  і  $x_0 \neq 0$  (мал. 20), то вершина параболи зміщується в точку, координати якої визначають співвідношеннями:

$$x = x_0 - \frac{v_{0x}^2}{2a_x}; \quad t = -\frac{v_{0x}}{a_x}.$$



### ЗАПИТАННЯ ДО ВИВЧЕНОГО

- Швидкість руху тіла – векторна величина, може змінюватись як модуль швидкості, так і напрямок швидкості. Що саме змінюється під час рівноприскореного руху?
- Чи може швидкість руху тіла дорівнювати нулю, а прискорення – ні?
- Що таке кінематичне рівняння рівноприскореного руху? Чим воно відрізняється від рівняння переміщення?
- Чи можна визначити прискорення тіла, не знаючи часу його руху?
- Чим відрізняються залежності переміщення від часу під час рівномірного і рівноприскореного рухів тіла?
- Який вид має графік прискорення руху тіла?
- Чим відрізняється графік швидкості рівномірного прямолінійного руху тіла від графіка швидкості його рівноприскореного руху?

8. Як за графіком проекції швидкості рівноприскореного руху визначають проекцію переміщення тіла?
9. Від чого залежить напрямок і місце гілок параболи на графіках рівноприскореного руху тіла?



### ЧИ ЗНАЄТЕ ВИ, ЩО...

- Швидкість польоту серпокрильця чорного становить близько 144 км/год. Сокіл-сапсан, переслідуючи здобич, розвиває пікірувальну швидкість до 360 км/год, тоді як у горизонтальному польоті його швидкість становить близько 90 км/год.
- Журавлі можуть залітати на висоту до 4,5 км, галки – до 2 км, жайворонки – до 1,9 км. Гірські орли піднімаються на висоту до 5 км, а грифи і кондори літають навіть на висотах до 7 км.
- Більшість птахів мають чималу дальність польоту. Наприклад, чайки, перелітаючи через Атлантичний океан з Англії в Ньюфаундленд (Канада), долають без зупинок відстань до 3500 км, а золотисті сивки, які вдень і вночі летять з Нової Шотландії в Південну Америку, пролітають близько 4000 км.
- Завдяки швидкому бігу заєць рятує своє життя. Він розвиває швидкість руху до 72 км/год, але його легко випередить страус, який бігає зі швидкістю 80 км/год. На жаль, вони не можуть врятуватися від гепарда, який за 4 с може розвинути швидкість 115 км/год, що більше ніж у 3 рази перевищує максимальну швидкість бігу людини (35 км/год).
- Американська ящірка бігає по воді, як по твердій землі, зі швидкістю 11 км/год. Щоб це могла зробити людина, її ступні за розмірами мали б нагадувати розкриті парасольки, а за секунду вона мала б робити 20 кроків.
- Акула пливе в 10 разів швидше, ніж людина, досягаючи швидкості 50 км/год. А креветка-богомол завдає удару клешнею зі швидкістю льоту дрібнокаліберної кулі (удар триває 5 мілісекунд).
- Швидкість руху води стовбуром хвойних рослин сягає 0,5–1 см/год, а листяних – набагато більше, до 40 см/год. Швидкість ця залежить від багатьох зовнішніх чинників, і передусім – від температури навколишнього середовища: що вона нижча, то повільніше рухається рідина.
- Найбільшу швидкість на велосипеді (268,8 км/год = 75 м/с) розвинув під час гонок голландський велосипедист Фред Ромпелберг.
- Американська автогонщиця Кітті Хамблтон на трьохколісному автомобілі S.M. Мотівейтор розвинула швидкість 843,323 км/год.



### ЗАДАЧІ ТА ВПРАВИ

#### Розв'язуємо разом

1. У момент, коли через станцію зі швидкістю 5 м/с проїжджав товарний поїзд, від платформи в тому самому напрямку відійшов пасажирський поїзд. Через який час і за якої швидкості пасажирський поїзд наздожене товарний, якщо він рухається з прискоренням  $0,3 \text{ м/с}^2$ , а товарний – рівномірно?

#### Розв'язування

Прийmemo за тіло відліку станцію і спрямуємо вісь  $Ox$  за рухом поїздів. Тоді

$$s_{1x} = v_{1x}t; \quad s_{2x} = \frac{a_x t^2}{2}.$$

За умовою знаходимо час, коли проекції переміщень поїздів однакові. Тому

$$s_{1x} = s_{2x}; \quad v_{1x}t = \frac{a_x t^2}{2}.$$

Звідси час руху поїздів

$$t = \frac{2v_x}{a_x} = \frac{2 \cdot 5 \text{ м/с}}{0,3 \text{ м/с}^2} = 33,3 \text{ с.}$$

Отже, відстань від станції дорівнює

$$s_{1x} = v_x t = 5 \text{ м/с} \cdot 33,3 \text{ с} = 170 \text{ м.}$$

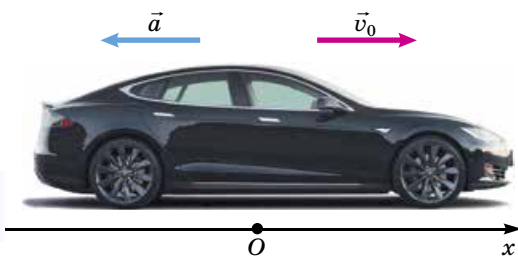
Модуль швидкості пасажирського поїзда

$$v = at = 0,3 \text{ м/с}^2 \cdot 33,3 \text{ с} \approx 10 \text{ м/с.}$$

**Відповідь:** 33,3 с; 10 м/с.

2. Водій автомобіля, що рухається зі швидкістю 72 км/год, побачив червоний сигнал світлофора і натиснув на педаль гальм. Після цього швидкість руху автомобіля почала зменшуватись на 5 м щосекунди. Визначте відстані, які автомобіль проходить за перші 2 с після початку гальмування і до повної його зупинки.

### Розв'язання



Мал. 21

Координатну вісь  $Ox$  спрямуємо вздовж напрямку руху автомобіля (мал. 21), а за початок відліку координати виберемо те місце на шляху, де почалося гальмування. За початок відліку часу візьмемо момент, коли водій натиснув на гальма.

Початкова швидкість руху автомобіля  $\vec{v}_0$  напрямлена так само, як вісь  $Ox$ , а прискорення – у протилежний бік, отже, проекція початкової швидкості  $v_{0x}$  – додатна, а проекція прискорення  $a_x$  – від'ємна:  $v_{0x} = v_0$ ;  $a_x = -a$ . Відстані, пройдені автомобілем, – це проекції переміщення  $s_x$ , а  $s_x = x - x_0$ . Оскільки  $x_0 = 0$ , то треба знайти координати  $x_1$  і  $x_2$  автомобіля через 2 с після початку гальмування і в момент зупинки. Координату  $x_1$  (через 2 с) визначимо за формулою:

$$x_1 = x_0 + v_0 t - \frac{at^2}{2};$$

$$x_1 = 0 + 20 \text{ м/с} \cdot 2 \text{ с} - 5 \text{ м/с}^2 \cdot 4 \text{ с}^2 : 2 = 40 \text{ м} - 10 \text{ м} = 30 \text{ м.}$$

Координату  $x_2$  можна визначити за формулою  $l = \frac{v_x^2 - v_{0x}^2}{2a_x}$ , оскільки ми

знаємо початкову і кінцеву швидкості руху автомобіля. Кінцева швидкість  $v$  дорівнює нулю, тому що автомобіль зупинився, отже,

$$l = x_2 - x_0 = \frac{-v_{0x}^2}{2a} \quad (\text{тут } x_0 = 0), \text{ тому}$$

$$x_2 = -(20 \text{ м/с})^2 : 2 \cdot (-5 \text{ м/с}^2) = 40 \text{ м.}$$

**Відповідь:**  $x_1 = 30 \text{ м}$ ;  $x_2 = 40 \text{ м}$ .

### Рівень А

42. Літак під час зльоту долає злітну смугу за 15 с і в момент відривання від поверхні землі має швидкість 100 м/с. З яким прискоренням рухався літак по злітній смузі і яка її довжина?

43. Через 10 с після початку руху швидкість поїзда дорівнює 0,6 м/с. Через який час після початку руху швидкість поїзда дорівнюватиме 3 м/с?

44. Кулька котиться по жолобу без початкової швидкості і за першу секунду проходить 10 см. Який шлях вона пройде за 3 с? Який шлях вона пройде за третю секунду?

45. Рухаючись зі швидкістю 72 км/год, автомобіль загальмував за 5 с. Визначте гальмівний шлях автомобіля.

46. Схил завдовжки 100 м лижниця пододала за 20 с, рухаючись з прискоренням  $0,3 \text{ м/с}^2$ . Яка швидкість лижниці на початку і в кінці схилу?

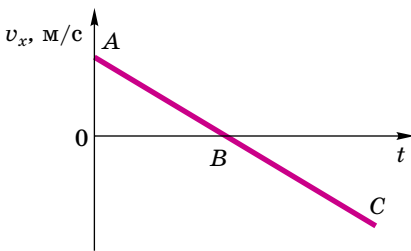
47. Ракета рухається з прискоренням  $45 \text{ м/с}^2$  і в певний момент часу досягає швидкості 900 м/с. Яку відстань вона пролетить за наступні 2,5 с?

48. На якій відстані від Землі був би космічний корабель через 30 хв після старту, якби він весь час рухався прямолінійно з прискоренням  $9,8 \text{ м/с}^2$ ?

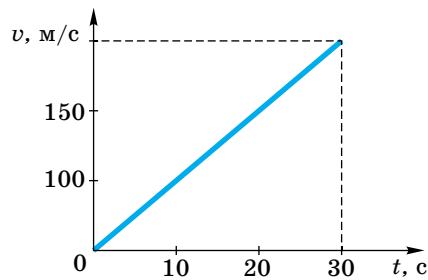
49. Спостереження показали, що скаковий кінь досягає своєї найбільшої швидкості 15 м/с після того, як він, стартувавши, «розженеться» на відстані 30 м. Вважаючи, що кінь скаче з прискоренням, визначте це прискорення.

50. Чи змінюється прискорення тіла, рух якого характеризується ділянкою AC графіка  $v_x = v_x(t)$  (мал. 22). Відповідь обґрунтуйте.

51. Користуючись графіком (мал. 23), поясніть, як рухається тіло. Визначте його початкову швидкість, прискорення. Запишіть рівняння швидкості.



Мал. 22



Мал. 23

52. Автомобіль рухався 1 год зі швидкістю 80 км/год, потім 0,5 год стояв, а далі проїхав ще 2 год зі швидкістю 60 км/год. Побудуйте графіки залежності швидкості й пройденого шляху від часу.

### Рівень Б

53. Тіло рухається без початкової швидкості з прискоренням  $0,6 \text{ м/с}^2$ . Який шлях воно пройде за першу, п'яту, десятую, двадцять п'яту секунду?

54. Гальмівний шлях поїзда перед зупинкою на станції – 1000 м. Визначте гальмівне прискорення і час гальмування, якщо на початку гальмування швидкість поїзда дорівнювала 72 км/год. Яка була швидкість поїзда біля семафора, встановленого в середній точці гальмівного шляху?

55. Який шлях пропливе моторний човен, якщо він рухається 5 с зі сталою швидкістю 1 м/с, а потім 5 с зі сталим прискоренням  $1 \text{ м/с}^2$ ?

56. Від поїзда, що рухається рівномірно, було відчеплено останній вагон, який став рухатися рівносповільнено, поки не зупинився. Доведіть, що пройдений відчепленим вагоном шлях удвічі менший від шляху, який подолав за цей самий час поїзд.



**57.** Автомобіль, рухаючись рівноприскорено, долає дві ділянки шляху завдовжки 10 м кожна. Визначте прискорення і швидкість на початку першої ділянки, якщо автомобіль проїде цю ділянку за 0,6 с, а другу ділянку – за 2,2 с.

**58.** За яку секунду від початку рівноприскореного руху тіло пройде шлях, утричі більший за шлях, пройдений за попередню секунду?

**59.** Покажіть, що середня швидкість руху тіла за даний інтервал часу  $\tau = t_2 - t_1$  під час рівнозмінного руху дорівнює швидкості в момент  $t = t_1 + \frac{\tau}{2}$ .

**60.** Тіло мало початкову швидкість  $v_0 = 1$  м/с. Через деякий час, рухаючись рівноприскорено, воно досягло швидкості  $v_x = 7$  м/с. Яка була швидкість тіла на середині пройденого шляху?

**61.** Автомобіль почав рухатися з прискоренням  $a = 1,5$  м/с<sup>2</sup> і за деякий час проїхав відстань  $l = 12$  м. Визначте його швидкість у цей момент і середню швидкість.

**62.** Тіло рухається вздовж прямої спочатку протягом 5 с рівномірно зі швидкістю 5 м/с, потім рівноприскорено протягом 10 с з прискоренням 1 м/с<sup>2</sup>, напрямленим протилежно до початкової швидкості. Побудуйте графіки залежності швидкості, координати і пройденого тілом шляху від часу. Початкова координата дорівнює нулю, напрямок осі координат – уздовж початкового напрямку руху.

### Є над чим замислитися

**63.** Тіло рухається з точки А спочатку рівноприскорено протягом часу  $t_0$ , а потім з тим самим прискоренням – рівносповільнено. Через який час від початку руху тіло повернеться в точку А?

**64.** Людина спізнилася на поїзд. Коли вона вийшла на платформу, з нею порівнявся передостанній вагон і пройшов повз неї за час  $t_1$ , останній – за час  $t_2$ . Поїзд рухався рівноприскорено. Знайдіть вираз для часу, на який запізнилася людина.

**65.** На сортувальній станції від поїзда, що рухався рівномірно, відцепили останній вагон, який став рухатися рівносповільнено, поки не зупинився. Доведіть, що пройдений відцепленим вагоном шлях удвічі менший від шляху, який пройшов за цей самий час поїзд.

**66.** На малюнку 24 показано графік залежності проекції швидкості тіл від часу.

1. Визначте час рівноприскореного та рівномірного рухів тіла.

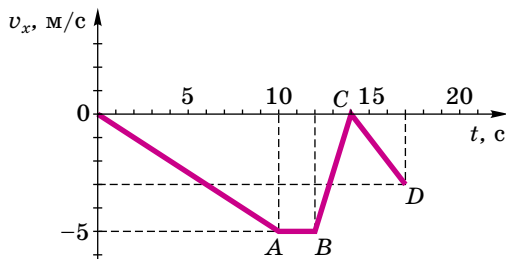
2. На яких ділянках швидкість тіла збільшується, на яких – зменшується?

3. Визначте прискорення на ділянках.

4. Користуючись графіком проекції швидкості, визначте шлях, пройдений тілом під час: а) розгонів; б) рівномірних рухів; в) гальмування.

5. Напишіть рівняння руху тіла для кожної ділянки.

6. В одній системі координат схематично накресліть графіки залежності координати, шляху та модуля переміщення від часу.



Мал. 24

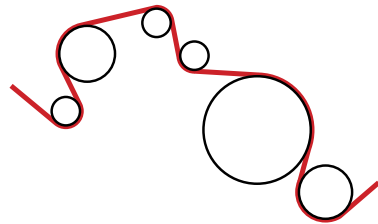
## § 11. РІВНОМІРНИЙ РУХ МАТЕРІАЛЬНОЇ ТОЧКИ ПО КОЛУ. ЛІНІЙНА І КУТОВА ШВИДКОСТІ. ПЕРІОД І ЧАСТОТА ОБЕРТАННЯ ТІЛА

Більш поширеними за прямолінійні є криволінійні рухи, які відбуваються під дією сил, напрямлених під кутом до швидкості. Серед них – рух матеріальної точки по колу, оскільки рух точки по колу є дуже поширеним у природі й техніці. По колу рухаються різні частини обертових машин. У тракторі, наприклад, спостерігаємо обертання колінчастого вала, цілої системи зубчастих коліс, що передають рух від колінчастого вала до різних механізмів, шківів, барабанів тощо. У літаку обертаються гвинти, колеса шасі (мал. 25).

Будь-який криволінійний рух тіл можна звести до руху по дугах – частинах кіл різних радіусів (мал. 26). Тобто криволінійний рух є комбінацією послідовних рухів тіла по колу та ділянок, на яких тіло рухається прямолінійно.



Мал. 25. Обертання гвинтів літака Ан-132Д



Мал. 26. Криволінійний рух тіла

37

Розглянемо найпростіший криволінійний рух тіла – рух по колу з незмінною за модулем швидкістю.

**Рівномірний рух тіла по колу** – це такий рух, під час якого швидкість тіла змінюється за напрямком, але не змінюється за значенням.

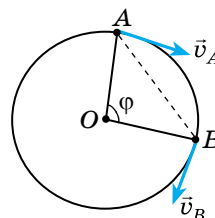
Розглянемо основні величини, які характеризують рівномірний рух по колу.

**Миттєва швидкість руху** тіла під час такого руху в кожній точці спрямована по дотичній до траєкторії. Підтвердженням цього може бути відлітання шматочків речовини (іскор) від диска для різання або шліфування металів (мал. 27), бризок від коліс велосипеда або автомобіля.

Припустимо, що точка рівномірно рухається по колу радіуса  $R$  і за певний час  $t$  переміщується з точки  $A$  в точку  $B$  (мал. 28).



Мал. 27. Відлітання іскор від диска під час шліфування металу



Мал. 28. Зміна напрямку швидкості тіла під час рівномірного руху по колу

Як ми бачимо з малюнка, лінійна швидкість руху тіла за модулем залишається сталою  $v_A = v_B = v$ , але її напрямок весь час змінюється. Тому в цьому випадку користуються поняттям миттєвої швидкості, яка визначає швидкість руху тіла в точці і напрямлена по дотичній до дуги в даній точці (точці  $A$  і точці  $B$ ).

**Отже, лінійна швидкість тіла, що рівномірно обертається по колу, весь час змінюється за напрямком і в будь-якій точці траєкторії напрямлена по дотичній до дуги цього кола, має сталі значення.**

Користуючись означенням швидкості руху тіла для рівномірного прямолінійного руху, з'ясуємо, як визначають лінійну швидкість тіла під час рівномірного руху по колу.

Ми знаємо, що  $v = \frac{l}{t}$ , де  $l$  – пройдений тілом шлях. Тіло здійснює за певний час  $t$  один оберт, пройшовши шлях, що дорівнює довжині кола  $l = 2\pi R$ . Тоді лінійна швидкість руху тіла під час рівномірного руху по колу буде визначатися за формулою:

$$v = \frac{2\pi R}{t},$$

де  $v$  – лінійна швидкість руху тіла по колу;  $R$  – радіус кола;  $t$  – час руху тіла.

38

Але лінійна швидкість тіла не дає змоги судити про швидкість обертання всіх його точок. Вона буде змінюватися з віддаленням точки від осі обертання. Сталим (незмінним) для всіх точок на тілі, що обертається, є відношення кута  $\varphi$ , який утворився при переміщенні радіуса  $R$  з положення  $A$  в положення  $B$  (кутове переміщення  $\varphi$ ), до інтервалу часу  $\Delta t$ , протягом якого це переміщення відбувалося.

Цю сталу фізичну величину називають **кутовою швидкістю**.

**Куткова швидкість тіла** – це фізична величина, яка показує, як швидко змінюється кут повороту тіла, і визначається відношенням зміни кута  $\Delta\varphi$  до інтервалу часу  $\Delta t$ , за який ця зміна відбулася:

$$\omega = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t}.$$

Якщо за час  $t$  кут повороту тіла, яке обертається рівномірно, дорівнює  $\varphi$ , то куткову швидкість визначають із співвідношення:  $\omega = \frac{\varphi}{t}$ .

Одиницею кутової швидкості в СІ є **радіан за секунду (рад/с)**. 1 рад/с дорівнює кутовій швидкості такого рівномірного руху по колу, під час якого за 1 секунду здійснюється кутове переміщення 1 радіан.

Для тіл, що здійснюють багато обертів, які виконуються з періодичною залежністю (штучні супутники, деталі обертових механізмів тощо), уводять величини, які називають **періодом обертання** і **частотою обертання**.

**Період обертання** – це час, протягом якого тіло робить один повний оберт по колу.

Якщо тіло робить  $N$  обертів, то

$$T = \frac{t}{N},$$

де  $t$  – час обертання;  $N$  – кількість обертів, які зробило тіло.

Одиницею періоду обертання  $T$  тіла в СІ є **1 секунда (1 с)**.

Величину, обернену до періоду обертання, називають *частотою обертання*:

$$n = \frac{1}{T}.$$

Частота обертання тіла  $n$  визначає кількість обертів тіла навколо центра обертання за 1 секунду:

$$n = \frac{N}{t}.$$

Одиницею частоти в СІ є **1 оберт за секунду (1 об/с)**. 1 об/с дорівнює такій частоті обертання, за якої тіло за 1 секунду робить 1 оберт. Використовують й інші одиниці, наприклад оберт за хвилину: 1 об/хв = 1/60 об/с.

Оскільки експериментально встановлено, що кутове переміщення за час, що дорівнює періоду  $T$ , становить  $2\pi$  рад, то кутову швидкість можна визначати через період і частоту обертання:

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

Якщо пригадати, що лінійна швидкість тіла  $v = \frac{2\pi R}{T}$ , то її зв'язок з кутовою швидкістю виражається формулою:  $v = \omega R$ .



### ЗАПИТАННЯ ДО ВИВЧЕНОГО

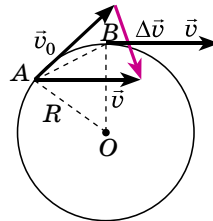
1. Чому серед криволінійних рухів виділяють рух по колу?
2. Що є основною характеристикою обертального руху?
3. Чим зумовлене введення кутової швидкості як характеристики руху тіла під час обертання?
4. Дайте визначення лінійної та кутової швидкостей під час рівномірного руху тіла по колу.
5. Як пов'язані між собою період і частота обертання тіла?
6. Виразіть лінійну та кутову швидкості через період або частоту обертання тіла.
7. Відобразіть лінійну швидкість тіла через його кутову швидкість.

## § 12. ДОЦЕНТРОВЕ ПРИСКОРЕННЯ ТІЛА

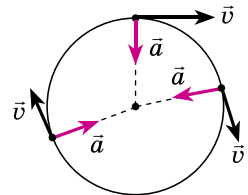
Рівномірний рух тіла по колу – це рух з прискоренням, хоча за модулем швидкість руху тіла не змінюється. Тоді постає завдання з'ясувати, як напрямлене і чому дорівнює це прискорення.

Ви уже знаєте, що прискорення визначають за формулою  $\vec{a} = \frac{\Delta \vec{v}}{t}$ . Вектор  $\vec{a}$  напрямлений так само, як вектор  $\Delta \vec{v}$ , тому що  $t$  – величина скалярна.

Будемо вважати, що тіло рухається по колу, яке має радіус  $R$ , і в деякий момент часу, який приймемо за початковий ( $t = 0$ ), воно перебуває в точці  $A$  (мал. 29). Швидкість руху тіла  $\vec{v}_0$  в цій точці напрямлена по дотичній. У точці  $B$ , у якій тіло, рухаючись по колу, опиниться через дуже малий інтервал часу  $t$ , швидкість  $\vec{v}$  також



Мал. 29.  
До пояснення доцентрового прискорення



Мал. 30. Напрямок прискорення тіла під час руху по колу

буде напрямлена по дотичній. Перенесемо вектор  $\vec{v}$  паралельно самому собі так, щоб він і вектор  $\vec{v}_0$  виходили з точки  $A$ , і сполучимо кінці обох векторів відрізком прямої у напрямку від  $\vec{v}_0$  до  $\vec{v}$ . Направлений відрізок і є вектор  $\Delta\vec{v}$ . З малюнка видно, що вектор  $\Delta\vec{v}$  напрямлений всередину кола. Якщо точки  $A$  і  $B$  близько одна до одної, то вектор  $\Delta\vec{v}$ , перенесений у точку  $A$ , буде напрямлений до центра кола. Туди само буде напрямлений і вектор прискорення  $\vec{a}$ .

Отже, під час рівномірного руху тіла по колу його прискорення в усіх точках кола напрямлене до центра. Його так і називають **доцентровим прискоренням**, позначають літерою  $\vec{a}$ .

**Прискорення тіла, яке рівномірно рухається по колу, у будь-якій його точці доцентрове, тобто напрямлене по радіусу кола до його центра.**

У будь-якій точці доцентрове прискорення перпендикулярне до лінійної швидкості (мал. 30).

Значення (модуль) прискорення визначимо з малюнка 29. Трикутник з векторів  $\vec{v}_0$ ,  $\vec{v}$  і  $\Delta\vec{v}$  – рівнобедрений, оскільки  $\vec{v}_0 = \vec{v}$ .  $\triangle OAB$  також рівнобедрений, оскільки  $OA$  і  $OB$  – радіуси кола. Кути при вершинах обох трикутників рівні, оскільки вони утворені взаємно перпендикулярними сторонами. Тому трикутники подібні як рівнобедрені з рівними кутами при вершинах. З подібності трикутників випливає пропорційність подібних сторін:

$$\frac{\Delta v}{AB} = \frac{v}{R}.$$

Якщо вважати, що точки  $A$  і  $B$  близько одна до одної, то хорда  $AB$  не відрізняється від довжини дуги  $AB$ . Тоді довжина дуги  $AB$  – це шлях, який пройшло тіло зі сталою за модулем швидкістю  $v$ . Він дорівнює  $vt$ , тому:

$$\frac{\Delta v}{vt} = \frac{v}{R}, \text{ або } \frac{\Delta v}{t} = \frac{v^2}{R}.$$

Оскільки інтервал часу в даному випадку дуже малий, то  $\frac{\Delta v}{t}$  і є модуль прискорення. Отже:  $a = \frac{v^2}{R}$ .

Згадаємо, що рівномірний рух по колу нас цікавив тому, що будь-який рух по криволінійній траєкторії можна представити як рух по дугах кіл різних радіусів. Тепер можна стверджувати, що в будь-якій точці криволінійної траєкторії тіло рухається з прискоренням, напрямленим до центра того кола, частиною якого є ділянка траєкторії, що містить цю точку. Модуль прискорення залежить від швидкості тіла і від радіуса відповідного кола.

Знаючи, що  $v = \omega R$ , формула для розрахунку доцентрового прискорення матиме вигляд:  $a = \omega^2 R$ .



### ЗАПИТАННЯ ДО ВИВЧЕНОГО

1. Як напрямлене прискорення тіла, що рухається по колу зі сталою за модулем швидкістю?
2. Чи можна вважати доцентрове прискорення сталим, а рівномірний рух по колу – рівноприскореним?
3. Якщо під час руху тіла по колу модуль його швидкості змінюється, чи буде прискорення тіла напрямлене до центра кола?
4. Дайте означення доцентрового прискорення тіла.
5. За якими формулами визначають доцентрове прискорення тіла?



6. Катер зі спортсменкою на водних лижах рухається по колу. Спортсменка може рухатися за катером по тому самому колу, за колом і всередині кола. Яке співвідношення швидкостей руху спортсменки і катера в цих трьох випадках?



Дослідіть, як використовують знання про рух по колу в космонавтиці, зокрема під час підготовки космонавтів.



## ЗАДАЧІ ТА ВПРАВИ

### Розв'язуємо разом

1. Електродвигун, зв'язаний ременевою передачею з токарним верстатом, обертається із частотою 980 об/хв. Діаметр шківів, надітих на вал двигуна, дорівнює 10 см. Визначте діаметр шківів, надітих на вал верстата, якщо частота обертання вала 300 об/хв. Яка кутова швидкість обертання шківів верстата?

Дано:

$$n_1 = 980 \text{ об/хв} = 16,3 \text{ об/с}$$

$$n_2 = 300 \text{ об/хв} = 5 \text{ об/с}$$

$$d_1 = 10 \text{ см} = 0,1 \text{ м}$$

$$d_2 = ? \quad \omega = ?$$

Розв'язання

Якщо шківів з'єднано перекидним ременем, який приводить їх у рух без проковзування, то відношення їх частот пропорційне їх діаметрам:

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{d_2}{d_1} \Rightarrow d_2 = d_1 \frac{n_1}{n_2}.$$

Підставимо значення відомих величин:  $d_1 = 0,1 \text{ м} \cdot \frac{16,3 \text{ об/с}}{5 \text{ об/с}} = 0,3 \text{ м}.$

Кутова швидкість шківів верстата  $\omega = 2\pi n_2 = 2 \cdot 3,14 \cdot 5 \text{ об/с} = 31,4 \text{ рад/с}.$   
Відповідь: 31,4 рад/с.

2. Яка швидкість руху автомобіля, якщо його колеса радіусом 30 см роблять 600 об/хв? Визначте доцентрове прискорення коліс автомобіля.

Дано:

$$R = 30 \text{ см} = 0,3 \text{ м}$$

$$n = 600 \text{ об/хв} = 10 \text{ об/с}$$

$$v = ? \quad a = ?$$

Розв'язання

Використаємо формули  $v = \frac{2\pi R}{T}$  і  $n = \frac{1}{T}.$   
Тоді  $v = 2\pi Rn.$

Підставимо значення відомих фізичних величин, отримаємо:

$$v = 2 \cdot 3,14 \cdot 0,3 \text{ м} \cdot 10 \text{ об/с} = 18,84 \text{ м/с}.$$

Щоб визначити прискорення коліс, використаємо формулу  $a = \frac{v^2}{R}.$

Тоді  $a = \frac{18,84 \text{ м/с}^2 \cdot 18,84 \text{ м/с}^2}{0,3 \text{ м}} = 1183 \text{ м/с}^2.$

Відповідь:  $v = 18,84 \text{ м/с}; a = 1183 \text{ м/с}^2.$

### Рівень А

67. Частота обертання вала генератора вітрогенератора дорівнює 30 об/хв, якоря електродвигуна – 1500 об/хв, барабана сепаратора – 8400 об/хв, шпинделя шліфувального верстата – 96 000 об/хв. Обчисліть їх періоди.

68. Частота обертання повітряного гвинта літака – 1500 об/хв. Скільки обертів робить гвинт на шляху 90 км при швидкості польоту 180 км/год?

69. Період обертання платформи карусельного верстата – 4 с. Визначте швидкість крайніх точок платформи, віддалених від осі обертання на 2 м.

**70.** Діаметр передніх коліс трактора вдвічі менший, ніж задніх. Порівняйте частоти обертання коліс під час руху трактора.

**71.** Період обертання Місяця навколо Землі дорівнює 27,3 доби. Вважаючи орбіту Місяця колом радіуса 385 000 км, визначте швидкість руху Місяця по орбіті і його прискорення.

**72.** Ротор турбіни, діаметр якої 40 см, обертається із частотою  $12\,000\text{ хв}^{-1}$ . Яке доцентрове прискорення кінців лопатей турбіни?

**73.** Швидкість точок робочої поверхні наждачного круга, який має діаметр 300 мм, не має перевищувати 35 м/с. Чи можна насадити цей круг на вал електродвигуна, що робить 1400 об/хв? 2800 об/хв?

**74.** Якщо радіус колової орбіти штучного супутника Землі збільшити в 4 рази, то його період обертання збільшиться у 8 разів. У скільки разів зміниться швидкість руху супутника по орбіті?

**75.** Секундна стрілка годинника зробила 5 обертів. Визначте кут повороту кінця стрілки і кутову швидкість руху.

**76.** Визначте кутові швидкості валів, які обертаються з періодами 10 с і 0,050 с.

### Рівень Б

**77.** Колесо велосипеда має радіус 40 см. З якою швидкістю їде велосипедистка, якщо колесо робить 120 об/хв? Визначте період обертання колеса.

**78.** Лінійна швидкість точок обода диска, що обертається, дорівнює  $v_1 = 3\text{ м/с}$ , а точок, що лежать на відстані  $a = 10\text{ см}$  від обода, дорівнює  $v_2 = 2\text{ м/с}$ . Визначте частоту обертання диска.

**79.** Хвилинна стрілка годинника втричі довша за секундну. Визначте відношення лінійних швидкостей кінців стрілок.

**80.** Яку відстань проїде велосипедистка за 60 обертів педалей, якщо діаметр колеса 70 см, ведуча шестірня має 48, а ведена – 18 зубців?

**81.** Дитячий заводний автомобіль, рухаючись рівномірно, проїхав відстань  $l$  за час  $t$ . Визначте частоту обертання  $n$  і доцентрове прискорення точок  $a_{\text{доц}}$  на ободі колеса, якщо його діаметр дорівнює  $d$ . Якщо є можливість, конкретні дані задачі візьміть з проведених дослідів.

**82.** Визначте радіус  $R$  колеса, якщо при його обертанні лінійна швидкість руху точки на ободі дорівнює  $v_1 = 6\text{ м/с}$ , а швидкість точки, що лежить ближче до осі обертання на  $a = 15\text{ см}$ , дорівнює  $v_2 = 5,5\text{ м/с}$ .

**83.** Вісь колеса, яке обертається, рухається поступально в горизонтальному напрямку зі швидкістю  $v$ . Вісь горизонтальна і напрямок її руху перпендикулярний до неї самої. Визначте миттєву швидкість верхньої точки обода колеса  $v_1$ , якщо миттєва швидкість нижньої точки  $v_2$ .

**84.** З якою швидкістю автомобіль має проїжджати середину опуклого мосту радіусом 40 м, щоб доцентрове прискорення дорівнювало прискоренню вільного падіння?

**85.** Автомобіль рухається по криволінійній траєкторії зі сталою за модулем швидкістю. Чи можна стверджувати, що його прискорення в цьому випадку дорівнює нулю? Відповідь обґрунтуйте.

**86.** У скільки разів кутова швидкість хвилинної стрілки годинника більша від кутової швидкості годинної стрілки?

### Є над чим замислитися

**87.** Чи можна насаджувати точильний круг на вал двигуна, який робить 3000 об/хв, коли на крузі є штамп заводу: «40 м/с;  $\varnothing 250\text{ мм}$ »?

**88.** Чи синхронно обертаються ротори двох електрогенераторів, якщо частота обертання першого дорівнює 66 об/хв, а кутова швидкість другого –  $2,2\pi$  рад/с?

**89.** На свердильному станку свердлять отвори діаметром 15 мм зі швидкістю 628 мм/с і подачею, що дорівнює 0,3 мм/об. Яка глибина отвору, якщо його свердлили протягом 1 хв?

**90.** Вал починає обертатись із стану спокою і за перші 10 с робить 50 обертів. Вважаючи обертання валу рівноприскореним, визначте кутове прискорення і кінцеву кутову швидкість.

**91.** Тонкий обруч радіусом  $R$  розганяють по горизонтальній ділянці дороги без вибоїн. При якому значенні миттєвої швидкості поступального руху обруча він «одірветься» від дороги (підскочить)?

**92.** Обруч радіусом 0,5 м котиться без проковзування по горизонтальній поверхні. Кутова швидкість обертання обруча дорівнює  $\frac{2}{3}\pi$  рад/с. У певний момент часу точка  $A$  обруча дотикається до поверхні. Яким буде значення швидкості точки  $A$  через 0,5 с після цього з точки зору нерухомого спостерігача?

## § 13. СИЛИ В МЕХАНІЦІ

Як ви знаєте з курсу 7-го класу, що для вивчення будь-якого природного явища використовують різні фізичні величини. Для того щоб описати якісно і кількісно взаємодію тіл, вводять фізичну величину, яку називають силою.

43

**Сила – це фізична величина, яка є мірою взаємодії тіл і є причиною зміни швидкостей тіл або їхніх частин.**

Розглянемо, які сили характеризують цю взаємодію і є причиною зміни швидкостей тіл або їхніх частин, а саме: силу тяжіння, силу всесвітнього тяжіння, силу Архімеда, силу пружності, силу тертя ковзання, силу тертя кочення.

Про силу тяжіння, силу всесвітнього тяжіння, силу Архімеда йтиметься пізніше, тому ми розглянемо сили, про які потрібно знати під час розв'язування задач.

Під час деформації тіл їхні частинки зміщуються одна відносно одної. Унаслідок цього змінюються відстані між атомами чи молекулами, з яких складаються тіла. Це приводить до зміни сил взаємодії між частинками. Якщо відстані між ними збільшуються (наприклад, під час розтягування), то силою міжмолекулярної взаємодії є сила притягання. Якщо відстані між частинками зменшуються (наприклад, під час стискування), то силою міжмолекулярної взаємодії є сила відштовхування. Тобто під час деформації тіла в ньому виникають сили, що прагнуть повернути його в попередній стан. Ці сили і є силами пружності, а властивість називають пружністю. Зміну форми або розмірів тіла називають деформацією.

**Сила пружності – це сила, що виникає внаслідок деформації тіла і напрямлена протилежно до напрямку переміщення частинок тіла під час деформації.**

Властивості пружних тіл (пружин) детально вивчав понад 300 років тому англійський природодослідник Роберт Гук (1635–1703). Його досліді дали змогу сформулювати закон, який назвали законом Гука:

**сила пружності прямо пропорційна деформації (видовженню) тіла (пружини) і напрямлена протилежно до напрямку переміщення частинки тіла під час деформації.**

Якщо видовження тіла, тобто зміну його довжини, позначити через  $x$ , а силу пружності – через  $F_{\text{пр}}$ , то закон Гука можна математично записати так:

$$F_{\text{пр}} = -kx,$$

де  $k$  – коефіцієнт пропорційності – **жорсткість тіла**. У кожного тіла своє значення жорсткості. Знак « $-$ » означає, що сила пружності напрямлена протилежно до напрямку деформації тіла.

**Спостереження 1.** Автомобіль після вимкнення двигуна через певний час зупиняється. Шайба, рухаючись по льоду, також згодом зупиниться. Зупиняється і велосипед, якщо припинити крутити педалі.

*Що ж є причиною зменшення швидкості руху тіл?*

Ви знаєте, що причиною зміни швидкості руху тіл є дія одного тіла на інше. Отже, у випадках, які розглядали, на кожне рухоме тіло діяла сила. Тіла зупинилися, тому що на них діяла сила, яка напрямлена протилежно до напрямку їхнього руху – **сила тертя  $F_{\text{тер}}$** .

**Сила тертя виникає під час взаємодії між твердими тілами в місцях їхнього дотику і перешкоджає їхньому відносному переміщенню.**

44

Однією з причин виникнення сили тертя є шорсткість стичних поверхонь тіл. Навіть гладенькі на вигляд поверхні тіл мають нерівності, горбики і подряпини.

Друга причина тертя – взаємне притягання молекул стичних поверхонь тіл. Якщо поверхні тіл дуже добре відполіровано, то їхні молекули розміщуються так близько одна до одної, що помітно починає проявлятися притягання між ними.

Розрізняють кілька видів сил тертя залежно від того, як взаємодіють тертьові тіла: **сила тертя спокою, сила тертя ковзання, сила тертя кочення**.

**Дослід 1.** Покладемо брусок на похилу дошку. Брусок перебуває у стані спокою. *Що утримує його від зісковзування вниз?* Тертя спокою забезпечує зчеплення бруска й дошки.

**Дослід 2.** Притисніть свою руку до зошита, що лежить на столі, і пересуньте його. Зошит рухатиметься відносно стола, але перебуватиме у спокої відносно вашої долоні. *За допомогою чого ви примусили цей зошит рухатися?* За допомогою тертя спокою зошита об руку.

Тертя спокою переміщує вантажі, що розміщуються на рухомій стрічці транспортера, запобігає розв'язуванню шнурків, утримує шурупи і цвяхи в дошці тощо.

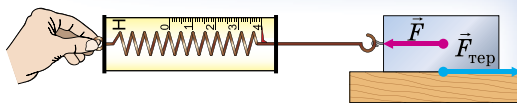
Якщо тіло ковзає по іншому тілі, то тертя, що виникає при цьому, називають **тертям ковзання**. Таке тертя виникає під час руху саней або лиж по снігу, підосів по землі.

Якщо одне тіло котиться по іншому, то говорять про **тертя кочення**. Під час кочення коліс вагона, автомобіля, воза, під час перекочування бочок по землі проявляється тертя.

*А від чого залежить сила тертя?*

**Дослід 3.** Прикріпимо до бруска динамометр і будемо тягнути його, надаючи бруску рівномірного руху (мал. 31). При цьому динамометр буде

показувати силу, з якою ми тягнемо брусок, а отже, і силу тертя, яка виникає під час руху бруска по поверхні стола. Покладемо на брусок тягарці й повторимо дослід. Динамометр зафіксує більшу силу тертя.



Мал. 31. Виникнення сили тертя ковзання

**Що більша сила притискає тіло до поверхні, то більша сила тертя виникає при цьому.**

Виконаємо попередній дослід, але тіло будемо рухати по поверхні скла, по бетону. З'ясуємо, що сила тертя залежить від якості поверхні, по якій рухається тіло.

**Сила тертя залежить від матеріалу і якості обробки поверхні, по якій рухається тіло.**

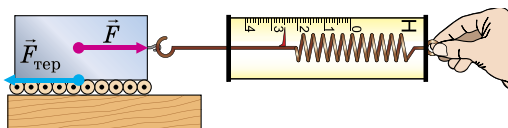
Силу тертя ковзання визначають за формулою:

$$F_{\text{тер}} = \mu N,$$

де  $F_{\text{тер}}$  – сила тертя ковзання;  $N$  – сила реакції опори, що за значенням дорівнює силі тиску тіла на поверхню ковзання;  $\mu$  – коефіцієнт тертя ковзання. Якщо поверхня ковзання горизонтальна, то сила тиску на неї дорівнює вазі тіла, тобто  $N = P = gt$ , а  $F_{\text{тер}} = \mu gt$ , де  $g = 9,81 \text{ Н/кг}$ ,  $t$  – маса тіла.

45

**Дослід 4.** Покладемо дерев'яний брусок на круглі олівці (мал. 32). Потягнемо брусок динамометром, олівці за рахунок тертя між ними і бруском з дошкою почнуть обертатися, а брусок – рухатися. Сила тертя кочення буде меншою за силу тертя ковзання.



Мал. 32. Виникнення сили тертя кочення

**При однакових навантаженнях сила тертя кочення завжди менша за силу тертя ковзання.**

**Спостереження 2.** Коли ви намагаєтеся бігти у воді басейну, річки або озера, то відчуваєте великий опір з боку води і не можете швидко бігти.

Переносячи легкі великі предмети у вітряну погоду, ви відчуваєте значний опір з боку вітру, вам дуже важко йти.

Коли в безвітряну погоду ви стоїте біля дороги і повз вас проїжджає великий вантажний автомобіль на великій швидкості, то ви обов'язково відчуєте вітер, що супроводжує рух автомобіля. Що більша швидкість автомобіля, то більша сила цього вітру.

**Сили тертя, які виникають під час руху тіл у рідині або газі, називають силами опору середовища.**

Сила опору залежить від форми тіла. Ракетам, літакам, підводним човнам, кораблям і автомобілям надають обтічної форми, тобто форми, за якої сила опору найменша.



**ЧИ ЗНАЄТЕ ВИ, ЩО...**

● У давні часи пружні властивості деяких матеріалів (зокрема, такого дерева, як тис) дали змогу нашим пращурам винайти лук – ручну зброю, призначену для метання стріл за допомогою сили пружності натягнутої тятиви.

● Винайдений приблизно 12 тис. років тому лук упродовж багатьох століть був основною зброєю майже всіх племен і народів світу. До винайдення вогнепальної зброї лук був найефективнішим бойовим знаряддям. Англійські лучники могли пускати до 14 стріл щохвилини, що під час масового використання луків у бою створювало цілу хмару стріл. Наприклад, кількість стріл, випущених у битві при Азенкурі (під час Столітньої війни), налічувала близько 6 мільйонів!

Широке застосування цієї грізної зброї в середні віки викликало обґрунтований протест з боку певних кіл суспільства. Однак боротьба за «лучне роззброєння» не мала успіху, і лук як бойову зброю продовжували використовувати ще протягом 500 років.

● У наш час стрільба з лука є лише одним із видів спорту, який включено в програму Олімпійських ігор.

**ЗАПИТАННЯ ДО ВИВЧЕНОГО**

1. Яку силу називають силою пружності? Коли вона виникає?
2. Як формулюється закон Гука?
3. Які є види тертя?
4. Як визначається сила тертя ковзання?
5. Які сили називають силами опору?

46

**ЗАДАЧІ ТА ВПРАВИ****Розв'язуємо разом**

1. Назвіть сили, які діють на тягар, підвішений до кінця спіральної пружини.

**Відповідь:** на тягар діє сила тяжіння, яка напрямлена вертикально вниз, і сила пружності, яка напрямлена протилежно до видовження пружини.

2. Яке призначення насічок на робочих поверхнях плоскогубців?

**Відповідь:** за рахунок насічок збільшується тертя між деталлю і робочими поверхнями плоскогубців, що забезпечує надійніше утримання деталі під час роботи.

3. Сталеве тіло масою 50 кг тягнуть по льоду. Яка сила тертя виникає при цьому?

Дано:

$$m = 50 \text{ кг}$$

$$g = 10 \text{ Н/кг}$$

$$\mu = 0,02$$

$$F_{\text{тер}} = ?$$

Розв'язання

Для визначення сили тертя скористаємося формулою:

$$F_{\text{тер}} = \mu g m.$$

$$F_{\text{тер}} = 0,02 \cdot 10 \text{ Н/кг} \cdot 50 \text{ кг} = 10 \text{ Н}.$$

**Відповідь:** 10 Н.

**Рівень А**

**93.** Дві пружини скріпили одними кінцями, а за вільні кінці їх розтягують руками. Пружина з жорсткістю 100 Н/м розтягнулася на 5 см. Яка жорсткість другої пружини, якщо вона розтягнулася на 1 см?

**94.** Жорсткість дроту, довжина якого  $l$ , дорівнює  $k$ . Яка жорсткість такого самого дроту, довжина якого  $l/2$ ?

**95.** Визначте видовження троса жорсткістю  $k = 100 \text{ кН/м}$  під час буксирування автомобіля масою  $m = 2 \text{ т}$  з прискоренням  $a = 0,5 \text{ м/с}^2$ . Тертям знехтувати.

**96.** Динамометр складається з двох циліндрів, з'єднаних легкою пружиною. Визначте відношення мас циліндрів, якщо динамометр показує силу  $F$ , коли до циліндрів прикладено сили  $F_1$  і  $F_2$ .

**97.** Покладіть на аркуш паперу тягарець. Потягніть аркуш спочатку плавно (з незначним прискоренням), а потім ривком. Поясніть результат досліду.

**98.** Яку горизонтальну силу  $F$  треба прикласти до тіла масою  $m = 2 \text{ кг}$ , яке лежить на горизонтальній поверхні, щоб воно почало ковзати по поверхні з прискоренням  $a = 0,2 \text{ м/с}^2$ ? Коефіцієнт тертя між тілом і поверхнею  $\mu = 0,02$ .

**99.** Під дією якої сили рухається автомобіль?

**100.** У тепловоза масою  $M$  усі колеса ведучі. Коефіцієнт тертя ковзання між колесами і рейками  $\mu$ . Яку максимальну силу тяги  $F$  може розвинути тепловоз на горизонтальній ділянці колії?

**101.** Визначте прискорення тіла, що ковзає по похилій площині, яка утворює кут  $\alpha = 30^\circ$  з горизонталлю. Коефіцієнт тертя між тілом і площиною  $\mu = 0,3$ .

**102.** На похилій площині завдовжки  $50 \text{ см}$  і заввишки  $10 \text{ см}$  лежить брусок масою  $2 \text{ кг}$ . За допомогою динамометра, паралельного площині, брусок спочатку тягнуть зі сталою швидкістю вгору, а потім униз. Визначте різницю показів динамометра.

**103.** На похилій площині завдовжки  $5 \text{ м}$  і заввишки  $3 \text{ м}$  лежить тіло масою  $50 \text{ кг}$ . Яку силу, спрямовану вздовж площини, треба прикласти, щоб утримати тіло; тягнути його рівномірно вгору; тягнути вгору з прискоренням  $1 \text{ м/с}^2$ ? Коефіцієнт тертя  $0,2$ .

**104.** Велотрек має заокруглення радіуса  $40 \text{ м}$ . У цьому місці його нахил становить  $40^\circ$  до горизонту. На яку швидкість руху розраховано цей нахил?



### Рівень Б

**105.** Тіло масою  $m$  прикріплено до двох послідовно з'єднаних пружин з жорсткостями  $k_1$  і  $k_2$ . До вільного кінця прикладено силу  $F$ . Яке сумарне видовження пружин, якщо коливання припинились?

**106.** Для вимірювання маси космонавта на орбітальній станції використовується рухомий стілець масою  $m_0$ , прикріплений до пружини. При одному й тому самому стисненні пружини сам стілець повертається в початкове положення за час  $t_0$ , а стілець із космонавтом – за час  $t$ . Яка маса космонавта? Рух стільця вважати рівноприскореним.

**107.** Дві послідовно з'єднані пружини з жорсткостями  $k_1$  і  $k_2$  треба замінити однією. Яка її жорсткість?

**108.** Дві паралельно з'єднані пружини з жорсткостями  $k_1$  і  $k_2$  треба замінити однією. Яка її жорсткість?

**109.** Яка сила  $T$  діє в поперечному перерізі однорідного стержня завдовжки  $l$  на відстані  $x$  від того кінця, до якого прикладено горизонтальну силу  $F$ ? Стержень рухається по горизонтальній поверхні без тертя.

**110.** На горизонтальній поверхні лежить дошка масою  $M = 10 \text{ кг}$ , а на дошці – брусок масою  $m = 1 \text{ кг}$ . Яку силу треба прикласти до дошки, щоб

брусок зісковзнув з неї? Коефіцієнт тертя між дошкою і бруском  $\mu = 0,1$ . Тертям між дошкою і поверхнею знехтувати.

**111.** Камінь ковзає по горизонтальній поверхні. Сила тертя між каменем і поверхнею становить 6 % від сили тяжіння, що діє на камінь. Пройшовши шлях  $s = 20,4$  м, камінь зупиняється. Яка початкова швидкість каменя?

**112.** У ліфті на похилій площині, що утворює кут  $\alpha$  з горизонталлю, лежить тіло масою  $m$ . Ліфт рухається з прискоренням  $a$ , спрямованим угору. При якому коефіцієнті тертя  $\mu$  між тілом і площиною воно не буде ковзати вниз? Визначте силу тиску  $F$  тіла на площину.

### Є над чим замислитися

**113.** Тіло масою  $m$  тягнуть рівномірно вгору по похилій площині за допомогою пружини з жорсткістю  $k$ . Коефіцієнт тертя між тілом і похилою площиною дорівнює  $\mu$ , кут нахилу похилої площини до горизонту –  $\alpha$ , кут між пружиною і похилою площиною –  $\beta$ . Визначте видовження пружини  $x$ .

**114.** Санки з'їжджають з гори заввишки  $h$  і далі їдуть горизонтально. Кут нахилу гори до горизонту  $\alpha$ . Коефіцієнт тертя однаковий на всьому шляху і дорівнює  $\mu$ . Виняток становить короткий відрізок шляху, де схил плавно переходить у горизонтальну дорогу; тут  $\mu = 0$ . Визначте шлях, який санки проходять по горизонтальній ділянці до повної зупинки.

**115.** Який має бути мінімальний коефіцієнт тертя  $\mu$  між шинами автомобіля та асфальтом, щоб автомобіль, який їде зі швидкістю  $v = 50$  км/год, зміг зробити поворот по дузі кола радіуса  $R = 100$  м?

**116.** Велосипедистка під час повороту по дузі радіуса  $R$  нахилиється до центра дуги так, що кут між площиною велосипеда і поверхнею землі дорівнює  $\alpha$ . Визначте швидкість  $v$  велосипедистки.

**117.** Магніт масою 50 г прилип до вертикальної сталеві плити. Для рівномірного ковзання магніту вниз треба прикласти силу 1,5 Н. Визначте силу тиску магніту на плиту. Яку вертикальну силу треба прикласти для рівномірного ковзання магніту вгору? Коефіцієнт тертя 0,2.

**118.** Хлопчик тягне санки масою  $m$  із силою  $F$ , спрямованою під кутом  $\alpha$  до горизонту. Коефіцієнт тертя між санками і дорогою дорівнює  $\mu$ . Визначте прискорення санок. За якої сили  $F_0$  рух буде рівномірний?

**119.** Тіло починає рух з початковою швидкістю  $v_0$  вгору по похилій площині, яка утворює кут  $\alpha$  з горизонталлю. Через який час  $t$  тіло повернеться в точку, з якої почало рух? Вважати  $\mu < \tan \alpha$ .

## § 14. ІНЕРЦІАЛЬНІ СИСТЕМИ ВІДЛІКУ. ПРИНЦИП ВІДНОСНОСТІ ГАЛІЛЕЯ

У першому законі Ньютона, який ви вивчали в 9-му класі, мова йшла про рівномірний прямолінійний рух. Рух можна розглядати тільки в якій-небудь системі відліку. Виникають запитання: *у якій же системі відліку виконується перший закон? Чи можна вважати, що він виконується в будь-якій системі відліку?* Навіть наближений аналіз механічних явищ показує, що закон інерції виконується не в усіх системах відліку.

Розглянемо простий дослід: покладемо м'яч на горизонтальний столик у вагоні і спостерігатимемо за рухом м'яча. Якщо поїзд перебуває у стані спокою відносно поверхні землі, то і м'яч зберігає стан спокою доти, доки ми не подіємо на нього іншим тілом (наприклад, рукою). Отже, у системі відліку, пов'язаній із Землею, закон інерції виконується.

Нехай тепер поїзд рухається рівномірно і прямолінійно відносно поверхні землі. У цьому випадку в системі відліку, пов'язаній з поїздом, м'яч зберігає стан спокою, а в системі відліку, пов'язаній із Землею, – рівномірного і прямолінійного руху.

Отже, закон інерції виконується не тільки в системі відліку, пов'язаній із Землею, але й в усіх системах відліку, які рухаються відносно Землі рівномірно і прямолінійно.

Уявімо, що поїзд швидко збільшує свою швидкість, або, навпаки, різко гальмує, або круто повертає (в усіх цих випадках він рухається з прискоренням відносно Землі). Тоді відносно Землі м'яч, як і раніше, зберігає рівномірний і прямолінійний рух, який він мав до початку прискорення поїзда. Але відносно поїзда м'яч сам собою виходить із стану спокою, хоч і немає тіл, які виводили б його із цього стану.

Отже, у системі відліку, пов'язаній із прискореним рухом поїзда відносно Землі, закон інерції не виконується.

**Системи відліку, у яких виконується закон інерції, називають *інерціальними*, а в яких не виконується, – *неінерціальними*.**

Перший закон Ньютона дає можливість визначити, чи є система відліку інерціальною. Для цього потрібно вибрати яке-небудь тіло, для якого сили, що діють, зрівноважені, і простежити за тим, як рухається це тіло відносно системи відліку, що цікавить нас. Якщо рух рівномірний і прямолінійний (в окремому випадку – спокій), то система інерціальна; якщо рух нерівномірний – система неінерціальна.

З усіх систем відліку на практиці найважливішою є система відліку, пов'язана із Землею. Вище ми з'ясували, що в цій системі завжди виконується закон інерції. Але це твердження було результатом «грубо» поставлених дослідів, наприклад вивчення поведінки покладеного на горизонтальний стіл м'яча. Більш точні дослідження переконують у зворотному.

Розглянемо один із таких дослідів – так званий дослід Фуко. Він полягає в спостереженні за площиною гойдання математичного маятника. Для того щоб коливання можна було спостерігати протягом достатньо великого інтервалу часу, французький фізик **Жан Фуко** (1850 р.) використовував маятник завдовжки 67 м і масою вантажу 28 кг (мал. 33).

Сили пружності й тяжіння, що діють на вантаж маятника, перебувають весь час у площині його гойдання і, отже, вивести його із цієї площини не можуть. Оскільки вздовж осі, перпендикулярної до площини гойдань, жодне тіло на маятник не діє, то маятник за інерцією має зберігати стан спокою. Проте дослід Фуко показав, що площина гойдання маятника



Мал. 33. Маятник Фуко в Пантеоні (Франція)

поступово повертається відносно Землі. Отже, закон інерції вздовж осі, перпендикулярної до площини гойдання, не виконується.

Виявилось, що площина гойдань маятника Фуко зберігає практично незмінне положення в системі відліку, пов'язаній із центром Сонця, осі координат якої напрямлені на віддалені зірки (ця система відліку не обертається разом із Сонцем).

Виникає запитання: *чи існують строго інерціальні системи?* Ньютон, формулюючи закон інерції і включаючи його в число основних законів динаміки, стверджував тим самим, що такі системи відліку в природі існують. Насправді, якщо у природі має місце закон інерції, то має існувати і така система відліку, де він виконується абсолютно строго, тобто інерціальна система відліку. А якщо існує хоча б одна така система, то із цього випливає, що їх є незліченна множина, тому що будь-яка система відліку, що рухається рівномірно і прямолінійно відносно інерціальної, буде також інерціальною.

Отже, можна сказати, що перший закон строго виконується лише в інерціальних системах, практично – у системі відліку, пов'язаній із Сонцем; приблизно – у системі відліку, пов'язаній із Землею.

Закон інерції має глибокий фізичний зміст. З нього випливають уявлення про те, якими мають бути властивості простору, щоб рух тіл у ньому підкорявся законам механіки Ньютона. Оскільки закон в інерціальних системах виконується незалежно від напрямку, то властивості простору в цих системах відліку мають бути однаковими в усіх напрямках. Іншими словами, у механіці Ньютона простір ізотропний (ізотропність – однаковість властивостей в усіх напрямках). Далі із закону інерції випливає, що простір має бути також і однорідним: тобто в ньому немає яких-небудь точок, які виділялися б відносно інших, адже всі точки простору рівноправні.

У давнину простір вважали неоднорідним, окремі його точки наділяли особливими властивостями і приписували їх центру Землі, приймаючи останній за абсолютно нерухому точку, до якої нібито «прагнуть» усі важкі тіла («центр всесвіту»). І система відліку, пов'язана із центром Землі, вважалася абсолютно нерухомою. Пізніше система відліку, пов'язана із Землею, втратила свою «винятковість». Те ж саме можна сказати про системи, пов'язані із Сонцем та іншими небесними тілами.

Але питання про те, чи існує у природі яка-небудь абсолютно нерухома система відліку, залишалося відкритим.

Ньютон вважав, що абсолютно нерухомим є «порожній» простір, який, за його уявленнями, існує незалежно від матерії, – на зразок гігантського «порожнього ящика». Через однорідність й ізотропність такого простору розміщена в ньому матеріальна точка нескінченно довго рухалася б у будь-якому напрямку рівномірно і прямолінійно, підкоряючись закону інерції. Отже, система відліку, пов'язана з порожнім простором, була б строго інерціальною.

Але розвиток фізики показав, що простір не існує окремо від матерії. Простір – це тільки форма існування матеріальних тіл, а не якийсь окремий «порожній ящик».

Тому ніякої системи відліку, пов'язаної з «порожнім» простором, не існує. Систему відліку можна пов'язати тільки з матеріальними тілами.

У зв'язку з тим, що всі матеріальні тіла у Всесвіті безперервно рухаються одне відносно одного, то у природі не існує ніякої абсолютно нерухомої системи відліку.



Закон інерції стверджує наявність інерціальних систем відліку. Виникає запитання: *чи однаково протікають фізичні явища в різних інерціальних системах?*

Першим поставив це запитання Галілей. У своїй книжці «Діалог про дві найголовніші системи світу – птолемеєву і коперникову» він відповів на нього так: *«Розмістіть себе з яким-небудь знайомим у залі під палубою якого-небудь великого корабля і пустіть туди мух, метеликів та інших подібних маленьких тварин, які літають; нехай там також буде велика посудина з водою і в ній рибки; підвісьте там також до стелі кухню, з якого краплина за краплиною витікала б вода в іншу посудину, що стоїть під нею. Поки корабель стоїть на місці, спостерігайте, як ці тварини, які літають, з рівною швидкістю літатимуть на всі боки; падаючі краплини потраплятимуть у підставлену посудину; і ви, кидаючи знайомому яку-небудь річ, не будете примушені кидати її з більшою силою в один бік, ніж в інший... змусьте привести в рух корабель з якою завгодно швидкістю. І ось ви не побачите і щонайменшої зміни в усіх названих явищах і за жодним з них не в змозі будете судити – чи рухається корабель, чи стоїть на місці».*

Таким чином, Галілей із спостережень вивів, що рівномірний і прямолінійний рух корабля не впливає на механічні явища, що відбуваються в приміщенні під палубою.

**В усіх інерціальних системах відліку всі механічні явища протікають однаково за однакових початкових умов.**

51

Це твердження називають механічним принципом відносності Галілея. Принцип відносності Галілей сформулював тільки для механічних явищ. Це зрозуміло, оскільки за часів Галілея найрозвиненішим розділом фізики була механіка, а про електромагнітні явища у той час люди ще не знали. Пізніше механічний принцип відносності узагальнив Ейнштейн для всіх фізичних явищ.

У принципі відносності мова йде про початкові умови. Річ у тому, що характер руху дуже сильно від них залежить. Наприклад, якщо тіло просто відпустити, то воно рухатиметься по вертикалі, а якщо його при цьому штовхнути горизонтально, тобто змінити початкові умови, то воно рухатиметься по параболі.

Оскільки в усіх інерціальних системах усі механічні явища протікають однаково, то виявити рівномірний і прямолінійний рух по механічних дослідах, що виконуються в будь-якій із цих систем, не можна. Отже, ми дійшли висновку, що **ніякими механічними дослідами і спостереженнями, проведеними всередині інерціальної системи, не можна виявити, чи перебуває система у стані спокою або рівномірного прямолінійного руху.**

Наша Земля рухається навколо Сонця зі швидкістю близько 30 м/с. Оскільки радіус орбіти дуже великий, то її кривизна незначна, і в першому наближенні ми можемо вважати, що Земля рухається рівномірно і прямолінійно. Проте ми цього руху не помічаємо. Це відбувається тому, що виявити рух Землі за механічними явищами, що протікають на Землі, неможливо (якщо, звичайно, не вдаватися до спеціально поставлених дуже точних дослідів). Із цієї причини так довго утримувалася й віра людей у нерухомість Землі.

Оскільки фізичні явища підкоряються певним фізичним законам, то подібність протікання явищ у різних інерціальних системах відліку означає, що і відповідні закони фізики в цих системах також однакові.



## ЗАПИТАННЯ ДО ВИВЧЕНОГО

1. Які системи відліку називають інерціальними? Неінерціальними?
2. Якими дослідami можна довести інерціальність або неінерціальність системи відліку?
3. Одна система відліку інерціальна. Як за рухом іншої системи відліку встановити, чи є перша інерціальною чи ні?
4. Чи можна на досліді всередині інерціальної системи відліку визначити її власний рух?
5. У чому полягає принцип відносності Галілея? Якими дослідami його можна перевірити? Чим визначається значення цього принципу для науки?
6. Схарактеризуйте за загальним планом фізичне поняття «інерціальна система відліку».

## § 15. МАСА ТІЛА

Усі фізичні тіла довкола нас – хоч кам'яна сокира, хоч пристрій, для виготовлення якого було використано високі технології, – мають деякі спільні властивості. Однією з таких властивостей є здатність тіл притягуватися до інших тіл завдяки гравітаційній взаємодії. Мірою цієї властивості тіл є фізична величина – маса тіла. У фізиці прийнято, що маса тіл – це міра гравітації, її позначають літерою  $m$ .

Поняття маси – одне з найскладніших у фізиці. У подальшому ви будете докладніше ознайомлюватися із цією фізичною величиною. Поки що ми маємо запам'ятати, що кожне фізичне тіло – Сонце, людина, краплина роси, мікрочастинка будь-якої речовини – має масу.

**Маса – фізична величина, одна з основних характеристик матерії, що визначає її інерційні, енергетичні та гравітаційні властивості.**

Поняття маси ввів у фізику Ісаак Ньютон (1643–1727), до нього користувалися тільки поняттям ваги. У праці «Математичні начала натуральної філософії» (1687) Ньютон спочатку визначив «кількість матерії» у фізичному тілі як добуток його густини на об'єм. Далі він указав, що в тому самому розумінні буде використовуватися термін «маса». Нарешті, учений уводить поняття маси в закони фізики: спочатку у другий закон Ньютона (через кількість руху), а потім – у закон всесвітнього тяжіння, звідки випливає, що вага пропорційна масі.

Ньютон використовував тільки два розуміння маси: міра інертності й джерело тяжіння. Тлумачення її як міри «кількості матерії» – не більш ніж наочна ілюстрація, і воно зазнало критики ще в XIX ст. як нефізичне та беззмислове.

Маса тіла – це величина, що характеризує міру інертності тіла. Вона вимірюється відношенням модуля прискорення еталона маси до модуля прискорення тіла під час їхньої взаємодії:

$$\frac{a_{\text{ет}}}{a} = \frac{m}{m_{\text{ет}}}; \quad m = \frac{a_{\text{ет}}}{a} m_{\text{ет}},$$

де  $a$ ,  $m$  – модуль прискорення і маса тіла;  $a_{\text{ет}}$ ,  $m_{\text{ет}}$  – модуль прискорення і маса еталона.

Що більша маса тіла, то повільніше змінює воно свою швидкість під дією певної сили. Тривалий час одним з головних законів природи вважався закон збереження маси. Однак у XX ст. з'ясувалося, що цей закон є окремим випадком закону збереження енергії і в деяких ситуаціях (ядерні реакції, релятивістська механіка тощо) він не виконується.

Одиницею маси в СІ є **один кілограм (1 кг)**. У Гаусовій системі (СГС) одиницею маси є **один грам (1 г)**. В атомній фізиці заведено прирівнювати масу до **атомної одиниці маси (а.о.м.)**, у фізиці твердого тіла – до маси електрона. Крім цих одиниць, що використовуються в науці, існує чимало історичних одиниць маси, які зберегли свою окрему сферу використання: фунт, унція, карат, тонна тощо. В астрономії одиницею для порівняння мас небесних тіл є маса Сонця.



### ЗАПИТАННЯ ДО ВИВЧЕНОГО

1. Що таке маса тіла?
2. Хто вперше ввів поняття «маса тіла»?
3. Які одиниці маси тіла ви знаєте?



Знайдіть відомості про одиниці маси, з'ясуйте, у яких галузях вони використовуються.

## § 16. ЗАКОНИ НЬЮТОНА

Як ви знаєте з курсу 9-го класу, закони Ньютона – це фундаментальні закони класичної механіки.

Ісаак Ньютон уперше опублікував їх у праці «Математичні начала...» та застосував для пояснення багатьох фізичних явищ, пов'язаних з рухом фізичних тіл.

Закони Ньютона разом з його ж законом всесвітнього тяжіння та апаратом математичного аналізу вперше у свій час надали пояснення низці фізичних явищ, починаючи з особливостей руху маятника та закінчуючи орбітами Місяця та планет. Закон збереження імпульсу, який Ньютон вивів як наслідок своїх другого та третього законів, також став першим з відомих законом збереження.

Закони Ньютона піддавались експериментальній перевірці протягом понад двохсот років. Для масштабів від  $10^{-6}$  м на швидкостях від 0 до 100 000 000 м/с вони дають задовільні результати. Але спеціальна теорія відносності Ейнштейна внесла свої корективи в закони Ньютона, ще більше розширивши сферу їхнього застосування.

Раніше за Ньютона закон інерції досить точно сформулював Декарт. Строге його формулювання в сучасному викладі таке:

**існують такі системи відліку, у яких центр мас будь-якого тіла, на яке не діють жодні сили, або сума сил, що діють на нього, дорівнює нулю, зберігає стан спокою або рівномірного прямолінійного руху, доки цей стан не змінять сили, застосовані до нього.**

Цей закон постулює існування систем відліку, у яких справджуються наступні два закони. Ці системи відліку мають назву інерційних, або Галілеєвих, тобто таких, які рухаються зі сталою швидкістю одна відносно іншої.

Ньютон у «Математичних началах...» сформулював перший закон механіки так:

**усяке тіло продовжує зберігати стан спокою або рівномірний і прямолінійний рух, поки і поскільки воно не потребує прикладеними силами зміни цього стану.**

Із сучасної точки зору таке формулювання незадовільне. По-перше, термін «тіло» слід замінити терміном «матеріальна точка», оскільки тіло кінце-

вих розмірів за відсутності зовнішніх сил може здійснювати й обертальний рух. Ньютон у своїй праці спирався на існування абсолютної нерухомої системи відліку, тобто абсолютного простору і часу, а ці уявлення сучасна фізика відкидає. З іншого боку, у довільній (наприклад, такий, що обертається) системі відліку закон інерції неправильний, тому ньютонівське формулювання було замінено постулатом існування інерціальних систем відліку.

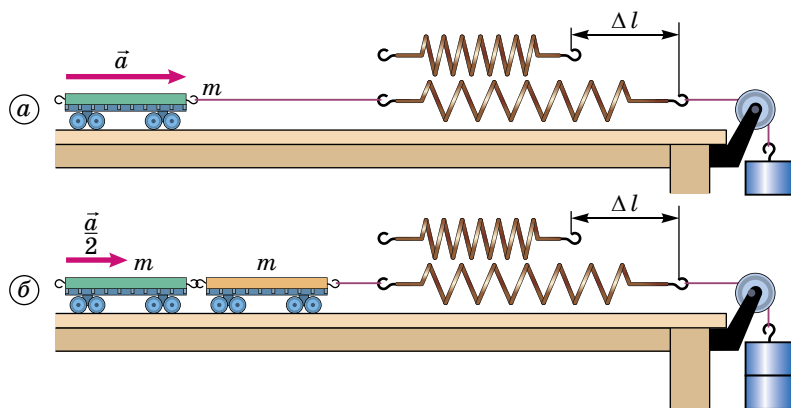
Щоб з'ясувати зв'язок між силою, що діє на тіло, і прискоренням руху тіла, слід виконати дослід.

Для проведення дослідів вибираємо тіло, яке діє на всі інші тіла з однакою силою. Таким тілом може слугувати розтягнута або стиснута пружина, у якій діє сила пружності. Від усіх інших сил вона відрізняється певною особливістю і залежить тільки від того, наскільки розтягнута або стиснута пружина, але не залежить від того, до якого тіла пружину прикріплено. Тому на будь-яке тіло, прикріплене до пружини, розтягнутої на певну довжину, діє одна й та сама сила – сила пружності пружини.

Оскільки сила одна й та сама, то якась величина має бути однакою для всіх тіл, що прискорюються цією силою. На досліді й слід з'ясувати, що це за величина.

Можна, наприклад, провести такий, на перший погляд простий, дослід. До візка відомої маси  $m$  прикріпимо один кінець пружини, а інший її кінець прикріпимо до нитки з вантажем, перекинутої через блок (мал. 34, а). Унаслідок притягання до поверхні землі вантаж рухається вниз і розтягує пружину. Вона, розтягнута на певну довжину  $\Delta l$ , діє силою пружності на візок і надає йому прискорення. Це прискорення можна виміряти, наприклад воно дорівнює  $a$ .

Повторимо дослід з двома візками однакової маси ( $2m$ ), з'єднаними разом (мал. 34, б). Нам треба виміряти прискорення візків при тому самому видовженні пружини, оскільки сила має бути незмінною. Щоб видовження пружини було таким самим, як на початку дослідів, потрібно підвісити до нитки інший вантаж. Дослід показує, що при тому самому видовженні пружини  $\Delta l$  прискорення двох візків дорівнює  $\frac{a}{2}$ . Якщо з'єднати три, чотири і більше візків, то при тому самому видовженні  $\Delta l$  пружини прискорення тіл буде у три, чотири і більше разів меншим, ніж одного візка. Виявляється, що зі збільшенням маси візка в певне число разів



Мал. 34. Прискорення візків силою

прискорення, якого набуває тіло при дії тієї самої сили, зменшується у стільки само разів. А це означає, що однаковим виявляється добуток маси візка і його прискорення.

Порівнюючи результати дослідів, можна зробити такий висновок:

**прискорення руху системи тіл прямо пропорційне силі, що діє на тіло, і обернено пропорційне масі цих тіл.**

Досліди допомагають зрозуміти взаємозв'язок прискорення, сили і маси, що справджується не тільки для візка. Замість нього можна взяти будь-яке інше тіло – залежність між прискоренням, силою і масою завжди буде тією самою. Це співвідношення і виражає другий закон Ньютона:

**прискорення, якого набуває тіло внаслідок взаємодії з іншим тілом, прямо пропорційне силі, що діє на нього, і обернено пропорційне його масі:**

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

Більш коректне формулювання другого закону Ньютона: рівнодійна сил, що діє на тіло, прямо пропорційна масі цього тіла та прискоренню, набутого ним під дією рівнодівної сил:  $\vec{F} = m\vec{a}$ .

Другий закон Ньютона виконується тільки в інерціальних системах відліку, бо тільки в них прискорення тіла обумовлено дією на це тіло інших тіл.

Коли ми вводили поняття маси тіла, то на основі дослідів з вимірювання прискорень двох взаємодіючих тіл ми з'ясували, що маси тіл, які взаємодіють, обернено пропорційні значенням прискорень:

$$\frac{m_1}{m_2} = -\frac{a_2}{a_1}, \text{ або } m_1 a_1 = -m_2 a_2.$$

У векторній формі це співвідношення набуває вигляду:

$$m_1 \vec{a}_1 = -m_2 \vec{a}_2.$$

Знак «-» означає, що прискорення тіл, які взаємодіють, завжди спрямовані у протилежні боки. Згідно з другим законом Ньютона, прискорення тіл спричинені силами  $\vec{F}_1 = m_1 \vec{a}_1$  і  $\vec{F}_2 = m_2 \vec{a}_2$ , що виникають при взаємодії тіл. Звідси слідує, що:

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

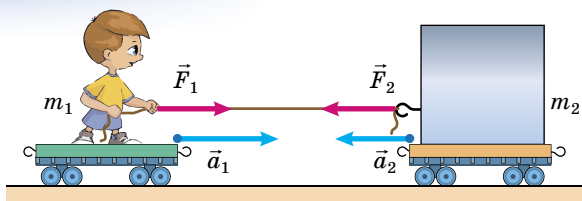
Цю рівність називають третім законом Ньютона.

**Тіла діють одне на одного із силами, рівними за модулем і протилежними за напрямком.**

Сили, що виникають під час взаємодії тіл, завжди мають однакову природу. Вони прикладені до різних тіл і тому не можуть урівноважувати одна одну. Додавати за правилами додавання векторів можна тільки сили, прикладені до одного тіла.

Людина діє на вантаж з такою самою за модулем силою, з якою вантаж діє на людину (мал. 35). Ці сили спрямовані у протилежні боки. Вони мають одну й ту саму фізичну природу – це пружні сили шнура, які надають обом тілам прискорення, обернено пропорційні масам тіл.





Мал. 35. Ілюстрація третього закону Ньютона

**ЗАПИТАННЯ ДО ВИВЧЕНОГО**

1. Сформулюйте перший закон Ньютона.
2. У чому полягає другий закон Ньютона?
3. Чи можна на підставі формули  $a = \frac{F}{m}$  сказати, що прискорення тіла  $a$  залежить від прикладеної до нього сили і від його маси?
4. Використовуючи другий закон Ньютона, сформулюйте перший закон Ньютона.
5. Сформулюйте третій закон Ньютона.
6. Напишіть формулу третього закону Ньютона.
7. Якими дослідями можна перевірити цей закон?

**ЗАДАЧІ ТА ВПРАВИ**

56

**Розв'язуємо разом**

**Дві основні задачі динаміки.** Другий закон Ньютона є загальним законом механічного руху тіл. Він пов'язує прискорення тіла даної маси з прикладеними до нього силами. Він дає змогу розв'язати дві основні задачі динаміки: 1) за силами, що діють на тіло, визначити кінематичні характеристики його руху; 2) за кінематичними характеристиками руху тіла визначити сили, що діють на нього.

Обидві задачі динаміки мають багато спільного в розв'язанні. Рух відбувається в результаті взаємодії даного тіла з іншими тілами. Ці взаємодії можна характеризувати силами. Додавши геометрично ці сили, ми можемо, використовуючи другий закон динаміки, визначити прискорення руху тіла.

Тому, розв'язуючи задачі з динаміки, спочатку треба вказати всі сили, які діють на дане тіло. При цьому слід зображати сили графічно правильно, точно вказувати їхні точки прикладання та їхній напрямок, оскільки від них залежить характер руху.

1. Тіло рухається вниз по похилій площині, кут нахилу якої  $45^\circ$  з горизонтом. Коефіцієнт тертя 0,4. Визначити прискорення руху тіла.

Дано:

$\alpha = 45^\circ$

$\mu = 0,4$

$a = ?$

**Розв'язання**

На дане тіло діє Земля, яка притягує його із силою  $m\vec{g}$ , що прикладена до центра тіла і напрямлена вертикально вниз. Крім того, на тіло діє похила площина із силою  $\vec{N}$ , яка прикладена до дотичної поверхні тіла і напрямлена перпендикулярно до нижньої поверхні. На тіло діє також сила тертя  $\vec{F}_{\text{тер}}$ , яка напрямлена у протилежний бік до руху тіла.

Після аналізу й запису умови задачі виконаємо малюнок.

Запишемо другий закон Ньютона у векторній формі:

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

Координатні осі найзручніше спрямувати вздовж похилої площини і перпендикулярно до неї. У цьому випадку переміщення вздовж осі  $Oy$  під час руху не буде, а отже, прискорення  $a_y$  буде дорівнювати нулю.

Запишемо другий закон Ньютона у проекціях на координатні осі.

Проекція сили  $\vec{N}$  на вісь  $Ox$  дорівнює нулю. Проекція сили  $\vec{F}_{\text{тер}}$  буде дорівнювати її значенню, але матиме знак «-», оскільки напрямлена протилежно до напрямку осі  $Ox$ . Проекція сили  $m\vec{g}$  на вісь  $Ox$  буде  $mg\sin\alpha$ . Знак проекції сили  $m\vec{g}$  буде додатним, оскільки вона напрямлена в напрямку осі  $Ox$ . У проекціях на вісь  $Ox$  другий закон Ньютона матиме вигляд:

$$ma = mg\sin\alpha - F_{\text{тер}}.$$

Проекція сили  $\vec{F}_{\text{тер}}$  на вісь  $Oy$  буде дорівнювати нулю. Проекція сили  $\vec{N}$  дорівнюватиме її значенню зі знаком «+». Проекція сили  $m\vec{g}$  буде  $mg\cos\alpha$  і матиме знак «-». Оскільки  $a_y = 0$ , то другий закон Ньютона у проекції на вісь  $Oy$  запишеться так:  $-mg\cos\alpha + N = 0$ .

Ці два рівняння містять невідомі:  $m$ ,  $a$ ,  $N$ ,  $F_{\text{тер}}$ . Для розв'язання задачі потрібно записати ще рівняння з тими самими невідомими, щоб число рівнянь дорівнювало числу невідомих. Тому для розв'язання досить записати вираз:

$$F_{\text{тер}} = \mu N = \mu mg.$$

Урахувавши всі вирази, отримаємо рівняння:  $ma = mg\sin\alpha - \mu mg\cos\alpha$ .

Скоротивши на  $m$ , отримаємо:  $a = g(\sin\alpha - \mu\cos\alpha)$ .

Підставивши значення, визначимо прискорення руху тіла:

$$a = 9,8 \text{ м/с}^2 \cdot (0,707 - 0,4 \cdot 0,707) = 4,16 \text{ м/с}^2.$$

Отже, ми бачимо, що тіло рухається вниз по похилій площині з прискоренням  $4,16 \text{ м/с}^2$ .

2. Пасажирський поїзд масою 400 т рухається зі швидкістю 40 км/год. Визначте силу гальмування, якщо гальмівний шлях поїзда – 200 м.

Дано:

$$\begin{aligned} m &= 400 \text{ т} = 4 \cdot 10^5 \text{ кг} \\ v_0 &= 40 \text{ км/год} = 11 \text{ м/с} \\ l &= 200 \text{ м} \end{aligned}$$

$F = ?$

Розв'язання

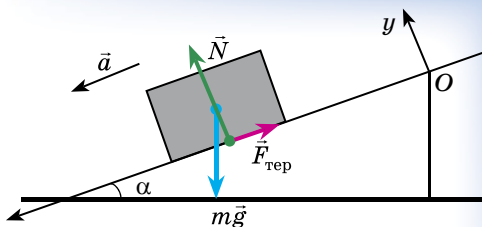
Гальмівна сила діє на всій ділянці, на якій відбувається гальмування, і сповільнює рух поїзда. Значення цієї сили можна визначити за формулою для другого закону Ньютона:  $F = ma$ .

З рівняння рівносповільненого руху:  $v^2 - v_0^2 = 2al$ .

При  $v = 0$  визначимо прискорення  $a = -\frac{v_0^2}{2l}$ . Тоді  $F = -m\frac{v_0^2}{2l}$ .

Знак «-» вказує на те, що гальмівна сила спрямована в бік, протилежний руху поїзда.

Перевіряємо одиницю одержаної величини:



$$[F] = \text{кг} \frac{\text{м}^2/\text{с}^2}{\text{м}} = \text{кг} \frac{\text{м}}{\text{с}^2} = \text{Н}.$$

Підставляючи числові значення, одержуємо:

$$F = -4 \cdot 10^5 \text{ кг} \frac{121 \text{ м}^2/\text{с}^2}{2 \cdot 200 \text{ м}} = -121\,000 \text{ Н} = -121 \text{ кН}.$$

*Відповідь:* -121 кН.

### Рівень А

**120.** Яке з двох тіл отримує більше прискорення за однакової дії на них: ящик масою 25 кг чи гиря масою 5 кг?

**121.** Автомобіль із вимкненим двигуном проїхав до повної зупинки по рівній горизонтальній дорозі ще якийсь час. Чи можна стверджувати, що весь час він рухався за інерцією?

**122.** Тіло рухається зі сталою швидкістю під дією кількох сил. Чи мож- на цей стан тіла розглядати як рух за інерцією?

**123.** Людина, впираючись руками у стіну вагона, хоче зрушити його з місця. Проте вагон зберігає стан спокою. Поясніть чому.

**124.** Із човна масою 0,5 т вибирають канат, поданий на баркас. Шляхи, що їх пройшли до зустрічі човен і баркас, дорівнюють відповідно 8 і 2 м. Яку масу має баркас?

**125.** Парашутистка спускається, рухаючись прямолінійно й рівномірно. Поясніть, дії яких сил компенсуються.

**126.** Як установиться поверхня бензину в цистерні під час рівномірного, прискореного й сповільненого руху поїзда?

**127.** Сила 200 Н діє на тіло масою 5 г. Визначте прискорення, з яким рухається тіло.

**128.** Визначте масу тіла, якому сила 5000 Н надає прискорення  $0,2 \text{ м/с}^2$ .

**129.** З яким прискоренням рухається тіло масою 300 кг, коли на нього діє сила 1500 Н?

**130.** Визначте масу тіла, якому сила 500 Н надає прискорення  $0,2 \text{ м/с}^2$ . Визначте переміщення тіла за 30 с руху із стану спокою.

**131.** Під дією сили 2,5 кН швидкість автомобіля масою 5 т збільшилася від 54 км/год до 72 км/год. Визначте прискорення, з яким рухався автомобіль, і час розгону.

**132.** Протягом 30 с людина жердиною відштовхує від пристані баржу, прикладаючи зусилля 400 Н. На яку відстань від пристані відпливе баржа, якщо її маса 300 т?

**133.** На два тіла діють однакові сили. Перше тіло має масу 50 г і рухається з прискоренням  $1 \text{ м/с}^2$ , а друге – з прискоренням  $1 \text{ см/с}^2$ . Яка маса другого тіла?

**134.** Сила тяги, що діє на автомобіль, дорівнює 1 кН, а опір рухові – 0,5 кН. Чи не суперечить це третьому закону Ньютона?

**135.** Барон Мюнхгаузен переконував, що сам себе витягнув за чуба з болота. Чому це неможливо?

**136.** Лінкор, зіткнувшись із маленьким пароплавом, може потопити його і майже не отримати при цьому пошкоджень. Чи не суперечить це третьому закону Ньютона?

**137.** Хлопчик і дівчинка тягнуть за динамометр у протилежні боки. Які покази динамометра, якщо хлопчик тягне із силою 300 Н, а дівчинка – 200 Н?

**Рівень Б**

**138.** Візок, рухаючись зі стану спокою під дією сили, пройшов шлях 40 см за деякий час. Коли на візок поклали тягарець масою 20 г, то під дією тієї самої сили він за той самий час пройшов шлях 20 см. Яка маса візка?

**139.** Чи можна стверджувати, що інерція одного з двох неоднакових тіл більша або менша? Відповідь поясніть.

**140.** Інертність тіла і маса тіла: що з них – фізична величина, а що – властивість матерії?

**141.** Стоячи у вагоні поїзда, що рухається рівномірно, ви підстрибнули. Чи опуститеся ви на те саме місце, звідки підстрибнули, відносно вагона? Відносно залізничного полотна? Яка із цих двох систем відліку є інерціальною? Чи є інерціальною системою карусель, штучний супутник Землі?

**142.** Порівняйте прискорення двох куль однакового радіуса під час взаємодії, якщо перша куля сталева, а друга – свинцева.

**143.** Електричне поле надає електрону прискорення  $2000 \text{ км/с}^2$ . Яке прискорення це поле буде надавати протону, якщо відомо, що маса протона приблизно у 2000 разів більша за масу електрона?

**144.** Сила  $F$  надає тілу масою  $m_1$  прискорення  $2 \text{ м/с}^2$ , а тілу масою  $m_2$  – прискорення  $3 \text{ м/с}^2$ . Якого прискорення під дією тієї самої сили набудуть обидва тіла, коли їх з'єднати одне з одним?

**145.** На тіло масою 1 кг подіяла сила 10 Н. Через який час модуль прискорення тіла буде  $10 \text{ м/с}^2$ ? Яке за значенням прискорення в той момент, коли сила тільки-но почала діяти на тіло? Відповідь обґрунтуйте.

**146.** Під дією якої сталої сили тіло масою 300 г, що перебувало у стані спокою, протягом 5 с пройде шлях 25 м?

**147.** Пасажирський поїзд масою 400 т рухається зі швидкістю 40 км/год. Визначте силу гальмування поїзда, якщо його гальмівний шлях – 200 м.

**148.** З яким прискоренням падають тіла на Марсі, якщо сила притягання тіл на його поверхні у 2,8 раза менша від сили притягання таких самих тіл на Землі?

**149.** М'яч масою 0,5 кг після удару, що тривав 0,2 с, набуває швидкості 10 м/с. Визначте середню силу удару.

**150.** Поїзд масою 500 т після припинення тяги локомотива під дією сили тертя, яка дорівнює 98 кН, зупиняється через 1 хв. З якою швидкістю їхав поїзд?

**151.** Вагон масою 20 т рухається рівносповільнено, маючи початкову швидкість руху 54 км/год і прискорення  $0,3 \text{ м/с}^2$ . Яка сила гальмування діє на вагон? Через який час вагон зупиниться? Який шлях вагон пройде до зупинки?

**152.** Чи однаково буфери стискаються під час зіткнення двох пасажирських залізничних вагонів, якщо: 1) один із них перебуває у спокої; 2) обидва рухаються; 3) один вагон заповнений пасажирами, а другий – порожній? Жорсткість буферних пружин вагонів однакова.

**153.** З погляду фізики дію не можна відрізнити від протидії. Поясніть чому.

**154.** Якщо сили, з якими взаємодіють тіло і динамометр під час зважування, не зрівноважуються (бо прикладені до різних тіл), то чому тіло і динамометр після певного видовження його пружини нерухомі?

**Є над чим замислитися**

**155.** З якою силою треба діяти на тіло масою  $m = 5 \text{ кг}$ , щоб воно падало вертикально вниз із прискоренням  $a = 15 \text{ м/с}^2$ ?

**156.** Дріт витримує вантаж масою  $m_{\max} = 450$  кг. З яким максимальним прискоренням можна підіймати вантаж масою  $m = 400$  кг, щоб дріт не обірвався?

**157.** Мотузка витримує вантаж масою  $m_1 = 110$  кг під час його руху з прискоренням, спрямованим угору, і вантаж масою  $m_2 = 690$  кг при русі з тим самим прискоренням, спрямованим униз. Якої маси вантаж витримає ця мотузка під час підйому його зі сталою швидкістю?

**158.** Через блок, підвішений на динамометрі, перекинута шнур, на кінцях якого закріплено тіла з масами  $m_1 = 2$  кг і  $m_2 = 8$  кг. Що покаже динамометр?

## § 17. ГРАВІТАЦІЙНА ВЗАЄМОДІЯ. ЗАКОН ВСЕСВІТНЬОГО ТЯЖІННЯ

Усі тіла Всесвіту, як небесні, так і ті, що розташовані на Землі, взаємно притягуються. Навіть якщо ми не помічаємо притягання між звичайними предметами, що оточують нас у повсякденному житті (наприклад, між книжками, зошитами, меблями тощо), то це лише тому, що воно в цих випадках дуже слабе.

**Взаємодію, яка властива всім тілам Всесвіту і проявляється взаємним притяганням одне до одного, називають *гравітаційною*, а саме явище всесвітнього тяжіння — *гравітацією* (від лат. *gravitas* — «тяжкість»).**

60

Гравітаційна взаємодія здійснюється за допомогою особливого виду матерії, який називають **гравітаційним полем**. Таке поле існує навколо будь-якого тіла — планети, каменя, людини або аркуша паперу. При цьому тіло, що створює гравітаційне поле, діє ним на будь-яке інше тіло так, що в того з'являється прискорення, завжди напрямлене до джерела поля. Поява такого прискорення й означає, що між тілами виникає притягання.

Гравітаційне поле не слід плутати з електромагнітними полями, які існують навколо наелектризованих тіл, провідників зі струмом і магнітів.

Цікавою особливістю гравітаційного поля, якої не мають електромагнітні поля, є його всепроникна здатність. Якщо від електричних і магнітних полів можна захиститися за допомогою спеціальних металевих екранів, то від гравітаційного поля захиститися нічим не можна: воно проникає крізь будь-які матеріали.

Для виявлення гравітаційного екранування проводилися спеціальні експерименти. Але вони дали негативний результат: якщо між двома тілами помістити у вигляді екрана третє тіло, то притягання між двома першими тілами не послаблюється. В усякому разі, якщо екранування гравітації й існує, то воно настільки слабе, що лежить за межами тієї точності, якої досягнуто в сучасних експериментах. Тому з великою впевненістю можна сказати, що ніякого «кейворита», який, за словами одного з героїв роману Г. Уеллса «Перші люди на Місяці», «не підкоряється силі тяжіння і перегороджує взаємне тяжіння між тілами», у природі не існує.

У середині XVII ст. багатьох учених цікавило питання про те, як сила взаємного притягання між тілами залежить від відстані між ними. З якою силою, наприклад, Сонце притягує до себе планети? З приводу цього питання **Роберт Гук** (1635–1703) у 1674 р. писав: «Сили, що притягають, значніше виявляють себе, що ближче тіло, на яке вони діють, до центра дії. Як це збільшення залежить від відстані, я ще не визначив дослідом». Сучасникам Гука ніяк не вдавалося знайти вираз для сили



тяжіння і на його основі визначити траєкторії планет. Хоча в Гука були із цього приводу припущення, але довести їх він не міг.

Вираз для сили тяжіння Ньютон отримав ще в 1666 р., коли йому було лише 24 роки. Тоді, порівнюючи висновки своєї теорії з даними досліду, він виявив розбіжності і тому не публікував свої результати. Як наслідок закон, який він відкрив, залишався невідомий людям протягом багатьох років. Проте потім з'ясувалося, що дані, якими учений користувався, були дуже неточними. Коли ж Ньютону стали відомі результати точніших вимірювань, він поновив обчислення.

Ньютон установив, як залежить від відстані прискорення вільного падіння. Він помітив, що поблизу поверхні землі, тобто на відстані 6400 км від її центра, це прискорення дорівнює  $9,8 \text{ м/с}^2$ , а на відстані, у 60 разів більшій, біля Місяця, це прискорення виявляється у 3600 разів менше, ніж на Землі. Але  $3600 = 60^2$ . Отже, прискорення вільного падіння зменшується обернено пропорційно до квадрата відстані від центра Землі. Але прискорення, за другим законом Ньютона, пропорційне силі. Отже, причиною такого зменшення прискорення є аналогічна залежність сили тяжіння від відстані.

Остаточну формулу сили притягання можна отримати, якщо врахувати, що ця сила має бути пропорційна масам тіл  $m_1$  і  $m_2$ . Таким чином,

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2},$$

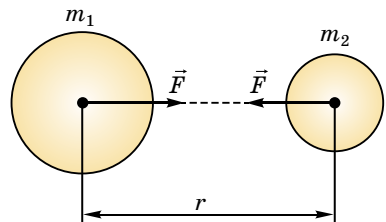
де  $G$  – коефіцієнт пропорційності, який називають **гравітаційною сталою**.

Так, Ньютон знайшов вираз для сили гравітаційної взаємодії Землі з тілами, що притягалися нею. Але інтуїція підказувала йому, що за отриманою формулою можна розраховувати і силу тяжіння, що діє між будь-якими іншими тілами Всесвіту, якщо тільки їхні розміри малі порівняно з відстанню  $r$  між ними. Тому він почав розглядати отриманий вираз як **закон всесвітнього тяжіння**, який справджується і для небесних тіл, і для тіл, що перебувають на Землі.

**Сила гравітаційного притягання будь-яких двох частинок прямо пропорційна добутку їхніх мас і обернено пропорційна квадрату відстані між ними.**

Закон всесвітнього тяжіння сформульовано для частинок, тобто для таких тіл, розміри яких значно менші за відстань  $r$  між ними. Проте одна особливість цього закону дає змогу використовувати його і в деяких інших випадках. Такою особливістю є обернено пропорційна залежність сили притягання саме від квадрата відстані між частинками, а не від третього, скажімо, або четвертого степеня відстані. Розрахунки показують, що завдяки цьому формулу  $F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$  можна застосовувати ще й для розрахунку сили притягання кулястих тіл зі сферично симетричним розподілом речовини, що перебувають на будь-якій відстані одне від одного. Під  $r$  у цьому випадку слід розуміти не відстань між ними, а відстань між їхніми центрами (мал. 36).

Формула  $F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$  справджується і для випадку, коли сферичне тіло довільних розмірів взаємодіє з деякою матеріальною точкою. Це й дає змогу застосовувати формулу закону всесвітнього тяжіння для розрахунку сили, з якою земна куля притягає до себе навколишні тіла.



Мал. 36. Гравітаційна взаємодія двох куль

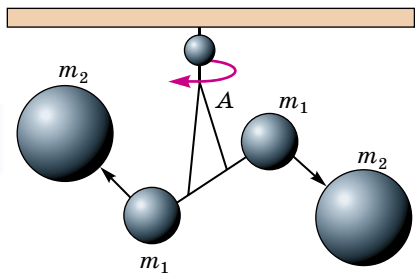
Коли Ньютон відкрив закон всесвітнього тяжіння, він не знав жодного числового значення мас небесних тіл, у тому числі й Землі. Невідомо йому було і значення сталої  $G$ .

Разом із тим **гравітаційна стала  $G$**  має для всіх тіл Всесвіту одне й те саме значення і є однією з фундаментальних фізичних констант. *Яким же чином можна визначити її значення?*

Із закону всесвітнього тяжіння виходить, що  $G = \frac{Fr^2}{m_1m_2}$ . Щоб визначити  $G$ , потрібно виміряти силу притягання  $F$  між тілами відомих мас  $m_1$  і  $m_2$  та відстань  $r$  між ними.

Перші вимірювання гравітаційної сталої було здійснено в середині XVIII ст. Оцінити, щоправда дуже грубо, значення  $G$  у той час удалося в результаті розгляду притягання маятника до гори, масу якої було визначено за допомогою геологічних методів.

Точні вимірювання гравітаційної сталої вперше провів у 1798 р. англійський фізик **Генрі Кавендіш** (1731–1810). За допомогою так званих крутильних терезів (мал. 37) учений по куту закручування нитки  $A$  зумів виміряти мізерно малу силу притягання між маленькими і великими металевими кулями. Для цього йому довелося використовувати дуже чутливі прилади, тому що навіть слабкі повітряні потоки могли спотворити вимірювання. Щоб уникнути сторонніх впливів, Кавендіш розмістив свої прилади в ящику, який залишив у кімнаті, а сам проводив спостереження за приладами за допомогою телескопа з іншого приміщення.



Мал. 37. Схема досліду Кавендіша

Досліди показали, що

$$G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2/\text{кг}^2.$$

**Фізичний зміст гравітаційної сталої** полягає в тому, що вона визначається силою, з якою притягуються два тіла масами по 1 кг кожне, що перебувають на відстані 1 м одне від одного.



### ЧИ ЗНАЄТЕ ВИ, ЩО...

Спроби пояснити спостережувану картину світу, і перш за все будову Сонячної системи, робило багато вчених. *Що пов'язує планети і Сонце в єдину систему? Яким законам підкоряється їхній рух?*

У II ст. н. е. давньогрецький учений Клавдій Птолемей розробив геоцентричну систему світу, згідно з якою всі спостережувані переміщення небесних світил пояснювалися їхнім рухом навколо нерухомої Землі.

У XVI ст. польський астроном Міколай Коперник запропонував геліоцентричну систему: у центрі якої є Сонце, а навколо нього рухаються планети та їхні супутники. *Що ж утримує планети, зокрема Землю, коли вони рухаються навколо Сонця?*

Якщо дотримуватися переконань Арістотеля і пов'язувати силу притягання тіл зі швидкістю їхнього руху, а не з прискоренням, то причиною руху планет є саме напрямок швидкості.

Ньютон пов'язав силу з прискоренням. Саме силу притягання Сонця природно вважати причиною обертання навколо нього Землі і планет.

Але не тільки планети притягуються до Сонця. Сонце також притягується планетами. Та й самі планети взаємодіють між собою. Одним із перших це зрозумів англійський учений Роберт Гук. Так, у 1674 р. він писав: *«Усі небесні тіла мають притягання, або силу тяжіння до свого центра, унаслідок чого вони не тільки*

*притягають власні частини і перешкоджають їм розлітатися, як спостерігаємо на Землі, але притягають також усі інші небесні тіла, що перебувають у сфері їх дії. Тому не тільки Сонце і Місяць мають вплив на рух Землі, але і Меркурій, і Венера, і Марс, і Юпітер, і Сатурн також своїм притяганням мають значний вплив на її рух. Подібним чином і Земля відповідним притяганням впливає на рух кожного із цих тіл».*

У своїй праці «Математичні начала...» Ньютон сформулював три фундаментальні закони (відомі як закони Ньютона). Відповідно до цих законів усі тіла Всесвіту, як небесні, так і ті, що перебувають на Землі, схильні до взаємного тяжіння, причому сили, з якими притягуються всі ці тіла, мають однакову природу і підкоряються одному й тому самому закону.

Згідно з легендою, думка про всесвітнє тяжіння осяяла Ньютона в той момент, коли він, відпочиваючи у своєму саду, побачив яблуко, що падає. Розповідають навіть, що знаменитій яблуні, плід якої зумів так «вчасно» впасти до ніг Ньютона, не дали зникнути безслідно і шматочки цього дерева нібито зберігаються в Англії й нині.

Відкриття закону всесвітнього тяжіння дало змогу Ньютону створити теорію руху небесних тіл, засновану на строгих математичних доведеннях. Нічого подібного в науці до того часу не було.

Ця теорія, безперечно, вразила сучасників Ньютона, але в них виникло запитання: *чому всі тіла притягуються одне до одного?* Відповіді на нього видатний фізик не дав. «Причину ж властивостей сили притягання я до цього часу не міг вивести з явища, гіпотез я не вдумую, — писав він у своїх «Математичних началах...». — Досить того, що притягання насправді існує, і діє згідно з викладеним законом, і є цілком достатнім для пояснення всіх рухів небесних тіл і моря».

Кажучи про море, Ньютон мав на увазі явище припливів, які обумовлені притяганням води Місяцем і Сонцем. За дві тисячі років до Ньютона над причинами цього явища роздумував Арістотель, який, проте, пояснити його не зміг. Для філософа це виявилось трагедією. «Спостерігаючи тривалий час це явище зі скелі Негропонта, він, охоплений відчаєм, кинувся в море і знайшов там добровільну смерть», — стверджував Галілей.



### ЗАПИТАННЯ ДО ВИВЧЕНОГО

1. Хто відкрив закон всесвітнього тяжіння?
2. Від яких фізичних величин залежить сила всесвітнього тяжіння?
3. Що таке гравітаційна стала?
4. Сформулюйте закон всесвітнього тяжіння.



Дослідіть явище виникнення припливів і відпливів.



### ЗАДАЧІ ТА ВПРАВИ

#### Розв'язуємо разом

Обчисліть силу притягання Місяця до Землі. Маса Місяця —  $7 \cdot 10^{22}$  кг, маса Землі —  $6 \cdot 10^{24}$  кг, відстань між Місяцем і Землею дорівнює 384 000 км.

Дано:

$$m_M = 7 \cdot 10^{22} \text{ кг}$$

$$m_Z = 6 \cdot 10^{24} \text{ кг}$$

$$r = 384\,000 \text{ км} = 3,84 \times 10^8 \text{ м}$$

$$G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2/\text{кг}^2$$

$F = ?$

Розв'язання

Щоб визначити силу притягання між Місяцем і Землею потрібно використати закон всесвітнього тяжіння, а саме:  $F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$ .

Підставивши значення величин, отримаємо:  

$$F = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2/\text{кг}^2 \cdot 7 \cdot 10^{22} \text{ кг} \cdot 6 \times 10^{24} \text{ кг} : (3,84 \cdot 10^8 \text{ м})^2 \approx 2 \cdot 10^{20} \text{ Н}.$$

Відповідь:  $2 \cdot 10^{20} \text{ Н}$ .

## Рівень А

159. Чому ми не помічаємо притягання між тілами, що нас оточують?

160. Як рухався б Місяць, якби зникло тяжіння між Місяцем і Землею?

161. Космічний корабель масою 8 т наблизився до орбітальної космічної станції масою 20 т на відстань 100 м. Визначте силу їхнього взаємного притягання.

162. Визначте силу тяжіння між Землею і Сонцем, якщо маси їх відповідно дорівнюють  $6 \cdot 10^{24}$  кг і  $2 \cdot 10^{30}$  кг, а відстань між ними –  $1,5 \cdot 10^{11}$  м.

163. Сила тяжіння між двома однаковими кулями 1 Н. Які маси куль, якщо відстань між їхніми центрами дорівнює 1 м?

164. Якою буде сила взаємного притягання між двома супутниками Землі масою по 3,87 т кожен, якщо вони наблизяться один до одного на відстань 100 м?

165. Визначте силу тяжіння між двома чотиривісними навантаженими вагонами масою по 70 т кожен, якщо відстань між центрами ваги вагонів 20 м.

## Рівень Б

166. Чи зможе космічний корабель летіти в космічному просторі по інерції прямолінійно?

167. За особистими спостереженнями установіть, чи можна тілом якої-небудь природи запобігти дії сили всесвітнього тяжіння.

168. Чи можна у формулі  $F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$ , не змінюючи правої частини, замість модуля сили поставити вектор сили? Чому?

169. У скільки разів зменшується сила притягання до Землі космічної ракети під час її віддалення від поверхні землі на відстань, що дорівнює радіусу Землі?

170. У скільки разів сила гравітаційного притягання на Марсі менша, ніж на Землі, якщо маса Марса становить 0,107 від маси Землі, а його радіус дорівнює  $3,4 \cdot 10^3$  км?

171. На якій відстані від поверхні Землі сила притягання космічного корабля до неї стане в 100 разів меншою, ніж на поверхні Землі?

172. Маса Землі та Плутона майже однакові, а відстані їх до Сонця відносяться як 1 : 40. Визначте співвідношення їхніх сил тяжіння до Сонця.

173. На прямій, що сполучає Землю і Місяць, визначте точку, у якій рівнодійна сил притягання Землі і Місяця дорівнює нулю. Відстань між Землею і Місяцем дорівнює 60 земним радіусам.

## Є над чим замислитися

174. Два важкоатлети, один з яких перебуває на екваторі, а другий – поблизу полюса Землі, можуть підняти штанги однакової маси. Кому з них це зробити легше?

175. На основі закону всесвітнього тяжіння обчисліть прискорення вільного падіння для тіл, що перебувають біля поверхні землі, і для тіл, що перебувають на висоті, яка дорівнює  $n$  радіусам Землі.

176. Обчисліть прискорення вільного падіння на астероїді, якщо його діаметр 30 км, вважаючи, що середня густина речовини астероїда така сама, як і Землі.



**177.** Уявіть, що через земну кулю уздовж діаметра вдалося прорити тунель. Як рухалося б тіло, яке упало б у цей тунель?

**178.** Сила притягання між двома алюмінієвими кулями дорівнює  $2 \cdot 10^{-10}$  Н. Відстань між центрами куль – 2,7 м. Визначте об'єми куль, якщо маса однієї кулі втричі більша від маси іншої.

**179.** Чому Земля надає всім тілам одного й того самого прискорення незалежно від їхньої маси?

## § 18. СИЛА ТЯЖІННЯ ТА ВАГА ТІЛА

Одним з виявів сили всесвітнього тяжіння є сила тяжіння – сила притягання тіл до Землі. Позначимо масу Землі через  $M$ , її радіус – через  $R$ , масу даного тіла – через  $m$ . Тоді сила, що діє на тіло поблизу поверхні землі, згідно із законом всесвітнього тяжіння, дорівнюватиме:

$$F = G \frac{Mm}{R^2}.$$

Це і є **сила тяжіння**. Вона напрямлена до центра Землі.

Якщо на тіло діє тільки ця сила (а всі інші сили зрівноважені), то воно вільно падає. Прискорення вільного падіння можна визначити за другим законом Ньютона:

$$g = \frac{F}{m} = G \frac{Mm}{R^2 m} = G \frac{M}{R^2}.$$

З формули випливає, що прискорення вільного падіння  $\vec{g}$  не залежить від маси  $m$  тіла, а отже, воно однакове для всіх тіл. Це цікава властивість сили всесвітнього тяжіння, а отже, і сили тяжіння. Її дослідним шляхом виявив ще Галілей. Цікава тому, що за другим законом Ньютона прискорення тіла має бути обернено пропорційним до маси. Але сама сила тяжіння пропорційна масі тіла, на яке вона діє. Саме тому прискорення вільного падіння однакове для всіх тіл.

Тепер для сили тяжіння можна записати вираз:  $\vec{F} = m\vec{g}$ .

По суті, формула  $g = G \frac{M}{R^2}$ , як і другий закон Ньютона, справджується, коли вільне падіння розглядається відносно інерціальної системи відліку. На поверхні землі інерціальною системою відліку можуть бути системи відліку, пов'язані з полюсами Землі, що не беруть участі в її добовому обертанні. Решта точок земної поверхні рухається по колах із доцентровими прискореннями, тому системи відліку, пов'язані із цими точками, неінерціальні. На них другий закон Ньютона не поширюється.

Обертанням Землі зумовлюється те, що прискорення *вільного* падіння, виміряне відносно якого-небудь тіла на поверхні землі, на різних широтах неоднакове.

Іншою, менш істотною причиною того, що прискорення вільного падіння в різних пунктах Землі неоднакове, є сплюснутість земної кулі біля полюсів.

Досліди показують: прискорення вільного падіння, виміряне відносно поверхні Землі поблизу полюсів, дорівнює приблизно  $9,83 \text{ м/с}^2$ , на екваторі –  $9,78 \text{ м/с}^2$ , а на широті  $45^\circ$  –  $9,81 \text{ м/с}^2$ .

Ці значення показують, що прискорення вільного падіння в різних районах земної кулі відрізняються між собою дуже мало. Вони дуже мало від-

різняються і від значення, обчисленого за формулою  $g = \frac{GM}{R^2}$ ,  $g \approx 9,83 \text{ м/с}^2$ . Тому під час грубих розрахунків нехтують неінерціальністю системи



відліку, пов'язаної з Землею, і відмінністю форми Землі від сферичної! Прискорення вільного падіння вважають усюди однаковим і обчислюють за формулою  $g = G \frac{M}{R^2}$ .

У деяких районах земної кулі прискорення вільного падіння відрізняється від наведеного вище значення ще з однієї причини. Такі відхилення спостерігаються в тих місцях, де в надрах Землі залягають породи, густина яких більша або менша від середньої густини Землі. Там, де є поклади порід, що мають більшу густину, значення  $g$  більше. Це дає змогу геологам за вимірюваннями значення  $g$  знаходити родовища корисних копалин.

Отже, сила тяжіння, а значить, і прискорення вільного падіння змінюються з віддаленням від Землі. Якщо тіло перебуває на висоті  $h$  над Землею, то модуль прискорення вільного падіння  $g$  визначають за формулою:

$$g = G \frac{M}{(R + h)^2}.$$

Так, на висоті 300 км прискорення вільного падіння зменшується на  $1 \text{ м/с}^2$ . Із цієї формули випливає, що, навіть коли тіло перебуває над Землею в кілька десятків або сотень метрів, навіть багатьох кілометрів, силу тяжіння можна вважати сталою, такою, що не залежить від положення тіла. Тільки тому вільне падіння поблизу Землі й можна вважати **рівноприскореним рухом**.

Нехай яке-небудь тіло, наприклад куля, лежить на горизонтальній опорі (мал. 38). Куля взаємодіє із Землею, і якби вона була вільною, то під дією сили тяжіння падала б на Землю з прискоренням  $g$ . Але падінню кулі перешкоджає опора.

Куля й опора взаємодіють. Куля діє на опору із силою  $\vec{P}$ , рівною за модулем силі тяжіння  $m\vec{g}$ , а опора на кулю – з рівною за модулем, але протилежно напрямленою силою реакції опори  $\vec{N}$ .

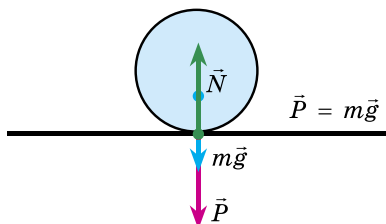
**Силу  $\vec{P}$ , з якою тіло внаслідок його притягання до Землі діє на опору або підвіс, називають вагою.**

Вагу тіла визначають за формулою:

$$\vec{P} = m\vec{g}.$$

Важливо зрозуміти і запам'ятати, що вага – це сила, прикладена до опори, а не до тіла. До тіла прикладено лише силу тяжіння і силу реакції опори, що врівноважують одна одну.

Інколи плутають вагу тіла з його масою. По-перше, це різні фізичні величини, з яких вага – векторна величина, а маса визначається лише числовим значенням. Вони характеризують різні властивості тіл і мають



Мал. 38. Взаємодія кулі з поверхнею

різні одиниці: для ваги – ньютон, для маси – кілограм. По-друге, кожне тіло завжди має певну незмінну масу, а вага тіла може змінюватися, якщо опора або підвіс нерівномірно рухається.

Розглянемо випадок, коли тіло разом із пружинними терезами рухається відносно Землі з прискоренням, але не здійснює вільного падіння. Для цього можна, не випускаючи терезів із рук, просто різко опустити їх

униз, надавши їм певного прискорення  $\vec{a}$ , направленого вниз (мал. 39, а). Легко помітити, що при цьому стрілка терезів підніметься вгору. Це означає, що вага тіла стала меншою, ніж вона була тоді, коли терези й тіло були у спокої. Чому зменшилась вага?

На тіло діють: сила тяжіння  $\vec{F} = m\vec{g}$ , направлена вниз, і сила пружності  $\vec{F}_{\text{пр}}$  пружини терезів, направлена вгору. Разом вони й надають тілу прискорення  $\vec{a}$ . За другим законом Ньютона:

$$\vec{F}_{\text{пр}} + m\vec{g} = m\vec{a}.$$

Усі три вектори, що входять до цього рівняння, паралельні осі  $Oy$ , яку ми спрямували вертикально вниз (мал. 39, а). Тому для проекцій цих векторів на вісь  $Oy$  формула  $\vec{F}_{\text{пр}} + m\vec{g} = m\vec{a}$  матиме вигляд:

$$(F_{\text{пр}})_y + mg_y = ma_y.$$

Вектори  $\vec{g}$  і  $\vec{a}$  однаково напрямлені уздовж осі  $Oy$ , тому їхні проекції додатні й дорівнюють модулям самих векторів:  $g_y = g$ ,  $a_y = a$ . А вектор  $\vec{F}_{\text{пр}}$  напрямлений протилежно до осі  $Oy$ , отже, його проекція від'ємна:  $(F_{\text{пр}})_y = -F_{\text{пр}}$ . Тому рівняння  $(F_{\text{пр}})_y + mg_y = ma_y$  можна записати у вигляді:  $-F_{\text{пр}} + mg = ma$ , або  $F_{\text{пр}} = mg - ma$ .

Вага  $P$  тіла за модулем дорівнює силі  $F_{\text{пр}}$  (за третім законом Ньютона), тому:

$$P = mg - ma.$$

Звідси бачимо, що коли  $a < g$ , то вага тіла менша за силу тяжіння  $mg$ , тобто менша від ваги нерухомого тіла.

**Якщо тіло разом з опорою чи підвісом рухається з прискоренням, напрямленим так само, як прискорення вільного падіння, то вага тіла менша за вагу нерухомого тіла.**

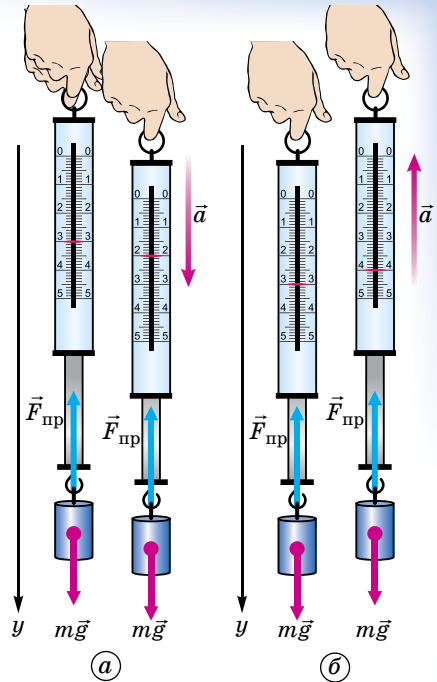
Нагадаємо ще раз, що йдеться про зменшення ваги, а не сили тяжіння.

Якщо терези з підвішеним до них тілом різко підняти *вгору*, надавши їм прискорення  $\vec{a}$ , направленого вгору (мал. 39, б), то стрілка терезів опуститься, показуючи, що вага тіла збільшилася. Наведені вище міркування правильні й для цього випадку з тією лише відмінністю, що тепер проекція вектора  $\vec{a}$  на вісь  $Oy$  від'ємна, тому формула для модуля ваги набуває вигляду:

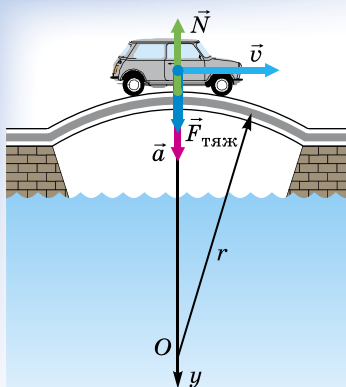
$$P = mg + ma.$$

Тепер вага тіла більша за силу тяжіння  $mg$ , тобто більша від ваги нерухомого тіла.

**Якщо тіло рухається з прискоренням, напрямленим протилежно до прискорення вільного падіння, то вага тіла більша за вагу нерухомого тіла.**



Мал. 39. Зміна ваги тіла, що рухається з прискоренням



Мал. 40. Зміна ваги автомобіля під час прискореного руху

Збільшення ваги тіла, спричинене його прискореним рухом, називають **перевантаженням**.

Вага збільшується або зменшується не тільки тоді, коли тіло, яке рухається прискорено, підвішене до пружини або пружинних терез. Це саме стосується будь-якого підвісу, будь-якої опори.

Наведемо деякі приклади зміни ваги тіла під час його прискореного руху.

Автомобіль, що рухається по опуклому мосту (мал. 40), легший від того самого автомобіля, що стоїть на тому самому мосту.

Справді, рух по опуклому мосту – це рух по частині кола. Тому автомобіль рухається з доцентровим прискоренням, модуль якого дорівнює:

$$a = \frac{v^2}{r},$$

де  $v$  – швидкість руху автомобіля;  $r$  – радіус кривизни моста. У момент, коли автомобіль перебуває в найвищій точці моста, це прискорення напрямлене вертикально вниз. Його надає автомобілю рівнодійна сили тяжіння  $\vec{F} = m\vec{g}$  і сили  $\vec{N}$  реакції моста.

Рівняння, що виражає другий закон Ньютона у векторній формі, запишемо так:

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

Спрямуємо координатну вісь  $Oy$  вертикально вниз і запишемо рівняння у проекціях на цю вісь:

$$mg_y + N_y = ma_y.$$

Зрозуміло, що  $g_y = g$ ,  $N_y = -N$  і  $a_y = a = \frac{v^2}{r}$ . Тоді  $mg - N = m \frac{v^2}{r}$ , звідки

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

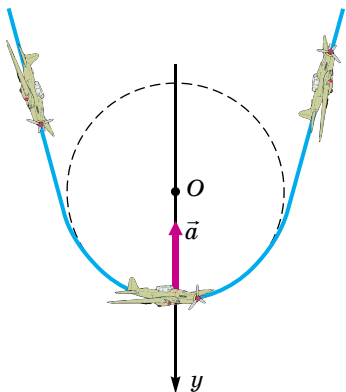
Вага автомобіля  $\vec{P}$  (сила, з якою він тисне на міст), за третім законом Ньютона, напрямлена протилежно до сили реакції моста  $\vec{N}$ , а за модулем ці сили рівні, отже,

$$P = N = m \left( g - \frac{v^2}{r} \right); P < mg.$$

Так само зменшується й вага людей, які йдуть в автомобілі по опуклому мосту. Причому, що більша швидкість руху автомобіля, то менша вага.

Льотчик, що виводить літак із пікірування (мал. 41), у нижній частині траєкторії зазнає перевантаження.

Справді, у цій частині траєкторії літак рухається по колу з доцентровим прискоренням,



Мал. 41. Перевантаження льотчика під час руху літака

напрямленим до його центра вздовж вертикалі вгору. Модуль прискорення дорівнює:

$$a = \frac{v^2}{r}.$$

Але його проекція на вертикальну вісь, напрямлену вниз, від'ємна:

$$a_y = -a = -\frac{v^2}{r}.$$

Таким чином, вага льотчика, тобто сила, з якою він тисне на опору (сидіння), за формулою  $P = mg + ma$  визначається так:

$$P = m(g + a) = m\left(g + \frac{v^2}{r}\right); \quad P > mg.$$

Отже, вага льотчика більша від «нормальної» ваги, що дорівнює силі тяжіння  $mg$ , на величину  $\frac{mv^2}{r}$ . Якщо під час виходу з пікірування доцентрове прискорення  $\frac{v^2}{r}$  перевищує за модулем прискорення вільного падіння  $g$  в  $n$  разів  $\left(\frac{v^2}{r} \approx ng\right)$ , то вага льотчика

$$P = m(g + ng) = mg(n + 1),$$

тобто вона буде в  $n + 1$  разів більша від «нормальної» ваги льотчика.

Під час перевантаження збільшується також вага внутрішніх органів льотчика, збільшується сила, з якою вони діють один на одного і на його кістяк (скелет). Це спричиняє болісні відчуття, а надмірне перевантаження може бути небезпечним для здоров'я. Натреновані пілоти витримують перевантаження до  $10mg$  (зазвичай перевантаження виражають не через величину  $mg$ , а через величину  $g$  і кажуть, що перевантаження дорівнює, наприклад,  $10g$ ).



### ЗАПИТАННЯ ДО ВИВЧЕНОГО

1. Що таке сила тяжіння?
2. Що таке вага тіла?
3. Як змінюється вага тіла під час його прискореного руху?
4. Чи змінюється вага тіла, якщо воно рухається з прискоренням у горизонтальному напрямку?
5. Як змінюється вага космонавта під час старту ракети, яка виводить космічний корабель на орбіту?
6. Як змінюється вага космонавта під час гальмування космічного корабля, який приземлюється?
7. Що можна сказати про вагу льотчика, який здійснює фігуру «мертва петля», коли він перебуває в нижній і верхній точках фігури?
8. Чим різняться між собою сила тяжіння, вага тіла і маса тіла?



Дослідіть вплив невагомості на організм людини.



### ЗАДАЧІ ТА ВПРАВИ

#### Розв'язуємо разом

1. Обчисліть масу Землі, якщо відомо, що прискорення вільного падіння поблизу її поверхні дорівнює  $9,8 \text{ м/с}^2$ . Радіус Землі прийняти рівним  $6370 \text{ км}$ .

Дано:

$$g = 9,8 \text{ м/с}^2$$

$$R = 6370 \text{ км} = 6,37 \cdot 10^6 \text{ м}$$

$$G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2/\text{кг}^2$$

 $M = ?$ 

Розв'язання

Масу Землі не можна, звичайно, виміряти, поклавши її на терези. Але її можна обчислити, користуючись формулою для прискорення вільного падіння:

$$g = G \frac{M}{R^2}.$$

Звідки для маси Землі матимемо:  $M = \frac{gR^2}{G}$ .

Підставивши відомі значення, отримаємо:

$$M = \frac{9,8 \text{ м/с}^2 \cdot (6,37 \cdot 10^6 \text{ м})^2}{6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2/\text{кг}^2} \approx 6,0 \cdot 10^{24} \text{ кг}.$$

**Відповідь:**  $6,0 \cdot 10^{24} \text{ кг}$ .

### Рівень А

**180.** Визначте вагу нерухомого тіла, якщо його маса – 2 кг; 400 г; 800 мг.

**181.** Визначте масу тіла, вага якого становить  $10^{-5}$  Н; 1 Н; 49 Н.

**182.** Студент, маса якого дорівнює 70 кг, перебуває в ліфті. Визначте вагу студента: 1) перед початком піднімання; 2) на початку піднімання з прискоренням  $3 \text{ м/с}^2$ ; 3) під час руху із сталою швидкістю  $5 \text{ м/с}$ .

**183.** Космічна ракета під час старту з поверхні Землі рухається вертикально з прискоренням  $20 \text{ м/с}^2$ . Визначте вагу льотчика-космонавта в кабіні, якщо його маса 80 кг. Якого перевантаження зазнає льотчик?

**184.** Фобос і Деймос – два природні супутники Марса. Фобос обертається ближче до центра планети, Деймос – далі. У кого з них більша швидкість обертання навколо планети? Орбіти супутників майже колові.

**185.** Шахтна кліть у стані спокою важить 2500 Н. З яким прискоренням опускається кліть, якщо її вага зменшилася до 2000 Н?

**186.** У шахту опускається рівноприскорено баддя, вага якої у стані спокою становить 2800 Н. За перші 10 с баддя проходить 35 м. Яка вага бадді в русі?

**187.** Дитина на лижах вагою 0,5 кН рухається зі швидкістю  $20 \text{ м/с}$  по вгнутій, а потім по опуклій ділянках шляху, які мають однакові радіуси кривизни – по 20 м. Визначте вагу дитини в середній точці кожної ділянки.

**188.** З якою швидкістю має їхати велосипедистка по середній частині опуклого моста з радіусом кривизни 10 м, щоб не чинити тиску на міст?

### Рівень Б

**189.** Ящик із брусом усередині ковзає без тертя вниз по похилій площині. Чи тиснутиме брусок на передню стінку ящика, якщо тертям між ним і основою знехтувати?

**190.** Від чого залежить перевантаження, яке зазнає людина в ракеті, що піднімається вертикально: від швидкості ракети в кожний момент часу чи від її прискорення?

**191.** У посудину циліндричної форми, що має невеликий отвір у бічній стінці біля дна, налили води. Чи витікатиме вода через отвір: а) під час вільного падіння посудини; б) під час падіння посудини в повітрі? Дією потоку повітря на витікання струменя знехтувати.



**192.** Уявіть, що ви перебуваєте в супутнику, що обертається навколо Землі, та тримаєте в руці один кінець натягнутої нитки з кулькою, прив'язаною на другому кінці. Як рухатиметься кулька після легкого поштовху вбік відносно стінок кабіни супутника?

**193.** У скільки разів швидше мала б обертатися Земля, щоб тіла на екваторі не мали ваги,  $g = 9,8 \text{ м/с}^2$ .

**194.** Лижниця масою 50 кг спускається з гори висотою 10 м. Визначте силу тиску спортсменки на лижі в нижній точці западини.

**195.** На якій відстані від центра Землі супутник (так званий синхронний супутник), зможе «висіти» над однією і тією самою точкою земної поверхні ( $g = 10 \text{ м/с}^2$ )?

### Є над чим замислитися

**196.** Льотчики-космонавти звикають до перевантажень, тренуючись на спеціальній центрифугі (типу каруселі). Скільки обертів має робити центрифуга, щоб перевантаження становило  $12g$ ? Радіус обертання – 7 м. Скільки буде «важити» космонавт під час такого перевантаження, якщо його маса 70 кг?

**197.** Припустимо, що, підлетівши до планети, кораблю була надана горизонтальна швидкість 11 км/с. Ця швидкість забезпечила політ корабля по коловій орбіті радіусом 9100 км. Яке прискорення вільного падіння на поверхні планети, якщо її радіус – 8800 км?

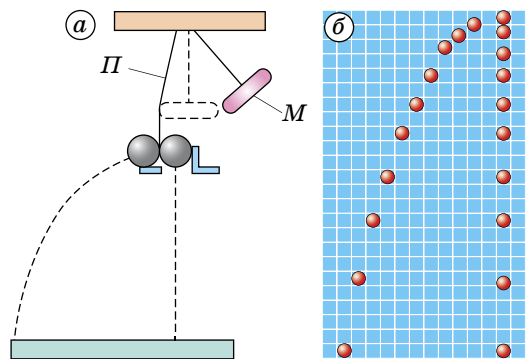
**198.** Час обертання Юпітера у 12 разів більший за час обертання Землі навколо Сонця. Яка відстань від Юпітера до Сонця, якщо відстань від Землі до Сонця становить  $150 \cdot 10^9 \text{ м}$ ? Орбіти вважати коловими.

**199.** Супутник обертається по коловій орбіті навколо Землі. Яка його лінійна швидкість, якщо на тій висоті, де летить супутник, сила тяжіння в  $n$  разів менша, ніж на поверхні Землі?

## § 19. РУХ ТІЛА В ПОЛІ СИЛИ ТЯЖІННЯ. ВІЛЬНЕ ПАДІННЯ

У 1638 р. в Лейдені вийшла книжка Галілея «Бесіди і математичні докази двох нових наук». Четвертий розділ цієї книжки називався «Про рух киданих тіл». Не без зусиль удалося вченому переконати людей у тому, що в безповітряному просторі «дробинка свинцю має падати з такою самою швидкістю, як гарматне ядро». Але коли Галілей розповів світу про те, що ядро, яке вилетіло з гармати в горизонтальному напрямку, перебуває в польоті стільки само часу, як і ядро, що просто випало з її жерла на Землю, йому не повірили. Але це дійсно так: тіло, кинуте з деякої висоти в горизонтальному напрямку, рухається до Землі протягом такого самого часу, начебто воно просто впало з тієї самої висоти вертикально вниз.

Щоб переконатися в цьому, скористаємося приладом, принцип дії якого ілюструє малюнок 42, а. Після удару молоточком  $M$  по пружній пластині  $\Pi$  кульки починають падати і, хоча мають відмінність



Мал. 42. Рух тіл, кинутих горизонтально і вертикально

у траєкторіях, одночасно досягають Землі. На малюнку 42, б зображено стробоскопічну фотографію кульок, які падають. Для отримання цієї фотографії дослід проводили в темноті, а кульки через однакові інтервали часу освітлювали яскравим спалахом світла. При цьому затвор фотоапарата був відкритий доти, доки кульки не впали на Землю. Ми бачимо, що в одні й ті самі моменти часу, коли відбувалися спалахи світла, обидві кульки перебували на однаковій висоті, і тому вони одночасно досягли Землі.

Час вільного падіння з висоти  $h$  (поблизу поверхні Землі) можна знайти за формулою  $s = \frac{at^2}{2}$ . Замінивши у формулі  $s$  на  $h$ ,  $a$  на  $g$ , отримаємо:  $h = \frac{gt^2}{2}$ , звідки після нескладних перетворень маємо:  $t = \sqrt{\frac{2h}{g}}$ .

Такий самий час перебуватиме в польоті і тіло, кинуте з тієї самої висоти в горизонтальному напрямку. У цьому випадку, як стверджував Галілей, «до рівномірного безперешкодного руху приєднується інший, що спричиняється силою тяжіння, завдяки чому виникає складний рух, що складається з рівномірного горизонтального і, зрозуміло, прискореного рухів».

За час  $t = \sqrt{\frac{2h}{g}}$ , рухаючись у горизонтальному напрямку зі швидкістю  $v_0$  (тобто з тією швидкістю, з якою його кинули), тіло переміститься по горизонталі на відстань  $l = v_0 t = v_0 \sqrt{\frac{2h}{g}}$ .

Із цієї формули випливає, що **дальність польоту тіла, кинутого в горизонтальному напрямку, пропорційна початковій швидкості руху тіла і збільшується зі збільшенням висоти кидання.**

Щоб з'ясувати, по якій траєкторії рухається в цьому випадку тіло, проведемо дослід. Приєднаємо до водопровідного крана гумову трубку з накопичником і спрямуємо струмінь води в горизонтальному напрямку. Частинки води при цьому рухатимуться точно так, як і кинуте в тому самому напрямку тіло. Відкручуючи або, навпаки, закручуючи кран, можна змінити початкову швидкість струменя і тим самим дальність польоту частинок води, проте в усіх випадках струмінь води матиме форму параболи. Щоб переконатися в цьому, позаду струменя слід поставити екран із заздалегідь накресленими на ньому параболami. Струмінь води точно відповідатиме зображенням на екрані лініям.

**Отже, вільно падаюче тіло, початкова швидкість якого горизонтальна, рухається по параболічній траєкторії.**

Часто доводиться розглядати рухи тіл, початкова швидкість яких не паралельна силі тяжіння, а напрямлена під певним кутом до неї (або до горизонту). Про таке тіло говорять, що воно кинуте під кутом до горизонту. Коли, наприклад, людина штовхає ядро, кидає диск або спис, вона надає цим предметам саме такої початкової швидкості. Під час артилерійської стрільби стволи гармат мають певний кут піднімання, так що снаряд, який вилетів, також отримує початкову швидкість, напрямлену під кутом до горизонту. Вважатимемо, що силою опору повітря можна знехтувати. Як у цьому випадку рухається тіло?

На малюнку 43, а показано стробоскопічний знімок кульки, яку кинуто під кутом  $60^\circ$  до горизонту. Сполучивши послідовні положення кульки плавною лінією, отримаємо траєкторію руху кульки – **параболу**.

Про те, що тіло, кинуте під кутом до горизонту, рухається по параболі, знав ще Галілей. І знову тільки закони руху Ньютона й закон всесвітнього тяжіння дають змогу пояснити це.

Припустимо, що з деякої точки  $O$  кинуте тіло з початковою швидкістю  $\vec{v}_0$ , напрямленою під кутом  $\alpha$  до горизонту. Візьмемо за початок відліку точку, з якої кинуте тіло, і вісь  $Ox$  спрямуємо горизонтально, а вісь  $Oy$  – вертикально (мал. 43, б).

За початок відліку часу візьмемо момент часу, коли тіло кинули.

З малюнка бачимо, що проекції початкової швидкості  $\vec{v}_0$  на осі  $Ox$  і  $Oy$  відповідно дорівнюють:

$$v_{0x} = v_0 \cos \alpha; \quad v_{0y} = v_0 \sin \alpha.$$

де  $v_0$  – модуль вектора початкової швидкості  $\vec{v}_0$ .

Оскільки на тіло діє тільки сила тяжіння, напрямлена по вертикалі вниз, то під час руху тіла змінюватиметься тільки проекція вектора швидкості  $\vec{v}$  на вісь  $Oy$ , а на вісь  $Ox$  – не змінюватиметься. Тому координата  $x$  тіла із часом змінюється так само, як під час прямолінійного рівномірного руху:

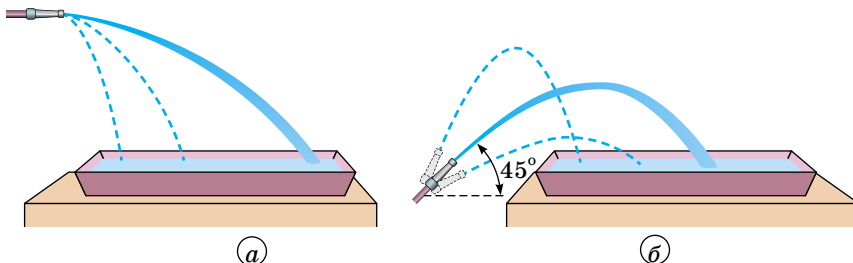
$$x = v_{0x}t.$$

А координата  $y$  змінюється так само, як під час прямолінійного рівноприскореного руху:

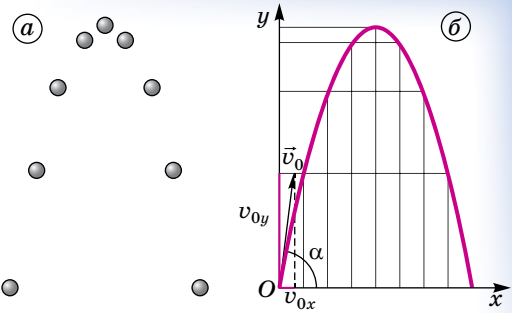
$$y = v_{0y}t + \frac{g_y t^2}{2}.$$

Щоб побудувати траєкторію руху тіла, треба підставити в рівняння  $x = v_{0x}t$  і  $y = v_{0y}t + \frac{g_y t^2}{2}$  значення часу  $t$ , які послідовно збільшуються, і обчислити координати  $x$  і  $y$  для кожного значення  $t$ . За цими координатами потрібно позначити точки, що зображують послідовні положення тіла. Плавна крива, проведена через ці точки, і буде траєкторією, яка нас цікавить, її зображено на малюнку 43, б. Маючи таку криву, можна знайти значення однієї з координат за значенням другої координати.

Проводячи досліди зі струменем води (мал. 44, а), можна встановити, що найбільша дальність польоту досягається тоді, коли початкова швидкість утворює з горизонтом кут  $45^\circ$  (мал. 44, б).



Мал. 44. Витікання води під різними кутами



Мал. 43. Рух тіла, кинутого під кутом до горизонту

При великих швидкостях руху тіл слід враховувати опір повітря. Тому дальність польоту кулі і снарядів у реальних умовах не така, як обчислюють за формулою. Наприклад, при початковій швидкості кулі 870 м/с і куті  $45^\circ$ , за відсутності опору повітря, дальність польоту склала б приблизно 77 км, тоді як насправді вона не перевищує 3,5 км.



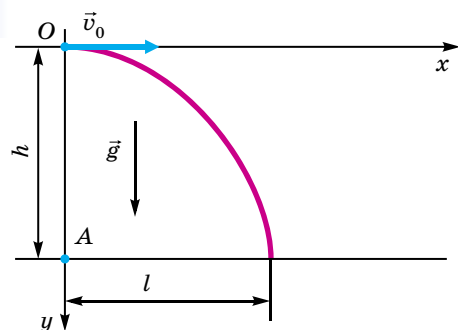
### ЗАПИТАННЯ ДО ВИВЧЕНОГО

1. Що спільного в русі тіл, кинутих вертикально, горизонтально і під кутом до горизонту?
2. Яка куля впаде на землю раніше: що вилетіла при пострілі з горизонтально розташованої рушниці або випадково упущена з тієї самої висоти в момент пострілу з рушниці?
3. По якій траєкторії рухається тіло, кинуте під кутом до горизонту?
4. Від чого залежить дальність польоту тіла, кинутого в горизонтальному напрямку? По якій траєкторії рухається таке тіло? Яка сила діє на тіло, кинуте під кутом до горизонту, під час його руху?
5. Чи можна вважати рівноприскореним рух тіла, кинутого під кутом до горизонту?
6. З яким прискоренням рухається тіло, кинуте під кутом до горизонту? Як напрямлене це прискорення?
7. Як впливає опір повітря на рух кинутих тіл?



### ЗАДАЧІ ТА ВПРАВИ

#### Розв'язуємо разом



Мал. 45. Рух вантажу, кинутого горизонтально

1. З літака, який летить у горизонтальному напрямку зі швидкістю  $v_0 = 720$  км/год, на висоті  $h = 3920$  м над землею скинули вантаж (мал. 45). На якій відстані від місця скидання вантаж упаде на землю?

#### Розв'язання

Скинутий вантаж у момент відокремлення від літака має початкову швидкість  $\vec{v}_0$ , яка напрямлена горизонтально і за модулем дорівнює швидкості літака. Цей момент візьмемо за початок відліку часу, а за початок координат – точку,

звідки було скинуто вантаж. Вісь  $Ox$  спрямуємо горизонтально, а вісь  $Oy$  – вертикально вниз (мал. 45). Рух вантажу описується відомими рівняннями:

$$x = v_0 t \cos \alpha; \quad y = v_0 t \sin \alpha - \frac{gt^2}{2}.$$

У цій задачі  $\alpha = 0$ , отже,  $\sin \alpha = 0$ ,  $\cos \alpha = 1$ . Тоді рівняння, що описують рух вантажу, скинутого з літака, матимуть вигляд:

$$x = v_0 t; \quad y = -\frac{gt^2}{2}.$$

Дальність польоту  $l$  – це значення координати  $x$ , яке вона матиме, коли замість часу  $t$  підставити час падіння вантажу. Цей час можна визначити з рівняння для координати  $y$ . У момент приземлення  $-y = h$ , тому

$$-h = -\frac{gt^2}{2}.$$

Звідки визначаємо час падіння вантажу:  $t = \sqrt{\frac{2h}{g}}$ . Отже,

$$l = v_0 \sqrt{\frac{2h}{g}}; \quad l = 200 \text{ м/с} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 3920 \text{ м}}{9,8 \text{ м/с}^2}} \approx 5600 \text{ м.}$$

**Відповідь:** 5600 м.

2. Снаряд вилетів з гармати під кутом  $\alpha$  до горизонту з початковою швидкістю  $\vec{v}_0$ . Визначте: а) час польоту снаряда; б) максимальну висоту його піднімання; в) дальність польоту снаряда.

#### Розв'язання

Рух тіла, кинутого під кутом до горизонту, описується рівняннями  $x = v_{0x}t$  і  $y = v_{0y}t + \frac{g_y t^2}{2}$ .

Оскільки  $v_{0x} = v_0 \cos \alpha$ ,  $v_{0y} = v_0 \sin \alpha$ ,  $g_y = -g$ , то

$$x = v_0 t \cos \alpha; \quad y = v_0 t \sin \alpha - \frac{gt^2}{2}.$$

а) У кінці польоту снаряда координата  $y = 0$ , тому час польоту визначимо з рівняння для координати  $y$ :

$$0 = v_0 t \sin \alpha - \frac{gt^2}{2}.$$

Розв'язуючи його, визначимо:  $t_1 = 0$ ;  $t_2 = \frac{2v_0 \sin \alpha}{g}$ .

Значення  $t_1 = 0$  відповідає початку польоту (у цей момент координата  $y$  також дорівнює нулю), а  $t_2$  — часу польоту:  $t_{\text{пол.}} = \frac{2v_0 \sin \alpha}{g}$ .

б) Завдяки симетрії параболи час піднімання до її вершини вдвічі менший від часу польоту, тобто  $t_{\text{підн.}} = \frac{v_0 \sin \alpha}{g}$ .

Максимальна висота піднімання  $h_{\text{max}}$  — це значення координати  $y$ , яке отримаємо, коли до виразу для координати  $y$  замість  $t$  підставити знайдене значення часу піднімання:

$$h_{\text{max}} = v_0 \sin \alpha \frac{v_0 \sin \alpha}{g} - \frac{g}{2} \left( \frac{v_0 \sin \alpha}{g} \right)^2,$$

а після спрощення:  $h_{\text{max}} = \frac{v_0^2 \sin^2 \alpha}{2g}$ .

Дальність польоту  $l$  дорівнює значенню координати  $x$ , яке отримаємо, коли до формули для координати  $x$  замість  $t$  підставимо час польоту:

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

Легко встановити, для якого кута  $\alpha$  дальність польоту максимальна. Знаючи, що  $2 \sin \alpha \cos \alpha = \sin 2\alpha$ . Тому формулу для дальності польоту можна записати так:

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

Звідки бачимо, що дальність польоту буде найбільша, коли  $\sin 2\alpha = 1$ .

Це означає, що  $2\alpha = 90^\circ$ , а  $\alpha = 45^\circ$ .

Зазначимо, що дальність польоту й висота піднімання тіла в повітрі завжди менші, ніж це впливає з формул  $h_{\max} = \frac{v_0^2 \sin^2 \alpha}{2g}$  і  $l = \frac{v_0^2 \sin 2\alpha}{g}$ , бо повітря чинить опір рухові.

### Рівень А

**200.** Чи на однакову висоту піднімуться тіла різної маси, кинуті з деякої висоти вертикально вгору з однаковими початковими швидкостями?

**201.** Використовуючи другий закон Ньютона і формулу  $\vec{g} = \frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{t}$ , поясніть, куди спрямовані прискорення вільного падіння під час руху тіла: а) угору; б) униз.

**202.** З гелікоптера, нерухомого відносно Землі, викинули вимпел. Яку він буде мати швидкість через 1, 2 і 3 с вертикального падіння?

**203.** Камінь падав на дно ущелини 4 с. Яка глибина ущелини?

**204.** Стрілу випустили з лука вертикально вгору зі швидкістю 30 м/с. На яку висоту підніметься стріла?

**205.** Визначте швидкість каменя через 2 с вертикального польоту вгору, якщо його початкова швидкість – 20 м/с.

**206.** Киньте вертикально вгору м'яч. Приблизно визначивши, на яку висоту піднявся м'яч, скажіть, якої швидкості ви йому надали?

**207.** Ствол рушниці й мішень розташовано на одній горизонталі. Одночасно з пострілом мішень починає вільно падати. Чи влучить куля в мішень?

**208.** М'яч кинуту під кутом  $30^\circ$  до горизонту з початковою швидкістю 10 м/с. Визначте горизонтальну і вертикальну складові початкової швидкості.

**209.** М'яч, кинутий горизонтально з початковою швидкістю 25 м/с, упав на землю через 3 с. З якої висоти кинуту м'яч? Яка горизонтальна дальність польоту?

**210.** Баскетболістка кидає м'яч своїй напарниці, і при цьому м'яч летить по параболі протягом 1 с. Яка найбільша висота піднімання м'яча і яка відстань між дівчатами, якщо м'яч кинуту під кутом  $45^\circ$  до горизонту?

**211.** М'яч кинуту під кутом  $30^\circ$  до горизонту з початковою швидкістю 10 м/с. Визначте висоту піднімання, а також час і дальність польоту м'яча.

**212.** Побудуйте траєкторію руху тіла, кинутого під кутом  $45^\circ$  до горизонту. Масштаб початкової швидкості і координат виберіть самостійно.

### Рівень Б

**213.** Чи можна стверджувати, що кинутий угору камінь весь час рухається зі швидкістю, модуль якої рівномірно зменшується? Опором повітря знехтувати.

**214.** Намалуйте графіки проекцій швидкості й прискорення тіл, кинутих: а) вертикально вгору; б) вертикально вниз. Початкова швидкість кидання  $\vec{v}_0$ .

**215.** Дві краплі води одночасно відокремилися від даху: перша – від бурульки, друга – скотившись з гребеня даху. Чи одночасно впадуть ці краплі на землю?

**216.** Тіло, вільно падаючи без початкової швидкості, досягає землі за 4 с. За який час воно досягне землі, коли його кинути з тієї самої висоти з початковою швидкістю 29,4 м/с?

**217.** У ліфті, що рівномірно піднімається зі швидкістю 1 м/с, падає тіло з висоти 50 см. Через скільки часу після початку падіння тіло торкнеться підлоги? На скільки зміниться за цей час висота тіла відносно Землі?



**218.** Повітряна куля, що перебуває у спокої, починає підніматися з поверхні землі з прискоренням  $2 \text{ м/с}^2$ . Через 5 с після початку піднімання з кулі скинули баласт (без початкової швидкості відносно неї). Через скільки часу після кидання баласт упаде на землю?

**219.** З пружинного пістолета з висоти 2 м над землею вилітає вертикально вгору кулька зі швидкістю 5 м/с. Визначте, на яку максимальну висоту підніметься кулька і яку вона матиме швидкість у момент падіння на землю. Скільки часу кулька перебувала в польоті? Яке її переміщення за перші 0,2 с польоту?

**220.** Яку швидкість мало б тіло через 1, 2, 3, 4 с, якщо його кинули б угору зі швидкістю 30 м/с?

**221.** Де – на Землі чи на Місяці – більше зміститься тіло по горизонталі, якщо його кидати горизонтально з однакової висоти з однаковими за модулем швидкостями?

**222.** У якому випадку (за інших однакових умов) дальність польоту списа буде більша: а) металник кидає спис зі стану спокою; б) металника кидає спис з розгону? Чому?

**223.** Предмет падає з полиці залізничного вагона, розташованої на висоті 2 м над підлогою. Вагон рухається зі швидкістю 18 км/год. На яку відстань переміститься вагон за час падіння предмета, ( $g = 10 \text{ м/с}^2$ )?

**224.** Зі спортивної рушниці куля вилітає з початковою швидкістю 300 м/с, а з мисливської – 375 м/с. Порівняйте дальність польоту кулі в обох випадках, якщо рушниці було розташовано в горизонтальному напрямку і на однаковій висоті.

**225.** З крутого берега річки заввишки 20 м кидають горизонтально камінь зі швидкістю 15 м/с. Через скільки часу і з якою швидкістю камінь упаде у воду? Який кут утворить вектор кінцевої швидкості каменя з поверхнею води?

**226.** Літак летить до арктичної станції «Академік Вернадський» на висоті 8 км зі швидкістю 900 км/год. За скільки кілометрів до станції пілот має скинути вантаж, щоб він упав біля неї? Як зміниться ця відстань, коли висота польоту буде вдвічі більшою?

**227.** М'яч кинуто з початковою швидкістю 20 м/с. Визначте висоту і дальність польоту м'яча, якщо кут кидання становить  $30^\circ$ ,  $45^\circ$  і  $60^\circ$ . Яка кінцева швидкість м'яча і який напрям її вектора в кожному із цих випадків?

**228.** Снаряд, що вилетів з гармати під кутом до горизонту, перебував у польоті 12 с. Якої найбільшої висоти він досяг?

**229.** Тіло кинуто під кутом  $45^\circ$  до горизонту зі швидкістю 50 м/с. Визначте графічно модуль і напрям швидкості тіла через 1, 2, 3 і 6 с.

**230.** Порівняйте дальність польоту і висоту підйому двох тіл, кинутих під кутами  $30^\circ$  і  $60^\circ$  до горизонту з однаковими за модулем швидкостями.

**231.** Спортсменка кидає диск під кутом  $45^\circ$  до горизонту. Визначте дальність польоту диска, якщо він піднявся на висоту  $h$ .

### Є над чим замислитися

**232.** На запитання вчителя, чи можна за допомогою формули координати  $y = y_0 + v_{0y}t + \frac{g_y t^2}{2}$  обчислити висоту піднімання тіла для інтервалу

часу  $t_0 > \frac{v_{0y}}{g_y}$ , де  $t_0$  – час піднімання тіла, десятикласниця відповіла негативно на тій підставі, що проекція  $g_y$  має різні знаки під час піднімання та опускання тіла. Чи мала рацію учениця?

**233.** Два тіла кинуто вертикально вгору з різними початковими швидкостями. Одне з них досягло в 4 рази більшої висоти, ніж друге. У скільки разів його початкова швидкість була більшою, ніж початкова швидкість другого тіла?

**234.** З гондולי аеростата, який рівномірно піднімається зі швидкістю 4 м/с, на висоті 20 м від землі кинули вгору предмет зі швидкістю 6 м/с відносно аеростата. Через який час предмет впаде на землю? На якій висоті буде аеростат у цей момент?

**235.** Скільки часу і з якою кінцевою швидкістю тіло вільно падає з висоти 5 м на Землі і на Місяці?

**236.** Дальність польоту м'яча  $l$  дорівнює висоті його підйому  $H$ . Під яким кутом  $\alpha$  до горизонту було кинуто м'яч?

**237.** Літак летить на висоті 400 м зі швидкістю 300 км/год. З літака треба скинути вантаж на судно, яке рухається зі швидкістю 22 км/год назустріч літаку. На якій відстані від судна треба скинути вантаж?

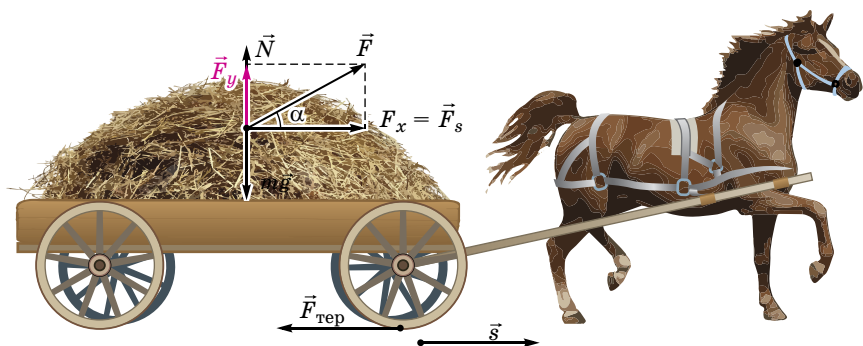
**238.** Спортсменка на змаганнях, які відбувалися в Осло, кинула спис на відстань 90 м 86 см. На якій відстані впав би спис, якби його кинули з такою самою швидкістю і під тим самим кутом до горизонту в Токіо? (Прискорення вільного падіння в Осло дорівнює  $9,819 \text{ м/с}^2$ , а в Токіо –  $9,798 \text{ м/с}^2$ ).

## § 20. РУХ ТІЛА ПІД ДІЄЮ КІЛЬКОХ СИЛ

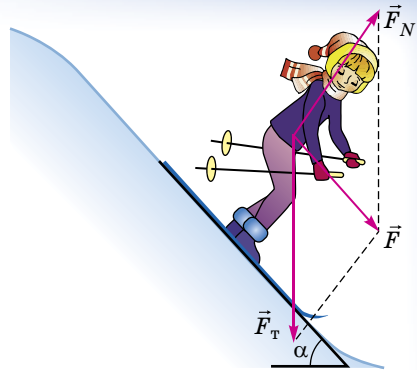
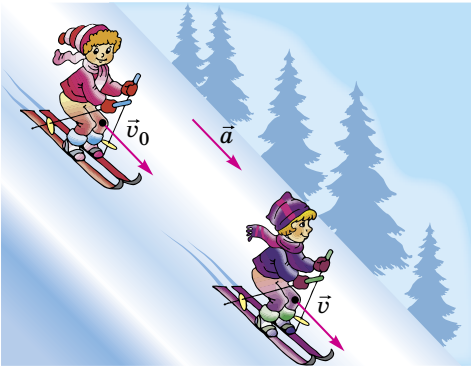
У попередніх класах ви розглядали рух тіла, на яке діє тільки одна сила – сила пружності, сила тяжіння чи сила тертя. Насправді такі рухи в земних умовах майже ніколи не відбуваються. Це впливає вже з того, що одночасно із силами пружності або тяжіння завжди діє також сила тертя.

Ви знаєте, якщо тіло рухається рівномірно прямолінійно, то на нього діють сили, які компенсуються. Наприклад, на малюнку 46 показано, що кінь тягне віз рівномірно, тому що дія всіх сил компенсується.

Якщо до тіла прикладено кілька сил і рівнодійна сила буде напрямлена в бік руху, то тіло буде рухатися рівноприскорено, а якщо у протилежний бік – рівносповільнено. Наприклад, лижниці спускаються з гори з прискоренням (мал. 47).



Мал. 46. Кінь тягне віз рівномірно



Мал. 47. Спуск лижниць з гори

Розв'язуючи задачі з механіки, коли на тіло діє кілька сил, слід нагадати, що в рівнянні  $\vec{F} = m\vec{a}$  (другий закон Ньютона)  $\vec{F}$  – це векторна сума всіх сил, прикладених до тіла. Векторне додавання сил можна замінити алгебраїчним додаванням їхніх проекцій на координатні осі.

Починаючи розв'язувати задачу, треба спочатку вибрати напрямок координатних осей і зобразити на малюнку вектори всіх сил і вектор прискорення тіла, якщо відомо його напрямок. Потім треба знайти проекції всіх векторів на ці осі координат. Нарешті, записати рівняння другого закону Ньютона для проекцій на кожен вісь і розв'язати разом знайдені рівняння.

Часто буває так, що в русі беруть участь кілька тіл, так чи інакше пов'язаних між собою, як кажуть, система тіл. Прикладом такого руху може бути рух спортсмена на водяних лижах, який слідує за катером, або рух вантажів на нитці, перекинутих через блок.

При цьому на кожне з тіл можуть діяти кілька сил. Як у таких випадках розв'язувати задачі? Загальний порядок розв'язування задач залишається таким самим, його треба застосовувати до кожного з тіл системи. Рівняння другого закону Ньютона записують для кожного з тіл системи спочатку у векторній формі, а потім у скалярній (для проекцій) і розв'язують разом знайдені рівняння.

У випадку, коли  $\vec{F} = 0$ , то й прискорення  $\vec{a} = 0$ . Про тіло, яке не має прискорення, кажуть, що воно перебуває у стані *рівноваги*. Таке тіло може рухатися прямолінійно і рівномірно, але може перебувати також у спокої. Саме про це йдеться в першому законі Ньютона. Якщо прямолінійний рівномірний рух трапляється рідко, то з нерухомими відносно якоїсь системи відліку тілами маємо справу часто. Усяке тіло, що перебуває у спокої, наприклад, відносно Землі, перебуває у стані рівноваги. Сума сил, прикладених до нього, дорівнює нулю. Можна також сказати, що *тіло перебуває в рівновазі, якщо сума проекцій усіх сил на координатні осі дорівнює нулю*. У цьому полягає умова *рівноваги тіла*.

Проте слід зазначити, що це стосується випадку, коли тіло здійснює *поступальний рух*. Як зазначалося раніше, під час поступального руху тіло можна розглядати як матеріальну точку, до якої прикладені сили. Однак реальне тіло може здійснювати також інші рухи. Наприклад, тіло ще може *обертатися* навколо деякої осі. Досі ми розглядали тільки поступальний рух, тобто вважали тіла матеріальними точками, хоч і не завжди це підкреслювали. Навіть коли йшлося про рух тіла по колу, мали на увазі його поступальний рух по колу.

Якщо виконується умова рівноваги: сума сил, що діють на тіло, дорівнює нулю, то при цьому тіло все-таки може обертатися навколо деякої осі. Наведемо приклад, як потрібно розв'язувати задачі, враховуючи вищесказане.

**Задача 1.** Дерев'яний брусок масою 200 г рівномірно тягнуть горизонтальною поверхнею за допомогою пружини жорсткістю 40 Н/м. Визначте видовження пружини, якщо коефіцієнт тертя ковзання 0,25.

Дано:

$$m = 200 \text{ г} = 0,2 \text{ кг}$$

$$k = 40 \text{ Н/м}$$

$$\mu = 0,25$$

$$g = 10 \text{ м/с}^2$$

$x = ?$

Розв'язання

Щоб визначити видовження пружини, слід знати силу пружності, яку визначимо, скориставшись другим законом Ньютона. Слід урахувати, що брусок тягнуть рівномірно, тому прискорення його руху дорівнює нулю.

Виконаємо малюнок, на якому зобразимо сили, що діють на тіло, і напрямки осей координат.

Запишемо другий закон Ньютона у векторному вигляді:

$$m\vec{g} + \vec{F}_{\text{тер}} + \vec{N} + \vec{F}_{\text{пруж}} = 0.$$

Визначимо проекції сил на осі  $Ox$  і  $Oy$ , запишемо формули для обчислення сили пружності та сили тертя ковзання:

$$\begin{cases} Ox: F_{\text{тер}} + F_{\text{пруж}} = 0 \text{ (оскільки } mg_x = 0, N_x = 0), \\ Oy: N - mg = 0 \text{ (оскільки } F_{\text{тер}y} = 0, \\ F_{\text{пруж}y} = 0), \\ F_{\text{тер}} = \mu N, \\ F_{\text{пруж}} = kx. \end{cases}$$

Розв'язавши систему рівнянь, знайдемо  $x$ :

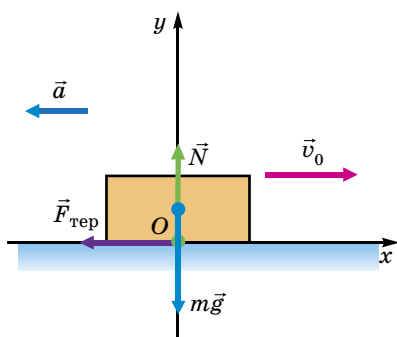
$$N = mg \Rightarrow F_{\text{тер}} = \mu mg; F_{\text{пруж}} = F_{\text{тер}} \Rightarrow kx = \mu mg \Rightarrow x = \frac{\mu mg}{k}.$$

Перевіримо одиницю величини й обчислимо значення шуканої величини:

$$[x] = \frac{\text{кг} \cdot \text{м/с}^2}{\text{Н/м}} = \frac{\text{Н}}{\text{Н/м}} = \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{Н}} = \text{м}; \quad [x] = \frac{0,25 \cdot 0,2 \text{ кг} \cdot 10 \text{ м/с}^2}{40 \text{ Н/м}} = 0,0125 \text{ м}.$$

**Відповідь:** 12,5 мм.

**Задача 2.** Визначте гальмівний шлях і час гальмування автомобіля, якщо він рухався прямою горизонтальною ділянкою дороги й перед початком гальмування мав швидкість 54 км/год. Коефіцієнт тертя ковзання гуми по бетону становить 0,75.



Розв'язання

Щоб визначити гальмівний шлях і час гальмування автомобіля, потрібно знати прискорення його руху. Прискорення визначимо, скориставшись другим законом Ньютона.

Виконаємо малюнок, на якому зобразимо сили, що діють на автомобіль, напрямки осей координат, початкової швидкості, переміщення та прискорення (автомобіль зупиняється, тому кінцева швидкість його

руху дорівнює нулю, а напрямок прискорення протилежний до напрямку руху).

Дано:

$$v_0 = 54 \text{ км/год} = 15 \text{ м/с}$$

$$\mu = 0,75$$

$$g = 10 \text{ м/с}^2$$

$$x - ?$$

$$x - ? \quad t - ?$$

Розв'язання

Запишемо другий закон Ньютона:

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

Знайдемо проекції сил і прискорення на осі  $Ox$  і  $Oy$ , запишемо формулу для обчислення сили тертя ковзання:

$$\begin{cases} Ox: -F_{\text{тер}} = ma \text{ (оскільки } mg_x = 0, N_x = 0), \\ Oy: N - mg = 0 \text{ (оскільки } F_{\text{тер}y} = 0, a_y = 0), \\ F_{\text{тер}} = \mu N. \end{cases}$$

Гальмівний шлях і час руху визначимо, скориставшись формулами:

$$s_x = \frac{v_x^2 - v_{0x}^2}{2a_x}; \quad v_x = v_{0x} + a_x t.$$

Урахувавши, що  $v_x = 0$ ;  $v_{0x} = v_0$ ;  $a_x = -a$ ;  $s_x = s$ , маємо:  $s = \frac{v_0^2}{2a}$ ;  $0 = v_0 - at$ .

Отже,  $v_0 = at \Rightarrow t = \frac{v_0}{a}$ ;  $a = \mu g$ , остаточно отримуємо:

$$s = \frac{v_0^2}{2\mu g}; \quad t = \frac{v_0}{\mu g}.$$

Перевіримо одиниці величин, обчислимо значення шуканих величин:

$$[s] = \frac{\text{м}^2/\text{с}^2}{\text{м}/\text{с}^2} = \frac{\text{м}^2 \cdot \text{с}^2}{\text{с}^2 \cdot \text{м}} = \text{м}, \quad s = \frac{15 \text{ м/с} \cdot 15 \text{ м/с}}{2 \cdot 0,75 \cdot 10 \text{ м/с}^2} = 15 \text{ м},$$

$$[t] = \frac{\text{м}/\text{с}}{\text{м}/\text{с}^2} = \frac{\text{м} \cdot \text{с}^2}{\text{м} \cdot \text{с}} = \text{с}, \quad t = \frac{15 \text{ м/с}}{0,75 \cdot 10 \text{ м/с}^2} = 2 \text{ с}.$$

Отже, отримано реальний результат, адже гальмівний шлях автомобіля дійсно досить великий. *Пам'ятайте про це і не порушуйте правил дорожнього руху!*

Відповідь: 15 м; 2 с.

**Задача 3.** Автомобіль масою 4 т рухається нагору, уповільнюючи свій рух. Визначте силу тяги, якщо ухил становить 0,02, а коефіцієнт опору руху дорівнює 0,04. Прискорення автомобіля стало і дорівнює 0,15 м/с<sup>2</sup>.

Дано:

$$m = 4 \text{ т}$$

$$\sin \alpha = 0,02$$

$$\mu = 0,04$$

$$a = 0,15 \text{ м/с}^2$$

$$\vec{F}_T - ?$$

Розв'язання

Якщо ухил (синус кута нахилу полотна дороги до горизонту) малий (менше ніж 0,1), то  $\cos \alpha = 1$ .

Коефіцієнт опору руху враховує всі види тертя (тертя кочення коліс об дорогу, тертя ковзання в осях автомобіля тощо).

На автомобіль діють сили: сила тяжіння  $m\vec{g}$ , сила реакції опори  $\vec{N}$ , сила тяги  $\vec{F}_T$  і сила опору  $\vec{F}$ .

Запишемо другий закон Ньютона:  $\vec{F}_T + m\vec{g} + \vec{N} + \vec{F} = m\vec{a}$ .

Спроектуємо рівняння на осі координат, враховуючи, що  $mg_x = -mg \sin \alpha$ ;  $mg_y = -mg \cos \alpha$ .

$$F_T - F - mg \sin \alpha = -ma \text{ (вісь } Ox); \quad N - mg \cos \alpha = 0 \text{ (вісь } Oy); \quad F = \mu N.$$

Ми отримали систему трьох рівнянь з трьома невідомими. Розв'язавши її, ми отримаємо:

$$N = \mu mg \cos \alpha \Rightarrow F = \mu mg \cos \alpha.$$

Підставляємо цей вираз у перше рівняння:

$$F_T = \mu mg \cos \alpha - mg \sin \alpha = -ma.$$

Звідки отримаємо:

$$F_T = \mu mg \cos \alpha + mg \sin \alpha - ma, \text{ або}$$

$$F_T = m(\mu g \cos \alpha + g \sin \alpha - a).$$

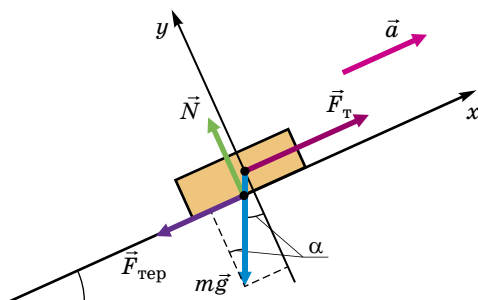
Перевіримо одиниці величин:

$$[F_T] = \text{кг}(\text{м/с}^2 + \text{м/с}^2 + \text{м/с}^2) = \text{Н}.$$

Виконаємо обчислення:

$$F_T = 4 \cdot 10^3 \text{ кг} \cdot (0,04 \cdot 10 \text{ м/с}^2 + 10 \text{ м/с}^2 \cdot 0,02 - 0,15 \text{ м/с}^2) = 1,4 \cdot 10^3 \text{ Н} = 1,4 \text{ кН}.$$

**Відповідь:** 1,4 кН.



### ЗАПИТАННЯ ДО ВИВЧЕНОГО

1. Які сили діють на тіло, що рухається рівномірно прямолінійно?
2. Які сили діють на тіло, що рухається рівноприскорено?
3. Як рухається тіло, якщо на нього діють: сила тяжіння, сила реакції опори, сила тертя?
4. Як рухається тіло, якщо на нього діє сила тяжіння і сила опору повітря?



### ЗАДАЧІ ТА ВПРАВИ

#### Рівень А

**239.** Тіло масою  $m$  перебуває у спокої на похилій площині з кутом нахилу  $\alpha$ . Чому дорівнює сила тертя спокою?

**240.** Під дією якої сталої сили тіло масою 300 г, що перебувало у стані спокою, пройде за 5 с шлях 25 м?

**241.** Брусок масою 2 кг лежить на шорсткій горизонтальній поверхні. Якщо на брусок діє горизонтальна сила 11 Н, то він рухається з прискоренням  $3 \text{ м/с}^2$ . Якою горизонтальною силою треба подіяти на брусок, щоб його лише зрушити з місця?

**242.** Ешелон якої маси може тягти тепловоз із прискоренням  $0,1 \text{ м/с}^2$ , розвиваючи максимальне тягове зусилля 300 кН, якщо коефіцієнт опору дорівнює 0,005?

**243.** На борт корабля висотою 5 м за допомогою мотузки моряк рівноприскорено піднімає відро з водою за 5 с. Маса відра з водою становить 10 кг. Визначте силу натягу мотузки.

**244.** Дівчинка масою 40 кг, з'їхавши на санках із гірки, проїхала по горизонтальному шляху до повної зупинки 20 м за 10 с. Визначте силу тертя та коефіцієнт тертя.

**245.** На похилій площині завдовжки 13 м і заввишки 5 м лежить тіло масою 26 кг. Коефіцієнт тертя 0,5. Яку треба прикласти силу вздовж площини, щоб тіло рухалось угору; униз?

**246.** У вагоні поїзда, що рухається рівномірно зі швидкістю 20 м/с по заокругленню радіуса 250 м, провідниця динамометром зважує тіло масою 10 кг. Визначте силу натягу пружини.



**247.** Яка початкова швидкість шайби, пущеної хокеїстом по поверхні льоду, якщо вона зупинилась через 40 с? Який шлях вона пройшла? Коефіцієнт тертя шайби об лід дорівнює 0,05.

### Рівень Б

**248.** Яку силу потрібно прикласти до вагона, який стоїть на рейках, щоб вагон почав рухатись рівноприскорено і за час 30 с пройшов шлях 11 м? Маса вагона становить 16 т. Під час руху на вагон діє сила тертя, яка дорівнює 0,05 від діючої на нього сили тяжіння.

**249.** На нитці, що витримує натяг 10 Н, піднімають вантаж масою 0,5 кг зі стану спокою вертикально вгору. Вважаючи рух рівноприскореним і силу опору такою, що дорівнює в середньому 1 Н, визначте максимальну висоту, на яку можна підняти вантаж за 1 с так, щоб нитка не розірвалась.

**250.** Краплина дощу, падаючи з великої висоти, випаровується. Як впливає це випаровування на рух краплини?

**251.** При якому коефіцієнті тертя спортсменка зможе вибігти на гірку висотою 10 м з кутом нахилу 0,1 рад за 10 с без попереднього розбігу? Вважайте, що потужність спортсменки не обмежує часу руху, а опір повітря малий.

**252.** На горизонтальній площині розташовано два тіла масами 10,5 кг і 6 кг та коефіцієнтами тертя 0,1 і 0,15 відповідно. Тіла з'єднано пружиною, яка перебуває в нерозтягнутому стані. Довжина нерозтягнутої пружини дорівнює 0,2 м, коефіцієнт її жорсткості дорівнює 100 Н/м. Коли до першого тіла дослідниця приклала горизонтальну силу 36 Н, система почала рухатися. Визначте довжину пружини під час руху.

### Є над чим замислитися

**253.** Хлопчик тягне санки масою  $m$  із силою  $F$ , спрямованою під кутом  $\alpha$  до горизонту. Коефіцієнт тертя між санками і дорогою дорівнює  $\mu$ . Визначте прискорення санок. При якій силі  $F_0$  рух буде рівномірним?

**254.** Для вимірювання маси космонавтів на орбітальній станції використовується рухомий стілець масою  $m_0$ , прикріплений до пружини. При одному й тому самому стисненні пружини сам стілець повертається в початкове положення за час  $t_0$ , а стілець із космонавтом – за час  $t$ . Яка маса космонавта? Рух стільця вважати рівноприскореним.

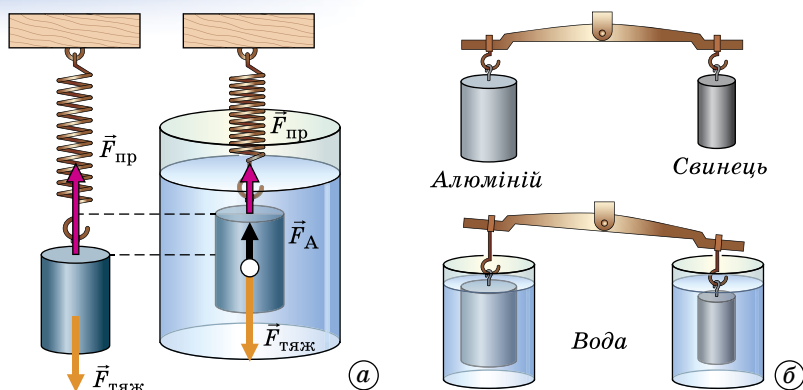
**255.** Брусок масою  $m$  лежить на горизонтальній поверхні. Коефіцієнт тертя між бруском і поверхнею дорівнює  $\mu$ . Побудуйте графік залежності прискорення бруска від зовнішньої горизонтальної сили  $F$ .

**256.** На дошці лежить брусок масою  $m$ . Коефіцієнт тертя  $\mu$ . Побудуйте графік залежності сили тертя, що діє на брусок, від кута нахилу дошки до горизонталі.

## § 21. ЗАКОН АРХІМЕДА

**Спостереження.** Чому важко занурити м'яч у воду і чому, як тільки ми його відпустимо, він вистрибує з води? Чому в морі легше плавати, ніж в озері? Чому у воді ми можемо підняти камінь, який у повітрі важко навіть зрушити з місця?

**Дослід 1.** Підвісимо до пружини тіло (мал. 48, а). У зв'язку з тим що на тіло діє сила тяжіння  $F_{\text{тяж}}$ , пружина розтягнеться. Тіло перебуватиме в рівновазі, тому що сила тяжіння і сила пружності  $F_{\text{пр}}$ , які діють на тіло, рівні



Мал. 48. Виштовхувальна сила та її дія

за значенням, але протилежні за напрямком. Зануримо це тіло у воду. Виводження пружини зменшиться. Маса тіла не змінювалась, відтак, сила тяжіння, яка діє на тіло, також не змінилася. Отже, зменшилася сила пружності.

Звідси можна зробити висновок, що з боку води на тіло діє сила, яка його виштовхує з води. Цю силу називають **виштовхувальною силою**, або **архімедовою силою (силою Архімеда)**.

Цим самим можна пояснити, чому ми під водою можемо легко підняти камінь, який з великим зусиллям утримуємо в повітрі. Якщо занурити м'яч під воду, то він вистрибне з води.

Гази багато в чому подібні до рідин. На тіла, розміщені в газах, також діє виштовхувальна сила. Саме під дією цієї сили повітряні кулі, метеорологічні зонди, дитячі кульки, наповнені воднем, піднімаються вгору.

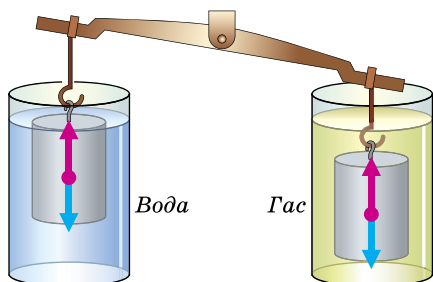
*А від чого залежить виштовхувальна сила?*

**Дослід 2.** Два тіла різного об'єму, але однакової маси зануримо повністю в одну й ту саму рідину (воду). Ми бачимо, що тіло більшого об'єму виштовхується з рідини (води) з більшою силою (мал. 48, б).

**Виштовхувальна сила (сила Архімеда) залежить від об'єму зануреного в рідину тіла. Що більший об'єм тіла, то більша виштовхувальна сила діє на нього.**

**Дослід 3.** Зануримо повністю два тіла однакового об'єму й маси в різні рідини, наприклад воду й гас (мал. 49).

Порушення рівноваги в цьому разі свідчить про те, що у воді на тіло діє більша виштовхувальна сила, це можна пов'язати з тим, що густина води більша, ніж густина гасу.



Мал. 49. Залежність виштовхувальної сили від густини рідини

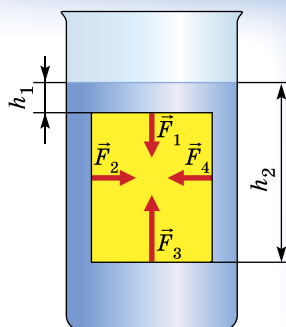
**Виштовхувальна сила (сила Архімеда) залежить від густини рідини, у яку занурене тіло. Що більша густина рідини, то більша виштовхувальна сила діє на занурене в неї тіло.**

Узагальнюючи результати спостережень і дослідів, можна зробити такий висновок.

**На тіло, занурене в рідину (газ), діє виштовхувальна сила (сила Архімеда), яка дорівнює вазі рідини (газу), витиснутої цим тілом.**

Це твердження називають **законом Архімеда**.

На основі закону Архімеда можна одразу записати формулу для обчислення виштовхувальної сили, але, щоб краще зрозуміти, унаслідок чого вона виникає, виконаємо прості розрахунки. Для цього розглянемо тіло у формі прямокутного бруска, зануреного в рідину так, що його верхня і нижня грані розташовані паралельно поверхні рідини (мал. 50). Подивимось, яким буде результат дії сил тиску на поверхню цього тіла.



Мал. 50. До пояснення виштовхувальної сили

Відповідно до закону Паскаля горизонтальні сили  $F_2$  і  $F_4$ , що діють на симетричні бічні грані бруска, попарно рівні за значенням і протилежно напрямлені. Вони не виштовхують брусок вгору, а тільки стискають його з боків. Розглянемо сили гідростатичного тиску на верхню і нижню грані бруска.

Нехай верхня грань площею  $S$  розташована на глибині  $h_1$ , тоді сила тиску  $F_1$  на неї дорівнюватиме:  $F_1 = g\rho_p h_1 S$ , де  $\rho_p$  – густина рідини.

Нижня грань бруска площею  $S$  розташована на більшій глибині  $h_2$ , тому сила тиску  $F_3$  на неї буде також більшою за  $F_1$ :  $F_3 = g\rho_p h_2 S$ .

Обидві сили тиску  $F_1$  і  $F_3$  діють уздовж вертикалі, їхня рівнодійна й буде силою Архімеда  $F_A$ , яка напрямлена вгору в бік більшої сили  $F_3$ , а її значення дорівнюватиме різниці сил  $F_3$  і  $F_1$ :

$$F_A = F_3 - F_1 = g\rho_p h_2 S - g\rho_p h_1 S = g\rho_p S(h_2 - h_1).$$

Оскільки різниця  $h_2 - h_1$  є висотою бруска, то добуток  $S(h_2 - h_1)$  дорівнює об'єму тіла  $V_T$ . Ми остаточно одержуємо формулу, яка є математичним виразом закону Архімеда:

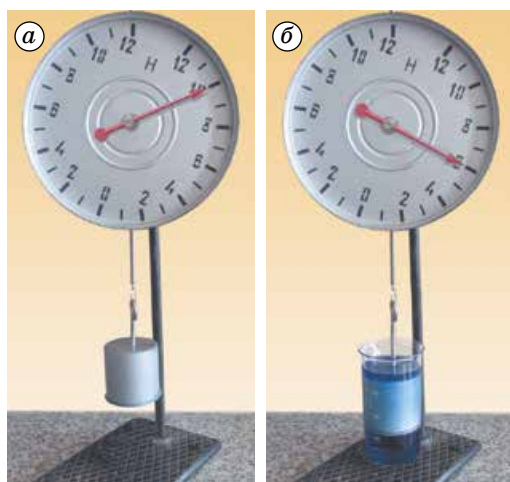
$$F_A = g\rho_p V_T.$$

Дійсно, оскільки рідина не стискається, то об'єм витиснутої тілом рідини дорівнює об'єму цього тіла і добуток  $\rho_p V_T$  дорівнює масі рідини  $m_p$  в об'ємі тіла  $V_T$ . У свою чергу, добуток  $g m_p$  є вагою цієї рідини.

З наведеного розрахунку наочно видно, що виштовхувальна (архімедова) сила виникає внаслідок того, що значення гідростатичного тиску на різних глибинах неоднакові й збільшуються з глибиною.

Архімедову силу можна визначити експериментально.

**Дослід 4.** Підвісимо тіло до динамометра (мал. 51, а). На тіло діє сила тяжіння майже 10 Н. Зануримо тіло в рідину (мал. 51, б). Динамометр показує 6 Н. Визначимо



Мал. 51. Експериментальне визначення сили Архімеда

різницю показів динамометра. Вона дорівнює 4 Н. Отже, на тіло діє сила Архімеда, яка дорівнює 4 Н.



### ЧИ ЗНАЄТЕ ВИ ЩО...

- Історія, пов'язана з короною царя Гіерона, додала до заслуг Архімеда почесне звання – першого відомого нам ученого-детектива.
- У місцях впадання річок у море трапляються колоди, які довгий час плавають у воді на певній відстані від поверхні. Це пояснюється меншою, ніж у морської, густиною прісної води. На межі цих вод може виявитися деревина з проміжною густиною.
- Задачу «Що відбудеться з рівнем води у басейні, якщо із човна, що плаває в ньому, кинути на дно камінь» якось запропонували знаменитим фізикам Дж. Гамову, Р. Опенгеймеру і Ф. Блоху, і... усі троє відповіли неправильно.
- Одного разу в імператора Цао-Цао, який правив у Китаї понад 2000 років тому, виникла думка зважити слона. Хоч як метушилися сановники, ніхто з них не міг нічого придумати, адже ніде не було таких гігантських терезів, щоб на них можна було зважити слона. Коли всі сановники визнали свою безпорадність, прийшов чоловік на ім'я Чао Чун і сказав, що він може зважити слона. Він попросив: «Накажіть завести слона у великий човен, після чого позначте рівень занурення човна у воду, потім виведіть слона, а човен завантажте камінням так, щоб він занурився до вашої позначки. Вага каміння дорівнюватиме вазі слона». Талановитий самородок, який на багато років випередив великого Архімеда, отримав за свою пропозицію «щедру» винагороду – прихильний кивок імператора Цао-Цао.



### ЗАПИТАННЯ ДО ВИВЧЕНОГО

1. Які відомі вам із життя явища вказують на існування виштовхувальної сили?
2. Що є причиною виникнення виштовхувальної сили?
3. Від чого залежить виштовхувальна сила?
4. Як можна виміряти силу Архімеда?
5. Чи буде діяти сила Архімеда на тіло, яке щільно прилягає до дна?



### ЗАДАЧІ ТА ВПРАВИ

#### Розв'язуємо разом

1. Купаючись у річці з мулким дном, можна помітити, що ноги більше грузнуть у мул на мілких місцях, ніж на глибоких. Поясніть чому.

**Відповідь:** тому що на глибоких місцях діє більша виштовхувальна сила.

2. Визначте, яка архімедова сила діє на тіло об'ємом  $5 \text{ м}^3$ , занурене повністю у воду?

Дано:

$$V_{\text{т}} = 5 \text{ м}^3$$

$$g = 10 \text{ Н/кг}$$

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

$$F_{\text{А}} - ?$$

Розв'язання

За формулою  $F_{\text{А}} = g \rho_{\text{в}} V_{\text{т}}$  визначаємо архімедову силу:

$$F_{\text{А}} = 10 \text{ Н/кг} \cdot 1000 \text{ кг/м}^3 \cdot 5 \text{ м} = 50\,000 \text{ Н}.$$

**Відповідь:** 50 кН.

3. Чи потрібно враховувати завантаженість судна під час його переміщення з моря в річку? Довантажувати чи розвантажувати потрібно судно, щоб воно було занурене по ватерлінії?

**Відповідь:** під час переміщення судна з моря в річку потрібно враховувати завантаженість судна, тому що густина води зменшується. Судно потрібно розвантажувати.

4. Як зміниться рівень води в посудині, у якій плаває чашка, якщо, зачерпнувши нею воду із цієї самої посудини, потопити чашку?

**Відповідь:** плаваючи, чашка витісняє значно більшу масу води, ніж потонувши. Вода, яка заповнила при зануренні чашку, залишалася в цій самій посудині. Рівень води знизиться.

### Рівень А

257. Корковий круг має вагу 40 Н. Визначте підйомну силу цього круга у прісній воді.

258. Мармурова плита в повітрі має вагу 405 кН. Яку силу треба прикласти, щоб утримати її у воді?

259. Визначте площу плоскої крижини завтовшки 20 см, якщо вона може утримати на воді вантаж масою 50 кг, занурюючись у воду на глибину 19 см. Густина льоду становить  $900 \text{ кг/м}^3$ , води –  $10^3 \text{ кг/м}^3$ .

260. Для чого водолази надівають черевики із свинцевими підшвами, а іноді ще й на груди й спину чіпляють важкі свинцеві пластинки (мал. 52)?

261. Чи однаковим є натяг якірного ланцюга корабля, коли якір висить у повітрі або коли перебуває в товщі води?

262. Поясніть, чому гідролітаки плавають на воді (мал. 53).

263. Для чого призначений плавальний міхур у риб?

264. Судно важить 100 000 000 Н. Який об'єм води воно витісняє?

### Рівень Б

265. Шматок льоду масою 1,9 кг плаває в циліндричній посудині, наповненій рідиною густиною  $0,95 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ . На скільки зміниться рівень рідини, коли лід розтане? Площа дна посудини становить  $400 \text{ см}^2$ , густина води –  $10^3 \text{ кг/м}^3$ .

266. Для визначення густини невідомої рідини однорідне тіло підвісили на динамометрі в цій рідині, а потім у вакуумі та воді. У рідині тіло розтягує пружину динамометра із силою 1,66 Н, у вакуумі – із силою 1,8 Н, а у воді – 1,6 Н. Визначте густину рідини і тіла. Густина води –  $10^3 \text{ кг/м}^3$ .

267. З води з глибини 5 м піднімають на поверхню камінь об'ємом  $0,6 \text{ м}^3$ . Густина каменя становить  $2500 \text{ кг/м}^3$ , води –  $1000 \text{ кг/м}^3$ . Яку силу потрібно прикласти, щоб підняти камінь на поверхню?



Мал. 52. Спорядження водолаза



Мал. 53. Гідролітаки



**268.** У циліндричну посудину з водою опустили залізну коробочку. Через це рівень води піднявся на 2 см. На скільки опуститься рівень води після того, як коробочка потоне? Густина заліза –  $7,8 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ , густина води –  $10^3 \text{ кг/м}^3$ .

**269.** Аеростат масою 500 кг і об'ємом  $600 \text{ м}^3$  піднімається вгору рівноприскорено. Знайти висоту підйому аеростата за перші 10 с. Густина повітря –  $1,3 \text{ кг/м}^3$ .

**270.** Визначте найменшу площу плоскої крижини завтовшки 20 см, яка здатна втримати на воді людину масою 80 кг. Густина льоду –  $900 \text{ кг/м}^3$ , води –  $10^3 \text{ кг/м}^3$ .

**271.** Почистіть картоплину. Шматок її покладіть у воду. Насипайте у воду сіль (розмішуючи її) доти, доки картоплина не спливе. Як пояснити це явище?

**272.** Виконайте такий дослід: у нижню частину стеаринової свічки встроміть цвях так, щоб свічка плавала у воді вертикально. Запаліть свічку. Як довго горітиме свічка, плаваючи у воді?

### Є над чим замислитися

**273.** Однорідна паличка густиною  $640 \text{ кг/м}^3$  шарнірно закріплена за верхній кінець, а нижня її частина занурена у воду. Яка частина палички занурена у воду при її рівновазі? Густина води –  $10^3 \text{ кг/м}^3$ .

**274.** Куб, що плаває у ртуті, занурений на  $1/12$  його об'єму. Яка частина об'єму буде занурена у ртуть, якщо долити шар води, що повністю покриє куб? Густина ртуті –  $13,6 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ , води –  $10^3 \text{ кг/м}^3$ .

**275.** Порожниста куля зі сталі розтягне пружину динамометра в повітрі із силою 6 Н, у воді – із силою 5 Н. Визначте об'єм порожнини. Густина сталі –  $8 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ .

**276.** Куля, до половини занурена у воду, тисне на дно посудини із силою втричі меншою від сили тяжіння, яка діє на кулю. Визначте густину кулі. Густина води –  $10^3 \text{ кг/м}^3$ .

**277.** Прилад для вимірювання густини рідини (ареометр) складається зі скляної кульки із свинцевим тягарцем, до якої припаяна довга циліндрична скляна трубка з площею поперечного перерізу  $10 \text{ мм}^2$  зі шкалою всередині. Маса ареометра – 3 г. Поділки шкали ареометра нанесені через  $0,01 \text{ г/см}^3$ . Яка відстань між поділками шкали в міліметрах поблизу поділки, що відповідає густині  $1,23 \text{ г/см}^3$ ?

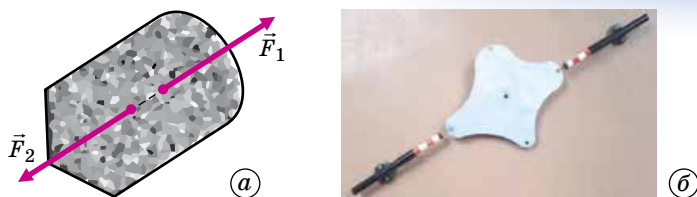
## § 22. РІВНОВАГА ТІЛ

Як ви вже знаєте, при поступальному русі тіла можна розглядати рух тільки однієї точки тіла – його центра мас. При цьому ми повинні вважати, що в центрі мас зосереджена вся маса тіла і до нього прикладена рівнодійна всіх сил, що діють на тіло. З другого закону Ньютона випливає, що прискорення цієї точки дорівнює нулю, якщо геометрична сума всіх прикладених до неї сил – рівнодійна цих сил – дорівнює нулю. Це і є умова рівноваги тіла за відсутності його обертання.

**Щоб тіло, яке може рухатися поступально (без обертання), перебувало в рівновазі, потрібно, щоб геометрична сума сил, прикладених до тіла, дорівнювала нулю.**

Але якщо геометрична сума сил дорівнює нулю, то і сума проекцій векторів цих сил на будь-яку вісь також дорівнює нулю. Тому умову рівноваги тіла можна сформулювати і так:





Мал. 54. Рівновага тіла

**щоб тіло, яке не має осі обертання, перебувало в рівновазі, потрібно, щоб сума проєкцій на будь-яку вісь прикладених до тіла сил дорівнювала нулю.**

У рівновазі, наприклад, перебуває тіло, до якого прикладено дві рівні сили, що діють уздовж однієї прямої, але напрямлені у протилежні боки (мал. 54, а). На малюнку 54, б показано, як такий випадок можна спостерігати за допомогою досліду.

Стан рівноваги – це не обов'язково стан спокою. З другого закону Ньютона випливає, що, коли рівнодійна сил, прикладених до тіла, дорівнює нулю, тіло може рухатися прямолінійно й рівномірно. Під час такого руху тіло також перебуває у стані рівноваги. Наприклад, парашутист, після того як він почав падати зі сталою швидкістю, перебуває у стані рівноваги.

На малюнку 54, а сили прикладено до тіла не в одній точці. Але ми вже бачили, що важлива не точка прикладання сили, а пряма, уздовж якої вона діє. Перенесення точки прикладання сили вздовж лінії її дії нічого не змінює ні в русі тіла, ні у стані рівноваги. Зрозуміло, наприклад, що нічого не зміниться, якщо замість того, щоб тягнути вагонетку, її почнуть штовхати (мал. 55).

Якщо рівнодійна сил, прикладених до тіла, не дорівнює нулю, то для того, щоб тіло перебувало у стані рівноваги, до нього має бути прикладено додаткову силу, що дорівнює за модулем рівнодійній, але протилежна їй за напрямком.



Мал. 55. Рух тіла не залежить від точки прикладання сили, а залежить від лінії її дії



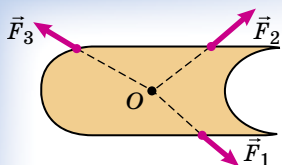
### ЗАПИТАННЯ ДО ВИВЧЕНОГО

1. Що означає твердження: «Тіло (або система тіл) перебуває у стані рівноваги»?
2. До тіла прикладено кілька сил, рівнодійна яких не дорівнює нулю. Що потрібно зробити, щоб тіло було у стані рівноваги?
3. У чому полягає умова рівноваги тіл, що рухаються поступально?
4. Чи перебуває у рівновазі тіло у стані спокою?
5. Якщо геометрична сума сил, прикладених до тіла, дорівнює нулю, то чому дорівнює алгебраїчна сума проєкцій цих сил на яку-небудь вісь?

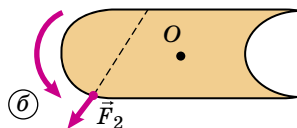
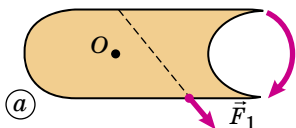
## § 23. УМОВА РІВНОВАГИ ТІЛА, ЩО МАЄ ВІСЬ ОБЕРТАННЯ. МОМЕНТ СИЛИ

У попередньому параграфі ми з'ясували умови рівноваги тіла за відсутності його обертання. Але як забезпечується відсутність обертання тіла?

Щоб відповісти на це запитання, розглянемо тіло, яке не може здійснювати поступального руху, але може повертатися або обертатися. Щоб



Мал. 56. Тіло не може обертатися



Мал. 57. Поворот тіла під дією сили

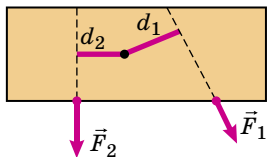
зробити неможливим поступальний рух тіла, його досить закріпити в одній точці так, як можна, наприклад, закріпити дошку на стіні, прибавши її одним цвяхом; поступальний рух такої дошки стає неможливим, але дошка може повертатися навколо цвяха, який слугує їй віссю повороту.

Які ж сили можуть спричинити поворот тіла? З'ясуємо спочатку, які сили не можуть і які можуть спричинити поворот (обертання) тіла із закріпленою віссю.

На малюнку 56 показано деяке тіло, яке може повертатися навколо осі  $O$ , яка перпендикулярна до площини сторінки. З малюнка видно, що сили  $\vec{F}_1$ ,  $\vec{F}_2$  і  $\vec{F}_3$  не спричинять повороту тіла. Лінії їх дії проходять через вісь обертання. Будь-яка така сила буде врівноважена силою реакції закріпленої осі.

Поворот (або обертання) можуть спричинити лише такі сили, лінії дії яких не проходять через вісь обертання. Сила  $\vec{F}_1$ , наприклад, прикладена до тіла так, як показано на малюнку 57, а, змусить тіло повернутися за годинниковою стрілкою. Сила  $\vec{F}_2$  (мал. 57, б) також спричинить поворот тіла, але проти годинникової стрілки.

Щоб зробити поворот (або обертання) неможливим, потрібно очевидно прикласти до тіла принаймні дві сили: одну, що спричинить поворот за годинниковою стрілкою, іншу – проти годинникової стрілки. Але ці дві сили можуть не дорівнювати одна одній (за модулем). Наприклад, сила  $F_2$  (мал. 58) спричиняє поворот тіла проти годинникової стрілки.



Мал. 58. Тіло, що має вісь обертання, перебуває в рівновазі під дією двох сил

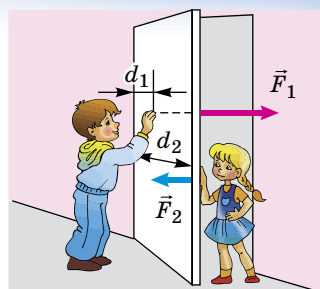
Як показує дослід, її можна зрівноважити силою  $\vec{F}_1$ , що спричиняє поворот тіла за годинниковою стрілкою, але за модулем меншою, ніж сила  $\vec{F}_2$ . Значить, у цих двох неоднакових за модулем сил однакова, так би мовити, «обертальна дія». Що ж у них спільне і що для них однакове? З дослідів випливає, що в цьому випадку однаковий добуток модуля сили і відстані від осі обертання до лінії дії сили. Цю відстань позначають відповідно літерами  $d_1$  і  $d_2$  і називають **плечем сили, яке дорівнює довжині перпендикуляра, опущеного від центра обертання до напрямку дії сили**. Плечем сили  $F_1$  є відстань  $d_1$ , а плечем сили  $F_2$  є відстань  $d_2$ .

Отже, «обертальна дія» сили характеризується добутком модуля сили і її плеча.

**Фізичну величину, яку визначають добутком сили  $F$  і її плеча  $d$ , називають моментом сили відносно осі обертання:  $M = Fd$ .**

Слова «відносно осі» у визначенні моменту потрібні тому, що якщо, не змінюючи ні модуля сили, ні її напрямку, перенести вісь обертання з точки  $O$  в іншу точку, то зміниться плече сили, а значить, і момент сили.

Момент сили залежить від двох величин: від модуля самої сили і від її плеча. Один і той самий момент сили може бути створений малою силою, плече якої велике, або більшою силою з малим плечем. Якщо, наприклад, намагатися закрити двері, штовхаючи їх поблизу від петель, то цьому з успіхом зможе протидіяти дитина, яка здогадається штовхати їх у протилежний бік, приклавши силу поближче до краю, двері залишаться у спокої (мал. 59).



Мал. 59. Виникнення моментів сил під час відкривання дверей

Для нової величини – моменту сили – потрібно, звичайно, вибрати одиницю. З виразу  $M = Fd$  випливає, що за одиницю обертового моменту в СІ потрібно прийняти момент сили 1 Н, лінія дії якої перебуває від осі обертання на відстані 1 м. Цю одиницю називають **ньютон-метр** (Н · м).

Моментом сил, що обертають тіло проти годинникової стрілки, прийнято приписувати знак «-», за годинниковою стрілкою – «+». Тоді моменти сил  $\vec{F}_1$  і  $\vec{F}_2$  відносно осі (мал. 57) мають протилежні знаки і їхня алгебраїчна сума дорівнює нулю. Отже, ми можемо написати умову рівноваги тіла із закріпленою віссю обертання:

$$F_1 d_1 = F_2 d_2, \text{ або } F_1 d_1 - F_2 d_2 = 0.$$

**Тіло, здатне обертатися навколо закріпленої осі, перебуває в рівновазі, якщо алгебраїчна сума моментів прикладених до нього сил відносно цієї осі дорівнює нулю.**

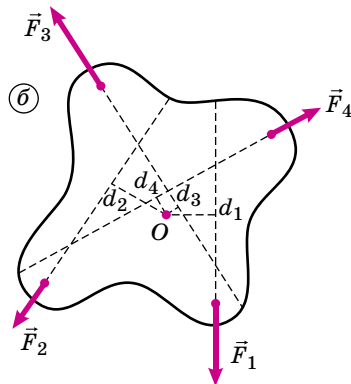
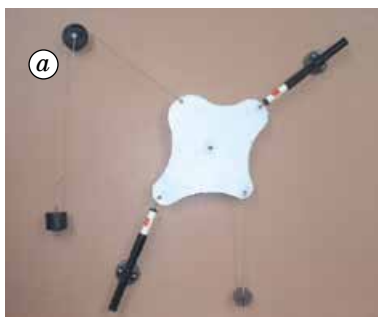
91

У цьому полягає **правило моментів**, воно і слугує умовою рівноваги тіла із закріпленою віссю обертання.

Правило моментів, яке ми отримали для випадку, коли на тіло діють дві сили. Можна показати, що це правило справджується і в тих випадках, коли на тіло діє кілька сил.

Пояснимо це на досліді, який проводиться з приладом, зображеним на малюнку 60, а. Він представляє собою тіло неправильної форми, закріплене на осі (вісь обертання).

До чотирьох точок цього тіла прикладено сили. Дві з них за модулем дорівнюють вагам відповідних вантажів, показаних на малюнку 60, а. Дві інші – це сили пружності, з якими розтягнуті пружини динамометрів



Мал. 60. Демонстрація правила моменту сил

діють на тіло. Модулі цих сил фіксуються на шкалах динамометрів. Під дією цих чотирьох сил тіло перебуває в рівновазі. За допомогою циркуля і лінійки можна виміряти плечі цих сил. При цьому можна переконатися в тому, що алгебраїчна сума моментів усіх чотирьох сил відносно осі обертання дорівнює нулю.

На малюнку 60, б показано схему цього досліду, де на тіло діють чотири сили:  $\vec{F}_1$ ,  $\vec{F}_2$ ,  $\vec{F}_3$  і  $\vec{F}_4$ . Закріплена вісь проходить через точку  $O$ .

З малюнка видно, що моменти сил  $\vec{F}_1$  і  $\vec{F}_4$  відносно осі обертання тіла додатні, а моменти сил  $\vec{F}_2$  і  $\vec{F}_3$  – від’ємні.

Тоді умова рівноваги тіла записується у вигляді:

$$F_1 d_1 - F_2 d_2 - F_3 d_3 + F_4 d_4 = 0,$$

де  $d_1$ ,  $d_2$ ,  $d_3$  і  $d_4$  – плечі відповідних сил.

Тепер сформулюємо загальну умову рівноваги тіла.

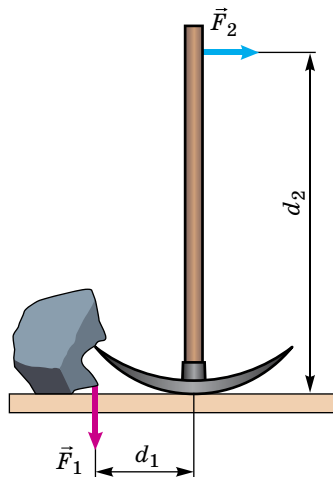
Для того щоб тіло перебувало в рівновазі, потрібно, щоб дорівнювали нулю геометрична сума прикладених до тіла сил і сума моментів цих сил відносно осі обертання.

Легко побачити, що з правила моментів випливає відоме **правило важеля**: важіль перебуває в рівновазі, коли сили, що діють на нього, обернено пропорційні до плечей.

Це інше формулювання правила моментів! Адже з формули випливає, що

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

На малюнку 61 показано важіль, до якого прикладено взаємно перпендикулярні сили  $\vec{F}_1$  і  $\vec{F}_2$ .



Мал. 61. До умови рівноваги важеля



### ЗАПИТАННЯ ДО ВИВЧЕНОГО

1. За яких умов сила, прикладена до тіла, спричиняє його поворот навколо закріпленої осі?
2. Що таке плече сили?
3. Що таке момент сили? Яка його одиниця в СІ?
4. У чому полягає умова рівноваги тіла, яке може обертатися навколо закріпленої осі?
5. За яких умов важіль, зображений на малюнку 61, перебуває в рівновазі?

## § 24. ЦЕНТР МАС І ЦЕНТР ТЯЖІННЯ ТІЛА. ВИДИ РІВНОВАГИ ТІЛ

Вивчаючи рух тіла під дією сили або кількох сил, ми вважали, що рухаються не тіла, а матеріальні точки, і не брали до уваги розміри й форму тіл. Але що це за точки, якими ми ніби замінювали реальні тіла? Чому і за яких умов така заміна можлива?

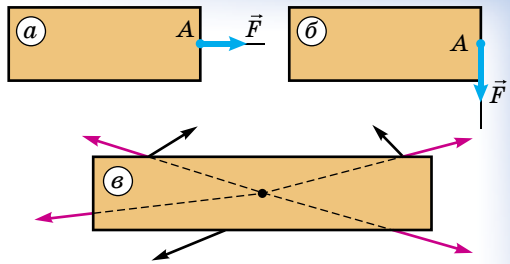
Вивчаючи в попередніх класах фізику, ви побачили, що розміри тіла можна не враховувати і вважати його точкою, коли воно рухається поступально. Під час такого руху всі точки тіла рухаються однаково – з однаковими швидкостями і прискоренням. Отже, треба з'ясувати, за яких

умов тіло рухається поступально. Виконаємо такий дослід.

**Дослід.** Візьмемо брусок прямокутної форми (мал. 62, а) і за допомогою нитки, прикріпленої до нього, прикладемо до бруска в точці А силу, направлену вздовж його осі. Брусок почне рухатися поступально. Проте якщо за допомогою тієї самої нитки прикласти в тій самій точці А силу, направлену перпендикулярно до осі (мал. 62, б), то брусок повернеться, тобто його рух не буде поступальним. Якщо нитку прикріплено в точці А, то існує тільки одна пряма, уздовж якої має бути спрямована сила, щоб рух був поступальним. Це стосується також будь-якої іншої точки прикладання сили.

На малюнку 62, в червоними лініями позначено прямі, уздовж яких має бути спрямована сила, прикладена до відповідної точки, щоб рух тіла був поступальним. Чорні прямі – це деякі лінії дії сил, що спричиняють повертання тіла.

З малюнка бачимо, що всі лінії дії сил, які спричиняють поступальний рух (червоні прямі), перетинаються в одній точці.



Мал. 62. Рух тіла поступально

**Точку, через яку має проходити лінія дії сили, щоб тіло рухалося поступально, називають центром мас тіла.**

93

А будь-яка сила, лінія дії якої не проходить через центр мас (чорні прямі на малюнку), обов'язково спричинить повертання або обертання тіла.

Коли ми розглядали рух тіла як рух точки, то вважали, що лінія дії прикладеної сили (або рівнодійної кількох сил) проходить через центр мас. Центр мас – ось та точка тіла, якою ми «заміняли» реальне тіло.

**Центром тяжіння механічної системи називають точку, відносно якої сумарний момент сил тяжіння (діючих на систему) дорівнює нулю.**

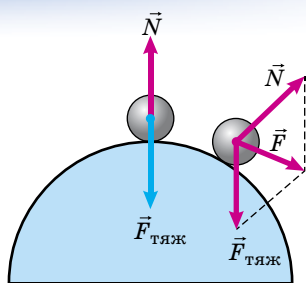
Наприклад, у системі, що складається з двох однакових мас, з'єднаних стержнем, і поміщена в неоднорідне гравітаційне поле (наприклад, планети), центр мас перебуватиме в середині стержня, тоді як центр тяжіння системи буде зміщений до того кінця стержня, який перебуває ближче до планети (бо вага  $P = mg$  залежить від параметра гравітаційного поля  $g$ ), і, взагалі кажучи, навіть розміщений поза стержнем.

В однорідному гравітаційному полі центр тяжіння завжди збігається із центром мас. Із цієї самої причини поняття «центр мас» і «центр тяжіння» збігаються у геометрії, статистичній та інших галузях. У цих застосуваннях традиційно обидва терміни синонімічні, але часто другому віддається перевага через те, що він старіший.

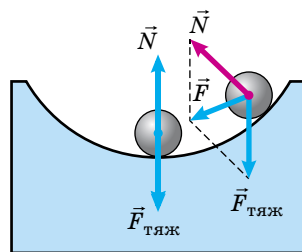
Тепер розглянемо, які бувають види рівноваги тіл.

Якщо тіло перебуває в рівновазі, то це означає, що сума прикладених до нього сил дорівнює нулю і сума моментів цих сил відносно осі обертання також дорівнює нулю. Але виникає запитання: *а чи стійка ця рівновага?*

З першого погляду видно, наприклад, що положення рівноваги кульки на вершині вигнутої підставки (мал. 63) нестійке: щонайменше відхилення кульки від його рівноважного положення приведе до того, що вона скотиться вниз. Але ту саму кульку, поміщену на вгнутій підставці (мал. 64), не



Мал. 63. Нестійка рівновага тіл



Мал. 64. Сстійка рівновага тіл

так просто змусити залишити своє місце. Рівновагу кульки можна вважати стійкою.

У чому секрет стійкості? У розглянутих випадках кулька перебуває в рівновазі: сила тяжіння  $\vec{F}_{\text{тяж}}$  дорівнює за модулем протилежно напрямлений силі реакції опори  $\vec{N}$  з боку опори (мал. 63, 64).

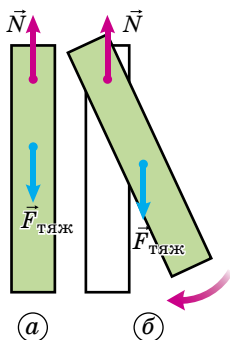
Усе проявляється саме в знонайменшому відхиленні тіла від положення рівноваги. На малюнку 63 видно, як, щойно кулька на випуклій підставці покинула своє місце, сила тяжіння  $\vec{F}_{\text{тяж}}$  перестає врівноважуватися силою реакції опори  $\vec{N}$  (сила  $\vec{N}$ , як вам відомо, завжди напрямлена перпендикулярно до стичних поверхонь кульки і підставки). Рівнодійна сил тяжіння  $\vec{F}_{\text{тяж}}$  і сил реакції опори  $\vec{N}$ , тобто сила  $\vec{F}$ , напрямлена так, що кулька ще більше віддаляється від положення рівноваги.

Інша річ на вгнутій підставці (мал. 64). За малого відхилення від початкового положення також порушується рівновага. Сила реакції опори  $\vec{N}$  не врівноважуватиме силу тяжіння  $\vec{F}_{\text{тяж}}$ . Але рівнодійна  $\vec{F}$  напрямлена так, що тіло повернеться в початкове положення. У цьому й полягає умова стійкості рівноваги тіла.

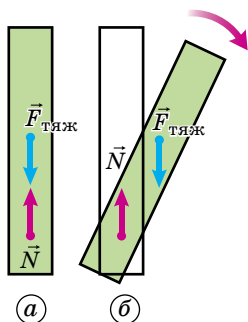
**Рівновага тіла стійка, якщо при малому відхиленні від рівноважного положення рівнодійна сил, прикладених до тіла, повертає його до положення рівноваги.**

**Рівновага нестійка, якщо при малому відхиленні тіла від положення рівноваги рівнодійна сил, прикладених до тіла, віддаляє його від цього положення.**

Це справджується і для тіла, що має вісь обертання. Як приклад такого тіла розглянемо звичайну лінійку, закріплену на стержні, що проходить через отвір поблизу її кінця. Положення лінійки, показане на малюнку 65, а, є стійким. Підвісити ту саму лінійку на стержні так, як це показано на малюнку 66, б, неможливо. При відхиленні від вертикального положення лінійка повернеться так, щоб зайняти положення рівноваги. Отже, рівновага лінійки, зображеної на малюнку 66, б, нестійка.



Мал. 65. Сстійка рівновага тіла



Мал. 66. Нестійка рівновага тіла

Стойке і нестійке положення рівноваги відрізняються одне від одного ще й положенням центра



тяжіння тіла. Коли кулька перебуває в положенні нестійкої рівноваги (мал. 63), її центр тяжіння вищий, ніж коли вона перебуває в будь-якому іншому положенні. Навпаки, у кульки на вгнутій опорі центр тяжіння в положенні стійкої рівноваги (мал. 64) нижчий, ніж у будь-якому із сусідніх положень. Отже,

**для стійкої рівноваги центр тяжіння тіла має розміщуватися в найнижчому з можливих для нього положень.**

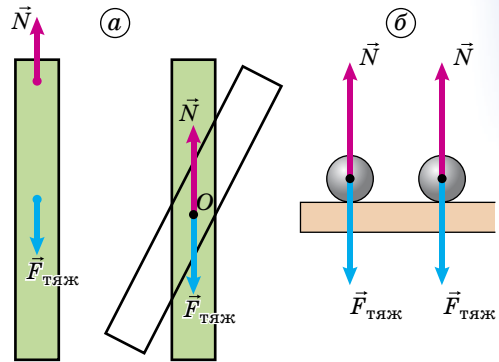
**Рівновага тіла, що має вісь обертання, стійка за умови, якщо його центр тяжіння розташований нижче за вісь обертання.**

Можливо і таке положення рівноваги, коли відхилення від нього не приводить до яких-небудь змін у стані тіла. Таке, наприклад, положення лінійки, підвішеної на стержні, що проходить через отвір в її центрі тяжіння (мал. 67, а), кульки на плоскій опорі (мал. 67, б), таку рівновагу називають **байдужою**.

Ми розглянули умову стійкості й нестійкості рівноваги тіл, що мають точку або вісь опори. Важливим випадком є той, коли опорою є не точка (вісь), а деяка поверхня. Поверхню опори має ящик на підлозі, склянка на столі, будівлі, фабричні труби тощо. Які умови стійкої рівноваги тіл у цьому випадку?

На тіла, що мають поверхню опори, діють і врівноважують одна одну, як і раніше, сила тяжіння  $\vec{F}_{\text{тяж}}$  і сила реакції з боку опори  $\vec{N}$ , яка перпендикулярна до її поверхні. Як і в раніше розглянутих випадках, рівновага буде стійкою, якщо при відхиленні від положення рівноваги не виникає сила, що віддаляє тіло від цього положення. Коли, наприклад, призма стоїть на горизонтальній поверхні, то вона перебуває в рівновазі. Це рівновага стійка. При нахилі її на певний кут, коли лінія дії сили тяжіння призми перетинає підставку призми (мал. 68, б), вона також буде в рівновазі. Але якщо нахилити призму так, щоб лінія дії сили тяжіння не перетинала підставку призми, то вона впаде. Малюнок 68, в відповідає граничному положенню призми, коли вона ще не падає.

Отже, для стійкості тіла потрібно, щоб вертикаль, проведена через його центр тяжіння, перетинала поверхню опори.



Мал. 67. Байдужа рівновага тіла



Мал. 68. Стійкість призми

Поверхня опори, від якої залежить рівновага, – це не завжди поверхня, яка дійсно стикається з тілом. Стіл, наприклад, стикається з підлогою тільки там, де розміщені його ніжки. Але поверхня опори столу – це поверхня всередині контуру, який вийде, якщо сполучити прямими лініями всі ніжки столу.

Під час спорудження будинків завжди використовують закони фізики, а саме закони статки (див. форзаци).



### ЧИ ЗНАЄТЕ ВИ, ЩО...

- Коти мають дуже цікаву властивість. Вони падаючи, здатні приземлитися на лапи, хоча момент імпульсу котів залишається сталим під час падіння. Відбувається це за рахунок повороту якої-небудь частини тіла котів в один бік, а лап – у протилежний, що дає змогу їм змінити орієнтацію у просторі.



### ЗАПИТАННЯ ДО ВИВЧЕНОГО

- Які види рівноваги ви знаєте?
- Яку рівновагу тіла називають стійкою? Нестійкою? Байдужою?
- Укажіть види рівноваги для таких випадків: а) гімнаст робить стійку на брусах; гімнаст висить на кільцях; б) колесо надіте на вісь; в) кулька лежить на столі.
- Як забезпечується хороша стійкість таких предметів: а) лабораторного штатива; б) баштового підйомного крана; в) настільної лампи?



### ЗАДАЧІ ТА ВПРАВИ

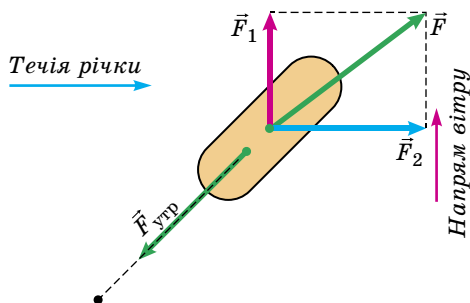
#### Розв'язуємо разом

- Як утримати в рівновазі човен, на який діють течія річки і вітер, що дме з берега?

#### Розв'язання

Знайдемо рівнодійну  $\vec{F}$  сил  $\vec{F}_1$  і  $\vec{F}_2$ , спричинених вітром і течією річки. Для цього скористаємося правилом паралелограма. Діагональ паралелограма дає нам модуль і напрям рівнодійної  $\vec{F}$ . Для того щоб човен був у рівновазі, до нього має бути прикладено силу  $\vec{F}_{\text{утр}}$ , яка дорівнює рівнодійній за модулем, але напрямлена у протилежний бік. Такою силою, наприклад, може бути сила пружності троса, прикріпленого одним кінцем до носа човна, а іншим до берега.

Якщо, наприклад, сила, з якою течія діє на човен, дорівнює 150 Н, а сила вітру дорівнює 100 Н, то рівнодійну цих двох взаємно перпендикулярних сил можна обчислити за теоремою Піфагора:



$$F = \sqrt{F_1^2 + F_2^2}; F = \sqrt{(100 \text{ Н})^2 + (150 \text{ Н})^2} \approx 180 \text{ Н}.$$

**Відповідь:** човен може бути утриманий тросом, здатним витримати натяг, не менший ніж 180 Н.

- Вантаж масою 10 кг висить на двох нерозтяжних тросах, кут між якими становить  $2\varphi = 120^\circ$ . Визначте натяг тросів.

Дано:

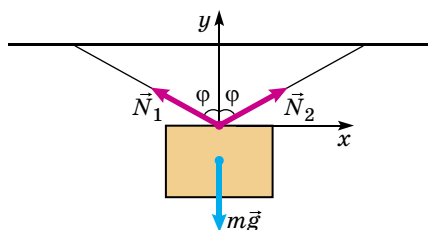
$m = 10 \text{ кг}$

$2\varphi = 120^\circ$

$N_1 - ? \quad N_2 - ?$

## Розв'язання

Виконаємо малюнок.

Запишемо умову рівноваги тіла на тросах:  $\vec{N}_1 + \vec{N}_2 + m\vec{g} = 0$ .

Знайдемо проекції сил на координатні осі:

$$Ox: N_1 \sin \varphi - N_2 \sin \varphi = 0,$$

$$Oy: N_1 \cos \varphi + N_2 \cos \varphi - mg = 0.$$

Знаючи, що  $N_1 = N_2$ , отримаємо  $2N_1 \cos \varphi = mg$ , звідки  $N_1 = N_2 = \frac{mg}{2 \cos \varphi}$ .

Підставивши значення відомих величин, визначимо

$$N_1 = N_2 = \frac{10 \text{ кг} \cdot 10 \text{ м/с}^2}{2 \cdot 0,5} = 100 \text{ Н}.$$

Відповідь: 100 Н.

## Рівень А

97

**278.** На двох тросах однакової довжини підвішено вантаж масою 50 кг. Кут між тросами дорівнює  $60^\circ$ . Визначте сили натягу тросів.

**279.** На аеростат у горизонтальному напрямі діє вітер із силою 1000 Н. Натяг троса дорівнює 2000 Н. На який кут від вертикалі відхилиться трос і який його натяг у безвітряну погоду?

**280.** До середини троса завдовжки 20 м підвішено світильник масою 3,4 кг, унаслідок чого трос провис на 5 см. Визначте сили пружності, що виникли у тросі.

**281.** Довга жердина, яку поставлено вертикально, перебуває у стані нестійкої рівноваги. Як її утримує жонглер? Зробіть аналогічний дослід самостійно з якою-небудь рейкою або лінійкою.

**282.** У якому стані і чому яйце перебуватиме у стійкій рівновазі на столі?

**283.** Чому човен стає менш стійким, коли той, хто сидить у ньому, встане?

**284.** Довжина горизонтального стержня 20 см. Ліву його половину зроблено з алюмінію, праву – із чавуну. Визначте положення центра тяжіння стержня, якщо поперечний переріз його однаковий по всій довжині.

## Рівень Б

**285.** На цях, забитий у стіну перпендикулярно до неї, діє сила 200 Н під кутом  $30^\circ$  до стіни. Визначте складові цієї сили, з яких одна вириває цях, а друга його згинає.

**286.** Вантаж переміщують по горизонтальній площині зі сталою швидкістю двома канатами, до яких прикладають сили по 500 Н. Канати утворюють між собою кут  $60^\circ$ . Визначте силу тертя об площину. За якої сили тертя кут між канатами доведеться зробити рівним  $0^\circ$ ;  $90^\circ$ ;  $120^\circ$ ?

**287.** Ліхтар масою 10 кг підвішено в середині каната, протягнутого поперек вулиці, ширина якої 10 м. Точка прикріплення ліхтаря до каната

міститься на висоті 5 м. Допустимий натяг каната 500 Н. Визначте висоту кріплення кінців каната, якщо вони перебувають на одному рівні.

**288.** На похилій площині лежить дерев'яний брусок. Щоб цей брусок не ковзав по площині, а перебував у рівновазі, до нього прикладено силу, яка утворює з площиною кут  $90^\circ$ . Яке мінімальне значення цієї сили? Маса бруска 2 кг, довжина похилої площини 1 м, висота – 60 см. Коефіцієнт тертя бруска по похилій площині дорівнює 0,4.

**289.** Маса трамбувального катка 100 кг, радіус 50 см. Яку мінімальну горизонтальну силу треба прикласти до катка, щоб переколити його через балку заввишки 10 см?

**290.** Що стійкіше: циліндр чи конус, коли вони мають однакову масу, висоту і площу основи?

**291.** Метрова лінійка висунута за край столу на  $\frac{1}{4}$  довжини і тисне тільки на край столу, якщо на кінець, що звисає, покладено вантаж 250 Н. Яка вага лінійки?

**292.** На яку частину довжини потрібно висунути лінійку за край столу, якщо на кінець, що звисає, покласти вантаж 125 Н?

### Є над чим замислитися

**293.** На похилій площині з кутом нахилу  $\alpha$  до горизонту стоїть циліндр радіусом  $r$ . Яка найбільша висота циліндра, за якої він ще не перекидається, якщо його зроблено з однорідного матеріалу?

**294.** Зводячи карниз будинку, каменяр кладе одна на одну чотири цеглини так, що частина верхньої цеглини виступає над нижньою. Довжина кожної цеглини  $l$ . Визначте найбільші довжини виступаючих частин, за яких цеглини в карнизі без цементного розчину ще перебувають у рівновазі.

**295.** Однорідна балка лежить на платформі так, що один кінець її звисає з платформи. Довжина звисаючого кінця становить 0,25 від довжини балки. На кінець балки діє сила  $F$ . При  $F = 3000$  Н протилежний кінець балки починає підніматися. Яка маса балки?

**296.** Однорідний металевий стержень зігнули навпіл так, що його частини утворили прямий кут. Стержень підвісили за один з вільних кінців на шарнірі. Визначте кут, який утворює з вертикаллю верхня частина стержня у стані рівноваги.

**297.** Два куби з ребром 10 см спаяні гранями і утворюють призму; маса одного куба 1 кг, другого – 3 кг. Призма стоїть на шорсткій горизонтальній площині. Яку горизонтальну силу треба прикласти до верхньої основи призми перпендикулярно до її ребра, щоб перекинути призму через ребро? Чи залежить значення цієї сили від того, який куб міститься зверху – легкий чи важкий?

**298.** Визначте положення центра ваги однорідного диска радіуса  $R$ . У ньому вирізано отвір радіуса  $r$ , центр отвору міститься від центра диска на відстані  $1/2R$ .

**299.** Штанга складається із циліндра завдовжки 50 см і вагою 2 кН та двох приєднаних до нього куль радіусами 3 і 6 см і вагою 1,5 і 12 кН. Визначте центр тяжіння штанги.

**300.** В однорідному плоскому диску радіусом 40 см вирізали отвір радіусом 15 см, центр якого міститься на відстані 20 см від центра диска. Визначте відстань між центрами ваги цілого диска і системи з отвором.

## § 25. ІМПУЛЬС. ЗАКОН ЗБЕРЕЖЕННЯ ІМПУЛЬСУ

Ви вже знаєте, як закони Ньютона дають змогу розв'язувати задачі про рух тіл. Але в багатьох випадках визначити значення сил, що діють на тіло, дуже важко. Коли ми розглядаємо зіткнення двох тіл, наприклад двох вагонів, ми знаємо, що при цьому вони взаємодіють один з одним силою пружності. Але визначити значення цієї сили буває важко, а іноді неможливо через те, що деформації стичних частин вагонів мають складний характер. Навіть у простому випадку зіткнення двох куль деформація кожної з них має складний вигляд, і незрозуміло, які значення величин  $x$  і  $k$  у формулі закону Гука:  $(F_{\text{пр}})_x = -kx$ .

У таких випадках для розв'язання задач механіки застосовують наслідки із законів руху, які є видозмінами другого закону Ньютона. Але при цьому з'являються нові величини замість сил і прискорень – **імпульс** і **енергія**. Це – особливі величини, вони мають властивість **збереження**. Саме вони відіграють важливу роль не тільки в механіці, але і в інших розділах фізики. Нехай формулу  $\vec{F} = m\vec{a}$ , яка виражає другий закон Ньютона, можна записати по-іншому, згадавши, що прискорення дорівнює темпу зміни швидкості тіла. Зокрема, для рівноприскореного руху  $\vec{a} = \frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{t}$ .

Отримаємо:  $\vec{F} = \frac{m(\vec{v} - \vec{v}_0)}{t}$ , або  $\vec{F} = \frac{m\vec{v} - m\vec{v}_0}{t}$ .

А можна записати і в такому вигляді:  $\vec{F}t = m\vec{v} - m\vec{v}_0$ .

Ця формула є іншим виразом другого закону Ньютона. Права частина цієї рівності є зміною добутку маси тіла і його швидкості руху. Добуток маси тіла і його швидкості руху – це фізична величина, що має назву **імпульс тіла** або **кількість руху тіла**, позначають її літерою  $p$ .

**Імпульсом тіла або кількістю руху тіла називають добуток маси тіла і його швидкості руху:  $\vec{p} = m\vec{v}$ .**

Імпульс тіла – векторна величина. Напрямок імпульсу збігається з напрямком швидкості руху тіла.

Прийнято говорити, що тіло масою  $m$ , що рухається зі швидкістю  $\vec{v}$ , несе із собою імпульс  $m\vec{v}$  (або володіє імпульсом  $m\vec{v}$ ).

За одиницю імпульсу в СІ прийнято імпульс тіла масою 1 кг, що рухається зі швидкістю 1 м/с. Одиницею імпульсу є **один кілограмометр за секунду (1 кг · м/с)**.

Зміна імпульсу тіла дорівнює, як видно з формули  $\vec{F}t = m\vec{v} - m\vec{v}_0$ , добутку сили  $\vec{F}$  і часу її дії  $t$ . Величина  $\vec{F}t$  має назву **імпульс сили**.

**Зміна імпульсу (кількості руху) тіла дорівнює імпульсу сили.**

Виводячи формулу  $\vec{F}t = m\vec{v} - m\vec{v}_0$ , ми припускали, що прискорення тіла, а значить, і сила, що діє на тіло, не змінюються із часом. Якщо сила змінюється із часом, то інтервал часу, протягом якого діє сила, можна розбити на маленькі інтервали, протягом яких силу можна вважати сталою. Для визначення зміни імпульсу протягом кожного такого інтервалу часу можна скористатися формулою  $\vec{F}t = m\vec{v} - m\vec{v}_0$ . Додавши отримані зміни імпульсу тіла, ми отримаємо зміну імпульсу за весь інтервал часу, протягом якого діяла сила.

Якщо час, протягом якого діяла сила, дуже малий, як, наприклад, під час зіткнення тіл або під час удару, то можна і безпосередньо скористатися формулою  $\vec{F}t = m\vec{v} - m\vec{v}_0$ , розуміючи під  $\vec{F}$  середню силу, що діє на тіло.

Імпульс цікавий тим, що він змінюється під дією даної сили однаково в усіх тіл, якщо час дії сили однаковий. Одна й та сама сила, що діє протягом певного часу, надасть однакового імпульсу і навантаженій баржі, і легенькій байдарці.

Імпульс тіла має дуже цікаву і важливу властивість, яку мають небагато фізичних величин. Це **властивість збереження**. Вона полягає в тому, що геометрична сума імпульсів тіл, що взаємодіють тільки одне з одним, зберігається незмінною. Самі імпульси тіл, звичайно, змінюються, оскільки на кожне з тіл діють сили взаємодії, але сума імпульсів залишається незмінною (сталою).

Це твердження називають **законом збереження імпульсу**. Закон збереження імпульсу – один з найважливіших законів природи. Дуже просто цей закон доводиться, якщо взаємодіють одне з одним два тіла. Дійсно, якщо перше тіло діє на друге із силою  $\vec{F}$ , то на перше тіло друге діє із силою, яка за третім законом Ньютона дорівнює  $-\vec{F}$ . Позначимо маси тіл через  $m_1$  і  $m_2$ , а їхні швидкості руху відносно якоїсь системи відліку через  $\vec{v}_1$  і  $\vec{v}_2$ . У результаті взаємодії тіл їх швидкості через деякий час  $t$  зміняться і будуть дорівнювати  $\vec{v}'_1$  і  $\vec{v}'_2$ .

Тоді, згідно з формулою  $\vec{F}t = m\vec{v} - m\vec{v}_0$ , запишемо:

$$\vec{F}t = m_1\vec{v}'_1 - m_1\vec{v}_1, -\vec{F}t = m_2\vec{v}'_2 - m_2\vec{v}_2.$$

Таким чином,  $m_1\vec{v}'_1 - m_1\vec{v}_1 = -(m_2\vec{v}'_2 - m_2\vec{v}_2)$ .

Змінивши знаки обох частин цієї рівності на протилежні, перепишемо її у вигляді:

$$m_1\vec{v}_1 + m_2\vec{v}_2 = m_1\vec{v}'_1 + m_2\vec{v}'_2.$$

У лівій частині цієї рівності міститься сума початкових імпульсів двох тіл, а у правій – сума імпульсів тих самих тіл через час  $t$ . Ці суми рівні між собою. Таким чином, хоча імпульс кожного з тіл при взаємодії змінюється, їхній повний імпульс, тобто сума імпульсів обох тіл, зберігається незмінним. Що і потрібно було довести.

Можна також довести, і досліди це підтверджують, якщо взаємодіють не два, а багато тіл, то геометрична сума імпульсів усіх тіл або системи тіл залишається незмінною. Важливо тільки, щоб ці тіла взаємодіяли одне з одним і на них не діяли сили з боку інших тіл, що не входять у систему (або щоб ці зовнішні сили врівноважувалися). Таку групу тіл, які не взаємодіють із жодними іншими тілами, що не входять до цієї групи, називають **замкнутою системою**.

Саме для замкнутих систем і справджується **закон збереження імпульсу**:

**геометрична сума імпульсів тіл, що є складовими замкнутої системи, залишається сталою при будь-яких взаємодіях тіл цієї системи між собою.**

Звідси випливає, що взаємодія тіл зводиться до того, що одні тіла передають частину свого імпульсу іншим.

Імпульс тіла – це векторна величина. Отже, якщо сума імпульсів тіл зберігається сталою, то й сума проєкцій цих імпульсів на координатні осі також залишається сталою. Унаслідок цього геометричне додавання імпульсів можна замінити алгебраїчним додаванням їхніх проєкцій.



Цікавий і важливий випадок практичного використання закону збереження імпульсу – це **реактивний рух**. Так називають рух тіла, який виникає, коли відділяється від тіла з певною швидкістю деяка його частина.

Реактивний рух здійснюють, наприклад, ракети (мал. 69). Будь-яка ракета – це система двох тіл. Вона складається з оболонки і пального, яке в ній є. Оболонка має форму труби, один кінець якої закрито, а інший відкрито і забезпечено трубчастою насадкою з отвором особливої форми – реактивним соплом.

Закон збереження імпульсу дає змогу визначити швидкість руху ракети (оболонки).

Дійсно, припустимо спочатку, що весь газ, що утворюється під час згоряння пального, викидається з ракети одразу, а не витікає поступово.

Позначимо всю масу газу, на який перетворюється пальне в ракеті, через  $m_r$ , а швидкість газу – через  $\vec{v}_r$ . Масу і швидкість руху оболонки позначимо через  $m_{об}$  і  $\vec{v}_{об}$ . Згідно із законом збереження імпульсу сума імпульсів оболонки і газу після запуску має бути такою самою, якою була до запуску ракети, тобто має дорівнювати нулю. Отже,

$$m_r(v_r)_y + m_{об}(v_{об})_y = 0, \text{ або } m_{об}v_{об} = m_r v_r$$

(координатну вісь  $Oy$  вибрано в напрямку руху оболонки). Звідки визначимо швидкість руху оболонки:

$$v_{об} = \frac{m_r}{m_{об}} v_r.$$

З формули видно: що більша швидкість витікання газу і що більше відношення маси палива до маси оболонки, то швидкість оболонки ракети більша. Тому достатньо велику швидкість оболонка отримає в тому випадку, якщо маса пального набагато більша від маси оболонки. Наприклад, щоб швидкість руху оболонки була за абсолютним значенням у 4 рази більша від швидкості витікання газу, потрібно, щоб маса пального була у стільки само разів більша за масу оболонки, тобто оболонка має складати одну п'яту від усієї маси ракети на старті. Адже «корисна» частина ракети – це сама оболонка.



Мал. 69. Старт української ракети-носія «Дніпро»



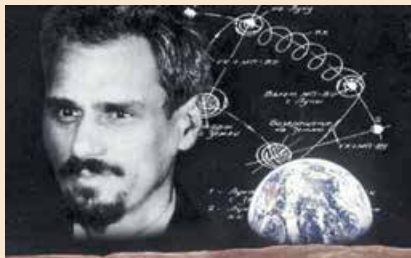
#### ЧИ ЗНАЄТЕ ВИ, ЩО...

- Декарт обґрунтовував принцип збереження кількості руху досконалістю бога «який діє з найбільшою постійністю і незмінністю».
- До винаходу пароплава існував проект судна, який ґрунтувався на реактивному принципі. Нагнітаючий насос у кормовій частині мав створювати потужний струмінь води, за викидом якого судно мало б рухатися вперед. Цей проект не було здійснено, однак він зіграв важливу роль у винаході пароплава.
- При незмінній швидкості витікання газів із сопла ракети виграш у швидкості при тій самій масі пального отримується під час використання багатоступінчастих ракет, коли відкидаються баки, трубопроводи і двигуни відпрацьованих ступенів. Однак до сьогодні не існує вигідної конструкції, де б непотрібна маса ракети відкидалася неперервно.

● Закон збереження імпульсу дає змогу «розшукати» і невидимі об'єкти, наприклад електромагнітні хвилі, що випромінюються коливальним контуром, або антинейтрино – субатомні частинки, які не залишають слідів у детекторах.

● Олександр Гнатович Шаргей увійшов в історію вітчизняної і світової науки як **Юрій Васильович Кондратюк** (1897–1942). Він уперше обґрунтував економічну доцільність вертикального злету ракет, створення проміжних баз під час польотів, гальмування у верхніх шарах атмосфери, використання сонячної енергії космічними апаратами тощо.

У праці «Завоювання міжпланетних просторів» (1929) учений оригінальним методом вивів основне рівняння руху ракети, розглянув енергетично найвигодніші траєкторії космічних польотів, виклав теорію багатоступеневих ракет. Дав схему та опис чотириступеневої ракети на киснево-водневому пальному, гіроскопічних регуляторів системи керування її рухом. Розглянув потенційне створення міжпланетних баз та використання гравітаційних полів на інших планетах.



*Юрій Кондратюк*

Однак найбільшим досягненням Кондратюка було визнано його проект розрахунків польоту людини на Місяць. Ім'я ученого стало широко відомим після успішного польоту американського корабля «Аполлон» на природний супутник Землі (1969). У програмі США була використана схема Кондратюка висадки людей на поверхню Місяця методом відокремлення посадкового модуля від основного корабля, що залишався на орбіті як штучний супутник. На знак великої поваги до видатного українського інженера американські астронавти назвали один із кратерів на Місяці кратером Кондратюка, а його ім'я увіchnили в Залі слави Космічного музею в США.

● **Сергій Павлович Корольов** (1907(1906)–1966) – учений у галузі механіки та процесів керування, конструктор ракетно-космічних систем, один з основоположників практичної космонавтики. Після ознайомлення з працями К. Ціолковського зацікавився ідеєю створення літальних апаратів ракетного типу. Він розробив кілька проектів крилатих ракет з автоматичним управлінням та проект ракетоплана «РП-318-1» (створений за цим проектом ракетоплан у 1940 р. здійснив політ під управлінням льотчика). У 1938 р. був заарештований, звинувачений у «контрреволюційній троцькістській діяльності» і засуджений до 10 років ув'язнення. Покарання відбував на Колимі. Після перегляду справи (1940 р.) ученого направили до Конструкторського бюро особливого режиму при НКВС СРСР, яким керував А. Туполєв. Брав участь у створенні та виробництві фронтового бомбардувальника «Ту-2» й одночасно з власної ініціативи розробляв проекти керованої аероторпеди й ракетного перехоплювача нового типу. Це стало приводом для переведення його в 1942 р. в Особливе конструкторське бюро НКВС СРСР при Казанському авіазаводі, де велися роботи зі створення ракетних двигунів для авіації. Звільнений у 1944 р. (реабілітований лише в 1957 р.) і в 1945 р. направлений до Німеччини для ознайомлення з трофейною ракетною технікою (ФАУ-2). З 1946 р. – головний конструктор балістичних ракет далекої дії (керівництво СРСР розглядало такі ракети як транспорт для доставки атомних зарядів) і керівник Ради головних конструкторів (конструкторів двигунів, систем автономного керування, гіроскопічних приладів, систем радіокерування і засобів наземного обладнання, стартових установок). Розробив ідею міжконтинентальної багатоступеневої балістичної ракети і втілював її в життя. У серпні 1957 р. було



*Сергій Корольов*

здійснено перший успішний політ такої ракети. Під його керівництвом відбулися запуски перших у світі штучних супутників Землі та Сонця, польоти автоматичних міжпланетних станцій до Місяця, Марса й Венери, м'яка посадка автоматичної станції на поверхню Місяця. Очолював розробку і запуски супутників серій «Електрон», «Молнія», «Космос», першої автоматичної міжпланетної станції «Зонд». Керував створенням ракет-носіїв «Спутник», «Молнія», «Восток», створенням і запуском пілотованих космічних кораблів «Восток», «Восход», на яких уперше в історії здійснено польоти людини в космос і вихід у відкритий космічний простір.



### ЗАПИТАННЯ ДО ВИВЧЕНОГО

1. Чому вводять поняття імпульсу тіла в механіці?
2. Що таке імпульс тіла?
3. Що таке імпульс сили?
4. У чому полягає закон збереження імпульсу?
5. Що є прикладом використання закону збереження імпульсу?



Дослідіть, де у природі використовується закон збереження імпульсу.



### ЗАДАЧІ ТА ВПРАВИ

#### Розв'язуємо разом

Візок масою  $m_1 = 120$  кг котиться зі швидкістю  $v_1 = 6$  м/с. Будівельник, який біг назустріч візку зі швидкістю  $v_2 = 9$  км/год, стрибає у візок. З якою швидкістю  $v$  рухається після цього візок, якщо маса будівельника

Дано:

$$m_1 = 120 \text{ кг}$$

$$v_1 = 6 \text{ м/с}$$

$$m_2 = 60 \text{ кг}$$

$$v_2 = 9 \text{ км/год} = 2,5 \text{ м/с}$$

$v = ?$

$$m_2 = 60 \text{ кг?}$$

#### Розв'язання

Запишемо закон збереження імпульсу у векторній формі:

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

Спрямуємо вісь  $Ox$  у напрямку руху візка, тоді закон збереження матиме вигляд:

$$m_1 v_1 - m_2 v_2 = (m_1 + m_2) v.$$

$$\text{Звідси отримаємо: } v = \frac{m_1 v_1 - m_2 v_2}{m_1 + m_2}.$$

Підставимо в отримане рівняння значення фізичних величин:

$$v = \frac{120 \text{ кг} \cdot 6 \text{ м/с} - 60 \cdot 2,5 \text{ м/с}}{120 \text{ кг} + 60 \text{ кг}} = 3,2 \text{ м/с}.$$

**Відповідь:** 3,2 м/с.

#### Рівень А

**301.** Яка маса тіла, якщо його імпульс дорівнює 500 кг, а швидкість – 20 м/с?

**302.** Кулька масою 500 г рівномірно котиться зі швидкістю 2 м/с. Визначте імпульс кульки.

**303.** М'яч масою 200 г летить зі швидкістю 5 м/с. Визначте імпульс м'яча. Як зміниться імпульс м'яча, якщо маса його буде у 3 рази більшою, а швидкість – у 2 рази меншою?

**304.** Для чого під час стрільання з рушниці рекомендується дужче притиснути приклад до плеча?

**305.** Куля масою 10 г пробила стіну, і в результаті швидкість її зменшилась від 800 м/с до 300 м/с. Визначте, на скільки зменшився імпульс кулі.

**306.** У супермаркеті дівчинка масою 50 кг біжить зі швидкістю 10 м/с за візком, який рухається зі швидкістю 5 км/год і стрибає на нього. Якою буде швидкість візка після цього, якщо його маса 80 кг?

**307.** Снаряд масою  $m_1$ , що летів зі швидкістю  $v_1$  паралельно рейкам, потрапляє в нерухому платформу з піском масою  $m_2$  і застрягає в піску. З якою швидкістю почне рухатися платформа?

### Рівень Б

**308.** Чому молотком можна розбити камінь на долоні, не відчувши болю від удару?

**309.** Чому під час прополювання бур'яни не слід виривати із землі дуже швидко?

**310.** З якою швидкістю має летіти хокейна шайба масою 160 г, щоб її імпульс дорівнював імпульсу кулі масою 8 г, що летить зі швидкістю 600 м/с?

**311.** З якою силою діє молоток масою 0,5 кг на цвях під час удару, якщо швидкість молотка перед ударом 2 м/с? Вважайте, що удар тривав 0,01 с.

**312.** Чи можна стверджувати, що імпульс тіла є відносним? Відповідь обґрунтуйте.

**313.** Кулька масою 200 г, що падала вертикально, ударилася об підлогу зі швидкістю 5 м/с і підстрибнула на висоту 46 см. Визначте зміну імпульсу кульки під час удару.

**314.** Від двоступеневої ракети загальною масою 1 т в момент досягнення ракетою швидкості 171 м/с відокремився другий ступінь масою 0,4 т. Швидкість другого ступеня збільшилася до 185 м/с. Визначте швидкість руху першого ступеня.

**315.** Ракета масою  $4 \cdot 10^3$  кг летить зі швидкістю 0,5 км/с. Від неї відокремлюється головна частина масою  $10^3$  кг і летить зі швидкістю 800 м/с. З якою швидкістю продовжуватиме політ частина ракети, що залишилася?

**316.** Криголам масою 5000 т рухався з вимкненими двигунами зі швидкістю 10 м/с. Після зіткнення з нерухомою крижиною криголам став рухатися разом з нею зі швидкістю 2 м/с. Визначте масу крижини. Опір води не враховуйте.

**317.** Із човна масою 200 кг, що рухається зі швидкістю 1 м/с, у горизонтальному напрямку стрибає рибалка масою 50 кг зі швидкістю 3 м/с. Яка швидкість човна після стрибка рибалки, якщо він стрибає з носа по ходу руху?

### Є над чим замислитися

**318.** Чому куля, вилетівши з рушниці, не може відчинити двері, але пробиває в них отвір, тоді як тиском пальця двері відчинити легко, але зробити отвір неможливо?

**319.** М'яч масою 150 г ударяється об гладку стінку під кутом  $30^\circ$  до неї й відскакує без втрати швидкості. Визначте середню силу, що діє на м'яч із боку стінки, якщо швидкість м'яча 10 м/с, а тривалість удару 0,1 с.

**320.** У повітряно-реактивний двигун літака входить у середньому 25 кг повітря за секунду. Швидкість повітря на вході 250 м/с, а швидкість газів на виході 500 м/с. Визначте реактивну силу. Маса згорілого пального не враховувати.

**321.** Рух матеріальної точки описується рівнянням  $x = 5 - 8t + 4t^2$ . Приймаючи її масу рівною 2 кг, визначте імпульс через 2 с і 4 с після початку відліку часу.

**322.** Куля масою 9 г, що летить горизонтально, потрапляє у вантаж масою 8 кг, підвішений на легкому жорсткому стержні, і застрягає в ньому. При цьому вантаж з кулею піднімається на висоту 2 см. З якою швидкістю летіла куля?

**323.** Снаряд вилітає з гармати під кутом  $30^\circ$  до горизонту зі швидкістю 700 м/с. У верхній точці траєкторії снаряд розривається на два осколки, які безпосередньо після вибуху рухаються в попередньому напрямку. Маса одного осколка у 3 рази більша за масу другого. Швидкість більшого осколка 500 м/с. Визначте швидкість меншого осколка.

**324.** Спортсменка розбігається протягом часу  $t$  і стрибає в довжину. Визначте максимально можливу дальність стрибка, якщо коефіцієнт тертя  $m$ , а максимальна висота стрибка  $h$ .

**325.** Продукти згоряння викидаються із сопла ракетного двигуна порціями по 200 г кожна з початковою швидкістю 100 м/с. Яку швидкість матиме ракета після викидання третьої порції, якщо в початковий момент її маса була 300 кг, а початкова швидкість дорівнювала нулю? Дію сили тяжіння не враховуйте.

**326.** Човен масою 140 кг стоїть нерухомо у стоячій воді. Мисливець масою 60 кг, який перебуває в човні, переходить з носа на корму. Яка довжина човна, якщо він при цьому змістився на 1,2 м? Опором води знехтуйте.

## § 26. КІНЕТИЧНА І ПОТЕНЦІАЛЬНА ЕНЕРГІЯ

Повсякденний досвід показує, що нерухомі тіла можна привести в рух, а рухомі зупинити. *Але чи зникає механічний рух тіл безслідно? Чи почне рухатися яке-небудь тіло без зміни руху інших тіл?*

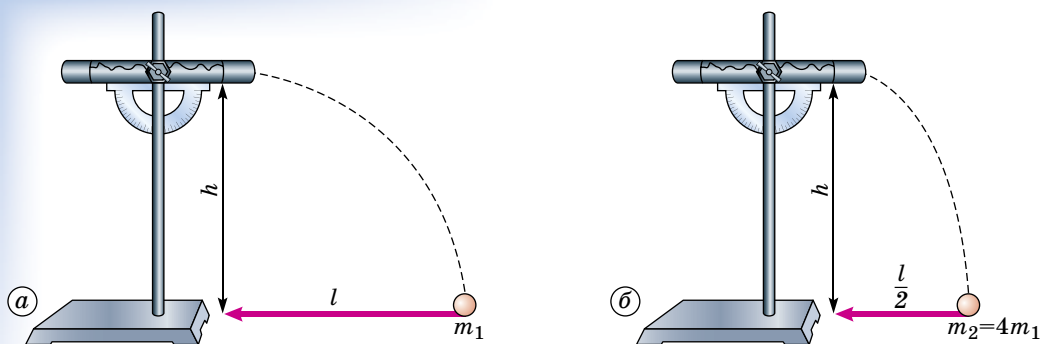
Наприклад, ударимо молотком по шматку пластиліну. У результаті удару механічний рух молотка припиняється. Вимірявши температуру пластиліну чутливим термометром, ми виявимо, що він став теплішим. Механічний рух тіл у результаті взаємодії перетворився на тепловий рух їхніх атомів.

Можливе і виникнення механічного поступального руху тіл за рахунок зміни теплового руху атомів і молекул. Такі процеси відбуваються під час пострілу з гармати і під час старту ракети, під час роботи двигуна внутрішнього згоряння.

Досліди і спостереження показують, що механічний рух тіл ніколи не зникає безслідно, але може перетворюватися на інші форми руху. З іншого боку, механічний рух ніколи не виникає безпричинно, без зміни руху інших тіл або без перетворення їх форм руху матерії.

Фізика поставила своїм завданням знайти **фізичну величину, яка є мірою механічного руху і яка зберігається при будь-яких перетвореннях механічного руху в інші форми руху матерії**. Таку фізичну величину називають **енергією**.

Для визначення енергії як фізичної величини потрібно встановити її зв'язок з іншими фізичними величинами, вибрати її одиницю і знайти способи вимірювання.



Мал. 70. При однаковій дії сили початкова швидкість руху тіла залежить від його маси

**Дослід.** Вивчимо результати пострілу з гармати снарядами різної маси при однаковому заряді. Це можна продемонструвати за допомогою дії однаково стисненої сталевий пружини на снаряд балістичного пістолета (мал. 70).

Дослід показує, що зі збільшенням маси снаряда в 4 рази його початкова швидкість руху під дією тієї самої пружини виявляється у 2 рази меншою. Отже, однаковим у двох снарядів різних мас у цьому досліді виявляється добуток маси тіла і квадрат швидкості поступального руху тіла:

$$m_2 = 4m_1, \quad v_2 = \frac{1}{2}v_1, \quad m_2v_2^2 = 4m_1 \left(\frac{v_1}{2}\right)^2 = m_1v_1^2.$$

Досліди з іншими снарядами показують, що однаково стиснена сталевий пружина надає снарядам різної маси  $m_1, m_2, \dots, m_n$  такі швидкості  $v_1, v_2, \dots, v_n$ , що добуток маси тіла і квадрата швидкості для всіх тіл виявляється однаковим:

$$m_1v_1^2 = m_2v_2^2 = \dots = m_nv_n^2.$$

Отже, величина  $mv^2$  може слугувати кількісною мірою поступального руху тіл при взаємних перетвореннях поступального механічного руху з іншими формами руху.

У фізиці кількісною мірою поступального механічного руху при виникненні його з інших форм руху або перетворенні на інші форми руху прийнято величину, яка дорівнює половині добутку маси тіла і квадрата швидкості його руху:

$$E_k = \frac{mv^2}{2}.$$

Цю фізичну величину називають **кінетичною енергією тіла**.

Оскільки швидкість руху тіла є величиною, яка залежить від вибору системи відліку, значення кінетичної енергії тіла також залежить від вибору системи відліку.

Зміна кінетичної енергії тіла відбувається в результаті дії зовнішньої сили  $\vec{F}$  на тіло.

**Фізичну величину  $A$ , яка дорівнює зміні кінетичної енергії  $\Delta E_k$  тіла в результаті дії на нього сили  $F$ , називають *роботою*:**

$$A = \Delta E_k.$$



Якщо на тіло, що рухається зі швидкістю  $\vec{v}_1$ , діє сила  $\vec{F}$ , яка збігається за напрямком зі швидкістю, то швидкість руху тіла збільшується за час  $t$  до деякого значення  $\vec{v}_2$ . При цьому зміна кінетичної енергії дорівнює:

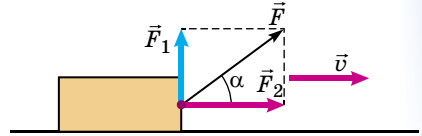
$$\Delta E_k = \frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2} = \frac{m(v_2 - v_1)}{t} \cdot \frac{(v_2 + v_1)t}{2} = mal = Fl.$$

Якщо напрям сили  $\vec{F}$  збігається з напрямком швидкості тіла  $\vec{v}$ , то робота  $A$  дорівнює добутку модуля сили  $F$  і шляху  $s$ , пройденого тілом:

$$A = Fl.$$

Розглянемо тепер загальний випадок. Нехай на тіло діє сила  $\vec{F}$  під кутом  $\alpha$  до швидкості руху тіла  $\vec{v}$ .

Розкладемо силу  $\vec{F}$  на складові  $\vec{F}_2$  і  $\vec{F}_1$ ,  $\vec{F}_2$  напрямлена паралельно, а  $\vec{F}_1$  – перпендикулярно до швидкості  $\vec{v}$  (мал. 71).



Мал. 71. Розкладання сили, що діє на тіло, на її складові

Під дією сили  $\vec{F}_1$ , напрямленої перпендикулярно до швидкості  $\vec{v}$ , відбувається зміна тільки напрямку швидкості  $\vec{v}$ . Оскільки модуль швидкості не змінюється, не змінюється кінетична енергія тіла  $E_k$ . Отже, зміна кінетичної енергії тіла відбувається тільки під дією складової сили  $F_2$ , паралельної швидкості  $\vec{v}$ . У цьому випадку зміна кінетичної енергії визначається виразом  $\Delta E_k = F_2 l$ .

Значення модуля складової сили  $F_2$  дорівнює:  $F_2 = F \cos \alpha$ , а тому зміна кінетичної енергії дорівнює:  $\Delta E_k = Fl \cos \alpha$ .

Отже,  $A = Fl \cos \alpha$ .

Якщо сила напрямлена під кутом  $\alpha$  до швидкості руху тіла, то робота дорівнює добутку модуля сили  $F$ , шляху  $l$  і косинуса кута  $\alpha$  між векторами сили  $\vec{F}$  і швидкості  $\vec{v}$ .

Залежно від значення кута  $\alpha$  між векторами сили  $\vec{F}$  і швидкості  $\vec{v}$  робота може мати додатне або від'ємне значення. Якщо кут  $\alpha$  такий, що  $0 \leq \alpha < \frac{\pi}{2}$ , то робота сили  $F$  додатна (мал. 72). У результаті виконання цієї роботи кінетична енергія тіла збільшується.

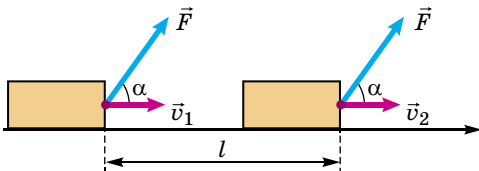
Якщо кут  $\alpha$  такий, що  $\frac{\pi}{2} < \alpha \leq \pi$ , то робота сили  $F$  від'ємна (мал. 73).

У результаті виконання цієї роботи кінетична енергія тіла зменшується.

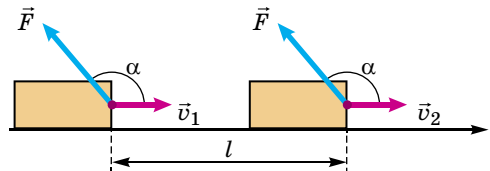
У випадку  $\alpha = \frac{\pi}{2}$  робота дорівнює нулю.

Наприклад, сила тяжіння виконує додатну роботу під час руху тіла вниз, а під час руху тіла вгору робота сили тяжіння від'ємна.

Одним з найпростіших прикладів виникнення кінетичної енергії поступального руху за рахунок перетворення інших видів енергії є вільне падіння тіл.



Мал. 72. Робота сили, що переміщує тіло, додатна



Мал. 73. Робота сили, що переміщує тіло, від'ємна



Мал. 74. Машина ударної дії

Якщо тіло масою  $m$  підняте над поверхнею землі на деяку висоту і потім вільно падає на землю, його швидкість збільшується, кінетична енергія теж збільшується. Збільшення кінетичної енергії тіла під час вільного падіння показує, що підняте над землею тіло має деякий запас енергії. Ця енергія під час вільного падіння перетворюється на кінетичну енергію. Це використовують, наприклад, у роботі машини ударної дії (мал. 74).

Зі збільшенням висоти, з якої падає тіло, збільшується його швидкість біля поверхні землі, збільшується і кінетична енергія. Отже, запас енергії тіла, за

рахунок якої збільшується кінетична енергія вільно падаючого тіла, збільшується із збільшенням відстані від поверхні землі.

Енергію, яка залежить тільки від координат тіла або взаємного розміщення тіл, називають *потенціальною енергією тіла*.

Потенціальною енергією піднятого над землею тіла називають таку фізичну величину  $E_{\text{п}}$ , яка під час вільного падіння тіла зменшується рівно на стільки, на скільки збільшується його кінетична енергія  $E_{\text{к}}$ :

$$\Delta E_{\text{п}} = -\Delta E_{\text{к}}.$$

Зміна кінетичної енергії тіла  $\Delta E_{\text{к}}$  у даному випадку дорівнює роботі  $A$  сили тяжіння, тому зміна потенціальної енергії тіла дорівнює роботі сили тяжіння, узятій з протилежним знаком:  $\Delta E_{\text{п}} = -A$ .

Зазвичай приймають, що потенціальна енергія тіла дорівнює нулю на поверхні землі.

Під час підйому тіла вертикально вгору на висоту  $h$  від поверхні землі сила тяжіння виконує роботу:

$$A = -mgh,$$

потенціальна енергія при цьому збільшується від нуля до значення  $mgh$ .

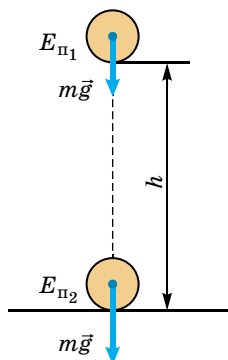
Потенціальна енергія  $E_{\text{п}}$  тіла, що міститься на висоті  $h$  над поверхнею землі, дорівнює добутку маси тіла  $m$ , прискорення вільного падіння  $g$  і відстані  $h$  від поверхні землі (мал. 75):

$$E_{\text{п}} = mgh.$$

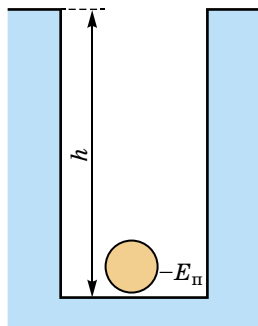
Потенціальна енергія тіла може мати як додатні, так і від'ємні значення. Тіло масою  $m$ , що міститься на глибині  $h$  від поверхні землі, має від'ємне значення потенціальної енергії (мал. 76):

$$E_{\text{п}} = -mgh.$$

Кінетична енергія може змінюватися не тільки в результаті дії на тіло сили тяжіння, але і під час дії сили пружності.



Мал. 75. Потенціальна енергія тіла додатна



Мал. 76. Потенціальна енергія тіла від'ємна

Потенціальною енергією пружно деформованого тіла називають фізичну величину  $E_{\text{п}}$ , яка під час зміни швидкості поступального руху тіла під дією сил пружності зменшується рівно на стільки, на скільки збільшується кінетична енергія тіла  $E_{\text{к}}$ :

$$\Delta E_{\text{п}} = \Delta E_{\text{к}}.$$

З виразів  $\Delta E_{\text{п}} = -\Delta E_{\text{к}}$  і  $A = \Delta E_{\text{к}}$  випливає, що зміна потенціальної енергії  $\Delta E_{\text{п}}$  пружно деформованого тіла дорівнює роботі сил пружності  $A$ , узятої з протилежним знаком:  $\Delta E_{\text{п}} = -A$ .

Під час зміни деформації від  $x_1$  до  $x_2$  значення сили пружності за законом Гука лінійно змінюється від  $F_1 = -kx_1$  до  $F_2 = -kx_2$ . Середнє значення сили пружності при цьому дорівнює:

$$F_{\text{с}} = \frac{F_1 + F_2}{2} = -k \frac{x_1 + x_2}{2}.$$

Робота  $A$  сили пружності дорівнює:

$$A = F_{\text{с}} \Delta x = -k \left( \frac{x_1 + x_2}{2} \right) (x_2 - x_1) = \frac{kx_1^2}{2} - \frac{kx_2^2}{2}.$$

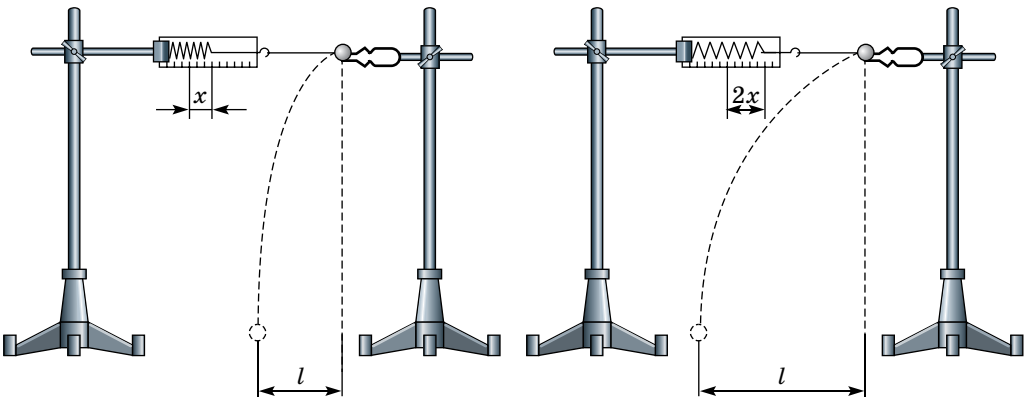
Зміна потенціальної енергії пружини дорівнює:

$$E_{\text{п2}} - E_{\text{п1}} = \Delta E_{\text{п}} = -A = \frac{kx_2^2}{2} - \frac{kx_1^2}{2}.$$

Потенціальна енергія пружно деформованого тіла  $E_{\text{п}}$  дорівнює половині добутку його жорсткості  $k$  і квадрата деформації  $x$ :

$$E_{\text{п}} = \frac{kx^2}{2}.$$

У справедливості цього висновку можна переконатися на досліді. Закріпимо горизонтально динамометр із сталеву пружиною, прикріпимо один кінець нитки до гачка динамометра, а до іншого прив'яжемо кулю. Розташуємо кулю на одній горизонтальній прямій з пружиною динамометра і розтягнемо пружину на 2 см, а потім відпустимо кулю. Пружина скорочується, при цьому відбувається перетворення потенціальної енергії пружної деформації на кінетичну енергію поступального руху кулі. Дальність польоту кулі пропорційна проекції її початкової швидкості на горизонтальну вісь (мал. 77).



Мал. 77. Дальність польоту тіла залежить від початкової швидкості його руху

Досліди показують, що зі збільшенням деформації пружини у 2 рази дальність польоту кулі збільшується також у 2 рази (мал. 77). Отже, початкова швидкість кулі у другому досліді у 2 рази більша, а кінетична енергія в 4 рази більша. Це доводить, що відповідно до рівняння  $E_{\text{п}} = \frac{kx^2}{2}$  зі збільшенням деформації у 2 рази потенціальна енергія пружно деформованого тіла збільшується в 4 рази.



### ЗАПИТАННЯ ДО ВИВЧЕНОГО

1. Що називають кінетичною енергією тіла?
2. Що називають роботою?
3. Як пов'язана робота із силою і пройденим шляхом під час прямолінійного руху?
4. Як пов'язана зміна потенціальної енергії тіла з роботою сили пружності або сили тяжіння?
5. Від чого залежить потенціальна енергія піднятого над Землею тіла?
6. За яких умов можна вважати, що потенціальна енергія піднятого над Землею тіла пропорційна висоті тіла над Землею?
7. Як залежить потенціальна енергія пружно деформованого тіла від деформації?

## § 27. ПОТУЖНІСТЬ

110

Механічна робота завжди пов'язана з рухом тіл. А рух відбувається в часі. Тому і виконання роботи, як перетворення механічної енергії, завжди відбувається протягом певного часу.

### Робота виконується протягом певного часу.

Найпростіші спостереження показують, що час виконання роботи може бути різним. Так, школярка може піднятися східцями на п'ятий поверх за 1–2 хв, а людина похилого віку – не менше як за 5 хв. Вантажний автомобіль КрАЗ перевезе певний вантаж на відстань 50 км за 1 год. Але якщо цей вантаж частинами почне перевозити легковий автомобіль з причіпом, то затратить на це не менше як 12 год.

Гектар землі сильним конем можна виорати за 10–12 год, а трактор з багатолемішним плугом цю роботу виконує за 40–50 хв (мал. 78).

Підйомний кран на будівництві за кілька хвилин піднімає на задану висоту, наприклад, 400 цеглин. Якби цю роботу виконував робітник, переносючи цеглу вручну, то він затратив би на це весь робочий день.

Для опису процесу виконання роботи, з огляду на його швидкість, використовують фізичну величину, яку називають **потужністю**.



Мал. 78. Потужність трактора оцінюється в десятки, а то й сотні кінських сил

**Потужність** – фізична величина, яка характеризує швидкість виконання роботи і визначається відношенням виконаної роботи до затраченого часу.

Щоб визначити потужність, треба роботу поділити на час її виконання:

$$N = \frac{A}{t},$$

де  $N$  – потужність;  $A$  – механічна робота;  $t$  – час.

Якщо на рухоме тіло діє сила, то ця сила виконує роботу. Потужність у цьому випадку визначається добутком сили і вектора швидкості, з якою рухається тіло:

$$N = Fv \cos \alpha,$$

де  $F$  – сила, яка діє на тіло;  $v$  – швидкість руху тіла;  $\alpha$  – кут між вектором швидкості та силою.

Одиницею потужності в СІ є **один ват (1 Вт)**. Її названо на честь англійського винахідника парової машини **Джеймса Ватта (1736–1819)**.

**1 ват – це потужність, при якій за 1 с виконується робота 1 Дж.**

Знаючи потужність двигуна  $N$ , можна визначити роботу  $A$ , яку виконує цей двигун протягом певного інтервалу часу  $t$ , за формулою:

$$A = Nt.$$



#### ЧИ ЗНАЄТЕ ВИ ЩО...

- Потужність серця у спокої в різних людей має межі 0,7–1,8 Вт, тобто співрозмірна з потужністю електричного дзвінка. Під час навантаження вона може збільшуватись у 2–6 разів, у тренуваних людей навіть у 10 разів. Довгий час людина здатна працювати із середньою потужністю 75 Вт (0,1 кін. сил), а короткочасно, наприклад під час бігу, – до 600 Вт. Хвіст голубого кита має горизонтальні лопаті. Він розвиває потужність 368 кВт. Ця потужність у 8 разів менша від потужності двигуна українського літака Ан-12 і майже в 3 рази більша за потужність двигуна трактора ХТЗ-17211-21 харківського виробництва.

- Тепловоз 2ТЕ116-994 має потужність 4,5 МВт, а електровоз ВЛ 85 – 9,3 МВт. Ракета-носіє «Дніпро», виготовлена на ДП «ВО «Південмаш» ім. О.Макарова», має потужність понад 60 000 МВт.

111



#### ЗАПИТАННЯ ДО ВИВЧЕНОГО

1. Що таке потужність?
2. За якими формулами визначають потужність?
3. Які є одиниці потужності?
4. Як можна визначити механічну роботу, знаючи потужність двигуна і час, протягом якого він працював?



Дослідіть, які процеси відбуваються у двигунах внутрішнього згоряння і якими фізичними законами вони описуються.

## § 28. ЗАКОН ЗБЕРЕЖЕННЯ МЕХАНІЧНОЇ ЕНЕРГІЇ

Вивчення руху тіл під дією сил тяжіння і сил пружності показало, що існує фізична величина, яку називають потенціальною енергією  $E_{\text{п}}$ . Вона залежить від координат тіла, і зміна її дорівнює зміні кінетичної енергії тіла, узятій з протилежним знаком:

$$\Delta E_{\text{п}} = -\Delta E_{\text{к}}.$$

Отже, сума змін кінетичної і потенціальної енергій тіл, які взаємодіють гравітаційними силами і силами пружності, дорівнює нулю:

$$\Delta E_{\text{к}} + \Delta E_{\text{п}} = 0.$$

Сили, які залежать тільки від координат тіла, називають **консервативними силами**. Сили тяжіння і пружності є консервативними силами.

Сума кінетичної і потенціальної енергій тіла є повною механічною енергією  $E$ :

$$E = E_{\text{к}} + E_{\text{п}}.$$

Якщо сума змін кінетичної і потенціальної енергій тіл дорівнює нулю, то це означає, що

**повна механічна енергія системи тіл, що взаємодіють між собою консервативними силами, залишається сталою:**

$$E = E_{\text{к}} + E_{\text{п}} = \text{const.}$$

Цей дослідний факт, що підтверджується найточнішими експериментами, називають **законом збереження механічної енергії**. Якщо тіла взаємодіють силами, які залежать від швидкості відносного руху, механічна енергія в системі взаємодіючих тіл не зберігається. Прикладом сил такого типу, що називають **неконсервативними силами**, є сили тертя.

112

Якщо на тіло діють сили тертя, то для їх подолання потрібно затратити енергію, частина якої йде на виконання роботи проти сил тертя.

Але нам тільки здається, що закон збереження енергії порушується, тому що цей закон є частковим випадком загального закону збереження і перетворення енергії.

**Енергія тіла ніколи не зникає і не з'являється знову: вона лише перетворюється з одного виду на інший.**

Загальний закон збереження і перетворення енергії виконується всюди. Внутрішня енергія палива у двигуні внутрішнього згоряння перетворюється в механічну енергію поршня. Під час падіння з греблі електростанції потенціальна енергія води перетворюється в кінетичну, яка приводить у рух турбіни і перетворюється в електричну, тощо.

Загальний закон збереження енергії застосовується для розв'язання багатьох механічних задач. Він дає змогу їх розв'язати простіше, ніж за законами Ньютона, і є важливим критерієм багатьох наукових відкриттів і теорій, а також працездатності машин.



### ЗАПИТАННЯ ДО ВИВЧЕНОГО

1. Як пов'язані між собою зміни кінетичної і потенціальної енергій під час взаємодії силами пружності і всесвітнього тяжіння?
2. Що називають повною механічною енергією?
3. Запишіть формулу закону збереження повної механічної енергії. Сформулюйте закон.
4. Чому під час дії сил тертя закон збереження повної механічної енергії порушується?
5. Сформулюйте загальний закон збереження і перетворення енергії.



Дослідіть дію закону збереження енергії у живій природі.





## ЗАДАЧІ ТА ВПРАВИ

## Розв'язуємо разом

1. Крістіан Гюйгенс стверджував, що якщо куля на невагомій і нерозтяжній нитці обертається у вертикальній площині (мал. 79), то нитка має витримувати силу, рівну принаймні збільшеній ушестеро силі тяжіння кулі. Доведіть це твердження.

## Розв'язання

Позначимо швидкості руху кулі в нижній і верхній точках її траєкторії через  $\vec{v}_1$  і  $\vec{v}_2$ .

У системі тіл «куля–Земля» діє тільки консервативна внутрішня сила тяжіння. Робота зовнішньої сили пружності нитки дорівнює нулю, оскільки кут між векторами  $\vec{T}$  і  $\vec{v}$  дорівнює  $90^\circ$ . Тому до системи тіл «куля–Земля» застосуємо закон збереження механічної енергії. Нульовий рівень відліку потенціальної енергії пов'яжемо з нижнім положенням кулі:

$$\frac{mv_1^2}{2} = \frac{mv_2^2}{2} + mg2l,$$

де  $l$  – довжина нитки, звідки випливає:  $v_1^2 = v_2^2 + 4gl$ .

На малюнку 79 зображено сили, що надають кулі доцентрового прискорення під час проходження нижньої А і верхньої В точок траєкторії. Запишемо другий закон Ньютона для цих точок:

для точки А: 
$$T - mg = m \frac{v_1^2}{l}, \quad T = m \left( g + \frac{v_1^2}{l} \right);$$

для точки В: 
$$mg = m \frac{v_2^2}{l}, \quad v_2^2 = gl.$$

При мінімально можливій швидкості  $v_2$  для проходження кулею верхньої точки доцентрове прискорення кулі надається тільки силою тяжіння. Розв'язуючи записані вище рівняння, отримаємо:

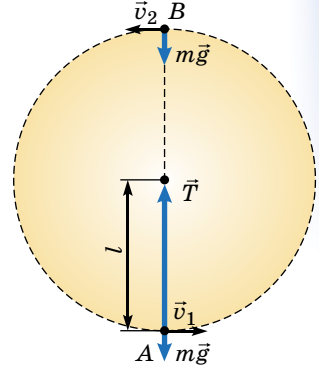
$$v_1^2 = 5gl, \quad T = m \left( g + \frac{5gl}{l} \right) = 6mg,$$

що й потрібно було довести.

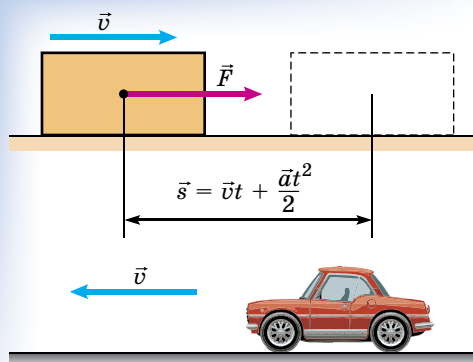
Якщо в одній інерціальній системі відліку механічна енергія замкнутої системи тіл змінюється, наприклад частина її витрачається на нагрівання, то й у будь-яких інших системах, що рухаються відносно першої рівномірно і прямолінійно, відбудеться така сама зміна механічної енергії.

Для незамкнених систем тіл не тільки енергія, але і зміна енергії в різних інерціальних системах відліку різні. Проте рівність між виконаною над системою роботою і зміною кінетичної енергії виконуватиметься і в цьому випадку.

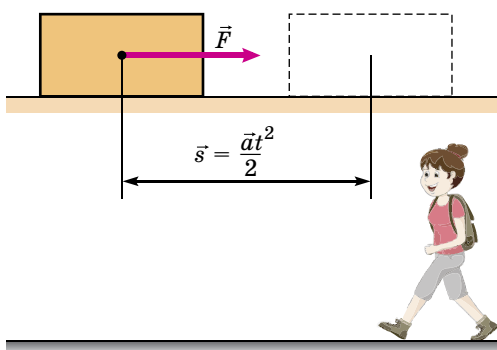
2. На нерухомо відносно Землі тіло масою  $m$  діє стала сила  $\vec{F}$ . Порівняйте зміни кінетичної енергії тіла за час  $t$  дії сили в системах відліку, пов'язаних із Землею і з автомобілем, що рухається зі швидкістю  $\vec{v}_0$  у напрямку, протилежному до напрямку сили.



Мал. 79



Мал. 80



Мал. 81

## Розв'язання

У системі відліку «Земля» (мал. 80) зміна кінетичної енергії тіла дорівнює:

$$\Delta E_{\text{к}} = \frac{mv^2}{2} - 0 = \frac{m}{2}(at)^2 = \frac{F^2 t^2}{2m};$$

у системі відліку «автомобіль», який рухається зі швидкістю  $\bar{v}$  у напрямку, протилежному до дії сили (мал. 81), зміна кінетичної енергії тіла становить:

$$\Delta E'_{\text{к}} = \frac{m}{2}(v_0 + at)^2 - \frac{m}{2}v_0^2 = Fv_0t + \frac{F^2 t^2}{2m}.$$

Таким чином, для незамкнутих систем тіл навіть зміна механічної енергії в різних інерціальних системах відліку різна:  $\Delta E_{\text{к}} \neq \Delta E'_{\text{к}}$ .

Проте у вказаних системах відліку будуть різними і переміщення за певний час  $t$ :

$$s = \frac{at^2}{2} = \frac{Ft^2}{2m}, \quad s' = v_0t + \frac{at^2}{2} = v_0t + \frac{F^2 t^2}{2m}.$$

Отже, і робота сили  $\bar{F}$  у цих системах відліку буде різною:

$$A = Fs = \frac{F^2 t^2}{2m}, \quad A' = Fs' = Fv_0t + \frac{F^2 t^2}{2m}.$$

Порівнюючи зміну кінетичної енергії тіла і виконану в кожній системі відліку роботу, отримаємо:

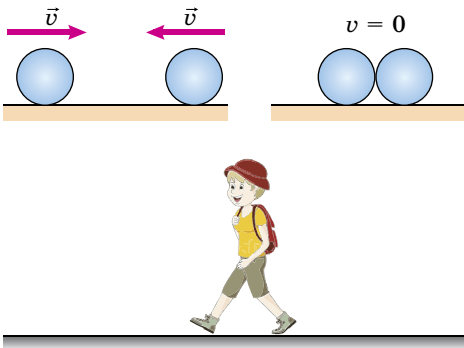
$$A = \Delta E_{\text{к}}, \quad A' = \Delta E'_{\text{к}}.$$

**3.** У замкнутих системах тіл діють внутрішні неконсервативні сили, кінетична енергія системи тіл змінюється, але зміна цієї енергії  $\Delta E_{\text{к}}$  у різних інерціальних системах відліку однакова. Покажемо це на прикладі.

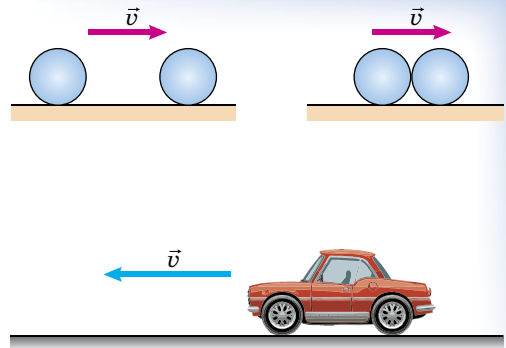
Дві кулі однакової маси рухаються назустріч одна одній з однаковими за модулем швидкостями  $\bar{v}$ . Порівняйте зміни кінетичної енергії під час непружного зіткнення цих куль у системах відліку, пов'язаних із Землею і з автомобілем, який рухається зі швидкістю, що дорівнює швидкості руху однієї з куль.

## Розв'язання

У системі відліку, пов'язаній із Землею (мал. 82), зміна кінетичної енергії куль після непружного удару дорівнює:



Мал. 82



Мал. 83

$$\Delta E_{\text{к}} = \frac{mv^2}{2} + \frac{mv^2}{2} - 2 \frac{mu'^2}{2}.$$

Швидкість руху куль після удару  $u$  визначимо, застосувавши закон збереження імпульсу для проєкцій на напрям руху куль:  $mv - mv = 2mu$ , звідки  $u = 0$  і  $\Delta E_{\text{к}} = mv^2$ .

У системі відліку, що рухається з такою самою швидкістю  $v$ , як одна з куль (мал. 83), зміна кінетичної енергії куль дорівнює:  $\Delta E'_{\text{к}} = \frac{m(2v)^2}{2} - 2 \frac{mu'^2}{2}$ .

Швидкість руху куль після удару  $u'$  визначимо також із закону збереження імпульсу:  $2mv = 2mu'$ ,  $u' = v$ , звідки випливає:  $\Delta E'_{\text{к}} = 2mv^2 - mv^2 = mv^2$ .

Дійсно, отримуємо, що зміна кінетичної енергії замкнутої системи тіл у різних інерціальних системах відліку однакова:  $\Delta E_{\text{к}} = \Delta E'_{\text{к}}$ .

Під час розв'язування задач, у яких розглядається взаємодія тіл з істотно різними масами, зміною енергії тіла більшої маси зазвичай нехтують. І це цілком коректно у тих системах відліку, у яких «велике тіло» до взаємодії перебуває у стані спокою. Вибираючи систему відліку, у якій тіло великої маси до взаємодії мало деяку початкову швидкість, нехтувати зміною кінетичної енергії «великого тіла» уже не можна, навіть якщо воно взаємодіє з тілом, маса якого набагато менша за масу «великого тіла».

### Рівень А

**327.** Висота кімнати 3 м, висота стола 0,75 м. На столі стоїть гиря масою 2 кг. Яка потенціальна енергія гирі відносно стола, підлоги, стелі? ( $g = 10 \text{ м/с}^2$ ).

**328.** На яку висоту треба підняти вантаж 50 Н, щоб його потенціальна енергія збільшилася на 40 Дж? На скільки треба опустити вантаж, щоб його потенціальна енергія зменшилася на 100 Дж?

**329.** Визначте потенціальну енергію пружини, стиснутої на 30 мм силою 2600 Н.

**330.** Визначте кінетичну енергію метеорної частинки масою 1 г, якщо вона влітає в атмосферу Землі зі швидкістю 70 км/с.

**331.** Яку кінетичну енергію має куля масою 20 г, якщо її швидкість руху дорівнює 900 м/с? З якою швидкістю має рухатися автомобіль масою 7,2 т, щоб мати таку саму кінетичну енергію?

**332.** Тіло масою 2 кг вільно падає протягом 6 с. Визначте кінетичну енергію тіла в кінці падіння.

**333.** Градинка масою 1 г падає з висоти 100 м. Яку кінетичну енергію мала б градинка в кінці падіння, коли б вона падала вільно?

**334.** Визначте роботу, виконану під час рівномірного піднімання вантажу 2 т на висоту 50 см.

**335.** Вантаж переміщують рівномірно по горизонтальній поверхні, прикладаючи силу 300 Н під кутом  $45^\circ$  до горизонту. Визначте роботу, виконану під час переміщення вантажу на відстань 10 м.

**336.** Кран піднімає вантаж 20 кН. Визначте виконану роботу за перші 5 с, якщо швидкість піднімання 30 м/хв.

**337.** Яку роботу виконує людина, піднімаючи тіло масою 2 кг на висоту 1 м з прискоренням  $3 \text{ м/с}^2$ ?

**338.** Вода, вага якої 45 кН, подається за допомогою насоса на висоту 5 м за 5 хв. Яка потужність насоса?

**339.** Потужності автомобіля і трактора майже однакові, а рухаються вони з різними швидкостями. Чому? Сила тяги більша у трактора чи в автомобіля?

**340.** Самоскид під час перевезення вантажу розвиває потужність 30 кВт. Яку роботу він виконує протягом 45 хв?

**341.** Тіло кинути вертикально вгору зі швидкістю 20 м/с. На якій висоті від точки кидання кінетична енергія тіла дорівнюватиме потенціальній?

**342.** Тіло масою 2 кг падає з висоти 30 м над землею. Визначте кінетичну енергію тіла в момент, коли воно перебуває на висоті 10 м над землею.

**343.** Під час пробивання дошки швидкість кулі масою 8 г зменшилася від 600 м/с до 330 м/с. Яку роботу виконано з подолання опору дошки?

116

**344.** Автомобіль масою 5 т починає гальмувати при швидкості 36 км/год. Яку відстань пройде він від початку гальмування до повної зупинки під час дії гальмівної сили 3 кН?

**345.** З якою швидкістю рухався поїзд масою 1500 т, якщо під дією гальмівної сили в 150 кН він пройшов з моменту початку гальмування до зупинки шлях 500 м?

### Рівень Б

**346.** Яку роботу треба виконати, щоб підняти вантаж 0,3 кН на висоту 10 м із прискоренням  $0,5 \text{ м/с}^2$ ?

**347.** Навантажена шахтна кліть масою 10 т піднімається з прискоренням  $0,5 \text{ м/с}^2$ . Визначте роботу, що затрачається на піднімання кліті, за перші 10 с руху.

**348.** Під навантаженням 8 кН стержень подовжився на 0,1 мм. Яка потрібна робота, щоб стержень подовжився на 0,6 мм?

**349.** У воді з глибини 5 м піднімають до поверхні камінь, об'єм якого становить  $0,6 \text{ м}^3$ . Густина каменя дорівнює  $2500 \text{ кг/м}^3$ . Визначте роботу, затрачену на піднімання каменя.

**350.** Сплавник пересуває багром пліт, прикладаючи до багра силу 200 Н. Яку роботу виконає сплавник, перемістивши пліт на 10 м, якщо кут між напрямком сили і напрямком переміщення становить  $45^\circ$ ?

**351.** Чи однакову кінетичну енергію матимуть тіла масами  $m$  і  $2m$ , якщо під час розгону зі стану спокою на них діяли рівними силами протягом того самого часу?

**352.** Яку швидкість матиме космічна ракета, якщо для досягнення цієї швидкості реактивний двигун виконує  $7,2 \cdot 10^7$  Дж роботи на кожен кілограм маси ракети?

**353.** Дві дівчинки, що мають різну масу, наввипередки бігли сходами і піднялися на третій поверх будинку одночасно. Чи однакову потужність розвивали вони при цьому? Відповідь обґрунтуйте.

**354.** У якому випадку людина розвиває більшу потужність: повільно піднімаючись по сходах, чи стрибаючи з жердиною?

**355.** Під час піднімання санок на гору за 16 с виконано роботу 800 Дж. Яку потужність було розвинуто під час переміщення санок?

**356.** Визначте потужність машини, яка піднімає молот масою 200 кг на висоту 0,75 м 120 разів за хвилину.

**357.** Дитина, маса якої 30 кг, за 20 с піднялася сходами на висоту 10 м. Яку потужність розвинула дитина?

**358.** Куля масою 200 г, рухаючись по горизонтальній поверхні зі швидкістю 5 м/с, вдаряється в нерухому кулю, маса якої 800 г. Удар центральний і непружний. Визначте втрату кінетичної енергії в результаті удару.

**359.** Кінець важеля опустили вниз без тертя, діючи із силою 4 Н. На скільки сантиметрів його опустили, якщо потенціальна енергія вантажу, підвішеного до другого кінця, збільшилася на 1,2 Дж?

**360.** Тіло масою 0,25 кг кинули вертикально вгору зі швидкістю 4 м/с. Визначте роботу сили тяжіння, зміну потенціальної енергії тіла та зміну кінетичної енергії під час піднімання тіла до максимальної висоти.

**361.** Камінь вагою 2 Н падає з висоти 5 м і вдавлюється в м'який ґрунт на 5 см. Визначте середню силу опору ґрунту.

**362.** Молот вагою 1 кН вільно падає з висоти 80 см на поковку. Визначте глибину вм'ятини на поковці, якщо середня сила опору стискові дорівнює 80 кН.

**363.** Санки масою 80 кг з'їжджають з гори завдовжки 200 м і заввишки 20 м, маючи початкову швидкість 6 м/с. Визначте швидкість санок у кінці гори, якщо середня сила опору рухові 20 Н.

**364.** Камінь, пущений по поверхні льоду зі швидкістю 2 м/с, зупинився на відстані 20,4 м. Визначте коефіцієнт тертя каменя по льоду. Яка кінетична енергія каменя на початку руху, якщо його маса 500 г?

**365.** Шлях, що його проїхав автомобіль після того, як водій вимкнув двигун, дорівнює 200 м. Визначте роботу сили опору під час гальмування автомобіля, якщо його маса 1,5 т, а коефіцієнт опору 0,02.

**366.** Санки з дитиною загальною масою 60 кг скочуються зі стану спокою з гори заввишки 10 м і завдовжки 100 м. Яка середня сила опору рухові санок, якщо в кінці гори вони досягли швидкості 10 м/с?

### Є над чим замислитися

**367.** Тіло масою 5 кг вдаряється в нерухоме тіло масою 2,5 кг. Кінетична енергія системи двох тіл одразу після удару стала 5 Дж. Вважаючи удар центральним і непружним, визначте кінетичну енергію першого тіла до удару.

**368.** Два тіла рухаються назустріч одне одному і непружно вдаряються. Швидкості тіл до удару були 2 м/с і 4 м/с. Загальна швидкість тіл після удару – 1 м/с, і за напрямком вона збігається з напрямком швидкості першого тіла до удару. У скільки разів кінетична енергія першого тіла більша від кінетичної енергії другого тіла?

**369.** Дослідіть, на що більше витрачається палива: на надання штучному супутнику Землі потенціальної енергії, що відповідає висоті  $h$  запуску супутника, чи на надання йому на цій висоті кінетичної енергії, що відповідає першій космічній швидкості.

**370.** Тіло масою 0,5 кг розміщено на горизонтальній поверхні і з'єднано стиснутою пружинкою з нерухомою стіною. Коефіцієнт жорсткості пружини дорівнює 18 Н/м. Довжина пружини у вільному стані 5 см, у стис-

нутому – 3 см. Визначте час руху тіла по поверхні після того, як пружину звільнили. Коефіцієнт тертя тіла по поверхні дорівнює 0,01.

**371.** Шматок льоду занурили у воду на глибину 0,9 м. На яку висоту над поверхнею води підскочить шматок льоду, після того як він випливе? Опір води і повітря не враховуйте.

**372.** Куля масою 10 г, що летіла горизонтально зі швидкістю 200 м/с, влучила в тіло масою 0,49 кг, підвішене на нитці завдовжки 2,5 м, і застрягла в ньому. На який кут відхилився цей маятник?

**373.** Сталеві кульки масами 100 і 200 г підвішені на нитках завдовжки по 50 см так, що нитки паралельні, а кульки дотикаються одна до одної. Меншу кульку відхилили на кут  $90^\circ$  і відпустили. Яку швидкість набуде більша кулька після удару? Удар вважайте абсолютно пружним.

## § 29. ЗАСТОСУВАННЯ ЗАКОНІВ ЗБЕРЕЖЕННЯ В МЕХАНІЦІ

Розв'язання багатьох практичних задач значно спрощується, якщо скористатися законами збереження – законом збереження імпульсу та законом збереження і перетворення енергії. Адже ці закони можна використовувати й тоді, коли сили, які діють у системі, є невідомими.

Закони збереження імпульсу й енергії обов'язово потрібно використовувати в практичних цілях. Покажемо це на прикладі розв'язання задач.

**Задача 1.** Учасник атракціону з банджі-джампінгу здійснює стрибок з моста (мал. 84). Яка жорсткість гумового канату, прив'язаного до спортсмена, якщо під час падіння канат розтягнувся від 40 до 100 м? Маса спортсмена 72 кг, початкова швидкість його руху дорівнює нулю. Опором повітря знехтуйте.

### Розв'язання

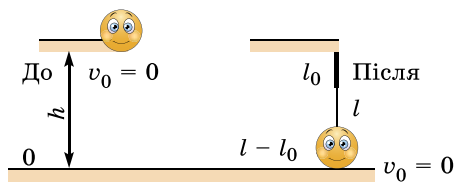
Якщо опором повітря нехтуємо, то систему тіл «Земля–людина–шнур» можна вважати замкненою і для розв'язання задачі скористаємося законом

збереження механічної енергії. На початку стрибка людина має потенціальну енергію піднятого тіла, у найнижчій точці ця енергія перетворюється на потенціальну енергію деформованого шнура.

Для розв'язання задачі виконаємо малюнок, на якому зазначимо початкове та кінцеве положення людини. За нульовий рівень оберемо найнижче положення людини (шнур розтягнений максимально, швидкість руху людини дорівнює 0).

Запишемо закон збереження механічної енергії:

$$E_{к0} + E_{п0} = E_{к} + E_{п}.$$



Розглянемо зміну механічної енергії. До стрибка: оскільки  $v_0 = 0$ , то  $E_{к0} = 0$ , а  $E_{п0} = mgh$ , де  $h = l$  – довжина розтягнутого шнура; після стрибка: оскільки  $v_0 = 0$ , то  $E_{к} = 0$ , а  $E_{п} = kx^2/2$ , де  $x = l - l_0$  – видовження шнура.



Таким чином, ми маємо:  $0 + mgl = 0 + \frac{k(l - l_0)^2}{2}$ .

Звідки отримаємо:  $k = \frac{2mgl}{(l - l_0)^2}$ .

Підставимо значення фізичних величин в отриману формулу:

$$k = \frac{2 \cdot 72 \text{ кг} \cdot 10 \text{ м/с}^2 \cdot 100 \text{ м}}{(100 \text{ м} - 40 \text{ м})^2} = 40 \text{ Н/м}.$$

*Відповідь:* 40 Н/м.

Чи грали ви в більярд? Спробуємо описати один з випадків зіткнення більярдних куль, а саме пружний центральний удар – зіткнення, під час якого втрати механічної енергії відсутні, а швидкості руху куль до і після удару напрямлені вздовж прямої, що проходить через центри куль.

**Задача 2.** Куля, яка рухалася більярдним столом зі швидкістю 5 м/с, зіштовхується з нерухомою кулею такої самої маси (мал. 85). Визначте швидкості руху куль після зіткнення. Удар вважайте пружним центральним.

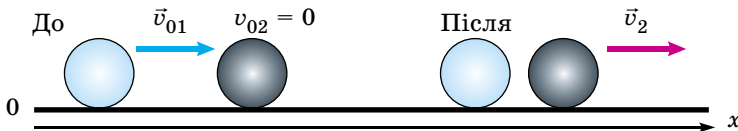


Мал. 85

### Розв'язання

Систему двох куль можна вважати замкнутою, удар є пружним, тому втрати механічної енергії відсутні. Отже, для розв'язання задачі можна використати і закон збереження механічної енергії, і закон збереження імпульсу. Оберемо за нульовий рівень поверхню стола. У даному випадку потенціальні енергії куль до і після удару дорівнюють нулю, тому повна механічна енергія системи і до, і після удару складається тільки з кінетичних енергій куль.

Для розв'язання задачі виконаємо малюнок, на якому зазначимо положення куль до і після удару.



Запишемо для системи двох куль закон збереження імпульсу і закон збереження механічної енергії, урахувавши, що  $v_{02} = 0$ :

$$\begin{cases} m\vec{v}_{01} = m\vec{v}_1 + m\vec{v}_2 \\ \frac{mv_{01}^2}{2} = \frac{mv_1^2}{2} + \frac{mv_2^2}{2} \end{cases} \times 2 : m \Rightarrow \begin{cases} \vec{v}_{01} = \vec{v}_1 + \vec{v}_2, \\ v_{01}^2 = v_1^2 + v_2^2. \end{cases}$$

Знайдемо проекції швидкостей на вісь  $Ox$ :

$$\begin{cases} v_{01} = -v_1 + v_2, \\ v_{01}^2 = v_1^2 + v_2^2. \end{cases}$$

Оскільки  $v_{01} = 5 \text{ м/с}$ , маємо:  $\begin{cases} 5 = -v_1 + v_2 \\ 25 = v_1^2 + v_2^2. \end{cases}$

Розв'яжемо систему рівнянь:

Визначимо:  $v_2 = 5 + v_1$ ,  $25 = v_1^2 + 25 + v_1^2$ ,  $25 - 25 = 2v_1^2$ ,  $v_1 = 0$ .

$$v_1 = v_2 - 5, 25 = v_1^2 - 25 + v_1^2, 25 = v_2^2 + v_2^2 - 25, 50 = 2v_2^2, v_2^2 = 25, v_2 = 5.$$

Отже, ми бачимо, що кулі «обмінялися» швидкостями: куля 1 зупинилася, а куля 2 набула швидкості кулі 1 до зіткнення.

Зазначимо: у разі пружного центрального удару двох тіл однакової маси ці тіла «обмінюються» швидкостями незалежно від того, якими були початкові швидкості руху тіл.

**Відповідь:**  $v_1 = 0$ ;  $v_2 = 5$  м/с.



### ЗАПИТАННЯ ДО ВИВЧЕНОГО

1. Яке практичне значення мають закони збереження імпульсу й енергії?
2. Наведіть приклади використання законів збереження імпульсу й енергії у спорті.

## § 30. МЕЖІ ЗАСТОСУВАННЯ ЗАКОНІВ КЛАСИЧНОЇ МЕХАНІКИ

Як ви вже знаєте, кінематика вивчає рух матеріальних тіл без урахування причин, які спричинили цей рух. Динаміка вивчає рух матеріальних тіл, ураховуючи ці причини, тобто вона вивчає зв'язок між взаємодією одного тіла з іншими тілами або полями та змінами стану руху тіла внаслідок цієї взаємодії. Тому динаміка є основним розділом механіки.

Основою класичної, або ньютонівської, механіки є три закони динаміки, які сформулював Ньютон у 1687 р. Ці закони є узагальненням усіх дослідних і теоретичних відомостей, які були отримані до Ньютона і самим Ньютоном.

Протягом двох століть ньютонівська механіка досягла таких великих успіхів, що багато хто в XIX ст. був переконаний в її силі і вважав, що пояснити будь-яке фізичне явище означає звести його до механічного процесу, який підкоряється законам Ньютона. Однак з розвитком науки було виявлено нові факти, які виходили за межі класичної механіки. Ці факти одержали своє пояснення в нових фізичних теоріях – теорії відносності та квантовій механіці. Перегляд А. Ейнштейном ньютонівських уявлень про простір і час дав змогу створити в 1905 р. «механіку великих швидкостей» – релятивістську механіку, що не привела до заперечення ньютонівської механіки. Рівняння релятивістської механіки у випадку швидкостей, дуже малих порівняно зі швидкістю поширення світла, переходять у рівняння ньютонівської механіки. Аналогічно рівняння квантової механіки переходять у рівняння ньютонівської механіки, яка описує рух мас, значно більших від маси атома. Отже, розвиток науки не перекреслив класичну механіку – механіку великих мас і малих швидкостей, а лише засвідчив її обмежене застосування. Тут дуже чітко проявляється співвідношення між відносною й абсолютною істиною, тобто між знанням незавершеним (яке надалі підлягає уточненню, поглибленню) і повним, вичерпним знанням, що досягається лише в нескінченному русі думки. Узгодженість теорій зумовлена єдністю матеріального світу, досліджуваного цими теоріями.

Відомо три типи ситуацій, у яких класична механіка перестає відображати реальність.

Властивості мікросвіту неможливо пояснити в рамках класичної механіки. Зокрема, у поєднанні з термодинамікою вона породжує багато протиріч. Відповідною мовою для опису властивостей атомів і субатомних частинок є квантова механіка. Слід підкреслити, що перехід від класич-

ної до квантової механіки – це не просто заміна рівнянь руху, а повна перебудова всієї сукупності понять (що таке фізична величина, що спостерігається, процес вимірювання тощо).

При швидкостях, близьких до швидкості поширення світла, класична механіка не може описати фізичні явища і процеси, і потрібно переходити до спеціальної теорії відносності (СТВ). Цей перехід має на увазі повний перегляд парадигми, а не просту видозміну рівнянь руху. Якщо ж, нехтуючи новим поглядом на реальність, спробувати все-таки привести рівняння руху до виду  $F = ma$ , то доведеться вводити тензор мас, компоненти якого збільшуються зі збільшенням швидкості. Ця конструкція вже довгий час слугує джерелом численних помилок, тому користуватися нею не рекомендується.

Класична механіка стає неефективною, коли розглядають системи з дуже великим числом частинок (або ж великим числом ступенів вільності). У цьому випадку практично доцільно переходити до статистичної фізики.

Принцип відносності – фундаментальний фізичний принцип, згідно з яким усі фізичні процеси в інерціальних системах відліку протікають однаково, незалежно від того, нерухома система чи вона перебуває у стані рівномірного і прямолінійного руху. Звідси випливає, що всі закони природи однакові в усіх інерціальних системах відліку.

Розрізняють принцип відносності Ейнштейна і принцип відносності Галілея, який стверджує те саме, але не для всіх законів природи, а тільки для законів класичної механіки, маючи на увазі можливість застосування перетворень Галілея, залишаючи відкритим питання про можливість застосування принципу відносності до оптики та електродинаміки.

У сучасній літературі принцип відносності в його застосуванні до інерціальних систем відліку (найчастіше за відсутності гравітації або при нехтуванні нею) зазвичай позначають терміном «лоренц-коваріантність» (або «лоренц-інваріантність»).

Релятивістська механіка – розділ фізики, який розглядає закони механіки (закони руху тіл і частинок) при швидкостях, порівняних зі швидкістю поширення світла. При швидкостях значно менших від швидкості поширення світла переходить у класичну (ньютонівську) механіку.



#### ЗАПИТАННЯ ДО ВИВЧЕНОГО

1. Що є основою класичної механіки?
2. Які принципи відносності ви знаєте?
3. У чому полягають межі застосування законів механіки?

## § 31. ОСНОВНІ ПОЛОЖЕННЯ СПЕЦІАЛЬНОЇ ТЕОРІЇ ВІДНОСНОСТІ ТА ЇХНІ НАСЛІДКИ. РЕЛЯТИВІСТСЬКИЙ ЗАКОН ДОДАВАННЯ ШВИДКОСТЕЙ

Дослід Альберта Майкельсона (1852–1931) і Альберта Морлі (1838–1923), виконаний у 1887 р., показав, що рух Землі не впливає на швидкість поширення світла. Цей факт був приголомшуючим. Фізики настільки були впевнені, що рух Землі має змінювати швидкість поширення світла відносно нерухомої системи координат, що не могли повірити в результати дослідів. Вихід із цієї важкої ситуації знайшов геніальний учений **Альберт Ейнштейн** (1879–1955). У 1905 р. він опублікував статтю «До електроди-

наміки рухомих середовищ», у якій показав, що дослід Майкельсона–Морлі аналогічний до дослідів усередині вагона, що рухається рівномірно відносно Землі. У цих дослідях Земля виконувала роль нерухомої системи відліку, а вагон – роль рухомої системи відліку, об'єктом вивчення були механічні явища. У досліді Майкельсона–Морлі як нерухома система відліку було Сонце, роль рухомої системи відліку відігравала Земля, а об'єктом вивчення були оптичні явища.

Рівномірний рух вагона, як ми бачили, не впливає на хід механічних явищ, і тому в інерціальній системі відліку, пов'язаній з вагоном, усі механічні явища протікають так само, як і в системі відліку, пов'язаній із Землею. Якщо результат досліді Майкельсона–Морлі виявився негативним, то це означає, що рівномірний рух Землі не змінює швидкості поширення світла в системі відліку, пов'язаній із Землею. Швидкість поширення світла у вакуумі однакова для всіх інерціальних систем відліку, незалежно від швидкості їх руху одна відносно одної. Рівномірний рух системи відліку не впливає на характер оптичних явищ аналогічно до того, як рівномірний рух вагона не змінює характеру механічного руху тіл.

Таким чином, Ейнштейн прийшов до двох важливих висновків:

1. Усі явища природи в інерціальних системах відліку за однакових початкових умов протікають однаково.
2. В усіх інерціальних системах відліку швидкість поширення світла у вакуумі однакова і дорівнює 300 000 км/с.

122

Ці два положення складають основу спеціальної теорії відносності (СТВ) Ейнштейна. Їх називають принципами, або постулатами, теорії відносності. Перше положення спеціальної теорії відносності називають **принципом відносності** Ейнштейна.

Перший постулат можна сформулювати і в поширенішій негативній формі. Жодні фізичні досліді, що проводяться всередині рухомої системи відліку (лабораторія, вагон), не дають змоги встановити, чи перебуває ця система у прямолінійному і рівномірному русі чи ні.

У класичній механіці цей постулат відомий під назвою «принцип відносності Галілея». Головний внесок Ейнштейна в пізнання законів природи полягає не у відкритті нових формул, а в радикальній зміні основних фундаментальних уявлень про простір, час, речовину і рух.

Поширення принципу відносності Галілея на всі закони природи означає, що закон додавання швидкостей справджується для опису поширення всіх видів взаємодії, зокрема електромагнітної.

*Як узгодити твердження про незалежність швидкості світла від руху джерела з алгебраїчним додаванням звичайних швидкостей у механіці?* Ейнштейн показав, що звичайна формула механіки для додавання швидкостей неправильна й має бути змінена. Релятивістський закон додавання швидкостей має вигляд:

$$u = \frac{u' + v}{1 + \frac{vu'}{c^2}}.$$

Розглянемо випадок з ракетами і Землею, система відліку  $S'$  (перша ракета) рухається зі швидкістю  $v = 0,6c$  відносно нерухомої системи відліку  $S$  (Земля). Швидкість другої ракети відносно першої  $v = 0,6c$ . Тепер, за Ейнштейном, швидкість другої ракети відносно Землі буде  $v = 0,8c$ .

$$\text{Тоді } u = \frac{0,6c + 0,8c}{1 + \frac{0,8c \cdot 0,6c}{c^2}} = \frac{1,4c}{1 + 0,48} \approx 0,95c.$$

Якщо  $v \ll c$ , то  $\frac{vu'}{c^2} \rightarrow 0$ , тоді отримаємо формулу перетворення Галілея для швидкості  $\vec{u}' = \vec{u} + \vec{v}$ .

Якщо одна зі швидкостей дорівнює швидкості світла, наприклад  $u' \approx c$ , то

$$u = \frac{u' + v}{1 + \frac{vu'}{c^2}} = \frac{c + v}{1 + \frac{cv}{c^2}} = \frac{c + v}{\frac{c + v}{c}} = (c + v) \left( \frac{c}{c + v} \right) = c.$$

Цей результат демонструє той факт, що рух системи відліку не впливає на швидкість поширення світла в ній. Величина  $c$  відіграє роль гранично великої швидкості для будь-яких тіл або матеріальних сигналів.

Виключно важливим наслідком постулатів теорії відносності є закон взаємозв'язку між масою і енергією тіла.

Між масою і енергією у природі існує певне кількісне співвідношення: кожній одиниці маси відповідає строго певна кількість енергії:

$$E = mc^2.$$



### ЗАПИТАННЯ ДО ВИВЧЕНОГО

123

1. Які експериментальні факти є основою теорії відносності?
2. На яких положеннях (постулатах, передумовах) ґрунтується теорія відносності? Скільки положень потрібно для побудови теорії відносності?
3. Чи можна поставити дослід на Землі для виявлення руху Землі навколо Сонця?
4. У чому полягає принцип відносності Ейнштейна?
5. Чим відрізняється принцип відносності Галілея від принципу відносності Ейнштейна?
6. У чому полягає релятивістський закон додавання швидкостей?
7. Як взаємопов'язані маса тіла і його енергія з погляду сучасної фізики?



### ЗАДАЧІ ТА ВПРАВИ

#### Розв'язуємо разом

Два літальних апарати А і В наближаються до Землі з протилежних напрямків, швидкість кожного –  $0,75c$ . Яка приблизно швидкість літального апарата В?

#### Розв'язання

Використовуючи релятивістський закон додавання швидкостей, маємо:

$$u = \frac{u' + v}{1 + \frac{vu'}{c^2}}, \quad u = \frac{0,75c + 0,75c}{1 + \frac{0,75c \cdot 0,75c}{c^2}} = \frac{1,5c}{1 + 0,75^2} \approx 0,96c.$$

**Відповідь:**  $0,96c$ .

#### Рівень А

**374.** Дві фотонні ракети віддаляються одна від одної зі швидкістю  $0,65c$  відносно спостерігача на Землі. Визначте відносну швидкість ракет.

**375.** Дві частинки віддаляються від спостерігача зі швидкостями  $0,7$  с у протилежні боки. Якою є швидкість частинок одна відносно одної?

### Рівень Б

**376.** Дві частинки, відстань між якими  $100$  м, рухаються назустріч одна одній зі швидкостями  $0,65$  с відносно нерухомого спостерігача. Яка відносна швидкість частинок? Через який час станеться зіткнення? Яке значення мала б відносна швидкість частинок за класичним законом додавання швидкостей?

## ПЕРЕВІРТЕ СВОЮ КОМПЕТЕНТНІСТЬ

### Контрольні запитання

1. Чому швидкість руху тіла  $5$  м/с у прямолінійному рівномірному русі – це не те саме, що  $5$  м/с – швидкість рівномірного руху тіла по колу?

2. Чому формула для розрахунку швидкості рівнозмінного руху тіла має два знаки:  $v_x = v_{0x} \pm a_x t$ ?

3. Чому графіком швидкості рівноприскореного руху є пряма лінія?

4. Чому графік швидкості рівносповільненого руху тіла ніколи не проходить через початок координат?

5. Як можна визначити швидкість плавчині відносно берега, якщо швидкість течії  $v_1$ , а швидкість плавчині відносно води  $v_2$  напрямлена перпендикулярно до течії?

6. Під час будь-якого нерівномірного руху тіла змінюється його швидкість. Як прискорення характеризує цю зміну?

7. Виведіть формули, що виражають залежність між доцентровим прискоренням, періодом і частотою обертання.

8. По горизонтальній прямолінійній дорозі рівномірно рухається автомобіль з увімкненим двигуном. Чи не протирічить це першому закону Ньютона?

9. Напрямок вектора якої фізичної величини залежить від напрямку рівнодійної сил, прикладених до тіла: швидкості руху тіла, його прискорення чи переміщення?

10. Чим відрізняються одна від одної формули третього закону Ньютона:  $\vec{F}_1 = -\vec{F}_2$ ,  $F_1 = -F_2$ ?

11. Як за результатами вимірювань прискорення вільного падіння можна судити про залягання щільних порід у земних надрах?

12. Як легше запустити штучний супутник Землі: уздовж екватора чи вздовж меридіана?

13. Як можна розрахувати вагу тіла, що рухається з прискоренням вертикально вгору?

14. Чи можна стверджувати, що імпульс тіла відносний? За яких умов справджується закон збереження імпульсу?

15. Парусний човен потрапив у штиль і зупинився. Чи можна змусити його рухатися, надуваючи вітрила за допомогою насосів, установлених на його борту?

16. З рухомого танка робиться гарматний постріл. Чи вплине постріл на швидкість руху танка? Які тіла утворюють у даному випадку замкнуту систему?

17. Як здійснюється гальмування космічних кораблів?

18. Що спільного в потенціальних енергіях піднятого над Землею тіла і тіла пружно деформованого?



19. Чому дорівнює повна робота двох команд спортсменок, що змагаються в перетягуванні канату? Відповідь обґрунтуйте.

20. Застосовуючи закон збереження механічної енергії, поясніть, чому швидкість планети (ШСЗ) у перигелії більша, ніж в афелії?

21. Оцініть максимальну висоту  $h$  піднімання бризок під час падіння на поверхню води крапель дощу.

22. Чому при дії сили тертя закон збереження механічної енергії порушується?

### Що я знаю і вмію робити

#### Я знаю, що таке відносність руху

1. Два поїзди рухаються назустріч один одному зі швидкостями 54 км/год та 72 км/год. Пасажири першого поїзда помітили, що другий поїзд рухається повз них протягом 4 с. Яка довжина другого поїзда?

2. Автомобіль, що рухається рівномірно зі швидкістю  $v_1 = 45$  км/год, за час  $t_1 = 10$  с проїхав такий самий шлях, як і автобус за час  $t_2 = 15$  с, який рухається в тому самому напрямку. Визначте їхню відносну швидкість руху.

3. Швидкість руху човна в  $n$  разів більша за швидкість течії. У скільки разів більше часу займає поїздка між двома пунктами проти течії, ніж за течією?

#### Я знаю, як визначається швидкість руху тіла, час його руху і шлях, який воно проходить

4. Надзвуковий літак летить горизонтально на висоті 4 км. Спостерігач почув звук через 10 с після того, як літак пролетів над ним. Визначте швидкість літака, якщо швидкість звуку 330 м/с.

5. Скільки часу падало тіло, якщо за останні 2 с воно пролетіло 58,8 м?

6. Дівчина, яка кинула камінь у прірву, почула звук удару через  $t = 6$  с. Визначте глибину прірви. Швидкість поширення звуку в повітрі 330 м/с.

7. Доведіть, що середня швидкість за даний інтервал часу  $\tau = t_2 - t_1$  під час рівноприскореного руху дорівнює швидкості в момент  $t = t_1 + \frac{\tau}{2}$ .

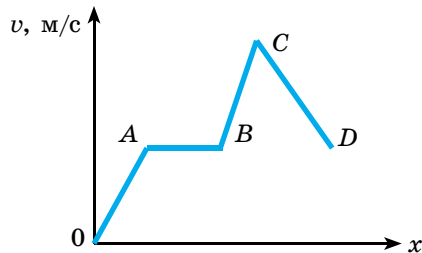
#### Я вмію розв'язувати задачі на рівномірний рух тіла по колу

8. Радіус робочого колеса гідротурбіни у 8 разів більший, ніж парової, а частота обертання в 40 разів менша. Порівняйте лінійні швидкості та прискорення точок ободів коліс турбін.

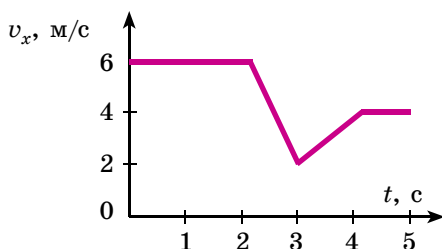
9. Циліндр, радіус основи якого  $R = 10$  см, міститься між двома рейками, які рухаються в один бік зі швидкостями  $v_1 = 6$  м/с та  $v_2 = 4$  м/с. Визначте швидкість руху точок на осі циліндра та кутову швидкість його обертання. Розв'яжіть задачу і для випадку, коли рейки рухаються в різні боки.

#### Я вмію аналізувати та будувати графіки

10. На малюнку подано графік швидкості руху поїзда. Що можна сказати про співвідношення сили тяги і сили опору руху поїзда на різних ділянках?



11. За графіком проекції швидкості руху тіла побудуйте графік проекції прискорення і графік проекції переміщення тіла.



### Я вмію робити доведення

12. Доведіть, що під час прямолінійного рівноприскореного руху, проекції переміщення  $s_x$  тіла за послідовні однакові інтервали часу, утворюють арифметичну прогресію.

13. Доведіть, що під час прямолінійного рівноприскореного руху без початкової швидкості виконується «закон непарних чисел», шляхи, які проходить тіло за послідовні однакові інтервали часу, відносяться як послідовні непарні числа:  $l_1 : l_2 : \dots : l_n = 1 : 3 : \dots : (2n - 1)$ .

### Я вмію розв'язувати задачі на закони механіки

126

14. Автомобіль масою 1500 кг починає рухатися горизонтально з прискоренням  $0,5 \text{ м/с}^2$ . Опір його рухові становить 500 Н. Визначте силу тяги, яку розвиває двигун.

15. Спортсменка масою 50 кг, яка стоїть на ковзанах, відштовхує від себе кулю масою 2 кг силою 20 Н. Яке прискорення отримують при цьому спортсменка і куля?

16. У скільки разів сила притягання супутника більша на поверхні Землі, ніж на висоті трьох земних радіусів над поверхнею?

17. Два однакових тіла масою по 2 кг кожне з'єднані пружиною, жорсткість якої 230 Н/м. На скільки розтягнеться пружина, якщо за одне тіло тягнути всю систему вертикально вгору силою 4,6 Н? Масою пружини знехтуйте.

18. Візок масою 1 кг рухається зі швидкістю 8 м/с назустріч візку масою 2 кг, який рухається зі швидкістю 3,5 м/с. Після зіткнення візки з'єднуються і продовжують рух як єдине ціле. Яка швидкість їх руху?

19. М'яч масою 0,5 кг вільно падає з висоти 7 м. Визначте його кінетичну енергію на висоті 5 м.

20. Дві кульки однакової маси котяться назустріч одна одній з однаковими за модулем швидкостями по гладенькій поверхні (обидві кульки утворюють замкнуту систему). Кульки стикаються і після зіткнення рухаються у протилежних напрямках з такими самими за модулем швидкостями. Визначте їх загальний імпульс до зіткнення, у момент зіткнення і після нього.

21. Чи можуть осколки гранати, що вибухнула, летіти в одному напрямку, якщо до вибуху граната перебувала у стані спокою? А якщо рухалася?

22. Ракета, як відомо, може отримати прискорення в космічному просторі, де навколо неї немає ніяких тіл. Крім того, для її прискорення потрібна сила, а сила – це дія одного тіла на інше. Чому прискорюється ракета?



## ТЕСТОВІ ЗАВДАННЯ

## Варіант 1

1. Ви знаєте задачу, яка є основою для кінематики: за відомою траєкторією і законом руху визначити швидкість і зміну цієї швидкості для кожного моменту часу і кожної точки траєкторії (пряма задача). Укажіть, якими серед наведених прикладів, можна підтвердити цю задачу.

- А під час польоту літака напрямок швидкості залишався незмінним
- Б для руху тіла отримано графік закону руху
- В людина обертається в центрифугі, радіус якої  $R$ ; при цьому лінійна швидкість центра мас кабіни залишається сталою і дорівнює  $v$
- Г отримана послідовність малих переміщень тіла утворює пряму лінію, тобто рух тіл є прямолінійним
- Д таких прикладів немає

2. На основі дослідів зі взаємодії тіл було зроблено висновки. Укажіть, який із них *помилковий*.

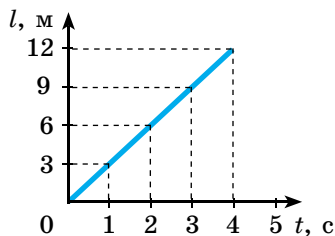
- А прискорення, отримані взаємодіючими тілами, різні за знаком
- Б прискорення можуть бути однаковими під час взаємодії однакових тіл і різними для обох тіл
- В прискорення для двох взаємодіючих тіл залежать від умов досліду, тому можуть бути різними
- Г відношення  $a_1/a_2 = \text{const}$  не залежить від умов досліду, воно залежить тільки від механічних властивостей взаємодіючих тіл
- Д під час взаємодії сили взаємно компенсуються

3. Під час рівномірного руху пішохід проходить за 10 с шлях 15 м. Який шлях він пройде, рухаючись із тією самою швидкістю за 2 с?

- А 3 м Б 30 м В 1,5 м Г 7,5 м
- Д серед відповідей (А–Г) немає правильної

4. На малюнку зображено графік залежності шляху, що пройшов велосипедист, від часу. Визначте за цим графіком шлях, що пройшов велосипедист за інтервал від  $t_1 = 1$  с до  $t_3 = 3$  с.

- А 9 м Б 6 м В 3 м Г 12 м
- Д серед відповідей (А–Г) немає правильної

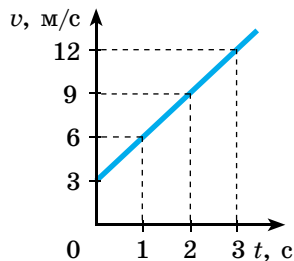


5. Плавчиня пливе за течією річки. Визначте швидкість руху плавчині відносно берега, якщо її швидкість руху відносно води дорівнює 1,5 м/с, а швидкість течії річки 0,5 м/с.

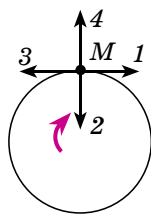
- А 0,5 м/с Б 1 м/с В 1,5 м/с Г 2 м/с
- Д серед відповідей (А–Г) немає правильної

6. За графіком залежності модуля швидкості руху тіла від часу (див. мал.) визначте прискорення тіла, що рухається прямолінійно, у момент часу  $t = 2$  с.

- А 18 м/с<sup>2</sup> Б 9 м/с<sup>2</sup> В 3 м/с<sup>2</sup> Г 4,5 м/с<sup>2</sup>
- Д серед відповідей (А–Г) немає правильної



7. Тіло рухається по колу зі сталою за модулем швидкістю за годинниковою стрілкою. Який напрямок має швидкість у точці  $M$  (див. мал.)?



А 1 Б 2 В 3 Г 4 Д серед відповідей (А–Г) немає правильної

8. Тіло рухається по колу зі сталою за модулем швидкістю. Як зміниться доцентрове прискорення тіла, якщо його швидкість збільшується у 2 рази, а радіус кола залишається незмінним?

А збільшиться у 2 рази      Б зменшиться у 2 рази  
В не зміниться      Г зменшиться в 4 рази  
Д збільшиться в 4 рази

9. Прискорення, якого набуває тіло під дією сили (за другим законом Ньютона), визначають за формулою...

А  $\vec{a} = \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t}$     Б  $\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m}$     В  $\vec{a} = \frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{t}$     Г  $\vec{a} = \frac{v^2}{r}$     Д  $\vec{a} = \frac{\vec{v}^2 - \vec{v}_0^2}{2s}$

10. Установіть відповідність між фізичним законом та його назвою.

|                               |                              |
|-------------------------------|------------------------------|
| А $F = G \frac{m_1 m_2}{R^2}$ | 1 другий закон Ньютона       |
| Б $F = k\Delta l$             | 2 третій закон Ньютона       |
| В $F = ma$                    | 3 закон Гука                 |
| Г $\vec{F} = -\vec{F}$        | 4 закон всесвітнього тяжіння |

11. Установіть відповідність між назвою фізичної величини та одиницею вимірювання.

|                        |               |
|------------------------|---------------|
| А сила                 | 1 Н/м         |
| Б коефіцієнт пружності | 2 м           |
| В коефіцієнт тертя     | 3 Н           |
| Г видовження           | 4 безрозмірна |

12. Шайба, маса якої 200 г, від удару клюшкою почала ковзати по льоду зі швидкістю 9 м/с. Через який час шайба зупиниться, якщо на неї діє сила тертя 0,18 Н?

А 5 с      Б 10 с      В 15 с      Г 20 с      Д 25 с

13. Біля поверхні Землі (на відстані  $R$  від її центра) на тіло діє сила всесвітнього тяжіння 36 Н. Визначте силу тяжіння, яка діє на це тіло на відстані  $2R$  від центра Землі.

А 18 Н      Б 12 Н      В 4 Н      Г 9 Н      Д 36 Н

14. Сила гравітаційної взаємодії між двома кулями масами  $m_1 = m_2 = 1$  кг на відстані  $R$  дорівнює  $F$ . Визначте силу гравітаційної взаємодії між кулями масами 2 кг і 1 кг на такій самій відстані  $R$  одна від одної?

А  $F$       Б  $3F$       В  $2F$       Г  $4F$       Д  $9F$

15. Як змінюються маса та вага тіла, яке переміщують з екватора на полюс Землі?

А маса залишається незмінною, а вага збільшується  
Б маса залишається незмінною, а вага зменшується  
В маса збільшується, а вага залишається незмінною  
Г маса зменшується, а вага залишається незмінною  
Д маса і вага залишаються незмінними

16. Ліфт піднімається з прискоренням  $1 \text{ м/с}^2$ , його прискорення напрямлене вертикально вгору. У ліфті є тіло, маса якого  $1 \text{ кг}$ . Яка вага тіла?

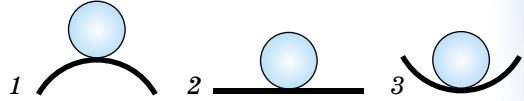
А  $10 \text{ Н}$     Б  $1 \text{ Н}$     В  $11 \text{ Н}$     Г  $9 \text{ Н}$

Д серед відповідей (А–Г) правильної немає

17. З якою швидкістю треба кинути тіло з вежі заввишки  $20 \text{ м}$  у горизонтальному напрямку, щоб воно впало на відстані  $24 \text{ м}$  від її основи?

А  $0,12 \text{ м/с}$     Б  $1,2 \text{ м/с}$     В  $12 \text{ м/с}$     Г  $120 \text{ м/с}$     Д  $24 \text{ м/с}$

18. На якій поверхні нерухомий м'яч перебуватиме у стані нестійкої рівноваги (див. мал.)?



А 1    Б 2    В 3    Г в усіх трьох точках    Д у жодній з трьох точок

19. Два автомобілі однакової маси  $m$  рухаються зі швидкостями  $v$  і  $2v$  відносно Землі в одному напрямку. Визначте імпульс другого автомобіля в системі відліку, пов'язаній з першим автомобілем.

А  $mv$     Б  $2mv$     В  $3mv$     Г  $0$

Д серед відповідей (А–Г) правильної немає

20. Швидкість легкового автомобіля удвічі більша за швидкість вантажного, а маса вантажного автомобіля удвічі більша за масу легкового. Порівняйте значення кінетичної енергії легкового  $E_{\text{к.легк}}$  і вантажного  $E_{\text{к.вант}}$  автомобілів.

А  $E_{\text{к.легк}} = E_{\text{к.вант}}$     Б  $E_{\text{к.легк}} = 2E_{\text{к.вант}}$     В  $E_{\text{к.вант}} = 2E_{\text{к.легк}}$

Г  $E_{\text{к.легк}} = 4E_{\text{к.вант}}$     Д  $E_{\text{к.вант}} = 4E_{\text{к.легк}}$

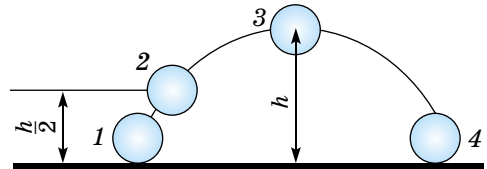
21. Як зміниться запас потенціальної енергії пружно деформованого тіла при збільшенні його деформації у 2 рази?

А зменшиться у 2 рази    Г не зміниться

В збільшиться в 4 рази    Д серед відповідей (А–Г) правильної немає

Б збільшиться у 2 рази

22. На малюнку зображено траєкторію руху тіла, кинутого під кутом до горизонту. У якій точці траєкторії кінетична енергія тіла мала максимальне значення? Опором повітря знехтуйте.



А 1    Б 2    В 3    Г 4    Д в усіх точках однакова

23. Два автомобілі однакової маси  $m$  рухаються зі швидкостями  $v$  і  $2v$  відносно Землі у протилежних напрямках. Визначте кінетичну енергію другого автомобіля в системі відліку, пов'язаній з першим автомобілем.

А  $0,5mv^2$     Б  $mv^2$     В  $2mv^2$     Г  $4,5mv^2$     Д  $1,5mv^2$

24. Яка відносна швидкість двох космічних кораблів, які рухаються у протилежних напрямках, якщо їх швидкості ( $u = v$ )  $0,9c$  відносно Землі?

А  $2,6452275 \cdot 10^8 \text{ м/с}$     Б  $2,9813614 \cdot 10^8 \text{ м/с}$     В  $28780075 \text{ м/с}$

Г  $299\,792\,458 \text{ м/с}$     Д серед відповідей (А–Г) правильної немає

## Варіант 2

1. Ви знаєте задачу, яка є основною для кінематики: за заданим початковим положенням, початковою швидкістю і відомою для кожного моменту часу зміною швидкості визначається траєкторія і закон руху тіла (обернена задача). Укажіть, якими прикладами, наведеними нижче, можна підтвердити цю задачу.

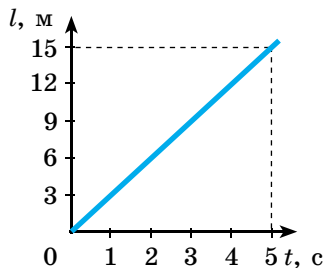
- А під час польоту літака напрямком швидкості залишався незмінним  
 Б для руху тіла отримано графік закону руху  
 В космонавт обертається в центрифугі, радіус якої  $R$ ; при цьому лінійна швидкість центра мас кабіни залишається сталою і дорівнює  $v$   
 Г отримана послідовність малих переміщень тіла утворює пряму лінію, тобто рух тіл є прямолінійний  
 Д таких прикладів немає

2. Під час рівномірного руху пішохід проходить за 6 с шлях 12 м. Який шлях він пройде за 3 с рухаючись із тією самою швидкістю?

- А 2 м    Б 36 м    В 4 м  
 Г 6 м    Д серед відповідей (А–Г) немає правильної

3. На малюнку зображено графік залежності шляху, що пройшов велосипедист, від часу. Визначте за цим графіком шлях, що пройшов велосипедист за інтервал від  $t_1 = 2$  с до  $t_3 = 5$  с.

- А 6 м    Б 15 м    В 9 м    Г 21 м  
 Д серед відповідей (А–Г) немає правильної

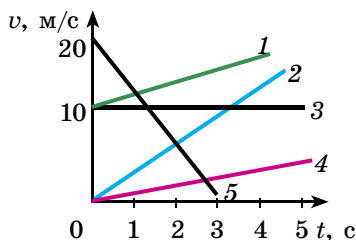


4. Людина пливе проти течії річки. Визначте швидкість руху людини відносно берега річки, якщо її швидкість руху відносно води дорівнює 1,5 м/с, а швидкість течії річки 0,5 м/с.

- А 0,5 м/с    Б 1 м/с    В 1,5 м/с    Г 2 м/с  
 Д серед відповідей (А–Г) немає правильної

5. На малюнку зображено графіки залежності від часу модулів швидкості руху п'яти тіл. Яке з них рухається з найменшою швидкістю в момент часу  $t = 1$  с?

- А 1    Б 2    В 3    Г 4    Д 5

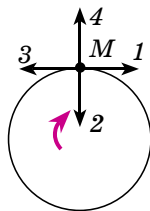


6. Який із графіків, зображених на малюнку (див. мал. до № 5), відповідає руху тіла з найменшим за модулем, але відмінним від нуля прискоренням?

- А 1    Б 2    В 3    Г 4    Д 5

7. Тіло рухається по колу зі сталою за модулем швидкістю за годинниковою стрілкою. Який напрямок має прискорення у точці М (див. мал.)?

- А 1    Б 2    В 3    Г 4  
 Д серед відповідей (А–Г) немає правильної



8. На деякому відрізку шляху спідометр автомобіля показав зміну швидкості від 36 км/год до 54 км/год за 20 с. Яке прискорення розгону?

- А 0,15 м/с<sup>2</sup>    Б 0,25 м/с<sup>2</sup>    В 0,35 м/с<sup>2</sup>    Г 0,45 м/с<sup>2</sup>    Д 0,5 м/с<sup>2</sup>



9. Тіло рухається по колу зі сталою за модулем швидкістю. Як зміниться доцентрове прискорення тіла при збільшенні радіуса кола удвічі, а швидкість руху тіла залишиться незмінною?

- А збільшиться у 2 рази
- Б зменшиться у 2 рази
- В не зміниться
- Г зменшиться в 4 рази
- Д збільшиться в 4 рази

10. Установіть відповідність між фізичним законом та назвою фізичної величини.

- |                |                        |
|----------------|------------------------|
| А $E = mgh$    | 1 кінетична енергія    |
| Б $A = Fs$     | 2 потенціальна енергія |
| В $E = mv^2/2$ | 3 потужність           |
| Г $N = A/t$    | 4 робота               |

11. Установіть відповідність між назвою одиниць фізичної величини та одиницею вимірювання.

- |              |            |
|--------------|------------|
| А робота     | 1 Вт       |
| Б сила       | 2 Дж       |
| В потужність | 3 кг · м/с |
| Г імпульс    | 4 Н        |

12. Серед форм інтерпретації принципу відносності Галілея і висновків з них укажіть *помилкове* твердження.

- А принцип відносності означає повну тотожність даного руху в різних інерціальних системах відліку
- Б не можна назвати нерухоме тіло, а також й абсолютно нерухому систему відліку
- В усі три закони Ньютона інваріантні відносно інерціальних систем відліку
- Г будь-яке механічне явище в усіх інерціальних системах відбувається за одним і тим самим законом
- Д у природі існує безліч інерціальних систем відліку, які «механічно» нічим не відрізняються одна від одної

13. Під час взаємодії двох тіл відношення модулів їх прискорень  $a_1/a_2 = 4$ . Визначте масу другого тіла, якщо маса першого 6 кг.

- А 1/4 кг    Б 2/3 кг    В 1,5 кг    Г 24 кг    Д 36 кг

14. На скільки збільшиться швидкість автомобіля масою 1 т за 10 с під дією сили 1 кН?

- А 1 м/с    Б 2 м/с    В 5 м/с    Г 10 м/с    Д 12 м/с

15. Біля поверхні Землі (на відстані  $R$  від її центра) на тіло діє сила всесвітнього тяжіння 36 Н. Визначте силу тяжіння, яка діє на це тіло на відстані  $2R$  від поверхні землі.

- А 9 Н    Б 12 Н    В 18 Н    Г 36 Н    Д 4 Н

16. Сила гравітаційної взаємодії між двома кулями масами  $m_1 = m_2 = 1$  кг на відстані  $R$  дорівнює  $F$ . Визначте силу гравітаційної взаємодії між кулями масами 3 кг і 4 кг на такій самій відстані  $R$  одна від одної.

- А  $7F$     Б  $49F$     В  $144F$     Г  $F$     Д  $12F$

17. Космічний корабель після вимкнення ракетних двигунів рухається вертикально вгору, досягає верхньої точки траєкторії і потім рухається вниз. На якій ділянці цієї траєкторії сила тиску космонавта на крісло має максимальне значення?

- А під час руху вгору
- Б у верхній точці траєкторії
- В під час руху вниз
- Г під час всього польоту сила тиску однакова і не дорівнює нулю
- Д під час всього польоту сила тиску дорівнює нулю

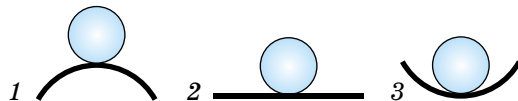
18. Вага – це...

- А міра інертності тіла
- Б міра гравітаційної взаємодії тіла із Землею
- В сила, з якою Земля діє на тіло біля її поверхні
- Г сила, з якою тіло діє на опору або підвіс унаслідок притягання до Землі
- Д маса тіла

19. Ліфт опускається з прискоренням  $10 \text{ м/с}^2$  вертикально вниз. У ліфті є тіло, маса якого  $1 \text{ кг}$ . Яка вага тіла? Прискорення вільного падіння прийняти за  $10 \text{ м/с}^2$ .

- А 0    Б 10 Н    В 20 Н    Г 1 Н
- Д серед відповідей (А–Г) правильної немає

20. На якій поверхні нерухомий м'яч перебуватиме у стані *стійкої* рівноваги (див. мал.)?

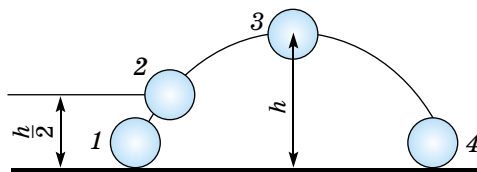


- А 1    Б 2    В 3    Г в усіх трьох точках    Д у жодній із трьох точок

21. Під час пострілу з автомата куля масою  $m$  вилітає зі швидкістю  $v$ . Якого імпульсу набуває в результаті пострілу автомат, якщо його маса в 500 разів більша за масу кулі?

- А  $mv$     Б  $500mv$     В  $1/500mv$     Г 0
- Д серед відповідей (А–Г) правильної немає

22. На малюнку зображено траєкторію руху тіла, кинутого під кутом до горизонту. У якій точці траєкторії сума кінетичної і потенціальної енергій тіла мала максимальне значення? Опором повітря знехтуйте.



- А 1    Б 2    В 3    Г 4    Д в усіх точках однакова

23. Два автомобілі однакової маси  $m$  рухаються зі швидкостями  $v$  і  $2v$  відносно Землі в одному напрямку. Визначте кінетичну енергію другого автомобіля в системі відліку, пов'язаній з першим автомобілем.

- А  $0,5mv^2$     Б  $mv^2$     В  $2mv^2$     Г  $4,5mv^2$     Д  $1,5mv^2$

24. Яка відносна швидкість двох космічних кораблів, які рухаються у протилежних напрямках, якщо їх швидкості ( $u = v$ )  $0,6c$  відносно Землі?

- А  $2,6452275 \cdot 10^8 \text{ м/с}$     Б  $2,9813614 \cdot 10^8 \text{ м/с}$     В  $28780075 \text{ м/с}$
- Г  $299\,792\,458 \text{ м/с}$     Д серед відповідей (А–Г) правильної немає

# МОЛЕКУЛЯРНА ФІЗИКА ТА ТЕРМОДИНАМІКА

*У житті людини велику роль відіграють теплові явища, зокрема теплообмін в організмі людини, який пов'язаний з температурою і тиском навколишнього середовища, вологістю повітря тощо. Людина також використовує явища і процеси, які відбуваються у природі, а саме: капілярні явища, поверхневий натяг, змочування і незмочування тіл різними рідинами. Вона вміло використовує теплові двигуни та холодильні машини, ураховує різноманітні деформації, які трапляються на кожному кроці – на транспорті, виробництві та побуті.*

*Саме в цьому розділі ви знайдете всі відповіді на питання, які вивчає молекулярна фізика та термодинаміка.*

133

### § 32. ІСТОРІЯ ВИВЧЕННЯ АТОМА

З попередніх класів ви вже багато знаєте про атом, його будову та властивості. Тому ми коротко зупинимося на історичних етапах вивчення атома.

Ганс Гейгер (1882–1945), колега та учень знаменитого фізика **Ернеста Резерфорда** (1871–1937), згадуючи якось про важливу подію в історії фізики, що відбулася у 1911 р., написав у листі до іншого учня свого вчителя, **Джеймса Чедвіка** (1891–1974): «Одного разу Резерфорд увійшов у мою кімнату у досить гарному настрої і сказав, що він тепер знає, який вигляд має атом...».

Модель Резерфорда була не першою в історії фізики. Учителю Резерфорда, **Джожеф-Джон Томсон** (1856–1940), який відкрив існування в атомах електронів – найменших частинок, що несуть негативний заряд, пропонував уважати атом позитивно зарядженою кулею-сферою, у якій «плавають» електрони. Позитивний заряд в уяві Томсона був розподілений по всьому об'єму кулі.

Німецький фізик **Філіпп Ленард** (1862–1947) у 1903 р. запропонував модель «порожнього» атома, усередині якого літають ніким не встановлені (ні раніше, ні тепер) нейтральні частинки, складені із взаємно зрівноважених позитивних і негативних зарядів. Учений навіть придумав назву для цих неіснуючих частинок – *дінаміди*.

Проте модель атома Резерфорда була єдиною, право на існування якої доводилося строгими, простими і красивими дослідженнями. До свого відкриття учений прийшов не відразу. Працюючи майже все перше десятиліття XX ст. у Канаді (до переїзду в Англію) разом з радіохіміком **Фредеріком Содді** (1877–1956), Резерфорд вивчав явище радіоактивного розпаду атомів Радію, яке відкрили наприкінці XIX ст. у Франції **Антуан-Анрі Беккерель** (1852–1908) та подружжя Кюрі. Як відомо, **П'єр Кюрі** (1859–1906) і **Марія Склодовська-Кюрі** (1867–1934), пропускаючи випромінювання від Радію через магнітне поле, установили, що частина променів відхиляється вгору від початкової траєкторії, а шлях інших залишається прямолінійним.

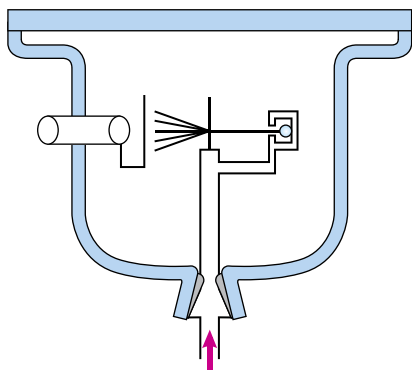
Резерфорд та Содді помістили шматок Радію в більш сильне магнітне поле, ніж в експериментах, описаних вище, і з подивом помітили, що та частина випромінювання, яка до цього часу вважалася рухається прямолінійно, також розділилася на дві складові: одна частина летіла і далі прямолінійно, а інша – відхилялася вниз від уявної лінії між полюсами магніту. Таким чином, з атомів Радію спонтанно випромінюються три види частинок або променів: негативно заряджені (ті, що відхиляються вгору), нейтральні і позитивно заряджені.

Знаючи силу магнітного поля та величину відхилення в полі частинок-променів, використовуючи спектральний аналіз (де природу речовини визначають за характерним для неї світінням), Резерфорд і Содді довели, що позитивно заряджена частина випромінювання, що отримала назву  $\alpha$ -випромінювання, є потоком іонізованих атомів Гелію. Знаменитий англійський хімік і фізик **Уільям Рамзай** (1852–1916) підтвердив висновки молодих учених.

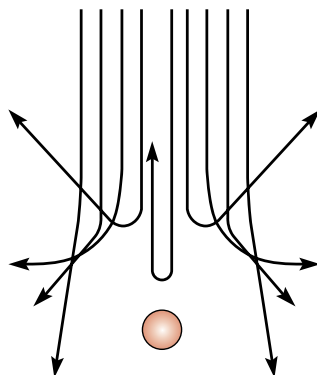
Усі експерименти і досліді Резерфорда було виконано досить просто. Відхилене магнітним полем  $\alpha$ -випромінювання від шматка радію, проходило через тоненьку фольгу з алюмінію, міді, свинцю та інших металів і потрапляло на напівпрозорий екран, покритий шаром люмінофора (мал. 86).

У місцях потрапляння  $\alpha$ -частинок екран світився точковими спалахами. Кількість спалахів залежала від атомної маси елемента, з якого було зроблено фольгу: що важчий елемент, то менше і рідше світився екран.

Резерфорд попросив одного зі своїх учнів, який спостерігав за спалахами, особливо уважно стежити за віддаленими від центра частинами екрана, де, як спочатку здавалося, спалахи не відбуваються. Хоча спалахів було і небагато, їх вдалося помітити. Крім того, під час дослідження було зареєстровано, що деякі з  $\alpha$ -частинок відскакують назад, і тому екран потрібно ставити перед фольгою, щоб було видно ці незвичайні випадки (мал. 87).



Мал. 86. Установка Резерфорда



Мал. 87. Результати дослідів Резерфорда

Одна з восьми тисяч частинок, що пролітали, поверталася назад. Ученим удалося не лише розгледіти це, а й підрахувати число таких випадків.

Це означало: у центрі будь-якого атома є маленьке, щільне, позитивно заряджене ядро, що відхиляє  $\alpha$ -частинку (також позитивно заряджену), яка пролітає близько від нього, на досить великі кути, а інколи і взагалі повертає назад до джерела частинок, і тоді виникають спалахи в дальніх частинах екрана або на екрані, розміщеному перед фольгою.

Результати дослідів, які привели Резерфорда до планетарної будови атома, учений виклав у великій статті «Розсіювання альфа- і бета-частинок у речовині і структура атома» (1911 р.), опублікованій в англійському «Філософському журналі».

Резерфорд продовжував працювати далі, і завдяки копіткій роботі він виводить формулу, що пов'язує число  $\alpha$ -частинок, відхилених на певний кут, із зарядом ядер речовини фольги-мішені. Тепер уже можна було дослідно визначити природу матеріалу мішені. Так з'явився перший ядерний метод хімічного аналізу!

Удалося нарешті оцінити розміри найменшого ядра – Гідрогену, навколо якого обертається лише один електрон. Діаметр ядра Гідрогену виявився трохи більший ніж  $1,3 \cdot 10^{-13}$  см. У важчих атомів діаметр ядра в кілька тисяч разів більший.



#### ЗАПИТАННЯ ДО ВИВЧЕНОГО

1. Хто з учених вивчав будову атома?
2. Які існували моделі атома?
3. У чому суть дослідів Резерфорда?
4. Які розміри має атом Гідрогену?

135

## § 33. СУЧАСНІ ДОСЛІДЖЕННЯ БУДОВИ РЕЧОВИНИ. НОВІТНІ ТЕХНОЛОГІЇ: НАНОМАТЕРІАЛИ

Склад і будову тієї чи іншої речовини можна виявити фізичними методами аналізу, не вдаючись до хімічних реакцій, або фізико-хімічними методами шляхом вивчення фізичних явищ та спостереження за ними, що відбуваються під час хімічних реакцій. До таких методів, які часто називають експериментальними, належать такі методи якісного й кількісного аналізу: спектральний; люмінесцентний; оптичний; електрохімічний; хроматографічний та деякі інші.

**Спектральні методи** аналізу – це методи, що ґрунтуються на визначенні хімічного складу та будови речовин з їх спектра. Випромінювання, поглинання або розсіювання електромагнітного випромінювання може розглядатися як сигнал, що несе інформацію про якісний і кількісний склад речовини або про її структуру.

У сучасних фізико-хімічних дослідженнях будови речовини широко застосовують **інфрачервону спектроскопію**. Інфрачервоні спектри дають досить повну характеристику речовин. Інфрачервона спектроскопія може бути корисною під час вимірювання міжатомних відстаней у молекулах, під час вимірювання температури згоряння ракетного палива.

**Люмінесцентний аналіз** – якісний і кількісний метод дослідження різних речовин, який ґрунтується на явищі люмінесценції. Найпоширеніший люмінесцентний аналіз – аналіз з використанням люмінесценції, яку викликає ультрафіолетове проміння. Люмінесцентний аналіз дає змогу визначити

якісний та кількісний склад речовин. Його використовують у видимій області спектра. Перевага методу – висока чутливість, яка дає змогу ідентифікувати речовину при її кількості від  $10^{-8}$ – $10^{-9}$  г до  $10^{-10}$ – $10^{-12}$  г.

**Оптичні методи** дослідження речовини ґрунтуються на використанні законів оптики, які стосуються природи, поширення і взаємодії з речовиною електромагнітного випромінювання оптичного діапазону (видиме світло, ультрафіолетове й інфрачервоне випромінювання).

Для якісного й кількісного визначення хімічних елементів у біологічних рідинах і тканинах, у лікарських засобах та інших об'єктах слугує спектрально-емісійний аналіз. Суть його у вивченні спектра світла, яке випромінюють атоми і молекули, порушені різними способами, наприклад нагріванням до високих температур.

Для вимірювання поглинання світла речовиною з метою аналізу складу і структури зразка широко застосовують фотометричні та спектрофотометричні методи. Наприклад, спектрофотометри дають змогу вивчати характерні спектри поглинання різних речовин і встановлювати їх хімічну будову й кількісний вміст у розчинах.

**Електрохімічні методи** аналізу речовин – сукупність методів якісного та кількісного аналізу речовин, що ґрунтуються на процесах, які протікають на електродах або в міжелектродному просторі. При цьому вимірюють ряд параметрів, наприклад електродний потенціал, кількість електрики, повний електричний опір, ємність, електропровідність, діелектрична проникність, значення яких пропорційні концентраціям речовин, які визначаються. Електрохімічні методи аналізу використовують для визначення понад 60 елементів у різних природних і промислових матеріалах, у рудах, мінералах.

**Хроматографія** – сучасний і високоефективний метод, дає змогу досить швидко й надійно визначати вміст окремих компонентів у сумішах, концентрувати й ідентифікувати ці компоненти. Вона ефективна не тільки в хімічному аналізі, але і в хімічній технології. У біології й агропромисловій галузі хроматографічне розділення і концентрування використовують перед кількісним визначенням мікроелементів, а також для виявлення пестицидних сполук у навколишньому середовищі. Під час технологічного контролю харчових виробництв хроматографія слугує для очищення речовин, аналізу сумішей органічних кислот, амінокислот та інших продуктів.

Для вивчення будови речовини використовують різноманітні технології. В основі будь-якого процесу лежить певна технологія, до компонент якої належать: 1) мета реалізації процесу; 2) предмет, що підлягає технологічним змінам; 3) способи й методи дії; 4) засоби технологічної дії; 5) упорядкованість й організація, протиставлені стихійним процесам.

**Технологічний процес** – це послідовна зміна станів, стадій розвитку, сукупність дій; **виробничий процес** – це сукупність взаємопов'язаних операцій і перетворень ресурсів, спрямованих на виготовлення певної продукції.

Цілеспрямовані процеси можна подати у вигляді схеми.

Наведені на малюнку 88 процеси характеризуються різною можливістю управління, а саме:

– автоматичні процеси – усі дії виконуються без будь-яких відхилень, в автоматичному режимі;

– хаотичні процеси – причинно-наслідкові зв'язки мають статистичний, імовірнісний характер;





Мал. 88. Цілеспрямовані технологічні процеси

– програмована технологія – певна послідовність процесів обробки інформації відповідно до заданої програми;

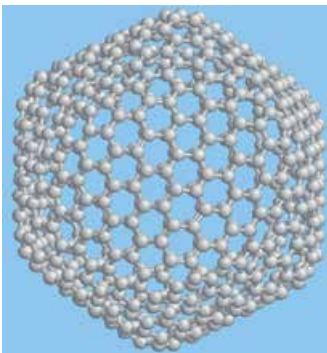
– професійно-технічна технологія – певна послідовність процесів обробки деталей, виробів, вузлів певним технологічним процесом;

– науково-технічна технологія – певна послідовність процесів обробки технологічного об'єкта (інформації, деталей, виробів, вузлів) згідно із заданим технологічним процесом і із застосуванням засобів й інтелектуальної обробки інформації;

– науково-дослідна технологія – не визначена повністю послідовність процесів обробки технологічного об'єкта відповідно до заданого технологічного процесу, який може змінюватися для отримання бажаного результату і вимагає застосування засобів інтелектуальної обробки інформації.

Наведемо приклади ролі новітніх технологій у створенні продукції, що необхідна для сучасної науки, виробництва і потреб людини.

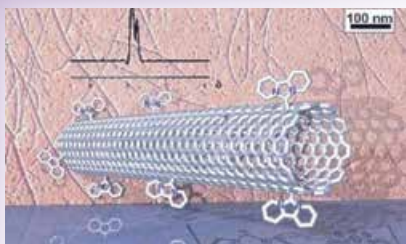
**Наноматеріали** – матеріали з якісно новими властивостями (з грец. *nanpos* – «карлик»), створені з використанням наночастинок та за допомогою нанотехнологій (методи цілеспрямованого маніпулювання речовиною на атомному або молекулярному рівні). До наноматеріалів належать об'єкти, розміри яких – від 1 до 100 нм ( $1 \text{ нм} = 10^{-9} \text{ м}$ ), (мал. 89, 90).



Мал. 89. Ікосаедричний фулерен C50



Мал. 90. Вуглецеві нанотрубки

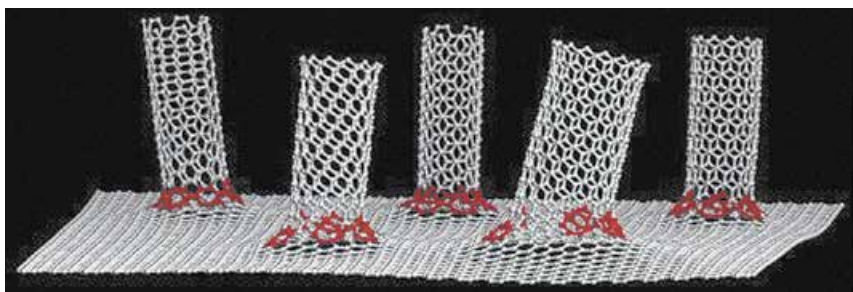


Мал. 91. Тонка плівка

(особливо металеві) дуже активні і взаємодіють з навколишнім середовищем.

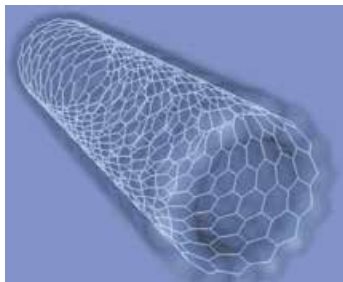
Дослідна група з Університету Райса й Ренселлерського політехнічного інституту (США) розробила найтемніший у світі матеріал. Тонка плівка (мал. 91), що складається з вуглецевих нанотрубок, відбиває лише 0,045 % світла, що падає на неї. Це в чотири рази менше, ніж у найтемнішого з раніше відомих матеріалів (нікель-фосфорного сплаву з поверхнею, укритою мікрозападинами) і приблизно в сто разів менше, ніж відбиває аркуш чорного паперу.

Новий наноматеріал, який є чимось на зразок гібрида графену і вуглецевих нанотрубок (мал. 92), створили вчені того самого університету. У перспективі такий матеріал – найкраще рішення для виготовлення електродів певних електронних приладів, суперконденсаторів та інших



Мал. 92. Гібрид вуглецевих нанотрубок і графену

пристроїв акумуляції електричної енергії. Дослідницька група, яку очолює хімік Джеймс Тур, виростила на поверхні графенової плівки цілісні вуглецеві нанотрубки. «Ліси» з вуглецевих нанотрубок швидко виростили з аркушів графену на вражаючу висоту до 120 мікронів. Якщо спорудити звичайний будинок з таким самим співвідношенням площі основи та висоти, то його дах вийшов би далеко за межі атмосфери.



Мал. 93. Самозбірні матеріали

Самоскладання – найпопулярніша технологія у природі. У ранній період створення Всесвіту з окремих атомів збиралися різноманітні речовини. У відділі фізико-неорганічної хімії Інституту загальної і неорганічної хімії ім. В. Вернадського НАН України розробляють технологію створення вуглецевих самозбірних наноматеріалів (мал. 93). Для цього вченим доводиться розпорошувати речовину у вигляді атомів, щоб

вони збиралися у просторі в мікроскопічні нанотрубки. Роздивитися результат цієї операції можна тільки в надпотужні растрові мікроскопи, на яких розрізняються утворення до 10 ангстремів.



### ЧИ ЗНАЄТЕ ВИ, ЩО...

- 11 лютого відзначається Міжнародний день жінок в науці. За даними ЮНЕСКО, лише 28 % наукових працівників у світі – жінки.

В Україні 46 % – жінки-науковці. Вони найкраще зарекомендували себе в молекулярній біофізиці, психології, наноматеріалознавстві та комп'ютерній інженерії, зокрема й за кордоном.

- Ольга Броварець – наймолодша в Україні докторка фізико-математичних наук, провідна наукова співробітниця відділу молекулярної та квантової біофізики Інституту молекулярної біології і генетики НАН України, старша наукова співробітниця кафедри молекулярної біотехнології та біоінформатики Інституту високих технологій Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Опублікувала понад 60 статей англійською мовою в міжнародних наукових журналах. Наукові знахідки Ольги Броварець та її колег не лише дають змогу краще зрозуміти молекулярну еволюцію живого, а й відкривають нові перспективи у фармації для створення новітніх препаратів для лікування онкологічних хвороб.



Ольга Броварець



### ЗАПИТАННЯ ДО ВИВЧЕНОГО

1. Які сучасні дослідження будови речовини ви знаєте?
2. Що таке технологія?
3. Що таке технологічний процес?
4. Що таке наноматеріали? Які види наноматеріалів ви знаєте?



Дослідіть питання використання наноматеріалів у наукових і промислових цілях.

## § 34. ОСНОВИ МОЛЕКУЛЯРНО-КІНЕТИЧНОЇ ТЕОРІЇ БУДОВИ РЕЧОВИНИ

Теплові явища відіграють велику роль у житті людини, тварин і рослин. У різні пори року зі зміною температури повітря на 20–30 °C змінюється навколишній світ. Зміна температури впливає на всі властивості тіл. Так, від нагрівання або охолодження змінюються розміри твердих тіл і об'єм рідин. Значно змінюються також їх механічні властивості, наприклад пружність. Якщо за кімнатної температури вдарити молотком по гумовій трубці, то вона залишиться цілою. Але якщо трубку охолодити до температури, нижчої за –100 °C, то легким ударом можна розбити її на дрібні шматочки. Гума стає крихкою, як скло. Тільки після нагрівання гума знову набуває своїх пружних властивостей.

Усі теплові явища, а також багато інших, відбуваються за певними законами. Ці закони так само точні й надійні, як і закони механіки, але відрізняються від них змістом і формою. Відкриття законів, за якими відбуваються теплові явища, дає змогу максимально використати ці явища на практиці, у техніці. Сучасні теплові двигуни, установки для зрідження газів, холодильні та інші апарати конструюють на основі цих законів.

Теорію, яка пояснює теплові явища в макроскопічних тілах і внутрішні властивості цих тіл на основі уявлень про те, що всі тіла складаються з окремих частинок, які рухаються хаотично, називають *молекулярно-кінетичною теорією*.

У цій теорії головне завдання пов'язати закономірності поведінки окремих атомів і молекул з величинами, які характеризують властивості макроскопічних тіл.

Молекулярна фізика ґрунтується на кількох положеннях, які стосуються структури речовини і закономірностей руху частинок, що входять до складу речовини. До цих положень належать такі:

**1. Речовина складається із частинок (атомів і молекул).** Маса будь-якого тіла дорівнює сумі мас частинок, з яких складається тіло. Маса тіл може змінюватися лише на ціле число, кратне масі частинки. Кажуть, що маса тіла може змінюватися не безперервно, а лише порціями – дискретно.

**2. Молекули (атоми) усіх тіл перебувають в безперервному тепловому русі.** Невпорядкованість руху частинок – найважливіша особливість теплового руху.

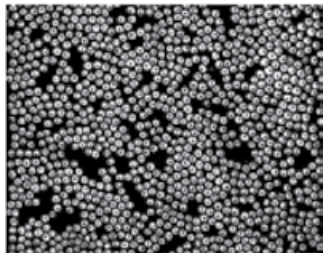
**3. Молекули (атоми) взаємодіють між собою** – залежно від відстані між частинками вони притягуються або відштовхуються.

Основні положення молекулярно-кінетичної теорії (МКТ) будови речовини сформульовані на основі узагальнення експериментальних спостережень. Розглянемо деякі з них.

**Розміри атомів і молекул.** Атоми і молекули надзвичайно малі, їх неможливо розрізнити навіть за допомогою найсильніших оптичних мікроскопів. Уперше вдалося побачити окремі молекули і групи атомів за допомогою електронного мікроскопа. На фотографії (мал. 94) добре видно дискретну структуру речовини: чітко розрізняється безліч окремих частинок, розділених проміжками. Знаючи, з яким збільшенням отримано фотографію, можна визначити, лінійні розміри атомів і молекул.

Розглянемо один з найпростіших способів, що дають змогу оцінити розміри молекул.

**Дослід 1.** Розчинимо  $0,5 \text{ см}^3$  стеаринової кислоти в 1 л бензолу і за допомогою піпетки помістимо одну краплину на поверхню дистильованої води. Краплина розтікається, а бензол випаровується і на поверхні води утворюється надзвичайно тонкий шар стеаринової кислоти, товщина якого дорівнює діаметру однієї молекули. Визначивши товщину шару, можна приблизно оцінити і розмір молекули стеаринової кислоти: її діаметр, як показали розрахунки, дорівнює  $2 \text{ нм} = 2 \cdot 10^{-9} \text{ м}$ .



Мал. 94. Фотографія молекул, отримана за допомогою електронного мікроскопа

У світі атомів і молекул це справжні гіганти. Молекули переважної більшості речовин мають значно менші розміри. Наприклад, діаметр молекули Оксигену приблизно дорівнює  $0,3 \text{ нм}$ , молекули води –  $0,26 \text{ нм}$ . Найменша молекула у природі – молекула Гідрогену, її діаметр –  $0,12 \text{ нм}$ . Найбільшими є молекули органічних сполук і полімерів, які складаються з кількох тисяч атомів. Довжина однієї з таких гігантських молекул – молекули альбуміну – становить  $43 \text{ нм}$ .

**Броунівський рух.** Безпосередньо спостерігати рух окремих атомів або молекул неможливо, але



існує багато явищ, які побічно, але не менш переконливо свідчать про рух молекул.

Уперше таке явище спостерігав у 1827 р. англійський ботанік **Роберт Броун** (1773–1858). Учений, розглядаючи в мікроскоп спори рослин, які плавають у воді, побачив, що вони безперервно рухаються по ламаних зигзагоподібних траєкторіях. Такий самий рух частинок можна спостерігати, якщо у воді розмішати трохи фарби або якщо в повітрі є тверді частинки диму. Маса і розміри цих частинок у тисячі разів більші за розміри молекул. Їх назвали **броунівськими частинками**. Спостереження показують, що броунівські частинки здійснюють безперервний, такий, що ніколи не припиняється, безладний рух, що отримав назву **броунівський рух**.

**Броунівський рух** – це тепловий рух завислих у рідині або газі частинок.

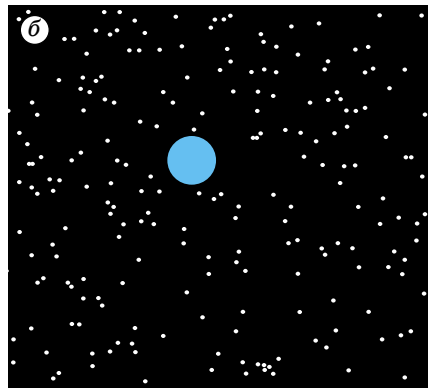
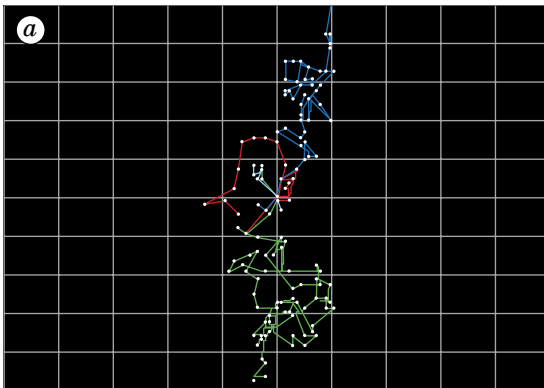
Найретельніше експериментально дослідили броунівський рух французькі учені **Жан Перрен** (1870–1942) і **Френсіс Перрен** (1901–1979). Вони фіксували точками положення однієї і тієї самої броунівської частинки через кожних 30 секунд. Отримані точки сполучили прямими і отримали картину, подібну до тої, яку зображено на малюнку 95, а.

Уважно спостерігаючи рух броунівських частинок, створюється враження, що вони рухаються під дією ударів якихось невидимих оку частинок речовини. Це молекули самої рідини або газу, які безперервно бомбардують броунівську частинку з усіх боків одночасно (мал. 95, б). Якщо число ударів з одного боку більше, ніж з іншого, то броунівська частинка починає рухатися; якщо за цим слідує поштовх з іншого боку, напрямом руху частинки змінюється. Так пояснюється хаотичність руху броунівських частинок. А це доводить безладність руху молекул рідини й газу.

Молекулярно-кінетичну теорію броунівського руху створив у 1905 р. Альберт Ейнштейн. А після того як Жан Перрен побудував теорію броунівського руху і підтвердив її експериментально, молекулярно-кінетична теорія перемогла остаточно.

**Явище дифузії.** Крім броунівського руху, відомі й інші факти, що свідчать про рух атомів і молекул. За допомогою піпетки внесемо до високого скляного циліндра краплину бром. Бром випаровується і його пара, хоча вона і важча за повітря, поступово заповнює всю посудину.

Якщо в дистильовану воду обережно за допомогою піпетки додати трохи розчину мідного купоросу, то протягом кількох днів молекули мідного купоросу піднімуться вгору і поволі забарвлять воду у блакитний колір.



Мал. 95. Модель броунівського руху

Дві металеві пластинки, щільно притиснуті одна до одної протягом кількох років, зростаються. Якщо ж ці пластинки помістити в піч за температури 300–400 °С, то такий самий результат отримаємо через кілька діб.

**Дифузія** – процес взаємного проникнення частинок однієї речовини в міжмолекулярні проміжки іншої без дії зовнішніх сил.

Вона можлива тільки завдяки тому, що частинки речовини перебувають у стані безперервного руху. Отже, явища броунівського руху і дифузії переконують нас у тому, що молекули, атоми та йони перебувають у стані безперервного руху.

Явище дифузії відіграє важливу роль у живій природі. Завдяки йому відбувається обмін речовин і енергії в живих організмах. Поживні речовини переходять з навколишнього середовища в живу клітину, а продукти розпаду виводяться з неї в навколишнє середовище. Без цих процесів життя неможливе.

**Взаємодія атомів і молекул.** Ви вже знаєте, що до складу атомів і молекул входять електрично заряджені частинки речовини – протони й електрони. Тому між атомами й молекулами всіх речовин одночасно діють і сили притягання (між різнойменно зарядженими частинками), і сили відштовхування (між однойменно зарядженими частинками).

**Сили, що діють між атомами й молекулами речовини, називають молекулярними силами.**

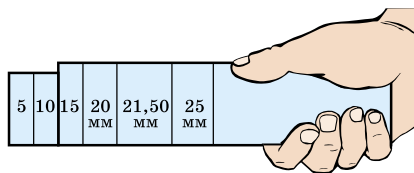
142

У існуванні молекулярних сил можна переконатися на дослідах. Наприклад, той факт, що тверді тіла зберігають свої розміри й форму, можна пояснити тільки тим, що між атомами й молекулами твердих тіл існують сили притягання. Якщо щільно притиснути одна до одної кілька металевих добре відполірованих плиток (плиток Йогансона), то завдяки силам притягання між молекулами вони так міцно утримуються одна біля одної, що з них можна скласти цілий ланцюжок (мал. 96). Такі плитки використовують для точного вимірювання довжини і контролю вимірювальних приладів.

Сили молекулярного притягання виникають не тільки між однорідними, але й між різнорідними речовинами.

**Дослід 2.** Підвісимо на нитках до динамометра скляну або добре відполіровану металеву пластинку так, щоб її нижня поверхня стикалася з водою. Тепер спробуємо відірвати її від води. Пружина динамометра помітно розтягується: між молекулами води і пластинки виникають сили притягання. Сили притягання між молекулами виникають завжди, коли відстань між молекулами дорівнює або менша від радіуса сфери молекулярної дії. Значення цих сил визначається природою взаємодіючих молекул.

Існування сил відштовхування між молекулами речовини можна також виявити на багатьох дослідах.



Мал. 96. Зчеплення плиток Йогансона

**Дослід 3.** Натиснемо на поршень велосипедного насоса, закривши вихідний отвір. Довести поршень до кінця не вдасться: між молекулами газу діють сили відштовхування.

**Дослід 4.** Закриємо отвір медичного шприца, заповненого рідиною. Натискаючи на його поршень, виявимо, що між молекулами рідини існують такі великі



сили відштовхування, що сили людини недостатньо, щоб хоч трохи зменшити об'єм рідини.

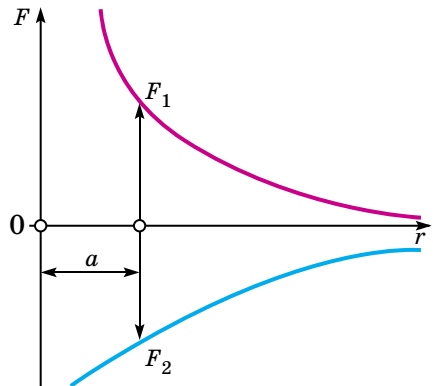
**Дослід 5.** Зігнемо металеву лінійку, її форма зміниться. Після припинення дії зовнішніх сил лінійка відновить свою форму. Це можливо тільки в тому випадку, якщо між частинками, з яких вона складається, діють сили відштовхування і притягання одночасно.

Слід зауважити, що молекулярні сили діють тільки на дуже малих відстанях: молекули взаємодіють тільки зі своїми найближчими сусідами. Цей висновок підтверджується спостереженнями. Розбиті частини скляної трубки не вдається з'єднати знов. Чому? Тому, що через нерівності поверхні зламу молекули перебувають на таких відстанях, де молекулярні сили вже не діють. Якщо ж нагрівати місце зламу, то скло стане м'яким, і його окремі частини буде легко зблизити. Між молекулами виникнуть достатньо великі сили і обидві частини скляної трубки легко з'єднаються.

Отже, молекулярні сили дуже швидко зменшуються з відстанню і практично дорівнюють нулю, коли відстань між центрами молекул перевищує 1 нм ( $10^{-9}$  м).

**Область простору, у якій діють молекулярні сили, називають сферою молекулярної дії, радіус цієї сфери порядку  $10^{-9}$  м.**

Сили притягання і відштовхування, що діють між молекулами, мають складну залежність від відстані між ними. Характер цієї залежності наочно ілюструє графік, зображений на малюнку 97. На осі абсцис відкладено відстані між центрами частинок  $r$ , а на осі ординат – сили взаємодії між ними  $F$ . Сили відштовхування  $F_1$  домовимось вважати додатними, а сили притягання  $F_2$  – від'ємними. Коли відстань між частинками збільшується, сили притягання  $F_2$  і сили відштовхування  $F_1$  зменшуються, але неоднаково: сили відштовхування зменшуються швидше за сили притягання. Навпаки, у разі зближення частинок одна з одною сили притягання і сили відштовхування збільшуються одночасно, але знову неоднаково: сили відштовхування збільшуються швидше за сили притягання. На певній відстані  $a$  між центрами частинок, що взаємодіють, сили притягання виявляються рівними силам відштовхування. У цьому положенні частинки перебувають у стані рівноваги одна відносно одної.



Мал. 97. Залежність молекулярних сил від відстані між молекулами

**Відстань між частинками, що перебувають у стані рівноваги, називають рівноважною відстанню.**

Якщо відстань між центрами частинок стає меншою за рівноважну, то сили відштовхування, збільшуючись швидше за сили притягання, починають переважати сили притягання і частинки відштовхуються одна від одної.

Зі збільшенням відстані між центрами частинок сили притягання стають більшими за сили відштовхування, і частинки притягуються одна до одної.



## ЗАПИТАННЯ ДО ВИВЧЕНОГО

1. Які положення молекулярно-кінетичної теорії будови речовини ви знаєте?
2. Які розміри мають атоми і молекули?
3. Які існують методи вимірювання розмірів атомів і молекул?
4. Який рух називають броунівським? Хто з учених пояснював цей рух?
5. У чому полягає явище дифузії?
6. Яку роль відіграє явище дифузії у житті живих організмів?
7. Які сили називають молекулярними?
8. Що називають сферою молекулярної дії?
9. Що таке рівноважна відстань?
10. Як залежать сили відштовхування і сили притягання від відстані між молекулами?



## РОБОТА У ГРУПАХ

- Об'єднайтеся в групи та створіть мультимедійну презентацію на тему: «Дифузія як засіб переміщення поживних речовин у рослинах».

## § 35. МАСА АТОМІВ І МОЛЕКУЛ. КІЛЬКІСТЬ РЕЧОВИНИ

144

Ви вже знаєте, що, атоми і молекули складаються з певної кількості елементарних частинок – електронів, протонів і нейтронів, які мають масу. Отже, атоми і молекули всіх речовин також мають певну масу. Маса атома і молекули надзвичайно малі. Сьогодні їх вимірюють з дуже великою точністю за допомогою спеціальних приладів – мас-спектрометрів.

У таблиці 1 наведено значення мас деяких атомів, поданих у кілограмах. Слід зазначити, що в цьому випадку маси навіть найважчих атомів – Плюмбуму та Урану – виражаються дуже малими і тому незручними для розрахунків числами.

Щоб усунути цю незручність, для вимірювання мас атомів і молекул було прийнято спеціальну одиницю – **атомну одиницю маси (а.о.м.)**. За атомну одиницю маси беруть  $1/12$  частку маси атома Карбону. Користуючись даними таблиці 1, легко розрахувати, що  $1 \text{ а.о.м.} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$ , і визначити масу атомів усіх хімічних елементів в а.о.м.

Таблиця 1

Значення мас деяких атомів

| Елемент  | Маса атома            |        |
|----------|-----------------------|--------|
|          | $10^{-27} \text{ кг}$ | а.о.м. |
| Гідроген | 1,67                  | 1,008  |
| Гелій    | 6,64                  | 4,003  |
| Карбон   | 19,9                  | 12,00  |
| Нітроген | 23,2                  | 14,01  |
| Оксиген  | 26,6                  | 15,99  |
| Хлор     | 58,9                  | 35,5   |
| Ферум    | 92,8                  | 55,9   |
| Плюмбум  | 344                   | 207,2  |
| Уран     | 394                   | 238,03 |

**Атомна маса** – маса атома, виміряна в атомних одиницях маси. **Молекулярна маса** – маса молекули, виміряна в атомних одиницях маси.

Молекулярна маса є сумою атомних мас атомів, які утворюють цю молекулу. Визначимо, наприклад, молекулярну масу оксиду Карбону – так званого вуглекислого газу. Хімічна формула цієї речовини  $\text{CO}_2$ , отже, її молекулярна маса (з точністю до цілих)  $m = 12 \text{ а.о.м.} + 2 \cdot 16 \text{ а.о.м.} = 44 \text{ а.о.м.}$  Аналогічно можна визначити молекулярну масу будь-якої речовини.

Визначимо молекулярну або атомну масу деяких речовин і результати обчислень запишемо в таблицю 2. Візьмемо стільки грамів кожної речовини, скільки атомних одиниць маси містить одна її молекула або атом, тобто 12 г вуглецю, 32 г кисню, 28 г азоту і т.д.

**Моль даної речовини – кількість речовини, маса якої у грамах дорівнює її молекулярній або атомній масі.**

Позначають масу моля даної речовини (молярну масу) літерою  $\mu$ . Одиницею молярної маси в СІ є один кілограм на моль (1 кг/моль).

Отже, один моль вуглецю дорівнює  $12 \cdot 10^{-3}$  кг/моль, кисню  $32 \cdot 10^{-3}$  кг/моль, води  $18 \cdot 10^{-3}$  кг/моль.

Молекулярна маса деяких речовин

Таблиця 2

| Речовина | Хімічна формула  | Молекулярна маса, а.о.м. | Молярна маса, г/моль |
|----------|------------------|--------------------------|----------------------|
| Карбон   | C                | 12                       | 12                   |
| Оксиген  | O <sub>2</sub>   | 32                       | 32                   |
| Азот     | N <sub>2</sub>   | 28                       | 28                   |
| Вода     | H <sub>2</sub> O | 18                       | 18                   |
| Аміак    | NH <sub>3</sub>  | 17                       | 17                   |

Знаючи масу одного моля і масу однієї молекули (атома), визначимо число молекул, що містяться в одному молі різних речовин. Якщо виконати відповідні розрахунки (зробіть це самостійно), то для всіх речовин результати будуть однаковими, **тобто в одному молі будь-якої речовини міститься однакове число атомів або молекул:  $N = 6,02 \cdot 10^{23}$  1/моль (моль<sup>-1</sup>).** Це – закон Амадео Авогадро (1776–1856) – один з фундаментальних законів молекулярної фізики. Число атомів або молекул, що містяться в одному молі речовини, має назву **сталой Авогадро**.

Знаючи сталу Авогадро  $N_A$  і масу одного моля  $\mu$ , можна визначити масу атома або молекули досліджуваної речовини:  $m_0 = \frac{\mu}{N_A}$ .

Знаючи сталу Авогадро, можна визначити і число атомів або молекул  $N$ , які утворюють тіло будь-якої маси  $m$ . Якщо маса одного атома або молекули дорівнює  $m_0$ , то, очевидно, маса всього тіла  $m = m_0 N$ , а маса одного моля  $\mu = m_0 N_A$ . Поділимо перше рівняння на друге:  $\frac{m}{\mu} = \frac{N}{N_A}$ , звідки  $N = \frac{mN}{\mu N_A}$ .

Усі тіла, що нас оточують, складаються з різних речовин. І цеглина, і пігулка ацетилсаліцилової кислоти, і склянка води містять певну кількість речовини. Про кількість речовини, яка міститься всередині тіла, можна судити за кількістю його абсолютно однакових структурних елементів, з яких воно складається. Такими структурними елементами можуть бути молекули, йони, атоми та інші частинки, з яких побудована речовина. Проте число частинок, які утворюють макроскопічні тіла, таке велике, що практично їх порахувати неможливо. Тому для визначення кількості речовини, що утворює дане тіло, домовилися порівнювати число частинок, з яких воно складається, із числом частинок, що містяться в одному молі Карбону.

**Величину, яку визначають відношенням числа структурних елементів  $N$ , з яких складається дане тіло, до атомів  $N_A$ , що містяться в одному молі Карбону, називають кількістю речовини** (позначають літерою  $\nu$  (ню)):

$$\nu = \frac{N}{N_A}.$$

**За одиницю кількості речовини в СІ приймають таку її кількість, яка міститься в одному молі Карбону.**

Одиницею кількості речовини є **моль**. Якщо кількість речовини дорівнює 1,5 моля, то це означає, що дане тіло містить у 1,5 раза більше частинок (молекул, атомів, йонів), а значить, і речовини, ніж її міститься у 12 г (в одному молі) Карбону.

Якщо маси частинок, з яких утворено тіло, абсолютно однакові, то про кількість речовини в цьому тілі можна судити за його масою. Враховуючи співвідношення  $\nu = \frac{N}{N_A}$ , кількість речовини:

$$\nu = \frac{m}{\mu}.$$



### ЧИ ЗНАЄТЕ ВИ, ЩО...

- У нашому тілі є найбільша в природі молекула – перша хромосома. Вона складається з 10 мільярдів атомів і здатна зберігати велику кількість генів.
- Тіло людини складається приблизно з 7 октиліонів атомів. Але ці атоми здебільшого – лише порожнеча. Без неї тіло можна було б стиснути в об'єм, що дорівнює об'єму куба зі стороною 1/500 см.
- Будь-який атом нашого тіла має вік мільярди років. Найважливіша складова нашого тіла і найпоширеніший елемент у Всесвіті – Гідроген – виник під час Великого вибуху близько 13,7 млрд років тому. Інші атоми (такі як Карбон і Оксиген) виникли в зорях 7–12 млрд років тому. Вони були викинуті в космос під час вибуху зір. Тому вчені вважають, що наше тіло – зоряний пил. Погодьтеся, наше тіло – диво з точки зору науки.

146



### ЗАПИТАННЯ ДО ВИВЧЕНОГО

1. Що таке атомна одиниця маси?
2. Що таке молекулярна маса? Молярна маса?
3. Чому дорівнює число Авогадро?
4. Як визначають масу одного атома або молекули?
5. Що таке кількість речовини? Яка її одиниця в СІ?



### РОБОТА У ГРУПАХ

- Об'єднайтеся в групи та створіть мультимедійну презентацію про історію становлення молекулярно-кінетичної теорії.

## § 36. ІДЕАЛЬНИЙ ГАЗ. ОСНОВНЕ РІВНЯННЯ МОЛЕКУЛЯРНО-КІНЕТИЧНОЇ ТЕОРІЇ ГАЗІВ

Речовини в газуватому стані не мають власної форми і сталого об'єму: гази завжди повністю займають об'єм тієї посудини, у якій вони містяться. За нормальних умов середні відстані між молекулами газу в десятки разів більші за їх власні розміри, тому молекули газу практично не взаємодіють між собою.

Вивчаючи властивості газів, нехтують дійсною формою і розмірами їх молекул й умовно вважають, що молекули газів мають форму кульок певної маси. Вони рівномірно розподілені в усьому об'ємі, що займає газ, і взаємодіють між собою тільки в моменти зіткнення одна з одною. Такий газ називають **ідеальним**. Ідеальний газ – це спрощена модель реально існуючих газів. Така ідеалізація істотно полегшує кількісний опис процесів, що протікають у реальних газах.

**Ідеальний газ** – це газ, взаємодія між молекулами якого така мала, що нею можна знехтувати.

Отже, у фізичній моделі беруть до уваги лише ті властивості реальної системи, які абсолютно необхідні для пояснення досліджуваних закономірностей поведінки цієї системи.

На відміну від ідеального газу молекули реальних газів мають кінцеві, хоча і дуже малі розміри. Між молекулами реальних газів постійно діють молекулярні сили. Не зважаючи на це, уже за нормальних умов багато реальних газів за своїми властивостями близькі до ідеального. Вивчивши властивості ідеального газу, можна з досить великою точністю застосовувати їх і до реальних газів.

Хаотично рухаючись у різних напрямках, молекули ідеального газу неминуче стикаються одна з одною і зі стінками посудини, у якій міститься газ. Молекула масою  $m_0$ , рухаючись зі швидкістю  $v$ , має певний імпульс. Під час удару об стінку посудини молекула передає їй частину свого імпульсу, тобто діє на неї з певною силою. Значення цієї сили для однієї молекули дуже мале, але за кожну одиницю часу об стінку посудини вдаряється колосальна кількість молекул і із цих дій складається тиск, з яким газ діє на стінки посудини навіть за відсутності яких-небудь зовнішніх дій на нього. Визначимо значення цього тиску.

Нехай у посудині, що має форму куба з ребром  $a$ , у кожній одиниці її об'єму міститься  $N_0$  молекул ідеального газу. Якщо маса однієї молекули дорівнює  $m_0$  і вона рухається зі швидкістю  $v$ , то її імпульс  $p'_1 = m_0 v$ . Удар молекули об стінку куба вважатимемо ідеально-пружним. Тоді під час удару молекули об одну зі стінок посудини її швидкість руху зміниться не за значенням, а тільки за напрямком. Імпульс молекули після удару буде  $p'_2 = -m_0 v$ . Отже, під час удару об стінку посудини імпульс однієї молекули змінюється на значення:  $\Delta p' = p'_2 - p'_1 = -m_0 v - m_0 v = -2m_0 v$ . Відповідно до третього закону Ньютона, стінці передається імпульс  $\Delta p'_1 = 2m_0 v$ .

Рухаючись зі швидкістю  $v$ , молекула за час  $\Delta t$  проходить відстань  $\Delta l = v \Delta t$ . Отже, за час  $\Delta t$  до стінки куба долетять тільки ті молекули газу, які перебувають від неї на відстані, не більшій за  $\Delta l$ . Очевидно, усі ці молекули перебувають усередині паралелепіпеда заввишки  $\Delta l$ . Його об'єм  $V = \Delta l a^2 = \Delta l S = v S \Delta t$ . Оскільки в кожній одиниці об'єму є  $n$  молекул, то число молекул, що перебувають усередині всього паралелепіпеда,  $N = nV = nvS\Delta t$ .

Проте не всі ці молекули вдаряються об стінку посудини. Зважаючи на повну безладність в їх русі, молекули рухаються в різних напрямках кожної зі стінок куба. Оскільки молекул дуже багато, і рухаються вони абсолютно хаотично, то в напрямку до будь-якої стінки куба в середньому рухається однакове число молекул. Отже, зі всього числа молекул, що перебувають усередині виділеного паралелепіпеда, до кожної стінки буде рухатися тільки 1/6 частина молекул:  $N = \frac{1}{6} m_0 v S \Delta t$ . Ударяючись об стінку, вони передають їй імпульс:

$$\Delta p' = \Delta p'_1 N = 2m_0 v \frac{1}{6} nvS\Delta t = \frac{1}{3} nm_0 v^2 S \Delta t.$$

З механіки відомо, що  $F \Delta t = \Delta p'$ , звідки  $F = \frac{\Delta p'}{\Delta t}$ , але  $p = \frac{F}{S}$ , тому:

$$p = \frac{\Delta p'}{S \Delta t}.$$

Підставляючи в цю формулу значення  $\Delta p'$ , отримаємо:

$$p = \frac{1}{3} n m_0 v^2.$$

Це співвідношення ми отримали, вважаючи, що швидкості руху всіх молекул однакові. Насправді швидкості руху молекул одного і того самого газу різні. Тому в рівнянні квадрат швидкості однієї молекули слід замінити середнім значенням квадратів швидкостей руху всіх молекул. Для цього треба додати квадрати всіх швидкостей і отриманий результат поділити на число молекул:  $\bar{v}^2 = (v_1^2 + v_2^2 + \dots + v_n^2) : n$ .

Якщо добути квадратний корінь з обох частин цього рівняння, то отримаємо швидкість руху, яку називають **середньою квадратичною швидкістю руху молекул**. Тоді рівняння  $p = \frac{1}{3} n m_0 v^2$  слід записати так:

$$p = \frac{1}{3} n m_0 \bar{v}^2.$$

Обидві частини цього рівняння поділимо і помножимо на 2:

$$p = \frac{2}{3} n \left( \frac{m_0 \bar{v}^2}{2} \right).$$

Очевидно, що  $\frac{m_0 \bar{v}^2}{2}$  є середньою кінетичною енергією поступального руху однієї молекули  $\bar{E}_k$ , тому маємо:

$$p = \frac{2}{3} n \bar{E}_k.$$

Це співвідношення має назву **основне рівняння молекулярно-кінетичної теорії газів (рівняння Клаузіуса)**: тиск ідеального газу пропорційний добутку кількості молекул в одиниці об'єму газу і середньої кінетичної енергії поступального руху молекул.



#### ЗАПИТАННЯ ДО ВИВЧЕНОГО

1. Що називають ідеальним газом у молекулярно-кінетичній теорії?
2. Який механізм виникнення тиску газу з погляду молекулярно-кінетичної теорії?
3. Що таке середня квадратична швидкість руху молекул?
4. Запишіть основне рівняння молекулярно-кінетичної теорії.

### § 37. АБСОЛЮТНА (ТЕРМОДИНАМІЧНА) ШКАЛА ТЕМПЕРАТУР. РІВНЯННЯ СТАНУ ІДЕАЛЬНОГО ГАЗУ

Численними дослідженнями було встановлено, що середня кінетична енергія поступального руху молекул за даної температури одна й та сама, і не залежить від роду газу.

Крім того, було встановлено також, що під час нагрівання газу на  $1^\circ\text{C}$  середня кінетична енергія поступального руху його молекул збільшується на одне й те саме значення – на  $\Delta E = 2,07 \cdot 10^{-23}$  Дж/ $^\circ\text{C}$ .

Для того щоб обчислити середню кінетичну енергію поступального руху молекул, треба, окрім цієї відносної величини, знати ще хоча б одне абсолютне значення енергії поступального руху. У фізиці достатньо точно визначено ці значення для широкого діапазону температур. Наприклад, при  $t = 500^\circ\text{C}$  кінетична енергія поступально руху молекули  $E = 1600 \cdot 10^{-23}$  Дж.



Знаючи ці дві величини ( $E$  і  $\Delta E$ ), ми можемо обчислити енергію поступального руху молекул за даної температури, і розв'язати обернену задачу – визначити температуру за заданими значеннями енергії.

Визначимо, користуючись цими значеннями, за якої температури енергія поступального руху молекул дорівнюватиме нулю. Але спочатку дізнаємося на скільки градусів слід для цього охолодити газ, температура якого  $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

$$E_{500} - \Delta E t = 0; t = \frac{E_{500}}{\Delta E} = \frac{1600 \cdot 10^{-23} \text{ Дж}}{2,07 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/}^{\circ}\text{C}} = 773\text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Отже, шукана температура буде дорівнювати  $500\text{ }^{\circ}\text{C} - 773\text{ }^{\circ}\text{C} = -273\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Цю температуру прийнято за нуль абсолютної шкали температур. Ми отримали її, виходячи з припущення, що за даної температури припиниться поступальний рух молекул. Проте не слід робити висновку, що за даної температури припиниться рух узагалі. Окрім поступального руху, існують й інші види руху, крім того, і сама молекула є складним світом, у якому продовжуватиметься рух, хоч би і було досягнуто даної температури.

Цю абсолютну шкалу температур увів англійський учений **Вільям (Кельвін) Томсон (1824–1907)**.

Нульова температура за абсолютною шкалою відповідає абсолютному нулю, а кожна одиниця температури за цією шкалою дорівнює градусу за шкалою Цельсія.

Позначають абсолютну температуру літерою  $T$ . Між температурними шкалами Кельвіна і Цельсія існує такий зв'язок:  $T = t + 273$ .

Одиницею абсолютної температури в СІ є **один кельвін (1 К)**.

Користуючись абсолютною температурою, ми зможемо записати вираз для значення кінетичної енергії поступального руху молекул:  $E = \Delta E T$ .

Введемо значення абсолютної температури в основне рівняння молекулярно-кінетичної теорії газів:  $p = \frac{2}{3} n \Delta E T$ .

У правій частині величина  $\frac{2}{3} \Delta E$  є сталою, її називають **сталою Больцмана** і позначають літерою  $k$ . Названа на честь видатного австрійського фізика **Людвіга Больцмана (1844–1906)**.

Визначимо значення сталої Больцмана:

$$k = \frac{2}{3} \Delta E = \frac{2}{3} 2,07 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К} = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}.$$

$$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}.$$

**Стала Больцмана пов'язує температуру в енергетичних одиницях з температурою у кельвінах.**

Підставляючи в основне рівняння молекулярно-кінетичної теорії газів сталу Больцмана, отримуємо:  $p = nkT$ .

Але  $n = \frac{N}{V}$ , то рівняння для одного моля матиме вигляд:

$$p = \frac{N_A}{V} kT. \text{ Отже, } pV = N_A kT.$$

Слід зауважити, що у правій частині добуток  $N_A k$  – величина стала. Цю величину називають **універсальною газовою сталою** і позначають літерою  $R$ . Отже,  $R = N_A k$ .

З уведенням універсальної газової сталої рівняння матиме вигляд:

$$pV = RT.$$

Це рівняння встановлює залежність між об'ємом, тиском і температурою газу. Використовуючи його, ми можемо визначити будь-який з трьох газових параметрів за відомими двома. Проте це рівняння справджується лише для одного моля газу. Припустимо, що в нас два моля газу. Тоді, очевидно, добуток  $pV$  виявився б удвічі більший, ніж за тих самих умов для однієї молекули. Якщо ж газу взяти в кількості  $n$  молекул, то відповідний добуток буде в  $n$  разів більший. Отже, для  $\nu$  молів газу це рівняння прийме вигляд:  $pV = \nu RT$ .

Але число молів газу можна визначити, знаючи масу газу  $m$  і його молярну масу:  $\nu = \frac{m}{\mu}$ .

Увівши ці позначення, ми отримаємо рівняння, яке правильне для будь-якої маси газу  $m$ :  $pV = \frac{m}{\mu} RT$ .

Таке рівняння стану ідеального газу вперше отримав Дмитро Менделєєв (1834–1907), об'єднавши в одній формулі рівняння Еміля Клапейрона (1799–1864)  $\left( p \frac{V}{T} = \text{const} \right)$  для даної маси газу та закон Авогадро.

Визначимо значення універсальної газової сталої:

$$R = N_A k = 6,023 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1} \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К} = 8,31 \text{ Дж/(К} \cdot \text{моль)}.$$

$$R = 8,31 \text{ Дж/(К} \cdot \text{моль)}.$$

150



### ЗАПИТАННЯ ДО ВИВЧЕНОГО

1. Що таке абсолютний нуль температури? Абсолютна шкала температур?
2. Назвіть одиницю абсолютної температури.
3. Який зв'язок існує між температурою й абсолютною температурою?
4. Що показує стала Больцмана? Яке її значення?
5. Які параметри пов'язує рівняння стану ідеального газу? Чиї імена воно носить?
6. Чому дорівнює універсальна газова стала?

## § 38. ГАЗОВІ ЗАКОНИ ДЛЯ ІЗОПРОЦЕСІВ

За допомогою рівняння стану ідеального газу можна дослідити процеси, у яких маса й один з трьох параметрів  $p$ ,  $V$  або  $T$  залишаються незмінними.

Кількісні залежності між двома параметрами газу за фіксованого значення третього параметра називають *газовими законами*.

**Процеси, що відбуваються за незмінного значення одного з параметрів, називають ізопроесами.**

Ізопроееси дуже поширені у природі, і їх часто застосовують у техніці.

**Процес зміни стану термодинамічної системи за сталої температури називають ізоермічним (від грец. *isos* – «рівний», *termos* – «гарячий»).**

Щоб підтримувати сталу температуру газу, потрібно, щоб він міг обмінюватися теплотою з великою системою – **термостатом**. Термостатом може бути атмосферне повітря, якщо температура його помітно не змінюється протягом процесу.

За рівнянням стану ідеального газу  $pV = \frac{m}{\mu} RT$  у будь-якому стані за сталої температури добуток тиску газу і його об'єму однаковий:

$$pV = \text{const при } T = \text{const і } m = \text{const.}$$

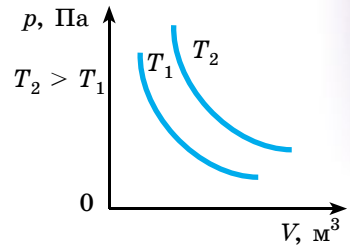
Для даної маси газу добуток тиску газу і його об'єму сталий, якщо температура газу не змінюється.

Цей закон установив експериментально англійський фізик і хімік **Роберт Бойль** (1627–1691), а трохи пізніше – французький учений **Едм Маріотт** (1620–1684). Тому його називають **законом Бойля–Маріотта**.

Закон Бойля–Маріотта справджується для будь-яких газів, а також для суміші газів (наприклад, для повітря). Тільки коли тиск у кілька тисяч разів більший за атмосферний, відхилення від цього закону стає істотним.

Залежність тиску газу від об'єму за сталої температури зображають графічно кривою – **ізотермою** (мал. 98). Ізотерма газу виражає обернену пропорційну залежність між тиском і об'ємом. Таку криву в математиці називають гіперболою.

Різним сталим температурам відповідають різні ізотерми. З підвищенням температури тиск відповідно до рівняння стану  $pV = \frac{m}{\mu} RT$  збільшується, якщо  $V = \text{const}$ . Тому ізотерма, що відповідає вищій температурі  $T_2$ , лежить вище від ізотерми, що відповідає нижчій температурі  $T_1$ .



Мал. 98. Графік ізотермічного процесу

**Процес зміни стану термодинамічної системи за сталою тиску називають ізобарним** (від грец. *isos* – «рівний», *báros* – «вага»).

Відповідно до рівняння  $pV = \frac{m}{\mu} RT$  у будь-якому стані газу з незмінним тиском відношення об'єму до температури залишається сталим:

$$\frac{V}{T} = \text{const при } p = \text{const і } m = \text{const.}$$

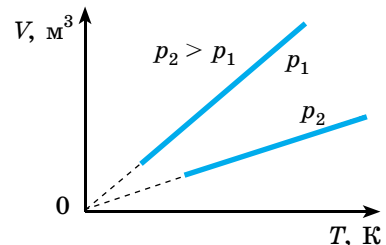
Для даної маси газу відношення об'єму до температури стає, якщо тиск газу не змінюється.

Цей закон установив експериментально в 1802 р. французький фізик і хімік **Жозеф-Луї Гей-Люссак** (1778–1850), тому його називають **законом Гей-Люссака**. Відповідно до  $\frac{V}{T} = \text{const}$  при  $p = \text{const}$  і  $m = \text{const}$  об'єм газу лінійно залежить від температури за сталою тиску:  $V = \text{const} \cdot T$ .

Цю залежність графічно зображають прямою – **ізобарою** (мал. 99).

Різним тискам відповідають різні ізобари. Зі збільшенням тиску об'єм газу за сталої температури зменшується за законом Бойля–Маріотта. Тому ізобара, що відповідає вищому тиску  $p_2$ , лежить нижче від ізобари, що відповідає нижчому тиску  $p_1$ .

В області низьких температур усі ізобари ідеального газу перетинаються в точці  $T = 0$ . Але це не означає, що об'єм газу справді



Мал. 99. Графік ізобарного процесу

перетворюється в нуль. Усі гази в результаті сильного охолодження перетворюються в рідини, а до рідин рівняння стану  $pV = \frac{m}{\mu} RT$  не застосовується.

**Процес зміни стану термодинамічної системи за сталого об'єму називають ізохорним** (від грец. *isos* – «рівний», *chora* – «місткість»).

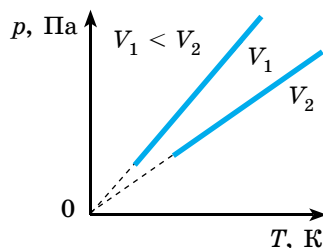
З рівняння стану  $pV = \frac{m}{\mu} RT$  випливає, що в будь-якому стані газу з незмінним об'ємом відношення тиску газу до температури залишається сталим:  $\frac{p}{T} = \text{const}$  при  $V = \text{const}$  і  $m = \text{const}$ .

Для даної маси газу відношення тиску до температури стає, якщо об'єм газу не змінюється.

Цей газовий закон експериментально встановив у 1787 р. французький фізик **Жак Шарль** (1746–1823), тому його називають **законом Шарля**. Відповідно до  $\frac{p}{T} = \text{const}$  при  $V = \text{const}$  і  $m = \text{const}$ , тиск газу лінійно залежить від температури за сталого об'єму:  $p = \text{const}T$ .

Цю залежність зображають графічно прямою – **ізохорою** (мал. 100). Різним об'ємам відповідають різні ізохори. Зі збільшенням об'єму газу за сталої температури тиск його відповідно до закону Бойля–Маріотта зменшується. Тому ізохора, що відповідає більшому об'єму  $V_2$ , лежить нижче від ізохори, що відповідає меншому об'єму  $V_1$ .

За рівнянням  $p = \text{const}T$  усі ізохори починаються в точці  $T = 0$ . Отже, **тиск ідеального газу за абсолютного нуля дорівнює нулю**.



Мал. 100. Графік ізохорного процесу

152



### ЗАПИТАННЯ ДО ВИВЧЕНОГО

1. Які закони називаються газовими?
2. Як пов'язані тиск і об'єм газу при ізотермічному процесі?
3. У чому полягає суть закону Гей-Люссака?
4. Сформулюйте закон Шарля.
5. Дайте якісне пояснення газових законів на основі молекулярно-кінетичної теорії газів.



### ЗАДАЧІ ТА ВПРАВИ

#### Розв'язуємо разом

1. Щоб уникнути окиснення розжареної нитки лампи розжарювання, з її балона відкачують повітря до тиску  $13 \cdot 10^{-2}$  Па. Скільки молекул газів повітря міститься в балоні лампи за цього тиску, якщо місткість балона  $10^{-4}$  м<sup>3</sup>? Середню квадратичну швидкість хаотичного руху молекул газів повітря вважати такою, що дорівнює 400 м/с.

Дано:

$$p = 1,3 \cdot 10^{-3} \text{ Па}$$

$$V = 10^{-4} \text{ м}^3$$

$$\bar{v} = 400 \text{ м/с}$$

$N = ?$

Розв'язання

З основного рівняння МКТ газів  $p = \frac{1}{3} n m_0 \bar{v}^2$  визначимо кількість молекул в одиниці об'єму:

$$n = \frac{3p}{m_0 \bar{v}^2}. \text{ Тоді загальне число молекул у балоні:}$$

$$N = nV = \frac{3p}{m_0 \bar{v}^2} V.$$

Для обчислення  $N$  треба визначити масу однієї молекули  $m_0$ . Якщо маса одного кіломоля  $\mu$  і число Авогадро  $N_A$ , то маса однієї молекули  $m_0 = \frac{\mu}{N_A}$ .

$$\text{Тоді: } N = \frac{3pVN_A}{\mu v^2}; N \approx 5,7 \cdot 10^{14}.$$

Перевіряємо одиницю одержаної величини:

$$[n] = \frac{\text{Па} \cdot \text{м}^3 \cdot 1/\text{моль}}{\text{кг/моль} \cdot \text{м}^2/\text{с}^2} = \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2 \cdot 1/\text{моль}}{\text{кг/моль} \cdot \text{м}^2/\text{с}^2} = \frac{\text{кг} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с}^2}{\text{кг} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с}^2}.$$

**Відповідь:**  $5,7 \cdot 10^{14}$ .

2. У балон місткістю 12 л закачано 1,5 кг азоту за температури 327 °С. Який тиск буде створювати азот у балоні за температури 50 °С, якщо 35 % азоту буде випущено? Яким був початковий тиск?

Дано:

$$V = 12 \text{ л} = 12 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$$

$$m_1 = 1,5 \text{ кг}$$

$$t_1 = 327 \text{ °С}; T_1 = 600 \text{ К}$$

$$t_2 = 50 \text{ °С}; T_2 = 323 \text{ К}$$

$$m_2 = 0,35m_1$$

$p - ?$

Розв'язання

Запишемо рівняння стану газу для обох випадків:

$$p_1 V = \frac{m_1}{\mu} RT_1; \quad p_2 V = \frac{m_2}{\mu} RT_2; \quad \frac{p_1}{p_2} = \frac{m_1 T_1}{m_2 T_2};$$

$$p_1 = \frac{m_1}{\mu} \frac{RT_1}{V}; \quad p_1 = 2,2 \cdot 10^7 \text{ Па}.$$

Перевіряємо одиницю одержаної величини:

$$[p] = \frac{\text{кг}}{\text{кг/моль}} \cdot \frac{\text{Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К})}{\text{м}^3} = \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{м}^3} = \frac{\text{Н}}{\text{м}^2} = \text{Па}.$$

$$\text{Знаючи, що } m_2 = m_1 - 0,35m_1 = 0,65m_1, \text{ то } p_2 = \frac{0,65p_1 T_2}{T_1}; \quad p_2 = 7,7 \cdot 10^6 \text{ Па}.$$

**Відповідь:**  $p_1 = 2,2 \cdot 10^7 \text{ Па}; p_2 = 7,7 \cdot 10^6 \text{ Па}.$

3. До якого тиску накачано футбольний м'яч об'ємом  $V = 3 \text{ л}$  за  $n = 40$  коливань поршневого насоса?

Розв'язання

Під час кожного качання насос захоплює з атмосфери об'єм повітря  $V_0$ . Атмосферний тиск  $p_0 = 0,1 \text{ МПа}$ . У кінці кожного закачування повітря при атмосферному тиску  $p_0$  займає об'єм  $V_0$  камери насоса. У м'ячі це повітря займає об'єм  $V$  і має парціальний тиск  $p$ , який можна визначити за допомогою закону Бойля–Маріотта:  $p = \frac{p_0 V_0}{V}$ . Після качань тиск  $p_n$  у м'ячі

дорівнюватиме сумі парціальних тисків:  $p_n = np = \frac{np_0 V_0}{V}; p_n = 0,2 \text{ МПа}.$

**Відповідь:** 0,2 МПа.

### Рівень А

377. Крапля олії об'ємом  $2,4 \cdot 10^{-5} \text{ см}^3$  розпливлася по поверхні води, утворивши плівку площею  $0,6 \text{ дм}^2$ . Визначте діаметр молекули олії та її об'єм.

378. Чому частинки пилу рухаються в повітрі безладно?

379. Чому навіть коли навколо абсолютна тиша, можна почути ледь чутний шум?

380. У якому середовищі броунівський рух інтенсивніший: у краплі води чи в краплі олії? Чому?

**381.** За молярною масою Оксигену і числом Авогадро визначте масу молекули Оксигену.

**382.** Визначте масу молекули води ( $\text{H}_2\text{O}$ ) і кухонної солі ( $\text{NaCl}$ ).

**383.** Яка кількість речовини міститься у свинцевому злитку масою 41,4 кг?

**384.** Який об'єм займають 100 молів ртуті?

**385.** Яка маса 500 молів вуглекислого газу?

**386.** У яких шарах атмосфери повітря більш схоже на ідеальний газ: над поверхнею землі чи на великих висотах?

**387.** Який тиск на стінки посудини чинять молекули газу, якщо маса газу 3 г, об'єм 0,5 л, а середня квадратична швидкість молекул 500 м/с?

**388.** Який тиск чинить газ за температури  $27^\circ\text{C}$  у посудині місткістю 2 л, якщо він складається з  $1,0 \cdot 10^{22}$  молекул?

**389.** Яка середня кінетична енергія хаотичного поступального руху молекули вуглекислого газу за температури  $27^\circ\text{C}$ ?

**390.** Який тиск чинить газ густиною  $6 \cdot 10^{-2}$  кг/м<sup>3</sup> на стінки посудини, якщо середня швидкість руху його молекул дорівнює 400 м/с?

**391.** Визначте середню квадратичну швидкість молекул Оксигену за температури  $20^\circ\text{C}$ . За якої температури ця швидкість дорівнює 500 м/с?

**392.** Визначте масу аміаку ( $\text{NH}_3$ ), об'єм якого  $20 \text{ м}^3$ , який міститься під тиском  $1,93 \cdot 10^5$  Па за температури  $17^\circ\text{C}$ .

**393.** 12 л вуглекислого газу перебувають під тиском  $9 \cdot 10^5$  Па і за температури 288 К. Визначте масу газу.

**394.** У посудині місткістю  $500 \text{ см}^3$  є 0,89 г водню за температури  $17^\circ\text{C}$ . Визначте тиск газу.

**395.** Балон якого об'єму треба взяти, щоб вмістити в ньому 10 кг кисню під тиском 200 атм. за температури  $40^\circ\text{C}$ ?

**396.** Визначте масу водню в балоні об'ємом 20 л під тиском  $8,3 \cdot 10^5$  Па за температури  $17^\circ\text{C}$ .

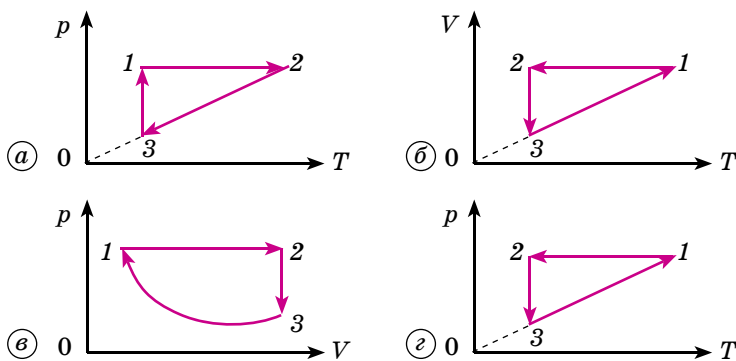
**397.** Стан деякого газу сталої маси змінювався за графіком, що показано на малюнку 101. Назвіть процеси; запишіть рівняння процесів.

**398.** Газ за тиску  $2 \cdot 10^7$  Па займає об'єм  $2,8 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$ . Який об'єм газ займе за тиску  $3,1 \cdot 10^7$  Па?

**399.** Який був тиск газу, якщо його об'єм збільшився від 2 до  $5 \text{ м}^3$ , а тиск став  $12 \cdot 10^8$  Па?

**400.** Унаслідок ізотермічного стискання об'єм газу зменшився від 6 л до 4 л, а тиск збільшився до 2,25 атм. Який був початковий тиск газу?

**401.** Газ займає об'єм  $2 \text{ м}^3$  за температури  $273^\circ\text{C}$ . Яким буде його об'єм за температури  $546^\circ\text{C}$  і попереднього тиску?



Мал. 101. До задачі 397



**402.** Визначте початковий об'єм газу, якщо температура його збільшилась від 127 до 227 °С, а кінцевий об'єм дорівнює 2,5 м<sup>3</sup>.

**403.** Тиск повітря в шинах велосипеда за температури 12 °С дорівнює 1,5 атм. Який тиск за температури 42 °С?

### Рівень Б

**404.** Як можна зменшити інтенсивність броунівського руху в краплинах води й олії?

**405.** Чому метали, подрібнені на частинки, розмір яких становить кілька мікрометрів, заповнюючи всю посудину з водою, повністю не осідають на дно?

**406.** Кристал мідного купоросу підвішений на нитці і вміщений у посудину, заповнену водою. Чи однаково швидко молекули  $\text{CuSO}_4$  будуть дифундувати у воду вгору і вниз? Відповідь обґрунтуйте.

**407.** Визначте лінійні розміри молекул води і золота.

**408.** Знаючи сталу Авогадро  $N_A$ , густину  $\rho$  даної речовини і її молярну масу  $\mu$ , виведіть формулу для розрахунку числа молекул в одиниці об'єму.

**409.** Вважаючи, що діаметр молекули Гідрогену дорівнює приблизно  $2,3 \cdot 10^{-10}$  м, визначте, якої довжини отримали б нитку, якщо б усі молекули, що містяться в 1 мг цього газу, були розміщені в один ряд щільно одна біля одної.

**410.** Оцініть об'єм молекули води, знаючи, що 10 молів її займають об'єм  $1,8 \cdot 10^{-4}$  м<sup>3</sup>.

**411.** Визначте кількість речовини водню, що заповнює посудину об'ємом 3 л, якщо концентрація молекул газу в посудині  $2 \cdot 10^{18}$  м<sup>-3</sup>.

**412.** Гранично допустима концентрація молекул пари ртуті в повітрі  $3 \cdot 10^{16}$  м<sup>-3</sup>. Визначте, при якій масі ртуті в одному кубічному метрі повітря виникає небезпека отруєння.

**413.** Визначте відношення середніх квадратичних швидкостей молекул кисню і азоту за однакової температури.

**414.** Середня квадратична швидкість молекули вуглекислого газу за температури 0 °С дорівнює 360 м/с. Яку швидкість матиме молекула за температури 127 °С?

**415.** За якої температури молекули Гелію мають таку середню квадратичну швидкість, як молекули Гідрогену за температури 15 °С?

**416.** Яка середня квадратична швидкість броунівських частинок діаметром 1 мкм за температури 0 °С? Густина речовини частинок 1 г/см<sup>3</sup>.

**417.** Визначте середню кінетичну енергію поступального руху молекул гелію та аргону за температури 1200 К.

**418.** Визначте температуру газу, якщо середня кінетична енергія поступального руху його молекул дорівнює  $1,6 \cdot 10^{-19}$  Дж.

**419.** Яка вага водню, що заповнює повітряну кулю, якщо її об'єм 1400 м<sup>3</sup>, тиск газу  $9,6 \cdot 10^4$  Па і температура 7 °С?

**420.** Визначте густину водню і кисню за нормальних умов. Результати обчислень порівняйте з табличними даними.

**421.** Яку густину має гелій за температури 127 °С і тиску  $8,3 \cdot 10^5$  Па?

**422.** За температури 10 °С і нормального атмосферного тиску густина деякої газоподібної речовини дорівнює 0,25 кг/м<sup>3</sup>. Яка молярна маса цієї речовини?

**423.** Який об'єм ідеального газу з кількістю речовини 1 моль за нормальних умов?

**424.** На малюнку 102 зображено замкнутий цикл. Ділянка  $CD$  відповідає ізотермі. Накресліть цю діаграму в координатах  $pT$  і  $VT$ .

**425.** Газ повільно стиснули від початкового об'єму 6 л до об'єму 4 л. Тиск газу в результаті цього підвищився на 2 атм. Який початковий тиск газу?

**426.** Посередині циліндра, закритого з обох кінців, міститься поршень. Тиск газу в обох частинах циліндра 7,5 Па. Поршень повільно зсувають так, щоб об'єм газу у правій частині циліндра зменшився вдвічі. Визначте різницю тисків.

**427.** Повітря нагнітають у порожній балон місткістю 40 л. Протягом якого часу балон буде накачано до тиску 15 атм, якщо компресор всмоктує 5 м<sup>3</sup> повітря за хвилину?

**428.** Газ, що виходить з топки у трубу, охолоджується від 1150 °С до 200 °С. У скільки разів зменшується їх об'єм?

**429.** У приміщенні об'ємом 20 м<sup>3</sup> температура повітря знизилася від 20 °С до 0 °С. Тиск дорівнює 1 атм. Чому і на скільки збільшилася маса повітря в приміщенні?

**430.** Є повітря за нормального атмосферного тиску і температур – 25, 50, 100, 200, 500 °С. Побудуйте графік залежності густини повітря від температури.

**431.** До якої температури треба ізохорно нагріти газ, що має температуру 0 °С, щоб його тиск збільшився в  $n$  разів?

**432.** Газ за нормальних умов займає об'єм 2 л. На скільки збільшиться тиск газу під час підвищення його температури до 77 °С, якщо об'єм газу незмінний?

**433.** Газ у посудині перебуває під тиском  $2 \cdot 10^5$  Па і температурі 127 °С. Визначте тиск газу після того, як половину маси газу було випущено з посудини і температура знизилася на 50 °С.

### Є над чим замислитися

**434.** У скільки разів середня квадратична швидкість молекул Оксигену більша за середню квадратичну швидкість порошинки масою  $10^{-8}$  г, яка міститься серед молекул Оксигену?

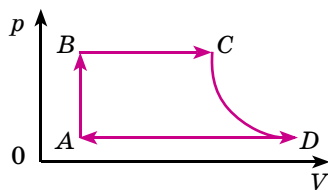
**435.** Визначте найбільш ймовірну швидкість молекул Гідрогену за температури 400 К.

**436.** Молярна енергія дисоціації (енергія, яка використовується на дисоціацію всіх молекул газу, який містить 1 моль речовини) водню дорівнює 419 кДж/моль. За якої температури газу середня кінетична енергія поступального руху його молекул достатня для їх розщеплення?

**437.** Компресор за кожне всмоктування захоплює 5 дм<sup>3</sup> повітря за нормального атмосферного тиску й температури 280 К і наповнює ним резервуар об'ємом 2 м<sup>3</sup>. Температура повітря в резервуарі 300 К. Скільки разів компресор має всмоктувати повітря, щоб тиск у резервуарі збільшився на 3 атм?

**438.** Найвища у світі гора Джомолунгма, що в Гімалаях, має висоту 8848 м. Атмосферний тиск на цій висоті 232 мм рт. ст. Визначте густину повітря на вершині при –30 °С, якщо густина повітря за нормальних умов 1,29 кг/м<sup>3</sup>.

**439.** У вертикальному циліндрі, закритому зверху поршнем, міститься газ за температури 20 °С. Площа поршня 20 см<sup>2</sup>, маса його 2 кг. На поршень поклали вантаж масою 5 кг. До якої температури треба нагріти газ,



Мал. 102. До задачі 424

щоб об'єм становив 0,9 від початкового значення? Тертям між стінками циліндра і поршнем знехтувати. Атмосферний тиск дорівнює  $10^5$  Па.

**440.** У сталевому резервуарі міститься стиснуте повітря за температури  $-23^\circ\text{C}$ . На резервуарі є запобіжний клапан. Він відкривається тоді, коли тиск у резервуарі збільшується на  $2 \cdot 10^5$  Па. Під час нагрівання резервуара до  $27^\circ\text{C}$  з нього вийшло 10 % маси газу. Яким був тиск у резервуарі спочатку? Тепловим розширенням резервуара знехтувати.

**441.** Пляшку наповнили газом і щільно закрили корком, площа перерізу якого становить  $2,5\text{ см}^2$ . До якої температури треба нагріти газ, щоб корок вилетів із пляшки, якщо сила тертя, яка утримує корок, дорівнює 12 Н? Початковий тиск повітря у пляшці дорівнює нормальному атмосферному тиску, а початкова температура дорівнює  $-3^\circ\text{C}$ .

**442.** Об'єм бульбашки повітря, яка піднімається з дна озера на поверхню, збільшується в 3 рази. Яка глибина озера, якщо густина води  $1000\text{ кг/м}^3$ , атмосферний тиск дорівнює  $1,01 \cdot 10^5$  Па,  $g = 9,8\text{ м/с}^2$ ?

**443.** У воді на глибині 1 м є бульбашка повітря. На якій висоті ця бульбашка повітря матиме втричі менший об'єм?

**444.** Бульбашка повітря піднімається з дна водойми глибиною  $H$ . Покажіть залежність радіуса бульбашки  $r$  від глибини  $h$  її місця перебування в даний момент часу, якщо її об'єм на дні дорівнює  $V_0$ . Сил поверхневого натягу не враховувати.

**445.** Відкрита з двох боків скляна трубка до половини занурюється у ртуть. Верхній отвір закривають пальцем, і трубку витягують із ртуті, при цьому в ній залишається стовпчик ртуті висотою 22 см. Визначте зовнішній атмосферний тиск, якщо довжина трубки 80 см.

**446.** Два однакових балони, що містять газ за температури  $0^\circ\text{C}$ , з'єднано вузькою горизонтальною трубкою діаметром 5 мм, посередині якої є краплина ртуті. Краплина ділить усю посудину на два рівних об'єми по  $200\text{ см}^3$ . На яку відстань переміститься краплина, якщо один балон нагріти на  $2^\circ\text{C}$ , а інший – на стільки ж охолодити?

**447.** Яку кількість кисню вдихає під час кожного вдиху людина, що перебуває на висоті, де тиск повітря становить  $0,505 \cdot 10^5$  Па. Відомо, що людина на поверхні землі, де тиск становить  $1,01 \cdot 10^5$  Па, вдихає за 1 раз 1 г кисню. Зміною температури повітря з висотою знехтувати.

## § 39. ВНУТРІШНЯ ЕНЕРГІЯ ТІЛ

Ви вже знаєте, що теплові явища – це явища, пов'язані з нагріванням і охолодженням тіл. Ми постійно стикаємося із цими явищами. Зміна дня і ночі супроводжується зміною температури тіл, що, в свою чергу, впливає на їхні властивості. Зміна пір року у наших широтах супроводжується змінами агрегатних станів речовини тощо. Людство здавна намагалось пояснити та використати ці явища в повсякденному житті. Пояснити теплові явища можна, користуючись величинами, які характеризують світ молекул та атомів, тобто використовуючи молекулярно-кінетичну теорію, з якою ви ознайомилися і вмієте пояснювати теплові явища, які ви знаєте.

Величини, якими оперує ця теорія, масу молекул, їх швидкість руху, енергію називають **мікроскопічними** (від грец. *μικρός* – «малий»). Вона здобула визнання на початку ХХ ст., хоча теорія про атомну будову речовини зародилася ще в Давній Греції.

Знаючи, що речовина складається з величезної кількості частинок (нагадаємо, що в  $1\text{ см}^3$  міститься близько  $10^{23}$  молекул), то описати рух

кожної молекули чи атома й визначити (виміряти) сили взаємодії між ними дуже важко, а інколи й неможливо. Отже, методи молекулярної фізики для кількісного опису явищ у певних випадках виявляються занадто складними.

Окрім цього, використовуючи багатовіковий досвід спостережень за перебігом теплових явищ і процесів, сформулювавши загальний принцип їх перебігу та вимірявши за допомогою приладів такі величини, значення яких визначаються спільною дією величезної кількості молекул, наприклад, тиск, температура, об'єм, густина, можна вивести багато співвідношень між цими величинами, нічого не знаючи про будову речовини.

Метод вивчення властивостей тіл без урахування особливостей їх внутрішньої будови називають **термодинамічним**, величини, якими він оперує, – **макроскопічними** (від грец. *μάκρος* – «великий»), а розділ фізики, у якому вивчають цей метод, – **термодинамікою**.

Закони молекулярно-кінетичної теорії доповнюють термодинаміку, розширюючи при цьому можливості вивчення макроскопічних тіл, які складаються з великої кількості частинок. Так, будь-яке макроскопічне тіло має енергію, яка зумовлена його мікростаном, а саме кінетичною енергією хаотичного руху його молекул і потенціальною енергією їх взаємодії. Таку енергію називають **внутрішньою енергією**. Розрахувати внутрішню енергію, визначаючи кінетичну і потенціальну енергію мільярдів частинок, неможливо, тому потрібно вміти визначити її значення, вимірявши макроскопічні величини, що характеризують стан тіла.

Це легко продемонструвати на прикладі ідеального одноатомного газу (гелію, аргону, неону тощо), де внутрішня енергія становить лише суму кінетичних енергій його частинок. Середня кінетична енергія молекули

таких газів дорівнює  $\frac{3}{2}kT$ , а якщо молекул в газі  $N$ , то  $U = \frac{3}{2}kTN$ .

$$\text{Оскільки } N = \frac{m}{\mu} N_A, \text{ то } U = \frac{3}{2} \frac{m}{\mu} N_A kT \text{ або } U = \frac{3}{2} \frac{m}{\mu} RT.$$

Отже, враховуючи, що в цьому рівнянні є тільки дві змінні величини, можна зробити висновок, що внутрішня енергія одноатомного ідеального газу під час нагрівання збільшується, а під час охолодження зменшується. Тобто залежить від одночасного параметра – його абсолютної температури.

Якщо ж будова ідеального газу складніша, ніж в одноатомного, то зміниться лише коефіцієнт пропорційності між його внутрішньою енергією і значенням абсолютної температури.

У реальних газах, рідинах і твердих тілах потенціальна енергія взаємодії мікрочастинок залежить від відстані між ними, а відстань між частинками впливає на об'єм тіла. Тому внутрішня енергія тіла визначається його температурою  $T$  і об'ємом  $V$ .

**Сукупність матеріальних тіл, які перебувають у взаємодії з навколишніми тілами і можуть обмінюватися з ними енергією та частинками, називають *термодинамічною системою*.**

Найважливішими її параметрами є об'єм  $V$ , тиск  $P$  і температура  $T$ . Якщо стан термодинамічної системи не змінюється із часом, її параметри залишаються сталими, то кажуть, що система перебуває у термодинамічній рівновазі.

З курсу фізики 8-го класу ви знаєте, що існує два види процесів, під час яких може змінюватися внутрішня енергія тіла: теплообмін і виконання роботи.

Внутрішня енергія тіла визначає його тепловий стан і змінюється, переходячи від одного стану до іншого. Енергія завжди передається від більш нагрітого тіла до менш нагрітого. При цьому швидкість руху молекул холодного тіла збільшується, а гарячого тіла – зменшується, кінетичні енергії молекул обох тіл стають однаковими.

**Процес передачі енергії від більш нагрітого до менш нагрітого тіла називають *теплообміном*, а порцію переданої енергії називають *кількістю теплоти*.**

Пригадаємо, як обчислюється зміна внутрішньої енергії тіл під час теплообміну:

під час нагрівання чи охолодження тіл:  $\Delta U = Q = cm(t_2 - t_1) = cm(T_2 - T_1)$ ;

під час плавлення і тверднення тіл:  $\Delta U = \pm \lambda m$ ;

під час пароутворення і конденсації рідини:  $\Delta U = Q = \pm rm$ ;

під час повного згоряння палива:  $\Delta U = Q = qm$ .

Зверніть увагу на те, що кількість теплоти характеризує не внутрішню енергію тіла, а її зміну.

Якщо ж способом передачі є виконання механічної роботи, то кількість переданої енергії називають – **робочою**. Так, нагріти руки можна, не тримаючи їх над обігрівачем, а потерши долоню об долоню, розпалити вогнище без сірників, так, як це робили первісні люди, тертям сухих шматочків дерева. Ці й подібні до них приклади й досліди показують, що кількість теплоти і виконану роботу треба вважати мірою зміни внутрішньої енергії тіла.

Пригадаємо, що механічну роботу можна визначити за формулою  $A = FScos\alpha$  або  $A = E_2 - E_1$ , де  $E_2$  – кінцеве, а  $E_1$  – початкове значення повної механічної енергії.

Здатність змінювати внутрішню енергію тіл під час виконання роботи застосовують у техніці. Одним з прикладів є зварювання тертям. Зварювані деталі щільно притискають і потім приводять у швидке обертання одна відносно одної. У результаті виконання роботи на подолання сили тертя між деталями відбуваються розігрівання і плавлення їх поверхонь, і під час стискання вони зварюються.

У тому що нагрівання тіла може відбуватися без надання йому певної кількості теплоти, а за рахунок виконання роботи, неважко переконатися і на простих дослідах. Складіть долоні, і потерши їх одна об одну, ви відчуєте тепло, зігніть і розігніть кілька разів мідну пластинку чи дротину, і ви виявите, що місце згину нагрілося. Ударте кілька разів молотком по шматку свинцю, виявиться, що свинець також нагрівся.

Отже, внутрішня енергія тіла може змінюватися двома способами – за допомогою теплообміну та в результаті виконання роботи.



### ЧИ ЗНАЄТЕ ВИ ЩО...

- За 30 хв наше тіло виділяє стільки енергії, скільки потрібно, щоб закип'ятити 1,5 л води.
- Мозок людини виробляє неймовірну кількість енергії. Енергія мозку людини, яка спить, могла б засвітити лампочку потужністю 25 Вт.



### ЗАПИТАННЯ ДО ВИВЧЕНОГО

1. Які явища називають тепловими? Наведіть приклади цих явищ.
2. Які два підходи існують у фізиці щодо пояснення теплових явищ?



3. Від чого залежить внутрішня енергія тіла, виходячи з молекулярно-кінетичної теорії?
4. Які макропараметри визначають внутрішню енергію тіла?
5. Чому дорівнює зміна внутрішньої енергії, якщо відбувається лише теплообмін?
6. Як виконана механічна робота впливає на внутрішню енергію тіла?

## § 40. ПЕРШИЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМІКИ

Проаналізувавши механізм виникнення і зміни внутрішньої енергії тіла, зробили висновок, що це відбувається у процесі теплообміну чи виконання роботи. Причому обидва ці процеси можуть відбуватись і одночасно. Тобто внутрішню енергію системи можна змінити двома способами.

Наприклад, газ у циліндрі під поршнем може нагріватися за рахунок передачі йому певної кількості теплоти, й одночасно виконуватиметься робота для його розширення і стискання. Ще в 1842 р. німецький природодослідник **Роберт Майєр** (1814–1878) теоретично, а згодом англійський фізик **Джеймс-Прескотт Джоуль** (1818–1889) у 1843 р. експериментально довели еквівалентність кількості теплоти і роботи як міри внутрішньої енергії. Ці теоретичні й практичні досліді дали змогу сформулювати закон збереження і перетворення енергії в усіх процесах, які відбуваються у природі: **енергія не виникає і не зникає, а лише перетворюється в рівних кількостях з одного виду в інший.**

160

Відповідно до закону збереження і перетворення енергії зміна внутрішньої енергії системи  $\Delta U$  дорівнює сумі наданої їй кількості теплоти  $Q$  і роботи  $A'$ , виконаної над системою зовнішніми силами:  $\Delta U = Q + A'$ .

Це твердження прийнято називати **першим законом (началом) термодинаміки**. У формулі під  $A'$  розуміють роботу, яка виконується над системою зовнішніми силами (її вважають додатною величиною). Але можна розглядати і роботу  $A$ , виконану системою над зовнішніми тілами. Тоді її записують зі знаком «-», і рівняння набуває вигляду:

$$\Delta U = Q - A, \text{ або } Q = \Delta U + A.$$

Цей вираз також є першим законом термодинаміки, але в іншому вигляді. Він показує, що підведена до системи **кількість теплоти  $Q$  частково йде на збільшення її внутрішньої енергії  $\Delta U$  і частково – на виконання системою роботи  $A$  над зовнішніми тілами.**

Кожне тіло, незважаючи на його стан, має певну внутрішню енергію, але воно не може мати певну кількість теплоти чи роботи. Так, газ може нагрітись за рахунок надання йому певної кількості теплоти або внаслідок виконання зовнішніми силами роботи (наприклад, стискання газу). Проте не можна однозначно відповісти, завдяки якому з процесів – виконанню роботи чи теплообміну – відбулося нагрівання газу.

Якщо система сама виконує роботу внаслідок теплообміну, то перший закон термодинаміки набуває іншого вигляду:  $Q = \Delta U + p\Delta V$ , тобто кількість теплоти, надана термодинамічній системі, приводить до зміни її внутрішньої енергії або виконання нею роботи чи обох чинників одночасно.

Останнє приведення формулювання заперечує створення вічного двигуна: не можна створити машину, яка б необмежено виконувала роботу, не отримуючи енергію іззовні. Адже якщо кількість теплоти  $Q = 0$ , то  $A = -\Delta U$ , тобто робота виконується за рахунок зменшення внутрішньої енергії, яка не є безмежною.





## ЧИ ЗНАЄТЕ ВИ ЩО...

- Просте формулювання першого закону термодинаміки може звучати так: зміна внутрішньої енергії тієї чи іншої системи можлива лише при зовнішньому впливі. Тобто, щоб у системі відбулися якісь зміни, потрібно докласти певних зусиль ззовні. Своєрідним виразом закону термодинаміки можуть бути прислів'я: «під лежачий камінь вода не тече», «без праці не витягнеш рибку зі ставка» тощо. Можна уявити, що рибка і є умовно замкнута система, у ній не відбудеться ніяких змін (рибка сама себе не витягне зі ставка) без зовнішнього впливу та участі (праці).
- Саме перший закон термодинаміки встановлює, чому зазнали невдачі всі численні спроби вчених, дослідників, винахідників винайти «вічний двигун», адже його існування є абсолютно неможливим згідно із цим самим законом.



## ЗАПИТАННЯ ДО ВИВЧЕНОГО

1. Яким фундаментальним законом природи є перший закон термодинаміки? Сформулюйте його.
2. Який важливий наслідок випливає з першого закону термодинаміки?

## § 41. РОБОТА ТЕРМОДИНАМІЧНОГО ПРОЦЕСУ

Якщо розглядати дію теплових двигунів, у яких внутрішня енергія перетворюється в механічну, то це можна спостерігати у процесі розширення пари чи газу. Тоді робота виконується внаслідок цього розширення. Проаналізуємо умови, за яких газ може виконувати роботу.

Розглянемо газ, що нагрівається ізобарно ( $p = \text{const}$ ) і певна його маса перебуває в циліндрі з рухомим поршнем, який може без тертя переміщуватися вздовж осі циліндра (мал. 103). Початкова температура  $T_1$  газу дорівнює температурі навколишнього середовища; поршень перебуває у спокої, якщо тиск на нього ізсередини і ззовні однаковий, наприклад дорівнює атмосферному. У результаті нагрівання газ розширюватиметься. Енергія, яка підводиться в цьому випадку, витрачатиметься частково на нагрівання газу, частково на виконання ним роботи.

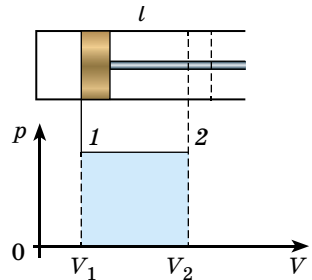
Унаслідок підвищення температури газу до  $T_2$ , збільшиться його об'єм і поршень переміститься на відстань  $l$ . Отже, газ, розширюючись і переміщуючи поршень, виконає тим самим роботу проти зовнішніх сил. Оскільки тиск залишався сталим, то діюча на поршень сила дорівнює:  $F = pS$ , де  $S$  – площа поршня, а виконана газом робота:  $A = pSl$ . Але  $Sl = V_2 - V_1$ . Отже,

$$A = p(V_2 - V_1),$$

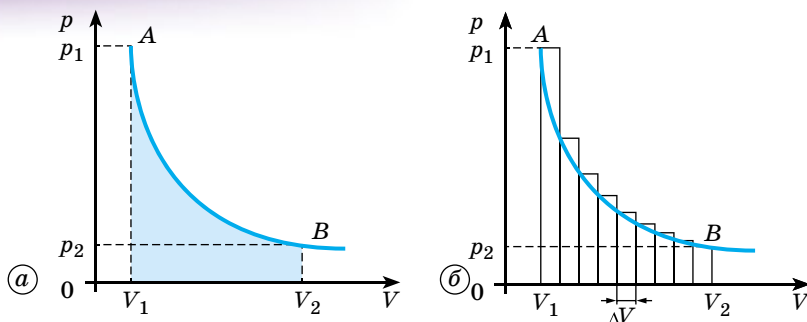
тобто **робота, виконана газом під час ізобарного розширення проти зовнішніх сил, дорівнює добутку тиску газу і приросту його об'єму.**

Під час розширення газ виконує додатну роботу, передає енергію навколишнім тілам. Якщо газ стискається, то  $V_2 < V_1$  і тому  $A < 0$ .

Скориставшись графічним зображенням ізобарного процесу (мал. 103), ми побачимо, що **робота газу дорівнює площі прямокутника, висота якого  $p$  і ширина  $V_2 - V_1$ .** Якщо газ ізобарно стискається, у цьому випадку роботу виконують над ним зовнішні сили, збільшуючи його потенціальну енергію. Графічно ця робота виражається тією самою площею.



Мал. 103. Виконання роботи газом



Мал. 104. Графік ізотермічного процесу

Якщо говорити про зміну об'єму газу, то в багатьох випадках слід казати і про зміну його тиску. Роботу в таких випадках знаходять за допомогою графічного методу. Можна наочно математично підтвердити, що під час будь-якого процесу виконана робота газом дорівнює площі, обмеженій графіком цього процесу в системі координат  $pV$ , віссю абсцис і двома ординатами.

Розглянемо графік ізотермічного процесу ( $T = \text{const}$ ) у системі координат  $pV$ . Ізотерма має вигляд гіперболи  $AB$  (мал. 104, а).

Ми припустили, що робота газу, який розширюється ізотермічно, дорівнює площі фігури, обмеженої графіком залежності  $p$  від  $V$ , віссю  $V$  і ординатами, що відповідають тискам  $p_1$  і  $p_2$  в початковому і кінцевому станах газу. Це твердження можна легко довести, якщо розбити площу криволінійної фігури, обмеженої гіперболою, вертикальними лініями на ряд вузьких ділянок (мал. 104, б). За дуже малої зміни об'єму  $\Delta V$  можна припустити, що тиск на кожній окремій ділянці сталий, або, інакше кажучи, що він змінюється в ході процесу стрибками під час переходу від однієї ділянки до другої. Тому робота розширення газу на  $\Delta V$  зобразиться площею вузького прямокутника. Робота розширення газу на  $V_2 - V_1$  дорівнюватиме приблизно площі одержаної «ступінчастої» фігури, яку можна обчислити, додаючи площі окремих прямокутних ділянок. Природно, що визначена в такий спосіб площа буде трохи більшою за площу, обмежену гіперболою, але якщо розбити графік на більшу кількість вузьких ділянок, то спад тиску меншими стрибками наближатиметься до дійсного безперервного спаду тиску. Отже, у граничному випадку (коли ширина ділянки  $\Delta V$  прямує до нуля) графік ізотермічного процесу визначатиме роботу розширення газу.

Під час розгляду ізохорного процесу об'єм газу сталий  $V = \text{const}$ , змінюються його тиск і температура. Оскільки об'єм газу не змінюється, газ не виконує ніякої роботи проти зовнішніх сил:  $A = 0$ , тобто у процесі ізохорного нагрівання вся надана газу теплота повністю витрачається на збільшення його внутрішньої енергії:  $Q = \Delta U$ .

Термодинаміка вивчає ще один процес, який широко застосовують на практиці, зокрема в теплових двигунах. Це так званий адіабатний процес.

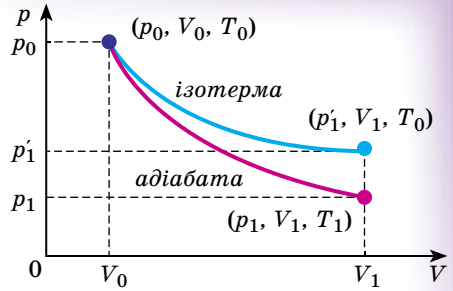
**Адіабатний процес** — це термодинамічний процес зміни параметрів газу, що відбувається в теплоізовльованій системі, тобто за відсутності теплообміну з навколишніми тілами.

Оскільки в такому разі  $Q = 0$ , то згідно з першим законом термодинаміки вся виконана робота йде на зміну внутрішньої енергії системи:  $A = \Delta U$ .

Звичайно, у реальних умовах досягти такого результату практично неможливо, оскільки не існує ідеальних ізоляторів тепла. Але, наприклад, створити оболонки з низькою теплопровідністю (за принципом термоса) або здійснити процес так швидко, щоб теплообмін між системою і навколишніми тілами був надто малим і ним можна було знехтувати, можливо.

Наприклад, швидке стискання газу спричиняє зростання внутрішньої енергії, що дорівнює значенню виконаної роботи  $A$ , і газ нагрівається. На цьому явищі, зокрема, ґрунтується самозаймання паливної суміші в дизельних двигунах. І навпаки, якщо газ сам виконує роботу внаслідок стрімкого розширення, то його внутрішня енергія зменшується і температура газу знижується. На цій властивості адіабатного процесу ґрунтується скраплення газу. Прикладом адіабатного процесу є також вибух, плавлення запобіжника під час короткого замикання тощо.

Графічно на координатній площині  $pV$  адіабатний процес зображають кривою – **адіабатою** (мал. 105). Вона стрімкіше спадає, ніж ізотерма, оскільки під час адіабатного процесу зміна тиску відбувається за рахунок одночасного збільшення об'єму і зменшення температури. Цей висновок підтверджує також формула  $p = nkT$ , адже збільшення об'єму газу веде до зменшення концентрації молекул газу, і тому спад тиску зумовлюють два параметри – температура газу  $T$  і концентрація молекул  $n$ .



Мал. 105. Графіки ізохоричного та адіабатного процесу

Отже, унаслідок адіабатного розширення газу відбувається зміна його стану, що характеризується зменшенням внутрішньої енергії; під час адіабатного стискання газу його внутрішня енергія збільшується.



#### ЗАПИТАННЯ ДО ВИВЧЕНОГО

1. У яких ізопроцесах виконується механічна робота?
2. Який процес називають адіабатним? Яка умова його протікання?
3. Який процес можна вважати адіабатним у реальних умовах?
4. Як називають криву, що відображає адіабатний процес? Схарактеризуйте її властивості.

## § 42. ТЕПЛОВІ МАШИНИ. ХОЛОДИЛЬНА МАШИНА

Якщо пригадати історію фізики та машинобудування, теплові двигуни з'явилися у XVIII ст. У 1784 р. **Джеймс Ватт** запатентував універсальний паровий двигун. Революційною працею з підвищення коефіцієнта корисної дії (ККД) теплових двигунів стала праця **Садді Карно** (1796–1832) «Роздуми про рушійну силу вогню і про машини, здатні розвивати цю силу» (1824). У ній учений запропонував цикл ідеальної теплової машини.

**Тепловий двигун** – це пристрій, який перетворює внутрішню енергію палива в механічну.

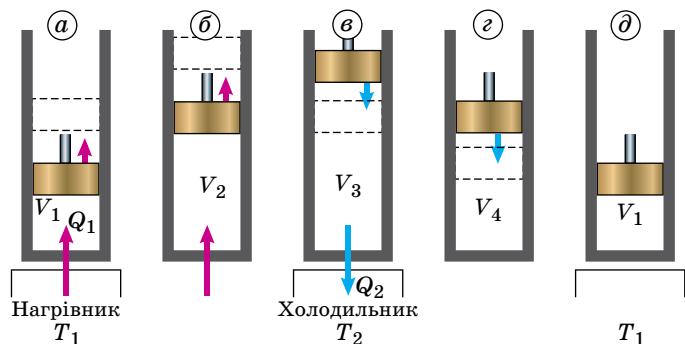
Енергія, яка виділяється під час згоряння палива, через теплообмін передається газу. Газ, розширюючись, виконує роботу проти зовнішніх

сил і надає руху механізму. Нехай ідеальний газ об'ємом  $V_1$  міститься в закритому циліндрі з поршнем (мал. 106) під тиском  $p_1$ . Поставимо циліндр на нагрівник, температура якого  $T_1$  підтримується сталою (мал. 106, а). Ми будемо спостерігати ізотермічний процес, який супроводжується зміною об'єму і тиску газу відповідно –  $V_2, p_2$  та виконанням роботи  $A_1$  за рахунок кількості теплоти  $Q_1$ , одержаної від нагрівника. Відповідно до графіка в системі координат  $pV$  процес зобразимо ізотермою 1–2 (мал. 107).

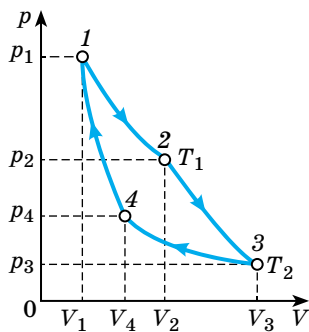
Припустимо, що далі газ буде розширяться адіабатно, тобто без теплообміну з навколишнім середовищем. Газ виконує додатну роботу розширення  $A_2$  за рахунок внутрішньої енергії, змінивши стан з об'ємом  $V_2$  і тиском  $p_2$  до стану з об'ємом  $V_3$  і тиском  $p_3$  (мал. 106, б, в). При цьому відбувається охолодження, яке супроводжується зміною температури від  $T_1$  до  $T_2$ . На графіку (мал. 107) цей процес буде відповідати адіабаті 2–3.

Далі поставимо циліндр у холодильник, температура якого  $T_2$  підтримується сталою. Ми будемо спостерігати ізотермічний процес, під час якого газ зі стану з об'ємом  $V_3$  і тиском  $p_3$  перейде до стану з об'ємом  $V_4$  і тиском  $p_4$  (мал. 106, в, г). Під час стиснення газу зовнішні сили виконують від'ємну роботу ( $-A_3$ ), і, щоб температура газу не змінилася, вона має відповідати кількості теплоти, відданої холодильнику  $Q_2 = A_3$ . Цей процес відповідатиме на графіку ізотермі 3–4 (мал. 107). Але стан  $V_4, p_4$  підбираємо так, щоб подальше адіабатне стискання газу з досягненням температури  $T_1$  привело до замикання циклу, тобто до об'єму  $V_1$ .

Нарешті в точці  $V_4, p_4$  знову без теплообміну (мал. 106, г) адіабатним стисканням повернемо газ у початковий стан (мал. 106, д), приводячи до збільшення його внутрішньої енергії і підвищення температури до  $T_1$ . На графіку цьому процесу відповідає адіабата 4–1 (мал. 107).



Мал. 106. Схема роботи теплового двигуна



Мал. 107. Цикл Карно

Цикл, що ми отримали, який складається з двох ізотермічних і двох адіабатних процесів, називають **циклом Карно** і є одним із циклів роботи ідеальної теплової машини. Під час розширення робоче тіло виконує роботу, а в результаті стискання роботу над ним виконують зовнішні сили. Після кожного циклу робоче тіло повертається у початковий стан.

Закон збереження й перетворення енергії для циклу Карно полягає в тому, що енергія, одержана робочим тілом від навколишнього середовища, дорівнює енергії, переданій ним навколишньому середовищу. Навколишнім середовищем передано кількість теплоти  $Q_1$  під час розширення робочого тіла і виконано роботу  $A_3 + A_4$  на стискання. Робоче тіло виконало роботу  $A_1 + A_2$  під час розширення і передало кількість теплоти  $Q_2$  під час стискання.

$Q_1 + A_3 + A_4 = Q_2 + A_1 + A_2$  або, враховуючи, що  $A_1 = A_4$ ,  $A_1 - A_3 = Q_1 - Q_2$ .

Різниця  $A_1 - A_3$  є корисною роботою, яку виконує робоче тіло в результаті даного циклічного процесу. Вона дорівнює різниці кількості теплоти, підведеної під час розширення газу і відведеної під час його стискування.

Для характеристики ефективності циклу перетворення внутрішньої енергії в механічну, а значить і теплової машини, вводиться коефіцієнт корисної дії (ККД) циклу, або машини. Він визначається відношенням роботи  $A_1 - A_3$ , яка використовується в даному циклі, до роботи  $A_1$ , яку можна було б виконати внаслідок повного перетворення в неї всієї кількості теплоти  $Q_1$ , підведеної до газу:

$$\eta = \frac{A_1 - A_3}{A_1} = 1 - \frac{A_3}{A_1}.$$

Або, враховуючи попередню рівність, маємо:  $\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}$ .

За умови ідеального процесу перетворення внутрішньої енергії в механічну найвищий тепловий ККД був би:

$$\eta_{\max} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1},$$

де  $T_1$  – максимальна температура робочого тіла (газу, пари);  $T_2$  – мінімальна температура, за якої робоче тіло віддає частину внутрішньої енергії холодильнику. Оскільки  $T_2$  – температура холодильника або відпрацьованих продуктів горіння – не може дорівнювати абсолютному нулеві, то максимальний тепловий ККД машини не може дорівнювати одиниці (100 %).

Проте машину можна примусити працювати і за зворотним циклом Карно, коли внаслідок виконаної роботи від системи віднімається деяка кількість теплоти. У цьому разі охолодження досягають за рахунок виконання роботи, теплота примусово переходить від менш нагрітого тіла до більш нагрітого, а теплова машина перетвориться в холодильну машину.

За зворотним циклом від поршня з нижчою температурою  $T_2$  (мал. 106, в) віднімається кількість теплоти  $Q_2$  і віддається поршню з вищою температурою  $T_1$  (мал. 106, а) кількість теплоти  $Q_1$ . Для кругового процесу  $Q = A$ , але є умова  $Q = Q_2 - Q_1 < 0$ , тому  $A < 0$  і  $Q_2 - Q_1 = A'$  або  $Q_1 = Q_2 + A'$ , тобто кількість теплоти  $Q_1$ , віддана системою джерелу теплоти з більш високою температурою  $T_1$ , більша за кількість теплоти  $Q_2$ , одержаної від джерела теплоти з більш низькою температурою  $T_1$  на значення роботи  $A'$ , виконаної над системою. Таким чином, без виконання роботи не можна відбирати теплоту від менш нагрітого тіла і віддавати її більш нагрітому.

Ефективність роботи холодильної машини характеризують **холодильним коефіцієнтом**, який визначають відношенням кількості теплоти  $Q_2$ , отриманої від поршня з нижчою температурою, до роботи  $A'$ , яка витрачається на приведення холодильної машини в дію:

$$\varepsilon = \frac{Q_2}{A'} = \frac{Q_2}{Q_1 - Q_2} = \frac{Q_2}{Q_1} - 1.$$

Прикладом найпоширенішої холодильної машини є домашній холодильник. Робочу систему холодильника заповнюють рідиною, яка легко випаровується (фреон, аміак, сірчистий ангідрид тощо), її називають **холодоагентом**.

Цим підтверджується дослідний факт про певну спрямованість теплопередавання: **теплота сама по собі переходить завжди від гарячих тіл до холодних**.

Природно, що внаслідок перебігу фізичних процесів навколишній світ зазнає певних змін. Наприклад, унаслідок механічної взаємодії змінюються координати тіл або їх швидкості. Термодинамічні процеси супроводжуються змінами станів системи, яка характеризується певними макро- і мікропараметрами.

Ці зміни, як правило, такі, що не допускають можливість самочинного повернення системи в початковий стан. Тому самоплинні **природні процеси є необоротними**. Оборотними вони стають завдяки стороннім впливам або складним процесам, які компенсують ці зміни.

Напрямок плину теплових процесів установлює **другий закон термодинаміки**, який уперше сформулював німецький фізик **Рудольф Клаузіус** (1822–1888) у 1850 р.: **у природі не можливий процес, під час якого тепло- та самочинно переходила б від менш нагрітих до більш нагрітих тіл.**

Пізніше **Вільям Томсон (Кельвін)** дав інше формулювання другого закону термодинаміки: **неможливо здійснити такий періодичний процес, єдиним результатом якого буде виконання роботи за рахунок теплоти, відібраної у нагрівника**. Отже, другий закон термодинаміки доповнює закон збереження і перетворення енергії в теплових процесах можливим напрямком їх самочинного перебігу в природі та заперечує можливість створення вічного двигуна.



### ЧИ ЗНАЄТЕ ВИ ЩО...

166

- Зростання потреби людства в енергоносіях прискорює розвиток теплоенергетики. Одним із важливих недоліків використання теплових машин є забруднення навколишнього середовища. Теплові двигуни різної конструкції (на автомобільному, залізничному, повітряному, морському транспорті та в ракетобудуванні) спричиняють хімічне, фізичне, теплове та шумове забруднення навколишнього середовища.

- Сучасні надпотужні працюючі ТЕС викидають у повітря шкідливі речовини. Наприклад, оксиди сірки, азоту, фтористі сполуки, чадний газ, метан, етилен, п'ятиокис ванадію. Одна ТЕС за рік викидає в атмосферу понад 3000 т оксидів сірки та майже 2000 т оксидів азоту. Більшість цих речовин є токсичними й негативно впливають на довкілля. Змішуючись із водою у хмарах, вони випадають згодом у вигляді кислотних дощів.

- Значну частку шкідливих викидів у атмосферу становлять продукти роботи двигунів внутрішнього згорання. Особливо сильно забруднюють атмосферу реактивні двигуни літаків і ракет. Шкідливі речовини потрапляють в атмосферу й під час роботи котлів опалювальних систем.

Із розвитком теплової енергетики вчені пов'язують теплове забруднення атмосфери й так зване глобальне потепління. Холодильником для теплових двигунів є атмосфера, куди передається «відпрацьоване» тепло. Крім того, до атмосфери потрапляють дуже дрібні частинки викидів, які зависають у ній і відбивають теплові промені, що випромінюються землею поверхнею. Відбувається так званий парниковий ефект, у результаті якого підвищується температура атмосфери, що виявляється у змінах клімату з непередбачуваними наслідками.

Деякі види теплових двигунів викидають в атмосферу речовини, що зумовлюють, наприклад, зменшення товщини озонового шару, який захищає все живе на Землі від ультрафіолетового випромінювання Сонця.

Робота теплових двигунів супроводжується шумами, які негативно впливають на біологічні об'єкти. Тому перед людством постають глобальні екологічні проблеми, для розв'язання яких слід усунути шкідливі чинники дії теплових машин.

Перспективним напрямом є поступова заміна теплових двигунів електричними, використання екологічно чистих джерел енергії (води, сонця, вітру), розвиток геотермальної енергетики.



- Сьогодні в Україні, як і в усьому світі, активно розвивається альтернативна, або відновлювальна, енергетика. Щороку на сонячних електростанціях виробляється понад 500 млн кВт · год електричної енергії. Популярності набувають сонячні міні-електростанції.

- Одним із найперспективніших напрямів розвитку теплової енергетики є використання геотермальної енергії. Сучасні теплосистеми дають змогу використовувати теплову енергію, акумульовану в надрах земної кулі, як для виробництва електричної енергії, так і для опалення, гарячого водопостачання, поверхневого охолодження.



### ЗАПИТАННЯ ДО ВИВЧЕНОГО

1. Що таке цикл Карно? З яких процесів він складається?
2. Який коефіцієнт корисної дії ідеальної теплової машини? Яке максимальне його значення можуть мати реальні теплові машини?
3. Який принцип дії теплової машини? Які обов'язкові складові частини вона має?
4. Чому дорівнює ККД теплової машини? Чи може він бути більшим за 1?
5. За яким принципом працює холодильна машина? У чому її відмінність від теплової машини?
6. Що характеризує ефективність холодильної машини?



Дослідіть, які процеси відбуваються у двигунах внутрішнього згоряння і якими фізичними законами вони описуються.

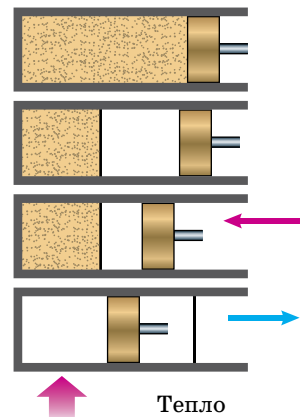
## § 43. НЕОБОРОТНІСТЬ ТЕПЛОВИХ ПРОЦЕСІВ. ЕНТРОПІЯ

Термодинамічний підхід не дає змоги розкрити внутрішню природу необоротності реальних процесів у макроскопічних системах. Він тільки фіксує факт необоротності у другому законі термодинаміки, спираючись на експеримент. Молекулярно-кінетичний підхід дає змогу проаналізувати причини такої необоротності реальних процесів і певної спрямованості енергетичних перетворень у природі.

Розглянемо з точки зору молекулярно-кінетичної теорії модель гіпотетичного «вічного» двигуна другого роду (мал. 108).

Припустимо, що цей «вічний» двигун працює так: газ самовільно збирається в лівій половині циліндра, після чого поршень посуваємо впритул до газу. За такого переміщення зовнішні сили роботи не виконують, оскільки зібраний у лівій половині газ не чинить тиску на поршень. Потім підводимо до газу тепло до попереднього об'єму. При цьому газ виконує роботу за рахунок тепла, що підводиться. Після того як поршень перейде у крайнє праве положення, чекатимемо, поки газ знову збереться самовільно в лівій половині посудини, і потім повторюємо все знову. У результаті вийшла періодично діюча машина, яка виконує роботу тільки за рахунок отримання тепла від навколишнього середовища.

Молекулярно-кінетична теорія дає змогу одразу пояснити, чому такий пристрій не працюватиме. Вірогідність того, що газ, який містить велике число молекул, хоч би один раз самовільно зібрався в



Мал. 108. Один з варіантів «вічного» двигуна другого роду

одній половині посудини, нікчемно мала. І вже абсолютно неможливо уявити, щоб це могло періодично повторюватися в ході роботи машини.

Тепер можна вказати зміст необоротного процесу: процес є необоротним, якщо зворотний процес насправді майже ніколи не відбувається. Він мало-ймовірний, щоб його можна було спостерігати на досліді. Так, цей приклад ґрунтувався на процесі мимовільної концентрації газу в одній половині посудини. Такий процес є зворотним до процесу розширення газу в порожнечу. А це є одним з найяскравіших прикладів необоротних процесів – зворотний процес у макроскопічній системі ніколи не спостерігався.

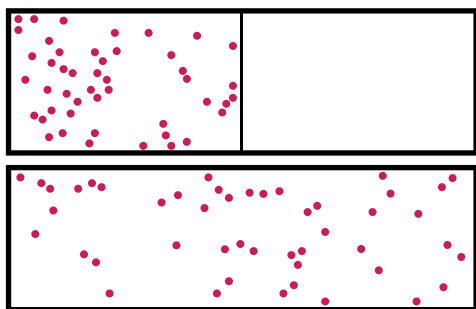
Отже, з точки зору уявлень молекулярно-кінетичної теорії, другий закон термодинаміки стверджує те, що у природі в макроскопічних системах процеси розвиваються в напрямку, коли менш імовірні стани системи замінюються на більш імовірні. Таку інтерпретацію другого закону термодинаміки вперше запропонував **Людвіг Больцман**. У випадку відхилення від середнього значення густини ідеального газу було з'ясовано, що стани газу, при яких розподіл молекул близький до рівномірного, трапляються набагато частіше, ніж далекі від рівноваги стани із сильно нерівномірним розподілом молекул.

Можна сказати, що необоротний перехід до рівноваги – це перехід від більш упорядкованих нерівноважних станів до менш упорядкованих, хаотичних станів. Під час розширення газу в порожнечу початковий стан, коли газ займає частину наданого йому об'єму, є значною мірою впорядкованим, тоді як кінцевий стан теплової рівноваги, коли газ рівномірно розподілений в усьому об'ємі посудини, є абсолютно неупорядкованим.

Коли тіло отримує деяку кількість теплоти за рахунок виконання механічної роботи, то це означає необоротне перетворення кінетичної енергії впорядкованого макроскопічного руху на кінетичну енергію хаотичного руху молекул. Перетворення тепла в роботу, навпаки, означає перетворення енергії безладного руху молекул в енергію впорядкованого руху макроскопічного тіла – такий перехід, як ми бачили, у принципі можливий, але малоімовірний.

Необоротний характер процесів переходу у стан теплової рівноваги, встановлюваний другим законом термодинаміки, справджується тільки для великих макроскопічних систем.

У системах з невеликим числом частинок самовільне відхилення якої-небудь величини від її середнього значення можуть бути порівняні із середнім значенням. Така система часто самовільно виходить зі стану рівноваги, і другий закон термодинаміки тут не застосовується (мал. 109).



Мал. 109. Ілюстрація самовільного нерівноважного процесу в ізольованій системі

Характерний приклад порушення другого закону термодинаміки в достатньо малих системах – броунівський рух, при якому зависла в рідині частинка отримує кінетичну енергію від молекул навколишнього середовища, хоча температура середовища не вища від температури броунівської частинки.

Для опису термодинамічної системи використовують фізичну величину, що отримала назву **ентропія** і яка є однією з основних термодинамічних величин.

**Ентропія** – фізична величина, яка в спостережуваних явищах і процесах характеризує розсіювання енергії, зумовлене перетворенням усіх її видів на теплову і рівномірним розподілом тепла між тілами (вирівнювання їх температур).

Ентропію використовують для опису термічних явищ і термічних властивостей макроскопічних об'єктів.

Нерівноважні процеси в ізольованій системі супроводжуються зростанням ентропії, вони наближають систему до стану рівноваги, у якому ентропія максимальна. Поняття ентропії у 1865 р. увів Рудольф Клаузіус.

Серед величин, що визначають стан системи, ентропія займає особливе місце. Вона виділяється своєю абстрактністю, фізичний зміст її не впливає безпосередньо з математичного виразу і не піддається простому інтуїтивному уявленню. Він може бути з'ясований під час розгляду різних необоротних фізичних, хімічних, ядерних, біологічних та інших процесів, наприклад: тертя, електронагрівання, нерівноважний теплообмін, дифузія, дисипація (розсіювання) енергії.

Ентропія є величиною, яка залежить від маси і об'єму системи, тому сумарна ентропія двох систем:  $S = S_1 + S_2$ . Ентропія є функцією стану системи, її зміна не залежить від способу переходу з кінцевого стану в початковий:  $\Delta S = S_f - S_i$ , якщо обидва стани рівноважні.

У самочинних процесах, які протікають в ізольованій системі, ентропія зростає ( $\Delta S > 0$ ). Ця властивість є основою другого закону термодинаміки. Виходячи з означення ентропії за Больцманом, у самочинних процесах в ізольованій системі безладдя завжди зростає. Загалом, для довільної, не обов'язково ізольованої термодинамічної системи:

$$\Delta S \geq \Delta Q/T,$$

де рівність виконується, за означенням, для рівноважних оборотних процесів.

Ентропія залишається сталою при рівноважних оборотних процесах в ізольованій системі, яка не обмінюється ні енергією, ні частинками з іншими системами. У неізольованих термодинамічних системах зміна ентропії підпорядкована першому закону термодинаміки. Процеси, що відбуваються зі сталою ентропією називають *ізоентропійними*.

Серед рівноважних процесів до таких належить адіабатний процес. Ізоентропійними також можуть бути деякі нерівноважні процеси.



#### ЧИ ЗНАЄТЕ ВИ, ЩО...

- Ентропія – абстрактна величина, фізичний зміст її не впливає з математичного виразу і не піддається інтуїтивному уявленню. Були численні спроби уточнити фізичний зміст ентропії, які ґрунтувалися на пошуках аналогій з іншими величинами, доступнішими безпосередньому сприйняттю. Наприклад, якщо уявити елементарну роботу як добуток сили й елементарного переміщення, то робота – аналог кількості тепла, сила – аналог абсолютної температури, а переміщення – аналог ентропії. В іншому варіанті елементарна робота може бути представлена добутком тиску й елементарного об'єму. Тут аналогом ентропії буде об'єм. Такі порівняння штучні, і їх користь для інтерпретації ентропії дуже сумнівна, оскільки неможлива аналогія ентропії з теплоємністю тіла.



#### ЗАПИТАННЯ ДО ВИВЧЕНОГО

1. У чому полягає зміст необоротності теплових процесів?
2. Як довести, що теплові процеси у природі є необоротними?

3. Що таке ентропія? Хто вперше ввів це поняття?
4. Що доводить ентропія?



### ЗАДАЧІ ТА ВПРАВИ

#### Розв'язуємо разом

1. У циліндричній посудині під поршнем з вантажем загальною масою  $m_1 = 200$  кг є  $m_0 = 2,5$  г водню за температури  $t_1 = 27$  °С. Внутрішній діаметр посудини  $d = 20$  см. Визначте роботу, яку виконує водень при його ізобарно-му нагріванні до  $t_2 = 100$  °С. Тертя між поршнем і циліндром відсутнє.

#### Розв'язання

Робота під час ізобарного розширення  $A = p\Delta V = p(V_2 - V_1)$ .

З об'єднаного газового закону для ізобарного процесу визначаємо

$$V_2 = V_1 \frac{T_2}{T_1}. \text{ Тоді } A = pV_1 \frac{T_2 - T_1}{T_1}.$$

Із закону Менделєєва–Клапейрона визначаємо добуток  $pV_1 = \frac{m_0}{\mu} RT_1$ .

Остаточно робота  $A = \frac{m_0}{\mu} R(T_2 - T_1)$ .  $A = 760$  Дж.

**Відповідь:** 760 Дж.

2. У кожному стані тіло має одне певне значення енергії, тобто вона є однозначною функцією стану. Обґрунтуйте це положення.

**Відповідь:** Це наслідок закону збереження енергії. Справді, нехай тіло в заданому стані має внутрішню енергію  $U$  і ще має внутрішню енергію  $U_1$ . Тоді від тіла можна було б забрати енергію  $\Delta U = U - U_1$ , не змінюючи його стану. Таке тіло могло б слугувати джерелом енергії, не зазнаючи при цьому жодних змін, що суперечить закону збереження енергії. А це означає, що енергія є однозначною функцією стану. Під час дії сил на тіло змінюється його стан, а отже, змінюється його внутрішня енергія. Під час повернення тіла у початковий стан його енергія набуває початкового значення.

#### Рівень А

**448.** Обчисліть внутрішню енергію одноатомного газу з кількістю речовини 5 моль за температури 27 °С.

**449.** На скільки змінюється внутрішня енергія 200 г гелію під час збільшення температури на 20 К?

**450.** Як змінюється внутрішня енергія ідеального газу під час: а) ізобарного розширення; б) ізотермічного розширення; в) ізохорного збільшення тиску?

**451.** Визначте внутрішню енергію одноатомного ідеального газу, який займає об'єм  $50 \text{ м}^3$  за тиску 120 кПа.

**452.** Об'єм одноатомного ідеального газу збільшився втричі, а тиск зменшився вдвічі. Як змінюється при цьому внутрішня енергія газу?

**453.** Під час розширення деякої маси ідеального газу тиск збільшився на 25 %, а об'єм зменшився на 20 %. Як змінилася внутрішня енергія газу?

**454.** Порівняйте внутрішні енергії однакових мас аргону і гелію за однакової температури.

**455.** У циліндрі під поршнем є гелій. Для його нагрівання за сталого тиску було витрачено 10 кДж теплоти. Визначте зміну внутрішньої енергії та роботу, виконану газом.

**456.** Яку роботу виконує газ, розширюючись ізобарно під тиском 2 атм від об'єму 1,6 л до 2,5 л?

**457.** За ізобарного нагрівання об'єм повітря, стиснутого до 5 атм, збільшився від  $0,48 \text{ м}^3$  до  $0,75 \text{ м}^3$ . Обчисліть роботу, виконану повітрям.

**458.** Газ міститься під поршнем циліндра за температури  $0^\circ\text{C}$  і під тиском  $2 \cdot 10^5 \text{ Па}$ . Яку роботу виконає 1 л газу під час ізобарного розширення, коли температура газу підвищиться на  $20^\circ\text{C}$ ?

**459.** У металевому циліндрі газ повільно стиснули поршнем. Чи змінилася внутрішня енергія газу?

**460.** Газ, який під поршнем циліндра має температуру  $150^\circ\text{C}$ , адіабатно розширюється. Яку роботу виконав газ, якщо він охолодився до  $80^\circ\text{C}$ ?

**461.** Двигун автомобіля потужністю 36,8 кВт витрачає 10 кг бензину за годину. Визначте ККД двигуна.

**462.** Визначте масу бензину, яку споживає двигун мопеда потужністю 0,88 кВт протягом 0,5 год, якщо ККД двигуна становить 19 %.

**463.** Для роботи двигуна, ККД якого становить 18 %, виділено 4,9 т нафти. Визначте, на скільки днів вистачить цього запасу, якщо середня потужність двигуна дорівнює 25 кВт. Робочий день триває 8 год.

### Рівень Б

**464.** У сталевому балоні міститься гелій масою 0,5 кг за температури  $10^\circ\text{C}$ . Як зміниться внутрішня енергія гелію, якщо його температура підвищиться до  $30^\circ\text{C}$ ?

**465.** Для ізобарного нагрівання газу на 500 К було надано 9,4 МДж теплоти. Кількість речовини газу дорівнює 800 моль. Визначте роботу газу та приріст його внутрішньої енергії.

**466.** Зі зменшенням тиску одноатомного газу в 3,6 раза його об'єм збільшився на 20 %. Як змінилася внутрішня енергія?

**467.** Під час нагрівання деякої маси одноатомного ідеального газу його тиск збільшився в  $n$  разів, а об'єм – в  $k$  разів. Як змінилася внутрішня енергія газу?

**468.** Температура повітря в кімнаті, що має об'єм  $70 \text{ м}^3$ , дорівнює 280 К. Після того як затопили піч, температура підвищилася до 296 К. Обчисліть роботу повітря, яку воно виконало під час розширення, якщо тиск сталий і дорівнює 100 кПа.

**469.** Порівняйте роботи, що їх виконують однакові маси водню і кисню під час ізобарного нагрівання на одну й ту саму температуру.

**470.** 1 л повітря ізохорно нагріли від  $9^\circ\text{C}$  до  $100^\circ\text{C}$ . На скільки змінилася його внутрішня енергія? Яку роботу воно виконало?

**471.** Свинцева куля, що летіла зі швидкістю 300 м/с, влучила в дошку і застрягла в ній. Визначте підвищення температури кулі внаслідок удару, вважаючи, що 70 % її початкової енергії перетворилось у внутрішню енергію кулі.

**472.** У циліндрі під поршнем перебуває газ об'ємом 1 л під тиском 10 МПа. Визначте роботу, яку виконав газ під час ізобарного розширення, якщо його об'єм збільшився втричі.

**473.** Теплоізольована герметична посудина, заповнена аргоном, рухається зі швидкістю 10 м/с. На скільки підвищиться температура газу, якщо посудина миттєво зупиниться?

**474.** Тиск газу під поршнем циліндра становить 490 кПа. Яку роботу виконує газ, якщо його за сталого тиску нагрівають до температури, яка вдвічі більша від початкової? Початковий об'єм газу 10 л.



**475.** Тиск газу під поршнем циліндра 8 атм, а температура 150 °С. Яку роботу виконає 1 л газу під час ізобарного розширення, коли температура газу підвищиться на 20 °С?

**476.** Повітря ізотермічно розширюється від 2 до 10 л. Початковий тиск 8 атм. Визначте графічно роботу розширення повітря.

**477.** Під час ізотермічного стиснення газу від 6 до 2 л його тиск змінився відповідно від 3 до 9 атм. Побудуйте ізотерму газу і за нею визначте роботу зовнішньої сили.

**478.** Середній тиск газу в циліндрі 1,2 МН/м<sup>2</sup>. Площа поршня 300 см<sup>2</sup>, довжина ходу 0,5 м. Визначте, на скільки зменшиться внутрішня енергія газу за один хід поршня?

**479.** Поїзд масою  $15 \cdot 10^5$  кг рухається по горизонтальному шляху зі швидкістю 60 км/год. При цьому тепловоз спалює 600 кг нафти за годину. Яку швидкість розвине поїзд за тих самих умов на шляху з підйомом 1 : 100? ККД тепловоза 28 %.

**480.** В ідеальній тепловій машині за рахунок кожного кілоджоуля енергії, що її дає нагрівник, виконується робота 300 Дж. Визначте ККД машини й температуру нагрівника, якщо температура холодильника 280 К.

**481.** У паровій турбіні витрачається 0,35 кг дизельного пального на 1 кВт · год. Температура пари, яка надходить у турбіну, дорівнює 250 °С, температура холодильника 30 °С. Обчисліть фактичний ККД турбіни й порівняйте його з ККД ідеальної теплової машини, яка працює за тих самих температурних умов.

### Є над чим замислитися

**482.** Під час ізобарного розширення повітря виконало роботу 2 кДж. Визначте зміну його внутрішньої енергії при цьому процесі, якщо молярна теплоємність повітря 20,6 Дж/(моль · К).

**483.** Двигуни реактивного літака розвивають силу тяги 0,15 МН. Визначте скільки гасу витратить літак на переліт на відстань 3500 км, якщо ККД двигунів становить 30 %.

**484.** Кількість теплоти, яку передає протягом деякого інтервалу часу нагрівник робочому тілу ідеальної теплової машини, що працює з максимально можливим ККД, дорівнює 37,3 кДж. Температура нагрівника 373 К, а холодильника – 273 К. Визначте роботу, виконану машиною за цей час.

**485.** У циліндрі під поршнем міститься водень масою 0,02 кг за температури 300 К. Водень почав розширятись адіабатно, збільшивши свій об'єм у 5 разів, а потім його було стиснено ізотермічно, причому об'єм газу зменшився в 5 разів. Знайдіть температуру в кінці адіабатного розширення і роботу, яку виконав газ. Зобразіть процес графічно.

**486.** Автомобільну шину накачано до тиску 220 кПа за температури 290 К. Під час руху вона нагрілася до температури 330 К і лопнула. Вважаючи процес, який відбувається після пошкодження шини, адіабатним, визначте зміну температури повітря, що вийшло з неї. Зовнішній тиск повітря дорівнює 100 кПа.

**487.** У вертикальному циліндрі міститься гелій, закритий поршнем масою 10 кг і площею 10 см<sup>2</sup>. Поршень може переміщатися без тертя в циліндрі, щільно прилягаючи до нього. Яку кількість теплоти потрібно надати газу для того, щоб потенціальна енергія взаємодії поршня із Землею збільшилася на 50 Дж? Атмосферний тиск нормальний.

**488.** Міжміський автобус проїхав 80 км за 1 год. Двигун при цьому розвивав середню потужність 70 кВт, маючи ККД 25 %. Скільки дизель-



ного пального, густина якого  $800 \text{ кг/м}^3$ , зекономив водій під час рейсу, якщо норма витрати пального становить 40 л на 100 км шляху?

**489.** Автомобіль, маса якого 4,6 т, рушає з місця на підйомі з нахилом 0,025 і, рухаючись рівноприскорено, за 40 с проходить 200 м. Визначте витрати бензину (у літрах) на цій ділянці, якщо коефіцієнт опору 0,02, ККД дорівнює 20 % і густина бензину  $700 \text{ кг/м}^3$ .

**490.** Одноатомний ідеальний газ масою  $m$  з початковою температурою 300 К ізохорно нагрівають до температури 500 К, а потім ізобарно – до температури 700 К. Після цього газ ізохорно охолоджують до початкового тиску й ізобарно повертають у початковий стан. Обчисліть ККД циклу.

## § 44. ВЛАСТИВОСТІ НАСИЧЕНОЇ І НЕНАСИЧЕНОЇ ПАРИ. ВОЛОГІСТЬ ПОВІТРЯ

Хмари, дощі, тумани, сніжинки – усе це водяна пара. Кругообіг води у природі – один з основних чинників, що впливає на погоду, на самопочуття людини. Спортсмени і гляціологи (прогнозисти лавин), конструктори парових турбін, котлів і парових машин, авіатори і моряки, домогосподарки, які вивішують випрану білизну, потребують точних знань про водяну пару або хоча б результатів вимірювань чи спостережень за нею.

Пара – газуватий стан речовини в умовах, коли газувата фаза може перебувати в рівновазі з рідкою або твердою фазами тієї самої речовини. Процес виникнення пари з рідкої (твердої) фази називають **пароутворенням**. Зворотний процес – **конденсацією**. За низького тиску і високих температур властивості пари наближаються до властивостей ідеального газу. Говорячи слово «пара», ми майже завжди маємо на увазі водяну пару.

Розрізняють такі види станів пари хімічно чистих речовин.

**Ненасичена пара** – пара, що не досягла термодинамічної рівноваги зі своєю рідиною. Тиск ненасиченої пари залежить від її об'єму і температури. З підвищенням температури пари або зі зменшенням її об'єму, тиск ненасиченої пари збільшується. Охолоджуючись, ненасичена пара стає насиченою, тому що при цьому кінетична енергія молекул пари зменшується і легше відбувається їх перехід у рідину.

**Насичена пара** – пара, яка перебуває у динамічній рівновазі зі своєю рідиною. Ця назва підкреслює, що в даному об'ємі за даної температури не може перебувати більшої кількості пари. Якщо з посудини з рідиною відкачати повітря, то над поверхнею рідини буде тільки насичена пара. Концентрація молекул насиченої пари не залежить від об'єму за сталої температури. Під час нагрівання насичена пара стає ненасиченою. За даної температури тиск ненасиченої пари завжди менший за тиск насиченої пари. За наявності над поверхнею рідини ненасиченої пари процес пароутворення переважає над процесом конденсації, і тому кількість рідини в посудині із часом зменшується.

Атмосферне повітря – це суміш різних газів і водяної пари. Кожен із газів, що містяться в повітрі, робить свій внесок у сумарний тиск повітря на тіла. Тиск, який чинила б водяна пара, якщо не було б інших газів, називають **парціальним тиском водяної пари**, який є одним з показників вологості повітря:

$$p = \frac{mRT}{V_{\mu}} = \rho \frac{RT}{\mu},$$

де  $\rho$  – густина водяної пари.

У повітрі завжди є водяна пара. Від кількості водяної пари, що міститься в повітрі, залежать погода, самопочуття людини, функціонування багатьох її органів, життя флори і фауни, а також збереження технічних об'єктів. Усе це підтверджує актуальність потреби визначення кількості водяної пари, що міститься в атмосфері.

Для вимірювання вологості повітря введено спеціальні величини – абсолютна і відносна вологість.

**Абсолютною вологістю** називають масу водяної пари, що міститься в  $1 \text{ м}^3$  повітря за даної температури. Іншими словами, абсолютна вологість – це парціальний тиск водяної пари, наявної в повітрі за даної температури (або густина водяної пари):

$$f = p; f = \rho,$$

де  $p$  – парціальний тиск, а  $\rho$  – густина водяної пари за даної температури  $T$ .

Абсолютну вологість повітря визначають за точкою роси. Суть цього методу в тому, що за допомогою спеціального приладу (гігрометра, мал. 110) визначають температуру, за якої пара, що є в атмосфері, стає насиченою. Цю температуру називають **температурою (точкою) роси**.

Масу насиченої водяної пари в  $1 \text{ м}^3$  повітря за даної температури можна знайти у спеціальних таблицях.

Максимальна вологість повітря вимірюється густиною насиченої водяної пари. Густина насиченої водяної пари за різних температур визначається експериментально і наводиться в таблицях (табл. 3).

Тиск і густина насиченої водяної пари

Таблиця 3

| $t, ^\circ\text{C}$ | $p, \text{Па}$ | $\rho, \text{г/м}^3$ | $t, ^\circ\text{C}$ | $p, \text{Па}$ | $\rho, \text{г/м}^3$ |
|---------------------|----------------|----------------------|---------------------|----------------|----------------------|
| -10                 | 259,9          | 2,14                 | 17                  | 1936,8         | 14,5                 |
| -5                  | 402,4          | 3,2                  | 18                  | 2063,5         | 15,4                 |
| 0                   | 610,5          | 4,84                 | 19                  | 2196,8         | 16,3                 |
| 1                   | 656,1          | 5,22                 | 20                  | 2338,1         | 17,3                 |
| 2                   | 758,4          | 5,60                 | 21                  | 2486,0         | 18,3                 |
| 3                   | 797,3          | 5,98                 | 22                  | 2643,3         | 19,4                 |
| 4                   | 812,1          | 6,40                 | 23                  | 2808,6         | 20,6                 |
| 5                   | 871,1          | 6,84                 | 24                  | 2983,3         | 21,8                 |
| 6                   | 934,4          | 7,3                  | 25                  | 3167,2         | 23,0                 |
| 7                   | 1001,1         | 7,8                  | 26                  | 3360,5         | 24,4                 |
| 8                   | 1073,1         | 8,3                  | 27                  | 3567,1         | 25,8                 |
| 9                   | 1147,7         | 8,8                  | 28                  | 3779,1         | 27,2                 |
| 10                  | 1227,7         | 9,41                 | 29                  | 4004,3         | 28,7                 |
| 11                  | 1300,7         | 10,0                 | 30                  | 4241,6         | 30,3                 |
| 12                  | 1402,3         | 10,7                 | 40                  | 7374,2         | 51,2                 |
| 13                  | 1519,6         | 11,4                 | 50                  | 1234,3         | 82,9                 |
| 14                  | 1598,3         | 12,1                 | 90                  | 7011,4         | 423,3                |
| 15                  | 1704,9         | 12,8                 | 100                 | 101303         | 598                  |
| 16                  | 1816,9         | 13,6                 | 200                 | 156000         | 7870                 |

Наприклад, густина ненасиченої водяної пари за температури  $20 ^\circ\text{C}$  дорівнює  $13,6 \cdot 10^{-3} \text{ кг/м}^3$ . Ця пара за температури  $16 ^\circ\text{C}$  стає насиченою (випадає роса). Отже, її густина й абсолютна вологість  $\rho = 13,6 \cdot 10^{-3} \text{ кг/м}^3 = 13,6 \text{ г/м}^3$ . Для зручності одиницею абсолютної вологості зазвичай є  $1 \text{ г/м}^3$ .

Вологість повітря вимірюється за допомогою **гігрометрів** і **психрометрів**. Найпростішим є **гігрометр Ламбрехта** (мал. 110). Він складається з горизонтально розташованого циліндра, одна основа якого блискуча. Усе-

редину циліндра входить запаяна з одного кінця трубка, у нижній частині якої є багато отворів. Інший кінець трубки приєднують до якої-небудь повітродувки, наприклад гумової груші. Усередину циліндра наливають ефір. Продуваючи через трубку повітря, створюють умови для швидкого випаровування ефіру. Випаровуючись, ефір охолоджується і охолоджує циліндр. Коли температура циліндра дорівнюватиме точці роси, він «запітніє». Для вимірювання температури всередину циліндра вставляють термометр. Щоб момент випадання роси був помітніший, циліндр уставлено у блискуче кільце, яке надійно ізольоване від нього теплоізоляційною прокладкою.



Мал. 110. Гігрометр Ламбрехта

Визначивши температуру, за якої пара, що міститься в повітрі, стає насиченою, за спеціальними таблицями визначають абсолютну вологість повітря.

Знаючи абсолютну вологість повітря, ще не можна визначити, наскільки сухе або вологе повітря. Потрібно при цьому враховувати і температуру повітря. Якщо температура низька, то водяна пара в повітрі може виявитися дуже близькою до насичення. За вищої температури та сама водяна пара буде далекою від насичення.

Ступінь вологості повітря визначають по тому, наскільки водяна пара, що є в повітрі, перебуває близько до стану насичення. Для цього вводять поняття відносної вологості.

**Відносною вологістю** повітря називають виражене у відсотках відношення парціального тиску водяної пари (пружності водяної пари), яка є в повітрі, до тиску насиченої пари за даної температури:

$$\varphi = \frac{P}{P_n} 100 \% ; \quad \varphi = \frac{\rho}{\rho_n} 100 \% ,$$

де  $P_n$  – тиск, а  $\rho_n$  – густина насиченої водяної пари за даної температури  $T$ .

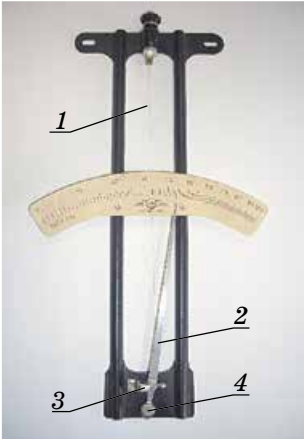
Поняття відносної вологості є дуже важливим. Наприклад, ми відчуваємо себе добре за температури 25 °C або 30 °C і відносній вологості 25 %. З іншого боку, за тієї самої температури самопочуття у нас погане, ми відчуваємо спеку і пригніченість за відносної вологості 80 % або 90 %. Або, наприклад, якщо температура повітря 18 °C, а відносна вологість 25 %, ми відчуваємо холод, хоча за тієї самої температури і вологості 60 % і вище можна добре почуватися.

Залежність самопочуття від відносної вологості за однакової температури пояснюється тим, що тіло охолоджується частково внаслідок випаровування під час дихання і швидкість охолодження збільшується зі швидкістю випаровування. Інакше кажучи, якщо відносна вологість низька, випаровування, а тому й охолодження, відбуваються швидше, і навпаки.

Багаторазовими експериментами встановлено, що для хорошого самопочуття і здоров'я потрібно, щоб відносна вологість була в межах від 40 % до 60 %. Проте в наших будинках і школах у зимові місяці відносна вологість часто не перевищує 10–20 %. Такі умови викликають швидке випаровування і висихання слизової оболонки носа, горла і легень, що призводить до простудних та інших захворювань органів дихання.



Мал. 111. Психрометр  
Августа



Мал. 112. Волос'яний  
гігрометр

Тому в зимовий час необхідно зволожувати повітря в житлових приміщеннях за допомогою спеціальних пристосувань. Наприклад, за допомогою пористих зволожувачів, укріплених на опалювальних елементах.

Підвищена вологість (вище 70 %) також негативно впливає на організм людини як за високих, так і за низьких температур. За високої температури повітря і підвищеної вологості людина сильно пітніє, але випаровування вологи з поверхні тіла не відбувається, що призводить до перегріву організму і «теплого удару». За низьких температур підвищена вологість повітря, навпаки, призводить до сильного охолодження організму, оскільки у вологому повітрі різко збільшуються втрати енергії шляхом конвекції і теплопровідності.

Вимірявши за допомогою гігрометра точку роси і знаючи температуру повітря, можна за допомогою таблиць визначити відносну вологість. Наприклад, якщо точка роси дорівнює 8 °С, а температура повітря 19 °С, то відносна вологість дорівнює 50 %.

Проте зазвичай відносну вологість визначають іншими приладами – волос'яними (мал. 112), плівковими або напівпровідниковими гігрометрами, а також за допомогою психрометрів (мал. 111).

**Психрометр** складається з двох термометрів, резервуар одного з яких обмотано батистом, кінець якого опущено в посудину з дистильованою водою (мал. 111). Сухий термометр реєструє температуру повітря, вологий – температуру води, що випаровується. Нагадаємо, що під час випаровування рідини її температура знижується. Очевидно, що сухіше повітря, тобто менша його відносна вологість, то інтенсивніше випаровується вода з вологого батисту, то більше охолоджується обмотаний батистом термометр. Навпаки, якщо

повітря містить багато пари і його відносна вологість висока, то випаровування води з батисту відбуватиметься поволі, і він слабо охолоджуватиметься. Отже, різниця показів сухого і вологого термометрів (психрометрична різниця) залежить від відносної вологості повітря. За допомогою спеціальних таблиць (табл. 4) можна легко визначити вологість повітря за психрометричною різницею.

Психрометрична таблиця

Таблиця 4

| Покази сухого<br>термометра, °С | Різниця показів сухого та вологого термометрів, °С |    |    |    |    |    |    |   |   |   |    |
|---------------------------------|----------------------------------------------------|----|----|----|----|----|----|---|---|---|----|
|                                 | 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 | – | – | – | –  |

| Покази сухого<br>термометра, °C | Різниця показів сухого та вологого термометрів, °C |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|---------------------------------|----------------------------------------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
|                                 | 0                                                  | 1  | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  | 9  | 10 |
|                                 | Відносна вологість, %                              |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 6                               | 100                                                | 86 | 73 | 60 | 47 | 35 | 23 | 10 | –  | –  | –  |
| 8                               | 100                                                | 87 | 75 | 63 | 51 | 40 | 28 | 18 | 7  | –  | –  |
| 10                              | 100                                                | 88 | 76 | 65 | 54 | 44 | 34 | 24 | 14 | 5  | –  |
| 12                              | 100                                                | 89 | 78 | 68 | 57 | 48 | 38 | 29 | 20 | 11 | –  |
| 14                              | 100                                                | 89 | 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 |

На малюнку 112 зображено прилад для вимірювання відносної вологості повітря – **волосяний гігрометр**. Він складається з таких частин: 1 – знежирена волосина, верхній кінець якої закріплено в регулювальному затискачі, а нижній на блоці 3, що має вісь обертання. На осі встановлено стрілку 2 і противагу 4. При підвищенні вологості волосина видовжується, і стрілка повертається на відповідний кут, фіксуючи значення відносної вологості повітря.



### ЧИ ЗНАЄТЕ ВИ, ЩО...

- Якщо припинився б кругообіг води у природі, за рік з поверхні Світового океану випарувався б шар води товщиною близько 1,1 м.
- Якщо дуже чиста пара не стикається з рідиною, то вдається отримати переохолоджену, або перенасичену, пару. Саме така пара використовується в камері Вільсона для реєстрації заряджених частинок.
- Перший волосяний гігрометр створив у 1783 р. швейцарський геолог Горацій де Соссюр. У своїй статті він довів, що за одних і тих самих температур та тиску вологе повітря легше за сухе.
- У 1880 р. шотландський морський інженер Джон Апткен відкрив, що конденсація водяної пари під час утворення туману, хмар і дощу відбувається на мікроскопічних частинках, таких як морська сіль, дрібний пил тощо. На цьому відкритті ґрунтуються деякі сучасні роботи зі штучного створення дощу.
- Сучасний прилад для визначення кількості водяної пари в повітрі – інфрачервоний гігрометр – здатний працювати в умовах, коли всі інші прилади практично непридатні. Його дія ґрунтується на порівнянні потоків інфрачервоного випромінювання хвиль різної довжини, що проходять через шар повітря. Одна з хвиль поглинається водяною паром, а інша – ні.



### ЗАПИТАННЯ ДО ВИВЧЕНОГО

1. Дайте визначення абсолютної та відносної вологості повітря.
2. Що таке точка роси?
3. Що таке парціальний тиск?
4. Якими приладами вимірюють вологість повітря? Яка їх будова?
5. Для чого використовують психрометричну таблицю?
6. Наведіть приклади, які показують значення вологості в житті людини.





## РОБОТА У ГРУПАХ

- Об'єднайтеся у групи та виконайте проекти на одну з тем:
- Уплив вологості повітря на живі організми;
- Передбачення заморозків за точкою роси;
- Урахування вологості повітря для зберігання музейних експонатів.

## § 45. ВЛАСТИВОСТІ РІДИН. ПОВЕРХНЕВИЙ НАТЯГ РІДИНИ

Вивчаючи фізику, ви ознайомилися з багатьма силами, які існують у природі. Але пригадайте випадок, коли з водопровідного крана через певний час падає крапля за краплею в раковину, викликаючи неприємні відчуття. *Що ж утримує певний час краплину?*



Мал. 113. Відривання краплини



Мал. 114. Мильні бульбашки

Спробуємо поспостерігати за утворенням краплі біля погано закритого крана. Придивіться уважно, як поступово збільшується крапля, утворюється звуження – шийка, і крапля відривається (мал. 113). Ніби вода вміщена в еластичну торбинку, яка розривається, коли її міцність стає недостатньою для утримання великої маси води. Насправді, нічого, крім води, у краплі немає, але поверхневий шар води нагадує розтягнуту еластичну плівку. Аналогічно плівка мильної бульбашки нагадує тонку

гуму дитячої кульки (мал. 114).

Якщо обережно покласти швацьку голку на поверхню води, то поверхнева плівка вгнеться і не дасть голці потонути (мал. 115). З тієї самої причини легкі комахи – водомірки – можуть швидко ковзати по поверхні води, як ковзанярі по льоду (мал. 116).

Угнута плівка не дає вилитися воді, обережно налитій у густе сито. Тканина – це своєрідне сито, утворене переплетенням ниток. Поверхневий натяг утруднює просочування води крізь тканину, і тому вона відразу не промокає. Намагаючись скоротитися, поверхнева плівка надавала б рідині сферичної форми, якби не притягання до Землі. Що менша крапелька, то більшу роль відіграють поверхневі сили порівняно із силою тяжіння. Тому маленькі крапельки роси (мал. 117) схожі за формою до кулі. Під час вільного падіння виникає стан невагомості, тому дощові краплі майже кулясті.



Мал. 115. Голка на поверхні води



Мал. 116. Водомірка на поверхні води



Мал. 117. Крапельки роси



У космічному кораблі, який перебуває у стані невагомості, кулястої форми набувають не тільки окремі краплі, а й великі маси рідини.

Сили поверхневого натягу виникають, тому що молекули води чи іншої рідини, які притягаються одна до одної, намагаються зблизитися. Кожна молекула на поверхні притягується рештою молекул, які містяться всередині рідини, і тому має тенденцію занурюватися вглиб. Оскільки рідина текуча внаслідок перестрибувань молекул з одного місця в інше, то вона набуває форми, при якій кількість молекул на поверхні мінімальна. А мінімальну площу поверхні заданого об'єму має куля. Площа поверхні скорочується, і це сприймається як поверхневий натяг.

Виявляється, що походження поверхневих сил зовсім не таке, як пружних сил розтягнутої гумової плівки. Коли скорочується гума, пружна сила ослаблюється, а сили поверхневого натягу зовсім не змінюються зі скороченням поверхні плівки, тому що густина рідини, а отже, і середня відстань між молекулами на поверхні, не змінюється.

**Дослід.** Візьмемо дротяне кільце, до сторін якого вільно, без натягу, прив'язано нитку. Опустимо кільце в мильний розчин, отримаємо по обидва боки від нитки мильну плівку (мал. 118, а). Нитка вільно лежить на мильній плівці: сили поверхневого натягу взаємно врівноважуються з обох боків нитки. Обережно прорвемо плівку з одного боку від нитки. Під дією сил поверхневого натягу – плівка скорочується і, діючи на нитку, натягує її по всій довжині – нитка приймає форму дуги кола (мал. 118, б). Сили поверхневого натягу діють уздовж усієї замкнутої лінії (контуру), що обмежує вільну поверхню рідини. Вони завжди напрямлені перпендикулярно до цього контуру і лежать на поверхні рідини, якщо вона горизонтальна.

**Величину, що вимірюється силою поверхневого натягу, яка діє на кожну одиницю довжини контуру, що обмежує вільну поверхню рідини, називають коефіцієнтом поверхневого натягу.**

Він характеризує розподіл сил поверхневого натягу вздовж контуру, що обмежує вільну поверхню рідини:

$$\sigma = \frac{F}{l},$$

де  $F$  – сила поверхневого натягу;  $l$  – довжина контуру.

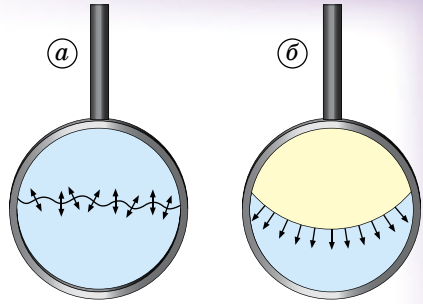
Одиницею коефіцієнта поверхневого натягу рідини в СІ є **1 ньютон на метр (1 Н/м)**.

Коефіцієнти поверхневого натягу деяких рідин наведено в таблиці 5.

**Коефіцієнт поверхневого натягу рідин (20 °C)**

**Таблиця 5**

| Речовина       | $\sigma$ , мН/м | Речовина | $\sigma$ , мН/м |
|----------------|-----------------|----------|-----------------|
| Вода           | 73              | Нафта    | 30              |
| Гас            | 24              | Ртуть    | 510             |
| Мильний розчин | 40              | Спирт    | 22              |



**Мал. 118.** Дія сил поверхневого натягу на нитку

Коефіцієнти поверхневого натягу залежать від природи рідин і температури, а також від наявності домішок. Оскільки щільність упаковки частинок у різних рідин неоднакова, виникають певні відмінності і в значенні молекулярних сил, чим і пояснюється залежність коефіцієнта поверхневого натягу від природи рідини.

З підвищенням температури збільшуються середні відстані між молекулами рідини, молекулярні сили зменшуються, і тому з підвищенням температури коефіцієнт поверхневого натягу рідин зменшується. Це можна спостерігати на такому досліді. Насипавши на поверхню води порошку лікоподію (спори рослин роду плаунів), злегка торкнемося її поверхні металевим стержнем тієї самої температури, що й сама вода. Частинки лікоподію залишаться нерухомими. Торкнемося тепер поверхні води розжареним стержнем. Частинки лікоподію розбігаються від центру посудини до його країв, де температура води нижча і сили поверхневого натягу більші.



### ЗАПИТАННЯ ДО ВИВЧЕНОГО

1. Наведіть приклади дії сил поверхневого натягу, які ви знаєте.
2. Чим подібні і чим різняться сили поверхневого натягу і сили пружності?
3. Що називають коефіцієнтом поверхневого натягу?
4. Від чого залежить коефіцієнт поверхневого натягу?
5. Що називають силою поверхневого натягу?

## § 46. ЗМОЧУВАННЯ. КАПІЛЯРНІ ЯВИЩА

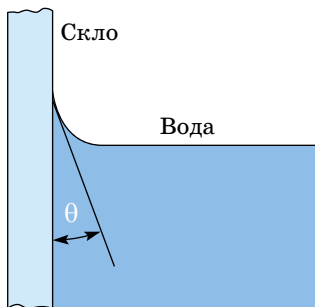
180

Молекули рідини, які містяться на межі з твердим тілом, взаємодіють і з молекулами рідини, і із частинками твердого тіла, тому можуть спостерігатися явища змочування або незмочування.

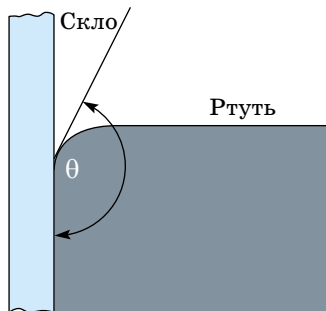
**Змочування** – це явище, яке виникає внаслідок взаємодії рідини з молекулами твердих тіл і зумовлює викривлення поверхні рідини біля поверхні твердого тіла.

Силами взаємодії між молекулами рідини і твердого тіла, на відміну від притягання між молекулами рідини і газу, знехтувати не можна. Форма поверхні рідини, що прилягає до твердого тіла, залежить від того, які сили притягання більші: між молекулами рідини і твердого тіла чи між молекулами самої рідини.

У першому випадку рідина змочувальна, її форма біля стінки посудини така (мал. 119), що кут  $\theta$  між площиною, дотичною до поверхні рідини, і стінкою гострий (рідина приліпає до стінки). У другому випадку рідина не змочує тверду поверхню, і кут  $\theta$  (мал. 120) тупий (рідина відходить від стінки).



Мал. 119. Явище змочування



Мал. 120. Явище незмочування

Розглянемо лише випадки повного змочування (кут  $\theta = 0^\circ$ ) і повного незмочування (кут  $\theta = 180^\circ$ ), щоб пояснити явища, пов'язані з поведінкою рідин у вузьких трубках – капілярах (від лат. *capillaris* – «волосина»).

**Під капілярними явищами розуміють піднімання або опускання рідини у вузьких трубках – капілярах – порівняно з її рівнем у широких трубках.**

Змочувальна рідина (наприклад, вода у скляній трубці) піднімається по капіляру. Причому, що менший радіус трубки, то на більшу висоту піднімається рідина (мал. 121). Якщо розглядати викривлену поверхню рідини в капілярі через лупу, то вона буде схожа на розтягнуту гумову плівку, прикріплену до стінок трубки (мал. 122).

У капілярах вигнуту поверхню рідини під час повного змочування і незмочування можна вважати півсферою, радіус якої дорівнює каналу трубки  $r$ .

Уздовж межі поверхневого шару, що має форму кола, на рідину діє сила поверхневого натягу  $F = \sigma l$ . Оскільки довжина кола  $l = 2\pi r$ , то ця сила дорівнює:

$$F = 2\sigma\pi r.$$

Сила поверхневого натягу  $\vec{F}$  урівноважує силу тяжіння  $m\vec{g}$ , яка діє на стовпчик рідини висотою  $h$ . Якщо об'єм рідини в капілярі  $V = \pi r^2 h$ , то модуль сили тяжіння буде дорівнювати:  $mg = \rho g V = \rho g h \pi r^2$ . Підставивши в рівняння  $-\vec{F} = m\vec{g}$  вирази  $F = 2\sigma\pi r$  і  $mg = \rho g V = \rho g h \pi r^2$  для модулів сил, отримаємо:  $2\sigma g \pi r = \rho g h \pi r^2$ .

Звідки висота підняття змочувальної рідини в капілярі визначається так:

$$h = \frac{2\sigma}{\rho g r},$$

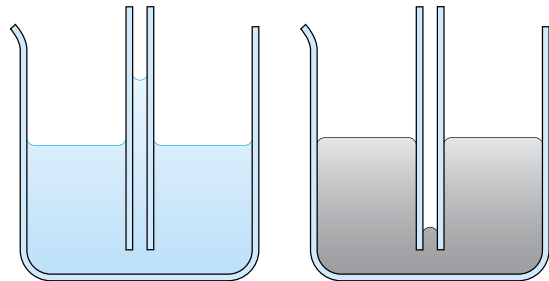
де  $\sigma$  – коефіцієнт поверхневого натягу;  $\rho$  – густина рідини;  $g = 9,81$  м/с<sup>2</sup>;  $r$  – радіус трубки (капіляра);  $h$  – висота підняття рідини в капілярі.

Рідина, яка не змочує стінки капіляра (наприклад, ртуть у скляній трубці), опускається нижче від рівня рідини в широкій посудині (мал. 123). Глибина  $h$ , на яку вона опускається, також визначається за формулою  $h = \frac{2\sigma}{\rho g r}$ .

Без капілярних явищ живі організми існувати просто не можуть. Усе тіло людини пронизують кровоносні судини. За будовою вони не однакові. Артерії – це судини, по яких рухається кров від серця. Вони мають пруж-



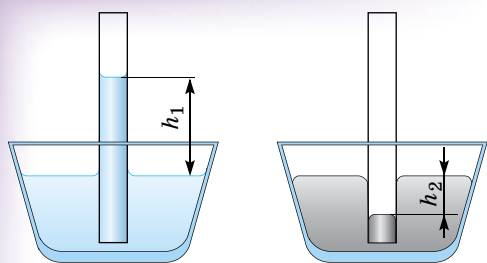
Мал. 121. Рідина в капілярних трубках



Вода

Ртуть

Мал. 122. Піднімання та опускання рідини в капілярних трубках



Мал. 123. Висота піднімання і опускання рідин у капілярних трубках



Мал. 124. Капіляри під мікроскопом

ні еластичні стінки, до складу яких входять гладкі м'язи. Скорочуючись, серце викидає в артерію кров під великим тиском. Завдяки щільності і пружності стінки артерії витримують цей тиск і розтягуються.

Що більша відстань від серця, то менший діаметр артерій. Маленькі артерії розпадаються на капіляри. Їх стінки утворені одним шаром плоских клітин. Крізь стінки капілярів речовини, розчинені у плазмі крові, проходять у тканинну рідину, а з неї потрапляють у клітину. Продукти життєдіяльності клітин проникають крізь стінки капілярів із тканинної рідини у кров.

В організмі людини приблизно 150 млрд капілярів (мал. 124). Якщо всі капіляри розмістити в одну лінію, то нею можна оперезати земну кулю 2,5 рази.

182

Піднімання вологи з глибинних шарів ґрунту також можливе завдяки капілярності, це необхідно враховувати в сільському господарстві. Зменшуючи діаметр капілярів шляхом ущільнення ґрунту, збільшують приплив води до поверхні, до зони випаровування і тим самим прискорюють висушування ґрунту. А розпушуючи його й руйнуючи тим самим систему ґрунтових капілярів, затримують приплив вологи до зони випаровування й уповільнюють висушування ґрунту. Саме на цьому ґрунтується відомий агротехнічний прийом регулювання водного режиму ґрунту – боронування.

Коріння рослин – це мережа капілярів, яка витягує вологу із землі, доносячи її до верхніх листків.

**Дослід.** Квітку з білими пелюстками (або листок пекінської капусти, стебло селери) поставимо у склянку з яскраво забарвленою водою (мал. 125). Через якийсь час на листках квітки можна спостерігати, як фарба просочується вгору. Колір рослини поступово зміниться відповідно до кольору води, у яку поміщено квітку. Це обумовлено рухом забарвленої води вгору по стеблах згідно з тими законами, які описують капілярні явища.

Просте побутове прибирання неможливе без капілярних явищ, адже за цим принципом тканина вбирає воду. Рушник, чорнило, гніт у газовій

лампі тощо – приклади дії капілярних явищ. У техніці вони відіграють важливу роль під час сушіння пористих тіл та в багатьох інших процесах.

Іноколи ці явища дають небажані наслідки, наприклад, пори цегли вбирають вологу. Щоб уникнути відволоження будівель під впливом ґрунтових вод, потрібно фундамент захистити за допомогою



Мал. 125. Забарвлення квітки

гідроізолювальних матеріалів – бітуму, руберойду або толю. Промокання одягу під час дощу, наприклад штанів до колін від ходьби по калюжах, також капілярне явище.



### ЗАПИТАННЯ ДО ВИВЧЕНОГО

1. Що таке змочування? Незмочування? Чому виникають ці явища?
2. Які явища називають капілярними?
3. За якою формулою визначають висоту підняття рідини в капілярі?
4. Наведіть приклади проявів капілярних явищ.



Дослідіть питання:

- Використання капілярних явищ у природі.
- В'язкість крові – важливий показник стану здоров'я людини.

## § 47. ДЕФОРМАЦІЯ ТВЕРДИХ ТІЛ. МЕХАНІЧНА НАПРУГА ТВЕРДИХ ТІЛ. ЗАКОН ГУКА. МОДУЛЬ ЮНГА

У природних умовах частинки кристала перебувають у стані рівноваги: сили притягання і відштовхування між ними однакові. Під дією зовнішніх сил частинки кристала зміщуються, унаслідок чого змінюється його форма і розміри, тобто виникає деформація.

**Дослід 1.** Злегка зігнемо сталеву пластинку – лінійку або полотно ножівки (пилки) – і потім відпустимо її. Пластинка випрямляється і приймає попередню форму.

183

**Пружна деформація** – деформація, яка повністю зникає після припинення дії зовнішніх сил.

Властивість матеріалу відновлювати свою форму і розміри після припинення дії зовнішніх сил називають **пружністю матеріалу**. Якщо замінити сталеву пластинку свинцевою, то після припинення дії зовнішніх сил попередня форма пластинки не відновлюється: деформація твердого тіла повністю не зникає.

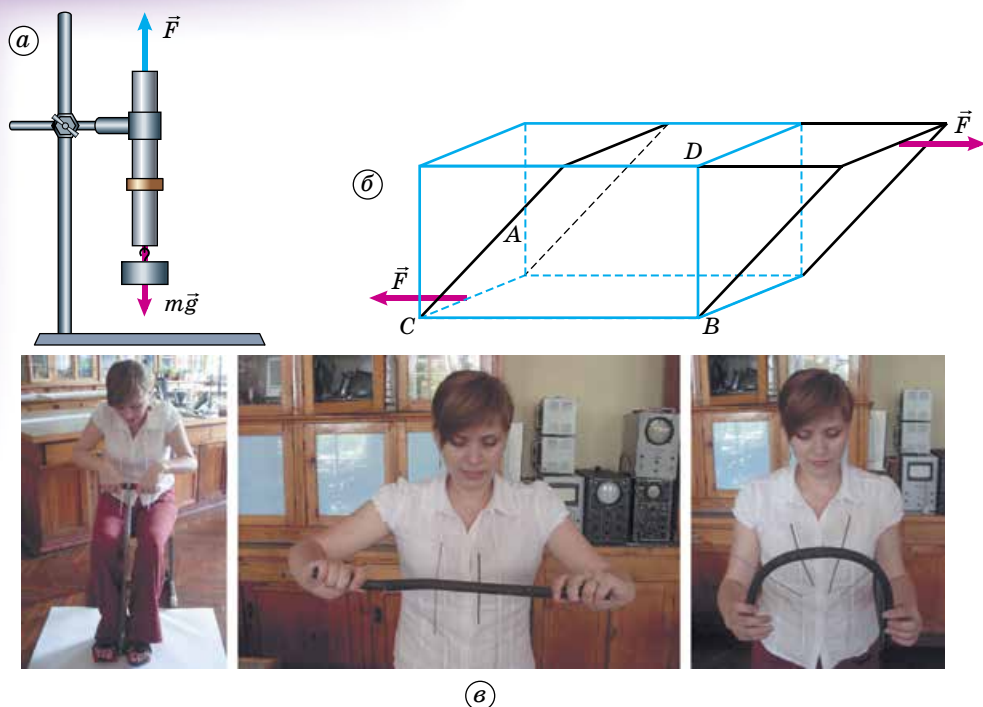
**Пластична деформація** – деформація, яка не зникає після припинення дії зовнішніх сил.

Властивість матеріалу зберігати придбану під дією зовнішніх сил форму, називають **пластичністю**.

Пружні деформації твердих тіл різноманітні. За характером дії зовнішніх сил усі деформації твердих тіл ділять на чотири основні види: **розтяг (стиск), зсув, кручення і згин**.

**Дослід 2.** Затиснемо в лапці штатива гумовий стержень, посередині якого щільно насаджено металеву шайбу (мал. 126, а). До нижнього кінця стержня підвісимо вантаж невеликої маси. На стержень діють дві рівні за значенням і протилежно напрямлені сили: сила тяжіння вантажу  $m\vec{g}$  і сила пружності лапок штатива  $\vec{F}$ . У результаті стержень розтягується вздовж своєї осі – його довжина збільшується, а поперечні розміри скорочуються і раніше щільно надіта на стержень шайба легко зісковзує вниз.

**Збільшення довжини тіла (стержня) при дії на нього двох рівних за модулем, але протилежних за напрямком сил називають деформацією розтягу.**



Мал. 126. Демонстрація деформації тіл

Деформацією розтягу випробовують різні троси, ланцюги, канати, струни музичних інструментів, багато груп м'язів під час виконання роботи або фізичних вправ тощо.

Якщо сили, що діють на тіло, напрямлені вздовж однієї прямої назустріч одна одній, то довжина тіла зменшується, а його поперечні розміри збільшуються.

**Зменшення довжини тіла під дією двох рівних за значенням і напрямлених назустріч одна одній сил називають деформацією стиснення.**

Деформації стиснення піддаються стовбури дерев, ніжки столів і стільців, опорні колони житлових і промислових будівель, нижні кінцівки людини під час ходьби, зуби під час пережовування їжі тощо.

Деформація зсуву виникає під дією двох паралельних сил, напрямлених у протилежні боки (мал. 126, б). У цьому випадку паралельно розташовані шари тіла зміщуються один відносно одного.

**Зсув паралельних шарів тіла один відносно одного під дією двох паралельних, але протилежно напрямлених сил називають деформацією зсуву.**

Деформація зсуву виникає і в тому випадку, якщо тіло одночасно стискати і розтягувати у двох взаємно перпендикулярних напрямках  $AB$  і  $CD$  (мал. 126, б). Деформації зсуву піддаються болти, заклепки, а також усі тіла, які переміщуються одне відносно одного із значним тертям.

**Дослід 3.** Візьмемо гумову трубку, у яку на однакових відстанях вставимо тонкі металеві стержні (мал. 126, в). Повертаючи руками вільні кінці трубки навколо її осі, ми помічаємо, що стержні при цьому зміщуються паралельно один одному, розташовуючись по гвинтовій лінії.



**Поворот паралельних шарів тіла один відносно одного під дією двох сил називають *деформацією кручення*.**

Деформації кручення піддаються вали двигунів під час обертання, гвинти і шурупи під час загвинчування, циліндричні пружини динамометра, м'язи голови або всього тулуба.

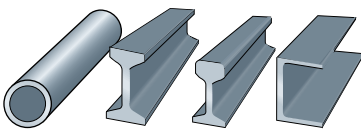
**Дослід 4.** Просунемо через товстий гумовий стержень на однакових відстанях тонкі металеві спиці і зігнемо його так, як показано на малюнку 126, в.

**Згинання (вигинання) тіла під дією сили, направленої перпендикулярно до його осі, називають *деформацією поперечного згину*.**

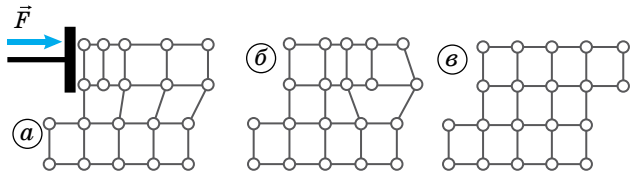
З малюнка 126, в видно, що нижня частина стержня розтягується (спиці розходяться віялоподібно), а верхня, навпаки, стискається (спиці сходяться), причому, що ближче даний шар до краю стержня, то він більший. Звідси випливає, що між двома найдеформованішими шарами міститься такий шар, який не піддається ні розтягуванню, ні стисненню; його називають **нейтральним шаром**. Матеріал нейтрального шару ніяких деформацій практично не зазнає і, отже, не піддається жодним навантаженням. Це дуже важливо для техніки. Так, широкі балки прямокутного перерізу, що піддаються згину, замінили однотоавровими (у вигляді літери Т) або двотоавровими балками (мал. 127), а суцільні металеві стержні трубами. Що значно економить матеріали, істотно зменшує вагу машин й інших технічних конструкцій і зменшує їх вартість.

Механізм пружних деформацій такий: під дією зовнішніх сил відбувається зсув частинок твердого тіла відносно їх рівноважних положень. Наприклад, під час розтягування тіла відстані між сусідніми частинками кристала збільшуються і сили притягання і відштовхування між ними зменшуються, але по-різному, унаслідок чого сили притягання починають переважати над силами відштовхування. Тому при знятті зовнішнього навантаження частинки кристала повертаються в початковий рівноважний стан. Форма і розміри тіла відновлюються. Під час стиснення, навпаки, відстань між частинками кристала зменшується, сили притягання і відштовхування збільшуються. Але при цьому сили відштовхування збільшуються швидше, ніж сили притягання, і частинки кристала під час зняття зовнішнього навантаження відштовхуються одна від одної і повертаються в початковий стан.

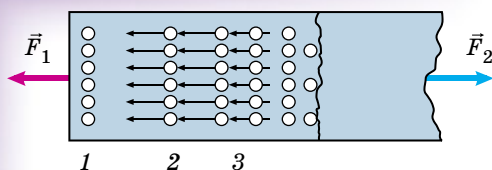
При пластичній деформації під дією зовнішніх сил одночасно розривається кілька зв'язків між частинками і один шар кристала починає ковзати відносно іншого (мал. 128, а, б). Це відбувається доти, доки частинки знову не займуть таке положення, при якому всередині кристала всі зв'язки знову відновляються (мал. 128, в). Нове положення частинок усередині кристала є рівноважним, як і первинне, і тому, коли зняти навантаження, всередині кристала не виникає сил, які повертали б частинки в попереднє положення: форма і розміри твердого тіла не відновлюються.



Мал. 127. Різні види балок



Мал. 128. Пояснення пластичних деформацій



Мал. 129. Механізм пружних деформацій

Якщо сили діють у напрямку поздовжньої осі тіла і напрямлені у протилежні боки назовні (мал. 129), то виникає деформація розтягу. Під час розтягу тіло видовжується в поздовжньому напрямку і скорочується в поперечному напрямку.

Якщо початкова довжина стержня  $l$ , а довжина після розтягу  $l_1$ , то  $\Delta l = l_1 - l$  називають **абсолютним видовженням**. Відношення абсолютного видовження до початкової довжини  $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$  називають **відносним видовженням**.

Відносне видовження показує значення абсолютного видовження, яке припадає на кожен одиницю початкової довжини тіла, що деформується.

Нехай стержень розтягується під дією двох сил  $\vec{F}_1$  і  $\vec{F}_2$  (мал. 129). Між частинками, з яких складається стержень, як відомо, одночасно діють і сили притягання, і сили відштовхування. Під час розтягування стержня відстань між частинками збільшується і сили притягання стають більшими за сили відштовхування. Тому шар 1, віддаляючись від шару 2, тягне його за собою; у свою чергу, шар 2 тягне за собою шар 3, і, таким чином, дія зовнішніх сил  $\vec{F}_1$  і  $\vec{F}_2$  передається вздовж усього стержня. У середині деформованого стержня в кожному його перерізі виникають сили – **сили внутрішньої напруги**.

Величину, що вимірюється силою внутрішньої напруги, яка діє на одиницю площі поперечного перерізу деформованого тіла, називають **механічною напругою**:  $\sigma = \frac{F}{S}$ .

Механічну напругу характеризує розподіл сил внутрішньої напруги в деформованому тілі.

За одиницю механічної напруги в СІ приймають таку напругу всередині деформованого тіла, за якої на площу  $1 \text{ м}^2$  діє сила  $1$  ньютон ( $1 \text{ Н/м}^2 = 1 \text{ Па}$ ). Названо на честь Блеза Паскаля (1623–1662) – французького фізика, математика, філософа.

Механічна напруга пружно деформованого тіла залежить від матеріалу, з якого воно виготовлене, і значення відносного видовження. В однакових за розмірами тіл, але виготовлених з різних речовин, за одного й того самого відносного видовження виникає різна механічна напруга.

Механічну напругу, що виникає в речовині за відносного видовження називають **модулем пружності  $k$** .

Що більший модуль пружності речовини  $k$ , то більша механічна напруга виникає в ній:  $\sigma \sim k$ .

Досліди, які провів англійський учений **Роберт Гук** (1635–1703), показали, що більше значення відносної деформації тіла:  $\sigma \sim \varepsilon$ , то більша механічна напруга.

Отже, механічна напруга пружно деформованого тіла прямо пропорційна відносному видовженню і модулю пружності речовини, з якої його виготовлено:  $\sigma = k\varepsilon$ .

Це співвідношення має назву **закон Гука**.

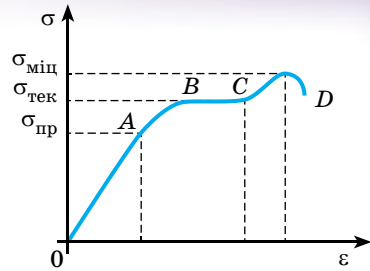
Для поздовжнього стиснення або розтягу модуль пружності  $k$  має назву **модуль Юнга** (на честь **Томаса Юнга** (1773–1829) – англійського фізика, лікаря й астронома), позначають його літерою  $E$ . Тоді закон Гука записують так:  $\sigma = E\varepsilon$ .

Враховуючи  $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$  і  $\sigma = E\varepsilon$ , закон Гука можна записати так:  $\sigma = E \frac{\Delta l}{l}$ .

Якщо абсолютне видовження дорівнює початковій довжині  $\Delta l = l_0$  (довжина тіла, що деформується, збільшується вдвічі), то з останнього співвідношення випливає, що  $E = \sigma$ .

Таким чином, модуль Юнга є такою механічною напругою, яка виникає в матеріалі під час збільшення початкової довжини тіла у 2 рази.

Закон Гука встановлює залежність між деформацією і механічною напругою аналітично. Але цю залежність можна виразити наочно у вигляді графіка – **діаграми розтягу**. Початкова ділянка кривої  $OA$  (мал. 130) є прямою лінією: механічна напруга тут прямо пропорційна до відносного видовження  $\varepsilon$ . Це область пружних деформацій. Тільки в області пружних деформацій виконується закон Гука і тверде тіло виявляє властивості пружності.



Мал. 130. Графік залежності механічної напруги від відносного видовження

**Найбільшу механічну напругу, при якій деформації тіла залишаються пружними, називають межею пружності  $\sigma_{пр}$ .**

Межі міцності та модулі пружності різних матеріалів подано в таблиці 6.

Межі міцності та модулі пружності речовин

Таблиця 6

| Речовина | Межа міцності, МПа | Модуль пружності, ГПа |
|----------|--------------------|-----------------------|
| Алюміній | 100                | 70                    |
| Мідь     | 400                | 120                   |
| Олово    | 20                 | 50                    |
| Свинець  | 15                 | 15                    |
| Срібло   | 140                | 80                    |
| Сталь    | 500                | 200                   |
| Чавун    | 100                | –                     |

Так, межа міцності для міді становить 400 МПа, для срібла – 140 МПа, для сталі – 500 МПа. Якщо механічна напруга перевищить ці значення, то після припинення дії зовнішніх сил тіло вже не відновить свою попередню форму або розміри.

Ділянка кривої  $ABCD$  (мал. 130) характеризує область пластичних деформацій; тут між  $\sigma$  і  $\varepsilon$  немає лінійної (прямо пропорційної) залежності. На ділянці  $AB$  відносно видовження збільшується швидше за механічну напругу і за деякого її значення  $\sigma_{тек}$  виникає **явище текучості** твердих тіл: механічна напруга не змінюється, а видовження збільшується (ділянка кривої  $BC$ ). Тверде тіло тече подібно до дуже в'язкої рідини.

Механічну напругу, за якої виникає явище текучості твердого тіла, називають **межею текучості**.

Досягши межі текучості, на стержні з'являється місцеве звуження – шийка. Починаючи із цього моменту, деформації піддається тільки шийка, а решта всього матеріалу стержня практично ніяких деформацій не зазнає. Тому навіть за незначного збільшення напруги незабаром настає розрив. У момент, безпосередньо перед розривом, напруга в матеріалі сягає максимального значення  $\sigma_{\text{міц}}$  – це **межа міцності**. Межа міцності залежить від характеру деформації і роду матеріалу (табл. 6).

Розраховуючи конструкції, допустиму напругу вибирають так, щоб вона складала певну частку від межі міцності.

**Число, яке показує, у скільки разів межа міцності більша за допустиму напругу, називають запасом міцності:**  $\chi = \frac{\sigma_{\text{міц}}}{\sigma_d}$ .

Зазвичай для сталі запас міцності вибирають у межах від 2,5 до 4, для заліза – від 4 до 5, для чавуну – від 6 до 8, для дерева – від 8 до 10. Вибираючи запас міцності, ураховується характер випробовуваного навантаження (постійне, змінне, ударне тощо), тип споруди і економічність конструкції.

Межа міцності багатьох матеріалів (мідь, цинк, залізо, незагартована сталь) значно більша за межу пружності. Такі матеріали мають достатньо широкі області пружних і пластичних деформацій, їх називають **в'язкими матеріалами**.

Проте разом із цим існує і цілий ряд матеріалів (чавун, скло, мармур тощо), у яких межа міцності і межа пружності майже однакові. Такі матеріали називають **крихкими**. У них області пластичних деформацій практично відсутні і руйнування настає без появи залишкових пластичних деформацій. Матеріали, у яких відсутня область пружних деформацій, називають **пластичними** (віск, глина, пластилін тощо).

Крім пружності і пластичності, в'язкості і крихкості, тверді тіла ще розрізняють і за твердістю.

**Твердість** – властивість тіла чинити опір проникненню в нього іншого тіла.

Проведемо вздовж скляної пластинки лінію спочатку гострим мідним стержнем, а потім алмазом. Мідний стержень ніякого сліду на скляній пластинці не залишить, а алмаз залишить на склі глибоку подряпину. Отже, скло твердіше за мідь, а алмаз твердіший за скло.

Для визначення твердості матеріалів зазвичай користуються десятибальною шкалою твердості. У цій шкалі твердість усіх мінералів порівнюється з твердістю десяти спеціально вибраних мінералів. Шкала твердості: тальк – 1, гіпс – 2, кальцит – 3, флюорит – 4, апатит – 5, ортоклаз – 6, кварц – 7, топаз – 8, корунд – 9, алмаз – 10. Знати твердість матеріалів потрібно для виготовлення різного ріжучого інструменту: ножів, ножиць, різців, свердл тощо.



## ЗАПИТАННЯ ДО ВИВЧЕНОГО

1. Від яких причин залежить деформація тіла?
2. Чим відрізняються пружні деформації від пластичних?
3. Яке значення має пружність і пластичність матеріалів для техніки?
4. У чому полягає закон Гука? З яких дослідних фактів він випливає?
5. Що характеризує модуль пружності матеріалу?
6. У чому полягає зміст твердження, що модуль пружності сталі у 2,5 рази більший за модуль пружності алюмінію?
7. Як досліджують матеріал на розтяг? Як оцінюють значення навантаження і деформації зразка під час дослідження на розтяг?

8. З якою метою використовують діаграму розтягу матеріалу?
9. Як оцінюють пластичність матеріалів?
10. У чому відмінність крихких матеріалів від пластичних?
11. Чому розрахунок на міцність проводиться по допустимих напругах, а не по межі міцності?
12. Від яких причин залежить вибір запасу міцності?



Дослідіть, як враховують різні види деформацій на будівництві.



## ЗАДАЧІ ТА ВПРАВИ

### Розв'язуємо разом

1. Кубик масою 0,02 кг, який змочується водою, плаває на поверхні води. Довжина ребра кубика 0,03 м. На яку відстань від поверхні води занурена нижня грань кубика?

### Розв'язання

Архімедова сила  $F_A = \rho g V = \rho g a^2 x$ , що діє на кубик і напрямлена вгору, зрівноважує силу тяжіння  $mg$ , що діє на кубик, та силу поверхневого натягу  $F = \sigma l = 4a\sigma$ , яка напрямлена вниз.

Запишемо проекції сил на вісь  $Ox$ , напрямлену вгору, отримаємо:

$$a^2 x \rho g - mg - 4a\sigma = 0. \text{ Звідки: } x = \frac{mg + 4a\sigma}{a^2 \rho g}.$$

Підставивши значення відомих величин, отримаємо:

$$E = \frac{0,02 \text{ кг} \cdot 9,81 \text{ м/с}^2 + 4 \cdot 0,03 \text{ м} \cdot 0,0728 \text{ Н/м}}{0,03 \text{ м} \cdot 0,03 \text{ м} \cdot 1000 \text{ кг/м}^3 \cdot 9,81 \text{ м/с}^2} \approx 0,023 \text{ м}.$$

Сили поверхневого натягу вносять поправку близько 1 мм.

**Відповідь:** 0,023 м.

2. На дротині діаметром 0,7 мм і завдовжки 1 м висів тягар масою 33 кг. Потім тягар відвели вбік до горизонтального положення дротини і відпустили. Чи витримає дротина коливання цього тягара, якщо межа міцності дротини  $4 \cdot 10^8 \text{ Па}$ ?

### Розв'язання

Під час руху тягара по дузі кола радіусом  $l$  на нього діють дві сили: сила тяжіння  $mg$  і сила натягу дротини  $F_n$ . За другим законом динаміки,

$$F_n - mg = \frac{mv^2}{l}, \text{ звідки } F_n = m \left( g + \frac{v^2}{l} \right).$$

Швидкість тягара в найнижчій точці траєкторії знайдемо із закону збереження енергії. Відведений до горизонтального положення тягар мав потенціальну енергію  $mgl$ , яка в найнижчій точці траєкторії перетворилася в кінетичну енергію тягарця  $\frac{mv^2}{2}$ , тобто  $mgl = \frac{mv^2}{2}$ , звідки  $v^2 = 2gl$ .

Тоді  $F_n = m(g + 2g) = 3mg$ .

Ця сила створює у дротині напругу  $\sigma = \frac{F_n}{S} = \frac{3mg}{\pi d^2/4} = \frac{12mg}{\pi d^2}$ ;  $\sigma \approx 2,5 \cdot 10^9 \text{ Па}$ .

Ця напруга значно перевищує межу міцності матеріалу дротини, отже, дротина не витримає навантаження і обірветься раніше, ніж тягар устигне дійти до нижнього положення.

**Відповідь:**  $2,5 \cdot 10^9 \text{ Па}$ .

## Рівень А

**491.** Через трубку з речовиною, що вбирає вологу, пропустили 10 л повітря. У результаті маса трубки збільшилася на 300 мг. Визначте абсолютну вологість повітря.

**492.** Виміряйте об'єм вашого класу. Скільки кілограмів води міститься в повітрі у вигляді пари за даної температури, якщо пара насичена?

**493.** У 4 м<sup>3</sup> повітря за температури 16 °С міститься 40 г водяної пари. Визначте відносну вологість повітря.

**494.** Покази сухого термометра у психрометрі 15 °С, вологого – 12 °С. Визначте відносну вологість повітря.

**495.** Як ненасичену пару можна перетворити в насичену?

**496.** Вода легша від піску. Чому ж вітер може підняти хмари піску, але дуже мало водяних бризок?

**497.** На поверхню води покладіть два сірники і шматком мила торкніться води між ними. Повторіть дослід, торкнувшись води шматком цукру. Результати досліду поясніть.

**498.** На яку висоту підніметься вода в капілярі діаметром 1 мм?

**499.** На яку висоту підніметься вода у ґрунті внаслідок його пористості, якщо діаметр ґрунтових капілярів  $7,5 \cdot 10^{-5}$  м, а вода повністю змочує ґрунт?

190

**500.** У капілярній трубці, радіус якої 0,5 мм, рідина піднялася на висоту 11 мм. Визначте густину цієї рідини, якщо коефіцієнт поверхневого натягу становить 0,022 Н/м.

**501.** Яку роботу треба виконати, щоб надуту мильну бульбашку радіусом 4 см? Коефіцієнт поверхневого натягу мильного розчину дорівнює 40 мН/м.

**502.** Чому волейбольна сітка дуже натягується після дощу?

**503.** Чому крапля спирту розтікається по склу, а крапля ртуті набирає форму кулі?

**504.** Чому навколо окремих снігових кучугур, які навесні ще зберігаються на полях, запас води у ґрунті більший, ніж подалі від них?

**505.** Вода піднялася в капілярній трубці на 3 см. Визначте внутрішній радіус трубки, вважаючи, що вода змочує її повністю.

**506.** Твердість матеріалу можна встановити двома способами: учавлюванням у нього сталевий кульки і нанесенням подряпини. Який із способів характеризує пластичність, а який – крихкість?

**507.** Чому під час недбалого поводження із зошитом кутики аркушів загинаються і їм неможливо надати початкової форми?

**508.** Визначте абсолютне видовження сталевий стержня завдовжки 5 м і площею поперечного перерізу  $8 \cdot 10^{-5}$  м<sup>2</sup> під дією вантажу вагою 1,96 кН.

**509.** Яку силу треба прикласти до сталевий дроту завдовжки 3,6 м і площею поперечного перерізу  $10^{-6}$  м<sup>2</sup>, щоб видовжити його на 2 мм?

**510.** Під дією якої сили, спрямованої вздовж осі стержня, у ньому виникає напруга  $1,5 \cdot 10^8$  Па? Діаметр стержня 0,4 см.

**511.** Дріт завдовжки 5,4 м під дією вантажу видовжився на 2,7 мм. Визначте абсолютне та відносне видовження дроту.

**512.** Абсолютне видовження стержня дорівнює 1 мм, а відносне – 0,001. Якою була довжина недеформованого стержня?

**513.** Яка сила діє на лопать паровий турбіни, площа перерізу якої становить 16 см<sup>2</sup>, якщо механічна напруга в лопаті дорівнює 25 кН/см<sup>2</sup>?



**514.** Штмпують монету діаметром 24 мм. Яка сила удару по заготовці? Межа текучості металу  $200 \text{ Н/мм}^2$ .

### Рівень Б

**515.** У який період доби влітку відносна вологість повітря вища за однавової абсолютної вологості?

**516.** Водяну пару, що має температуру  $27^\circ\text{C}$  і тиск 15 мм рт. ст., без зміни об'єму охолоджують до  $17^\circ\text{C}$ . Який тиск має пара за цієї температури? Якою стане ця пара?

**517.** Пара має температуру  $27^\circ\text{C}$  і тиск 10 мм рт. ст. Що це за пара? Якою стане пара, коли її об'єм зменшиться від 2 до 0,5 л, а температура знизиться до  $7^\circ\text{C}$ ?

**518.** Густина насиченої пари ртуті за температури  $20^\circ\text{C}$  становить  $0,02 \text{ г/м}^3$ . Визначте тиск пари за цієї температури.

**519.** Чому за літаком, що летить на великій висоті, утворюється слід?

**520.** Температура повітря  $16^\circ\text{C}$ , точка роси  $6^\circ\text{C}$ . Яка абсолютна і відносна вологість повітря?

**521.** За температури  $24^\circ\text{C}$  повітря має відносну вологість 70 %. Скільки води додатково випарується в  $1 \text{ м}^3$  такого повітря?

**522.** У повітрі об'ємом  $60 \text{ м}^3$  є водяна пара масою 510 г. Температура повітря  $19^\circ\text{C}$ . Визначте тиск водяної пари і відносну вологість повітря.

**523.** За температури  $15^\circ\text{C}$  відносна вологість повітря в кімнаті дорівнює 80 %. Який тиск водяної пари?

**524.** Визначте відносну вологість повітря у класі, якщо його температура  $18^\circ\text{C}$ , а точка роси  $14^\circ\text{C}$ . Чи комфортні такі умови для навчання?

**525.** Яку роботу проти сил поверхневого натягу треба виконати, щоб рухому перекладину дротяної П-подібної рамки, на якій утворилася мильна плівка, перемістити на 3 см? Довжина перекладини 6 см.

**526.** Для визначення коефіцієнта поверхневого натягу води використали піпетку, діаметр вихідного отвору якої 2 мм. Маса 40 крапель, як виявилось, дорівнює 1,9 г. За цими даними визначте коефіцієнт поверхневого натягу води.

**527.** Тиск, створений поверхневим шаром, дорівнює для води  $10 \cdot 10^8 \text{ Па}$ , для спирту  $2,4 \cdot 10^8 \text{ Па}$ , для ефіру  $1,4 \cdot 10^8 \text{ Па}$ . Чому ж такий великий тиск не розчавить навіть бульбашку повітря, яка міститься в рідині?

**528.** Крапля води витікає з вертикальної скляної трубки діаметром 1 мм. Визначте вагу краплі, якщо температура води  $20^\circ\text{C}$ .

**529.** 1820 мг мінеральної олії пропустили через піпетку і отримали 152 краплі. Визначте коефіцієнт поверхневого натягу олії, якщо діаметр шийки піпетки 1,2 мм.

**530.** У дні чайника є круглий отвір діаметром 0,1 мм. До якої висоти в чайник можна налити воду, щоб вона не виливалася крізь отвір? Чи зміниться ця висота, якщо воду в чайнику підігріти?

**531.** Висота піднімання води по стеблу рису в 15 разів більша, ніж у ґрунті. Визначте діаметр капіляра рису, якщо діаметр капіляра ґрунту 0,3 мм.

**532.** У двох капілярних трубках різного діаметра, занурених у воду, встановилася різниця рівнів 2,6 см. Коли ці самі трубки занурили у спирт, то різниця рівнів стала 1 см. Знаючи коефіцієнт поверхневого натягу води, визначте коефіцієнт поверхневого натягу спирту.

**533.** Вода налита у сполучені посудини різних діаметрів. Широку посудину закривають корком. Чи зміниться рівень води в колінах посудини?

**534.** Який запас міцності забезпечено причіпному пристрою тепловоза, якщо його поперечний переріз  $100 \text{ см}^2$ , межа міцності  $500 \text{ МПа}$ , а сила тяги тепловоза  $75 \text{ кН}$ ?

**535.** Стіну якої висоти можна вимурувати із цегли, якщо запас міцності дорівнює  $6$ ? Межа міцності цегли  $6 \cdot 10^6 \text{ Па}$ , густина –  $2 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ .

**536.** Вантаж масою  $100 \text{ кг}$  треба підвісити на дроті, переріз якого становить не більше ніж  $10 \text{ мм}^2$ . З якого металу треба взяти дріт, щоб запас його міцності був у  $5$  разів більший?

**537.** До нижнього кінця вертикального дроту завдовжки  $5 \text{ м}$  і площею поперечного перерізу  $2 \text{ мм}^2$  підвісили вантаж масою  $5,1 \text{ кг}$ , унаслідок чого дріт видовжився на  $0,6 \text{ мм}$ . Визначте модуль Юнга для матеріалу дроту.

**538.** Дріт завдовжки  $3 \text{ м}$  і діаметром  $0,8 \text{ мм}$  висить вертикально. До вільного кінця дроту підвісили вантаж масою  $5 \text{ кг}$ . Довжина дроту збільшилася на  $0,6 \text{ мм}$ . Визначте напругу, відносне видовження дроту і модуль пружності.

**539.** Якого діаметра треба взяти сталевий стержень, щоб під час навантаження  $25 \text{ кН}$  механічна напруга дорівнювала  $60 \text{ МПа}$ ? Яке абсолютне видовження стержня, якщо його початкова довжина  $200 \text{ см}$ ?

**540.** Із скількох сталевих дротин діаметром  $2 \text{ мм}$  має бути виготовлено трос, розрахований на піднімання вантажу масою  $3,14 \cdot 10^3 \text{ кг}$ , якщо запас міцності становить  $2,9$ , а межа міцності сталі дорівнює  $5,8 \cdot 10^8 \text{ Па}$ ?

**541.** Стержень з поперечним перерізом  $5 \text{ см}^2$  під дією підвищеного до нього вантажу масою  $1200 \text{ кг}$  видовжився на  $0,012 \%$  від довжини, яку мав у недеформованому стані. Визначте модуль Юнга матеріалу стержня, уважаючи деформацію розтягу пружною.

### Є над чим замислитися

**542.** Дві циліндричні посудини однакової висоти  $H$  з'єднано тонким шлангом знизу. Посудину  $1$  щільно закрито кришкою. Спочатку в посудині міститься сухе повітря за тиску  $p_1$ . Потім посудину  $2$  за сталої температури вщерть наповнюють водою, при цьому в посудині  $1$  вода піднімається на висоту  $h$  (мал. 131). Визначте тиск насиченої пари за температури досліду.

**543.** У класі за температури  $20^\circ\text{C}$  відносна вологість повітря  $20 \%$ . Воду якої маси треба додатково випарувати для збільшення відносної вологості до  $50 \%$ , якщо об'єм класу  $40 \text{ м}^3$ ?

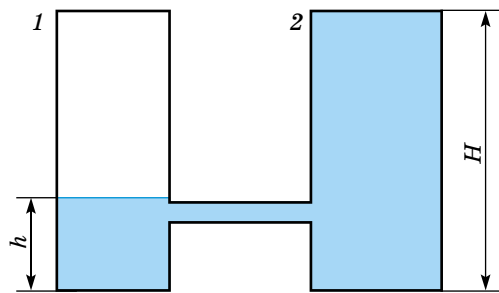
**544.** Як зміниться відносна вологість повітря під час провітрювання кімнати, якщо в ній температура вища, ніж зовні? Чому?

**545.** Температура повітря ввечері  $18^\circ\text{C}$ , а його відносна вологість  $65 \%$ . Уночі температура знизилася до  $4^\circ\text{C}$ . Чи випаде роса? Якщо випаде, то

скільки пари конденсується з кожного кубічного метра повітря?

**546.** У посудині за температури  $20^\circ\text{C}$  і тиску  $760 \text{ мм рт. ст.}$  міститься повітря, насичене водяною парою. Який тиск сухого повітря в цій посудині? Який буде тиск повітря, насиченого водяною парою, якщо об'єм зменшити у  $2$  рази за незмінної температури?

**547.** У циліндрі під поршнем міститься  $0,4 \text{ г}$  водяної пари за тем-



Мал. 131. До задачі 542

ператури 290 К. Ця пара займає об'єм 40 л. Що треба зробити, щоб пара стала насиченою?

**548.** Над поверхнею, площа якої  $5 \text{ км}^2$ , шар повітря завтовшки 1000 м має температуру  $20^\circ \text{C}$  і відносну вологість 73 %. Повітря охолодилося до  $10^\circ \text{C}$ . Визначте масу дощу, що випав, і товщину шару опадів на поверхні землі.

**549.** Поверхневий шар рідини дуже схожий на розтягнуту гумову плівку. Чи справді ця схожість між ними така суттєва? Чи можна, зокрема, до поверхневого шару рідини як до пружно деформованої плівки застосувати закон Гука?

**550.** Чи правильно, що невеликі краплі рідини на горизонтальній поверхні опори мали б сферичну форму, якби на них не діяла сила притягання Землі?

**551.** У закритій посудині є рідина з плоскою поверхнею і сферична крапля тієї самої рідини. Чи однаковий буде тиск насиченої пари над плоскою поверхнею рідини і над поверхнею краплі? Що буде з краплею рідини через деякий час?

**552.** Дві краплі ртуті радіусом 1 мм кожна злилися в одну велику краплю. Яка енергія виділиться при цьому злитті? Уважайте процес ізотермічним.

**553.** Повітряна бульбашка діаметром 2 мкм міститься у воді біля самої її поверхні. Визначте густину повітря в бульбашці, якщо повітря над поверхнею води перебуває за нормальних умов.

**554.** Різниця  $\Delta h$  рівнів рідини в колінах U-подібної трубки дорівнює 23 мм. Діаметри  $d_1$  і  $d_2$  каналів у колінах трубки дорівнюють відповідно 2 і 0,4 мм. Густина рідини дорівнює  $0,8 \text{ г/см}^3$ . Визначте поверхневий натяг рідини.

**555.** Капілярна трубка діаметром 0,5 мм наповнена водою. На нижньому кінці трубки вода повисла у вигляді краплі. Цю краплю можна прийняти за частину сфери радіусом 3 мм. Визначте висоту стовпчика води у трубці.

**556.** Широке коліно U-подібного ртутного манометра має діаметр 4 см, а вузьке – 0,25 см. Різниця рівнів ртуті в обох колінах дорівнює 200 мм. Визначте тиск, який показує манометр, прийнявши до уваги поправку на капілярність.

**557.** У металеву посудину з підфарбованою рідиною вставлено тоненьку скляну трубочку. Якщо підігрівати посудину, то стовпчик рідини спочатку знизиться, а потім підвищиться. Поясніть це явище.

**558.** Крапля ртуті масою 1 г розбивається на 100 однакових крапель. Визначте, на скільки збільшиться при цьому енергія поверхневого шару ртуті.

**559.** Якого виду деформація виникає в циліндричній пружині шкільного динамометра під час зважування? Відповідь поясніть.

**560.** Оцініть, якої найбільшої висоти  $h$  на поверхні землі можуть бути гори. Де вищі гори: на Землі чи на Марсі? Чому?

**561.** Під час океанічних досліджень, щоб узяти пробу ґрунту, на дно океану на сталевому тросі опускають спеціальний прилад. Яка максимальна глибина занурення приладу, якщо межа міцності сталі  $3,4 \cdot 10^8 \text{ Па}$ ? Масу та об'єм приладу до уваги не брати.

**562.** Тіло масою 6 т піднімають із прискоренням  $0,2 \text{ м/с}^2$ . Матеріал троса втримує максимальну механічну напругу 800 МПа. Який має бути діаметр троса при запасі міцності 5?

**563.** Який найменший завдовжки має бути свинцевий дріт, щоб він розірвався від власної ваги, якщо його вертикально підвісили за один кінець? Межа міцності свинцю  $1,96 \cdot 10^7$  Па.

**564.** Гиря масою 10 кг, прив'язана до дротини, обертається із частотою 2 Гц навколо вертикальної осі, яка проходить через кінець дротини, ковзаючи при цьому без тертя по горизонтальній поверхні. Довжина дротини дорівнює 1,2 м, а площа поперечного перерізу дорівнює  $2 \text{ мм}^2$ . Визначте напругу металу дротини. Масою знехтувати.

**565.** До сталевій дротини довжиною 1 м і радіусом 1 мм підвісили вантаж масою 100 кг. Визначте роботу розтягу дротини.

**566.** Дзеркальце гальванометра підвішено на дротині завдовжки 10 см і діаметром 0,01 мм. Визначте закручуючий момент, який відповідає відхиленню «зайчика» на 1 мм по шкалі, яка віддалена на 1 м від дзеркальця. Модуль зсуву матеріалу дротини  $4 \cdot 10^{10}$  Па.

**567.** У горизонтально розташованому циліндрі завдовжки 1 м може ковзати без тертя тонкий поршень. Поршень прикріплено до дна циліндра за допомогою двох однакових пружин жорсткістю 2 кН/м кожна. Із циліндра викачано повітря, поршень міститься посередині циліндра, а пружини перебувають у недеформованому стані. На яку відстань зміститься поршень, якщо одну із частин циліндра заповнити молекулярним азотом, маса якого дорівнює 7 г, а температура  $7^\circ\text{C}$ ?

## ПЕРЕВІРТЕ СВОЮ КОМПЕТЕНТНІСТЬ

### Контрольні запитання

1. У скільки разів змінюється тиск одноатомного газу в результаті зменшення його об'єму в 3 рази і збільшення середньої кінетичної енергії його молекул у 2 рази?

2. Яке відношення тисків азоту і кисню однакової густини за однакової температури?

3. Порівняйте тиск кисню і водню за однакових концентрацій молекул і однакових середніх квадратичних швидкостей їх руху.

4. Об'єм і маса газу сталі, а тиск збільшується швидше, ніж температура. Чи інертний це газ?

5. Газ зменшувався в об'ємі при  $T = \text{const}$  і  $p = \text{const}$ . Чи можливо це? Чи можна цей процес зміни стану газу описати рівнянням  $\frac{pV}{T} = \text{const}$ ? Чому?

6. Чому під час накачування камери велосипедного колеса насос нагрівається?

7. Чи можна здійснити повільний адіабатний процес у скляній колбі, калориметрі, посудині Дьюара?

8. Будь-яка теплова машина складається з трьох основних частин. Назвіть ці частини.

9. Чому у двигуні внутрішнього згорання такти стиснення і робочого ходу адіабатні, а такти всмоктування й випускання не є адіабатними процесами?

10. Чому бензин, який надходить до циліндра двигуна внутрішнього згорання, випаровується головним чином не під час такту всмоктування, а під час такту стиснення?

11. Що більше циліндрів у двигуні внутрішнього згорання, то менше за розмірами в нього махове колесо. Чому?

12. За яких умов підвищення абсолютної вологості повітря може супроводжуватися зниженням відносної вологості?

13. Чому крапля води на розжареній плиті починає підскакувати?
14. Що легше (за інших однакових умов) –  $1 \text{ м}^3$  сухого чи  $1 \text{ м}^3$  вологого повітря?
15. Чи існує у твердих тілах подібно до рідин поверхневий натяг?

### ЩО Я ЗНАЮ І ВМІЮ РОБИТИ

#### Я вмію робити доведення

1. Доведіть, що для будь-яких ізотермічних переходів між двома адіабатами величина  $\frac{Q}{T}$  стала.

#### Я вмію розв'язувати задачі

2. На що йде теплота, передана газу при ізохорному процесі ( $V = \text{const}$ )?
3. Об'єм газу збільшили в рази: один раз ізотермічно, другий раз ізобарно. У якому із цих випадків газ виконав більшу роботу?
4. На скільки кілометрів шляху  $l$  вистачить  $V = 10$  л бензину для двигуна мотоцикла, що розвиває при швидкості  $v = 54$  км/год потужність  $N = 8,5$  кВт з коефіцієнтом корисної дії  $\eta = 21$  %? Питома теплота згоряння бензину  $q = 4,6 \cdot 10^7$  Дж/кг, густина бензину  $800$  кг/м<sup>3</sup>.
5. Двигун реактивного літака, ККД якого  $20$  %, при польоті зі швидкістю  $1800$  км/год розвиває силу тяги  $82,2$  кН. Визначте витрати газу за  $1$  год польоту і потужність, яка розвивається.

#### Я знаю, які явища і процеси можуть відбуватися у природі

6. Водяний павук-сріблянка будує під водою повітряний палац, переносючи на лапках та черевці бульбашки атмосферного повітря і розміщує їх під купол павутиння, прикріпленого кінцями до водяних рослин. Скільки «рейсів» треба зробити павукові, щоб на глибині  $50$  см побудувати палац об'ємом  $1 \text{ см}^3$ , якщо кожного разу він бере повітря об'ємом  $5 \text{ мм}^3$  за нормального атмосферного тиску?
7. Високу температуру повітря в пустельних місцевостях людина витримує порівняно легко через низьку вологість. Чому спеку важче витримувати за високої вологості?

8. Чому на сирому ґрунті сліди від взуття людини намокають?

#### Я знаю, які прилади використовують у музеях

9. Відвідайте музей або картинну галерею. Які прилади, крім експонатів чи картин, є у приміщенні? Чому саме їх використовують і для чого?

#### Я знаю, які явища і процеси можуть відбуватися в техніці

10. У циліндрі під поршнем є насичена водяна пара без повітря. Чи буде ця пара «пружинити» під час стискання?
11. Якої деформації зазнає пружне тіло, занурене в рідину?
12. Чому раму велосипеда роблять з порожнистих трубок, а не із суцільних стержнів?
13. Чому якщо багаторазово згинати дріт, то він на згині ламається?

#### Я вмію пояснювати результати виконання лабораторних робіт

14. Під час виконання лабораторної роботи для вимірювання коефіцієнта поверхневого натягу рідини  $\sigma = \frac{mg}{\pi nd}$  (методом крапель) отримано такі результати:  $m = 8,35 \pm 0,02$  г,  $n = 100$ ,  $d = 0,35 \pm 0,02$  см. Визначте  $\sigma$ .



## ТЕСТОВІ ЗАВДАННЯ

## Варіант 1

1. Яка кількість речовини міститься в 90 г льоду?

А 5 моль    Б  $5 \cdot 10^3$  моль    В 0,5 моль    Г 50 моль    Д 500 моль

2. Рівняння стану ідеального газу встановлює зв'язок між...

А середньою квадратичною швидкістю руху молекул і температурою газу

Б температурою, об'ємом і тиском газу

В середньою кінетичною енергією молекул і температурою газу

Г об'ємом та кількістю молекул газу

Д тиском, концентрацією та середньою квадратичною швидкістю молекул

3. Який тиск чинить газ за температури  $27^\circ\text{C}$  в посудині місткістю 2 л, якщо він складається з  $1 \cdot 10^{22}$  молекул?

А  $2,1 \cdot 10^3$  Па    Б  $2,1 \cdot 10^4$  Па    В  $2,1 \cdot 10^5$  Па

Г  $3,1 \cdot 10^4$  Па    Д  $4,2 \cdot 10^5$  Па

4. Ідеальний газ нагріли в герметично закритій посудині так, що його тиск збільшився у 1,5 раза. Як при цьому змінилась абсолютна температура газу?

А збільшилась у 3 рази    Б збільшилась на 150 %

В збільшилась у 1,5 раза    Г збільшилась у 2 рази    Д не змінилась

196

5. На малюнку наведено графіки ізохорних процесів, що відбуваються з 1 моль ідеального газу. Порівняйте об'єми газу під час цих процесів.

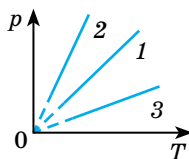
А  $V_1 = V_2 = V_3$

Б  $V_2 > V_1, V_2 > V_3$

В  $V_1 > V_2, V_1 > V_3$

Г  $V_3 > V_1, V_3 > V_2$

Д  $V_1 > V_2, V_1 < V_3$



6. Установіть відповідність між формулою та назвою відповідної фізичної величини.

А  $A' = p\Delta V$

1 внутрішня енергія

Б  $\Delta U = Q + A$

2 нагрівання тіл

В  $\Delta U = \frac{3}{2} \nu R \Delta T$

3 випаровування тіл

Г  $Q = cm\Delta T$

4 другий закон термодинаміки

Д  $Q = rm$

5 робота газу

7. Увідповідніть назву фізичної величини з її позначенням.

А  $U$

1 кількість теплоти

Б  $A$

2 питома теплоємність

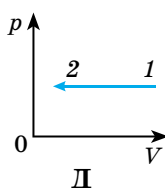
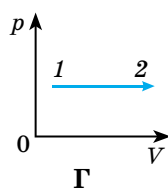
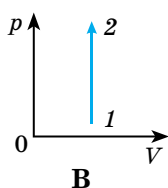
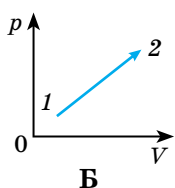
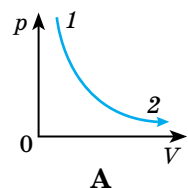
В  $Q$

3 внутрішня енергія

Г  $c$

4 робота

8. Газ переходить зі стану 1 у стан 2. У якому з випадків він не виконує роботу?





9. Адіабатним називають процес, що протікає...

- А за сталого тиску
- Б без зміни температури
- В за відсутності теплообміну з навколишнім середовищем
- Г без виконання роботи
- Д за відсутності зміни внутрішньої енергії

10. Який з перерахованих нижче пристроїв не є тепловим двигуном?

- А парова турбіна
- Б двигун внутрішнього згоряння
- В реактивний двигун
- Г електродвигун
- Д дизельний двигун

11. При ізохорному нагріванні газ отримав кількість теплоти 2 кДж. На скільки збільшилась його внутрішня енергія?

- А 0,5 кДж
- Б 1,5 кДж
- В 2 кДж
- Г 4 кДж
- Д 5 кДж

12. Визначте ККД ідеальної теплової машини, яка працює за циклом Карно, якщо температура нагрівника становить 300 К, а холодильника – 270 К.

- А 10 %
- Б 20 %
- В 30 %
- Г 40 %
- Д 50 %

13. Тепловий двигун отримує від нагрівника 8200 кДж теплоти і віддає холодильнику 6200 кДж. Визначте ККД цього двигуна.

- А 2,4 %
- Б 12 %
- В 24 %
- Г 1,2 %
- Д 36 %

14. Завдяки дії якої сили краплі туману мають форму кулі?

- А тяжіння
- Б тертя
- В поверхневого натягу
- Г архімедової
- Д пружності

15. Відносна вологість повітря у приміщенні 100 %. Яке співвідношення пов'язує покази сухого термометра  $T_1$  і вологого термометра  $T_2$  психрометра?

- А  $T_1 > T_2$
- Б  $T_1 < T_2$
- В  $T_1 = T_2$
- Г  $T_1 = 2T_2$
- Д  $T_2 = 2T_1$

16. Молоко чи вода підніметься вище в капілярних трубках з однаковими внутрішніми радіусами. У скільки разів? Поверхневий натяг води 72 мН/м, молока – 46 мН/м. Густини обох рідин однакові.

- А молоко в 6,3 раза
- Б молоко в 9 разів
- В вода в 1,57 раза
- Г вода в 1,2 раза
- Д на однакову висоту

17. На скільки міліметрів опуститься ртуть у капілярній трубці з внутрішнім діаметром 4 мм порівняно з рівнем ртуті в посудині, якщо наявне повне незмочування капіляра?

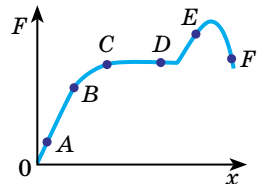
- А 2 мм
- Б 38 мм
- В 20 мм
- Г 3,8 мм
- Д 0,38 мм

18. Розтягуючи сталевий дріт, отримали залежність модуля сили пружності  $F$  від видовження  $x$  (див. мал.). На якій ділянці графіка виконується закон Гука?

- А АВ
- Б ВС
- В CD
- Г DE
- Д EF

19. Визначте механічну напругу, яка виникає у дротині площею поперечного перерізу  $10^{-5} \text{ м}^2$ , якщо на ній підвішено вантаж вагою 100 Н.

- А  $10^{-3} \text{ Па}$
- Б  $10^7 \text{ Па}$
- В 100 Па
- Г  $10^{-7} \text{ Па}$
- Д  $10^3 \text{ Па}$



## Варіант 2

1. Температура тіла визначається...

А масою його молекул (атомів)

Б кількістю молекул у тілі

В середньою кінетичною енергією поступального хаотичного руху атомів чи молекул

Г концентрацією молекул

Д відстанями між молекулами

2. Температура повітря становить  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а за шкалою Кельвіна – це...

А  $0\text{ К}$     Б  $300\text{ К}$     В  $-273\text{ К}$     Г  $273\text{ К}$     Д  $-300\text{ К}$

3. Як зміниться тиск ідеального газу, якщо концентрація його молекул збільшиться втричі, а температура залишиться незмінною?

А збільшиться у 3 рази    Б збільшиться в 9 разів

В зменшиться у 3 рази    Г зменшиться в 9 разів    Д не зміниться

4. Балон об'ємом  $60,2\text{ л}$  наповнено киснем, маса якого дорівнює  $3,2\text{ кг}$ . Визначте концентрацію молекул кисню в балоні.

А  $6,02 \cdot 10^{23}\text{ м}^{-3}$     Б  $10^{27}\text{ м}^{-3}$     В  $10^{26}\text{ м}^{-3}$

Г  $10^{25}\text{ м}^{-3}$     Д  $6,02 \cdot 10^{24}\text{ м}^{-3}$

5. У двох однакових посудинах міститься азот і водень за однакових температур. Визначте відношення тиску азоту до тиску водню, якщо концентрація молекул цих газів однакова.

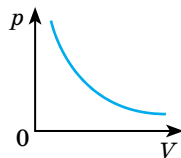
А  $7 : 1$     Б  $1 : 7$     В  $3 : 2$     Г  $2 : 3$     Д  $1$

6. Графік якого процесу зображено на малюнку?

А ізохорного    Б ізобарного

В ізотермічного    Г адіабатного

Д плавлення



7. Установіть відповідність між значенням сталої та її назвою.

А стала Авогадро

1  $1,661 \cdot 10^{-27}\text{ кг}$

Б універсальна газова стала

2  $1,38 \cdot 10^{-23}\text{ Дж/К}$

В стала Больцмана

3  $8,314\text{ Дж/(моль} \cdot \text{К)}$

Г атомна одиниця маси

4  $6,022 \cdot 10^{23}\text{ моль}^{-1}$

8. Установіть відповідність між назвою фізичної величини та її позначенням.

А  $\lambda$     1 кількість теплоти

Б  $A$     2 ККД теплової машини

В  $Q$     3 питома теплота плавлення

Г  $\eta$     4 робота

9. Визначте внутрішню енергію одноатомного газу з кількістю речовини  $5\text{ моль}$  за температури  $27\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

А  $265\text{ Дж}$     Б  $6,5\text{ кДж}$     В  $20\text{ кДж}$     Г  $18,7\text{ кДж}$     Д  $1,6\text{ кДж}$

10. На скільки зміниться внутрішня енергія  $10\text{ кг}$  води внаслідок її охолодження від  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ?

А зменшиться на  $2,26\text{ МДж}$

Б зменшиться на  $0,42\text{ МДж}$

В збільшиться на  $4,2\text{ кДж}$

Г збільшиться на  $0,226\text{ кДж}$

Д збільшиться на  $0,62\text{ МДж}$

11. Газ не виконує роботу при...

А адіабатному процесі

Б ізохорному процесі

В ізотермічному процесі

Г ізобарному процесі

Д усіх вищевказаних процесах

12. Газ переходить зі стану 1 у стан 2 (див. мал.). Яку роботу він виконує?

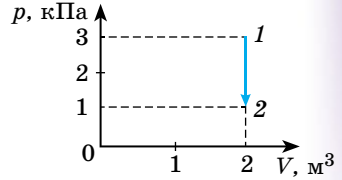
А 0

Б 0,5 кДж

В 1 кДж

Г 4 кДж

Д 8 кДж



13. При ізобарному нагріванні об'єм повітря, стиснутого до 5 атм, збільшився від 0,48 м<sup>3</sup> до 0,75 м<sup>3</sup>. Визначте роботу, виконану повітрям.

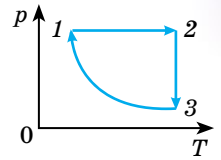
А 135 кДж

Б 250 кДж

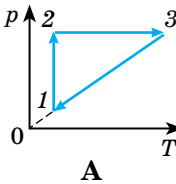
В 300 кДж

Г 270 кДж

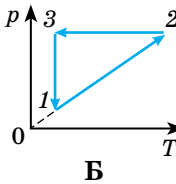
Д 125 кДж



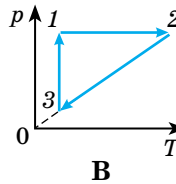
14. На малюнку в координатах  $p, V$  зображено замкнутий цикл 1-2-3-1, здійснений незмінною масою газу. Визначте, який вигляд має даний цикл у координатах  $p, T$ .



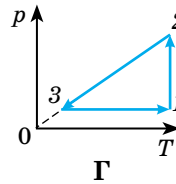
А



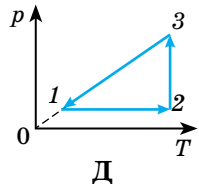
Б



В



Г



Д

15. ККД теплової машини дорівнює 40 %. Укажіть правильне співвідношення між кількістю теплоти  $Q_1$  (отримана від нагрівача) і кількістю теплоти  $Q_2$  (передана холодильнику) та корисною роботою  $A_{\text{кор}}$ .

А  $Q_2 = 0,4Q_1$

Б  $Q_1 = 0,4Q_2$

В  $A_{\text{кор}} = 0,4(Q_1 + Q_2)$

Г  $A_{\text{кор}} = 0,4Q_1$

Д  $A_{\text{кор}} = 0,4Q_2$

16. Визначте густину пари ртуті за температури 527 °С та тиску 8,3 гПа.

А  $2,5 \cdot 10^2$  кг/м<sup>3</sup>

Б  $2,1 \cdot 10^4$  кг/м<sup>3</sup>

В  $2,1 \cdot 10^{-4}$  кг/м<sup>3</sup>

Г  $3,5 \cdot 10^4$  кг/м<sup>3</sup>

Д  $2,5 \cdot 10^{-2}$  кг/м<sup>3</sup>

17. Визначте масу водяної пари, що міститься в повітрі теплиці об'ємом 1000 м<sup>3</sup> за температури 18 °С і відносній вологості 100 %.

А 15,4 кг

Б 100 кг

В 154 кг

Г 17,3 кг

Д 22,6 кг

18. Яка маса краплі води за температури 20 °С, що витікає з піпетки з діаметром отвору 1,2 мм, коли вважати, що діаметр шийки краплі дорівнює діаметру отвору?

А  $2,8 \cdot 10^5$  кг

Б  $2,1 \cdot 10^5$  кг

В  $2,8 \cdot 10^{-4}$  кг

Г  $2,5 \cdot 10^{-3}$  кг

Д  $2,8 \cdot 10^{-5}$  кг

19. На графіку залежності механічної напруги від відносного видовження вкажіть точку, що відповідає межі пружності.

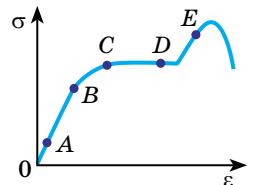
А А

Б В

В С

Г Д

Д Е



## ФІЗИЧНІ ЗАДАЧІ НАВКОЛО НАС

1. Стрічковий транспортер рухається зі швидкістю 16 см/с. За який час вантаж переміститься за допомогою транспортера на 24 м?

2. Ліфт рівномірно піднімається зі швидкістю 3 м/с. Яку відстань він подолає за 0,5 хв?

3. Для запобігання кесонної хвороби (закупорка кровоносних судин) водолаза слід піднімати на поверхню дуже повільно. Наприклад, після доби, проведеної на глибині 120 м, підйом повинен тривати 12 годин. Визначте середню швидкість підйому водолаза. Підйом вважати рівномірним.



4. Медоносна бджола літає за нектаром на відстань до 2,25 км. Щоб зібрати 400 г меду, вона повинна здійснити до 80 000 польотів. Порівняйте відстань, яку пролітає бджола, з довжиною земного екватора.

5. Страус бігає зі швидкістю 109 км/год. Чи наздожене його гепард, швидкість якого 32 м/с?

6. З якою швидкістю йде студентка, якщо вона робить 6 кроків за 4 с і довжина її кроку 70 см?

7. Як повинна вчинити людина за кермом: зупинитися чи проїхати на жовте світло світлофора, якщо встановлено такі параметри: автомобіль рухається з допустимою швидкістю 15 м/с, максимальне прискорення  $3 \text{ м/с}^2$ , ширина перехрестя 10 м, жовте світло світиться упродовж 2 с?

8. На столику залізничного вагона стоїть склянка чаю. Якою буде поверхня чаю у склянці, коли поїзд сповільнюватиме свій рух?

9. За течією річки в густому тумані, що закриває береги, пливе човен. Чому за таких умов із човна не можна визначити, у якому напрямку і з якою швидкістю він пливе?

10. Пліт пливе за течією річки. Який його рух відносно води? Берега річки?

11. Для економії часу в жнива автомобіль навантажують зерном з комбайна на ходу. Пояснить: а) чи рухається автомобіль відносно комбайна; б) чи рухаються автомобіль і комбайн відносно стерні; в) чи рухається зерно відносно автомобіля.

12. Перша у світі орбітальна космічна станція, утворена внаслідок стикування космічних кораблів «Союз-4» і «Союз-5» (1969 р.), мала період обертання 88,85 хв і середню висоту над поверхнею Землі 230 км (уважайте, що орбіта колова). Визначте середню швидкість руху станції.

13. Діаметр колеса велосипеда  $d = 70$  см, ведуча шестірня має 48 зубців, а ведена – 18 зубців. З якою швидкістю рухається велосипедистка на цьому велосипеді за частоти обертання педалей 1 об/с? З якою швидкістю рухається велосипедистка на велосипеді за тієї самої частоти обертання педалей, якщо в цього велосипеда  $d = 50$  см, ведуча шестірня має 48 зубців, а ведена – 15 зубців?

14. Кругла пилка має діаметр 600 мм. На вісь пилки насаджено шків діаметром 300 мм, який приводиться в обертання за допомогою пасової передачі від шківа діаметром 120 мм, насадженого на вал електродвигуна. Яка швидкість зубів пилки, якщо вал електродвигуна робить 1200 об/хв?

15. Фобос і Деймос – два природні супутники Марса. Фобос обертається ближче до центра планети, Деймос – далі. У якого з них більша швидкість обертання навколо планети? Орбіти супутників уважати майже коловими.

16. У 1895 р. вчені встановили, що кільце Сатурна складається з безлічі дрібних частинок, які незалежно обертаються навколо планети. Як змінюються швидкості обертання частинок по радіусу кільця в напрямку від його внутрішньої частини до зовнішньої?

17. Намотуючи нитку на котушку, слід поступово зменшувати швидкість її обертання. Чому?

18. Об вітрове скло автомобіля, який рухається, ударився комар. Порівняйте сили, які діють на комара й автомобіль під час удару.

19. Згідно з третім законом механіки, якщо кінь тягне воза, то й віз з такою самою силою мав би тягнути коня. Чому ж кінь тягне воза, а не віз коня?

20. Чому ми не помічаємо притягання між тілами, що нас оточують?

21. Як рухався б Місяць, якби зникло тяжіння між Місяцем і Землею?

22. З особистих спостережень установіть, чи можна тілом якої-небудь природи запобігти дії сили всесвітнього тяжіння.

23. На якій відстані від Землі сила притягання космічного корабля до неї стане у 100 разів меншою, ніж на Землі?

24. Вага тіла зменшується з підняттям над Землею. Чи збільшиться вага тіла, якщо його наблизити до центра Землі, наприклад опустити тіло на дно глибокої шахти?

25. Людина, маса якої дорівнює 70 кг, перебуває в ліфті. Визначте вагу людини: 1) перед початком піднімання; 2) на початку піднімання з прискоренням  $3 \text{ м/с}^2$ ; 3) під час руху із сталою швидкістю  $5 \text{ м/с}$ .

26. Чи має вагу качка, що летить? А чи має вагу качка, яка падає: а) у повітрі; б) вільно? Якщо має, то чи однакова ця вага? Якщо неоднакова, то на скільки відрізняється?

27. З якою швидкістю має їхати велосипедистка по середній частині опуклого моста з радіусом кривизни 10 м, щоб не чинити тиск на міст?

28. У якому випадку предмет, який випав з вікна вагона, упаде на землю раніше: коли вагон стоїть на місці чи коли він рухається?

29. Ствол рушниці й мішень розташовано на одній горизонталі. Одночасно з пострілом мішень починає вільно падати. Чи влучить куля в мішень?

30. На Землі чи на Місяці більше зміститься тіло по горизонталі, якщо його кидати горизонтально з однакової висоти з однаковими за модулем швидкостями?

31. У якому випадку (за інших однакових умов) дальність польоту списа буде більша: а) спортсменка кидає спис зі стану спокою; б) металник кидає спис із розгону? Чому?

32. Коли легше утримувати відро під час занурення його у криницю: коли воно перебуває в повітрі, чи коли воно занурене у воду? Чому?

33. Чому у водоймищі із заболоченим дном людина на глибокому місці грузне значно менше, ніж на мілкому?

34. Чому хлопчик, набравши повні легені повітря, може вільно лежати на поверхні води, а коли випустить повітря – занурюється?

35. Чому в морі легше плавати, ніж у річці?

36. Чому важко занурити у воду відро догори дном?

37. Чому, коли ми ходимо по дрібній гальці у воді, не відчуваємо болю, вийшовши на берег, відчуваємо?



38. Чому, відкриваючи двері від себе, слід штовхати їх ближче до ручки, ніж до дверних петель?

39. Поясніть, навіщо використовують нерухомий блок, адже він не дає виграшу в силі. Де зручно його використовувати? Наведіть приклади. Підтвердьте один із прикладів графічно.

40. Людина стрибнула з великого моторного човна на берег річки. Що можна сказати про швидкості, які отримали човен і тіло людини?

41. Перебуваючи в нерухомій байдарці, турист у напрямку берега кинув зі швидкістю 2 м/с важкий рюкзак. Унаслідок кидка байдарка набула швидкості 20 см/с. Якою є маса байдарки з туристом, якщо маса рюкзак 10 кг?

42. Супутник рухається по коловій орбіті. Чи мають потенціальну енергію предмети в кабіні супутника відносно кабіни? Відносно Землі?

43. Спортсменка підкинула м'яч вертикально вгору і зловила його, коли той падав униз. Як перетворювалася енергія м'яча?

44. Десятикласник, щоб утратити масу, щоденно протягом 30 хв займається фізичними вправами. При цьому він затрачає додатково потужність 232,5 Вт. Раціон харчування учень не змінює. На скільки зменшиться маса десятикласника за тиждень?

45. З яких видів механічної енергії складається повна енергія штучного супутника Землі?

46. Парашутистка рівномірно спускається на парашуті. Її кінетична енергія стала, а потенціальна – весь час зменшується. Чи не порушується тут закон збереження енергії?



47. Маса летючої риби 0,51 кг. Її політ у повітрі за інерцією на відстань до 30 м триває 2 с. Визначте кінетичну енергію в момент польоту риби над водою на висоті до 10 м. Політ риби вважати рівномірним.

48. Під час потужного землетрусу енергія ударної хвилі, за розрахунками вчених, сягає в епіцентрі до  $10^{18}$  Дж. Розрахуйте, скільки років довелося б працювати гідрогенератору потужністю  $10^5$  Вт, щоб виробити таку саму кількість енергії.

49. Червоні кров'яні тільця людини мають діаметр приблизно  $7 \cdot 10^{-6}$  м і товщину  $10^{-6}$  м. В  $1 \text{ мм}^3$  крові їх міститься  $5 \cdot 10^6$ . У тілі людини 5 л крові.

Маса молекули гемоглобіну  $\approx 1,9 \cdot 10^{-21}$  г, а густина гемоглобіну  $1 \text{ г/см}^3$ . Скільки червоних кров'яних тілець і молекул гемоглобіну міститься у крові людини?

50. На деталь, площа поверхні якої  $20 \text{ см}^2$ , нанесено шар срібла, товщиною 1 мкм. Скільки атомів срібла міститься в покритті?

51. Кухонна сіль (цукор), поміщена у воду, через деякий час після розчинення рівномірно розподіляється в усьому об'ємі. Переконайтеся в цьому. Чи залежить швидкість протікання процесу від температури води? Чим пояснити, що в рідинах дифузія протікає набагато повільніше, ніж у газах, і значно швидше, ніж у твердих тілах? Чи залежить швидкість протікання дифузії від роду дотичних рідин? Спосіб дослідження опишіть. Зробіть узагальнювальні висновки.

52. Маса повітря, що надходить до легень теляти за один вдих,  $3,5 \cdot 10^{-4}$  кг, а його об'єм 0,3 л. Визначте тиск у легенях теляти, якщо їх температура  $36,7^\circ \text{C}$ ?



53. Як зміниться тиск у посудині з газом, якщо раптово зникнуть сили тяжіння між його молекулами?

54. Яка приблизна маса повітря у вашому класі за температури  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  і нормального атмосферного тиску? Молярна маса повітря  $0,029\text{ кг/моль}$ .

55. Час пробігу реактивного літака по злітній смузі аеродрому з підвищенням температури навколишнього повітря збільшується. Як це пояснити?

56. Чому на СТО шини коліс автомобіля накачують узимку до більшого тиску, ніж улітку?

57. Накачуючи камеру футбольного (волейбольного) м'яча, кожного разу «посилають» у неї порцію повітря. Чому через деякий час камера перестає збільшуватися? Чи можна для визначення тиску в ній застосовувати закон Бойля–Маріотта? Закрийте пальцем трубку велосипедного насоса, натисніть на поршень і відпустіть його. Що ви спостерігатимете? Чому? Який процес відбувається при накачуванні насосом повітря у велосипедну камеру (футбольну, волейбольну)? Зробіть висновки з проведених спостережень.

58. Тепло повітря піднімається вгору. Чому у тропосфері внизу тепліше, ніж угорі?

59. Як пояснити розжарення метеорних тіл, що влітають в атмосферу Землі?

60. Чому від полін, що горять, з тріском відскакують іскри?

61. Чому проколений м'яч не відскакує під час удару об підлогу?

62. Чому батареї парового і водяного опалення розташовують біля підлоги, а не біля стелі?

63. Де більша ймовірність виникнення весняних уранішніх заморозків – на підвищенні чи в долині?

64. У виробничій практиці нагріті до високої температури металеві деталі часто охолоджують у воді, мінеральній оліві або на повітрі. У якому середовищі охолодження відбувається найшвидше і чому?

65. Чому гарячий чай охолоджують, помішуючи його ложкою?

66. Нормальна температура людини приблизно  $36,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Чому людині не холодно за температури навколишнього середовища  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$  і дуже жарко за температури  $37\text{ }^{\circ}\text{C}$ ?

67. У металевому циліндрі газ повільно стиснули поршнем. Чи змінилася внутрішня енергія газу?

68. Чому під час накачування камери велосипедного колеса насос нагрівається?

69. Чи можна здійснити повільний адіабатний процес у скляній колбі, калориметрі, посудині Дьюара?

70. Будь-яка теплова машина складається з трьох основних частин. Назвіть їх.

71. Чому поршні двигуна внутрішнього згоряння виготовляють з легких алюмінієвих сплавів? Чому між циліндром і поршнем двигуна внутрішнього згоряння залишають зазор?

72. Узимку для охолодження двигуна внутрішнього згоряння використовують не воду, а особливий склад, так званий антифриз (55 % етилену і 45 % води), який замерзає за нижчої температури, ніж вода. Чим викликана така заміна?

73. Чому у двигуні внутрішнього згоряння такти стиснення і робочого ходу – адіабатні, а такти всмоктування й випускання не є адіабатними процесами?

**74.** Чому бензин, який надходить до циліндра двигуна внутрішнього згоряння, випаровується в основному під час такту стиснення, а не під час такту всмоктування?

**75.** Що більше циліндрів у двигуні внутрішнього згоряння, то менше за розмірами в нього махове колесо. Чому?

**76.** Чому пітніють окуляри, коли людина з морозу заходить до кімнати?

**77.** Чи утворюється роса за вітряної погоди?

**78.** Чому волейбольна сітка значно натягується після дощу?

**79.** Чому сильну спеку важче перенести за високої вологості повітря?

**80.** Відомо, що випадки захворювання частіше трапляються взимку за вологості 20–30 %. А за тієї самої температури, але більш високої відносної вологості – рідше. Чим це пояснюється?

**81.** Вуглекислотні вогнегасники заряджають зрідженим вуглекислим газом. Чому під час роботи вогнегасника з нього виходить щільна білувата хмара («вуглекислий сніг»), а не рідина? На чому ґрунтується гасіння вогню таким вогнегасником?



**82.** Проведіть спостереження і поясніть, чому у відкриту квартиру нагрітої кімнати в морозний день ніби «валить» густий туман. Чому взимку лід утворюється тільки на внутрішніх боках шибок? Зробіть узагальнювальні висновки.

**83.** Личинки комарів, які розвиваються у воді, підвішуються знизу до поверхневої плівки води. Чи зміняться

умови підвісу, якщо поверхню води буде залито тонким шаром нафти?

**84.** Чому крапля спирту розтікається по склу, а крапля ртуті набирає форму кулі?

**85.** Чому брезентовий намет добре захищає від дощу?

**86.** У складальних цехах різних підприємств умови для роботи є комфортними, якщо температура повітря близько 18 °С, а відносна вологість – 50 %. Яку температуру має показувати вологий термометр психрометра за цих умов? На скільки має знизитися температура зовнішнього повітря, щоб шибки в цеху запітніли, якщо умови роботи в цеху комфортні?

**87.** Чи є умови комфортними в задачі № 86, якщо температура повітря в цеху 18 °С, а точка роси 10 °С? Знайдіть масу водяної пари, що міститься в повітрі приміщення цеху, якщо об'єм приміщення  $V = 500 \text{ м}^3$ .

**88.** В офісне приміщення подається кондиційоване повітря об'ємом  $200 \text{ м}^3$  за температури 20 °С і відносній вологості 52 %. Забирається повітря з вулиці при 5 °С і відносній вологості 90 %. Яку масу води треба додатково випарувати в повітря, яке подається у приміщення?

**89.** У приміщенні розмірами  $4 \times 5 \times 2,5 \text{ м}$  за температури 18 °С відносна вологість повітря становить  $\phi_1 = 30 \%$ . Скільки води перетворить у пару ультразвуковий зволожувач повітря, щоб умови у приміщенні стали комфортними ( $\phi_2 = 50 \%$ )? Який час має працювати зволожувач, щоб створити такі умови, якщо його продуктивність 0,77 кг/год?

**90.** Побутовий кондиціонер пропускає через кімнату щогодини  $552 \text{ м}^3$  повітря, яке подається з вулиці за температури 30 °С та вологості 70 % і охолоджується в кондиціонері до 5 °С, а в кімнаті нагрівається до 20 °С. Визначте масу конденсату, який утвориться впродовж 30 хв роботи кондиціонера. Яка відносна вологість установиться у приміщенні кімнати?

**91.** У кисневому балоні для газозварювальних робіт об'ємом 100 л міститься 400 мг водяної пари. Чи буде утворюватися лід на редукторі кисневого балона, якщо під час виходу з редукційного клапана температура газу внаслідок різкого розширення знизилася до  $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ? Температура навколишнього повітря  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а відносна вологість 37 %.

**92.** Як у ванній кімнаті за зовнішнім виглядом розрізнити трубу з гарячою і холодною водою?

**93.** Поясніть суть явища: за допомогою чорнильної ручки можна легко написати текст на щільному папері, важко – на промокальному і неможливо – на промасленому.

**94.** Чому шовкова хустинка не так добре витирає піт, як полотняна?

**95.** Чи псуватиметься зерно, якщо його зсипати на сухий тік під навіс?

**96.** Покладіть у воду шматок крейди. З нього в усіх напрямках почнуть виходити бульбашки. Чому?

**97.** Який ґрунт сохне після дощу швидше – піщаний чи глинистий? Чому?

**98.** Під час зведення споруд на цегляний фундамент укладають шар руберойду – матеріал, просочений кам'яновугільною смолою. Інакше приміщення легко може стати сирим. Чому?

**99.** У якому з капілярів: вузькому чи широкому встановиться вище стовпчик рідини, якщо рідина змочує капіляр?

**100.** У якому з капілярів: вузькому чи широкому встановиться вище стовпчик рідини, якщо рідина не змочує капіляр?

**101.** Гніт лампи, опущений у гас, горить безперервно. Чим це пояснюється?

**102.** Якщо капіляром доторкнутися до поверхні води, він повністю заповнюється. Чи битиме вода фонтаном, якщо його розламати пополам?

**103.** Яких деформацій зазнає деталь під час її обробки на токарному верстаті?

**104.** У чому проявляється зміцнення металу при пластичних деформаціях? Яке значення має це явище для техніки?

**105.** На чому ґрунтується використання пружних властивостей твердих тіл в амортизаторах, годинникових пружинах тощо?

**106.** Чому різець із вуглецевої сталі не можна використовувати при високих швидкостях різання?

**107.** Під час установа дверних блоків використовують монтажну поліуретанову піну, якою заповнюють щілини між стіною і полотном коробки дверей. Для чого між поздовжніми полотнами дверної коробки ставлять тимчасові горизонтальні поперечини? Яких деформацій зазнає така поперечина? Полотно дверної коробки?



## ПРАКТИКУМ З РОЗВ'ЯЗУВАННЯ ЗАДАЧ

Щоб навчитися розв'язувати задачі, скористайтесь такими порадами.

### Загальний алгоритм розв'язування задач із фізики

#### I етап. Аналіз задачі та вибір плану розв'язування:

1. **Попередній аналіз:** коротко записати умову задачі, установити розділи фізики, які охоплюють явища, що розглядаються в задачі.
2. **Детальний аналіз:** установити основні характеристики фізичних об'єктів, використовуючи системи понять з розділів фізики, визначених у п. 1.
3. **Аналіз фізичної суті конкретної ситуації:** установити фізичні закони, які можна застосувати в конкретній задачі.
4. **Вибір плану розв'язування задачі:** визначити послідовність застосування законів, обрати прийоми, спрощення, аналогії, побудувати гіпотези.

**II етап. Застосування законів:** користуючись алгоритмами перетворення, застосувати закони та прийоми, визначені під час аналізу.

#### III етап. Математичні дії:

1. Перейти, за потреби, від векторного вираження фізичних законів до скалярного.
2. Установити, чи відповідає кількість рівнянь кількості невідомих.
3. Розв'язати систему рівнянь у загальному вигляді.
4. Перевірити за одиницями величин правильність знайденої загальної формули.
5. Виконати обчислення, побудувати графіки.

**IV етап. Дослідження відповіді:** перевірити правильність найменувань, фізичний зміст, правдоподібність відповіді, дослідити граничні значення загальної формули.

### Алгоритм розв'язування задач із кінематики

Для кожного фізичного закону існує метод (алгоритм) його застосування. Він допомагає набагато спростити роботу під час розв'язування задач.

Алгоритм застосування законів кінематики під час розв'язування фізичних задач містить таку послідовність дій:

1. Визначте характер руху (поступальний, обертальний), вид руху (рівномірний, рівноприскорений, нерівномірний) і форму траєкторії (прямолінійна, криволінійна).
2. Зробіть короткий запис умови задачі, виконайте схематичний малюнок і вкажіть на ньому всі кінематичні характеристики руху тіла.
3. Виберіть тіло відліку і пов'яжіть з ним систему координат.
4. Запишіть закони кінематики у векторній формі.
5. Запишіть закони кінематики у проекціях на вибрані напрямки координатних осей.
6. За потреби доповніть систему формулами з кінематики, співвідношеннями між лінійними і кутовими характеристиками руху.
7. Розв'яжіть отриману систему рівнянь щодо шуканих величин у загальному вигляді.
8. Перевірте правильність розв'язку.

### Алгоритм розв'язування задач із динаміки

**Дві основні задачі динаміки.** Другий закон Ньютона є загальним законом механічного руху тіл. Він пов'язує прискорення тіла даної маси з прикладеними до нього силами. Він дає змогу розв'язати дві основні задачі динаміки: 1) за силами, що діють на тіло, визначити кінематичні харак-

теристики його руху; 2) за кінематичними характеристиками руху тіла визначити сили, що діють на нього.

Обидві задачі динаміки мають багато спільного в розв'язанні. Рух відбувається в результаті взаємодії даного тіла з іншими тілами. Ці взаємодії можна характеризувати силами. Додавши геометрично ці сили, ми можемо, використовуючи другий закон динаміки, визначити прискорення руху тіла. Тому під час розв'язання задач динаміки, перш за все, треба вказати всі сили, які діють на дане тіло. При цьому слід зображати сили графічно правильно, точно вказувати їх точки прикладання і їх напрямки, оскільки від них залежить характер руху. Усі задачі з динаміки можна розв'язувати, використовуючи такий **алгоритм**:

1. Аналіз задачі. Короткий запис умови задачі.
2. Виконання малюнка із зображенням усіх сил, що діють на дане тіло.
3. Запис другого закону Ньютона у векторній формі.
4. Вибір координатних осей.
5. Запис другого закону Ньютона у проекціях на координатні осі.
6. Подальші обчислення для визначення шуканих величин у даній задачі.
7. Аналіз розв'язку задачі.

### **Алгоритм розв'язування задач на закони збереження імпульсу та енергії**

Під час розв'язування задач використовуйте алгоритм застосування закону збереження імпульсу, який включає такі етапи:

1. Установіть, чи є система тіл замкнутою. Якщо в системі відбувається швидка зміна імпульсів (вибух, удар), то тривалість взаємодії вважається нескінченно малою. Тому не враховуються дії сили тяжіння і сили опору.
2. Зобразіть на малюнку вектори імпульсів тіл до і після взаємодії.
3. Запишіть геометричну суму імпульсів для кожного тіла до взаємодії і після неї.
4. Запишіть закон збереження імпульсу для заданих тіл у векторній формі.
5. Виберіть систему відліку і визначте проекції імпульсів тіл на координатні осі.
6. Запишіть закон збереження імпульсу для даного випадку у скалярній формі (у проекціях на вибрані осі координат).
7. Запишіть додаткові формули кінематики, якщо невідомих величин більше, ніж рівнянь.
8. Розв'яжіть систему рівнянь щодо шуканих величин.
9. Перевірте правильність розв'язку.

### **Алгоритм розв'язування задач із молекулярної фізики і термодинаміки**

1. Ознайомтеся з умовою задачі, визначте розділи фізики, які охоплюють явища, що розглядаються в задачі.
2. Запишіть коротко умову задачі, виразивши всі дані в СІ.
3. Проаналізуйте фізичну суть задачі.
4. Визначте, за яких умов відбуваються процеси, з'ясуйте характер цих процесів – ізотермічний, ізохорний, ізобарний чи адіабатний.
5. Визначте послідовність явищ. Для кожного етапу встановіть закони, які можна застосувати до цих процесів. Визначте, як змінюються параметри, які описують стан системи.
6. Якщо відсутня пряма вказівка на характер процесу, пам'ятайте, що повільноплинні процеси, як правило, мають ізотермічний характер, швидкоплинні без теплообміну із зовнішнім середовищем – адіабатний;

система під важким поршнем – ізохорний, з незакріпленим поршнем – ізобарний.

7. Під час графічних побудов ізопроцесів у різних системах координат зверніть увагу на те, що графік кругового процесу буде замкненим в усіх системах параметрів.

8. Описуючи процеси, пов'язані з теплообміном, визначте, чи виконує система роботу, чи змінюється внутрішня енергія системи.

9. Визначте, чи супроводжується теплообмін переходом речовини з одного агрегатного стану в інший.

10. У деяких випадках обчислення слід проводити не на заключному етапі, а у процесі розв'язування задачі для того, щоб можна було передбачити подальший хід процесів.

11. За потреби запишіть додаткові рівняння з інших розділів фізики, математичні формули.

12. Розв'яжіть систему рівнянь відносно шуканої величини в загальному вигляді.

13. Перевірте за одиницями фізичних величин правильність отриманої відповіді.

14. Виконайте обчислення, запишіть відповідь.

15. Перевірте результат на достовірність.

### Способи розв'язування фізичних задач

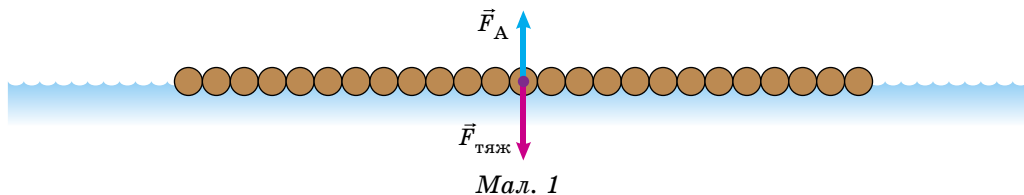
208

Залежно від того, як під час розв'язування фізичних задач застосовується математичний апарат, розрізняють такі способи і методи розв'язання розрахункових задач: 1. Арифметичний. 2. Алгебраїчний. 3. Геометричний. 4. Графічний.

За характером логічних операцій, які використовуються у процесі розв'язання, розрізняють такі способи: 1. Аналітичний. 2. Синтетичний. 3. Аналітико-синтетичний.

**Арифметичний метод.** Над фізичними величинами відбуваються тільки арифметичні дії. Задачі розв'язують по запитаннях, без застосування формул, не складають і не розв'язують рівнянь.

**Наприклад.** Який максимальний вантаж може витримати у прісній воді пліт, зв'язаний з 25 соснових колод (мал. 1)? Об'єм кожної колоди в середньому складає  $0,8 \text{ м}^3$ .



Мал. 1

1. Який об'єм плота?

$$V = 0,8 \text{ м}^3 \cdot 25 = 20 \text{ м}^3.$$

2. Яка маса плота? З таблиці густин деяких речовин дізнаємося, що маса  $1 \text{ м}^3$  деревини – 500 кг.

$$m_{\text{пл}} = 500 \text{ кг} \cdot 20 \text{ м}^3 = 10\,000 \text{ кг}.$$

3. Яка сила тяжіння діє на пліт?

$$F_{\text{тяж}} = 9,8 \text{ Н} \cdot 10\,000 \text{ кг} = 98\,000 \text{ Н}.$$



4. Яка маса витісненої води, якщо пліт повністю занурено? З таблиці густин деяких речовин дізнаємося, що маса  $1 \text{ м}^3$  води дорівнює  $1000 \text{ кг}$ .

$$m_B = 1000 \text{ кг} \cdot 20 \text{ м}^3 = 20\,000 \text{ кг}.$$

5. Яка вага витісненої води?

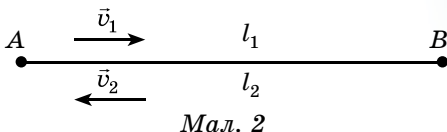
$$P_B = 20\,000 \text{ кг} \cdot 9,8 \text{ Н} = 196\,000 \text{ Н}.$$

6. Яка вага вантажу?

$$P = 196\,000 \text{ Н} - 98\,000 \text{ Н} = 98\,000 \text{ Н}.$$

**Алгебраїчний метод.** Під час розв'язування задач застосовують знання з алгебри, використовують формули, складають і розв'язують рівняння. Найпростішим випадком є розв'язування задачі за готовою формулою. У більш складних випадках кінцеву залежність, за допомогою якої визначають шукану величину, визначають, використовуючи кілька формул або системи рівнянь.

Наприклад. Від пункту  $A$  до пункту  $B$  автомобіль рухався зі швидкістю  $60 \text{ км/год}$ , а від  $B$  до  $A$  – зі швидкістю  $40 \text{ км/год}$  (мал. 2). Яка середня швидкість руху автомобіля?



$$\text{Ми знаємо, що } v = \frac{l}{t}; l = l_1 + l_2 = 2l_1; t = t_1 + t_2; t_1 = \frac{l_1}{v_1}; t_2 = \frac{l_1}{v_2}.$$

$$\text{Тоді } v_c = \frac{2l_1}{\frac{l_1}{v_1} + \frac{l_1}{v_2}} = \frac{2}{\frac{1}{v_1} + \frac{1}{v_2}} = \frac{2v_1v_2}{v_1 + v_2};$$

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

**Геометричний метод.** Шукану величину визначають на основі відомих геометричних співвідношень. Цей метод застосовують у статиці, геометричній оптиці, електростатиці тощо. Розв'язуючи задачі геометричним методом можна використовувати не тільки геометричні співвідношення, але й тригонометричні функції.

Наприклад. Посередині троса завдовжки  $10 \text{ м}$  підвісили ліхтар масою  $10 \text{ кг}$  (мал. 3). Визначте силу натягу троса, якщо стріла прогину  $0,5 \text{ м}$ .

Скориставшись малюнком 4, запишемо:  $F_1 = F_2$ ;  $MN = \frac{F}{2}$ ;  $\triangle OMB \sim \triangle NMF_1$ .

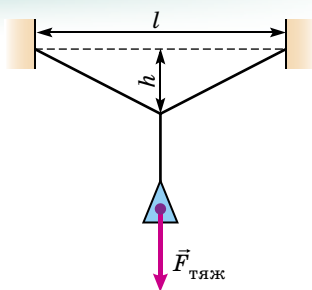
$$\frac{BM}{OM} = \frac{F_1}{MN}; F_1 = \frac{BM \cdot MN}{OM}; F_1 = \frac{\frac{F}{2} \sqrt{\frac{l^2}{4} + h^2}}{h} = \frac{F \sqrt{\frac{l^2}{4} + h^2}}{2h}.$$

$$\text{Якщо } h \ll \frac{l}{2}, \text{ то } F'_1 = \frac{Fl}{4h}.$$

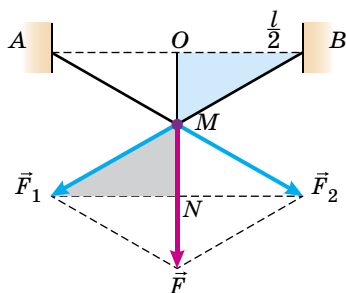
Підставивши значення величин, отримаємо:

$$F_1 = \frac{9,8 \text{ Н} \cdot 10 \sqrt{\frac{100 \text{ м}^2}{4} + 0,25 \text{ м}^2}}{2 \cdot 0,5 \text{ м}} = 492,45 \text{ Н},$$

$$F'_1 = \frac{9,8 \text{ Н} \cdot 0,5 \text{ м}}{1 \text{ м}} = 450 \text{ Н}.$$



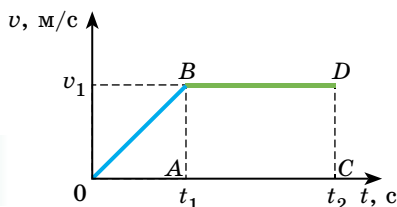
Мал. 3



Мал. 4

**Графічний метод.** Цей метод пов'язаний з геометричним методом. Для визначення шуканих величин використовують графіки.

Графічними називають задачі, у яких об'єктом дослідження є графіки залежності фізичних величин. В одних задачах ці графіки задано в умовах, в інших – їх потрібно побудувати.



Мал. 5

Наприклад. За графіком (мал. 5) описати рух тіла і визначити: 1) час руху; 2) пройдений шлях; 3) прискорення на окремих ділянках шляху.

Графік показує залежність швидкості від часу (графік швидкості).

Початкова швидкість руху тіла  $v_0 = 0$ . Через інтервал часу  $t_1$  швидкість руху тіла досягла значення  $v_1$  і далі протягом інтервалу часу  $(t_2 - t_1)$  залишалася сталою. Протягом інтервалу часу  $(t_1 - 0)$  маємо лінійну залежність швидкості руху тіла від часу, тому рух на цій ділянці рівноприскорений:  $a_1 = \frac{v_1}{t_1}$ , тому що  $v_1 = a_1 t_1$ .

Шлях  $l_1$  дорівнює площі прямокутного трикутника  $OBA$ :

$$l_1 = \frac{v_1 t_1}{2} = \frac{a_1 t_1 t_1}{2} = \frac{a_1 t_1^2}{2}.$$

Шлях  $l_2$  дорівнює площі прямокутника  $ABCD$ :  $l_2 = v_1(t_2 - t_1) = a_1 t_1(t_2 - t_1)$ .

Весь шлях дорівнює:  $l = l_1 + l_2 = \frac{v_1 t_1}{2} + v_1(t_2 - t_1)$ .

При аналітичному способі судження починають з визначення шуканої величини, з'ясовують, як вона пов'язана з іншими величинами, і, послідовно застосовуючи формули, приходять найкоротшим шляхом до шуканої величини.

При синтетичному способі судження спочатку встановлюють проміжні залежності між даними фізичними величинами, намагаючись підготувати ґрунт для визначення шуканої величини. У результаті всіх операцій, частина з яких може виявитися зайвою, отримують вираз, з якого визначають шукану величину.

Аналітико-синтетичний спосіб важчий, тому що вимагає строгої логічної послідовності в діях, але швидше приводить до бажаного результату.

Наприклад. У шахту рівноприскорено на тросі опускають ящик масою 280 кг. За перші 10 с він перемістився на 35 м. Визначте натяг троса.

**Аналітичний спосіб.** Ящик опускається на тросі. Вниз напрямлена сила тяжіння  $mg$ , а вгору – сила натягу троса  $\vec{F}_H$ . Рух відбувається вниз, тому очевидно, що і рівнодійна цих сил  $\vec{R}$  напрямлена вниз:  $R = mg - F_H$ .

За другим законом Ньютона:  $R = ma$ , тобто  $mg - F_H = ma$ .

Потрібно визначити  $a$ :  $l = \frac{at^2}{2}$ ;  $a = \frac{2l}{t^2}$ .

Тоді силу натягу визначимо таким співвідношенням:

$$F_H = mg - \frac{2ml}{t^2} = m \left( g - \frac{2l}{t^2} \right); F_H = 280 \text{ кг} \left( 9,8 \text{ м/с}^2 - \frac{2 \cdot 35 \text{ м}}{100 \text{ с}^2} \right) = 250 \text{ Н.}$$

Логіку судження можна відтворити таким особливим записом:

$$\begin{array}{l} \text{АНАЛІЗ} \left| \begin{array}{l} mg - F_H = ma \\ \downarrow \\ F_H = mg - ma \\ \downarrow \\ a = \frac{2l}{t^2} \\ \text{Остаточно: } F_H = m \left( g - \frac{2l}{t^2} \right). \end{array} \right. \end{array}$$

**Синтетичний спосіб.** Ящик рухається рівноприскорено, тому  $S = \frac{at^2}{2}$ .

Звідки можна визначити прискорення:  $a = \frac{2S}{t^2}$ .

Ящик набуває прискорення під дією рівнодійної сил  $\vec{R}$ :  $\vec{R} = \sum \vec{F} = m\vec{a}$ .

Ящик рухається вниз. На нього діють дві сили. Їх рівнодійна:

$$R = mg - F_H = ma. \text{ Звідки: } F_H = mg - ma = m(g - a) = m \left( g - \frac{2S}{t^2} \right).$$

Аналіз і синтез не застосовують окремо, вони завжди взаємодіють, взаємопроникають один в одного.

## ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ

### Загальні зауваження до виконання робіт лабораторного практикуму

Фізика – наука експериментальна. Це означає, що основою всіх результатів, одержаних наукою, є дослід. Будь-яка теорія, яку розробили вчені, має одержати експериментальне підтвердження.

Виконуючи роботи лабораторного практикуму, ви виконуєте досліди, аналізуєте результати, робите висновки. Провівши те чи інше вимірювання, ви маєте знати ступінь достовірності одержаного результату, оскільки всі вимірювання проводяться з певною точністю і результат їх завжди наближений.

Окремі вимірювання ви проводите безпосередньо, тобто визначаєте шукані величини за допомогою вимірювальних приладів. Такі вимірювання називають прямими.

**Різницю між дійсним значенням вимірюваної величини  $a$  і результатом  $a_d$ , який ви одержали, називають абсолютною похибкою  $\Delta a$ ,  $\Delta a = |a - a_d|$ .**

Похибка вимірювань в основному визначається точністю вимірювального приладу (**інструментальна похибка**), яка зазвичай вказується на вимірювальних приладах, та **похибкою відлічування**.

Межа похибки відлічування становить половину ціни поділки шкали приладу. Наприклад, під час вимірювання лінійкою з міліметровими поділками ви одержите точніший результат, ніж лінійкою, ціна поділки якої 1 см. Якщо вимірювані розміри більші за довжину лінійки, вам дове-

детсья проводити вимірювання, прикладаючи лінійку двічі або тричі. При цьому точність результату зменшується.

Значною мірою точність результатів залежить від акуратності вимірювань, які ви провели. Однак за будь-яких умов не вдається уникнути певних похибок, пов'язаних з умовами вимірювання фізичних величин. Наприклад, через затримку в часі реакції людини, яка вмикає і вимикає секундомір, у вимірювання часу можуть бути внесені суттєві похибки, які значно перевищують інструментальні. Найпростішим шляхом зменшення таких похибок є проведення кількох (за незмінних умов досліду) вимірювань тієї самої величини та обчислення її середнього арифметичного значення.

Знімаючи покази, треба дивитися перпендикулярно до шкали, користуватися приладами із чіткою шкалою, правильно визначати ціну поділки шкали тощо.

Результат безпосередніх (прямих) вимірювань величини  $a$  записують так:

$$a = a_d \pm \Delta a.$$

Слід пам'ятати, що більше  $a_d$  відрізняється від  $\Delta a$ , то точніший результат. Наприклад, лінійкою із ціною поділки 1 см вимірюють довжину і ширину стола (мал. 1). В обох випадках абсолютна похибка 0,5 см, але довжина стола більша і тому похибка складає меншу частину довжини, ніж ширини.

Що менше значення шуканої величини, то з меншою ціною поділки (точнішим) має бути інструмент для її вимірювання.

*Про яку точність вимірювань можна говорити, якщо діаметр вашої ручки визначати лінійкою із сантиметровими поділками?*

Як бачимо, абсолютної похибки недостатньо для оцінки точності результатів вимірювань, її можна оцінити на основі відносної похибки.

**Відносною похибкою вимірювань**  $\varepsilon$  називають відношення абсолютної похибки до значення вимірюваної величини:  $\varepsilon = \frac{\Delta a}{a} 100 \%$ .

Під час виконання лабораторних робіт можна вважати задовільними результати, якщо відносна похибка не перевищує 4–6 %. Якщо відносна похибка більша ніж 10 %, ми не можемо говорити про достовірність вимірювання, тому що залежність, яку ми встановили, носить лише якісний характер.

Якщо фізична величина визначається через інші величини за допомогою формул, то її вимірювання є опосередкованим (непрямим). Наприклад, щоб визначити площу прямокутника, треба довжину помножити на ширину:  $S = ab$ .

*Як визначити похибку вимірювань у цих випадках?*

У цьому вам допоможе таблиця похибок.

| № | Математична операція | Абсолютна похибка     | $\varepsilon$                       |
|---|----------------------|-----------------------|-------------------------------------|
| 1 | $a + b$              | $\Delta a + \Delta b$ | $\frac{\Delta a + \Delta b}{a + b}$ |
| 2 | $a - b$              | $\Delta a + \Delta b$ | $\frac{\Delta a + \Delta b}{a - b}$ |



Мал. 1. Вимірювання розмірів стола

|   |               |                                     |                                           |
|---|---------------|-------------------------------------|-------------------------------------------|
| 3 | $ab$          | $a\Delta a + b\Delta b$             | $\frac{\Delta a}{a} + \frac{\Delta b}{b}$ |
| 4 | $\frac{a}{b}$ | $\frac{a\Delta b + b\Delta a}{b^2}$ | $\frac{\Delta a}{a} + \frac{\Delta b}{b}$ |
| 5 | $a^n$         |                                     | $n \frac{\Delta a}{a}$                    |
| 6 | $\sqrt[n]{a}$ |                                     | $\frac{1}{n} \frac{\Delta a}{a}$          |

У наведеному прикладі відносна похибка дорівнює:  $\varepsilon = \frac{\Delta S}{S} = \frac{\Delta a}{a} + \frac{\Delta b}{b}$ .  
**Кілька порад:**

1. Якщо прямі вимірювання проведено з точністю до десятих долей, то опосередковані визначають до сотих і округлюють до десятих.

2. Під час визначення величини ви можете отримати кілька результатів, причому спостерігається певна закономірність (наприклад, одержані значення збільшуються). При цьому остерігайтеся неправильних висновків, оскільки умови досліду змінювалися. Якщо ви визначаєте жорсткість пружини і одержали результати 42 Н/м, 45 Н/м, 48 Н/м, то це ще не означає, що зі збільшенням сили, прикладеної до пружини, жорсткість її збільшується. Що більша сила (у межах пружності пружини), то точніший результат і відносна похибка має бути меншою.

3. Виконавши лабораторну роботу, потрібно проаналізувати її результати, зробити висновки і записати остаточний результат:  $a = a_4 \pm \Delta a$ ,  $\varepsilon = \frac{\Delta a}{a} 100 \%$ .

Важливо проаналізувати причини похибок, зокрема, де вони були найбільшими, чому і як це вплинуло на результат вашої роботи.

### Робота № 1. Визначення прискорення руху тіла під час прямолінійного рівноприскореного руху

**Мета роботи:** виміряти прискорення, з яким скочується кулька по похилому жолобу.

**Обладнання:** жолоб, штатив з муфтами і лапкою, кулька, металевий циліндр (гиря), електронний або механічний секундомір (або метроном), рулетка або вимірювальна стрічка.

#### Варіант 1

##### Підготовка до виконання роботи

**Дайте відповіді на запитання:**

1. Який рух називають рівноприскореним?

2. Як визначають прискорення руху тіла?

Розв'яжіть задачі.

1. По похилому жолобу кулька рухалася рівноприскорено з початковою швидкістю 0 і кінцевою швидкістю 80 см/с. З якою середньою швидкістю вона рухалася по всьому жолобу?

2. Кулька рухалася по похилому жолобу із середньою швидкістю 50 см/с. Яка її кінцева швидкість, якщо початкова: а) дорівнює нулю; б) дорівнює 10 см/с?

## Опис методу вимірювання

Для того щоб з'ясувати, з яким прискоренням рухається кулька по похилому жолобу, потрібно виміряти шлях  $l$ , який вона проходить за час  $t$ .

Оскільки при рівноприскореному русі без початкової швидкості  $l = \frac{at^2}{2}$ ,

то, вимірявши  $l$  і  $t$ , визначимо прискорення кульки:  $a = \frac{2l}{t^2}$ .

Жодні вимірювання не проводяться абсолютно точно. Вони завжди мають деяку похибку, пов'язану з недосконалістю засобів вимірювання та іншими причинами. Але і за наявності похибок є кілька способів проведення достовірних вимірювань. Найпростіші з них – обчислення середнього арифметичного з результатів кількох незалежних вимірювань однієї і тієї самої величини, якщо умови досліду не змінюються. Це і пропонується зробити в роботі.

## Хід роботи

1. Закріпіть жолоб у штативі в похилому положенні під невеликим кутом до горизонту (мал. 2). Біля нижнього кінця жолоба покладіть металевий циліндр або гирю.



Мал. 2

2. Пустивши кульку з верхнього кінця жолоба, одночасно увімкніть секундомір (одночасно з ударом метронома) і зафіксуйте час (підррахуйте число ударів метронома) до зіткнення кульки із циліндром. (Досліди зручно проводити при 120 ударах метронома за хвилину (60 с)). Результати вимірювань запишіть у таблицю.

3. За допомогою рулетки або вимірної стрічки визначте шлях, який пройшла кулька. Не змінюючи нахилу жолоба (умови досліду мають залишатися незмінними), повторіть дослід 5 разів. Результати вимірювань запишіть у таблицю.

4. Змінюючи кут нахилу жолоба до горизонту, повторіть попередній дослід, записавши отримані результати в таблицю.

5. За формулою  $l_c = \frac{l_1 + l_2 + l_3 + l_4 + l_5}{5}$  визначте середнє значення шляху, а за формулою  $t_c = \frac{t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5}{5}$  – середнє значення часу, потім

розрахуйте середнє значення прискорення:  $a_c = \frac{2l_c}{t_c^2}$ . Результати обчислень запишіть у таблицю.

| № | $l$ , м | $l_c$ , м | $t$ , с | $t_c$ , с | $a_c$ , м/с <sup>2</sup> | $\Delta l$ , м | $\Delta t$ , с | $\varepsilon$ , % | $\Delta a$ , м/с <sup>2</sup> |
|---|---------|-----------|---------|-----------|--------------------------|----------------|----------------|-------------------|-------------------------------|
|   |         |           |         |           |                          |                |                |                   |                               |

6. За формулою  $\varepsilon = \frac{\Delta a}{a_c} = \frac{2l}{l_c} + \frac{2t}{t_c}$  визначте абсолютну і відносну похибки вимірювання. Результати роботи запишіть у такому вигляді:  $a = a_c \pm \Delta a$ .



**Творче завдання**

Виконуючи цю лабораторну роботу, не змінюючи кут нахилу жолоба, дві групи отримали такі результати: перша група:  $l_1 = 10$  см,  $t_1 = 1$  с;  $l_2 = 30$  см,  $t_2 = 3$  с; друга група:  $l_1 = 15$  см,  $t_1 = 0,5$  с;  $l_2 = 60$  см,  $t_2 = 1$  с. Яка з груп отримала достовірні результати?

**Варіант 2**

**Мета роботи:** навчитися експериментально визначати прискорення рівнозмінного руху тіл; визначити прискорення, з яким скочується кулька по похилій площині; установити характер залежності між величинами, які описують рівнозмінний рух; установити співвідношення між шляхами, які проходить кулька за кожну секунду свого руху.

**Обладнання:** жолоб, штатив з муфтами і лапкою, кулька, металевий циліндр (гиря), електронний або механічний секундомір (або метроном), рулетка або вимірювальна стрічка.

**Підготовка до виконання роботи****Виконайте завдання:**

1. Сформулюйте означення рівноприскореного руху тіла.  
2. Сформулюйте означення прискорення руху тіла та запишіть формулу, за якою визначають прискорення. Сформулюйте означення середньої швидкості.

2. Запишіть закони рівноприскореного руху та назвіть величини, які входять до відповідних формул.

Розв'яжіть задачі

1. Швидкісний поїзд, рухаючись прямолінійно і рівноприскорено, через 10 с після початку руху зі стану спокою набув швидкості 0,6 м/с. Визначте: а) прискорення поїзда; б) швидкість поїзда через 5 хв та через 8 хв після початку руху; в) через який час від початку руху швидкість поїзда дорівнюватиме 3 м/с.

2. Схил завдовжки 100 м лижниця проїхала за 20 с, рухаючись прямолінійно рівноприскорено з прискоренням  $0,3 \text{ м/с}^2$ . Визначте швидкість лижниці на початку та в кінці схилу.

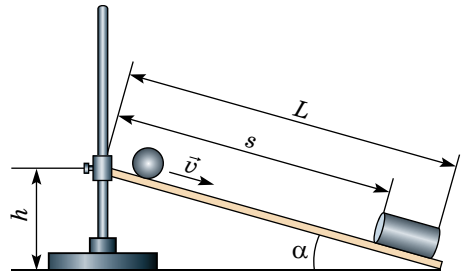
**Хід роботи**

1. Закріпіть жолоб за допомогою штатива в похилому положенні під невеликим кутом до горизонту. У нижній кінець жолоба покладіть металевий циліндр.

2. Виміряйте кут нахилу похилої площини  $\alpha$  до горизонту за формулою  $\sin \alpha = h/L$ , де  $h$  – висота верхнього краю жолоба над горизонтальною поверхнею,  $L$  – довжина жолоба (мал. 3).

3. Розташуйте кульку на верхньому кінці жолоба і відпустіть. За допомогою секундоміра виміряйте час  $t$  від моменту початку руху кульки до моменту її удару об циліндр, установлений у нижньому кінці жолоба.

4. За допомогою мірної стрічки (рулетки) виміряйте шлях  $l$ , пройдений кулькою за час  $t$ . Не змінюючи положення жолоба, проведіть дослід мінімум 5 разів, визначивши середні значення шляху  $l_c$  та часу  $t_c$ .



Мал. 3

5. Обчисліть середнє значення модуля прискорення кульки за формулою  $a_c = 2l_c/t_c^2$ . Результати вимірювань й обчислень запишіть у таблицю, яку ви склали. Визначте абсолютну та відносну похибки вимірювання прискорення.

6. Змініть кут нахилу жолоба та повторіть дослід (п. 3–6) для 5 різних значень. Результати вимірювань та обчислень запишіть у таблицю.

| № | $l$ , м | $l_c$ , м | $t$ , с | $t_c$ , с | $a_c$ , м/с <sup>2</sup> | $\Delta l$ , м | $\Delta t$ , с | $\varepsilon$ , % | $\Delta a$ , м/с <sup>2</sup> |
|---|---------|-----------|---------|-----------|--------------------------|----------------|----------------|-------------------|-------------------------------|
|   |         |           |         |           |                          |                |                |                   |                               |

7. За даними вимірювань і обчислень побудуйте графік залежності прискорення кульки від кута нахилу похилого жолоба до горизонту.

8. Зробіть висновок, у якому опишіть досягнення, яких ви набули, виконуючи дану роботу; головні причини похибок; основні, на ваш погляд, недоліки та переваги даного дослідження; пропозиції щодо його поліпшення.

### Творче завдання

За допомогою наданого обладнання встановіть співвідношення між шляхами, які проходить кулька за першу, другу, третю і т. д. секунди. Звіт про виконання завдання оформіть на окремому аркуші в такій послідовності:

1) розробіть і коротко опишіть ідею та інструкцію виконання роботи (не більше ніж 5 пунктів з одного-двох речень);

2) проведіть дослідження відповідно до вашої інструкції, складіть та заповніть таблицю даних;

3) результати дослідження можна представити у вигляді числового співвідношення, короткого висновку, можливо, графічної залежності тощо;

4) бажано теоретично підтвердити результати дослідження (довести формулу співвідношення шляхів, використовуючи закони рівнозмінного руху).

## Робота № 2. Визначення прискорення вільного падіння за допомогою математичного маятника

**Мета роботи:** визначити прискорення вільного падіння за допомогою маятника.

**Обладнання:** електронний годинник (секундомір), вимірювальна стрічка (рулетка), важок з набору, нитки, штатив з муфтою і кільцем.

### Підготовка до виконання роботи

**Дайте відповіді на запитання:**

1. Хто вперше ввів поняття прискорення вільного падіння тіл?
2. Від чого залежить прискорення вільного падіння тіл?
3. Що таке математичний маятник?

Розв'яжіть задачу: маятник завдовжки 150 см за 300 с робить 125 коливань. Визначте прискорення вільного падіння.

### Теоретичні відомості

Якщо швидкість руху тіла за однакові інтервали часу змінюється однаково, то кажуть, що це тіло рухається з прискоренням, тобто здійснює прямолінійний рівноприскорений рух.

Прискорення вільного падіння – це прискорення, якого набуває тіло під дією сили тяжіння. Такого прискорення набуває й будь-яке тіло, падаючи на Землю з невеликої висоти порівняно з радіусом Землі в безповітряному просторі (вакуумі). Прискорення вільного падіння на широті Києва дорівнює  $g = 9,81$  м/с<sup>2</sup>.

Прискорення вільного падіння  $g$  можна визначити за допомогою математичного маятника. Період коливань математичного маятника залежить від довжини маятника і прискорення вільного падіння. Це виражається такою формулою:  $T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$ , де  $T$  – період коливань маятника, с;  $\pi = 3,14$ ;  $l$  – довжина маятника, м;  $g$  – прискорення вільного падіння,  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ .

Період коливань маятника можна визначити за іншою формулою:  $T = \frac{t}{N}$ , де  $t$  – час, протягом якого відбувалися коливання, с;  $N$  – кількість коливань.

Виконуючи математичні перетворення із цими двома формулами, можна визначити прискорення вільного падіння:  $g = 4\pi^2 N^2 l / t^2$ .

### Хід роботи

1. Установіть на краю стола штатив. У верхній частині штатива за допомогою муфти закріпіть кільце та підвісьте до нього важок на нитці. Важок має висіти на відстані 3–5 см від підлоги (мал. 4).

2. Виміряйте довжину нитки  $l$  маятника.

3. Відхиліть маятник від положення рівноваги і відпустіть його.

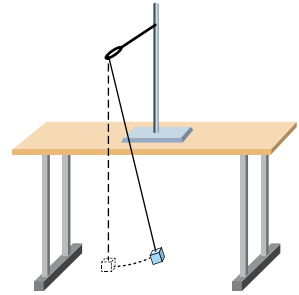
4. Виміряйте час 40–60 повних коливань.

5. За формулою  $g = 4\pi^2 n^2 l / t^2$  обчисліть  $g$ .

6. Повторіть дослід ще 4 рази й обчисліть значення  $g$ .

7. Визначте середнє значення отриманих значень виміряних величин.

8. Одержані результати запишіть у таблицю.



Мал. 4

| № | $l$ , м | $\Delta l$ , м | $N$ | $t$ , с | $t_c$ , с | $\Delta t_c$ , с | $T$ , с | $T_c$ , с | $g$ , м/с <sup>2</sup> | $\Delta g_c$ , м/с <sup>2</sup> | $\Delta g_c$ , м/с <sup>2</sup> | $\varepsilon$ , % |
|---|---------|----------------|-----|---------|-----------|------------------|---------|-----------|------------------------|---------------------------------|---------------------------------|-------------------|
| 1 |         |                |     |         |           |                  |         |           |                        |                                 |                                 |                   |
| 2 |         |                |     |         |           |                  |         |           |                        |                                 |                                 |                   |
| 3 |         |                |     |         |           |                  |         |           |                        |                                 |                                 |                   |
| 4 |         |                |     |         |           |                  |         |           |                        |                                 |                                 |                   |
| 5 |         |                |     |         |           |                  |         |           |                        |                                 |                                 |                   |

9. Порівняйте одержане значення  $g$  із значенням  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$  та обчисліть похибки вимірювання:  $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} + \frac{2T_c}{T}$ ;  $\Delta g = \varepsilon g_c$ .

10. Результати запишіть у такому вигляді:  $g = g_c \pm \Delta g_c$ . Зробіть висновки.

**Творче завдання.** Використовуючи знання з фізики, запропонуйте свій спосіб визначення прискорення вільного падіння тіл.

### Робота № 3. Визначення періоду, частоти, лінійної швидкості та доцентрового прискорення тіла під час рівномірного руху по колу

**Мета роботи:** дослідити рівномірний рух тіла по колу, виміряти швидкість руху, період обертання, обертову частоту.

**Обладнання:** кулька на нитці завдовжки 50–60 см, секундомір, лінійка, аркуш паперу із зображеннями двох кіл, радіус яких 15 та 20 см.

## Підготовка до виконання роботи

**Виконайте завдання:**

1. Сформулюйте означення рівномірного руху по колу. Назвіть, які ви знаєте параметри рівномірного руху по колу. Розкрийте фізичний зміст лінійної та кутової швидкостей.

2. Сформулюйте означення періоду та частоти рівномірного руху тіла по колу. Запишіть та доведіть такі формули зв'язку: а) між частотою (або періодом) та кутовою швидкістю; б) між частотою та лінійною швидкістю; в) між лінійною та кутовою швидкостями.

3. Сформулюйте означення рівноприскороного руху та прискорення. Подайте математичний запис законів рівноприскороного руху. Яке прискорення називають доцентровим, що воно характеризує?

Розв'яжіть задачу: вантаж, який підвісили на нитці завдовжки 60 см, описує в горизонтальній площині коло. З якою швидкістю рухається вантаж, якщо під час його руху нитка утворює з вертикаллю кут  $30^\circ$ .

**Хід роботи**

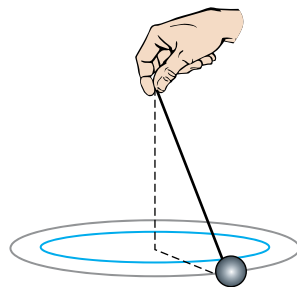
1. Виміряйте радіус однієї з колових орбіт, зображених на папері.

2. Надайте кульці обертання в горизонтальній площині, намагаючись обертати її зі сталою швидкістю (мал. 5).

218 3. Виміряйте час, за який кулька здійснює 10–15 повних обертів.

4. Повторіть дослід з колом іншого радіуса.

5. Обчисліть період обертання ( $T = t/N$ ), обертову частоту ( $n = N/t$ ) та швидкість рівномірного руху кульки по колу ( $v = 2\pi R$ ) для кожного дослід.



Мал. 5

6. За формулою  $a = \frac{4\pi^2 N^2}{t^2} R$  визначте доцентрове прискорення тіла.

7. Результати вимірювань та обчислень запишіть у таблицю.

| № | Радіус кола $R$ , м | Час руху $t$ , с | Кількість обертів $n$ | Період обертання $T$ , с | Обертова частота $n$ , об/с | Швидкість руху $v$ , м/с | Прискорення тіла, $a$ , м/с <sup>2</sup> |
|---|---------------------|------------------|-----------------------|--------------------------|-----------------------------|--------------------------|------------------------------------------|
| 1 |                     |                  |                       |                          |                             |                          |                                          |
| 2 |                     |                  |                       |                          |                             |                          |                                          |

8. Проаналізувавши експеримент, зробіть висновок, у якому зазначте, який рух ви вивчали, які величини визначали та які результати отримали.

**Творче завдання.** Оцініть абсолютну та відносну похибки вимірювання періоду обертання, обертової частоти й прискорення руху тіла по колу для кожного дослід.

**Робота № 4. Визначення центра мас плоских фігур**

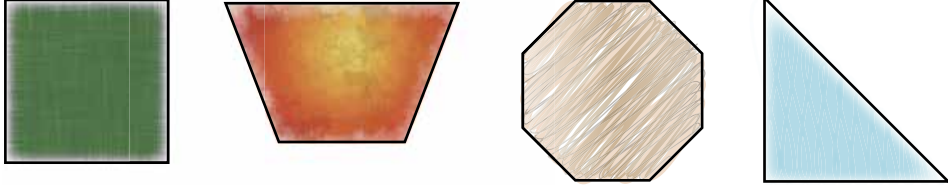
**Мета роботи:** навчитися визначати центр мас плоских фігур правильної та неправильної геометричних форм.

**Обладнання:** штатив, висок, пластини правильної та неправильної геометричних форм, скріпка, лінійка.

## Підготовка до виконання роботи

Дайте відповіді на запитання:

1. Що таке центр мас тіла?
  2. Які способи визначення центра мас ви знаєте? Коротко опишіть їх.
  3. Чи матиме тіло центр мас у космосі, далеко від Землі та інших планет?
- Задача: визначте центр мас плоских фігур (мал. 6).



Мал. 6

## Теоретичні відомості

Для того щоб тіло рухалося поступально під дією сили, потрібно, щоб лінія дії цієї сили проходила через точку, яку називають центром мас.

*Центр мас* – це точка, у якій перетинаються лінії дії сил, що примушують тіло рухатися поступально.

Центр мас є геометричним центром однорідного тіла правильної геометричної форми. Наприклад, центром мас трикутника є точка перетину його медіан. Отже, для того щоб знайти його центр, слід знайти геометричний центр фігури. Якщо фігура має неправильну геометричну форму, то, щоб знайти її центр мас, слід зробити таке:

1. Можна розділити неправильну геометричну фігуру на дві менші частини, що є правильними геометричними фігурами (наприклад, прямокутники, або трикутники, або кола). Потім визначити центр тяжіння кожної такої фігури-частини. Далі ці точки сполучають відрізком. Потім виконують розбиття фігури на дві інші фігури правильної геометричної форми і діють аналогічно. Перетин обох відрізків і буде центром мас плоскої однорідної фігури. Якщо такий геометричний спосіб застосувати досить важко, користуються експериментальним.

2. Якщо плоску фігуру підвісити в будь-якій точці, вона розташується так, що вертикальна пряма, проведена через точку підвісу (мал. 7), пройде через центр мас. Так можна знайти центр мас плоских фігур дослідним шляхом. Для цього треба, підвісивши пластину в будь-якій точці, накреслити на ній вертикальну пряму, що проходить через точку підвісу. Так зробить кілька разів, визначте точку перетину цих прямих. Вона і буде центром мас пластини. Для того щоб у цьому впевнитися, пластину можна підвісити у третій точці. Вертикальна пряма, яка проходить через точку підвісу, має пройти через точку перетину двох перших прямих. Можна також зрівноважити пластину на вістрі відігнутої скріпки. Пластина перебуватиме в рівновазі, якщо точка опори збігається із центром тяжіння. Можна також зрівноважити пластину на краю опори, наприклад на краю парти, і провести через цей край на пластині лінію, тоді, повернувши пластину, проробити це вдруге. Перетин ліній і дасть шукану точку.

## Хід роботи

### I. Визначення центра тяжіння плоскої фігури геометричним способом.

1. Розділіть запропоновану геометричну фігуру на дві більш прості геометрично правильні частини (прямокутники чи трикутники).

2. Знайдіть центр тяжіння кожної частини.

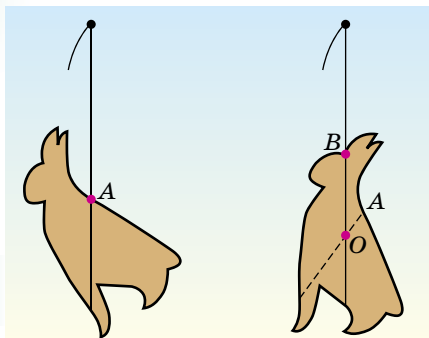
3. Сполучіть отримані точки відрізком. Проробіть ці дії знову, виконавши інше розбиття на дві інші фігури правильної геометричної форми, і сполучіть отримані точки відрізком. Знайдіть точку перетину відрізків. Отримана точка – центр мас плоскої фігури.

4. Переконайтеся, що знайдена точка є центром мас. Установіть пластинку на вістря відігнутої скріпки так, щоб центр тяжіння, який ви визначили, збігся з точкою опори. Якщо ви правильно виконали побудову, то пластинка має перебувати в рівновазі.

## II. Визначення центра мас плоскої фігури експериментально.

1. Закріпіть відігнуту скріпку в лапці штатива.

2. Підвісьте пластину і висок (це нитка з вантажком) на відігнутий кінець скріпки (мал. 7). Для цього попередньо зробіть отвір у пластині, трохи розширивши його, щоб тіло вільно оберталося навколо скріпки.



Мал. 7

3. Олівцем відмітьте лінію виска на нижньому та верхньому краях пластини.

4. Знявши пластину, проведіть лінію, яка сполучає позначені точки.

5. Повторіть дослід, підвісивши пластину в іншій точці.

6. Установіть пластину на кінець скріпки і олівець так, щоб точка опори збігалася із центром мас, який ви визначили. Якщо пластина перебуватиме в рівновазі, то точка, яку ви визначили, і є центром мас.

## Творче завдання

1. Довга жердина, яку поставлено вертикально, перебуває у стані нестійкої рівноваги. Як її утримує жонглер? Зробіть аналогічний дослід самостійно з рейкою або лінійкою.

2. У якому стані і чому яйце перебуватиме у стійкій рівновазі на столі?

## Робота № 5. Дослідження руху тіла, кинутого під кутом до горизонту

### Варіант 1

**Мета роботи:** вивчити залежність дальності польоту кульки від кута її вильоту з лабораторного балістичного пістолета.

**Обладнання:** лабораторний балістичний пістолет, вимірювальна стрічка (рулетка), аркуші копіювального та білого паперу, олівець, скотч.

### Підготовка до виконання роботи

#### Дайте відповіді на запитання:

1. Який характер руху тіла, кинутого під кутом до горизонту, у випадку, коли опором середовища можна знехтувати? По якій траєкторії рухається тіло?

2. Від яких величин залежить дальність польоту тіла, кинутого під кутом до горизонту?

3. З поверхні землі кинули тіло під кутом  $\alpha$  до горизонту. Як буде напрямлена його швидкість у момент падіння, якщо опором повітря знехтувати?

4. При якому куті кидання дальність польоту тіла є максимальною?

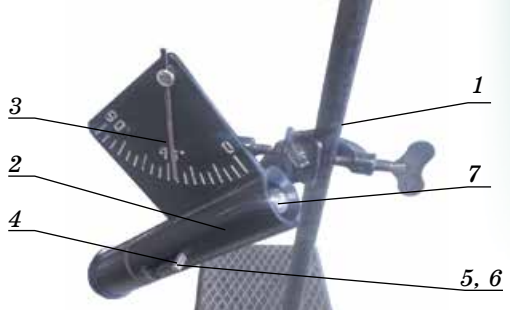


Розв'яжіть задачі:

1. Визначте дальність польоту тіла, кинутого з початковою швидкістю 1,5 м/с під кутом: а)  $30^\circ$  до горизонту; б)  $60^\circ$  до горизонту.
2. Визначте початкову швидкість тіла, кинутого вертикально вгору, якщо воно досягло висоти  $H$ .

### Опис установки та методу вимірювання

У роботі потрібно вивчити залежність дальності польоту тіла, кинутого під кутом до горизонту, від кута кидання. Для виконання роботи використовують лабораторний балістичний пістолет, закріплений на столі за допомогою штатива 1 (мал. 8). Пістолет складається зі ствола 2; кутоміра 3; спіральної пружини 4 зі стержнем; шпильки 5, що слугує для стискання й закріплення пружини; спускового кільця 6, поворот якого звільняє пружину



Мал. 8

й дає змогу снаряду – кульці 7 вилетіти зі ствола пістолета. За допомогою цього пістолета потрібно зробити кілька пострілів, запускаючи кульку під різними кутами до горизонту, а потім виміряти дальність її польоту.

Для зручності вимірювань на стіл кладуть аркуш білого паперу, накритий копіювальним папером. На білому аркуші в місці падіння кульки залишається чітка мітка. Після кількох пострілів під тим самим кутом до горизонту можна спостерігати розкид у розташуванні міток на аркуші. У цьому випадку під час вимірювання середньої дальності польоту вимірювальну стрічку слід прикласти приблизно до середини групи міток (мал. 9).

221



Мал. 9

### Хід роботи

1. Закріпіть балістичний пістолет у штативі.
2. За допомогою кутоміра встановіть пістолет під кутом  $45^\circ$ .
3. «Зарядіть» пістолет, помістивши в нього кульку, а потім зробіть пробний постріл.
4. Помітивши місце падіння кульки, покладіть на цій ділянці стола аркуш білого паперу. Зафіксуйте аркуш за допомогою скотчу, зверху покладіть копіювальний папір.
5. Установіть пістолет під кутом  $20^\circ$  і зробіть 3–4 постріли. Залишені кулькою на папері групи міток обведіть олівцем і вкажіть значення кута, при якому було отримано ці мітки.
6. Виміряйте середню дальність польоту кульки для цього кута вильоту, прикладаючи вимірювальну стрічку до середини групи міток.

7. Зробіть запуски кульки під кутами  $30^\circ$ ,  $40^\circ$  і  $45^\circ$ . Щоразу отриману групу міток обводьте олівцем, указуйте значення відповідних кутів і вимірюйте середню дальність польоту кульки.

8. Замінивши білий аркуш новим і накривши його копіювальним папером, продовжуйте запуски кульки й вимірювання середньої дальності її польоту для кутів  $50^\circ$ ,  $60^\circ$  і  $70^\circ$ .

| Кут вильоту<br>кульки                    | $l$ , м | $l_c$ , м | $\Delta l$ , м | $l \pm \Delta l$ , м |
|------------------------------------------|---------|-----------|----------------|----------------------|
| $20^\circ$<br>1.<br>2.<br>3.<br>4.<br>5. |         |           |                |                      |
| $30^\circ$<br>1.<br>2.<br>3.<br>4.<br>5. |         |           |                |                      |
| $40^\circ$<br>1.<br>2.<br>3.<br>4.<br>5. |         |           |                |                      |
| $45^\circ$<br>1.<br>2.<br>3.<br>4.<br>5. |         |           |                |                      |
| $50^\circ$<br>1.<br>2.<br>3.<br>4.<br>5. |         |           |                |                      |
| $60^\circ$<br>1.<br>2.<br>3.<br>4.<br>5. |         |           |                |                      |
| $70^\circ$<br>1.<br>2.<br>3.<br>4.<br>5. |         |           |                |                      |

9. Для кожного кута вильоту кульки обчисліть значення абсолютної похибки вимірювання дальності польоту й запишіть його в таблицю. *Зверніть увагу:* у цьому експерименті абсолютна похибка вимірювання дальності польоту  $\Delta l$  відповідає відстані від умовного центра до крайніх міток у кожній групі міток (мал. 9).

10. Запишіть у таблицю результати вимірювань з урахуванням похибки.

Уважно вивчивши таблицю результатів експерименту, сформулюйте висновок, у якому зазначте: як дальність польоту тіла, кинутого під кутом до горизонту, залежить від кута його кидання; у якому випадку дальність польоту є максимальною; чи узгоджуються результати, які ви отримали, з розрахунковими? Зробіть висновки.

**Творче завдання.** Визначте початкову швидкість, яку надає кульці пружина балістичного пістолета. Знаючи початкову швидкість і кут вильоту кульки, обчисліть дальність її польоту. Опишіть свої дії. Порівняйте експериментальні та розрахункові значення дальності польоту. Сформулюйте висновок.

## Варіант 2

**Мета роботи:** дослідити рух тіла, кинутого під кутом до горизонту; визначити швидкість вильоту снаряду з моделі гармати; дослідити вид траєкторії руху тіла, кинутого під кутом до горизонту, у полі сили тяжіння.

**Обладнання:** установка для дослідження руху тіла, кинутого під кутом до горизонту, у полі сили тяжіння, вимірювальна стрічка, міліметровий папір, транспортер, пластилін, пластиковий стаканчик з водою, клейка стрічка (за потреби).

223

## Підготовка до виконання роботи

### Виконайте завдання:

1. Доведіть формулу для дальності польоту та максимальної висоти підняття тіла, кинутого під кутом до горизонту, зобразіть траєкторією руху.

2. Доведіть формулу для дальності польоту  $l$ , висоти підняття вздовж осі  $Ox$  та над горизонтальною поверхнею  $h$  тіла, кинутого під кутом  $\beta$  до горизонту в полі сили тяжіння, якщо рух відбувається у площині, нахилений під кутом  $\alpha$  до горизонту для таких значень кутів: 1)  $\alpha = 30^\circ$ ,  $\beta = 60^\circ$ ; 2)  $\alpha = 30^\circ$ ,  $\beta = 45^\circ$ ; 3)  $\alpha = 45^\circ$ ,  $\beta = 60^\circ$ . (Зобразіть одну для всіх випадків траєкторію руху).

Розв'яжіть задачі:

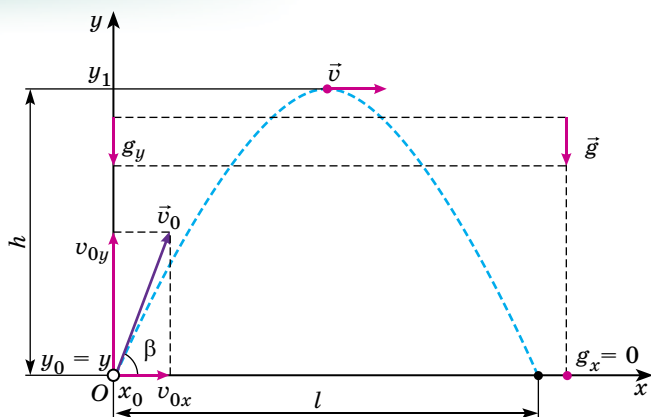
1. Визначте максимальну висоту підняття тіла та його дальність польоту, якщо це тіло кинули під кутом  $20^\circ$  до горизонту з початковою швидкістю  $20$  м/с.

2. Визначте початкову швидкість тіла, кинутого під кутом  $65^\circ$  до горизонту, якщо дальність польоту тіла становить  $80$  м.

## Теоретичні відомості

Визначимо дальність польоту і максимальну висоту підняття тіла, кинутого під кутом  $\alpha$  до горизонту. Для цього зобразимо траєкторію руху (мал. 10). Оскільки рух тіла, кинутого під кутом до горизонту, відбувається у вертикальній площині, то нам знадобляться дві взаємно перпендикулярні осі  $Ox$  та  $Oy$  для його опису.

Пов'яжемо систему відліку із Землею. Вісь  $Ox$  спрямуємо вздовж поверхні землі, а вісь  $Oy$  вертикально вгору, перпендикулярно до поверхні землі. Початок координат сумістимо з точкою початкового положення тіла, тоді з малюнка 10:  $x_0 = 0$  та  $y_0 = 0$ .



Мал. 10

Запишемо рівняння руху у проекціях на кожную вісь:

$$x = x_0 + v_{0x}t + \frac{a_x t^2}{2}, \quad y = y_0 + v_{0y}t + \frac{a_y t^2}{2}. \quad (1)$$

Оскільки під час польоту на кинуте тіло діє лише сила земного тяжіння, то тіло, кинуте під кутом до горизонту, рухатиметься з прискоренням вільного падіння  $g$ . Спроектувавши вектори початкової швидкості  $\vec{v}_0$  і прискорення  $\vec{g}$  на осі  $Ox$  та  $Oy$  (мал. 10), запишемо рівняння руху для цього випадку:

$$l = v_0 \cos \beta t, \quad (2)$$

$$0 = 0 + v_0 \sin \beta t - \frac{gt^2}{2}, \quad \text{звідки } t = \frac{2v_0 \sin \beta}{g}. \quad (3)$$

Підставимо (3) у (2):  $l = v_0 \cos \beta \frac{2v_0 \sin \beta}{g} = \frac{v_0^2 2 \cos \beta \sin \beta}{g}$ . За формулами

зведення  $2 \cos \beta \sin \beta = \sin 2\beta$ , тоді  $l = \frac{v_0^2 \sin 2\beta}{g}$  – дальність польоту тіла.

Щоб визначити максимальну висоту підняття, запишемо рівняння руху та рівняння швидкості у проекціях на вісь  $Oy$ , але не для всього часу польоту, а для польоту з точки, ордината якої  $y_0$  у точку з ординатою  $y_1$ :

$$y_1 = y_0 + v_{0y}t + \frac{a_y t^2}{2} \quad \text{та} \quad v_y = v_{0y} + a_y t. \quad (4)$$

Як видно з малюнка 10, у точці з ординатою  $y_1$  проекція миттєвої швидкості тіла на вісь  $Oy$  дорівнює нулю:  $v_y = 0$ . Спроектуємо вектори початкової швидкості  $\vec{v}_0$  і прискорення  $\vec{g}$  на вісь  $Ox$  та  $Oy$  (мал. 11), прийнявши до уваги, що  $y_0 = 0$ :

$$h = v_0 \sin \beta t_1 - \frac{gt_1^2}{2}, \quad (5)$$

$$0 = v_0 \sin \beta - gt_1, \quad \text{звідки } t_1 = \frac{v_0 \sin \beta}{g}. \quad (6)$$

Порівнявши (6) та (3), можна зробити висновок, що час підйому тіла до найвищої точки траєкторії дорівнює половині часу всього руху тіла.

Підставивши (6) в (5) та виконавши математичні перетворення, отримаємо:

$$h = \frac{v_0^2 \sin^2 \beta}{2g} - \text{максимальна висота підняття.}$$

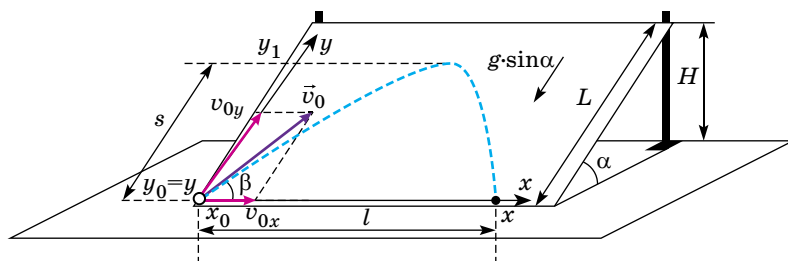
З отриманого співвідношення для дальності польоту випливає, що вона буде максимальною (для фіксованого значення  $v_0$ ) при максимальному значенні тригонометричної функції, тобто при  $\sin 2\beta = 1$ , звідки  $2\beta = 90^\circ$ ,  $\beta = 45^\circ$ .

Значення  $h$  буде найбільшим (для фіксованого значення  $v_0$ ) при  $\sin \beta = 1$ , звідки  $\beta = 90^\circ$ . Якщо площина, у якій відбувається рух тіла, кинутого під кутом, не вертикальна, то слід спроектувати вектор прискорення  $\vec{g}$  не лише на осі  $Ox$  та  $Oy$ , а й на площину  $xOy$ , у якій відбувається рух  $g_{x0y} = g \sin \alpha$ . Для випадку, коли площина утворює з горизонтом кут  $\alpha$  (мал. 11), рівняння (6) та (7) набудуть вигляду:

$$l = v_0 \cos \beta t = v_0 \frac{\sqrt{2}}{2} t, \quad (7)$$

$$0 = 0 + v_0 \sin \beta t - \frac{g \sin \alpha t^2}{2} = v_0 \frac{\sqrt{2}}{2} t - \frac{gt^2}{2} \frac{\sqrt{2}}{2}, \text{ звідки } t = \frac{2v_0}{g}. \quad (8)$$

Підставимо (8) у (7):  $l = v_0 \frac{\sqrt{2}}{2} \frac{2v_0}{g} = \frac{\sqrt{2}v_0^2}{g}$ , звідки  $v_0 = \sqrt{\frac{gl}{\sqrt{2}}}$ .



Мал. 11

Аналогічно можна визначити максимальну висоту підняття кульки вздовж похилої площини  $s$ , доповнивши рівняння (5) та (6):

$$s = v_0 \sin \beta t_1 - \frac{g \sin \alpha t_1^2}{2} = v_0 \frac{\sqrt{2}}{2} t_1 - \frac{gt_1^2}{2} \frac{\sqrt{2}}{2};$$

$$0 = v_0 \sin \beta - g \sin \alpha t_1 = v_0 \frac{\sqrt{2}}{2} - g \frac{\sqrt{2}}{2} t_1, \text{ звідки } t_1 = \frac{v_0}{g}.$$

У результаті отримаємо:  $s = \frac{\sqrt{2}v_0^2}{4g}$ .

Тоді висота підняття кульки над поверхнею парти:

$$H = s \sin \alpha = \frac{\sqrt{2}v_0^2}{4g} \frac{\sqrt{2}}{2} = \frac{v_0^2}{4g}.$$

### Хід роботи

**Завдання 1.** Визначення початкової швидкості тіла, кинутого під кутом до горизонту, у полі сили тяжіння.

1. Опрацюйте теоретичні відомості та інструкцію роботи. Підготуйте в роботі таблицю 1 для запису результатів вимірювань та обчислень.

2. За допомогою штатива встановіть дерев'яну площину під кутом  $\alpha = 45^\circ$  до горизонту. Для цього виміряйте довжину фанери  $L$ . Висоту, на яку потрібно підняти її верхній край  $H$ , розрахуйте за формулою  $H = L \sin \alpha$  (мал. 11).

3. Установіть пусковий механізм під кутом  $\beta = 45^\circ$  до нижнього краю дошки. Зробіть пробний постріл. У місці падіння кульки, на рівні з пусковим механізмом, на нижній край дошки прикріпіть смужку з пластиліну, щоб у результаті наступних пострілів кулька прилипала до нього. Запишіть значення кутів  $\alpha$  та  $\beta$  в таблицю 1.

4. Зробіть запуск кульки та за допомогою мірної стрічки виміряйте її дальність польоту  $l$  (відстань від місця запуску до місця падіння кульки). Виконайте серію пострілів (не менше ніж 5), щоразу вимірюючи дальність польоту. Визначте середню дальність польоту кульки  $l_c$ . Отримані дані запишіть у таблицю 1.

5. Обчисліть початкову швидкість кульки за формулою  $v_0 = \sqrt{\frac{gl_c}{\sqrt{2}}}$  та запишіть її значення в таблицю 1.

6. Знаючи початкову швидкість, обчисліть максимальну висоту підняття кульки вздовж похилої площини  $s$  та над поверхнею парти  $H$ .

7. Розрахуйте та запишіть похибки вимірювань.

8. Повторіть дослід (п. 2–7), розташовуючи пусковий механізм під кутами: 1)  $\alpha = 30^\circ$ ,  $\beta = 60^\circ$ ; 2)  $\alpha = 30^\circ$ ,  $\beta = 45^\circ$ ; 3)  $\alpha = 45^\circ$ ,  $\beta = 60^\circ$ .

9. Зробіть висновок, у якому опишіть свої результати, які ви отримали, виконуючи цю роботу; головні причини похибок; основні, на ваш погляд, недоліки та переваги цього дослідження; пропозиції щодо його поліпшення.

**Завдання 2. Визначення виду траєкторії тіла, кинутого під кутом до горизонту в полі сили тяжіння.**

1. Опрацюйте теоретичні відомості та інструкцію роботи. Підготуйте в роботі таблицю 2 для запису результатів вимірювань та обчислень.

2. За допомогою штатива встановіть дерев'яну площину під кутом  $\alpha = 45^\circ$  до горизонту. Для цього виміряйте довжину фанери  $L$ . Висоту, на яку потрібно підняти її верхній край  $H$ , розрахуйте за формулою  $H = L \sin \alpha$ . Установіть пусковий механізм під кутом  $\beta = 45^\circ$  до нижнього краю дошки.

3. На аркуші міліметрового паперу накресліть координатну сітку та прикріпіть її до похилої площини так, щоб початок координат збігався з точкою запуску кульки. Визначивши в попередньому досліді початкову швидкість кульки, запишіть рівняння залежності координати кульки вздовж кожної з осей від часу  $x(t)$  і  $y(t)$  та рівняння траєкторії  $y(x)$ .

4. Використовуючи ці рівняння, теоретично розрахуйте координати та позначте на аркуші паперу відповідні положення кульки через кожні 0,05 с. Результати обчислень запишіть до таблиці 2, яку ви склали. Через позначені точки проведіть плавну криву, яка і буде траєкторією руху кульки.

5. Після чого трохи змочіть кульку у воді та запустіть. На папері утвориться мокрий слід, який і буде реальною траєкторією кульки. Наведіть її олівцем. Підпишіть теоретично розраховану й експериментальну траєкторії на вашому малюнку. Продемонструйте отримані криві вчителю.

6. Зробіть висновок, у якому опишіть свої результати, які ви отримали, виконуючи цю роботу; головні причини похибок; основні, на ваш погляд, недоліки та переваги даного дослідження; пропозиції щодо його поліпшення.



**Творче завдання**

Установіть характер залежності дальності польоту снаряду  $l$  та висоти його підняття вздовж похилої площини  $s$  та над поверхнею парти  $h$  від кута нахилу дошки  $\alpha$  (для фіксованого значення кута запуску  $\beta$ , наприклад  $\beta = 45^\circ$ ).

Звіт про виконання завдання оформіть на окремому аркуші в такій послідовності:

1) розробіть та коротко запишіть інструкцію виконання роботи (не більше ніж 5 пунктів з одного-двох речень);

2) проведіть дослідження відповідно до вашої інструкції, складіть та заповніть таблиці даних, які ви розробили;

3) результати дослідження слід представити у вигляді числового співвідношення, короткого висновку. На міліметровому папері побудуйте графіки залежності  $l(\alpha)$ ,  $s(\alpha)$ ,  $h(\alpha)$ ;

4) бажано теоретично підтвердити результати дослідження (довести формули відповідних залежностей, використовуючи координатний метод опису руху кульки).

**Робота № 6. Вивчення ізотермічного процесу:  
дослідне підтвердження закону Бойля–Маріотта**

**Мета роботи:** дослідити, як змінюється об'єм певної маси газу (за сталої температури) зі зміною тиску, і встановити співвідношення між ними.

**Обладнання:** скляний циліндр заввишки 40 см з водою (або мензурка), скляна трубка завдовжки 40–50 см, закрита з одного кінця, лінійка з міліметровими поділками, барометр БР-52 (один на клас), штатив універсальний.

227

**Підготовка до виконання роботи**

**Дайте відповіді на запитання:**

1. Чи є формула  $\frac{p_1}{p_2} = \frac{V_2}{V_1}$  законом Бойля–Маріотта?

2. Яке співвідношення між 1 мм рт. ст. і 1 Па?

**Розв'яжіть задачі:**

1. Об'єм повітря в циліндрі зменшили в 5 разів, різко опустивши поршень. Чи можна вважати, що тиск газу в циліндрі збільшився у 5 разів, а температура залишилася сталою?

2. Чи є процес ізотермічним, якщо газ, який був у початковому стані за нормальних умов ( $p_1 = p_{\text{атм}} = 10^5$  Па,  $t_1 = 20^\circ\text{C}$ ) і об'ємом  $V_1 = 1$  л, перевели у стан з макропараметрами  $p_2 = 2 \cdot 10^5$  Па,  $V_2 = 5 \cdot 10^{-4}$  м<sup>3</sup>?

**Теоретичні відомості**

Для опису властивостей газів користуються трьома макропараметрами, які однозначно визначають стан газу та знаходять простим вимірюванням за допомогою приладів, це тиск –  $p$ , абсолютна температура –  $T$  і об'єм газу –  $V$ . Значення таких величин визначаються спільною дією великої кількості молекул, тому їх називають макроскопічними. Тиск вимірюють барометром, температуру – термометром, а об'єм – лінійкою або мензуркою.

Процес у газі, який відбувається за сталої температури ( $T = \text{const}$ ), називають ізотермічним, а його графік – ізотермою. Залежність між тиском  $p$  газу і його об'ємом  $V$  за сталої температури дослідним шляхом уперше встановили Роберт Бойль і Едм Маріотт.

Закон Бойля–Маріотта визначає те, що якщо маса газу в системі не змінюється (замкнена система), то добуток тиску газу і його об'єму є стала величина для будь-якого стану газу при ізотермічному процесі:  $pV = \text{const}$ .

Це означає, що коли об'єм газу зменшується, тиск підвищується, а коли збільшується, тиск знижується. При ізотермічному стисканні газу його частинкам надається менший об'єм, і тому вони частіше стикаються зі стінками посудини, що призводить до підвищення тиску газу. При ізотермічному розширенні газу все відбувається навпаки.

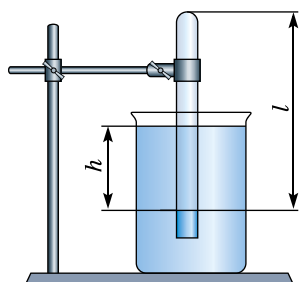
При врахуванні закону Менделєєва–Клапейрона для будь-якої кількості станів ідеального газу для ізотермічного процесу справджується:

$$p_1 V_1 = p_2 V_2 = p_3 V_3 = \dots = p_n V_n = \frac{m}{\mu} RT = \text{const.}$$

Для будь-яких двох станів газу (початкового і кінцевого) закон Бойля–Маріотта має такий вигляд:  $p_1 V_1 = p_2 V_2$ .

Закон Бойля–Маріотта можна перевірити за допомогою такого досліду.

Опустіть відкритим кінцем униз трубку у скляний циліндр висотою 40 см з водою (мал. 12) і закріпіть її у штативі. Повітря у трубці буде під тиском, який дорівнює атмосферному  $H$  і гідростатичному тиску стовпчика



Мал. 12

води висотою  $h$ . (Для спрощення розрахунку атмосферний тиск і тиск стовпчика води доцільно вимірювати в мм рт. ст.).

Густина води в 13,6 раза менша за густину ртуті, тому стовпчик висотою  $h$  (мм) створює такий самий тиск, як стовпчик ртуті висотою  $\frac{h}{13,6}$  (мм).

Повітря у трубці буде під тиском:  $p = H + \frac{h}{13,6}$ , де  $H$  – атмосферний тиск у мм рт. ст.;  $h$  – різниця рівнів води, виміряна у мм, у циліндрі і у трубці (мал. 12).

Об'єм повітря у трубці визначається за формулою:  $V = SL$ , де  $S$  – площа поперечного перерізу повітряного стовпчика у трубці,  $\text{м}^2$ ;  $L$  – довжина стовпчика повітря, мм рт. ст. (мал. 12).

Із зміною глибини занурення трубки змінюється об'єм  $V$  повітряного стовпчика у трубці (і  $L$  довжина стовпчика повітря) і, відповідно, тиск  $p$  повітря в ній.

Закон Бойля–Маріотта в нашому випадку матиме вигляд:  $p_1 V_1 = p_2 V_2$ , де  $p_1 = H + \frac{h_1}{13,6}$ ,  $p_2 = H + \frac{h_2}{13,6}$ ,  $V_1 = SL_1$ ,  $V_2 = SL_2$ .

Оскільки площа поперечного перерізу повітряного стовпчика  $S$  є стала величина (форма трубки не змінюється), то закон Бойля–Маріотта перепишемо так:  $p_1 L_1 = p_2 L_2$ .

Тому значення  $L$  можна прийняти за значення  $V$  в умовних одиницях.

### Хід роботи

1. Виміряйте барометром атмосферний тиск  $H$  у мм рт. ст. (Під таким тиском перебуває повітря у трубці до її занурення у воду).

2. Опустіть у воду трубку відкритим кінцем донизу на максимальну глибину. Виміряйте довжину стовпчика  $L$  повітря у трубці і різницю рівнів води в ній і в циліндрі –  $h$ . Щоб зручніше було визначити довжину стовпчика  $L$  повітря у трубці, один раз виміряйте лінійкою довжину трубки, яку занурюєте у воду, та відніміть від цього значення довжину стовпчика води в нижній частині трубки.

3. Повторіть вимірювання  $L$  і  $h$  для двох менших глибин занурення трубки.

4. Обчисліть добутки за формулою:  $C = L \left( H + \frac{h}{13,6} \right)$

для всіх трьох дослідів, порівняйте їх між собою, зробіть висновок.

5. Визначте середнє значення  $C_c$  з трьох значень за формулою:

$$C_c = (C_1 + C_2 + C_3) : 3.$$

6. Обчисліть абсолютну похибку вимірювань  $\Delta C$  за формулою:

$$\Delta C = C - C_c \text{ для всіх трьох дослідів.}$$

7. Обчисліть середню абсолютну похибку вимірювань  $\Delta C_c$  за формулою:

$$\Delta C_c = (\Delta C_1 + \Delta C_2 + \Delta C_3) : 3 \text{ для всіх трьох значень.}$$

8. Визначте відносну похибку  $\varepsilon$  вимірювань за формулою:

$$\varepsilon = \frac{\Delta C_c}{C_c} 100 \, \%.$$

9. Результат запишіть у вигляді:  $C_c - (\Delta C)_c \leq C \leq C_c + (\Delta C)_c$ .

10. Результати вимірювань і обчислень запишіть у таблицю.

| № | $H$ ,<br>мм<br>рт. ст. | $h$ ,<br>мм рт. ст. | $L$ ,<br>мм | $C = L \left( H + \frac{h}{13,6} \right)$ ,<br>мм рт. ст. · мм | $C_c$ ,<br>мм рт.<br>ст. · мм | $\Delta C = C - C_c$ ,<br>мм рт.<br>ст. · мм | $\Delta C_c$ ,<br>мм рт.<br>ст. · мм | $\varepsilon$ ,<br>% |
|---|------------------------|---------------------|-------------|----------------------------------------------------------------|-------------------------------|----------------------------------------------|--------------------------------------|----------------------|
| 1 |                        |                     |             |                                                                |                               |                                              |                                      |                      |
| 2 |                        |                     |             |                                                                |                               |                                              |                                      |                      |
| 3 |                        |                     |             |                                                                |                               |                                              |                                      |                      |

11. Зробіть висновки.

#### Творче завдання

У навчальній літературі є така задача: «Водяний павук-сріблянка буде під водою повітряний палац, переносючи на лапках та черевці бульбашки атмосферного повітря і вміщуючи їх під купол павутиння, прикріпленого кінцями до водяних рослин. Скільки «рейсів» треба зробити павукові, щоб на глибині 50 см побудувати палац об'ємом  $1 \text{ см}^3$ , якщо щоразу він бере повітря об'ємом  $5 \text{ мм}^3$  за нормального атмосферного тиску?».

Використовуючи інші джерела, дослідіть, чи дійсно ця комаха так поводиться.

#### Варіант 2

**Вивчення ізобарного процесу: дослідна перевірка закону Гей-Люссака**

**Мета роботи:** на дослідах перевірити закон Гей-Люссака.

**Обладнання:** скляна трубка довжиною 600 мм і діаметром 8–10 мм, запаяна з одного кінця, посудина висотою 600 мм і діаметром 40–50 мм, наповнена гарячою водою ( $\approx 60^\circ \text{C}$ ), склянка з водою кімнатної температури, лінійка з міліметровими поділками, пластилін або корок.

#### Підготовка до виконання роботи

Дайте відповіді на запитання:

1. Які газові закони впливають з рівняння Менделєєва–Клапейрона?
2. Дайте визначення закону Гей-Люссака.

Розв'яжіть задачі:

1. На скільки градусів треба ізобарно нагріти газ, узятий за температури  $17^\circ\text{C}$ , щоб його об'єм збільшився від  $50\text{ см}^3$  до  $60\text{ см}^3$ ?
2. Визначте початковий об'єм газу, якщо температура його збільшилася від  $127^\circ\text{C}$  до  $227^\circ\text{C}$ , а кінцевий об'єм дорівнює  $2,5\text{ м}^3$ .
3. Тиск повітря в шинах велосипеда за температури  $12^\circ\text{C}$  становить  $1,5\text{ атм}$ . Чому дорівнює тиск за температури  $42^\circ\text{C}$ ?

### Теоретичні відомості

Щоб перевірити закон Гей-Люссака, потрібно виміряти об'єм і температуру газу у двох станах за сталого тиску і перевірити справедливості рівності  $\frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2}$ . Це можна зробити за атмосферного тиску.

Скляну трубку відкритим кінцем угору вставляють на 3–5 хв у циліндричну посудину з гарячою водою (мал. 13, а). У цьому випадку об'єм повітря  $V_1$  дорівнює об'єму скляної трубки, а температура – температурі гарячої води  $T_1$ . Це – перший стан. Щоб під час переходу повітря у другий стан його кількість не змінилася, відкритий кінець скляної трубки, що перебуває в гарячій воді, закривають пластиніном або корком. Після цього трубку виймають з посудини з гарячою водою і закритий кінець швидко опускають у

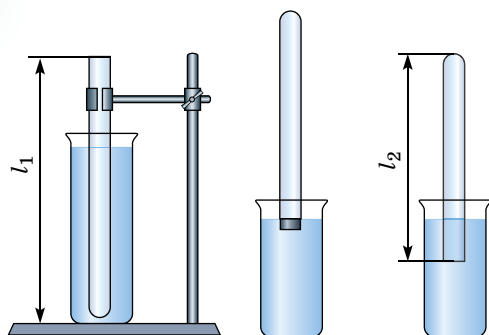
склянку з водою кімнатної температури (мал. 13, б), а потім під водою знімають пластинін або корок. З охолодженням повітря у трубці вода в ній піднімається. Після того як вода перестане підніматися у трубці (мал. 13, в), об'єм повітря в ній дорівнюватиме  $V_2 < V_1$ , а тиск  $p = p_{\text{атм}}\rho gh$ .

Щоб тиск повітря у трубці знову дорівнював атмосферному, потрібно збільшити глибину занурення трубки у склянку доти, доки рівні води у трубці і у склянці не будуть однаковими. Це буде другий стан повітря у трубці за температури навколишнього повітря  $T_2$ . Відношення об'ємів повітря у трубці в першому і другому станах можна замінити відношенням висот повітряних стовпів у трубці в цих станах, якщо переріз трубки однаковий по всій довжині  $\left(\frac{V_1}{V_2} = \frac{Sl_1}{Sl_2} = \frac{l_1}{l_2}\right)$ . Тому в роботі слід порівняти відношення  $\frac{l_1}{l_2} = \frac{T_1}{T_2}$ . Довжину повітряного стовпа вимірюємо лінійкою з міліметровими поділками, а температуру – термометром.

### Хід роботи

1. Підготуйте таблицю для записування результатів вимірювань і обчислень.

| $l_1$ , мм | $l_2$ , мм | $\Delta l$ , мм | $t_1$ , $^\circ\text{C}$ | $T_1$ , К | $t_2$ , $^\circ\text{C}$ | $T_2$ , К | $\Delta T$ , К | $\frac{l_1}{l_2}$ | $\Delta_1$ | $\varepsilon_1$ , % | $\frac{T_1}{T_2}$ | $\Delta_2$ | $\varepsilon_2$ , % |
|------------|------------|-----------------|--------------------------|-----------|--------------------------|-----------|----------------|-------------------|------------|---------------------|-------------------|------------|---------------------|
|            |            |                 |                          |           |                          |           |                |                   |            |                     |                   |            |                     |



Мал. 13

2. Підготуйте склянку з водою кімнатної температури і посудину з гарячою водою.

3. Виміряйте довжину  $l_1$  скляної трубки і температуру води в циліндричній посудині  $T_1$ .

4. Приведіть повітря у трубці у другий стан так, як про це розповідалося вище. Виміряйте довжину  $l_2$  повітряного стовпа у трубці і температуру навколишнього повітря  $T_2$ .

5. Обчисліть відношення  $\frac{l_1}{l_2}$  і  $\frac{T_1}{T_2}$ , відносні та абсолютні похибки вимірювань цих відношень за формулами:

$$\varepsilon_1 = \frac{\Delta l}{l_1} + \frac{\Delta l}{l_2}; \quad \Delta_1 = \frac{l_1}{l_2} \varepsilon_1; \quad \varepsilon_2 = \frac{\Delta T}{T_1} + \frac{\Delta T}{T_2}; \quad \Delta_2 = \frac{T_1}{T_2} \varepsilon_2.$$

6. Порівняйте відношення  $\frac{l_1}{l_2}$  і  $\frac{T_1}{T_2}$  та зробіть висновки про справедливність закону Гей-Люссака.

### Творче завдання

1. Чому після занурення трубки у склянку з водою кімнатної температури і після зняття пластиліну вода у трубці піднімається?

2. Чому коли рівні води у склянці та у трубці однакові, тиск повітря у трубці дорівнює атмосферному?

## Робота № 7. Визначення коефіцієнта поверхневого натягу рідини

231

### Варіант 1

**Мета роботи:** визначити коефіцієнт поверхневого натягу рідини.

**Обладнання:** динамометр, склянка, штангенциркуль або вимірювальна лінійка з міліметровими поділками, дротик або дротяна рамка на нитках (мал. 1).

### Підготовка до виконання роботи

Дайте відповіді на запитання:

1. Як пояснити існування поверхневого натягу рідини?
2. Які величини в цій роботі потрібно вимірювати найточніше?
3. Які є методи вимірювання коефіцієнта поверхневого натягу рідини?

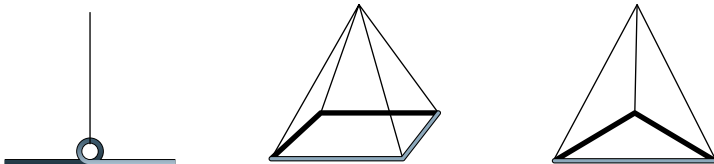
Розв'яжіть задачі:

1. На поверхню води покладіть два сірники і шматком мила торкніться води між ними. Повторіть дослід, торкнувшись шматком цукру. Запишіть результати дослідів.

2. Для визначення коефіцієнта поверхневого натягу води використали піпетку, діаметр вихідного отвору якої 2 мм. Маса 40 крапель, як виявилось, дорівнює 1,9 г. Чому дорівнює, за цими даними, коефіцієнт поверхневого натягу води?

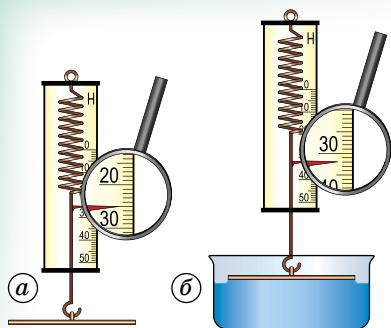
### Теоретичні відомості

Для визначення коефіцієнта поверхневого натягу найзручніше користуватися співвідношенням між силою поверхневого натягу і довжиною межі поверхневого шару  $F = \sigma l$ .



Мал. 14

## Хід роботи



Мал. 15

1. Виміряйте штангенциркулем або масштабною лінійкою довжину дротика (периметр рамки, мал. 14).

2. Прикріпіть дротик або рамку до гачка динамометра і намагайтеся горизонтально розташувати дротик або рамку (мал. 15, а).

3. Обережно опустіть дротик або рамку так, щоб вони, торкнувшись поверхні води, «прилипли» до неї.

4. Піднімайте вгору динамометр, простежте, при якому значенні дротик або рамка «відірветься» від води (мал. 15, б).

5. Повторіть дослід п'ять разів і заповніть таблицю.

| № | $l$ , м | $\Delta l$ , м | $F$ , Н | $F_c$ , Н | $\Delta F$ , Н | $\sigma$ , Н/м | $\Delta \sigma$ , Н/м | $\varepsilon$ , % |
|---|---------|----------------|---------|-----------|----------------|----------------|-----------------------|-------------------|
| 1 |         |                |         |           |                |                |                       |                   |
| 2 |         |                |         |           |                |                |                       |                   |
| 3 |         |                |         |           |                |                |                       |                   |
| 4 |         |                |         |           |                |                |                       |                   |
| 5 |         |                |         |           |                |                |                       |                   |

6. Обчисліть середнє значення сили, що діє на дротик або рамку.

7. Визначте коефіцієнт поверхневого натягу води за формулою:  $\sigma = \frac{F}{l}$ .

8. Розрахуйте абсолютну і відносну похибки вимірювання:

$$\varepsilon = \frac{\Delta F}{F} + \frac{\Delta l}{l}; \quad \Delta \sigma = \varepsilon \sigma.$$

9. Зробіть висновки.

**Творче завдання**

1. Виміряйте коефіцієнт поверхневого натягу підсолодженої води.

2. Виміряйте коефіцієнт поверхневого натягу будь-яких парфумів.

3. Зробіть висновки.

**Варіант 2****Вимірювання коефіцієнта поверхневого натягу рідини**

**Мета роботи:** виміряти коефіцієнт поверхневого натягу дистильованої води методом відриву крапель.

**Обладнання:** 1) крапельниця, закріплена у штативі; 2) дві хімічні склянки; 3) штангенциркуль; 4) терези з набором гир; 5) екран із приклеєним міліметровим папером; 6) електрична лампочка на 3,5 В на підставці; 7) батарейка кишенькового ліхтарика; 8) ключ; 9) з'єднувальні проводи.

**Підготовка до виконання роботи**

**Дайте відповіді на запитання:**

1. Як пояснити існування поверхневого натягу рідини?

2. Які величини в цій роботі потрібно вимірювати найточніше?

3. Які є методи вимірювання коефіцієнта поверхневого натягу рідини?

**Розв'яжіть задачі:**

1. 1820 мг мінеральної олії пропустили через піпетку і отримали 152 краплі. Визначте коефіцієнт поверхневого натягу олії, якщо діаметр шийки піпетки 1,2 мм.



2. Поверхневий шар рідини дуже схожий на розтягнуту гумову плівку. Чи справді ця схожість між ними така істотна? Чи можна, зокрема, до поверхневого шару рідини як до пружно-деформованої плівки застосувати закон Гука?

### Теоретичні відомості

Якщо вода повільно витікає з вертикально закріпленої трубки, то з її нижнього кінця відривається крапля за краплею. Розміри кожної з крапель збільшуються поступово. Зі збільшенням краплі шийка її тоншає, і, нарешті, крапля відривається. Коли крапля ще висить на шийці (мал. 16), сила тяжіння  $mg$ , яка діє на краплю, зрівноважується силами поверхневого натягу  $\pi d\sigma$ , що діють по периметру поперечного перерізу шийки, звідки  $\sigma = \frac{mg}{\pi d}$ , де  $\sigma$  – коефіцієнт поверхневого натягу рідини;  $d$  – діаметр найвузшого місця шийки, у якому сили поверхневого натягу напрямлені вертикально;  $m$  – маса висячої краплі.

Випускаючи рідину краплями дуже повільно, практично досягають того, що маса висячої краплі дорівнює масі краплі, що відривається (без цієї умови маса падаючої краплі буде меншою від маси, яка визначається за формулою  $\sigma = \frac{mg}{\pi d}$ ;  $m = \pi d\sigma/g$ ).

Щоб точніше виміряти масу  $m$  краплі, у посудину набирають багато крапель і ділять загальну масу  $m$  на їх кількість  $n$ . Для вимірювання діаметра шийки краплі, при якій крапля ще не відривається, її освітлюють розбіжним пучком світла і на екрані одержують тінь від краплі. Розміри тіні значно більші за розміри краплі. За допомогою міліметрового паперу, приклеєного до екрана, можна виміряти розміри тіней шийки і трубки. Якщо зовнішній діаметр трубки  $D$ , а розміри її тіні  $D'$ , то розміри тіні більші за діаметр у  $D'/D$  разів. Очевидно, у стільки само разів буде більшим розмір тіні шийки  $d'$  від діаметра шийки  $d$ :  $\frac{D'}{D} = \frac{d'}{d}$ , звідки  $d = \frac{D}{D'} d'$ .

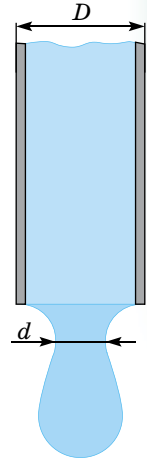
Остаточна формула для посереднього вимірювання коефіцієнта поверхневого натягу рідини:

$$\sigma = \frac{(m_2 - m_1)g}{\pi dn},$$

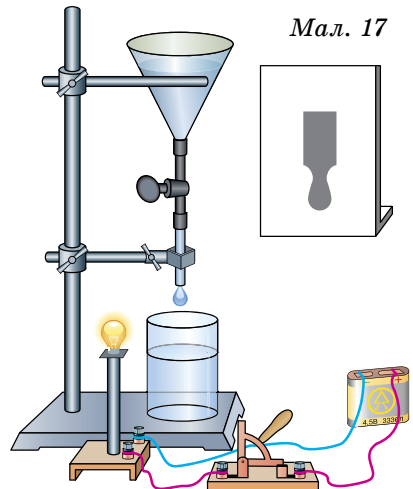
де  $m_1$  – маса порожньої посудини,  $m_2$  – маса посудини з  $n$  краплями води.

### Опис приладу

Прилад для цієї роботи показано на малюнку 17: закріплена у штативі крапельниця складається з лійки, гумової трубки, затискача і скляної трубки. Кінець трубки плоско відшліфований і повністю змочуваний. З одного боку трубки встановлено освітлювач (електричну лампочку, що живиться від батарейки кишенькового ліхтарика), а з другого – екран, до якого прикріплено міліметровий папір.



Мал. 16



Мал. 17

## Хід роботи

1. Визначте і запишіть характеристики засобів вимірювання, що використовуються в роботі.

2. Виміряйте штангенциркулем зовнішній діаметр трубки  $D$  і масу посудини  $m_1$ , у яку стікатимуть краплі.

3. Затисніть гумову трубку крапельниці, налейте в лійку дистильованої води. Підставте під крапельницю хімічну склянку. Регулюючи затискачем, намагайтеся, щоб краплі повільно витікали. Розмістіть освітлювач і екран так, щоб тіні від краплі й кінця трубки на екрані були чіткими. Підставте склянку з виміряною масою і відлічіть 20 крапель. Після того виміряйте масу посудини з краплями  $m_2$ .

4. Спостерігаючи за рухом крапель на екрані, виміряйте  $d'$  і  $D'$ . За максимальну абсолютну похибку вимірювання  $d'$  прийміть  $\pm 3$  мм (під час вимірювання  $d'$  потрібно було б оцінити випадкову похибку, а для цього треба виміряти діаметр шийки кожної падаючої краплі і знайти середнє його значення, обчислити середню арифметичну похибку результату вимірювання, потім оцінити максимальну похибку вимірювання діаметра шийки краплі. Для спрощення роботи цього не робимо).

| Вимірювана величина | Покази способу вимірювання | Межа похибки відлічування | Межа абсолютної похибки вимірювання | Результат вимірювання | Межа відносної похибки результату вимірювання |
|---------------------|----------------------------|---------------------------|-------------------------------------|-----------------------|-----------------------------------------------|
| $D$                 |                            |                           |                                     |                       |                                               |
| $d'$                |                            |                           |                                     |                       |                                               |
| $D'$                |                            |                           |                                     |                       |                                               |
| $m_1$               |                            |                           |                                     |                       |                                               |
| $m_2$               |                            |                           |                                     |                       |                                               |
| $n$                 |                            |                           |                                     |                       |                                               |

5. Результати вимірювань  $D$ ,  $d'$ ,  $D'$ ,  $m_1$ ,  $m_2$  і  $n$  запишіть у таблицю.

6. Обчисліть коефіцієнт поверхневого натягу дистильованої води. Результати вимірювань обробіть способом підрахунку цифр.

**Творче завдання**

На лійці крапельниці нанесіть горизонтальні лінії на відстані 5–10 мм одна від одної. Полічіть, скільки крапель  $n_1$  утвориться із цього об'єму дистильованої води, а потім кількість крапель  $n_2$  якоїсь іншої рідини. Виміряйте густину дистильованої води  $\rho_1$  і досліджуваної рідини  $\rho_2$  денсиметром.

За результатами вимірювань визначте коефіцієнт поверхневого натягу  $\sigma_2$  досліджуваної рідини, уважаючи коефіцієнт поверхневого натягу дистильованої води  $\sigma_1$  відомим (узяти з роботи).

*Порада.* Оскільки

$$\frac{\rho_1 V g}{n_1} = \pi d_1 \sigma_1, \quad \frac{\rho_2 V g}{n_2} = \pi d_2 \sigma_2,$$

де  $d_1$  і  $d_2$  – відповідні діаметри шийок крапель, які можна вважати рівними ( $d_1 = d_2$ ), то

$$\frac{\rho_1 V g}{n_1} : \frac{\rho_2 V g}{n_2} = \frac{\pi d_1 \sigma_1}{\pi d_2 \sigma_2}, \quad \text{звідки } \sigma_2 = \sigma_1 \frac{\rho_2 n_1}{\rho_1 n_2}.$$

**Робота № 8. Визначення модуля пружності різних речовин****Варіант 1**

**Мета роботи:** експериментально перевірити закон Гука і визначити модуль пружності гуми.

**Обладнання:** гумовий шнур завдовжки 20–30 см; динамометр Бакушинського; вимірювальна лінійка з міліметровими поділками, штангенциркуль, набір важків.

## Підготовка до виконання роботи

## Дайте відповіді на запитання:

1. Які види деформації відбуваються у тросі підйомного крана, стінах будинку, у мості, корпусі підводного човна, батискафа, стовбурі дерева у вітряну погоду, у свердлику, у валі токарного верстата?

2. Чим відрізняються деформації пластиліну, воску, свинцю від деформацій гуми, сталі?

3. На тіло у двох паралельних площинах діє протилежно напрямлена пара сил. Якого виду деформації зазнає тіло?

Розв'яжіть задачі:

1. Бетон добре протидіє стисканню, але погано витримує розтяг. Сталь має велику міцність на розтяг. Які властивості має залізобетон?

2. У скільки разів абсолютний розтяг мідної дротини більший, ніж залізної ( $\Delta l_1/\Delta l_2 = ?$ ), якщо  $l_{01} = l_{02}$ ,  $S_{01} = S_{02}$  і діють на них однакові розтягувальні сили ( $F_1 = F_2$ )?

## Теоретичні відомості

Модуль Юнга обчислюють за формулою  $E = \frac{Fl_0}{S(l - l_0)}$ , яку вивели із

закону Гука, де  $E$  – модуль Юнга;  $F$  – сила пружності, що виникає в розтягнутому шнурі і яка дорівнює вазі прикріплених до шнура важків (мал. 18, а);  $S$  – площа поперечного перерізу деформованого шнура;  $l_0$  – відстань між позначками А і В на нерозтягнутому шнурі (мал. 18, б);  $l$  – відстань між цими самими позначками на розтягнутому шнурі (мал. 18, в). Якщо поперечний переріз шнура має форму круга, то площа перерізу

виражається через діаметр шнура:  $S = \frac{\pi D^2}{4}$ .

Остаточно формула для визначення модуля Юнга має вигляд:

$$E = \frac{4Fl_0}{\pi D^2(l - l_0)}.$$

Вагу вантажів визначаємо динамометром, діаметр шнура – штангенциркулем, відстань між позначками А і В – лінійкою. Відносну й абсолютну похибки вимірювання модуля Юнга визначають за формулами:

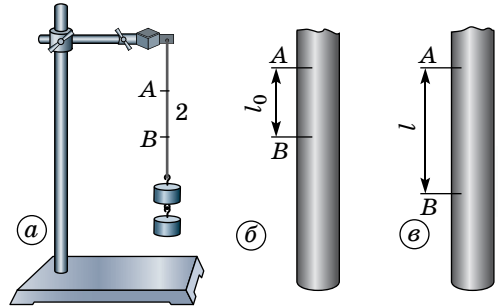
$$\varepsilon = \frac{\Delta F}{F} + \frac{\Delta l}{l_0} + 2 \frac{\Delta D}{D} + 2 \frac{\Delta l}{l - l_0}; \quad \Delta E = \varepsilon E.$$

Похибкою  $\pi = 3,14$  можна знехтувати.

## Хід роботи

1. Підготуйте таблицю для записування результатів вимірювання й обчислень.

| $l_0$ , м | $l$ , м | $\Delta l$ , м | $D$ , м | $\Delta D$ , м | $F$ , Н | $\Delta F$ , Н | $E$ , Па | $\Delta E$ , Па | $\varepsilon$ , % |
|-----------|---------|----------------|---------|----------------|---------|----------------|----------|-----------------|-------------------|
|           |         |                |         |                |         |                |          |                 |                   |



Мал. 18

2. Складіть експериментальну установку.

3. Зробіть олівцем позначки на гумовому шнурі. Виміряйте відстань між позначками  $A$  і  $B$  на нерозтягнутому шнурі.

4. Визначте загальну масу важків і підвісьте їх до нижнього кінця шнура. Виміряйте відстань між рисками на шнурі і діаметр шнура в розтягнутому стані.

5. Обчисліть модуль Юнга гуми; відносну й абсолютну похибки вимірювання модуля Юнга.

6. Запишіть отриманий результат:  $E = E_{\text{дп}} \pm \Delta E$ ,  $\varepsilon = \dots \%$ . Порівняйте цей результат з табличним. Зробіть висновки.

### Творче завдання

Чому модуль Юнга виражається таким великим числом?

## Варіант 2

**Мета роботи:** дослідити залежність видовження зразка від навантаження. Визначити модуль Юнга для капрона.

**Обладнання:** прилад для визначення модуля пружності, рулетка, мікрометр, важки, капронова нитка.

### Підготовка до виконання роботи

Дайте відповіді на запитання:

1. Які деформації називають пружними?

2. Сформулюйте закон Гука.

3. Який фізичний зміст модуля Юнга?

4. Накресліть діаграму розтягу дроту і поясніть фізичний зміст окремих її ділянок.

Розв'яжіть задачу:

Якої довжини має бути мідний дріт, щоб він, якщо його підвісити вертикально, розірвався під дією власної ваги?

### Теоретичні відомості

Деформацією називають зміну форми чи об'єму твердого тіла, яка спричинена дією зовнішніх сил. Якщо ці сили малі, то після припинення їх дії деформація зникає; якщо ж сили великі, то після припинення дії виявляється так звана залишкова деформація. У разі появи щонайменшої залишкової деформації кажуть, що досягнуто межі пружності.

Оскільки результат дії сили залежить також і від розмірів зразка, то зручно дію сили оцінювати за напругою, що виникає у зразку. **Напругою** називають відношення сили  $F$  до площі поперечного перерізу зразка  $S$ :  $\sigma = \frac{F}{S}$ .

Серед різних деформацій виділяють дві найпростіші: деформацію розтягу (стиску) і деформацію зсуву. Усі малі деформації можна розглядати як суму деяких розтягів (чи стисків) і зсувів.

Малі деформації задовольняють такі основні закони:

1. У межах пружності деформація пропорційна прикладеній нарузі.

2. Зі зміною напрямку дії зовнішньої сили змінюється тільки напрямок деформації без зміни її значення.

3. При дії кількох зовнішніх сил загальна деформація дорівнює сумі окремих деформацій (принцип суперпозиції малих деформацій).

Для малих деформацій розтягу чи стиску стержня справджується закон Гука:

$$\frac{\Delta l}{l_0} = \alpha \frac{F}{S} \text{ або } \varepsilon = \alpha \sigma,$$

де:  $l_0$  – початкова довжина стержня;  $\Delta l = l - l_0$  – його абсолютне видовження;  $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$  називають відносним видовженням;  $\alpha$  – коефіцієнт пружності під час розтягу.

Величину, обернену до  $\alpha$ , називають **модулем пружності** під час розтягу, або **модулем Юнга**:

$$E = \frac{l}{\alpha} = \frac{Fl_0}{S\Delta l}.$$

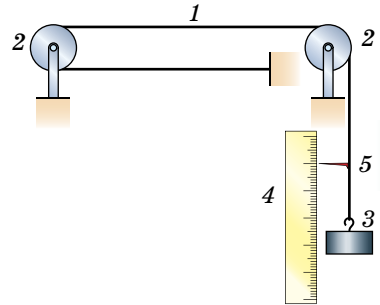
З використанням модуля Юнга закон Гука записують так:  $\sigma = E\varepsilon$ .

Під дією сили  $F$ , що розтягує стержень, змінюються не тільки поздовжні, а й поперечні розміри стержня; кажуть, що під час розтягу стержень зазнає поперечного стиску. Якщо  $d_0$  – діаметр стержня до деформації,  $d$  – після деформації, то  $\frac{\Delta d}{d_0} = \beta \frac{F}{S}$ , де  $\Delta d = d - d_0$ ,  $\beta$  – коефіцієнт поперечного стиску.

Відношення відносного поперечного стиску до відповідного відносного поздовжнього видовження (або відношення  $\beta/\alpha$ ) називають коефіцієнтом Пуассона:  $\mu = \frac{\beta}{\alpha} = \frac{\Delta d}{d_0} : \frac{\Delta l}{l_0}$ .

#### Опис установки

В установці (мал. 19) використовується довга (близько 5 м) капронова нитка діаметром 0,2–0,4 мм (рибальська волосінь). На малюнку її позначено цифрою 1. За допомогою блоків 2 капронову нитку закріплено на робочому столі. До кінця нитки приєднано платформу для важків 3. Поруч вертикально закріплено лінійку 4, на якій за допомогою покажчика 5 можна відмічати положення кінця нитки. Значна довжина нитки дає змогу вже за невеликих навантажень ( $\gg 1$  Н) з достатньою точністю виміряти абсолютне видовження  $\Delta l$ . Модуль Юнга визначають за формулою  $E = \frac{l}{\alpha} = \frac{Fl_0}{S\Delta l}$  для різних значень  $F$ .



Мал. 19

#### Хід роботи

1. Виміряйте рулеткою довжину капронової нитки  $l_0$  до стрілки-показчика 5 при ненавантаженій платформі. Допустима похибка вимірювання – 1 см.
2. Мікрометром виміряйте діаметр нитки  $d$ . Вимірювання виконайте кілька разів у різних місцях і знайдіть з одержаних значень середнє арифметичне.
3. Запишіть початкове положення стрілки-показчика  $n_0$ .
4. Навантажте платформу важком масою  $m$ . Під час обчислення сили тяжіння  $F$ , що діє на цей важок,  $g \approx 10$  м/с<sup>2</sup>.
5. Запишіть положення стрілки  $n_1$ .
6. Навантажуйте платформу послідовно важками, збільшуючи масу їх щоразу на  $m$  г. Записуйте кожного разу покази стрілки  $n_2, n_3$  і т. д.
7. Максимальне навантаження уточніть у вчителя.
8. Почніть розвантажувати платформу, знімаючи кожного разу також по  $m$  г. Записуйте щоразу покази стрілки  $n_6, n_5, n_4$  і т. д. до  $n_0$ .
9. Побудуйте графік зміни видовження нитки зі зміною навантаження  $F$ : при  $F_1$ :  $\Delta l_1 = n_1 - n_0$ , а при  $F_2$ :  $\Delta l_2 = n_2 - n_0$  і т. д.

10. Проаналізуйте одержаний графік. Чи виконується закон Гука?

11. Обчисліть для кожного видовження модуль Юнга за формулою:

$$E = \frac{4Fl_0}{\pi d^2 \Delta l}.$$

12. Знайдіть середнє арифметичне з одержаних значень  $E$  і порівняйте з табличним.

13. Результати вимірювань і обчислень можна подати у вигляді таблиці.

| №                | $F = mg, \text{ Н}$ | $l_0, \text{ м}$ | $d, \text{ м}$ | $\Delta l, \text{ м}$ | $E, \text{ Н/м}^2$ | $\Delta E, \text{ Н/м}^2$ |
|------------------|---------------------|------------------|----------------|-----------------------|--------------------|---------------------------|
| 1                |                     |                  |                |                       |                    |                           |
| 2                |                     |                  |                |                       |                    |                           |
| 3                |                     |                  |                |                       |                    |                           |
| .                |                     |                  |                |                       |                    |                           |
| .                |                     |                  |                |                       |                    |                           |
| Середнє значення | —                   |                  |                | —                     |                    |                           |

14. Похибка вимірювань:  $\Delta E_i = |E_i - E_c|$ . Кінцевий результат подайте у

238

вигляді  $E = E_c \pm \Delta E_c$ , де  $\Delta E_c = \frac{\sum_{i=1}^N \Delta E_i}{N}$ .

#### Творче завдання

Поясніть, чому сталеві троси різного діаметра виготовляють з певної кількості дротин меншого діаметра залежно від призначення троса.



## ВИДАТНІ УКРАЇНСЬКІ ФІЗИКИ, ЯКІ ЗРОБИЛИ ЗНАЧНИЙ ВНЕСОК У РОЗВИТОК МЕХАНІКИ, МОЛЕКУЛЯРНОЇ ФІЗИКИ ТА ТЕРМОДИНАМІКИ



**Ірина Іванівна Адаменко (1935–2010)** – українська науковиця, доктор фізико-математичних наук, професор Київського національного університету імені Тараса Шевченка.

Наукова діяльність пов'язана з дослідженням рівняння стану, пружних, акустичних, теплових і калоричних властивостей молекулярних рідин, нанорозмірних рідинних систем та їхніх розчинів. Займалася комп'ютерним моделюванням молекулярної будови і фізичних властивостей нанорозмірних рідинних систем у широких інтервалах зміни температури й тиску. Досліджувала вплив тиску на особливості структурних перебудов та термобаричних залежностей фізичних властивостей води і водних систем з нанорозмірними домішками (зокрема, гліцерином і вуглецевими нанодомішками).



**Володимир Євгенович Бахрушин (1960 р. н.)** – доктор фізико-математичних наук, професор.

Займався дослідженням впливу комплексного легування та високотемпературних обробок на внутрішнє тертя. Дослідив динамічні модулі пружності та інші фізичні властивості сплавів. Зокрема, у колективі науковців В.Є. Бахрушин визначив закономірності розподілу кисню та азоту в сплавах, швидко охолоджених від передплавильних температур, побудував модель дифузії домішок впровадження в сплавах. Також було визначено характер та механізм впливу легувальних елементів на кінетику взаємодії азоту зі сплавами ніобію за високих температур.



**Олександр Терентійович Богорош (1946–2017)** – український науковець, фахівець у галузі фізики твердого тіла, хімії, фізико-хімічної механіки, тепло- і масообміну, доктор технічних наук, професор кафедри прикладної фізики Фізико-технічного інституту НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського».

Наукові дослідження: кінетика кристалізації і перекристалізації органічних та неорганічних кристалів; фазові перетворення у твердих тілах; структура і властивості твердих тіл (кристалографічні й наноструктурні аспекти); ефекти пам'яті водних розчинів і режимних (технологічних) факторів, пов'язаних із фазовими перетвореннями у твердих тілах; нанофізика та наноелектроніка тощо.

Під керівництвом ученого видано українсько-російсько-англійський тлумачний словник «Прикладна фізика» у 4 томах. У словнику подано понад 35 тисяч термінів та словосполучень із прикладної фізики трьома мовами.



**Євген Станіславович Боровик (1915–1966)** – український фізик, доктор фізико-математичних наук, професор. Досліджував теплопровідність зріджених газів у широкому інтервалі температур і тисків. Розвинув новий напрям прикладної фізики – використання низьких температур для вироблення методів одержання вакууму, сильних стаціонарних та імпульсних, великої тривалості магнітних полів.

**Ярослав Йосипович Бурак (1931–2011)** – український фізик,



фахівець у галузі механіки деформівного твердого тіла та термодинаміки нерівноважних процесів.

Разом з Е.І. Григолюком і Я.С. Підстригачем проводив дослідження з розробки теоретичних основ і методів оптимізації термонапруженого стану деформівних тіл для створення раціональних режимів і схем високотемпературної локальної обробки зварних елементів тонкостінних конструкцій. Було сформульовано і розв'язано нові неklasичні екстремальні задачі термомеханіки оболонок і пластин при заданих областях допустимої зміни функції керування та обмеженнях на параметри розглядуваних фізико-механічних процесів. Надалі роботи в галузі оптимізації розвивались у напрямку розробки теоретичних основ створення раціональних технологій термообробки під час виготовлення електровакуумних та електронно-променевих приладів, а також заварюванні дефектів та під'єднанні відводів на діючих магістральних нафтопроводах.



**Борис Ієреміїнович Веркін (1919–1990)** – український учений у галузі фізики низьких температур. Довів можливість кристалізації молекул РНК та ДНК, запропонував новий метод вивчення міжмолекулярних взаємодій макромолекул. Одержав низку нових результатів у кріогенному та космічному матеріалознавстві. Розв'язав завдання моделювання поведінки рідини в умовах невагомості.



**Петро Васильович Воронець (1871–1923)** – фахівець у галузі математики та механіки. Зробив вагомий внесок у розвиток механіки, вдало пов'язав кінематику й динаміку обертально-го руху за інерцією навколо нерухомої точки за допомогою геометричного методу.



**Олександр Олександрович Галкін (1914–1982)** – український фізик-експериментатор, академік АН УРСР. Основні напрями наукових робіт – фізика твердого тіла, фізика низьких температур, надпровідність тощо.

**Олег Іванович Герасимов** (1955 р. н.) – український учений-фізик, доктор фізико-математичних наук, професор. Основні напрями досліджень: розв’язання задач статистичної фізики складних (нерівноважних, нелінійних) багаточастинкових систем (класичні рідини, розчини, колоїдні системи, хімічно реагуючі матеріали, запорошена плазма, ядерна матерія, гранульована матерія); дослідження нерівноважних процесів, фазових переходів та критичних явищ у складних динамічних дисипативних системах; застосування методів фізичних досліджень під час вивчення і моделювання процесів та систем у довікллі.



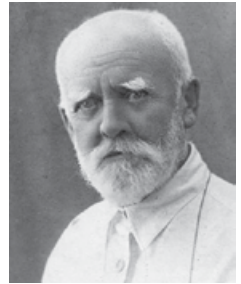
**Борис Вікторович Гриньов** (1956 р. н.) – український учений, доктор технічних наук, професор. Вивчає керамічні, композиційні, монокристалічні, плівкові, рідкі та пластмасові матеріали для різноманітного функціонального призначення.



**Андрій Михайлович Гусак** (1954 р. н.) – український фізик-теоретик, доктор фізико-математичних наук, професор. Наукові дослідження стосуються теорії і комп’ютерного моделювання дифузії та фазових перетворень у сплавах і твердофазних реакцій та еволюції морфології в нанорозмірних системах.



**Микола Борисович Делоне** (1856–1931) – український фізик у галузі механіки. Наукові дослідження: механіка твердого тіла й кінематика механізмів; повітроплавання.



**Олена Іванівна Казимирчак–Полонська** (1902–1992). Відома українська вчена в галузі небесної механіки, дослідниця руху комет, докторка фізико-математичних наук. Основні наукові праці вченої присвячені вивченню руху комет. Особливу увагу приділяла короткоперіодичним кометам: встановила, що характерними закономірностями руху таких комет є їхнє зближення з великими планетами (передусім з Юпітером). Дослідила рухи 35 короткоперіодичних комет різних планетних сімейств, визначила типи змін кометних орбіт. Обґрунтувала гіпотезу захоплення короткоперіодичних комет великими планетами і намітила загальні закономірності кометних орбіт.





**Леон Йосифович Кордиш (1874–1932)** – український фізик-теоретик. Відомий науковими дослідженнями в галузі механіки, акустики, термодинаміки тощо.



**Віктор Павлович Кубайчук (1946–2018)** – український науковець, кандидат фізико-математичних наук. Сформулював підхід до застосування методів молекулярної динаміки в галузі запорошеної плазми, що межує з поверхнею. У рамках цього підходу розробив алгоритм розв'язування рівнянь руху частинок, що дає змогу скоротити кількість диференціальних рівнянь у системі й використовувати під час інтегрування різні часові кроки для різних сортів частинок. Був укладачем книг з історії української мови, створив в Вікіпедії веб-сайт «Хронологія мовних подій в Україні».



**Федір Вікторович Недопьокін (1949 р. н.)** – український учений у галузі технічної теплофізики, доктор технічних наук, професор. Наукові роботи зосереджені на проблемі фізичного та математичного моделювання гідродинамічних, теплофізичних і масообмінних процесів у металургійних технологіях.



**Михайло Олександрович Оболенський (1940 р. н.)** – український учений-фізик, доктор фізико-математичних наук, професор. Наукові інтереси – у галузі електронних властивостей металів за низьких температур, надпровідності, водневої енергетики, фізики низьких температур. Розробив методику вирощування монокристалів високотемпературних надпровідників, що не поступаються найкращим на світовому рівні; створив накопичувачі водню; провів дослідження магнітних властивостей надпровідників, а також фазових перетворень у низьковимірних системах.



**Антоніна Федорівна Прихотько (1906–1995)** – український фізик, знаний фахівець у галузі фізики неметалевих кристалів, доктор фізико-математичних наук, професор, організатор в Інституті фізики АН УРСР спектральної лабораторії, яка згодом стала найбільшим у світі центром низькотемпературної спектроскопії неметалічних кристалів. Однією з перших робіт А. Ф. Прихотько було дослідження спектрів надтонких ( $10^{-4}$ – $10^{-6}$  см) монокристалів нафталіну, охолоджених до температури рідкого водню.

**Юрій Іванович Шиманський (1928–1998)** – доктор фізико-математичних наук, професор, автор класичної теорії температурних залежностей теплоти випаровування, густини та ізохорної теплоємності біля критичного стану. Експериментально дослідив і теоретично обґрунтував гравітаційний ефект у рідинах. Дослідив кінетику випаровування і конденсації росту крапель рідин у широкому інтервалі тисків. Розвинув теорію впливу температури приповерхневого шару рідини на кінетику фазового переходу в аеродисперсних системах.



**Володимир Миколайович Юзевич (1950 р. н.)** – доктор фізико-математичних наук, професор. Розробив нову термодинамічну теорію поверхневої енергії твердих тіл, яка враховує й електричну, і механічну складові цієї енергії, що характеризує пружну область деформування, а також область поблизу меж текучості та міцності з урахуванням точкових дефектів і розмірних ефектів. Розв'язано проблему визначення зв'язків між термодинамічними параметрами та енергетичними характеристиками поверхневих шарів багатокомпонентних тіл, на які діють потоки частинок, нагрівання, механічні навантаження. Встановлено, що об'єднання термодинамічної моделі з критеріальними співвідношеннями для меж міцності й текучості тіл в екстремальних умовах спрощує процедуру обґрунтування експериментальних даних.





## СЛОВНИК ФІЗИЧНИХ ТЕРМІНІВ

**Абсолютна похибка**  $\Delta a$  – різниця між дійсним значенням вимірюваної величини  $a$  та одержаним результатом  $a_d$  і дорівнює  $\Delta a = |a - a_d|$ .

**Броунівський рух** – тепловий рух завислих у рідині або газі частинок.

**Вага тіла** – сила  $\vec{P}$ , з якою тіло внаслідок його притягання до Землі діє на опору або підвіс.

**Відносна похибка** вимірювань  $\varepsilon$  – відношення абсолютної похибки до значення вимірюваної величини:  $\varepsilon = \frac{\Delta a}{a} 100 \%$ .

**Вільне падіння тіла** – рух тіла лише під дією притягання Землі без інших сторонніх впливів на нього.

**Вологість повітря:**

– **абсолютна** – кількість водяної пари, що міститься в одиниці об'єму повітря;

– **відносна** – відношення абсолютної вологості повітря  $\rho$  до його максимальної вологості  $\rho_n$  за даної температури:  $\varphi = \frac{\rho}{\rho_n} 100 \%$ ;

– **відносна**  $\varphi$  – відношення парціального тиску  $p$  водяної пари, яка є в повітрі за даної температури, до тиску  $p_n$  насиченої пари за тієї самої температури:

$$\varphi = \frac{p}{p_n} 100 \%;$$

– **максимальна** – кількість водяної пари, що міститься в одиниці об'єму повітря в стані насичення (при точці роси).

**Газові закони** – кількісні залежності між двома параметрами газу за фіксованого значення третього параметра.

**Гравітаційна взаємодія** – взаємодія, яка властива всім тілам Всесвіту і яка проявляється в їхньому взаємному притяганні одне до одного. Саме явище всесвітнього тяжіння називають гравітацією (від лат. *gravitas* – «тяжкість»).

**Деформація:**

– **зсуву** – зсув паралельних шарів тіла один відносно одного під дією двох паралельних, але протилежно напрямлених сил;

– **кручення** – поворот паралельних шарів тіла один відносно одного під дією двох сил;

– **пластична** – деформація, яка не зникає після припинення дії зовнішніх сил;

– **поперечного згину** – згинання (вигинання) тіла під дією сили, напрямленої перпендикулярно до його осі;

– **пружна** – деформація, яка повністю зникає після припинення дії зовнішніх сил;

– **розтягу** – збільшення довжини тіла (стержня) при дії на нього двох рівних за модулем, але протилежних за напрямком сил;

– **стиснення** – зменшення довжини тіла під дією двох однакових за значенням і напрямлених назустріч одна одній сил.

**Динаміка** (від грец. *dunamis* – «сила») – розділ механіки, у якому вивчається рух тіл з їхньою взаємодією з іншими тілами.

**Дифузія** – процес взаємного проникнення частинок однієї речовини у міжмолекулярні проміжки іншої без дії зовнішніх сил.

**Другий закон Ньютона:** сила, що діє на тіло, дорівнює добутку маси тіла і його прискорення, наданого цією силою.

**Другий закон Ньютона:** прискорення матеріальної точки прямо пропорційне прикладеній до неї силі, обернено пропорційне масі цієї точки і напрямлене в бік дії сили.

**Другий закон термодинаміки:** неможливо здійснити такий періодичний процес, єдиним результатом якого буде виконання роботи за рахунок теплоти, відібраної у нагрівника.



**Енергія поступального руху** – механічна величина, яка однакова в усіх тіл, що починають рухатися за рахунок однакової зміни якої-небудь іншої форми руху.

**Закон Архімеда:** на тіло, занурене в рідину (газ), діє виштовхувальна сила (сила Архімеда), яка дорівнює вазі рідини (газу), витиснутої цим тілом.

**Закон:**

– **Бойля–Маріотта:** для даної маси газу добуток тиску газу і його об'єму стає, якщо температура газу не змінюється:  $pV = \text{const}$  при  $T = \text{const}$  і  $m = \text{const}$ .

– **Гей-Люссака:** для даної маси газу відношення його об'єму до температури стає, якщо тиск газу не змінюється:  $\frac{V}{T} = \text{const}$  при  $p = \text{const}$  і  $m = \text{const}$ .

– **Шарля:** для даної маси газу відношення тиску до температури стає, якщо об'єм газу не змінюється:  $\frac{p}{T} = \text{const}$  при  $V = \text{const}$  і  $m = \text{const}$ .

**Закон всесвітнього тяжіння:** сила гравітаційного притягання будь-яких двох частинок прямо пропорційна добутку їхніх мас і обернено пропорційна квадрату відстані між ними:  $F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$ .

**Закон Гука:** сила пружності пропорційна абсолютній деформації і напрямлена протилежно до сили, що деформує тіло.

**Закон додавання швидкостей:** швидкість тіла відносно нерухомої системи відліку дорівнює векторній сумі швидкості тіла відносно рухомої системи відліку і швидкості самої рухомої системи відліку відносно нерухомої:  $\vec{v} = \vec{v}_1 + \vec{v}_2$ .

**Закон збереження енергії:** повна механічна енергія системи тіл, що взаємодіють між собою консервативними силами, залишається сталою:  $E = E_k + E_p = \text{const}$ .

**Закон збереження імпульсу:** геометрична сума імпульсів тіл, що є складовими замкнутої системи, залишається сталою при будь-яких взаємодіях тіл цієї системи між собою.

**Змочування** – явище, яке виникає внаслідок взаємодії рідини з молекулами твердих тіл і зумовлює викривлення поверхні рідини біля поверхні твердого тіла.

**Запас міцності** – число, яке показує, у скільки разів межа міцності більша за допустиму напругу:  $\chi = \frac{\sigma_m}{\sigma_d}$ .

**Ідеальний газ** – газ, взаємодія між молекулами якого така мала, що нею можна знехтувати.

**Імпульс тіла**, або кількість руху тіла, – добуток маси тіла і його швидкості руху.

**Інерціальні системи відліку** – системи відліку, у яких виконується закон інерції.

**Капілярні явища** – піднімання або опускання рідини у вузьких трубках – капілярах – порівняно з її рівнем у широких трубках.

**Кількість речовини** (позначають літерою  $\nu$  (ню)) – величина, яка визначається відношенням числа структурних елементів  $N$ , з яких складається дане тіло, до атомів  $N_A$ , що містяться в одному молі Карбону.

**Кінематика** – розділ механіки, у якому вивчають рухи матеріальних тіл без урахування їхніх мас і сил, що на них діють.

**Коефіцієнт поверхневого натягу** – величина, яка вимірюється силою поверхневого натягу, яка діє на кожну одиницю довжини контуру, що обмежує вільну поверхню рідини:  $\sigma = \frac{F}{l}$ .

**Маса:**

– **атомна маса** – маса атома, виміряна в атомних одиницях маси;

– **молекулярна маса** – маса молекули в атомних одиницях маси.

**Маса тіла** – фізична величина, яка є однією з основних характеристик матерії, що визначає її інерційні, енергетичні та гравітаційні властивості.

**Механіка** – розділ фізики, у якому пояснюється механічний рух матеріальних тіл і взаємодії, які при цьому відбуваються між тілами.

**Молекулярно-кінетична теорія** – теорія, яка пояснює теплові явища в макроскопічних тілах і внутрішні властивості цих тіл на основі уявлень про те, що всі тіла складаються з окремих частинок, які рухаються хаотично.

**Межа пружності**  $\sigma_{\text{пр}}$  – найбільша механічна напруга, при якій деформації тіла залишаються пружними.

**Межа текучості** – механічна напруга, при якій виникає явище текучості твердого тіла.

**Механічна напруга** – величина, що вимірюється силою внутрішньої напруги, яка діє на одиницю площі поперечного перерізу деформованого тіла:  $\sigma = \frac{F}{S}$ .

**Миттєва швидкість руху тіла, або швидкість в даній точці**, – векторна фізична величина, яка характеризує переміщення тіла за одиницю часу, коли швидкість руху тіла, починаючи з даного моменту, перестає змінюватися за напрямком і значенням.

**Момент сили** – фізична величина, яка визначається добутком модуля сили  $F$  і її плеча  $d$ :  $M = Fd$ .

**Наноматеріали** – матеріали, створені з використанням наночастинок та за допомогою нанотехнологій, мають певні унікальні властивості. До наноматеріалів належать об'єкти, розмір яких від 1 до 100 нм.

246

**Основні положення молекулярно-кінетичної теорії**: 1. Речовина складається із частинок (атомів і молекул). 2. Молекули (атоми) усіх тіл перебувають в безперервному тепловому русі. 3. Молекули (атоми) взаємодіють між собою.

**Основне рівняння молекулярно-кінетичної теорії газів** (рівняння Клаузіуса): тиск ідеального газу пропорційний добутку кількості молекул в одиниці об'єму газу і середньої кінетичної енергії поступального руху молекул.

### Пара:

- **насичена** – пара, що перебуває в динамічній рівновазі зі своєю рідиною;
- **ненасичена** – пара, що не перебуває в стані динамічної рівноваги зі своєю рідиною.

**Перевантаження** – стан тіла, при якому його вага перевищує силу тяжіння.

**Період обертання** – час, протягом якого тіло робить один повний оберт по колу:  $T = \frac{t}{N}$ .

**Перший закон Ньютона**: існують такі системи відліку, відносно яких тіло, що рухається поступально, зберігає свою швидкість сталою, якщо на нього не діють інші тіла (або дії інших тіл компенсуються).

**Потенціальна енергія** піднятого над Землею тіла – фізична величина  $E_{\text{п}}$ , яка при вільному падінні тіла зменшується на стільки, на скільки збільшується його кінетична енергія  $E_{\text{к}}$ :  $\Delta E_{\text{п}} = -\Delta E_{\text{к}}$ .

**Потужність** – фізична величина, яка характеризує швидкість виконання роботи і визначається відношенням виконаної роботи до затраченого часу:  $N = \frac{A}{t}$ .

**Правило важеля**: важіль перебуває в рівновазі, коли сили, що діють на нього, обернено пропорційні плечам.

**Принцип відносності Галілея** – в усіх інерціальних системах відліку всі механічні явища протікають однаково за однакових початкових умов.

**Прискорення тіла** в його рівноприскореному прямолінійному русі – векторна фізична величина, яка характеризує зміну швидкості за одиницю часу і дорівнює

відношенню зміни швидкості руху тіла до інтервалу часу, протягом якого ця зміна відбулася:  $\bar{a} = \frac{\bar{v} - \bar{v}_0}{t}$ .

**Прискорення тіла**, яке рівномірно рухається по колу, у будь-якій його точці **доцентрове**, тобто напрямлене по радіусу кола до його центра.

**Процес:**

– **адіабатний процес** – термодинамічний процес зміни параметрів газу, що відбувається в теплоізолюваній системі, тобто за відсутності теплообміну з навколишніми тілами;

– **ізобарний** (від грец. *isos* – «рівний», *baros* – «вага») – процес зміни стану термодинамічної системи за сталого тиску;

– **ізопроцес** – процес, що відбувається при незмінному значенні одного з параметрів;

– **ізотермічний** – процес зміни стану термодинамічної системи за сталої температури;

– **ізохорний** (від грец. *chora* – «місткість») – процес зміни стану термодинамічної системи за сталого об'єму.

**Релятивістські явища** (від лат. *relativ* – «відносний») – явища, які виникають у системах відліку, що рухаються відносно спостерігача зі швидкістю, близькою до швидкості поширення світла.

**Рівновага нестійка**, якщо при малому відхиленні тіла від положення рівноваги рівнодійна сил, прикладених до тіла, віддаляє його від цього положення.

**Рівновага тіла стійка**, якщо при малому відхиленні від положення рівноваги рівнодійна сил, прикладених до тіла, повертає його до положення рівноваги.

**Рівнодійна сил** – сила, яка замінює дію на матеріальну точку кількох сил.

**Робота** – фізична величина  $A$ , яка дорівнює зміні кінетичної енергії  $\Delta E_k$  тіла в результаті дії на нього сили  $F$ :  $A = \Delta E_k$ .

**Рух:**

– **механічний рух** – зміна з часом взаємного положення в просторі матеріальних тіл або взаємного положення частин даного тіла;

– **нерівномірний рух** – рух, серед інтервалів часу якого є такі однакові інтервали, за які тіло здійснює неоднакові переміщення;

– **прямолінійний рівномірний рух** – рух, під час якого тіло за будь-які однакові інтервали часу здійснює однакові переміщення;

– **рівномірний рух тіла по колу** – рух, під час якого швидкість тіла змінюється за напрямком, але не змінюється за значенням;

– **рівноприскорений рух** – рух тіла, під час якого його швидкість за будь-які однакові інтервали часу змінюється однаково.

**Середня швидкість нерівномірного руху** – векторна фізична величина, яка характеризує переміщення, що його тіло в середньому здійснює за одиницю часу, і визначається відношенням переміщення тіла до інтервалу часу, протягом якого це переміщення відбулося:  $v_c = \frac{l_1 + l_2 + \dots + l_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}$ .

**Сила** – фізична величина, яка є мірою взаємодії тіл і є причиною зміни швидкостей тіл або їхніх частин.

**Сили опору середовища** – сили тертя, які виникають під час руху тіл у рідині або газі.

**Сила пружності** – сила, що виникає внаслідок деформації тіла і напрямлена протилежно до напрямку переміщення частинок тіла під час деформації.

**Сила тертя ковзання** – сила, що виникає при русі одного тіла по поверхні іншого; напрямлена вона протилежно до переміщення тіла відносно стичного з ним тіла.

**Сили молекулярні** – сили, що діють між атомами і молекулами речовини.

**Стала:**

– **Авогадро** – в одному молі будь-якої речовини міститься однакове число атомів або молекул:  $N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$  1/моль (або моль<sup>-1</sup>);

– **Больцмана** – пов'язує температуру в енергетичних одиницях з температурою у кельвінах:  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К.

– **гравітаційна** – визначається силою, з якою притягуються два тіла масами по 1 кг кожне, що перебувають на відстані 1 м одне від одного:  $G = 6,67 \cdot 10^{-11}$  Н · м<sup>2</sup>/кг<sup>2</sup>;

– **універсальна газова**:  $R = 8,31$  Дж/(К · моль).

**Твердість** – властивість тіла чинити опір проникненню в нього іншого тіла.

**Теплообмін** – процес передачі енергії від більш нагрітого тіла до менш нагрітого.

**Тепловий двигун** – пристрій, який перетворює внутрішню енергію палива в механічну.

**Термодинамічна система** – тіло або група тіл, які взаємодіють з навколишнім середовищем, обмінюючись енергією.

**Тертя спокою** – тертя, що виникає між нерухомими одна відносно одної поверхнями.

**Технологія** – комплекс наукових та інженерних знань, утілених у способах і засобах праці, наборах матеріально-технічних чинників виробництва, видах їхнього поєднання для створення певного продукту або послуг.

**Тиск насиченої пари** – незалежний від об'єму тиск пари  $p_n$ , за якого рідина перебуває в рівновазі зі своєю парою.

**Третій закон Ньютона**: сили, з якими які-небудь два тіла діють одне на одне, завжди однакові за значенням, але протилежні за напрямком.

248

**Умова рівноваги тіла**: для того щоб тіло перебувало в рівновазі, необхідно, щоб дорівнювала нулю геометрична сума прикладених до тіла сил і сума моментів цих сил відносно осі обертання.

**Швидкість:**

– **прямолінійного рівномірного руху** – векторна фізична величина, яка характеризує переміщення тіла за одиницю часу і визначається відношенням переміщення тіла до інтервалу часу, протягом якого це переміщення відбулося:  $\vec{v} = \frac{\Delta \vec{s}}{\Delta t}$ .

– **кутова швидкість тіла** – фізична величина, яка показує швидкість зміни кута повороту тіла і визначається відношенням зміни кута  $\Delta \varphi$  до інтервалу часу  $\Delta t$ , за який ця зміна відбулася;

– **лінійна швидкість тіла**, що рівномірно обертається по колу, весь час змінюється за напрямком і в будь-якій точці траєкторії напрямлена по дотичній до дуги цього кола і має сталі значення;

– **миттєва швидкість руху тіла, або швидкість в даній точці**, – векторна фізична величина, яка характеризує переміщення тіла за одиницю часу, коли швидкість руху тіла, починаючи з даного моменту, перестає змінюватися за напрямком і значенням;

– **середня швидкість нерівномірного руху** – векторна фізична величина, яка характеризує переміщення, що його тіло в середньому здійснює за одиницю часу, і визначається відношенням переміщення тіла до інтервалу часу, протягом якого це переміщення відбулося.

**Шлях** – довжина траєкторії, яку описує тіло або матеріальна точка під час руху за певний інтервал часу.

**Центр тяжіння** механічної системи – точка, відносно якої сумарний момент сил тяжіння, які діють на систему, дорівнює нулю.

**Частота обертання тіла  $n$**  визначає кількість обертів тіла навколо центра обертання за 1 секунду:  $n = \frac{N}{t}$ .

## ВІДПОВІДІ ДО ЗАДАЧ І ВПРАВ

1. а), в). 2. У неділю переміщення дорівнює нулю. 5. 18 000 м. 7. Ні, 0,15 м/с. 9. 7 м, 5 м. 10. 25 с. 11. 50 км/год. 12. Через 15 хв, не зміниться. 13. 30 км/год, на південний схід. 14. 69 км/год, 106 км/год. 20. 48 км/год. 22. 2 км/год, 4 км/год. 23. Через 15 хв, 1250 м.
25.  $v_1 = \sqrt{v \frac{2}{2} - 2lv_2/t} = 15 \text{ м/с}$ . 26. 13 см/хв. 27.  $v_2 = bv_1/s = 600 \text{ м/с}$ .
28.  $\alpha = \pi/2$ ,  $t_{\min} = h/v$ ,  $l = uh/v$ ,  $s = h\sqrt{u^2 + u^2}/v$ . 29. Через 20 с, 30 м. 30. 5 м/с, 2 м/с<sup>2</sup>. 34. 1 – 1,5 год, 2 – 1 год, 60 км. 35. 450 м. 36. 3 км/год.
40.  $t = \frac{t_1 t_2}{2t_2 - t_1} = 90 \text{ с}$ . 42.  $\approx 6,7 \text{ м/с}^2$ ;  $\approx 750 \text{ м}$ . 44. 90 см, 50 см. 45. 50 м.
46. 2 м/с, 8 м/с. 47. 2,4 км. 48.  $1,6 \cdot 10^4 \text{ км}$ . 49.  $\approx 3,8 \text{ м/с}^2$ . 58. За другу.
60.  $v = \sqrt{\frac{v_0^2 + v_x^2}{2}} = 5 \text{ м/с}$ . 61.  $v = \sqrt{2as} = 6 \text{ м/с}$ ,  $v_c = \sqrt{2as}/2 = 3 \text{ м/с}$ .
63.  $t = (2 + \sqrt{2})t_0$ . 64.  $\tau = \frac{t_2^2 + 2t_1 t_2 - t_1^2}{2(t_1 - t_2)}$ . 65.  $t = \frac{v}{a} \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{2al}{v^2}} \right)$ ,  $v^2 > 2al$ .
67. 2 с, 0,04 с, 0,007 с, 0,0006 с. 68. 45 000. 69. 3,14 м/с. 70. Частота обертання переднього колеса трактора вдвічі більша. 71. 1025 м/с, 0,0004 м/с<sup>2</sup>. 72. 63 104 м/с<sup>2</sup>. 73. Ні. 76. 0,628 рад/с, 125,6 рад/с. 77. 1,256 м/с, 2 с. 78. 3,18 с<sup>-1</sup>. 79. 3. 82. 16 см. 84. 20 м/с. 87. 3060 об/хв, ні. 88. Так.
89. 3. 93. 500 Н/м. 94. 2к. 95.  $x = ma/k = 1 \text{ см}$ . 96.  $\frac{m_2}{m_1} = \frac{F_2 - F}{F - F_1}$ .
98.  $F = m(a + \mu g) = 0,79 \text{ Н}$ . 100.  $F = \mu Mg$ . 101.  $a = g(\sin \alpha - \mu \cos \alpha) = 2,45 \text{ м/с}^2$ . 102. 7,8 Н. 103. 216 Н; 372 Н; 421 Н. 104. 8 м/с. 105.  $x = F(k_1 + k_2)/(k_1 k_2)$ . 106.  $m = m_0 \left( \frac{t^2}{t_0^2} - 1 \right)$ . 107.  $k = \frac{k_1 k_2}{k_1 + k_2}$ . 108.  $k = k_1 + k_2$ .
109.  $T = F \left( 1 - \frac{x}{l} \right)$ . 110.  $F > \mu g(M + m) = 10,8 \text{ Н}$ . 111.  $v = \sqrt{2 \cdot 0,06gs} = 4,9 \text{ м/с}$ . 112.  $\mu > \tan \alpha$ ;  $F = m(g + a) \cos \alpha$ . 113.  $x = \frac{mg(\sin \alpha + \mu \cos \alpha)}{k(\cos \beta + \mu \sin \beta)}$ .
114.  $s = h(1 - \mu \tan \alpha)/\mu$ ,  $\mu < \tan \alpha$ . 115.  $\mu = \frac{v^2}{Rg} = 0,2$ . 116.  $v = \sqrt{gR \tan \alpha}$ .
117. 10 Н; 2,5 Н. 118.  $a = \frac{F}{m}(\cos \alpha + \mu \sin \alpha) - \mu g$ ,  $F_0 = \frac{\mu mg}{\cos \alpha + \mu \sin \alpha}$ .
119.  $t = \frac{v_0}{g} \frac{\sqrt{\sin \alpha - \mu \cos \alpha} + \sqrt{\sin \alpha + \mu \cos \alpha}}{(\sin \alpha + \mu \cos \alpha) \sqrt{\sin \alpha - \mu \cos \alpha}}$ . 120. Гиря масою 5 кг.
124. 2 т. 128. 25 000 кг. 129. 5 м/с<sup>2</sup>. 130. 2500 кг, 90 м. 133. 5 кг. 134. Ні. 138. 20 г. 141. Так, ні. 143. 1 км/с<sup>2</sup>. 146. 0,6 Н. 147. 120 кН. 148. 1,635 м/с<sup>2</sup>. 149. 25 Н. 150. 11,76 м/с. 151. 6 кН, 50 с, 1125 м.
155.  $F = m(a - g) = 26 \text{ Н}$ . 156.  $a = g \left( \frac{m_{\max}}{m} - 1 \right) = 1,2 \text{ м/с}^2$ . 157.  $m = \frac{2m_1 m_2}{m_1 m_2} = 190 \text{ кг}$ . 158.  $F = \frac{4m_1 m_2 g}{m_1 + m_2} = 63 \text{ Н}$ . 160. Прямолінійно. 161.  $1,07 \cdot 10^{-4} \text{ Н}$ .

162.  $5,3 \cdot 10^{33}$  Н. 163.  $7,5 \cdot 10^{13}$  кг. 164.  $10^{-5}$  Н. 167. Цього зробити неможливо. 174. На екваторі. 182. 700 Н, 910 Н, 700 Н. 183. 2400 Н, 3г. 185.  $2 \text{ м/с}^2$ . 202. 10 м/с, 20 м/с, 30 м/с. 203. 80 м. 204. 45 м. 205. 0 м/с. 209. 120 м, 75 м. 210. 1,3 м, 5 м. 211. 1,25 м, 10,2 м, 1,02 с. 216. 2 с. 217. 17 см. 218. 3,4 с. 219. 3,25 м, 8,1 м/с, 1,3 с, 0,8 м. 220. 20 м/с, 10 м/с, 0, -10 м/с. 223. 3,2 м. 224. 4 : 5. 225. 2 с, 25 м/с,  $53^\circ$ . 227. 5,1 м, 10 м, 15 м, 35 м, 40 м, 35 м, 20 м/с. 228. 176 м. 229. 43,6 м/с, 38,6 м/с, 35,8 м/с, 43 м/с. 230. Однакова. 233. У 2 рази. 234. 3,2 с, 33 м. 235. 1 с, 10 м/с, 2,5 с, 4 м/с. 236.  $76^\circ$ . 237. 800 м. 238. 91 м 5 см. 239.  $\mu mg$ ,  $\mu mg \cos \alpha$ ,  $\mu mg \sin \alpha$ . 244. 16 Н, 0,04. 245. 216 Н, 19,6 Н. 246. 101 Н. 247. 20 м/с, 400 м.
253.  $a = \frac{F}{m} (\cos \alpha + \mu \sin \alpha) - \mu g$ ,  $F_0 = \frac{\mu mg}{\cos \alpha + \mu \sin \alpha}$ . 254.  $m = m_0 \left( \frac{t^2}{t_0^2} - 1 \right)$ .
259.  $5 \text{ м}^2$ . 265. 2,5 мм. 267. 45 кДж. 268. 1,74 см. 269. 274 м. 270.  $4 \text{ м}^2$ . 273. 0,4. 275.  $24 \text{ см}^3$ . 276.  $0,75 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ . 278. 290 Н. 279.  $30^\circ$ , 1700 Н. 285. 0,1 кН, 0,17 кН. 287. 5,5 м. 288. 14 Н. 289. 0,74 кН. 291. 250 Н. 292.  $1/3$ . 293.  $2 \operatorname{ctg} \alpha$ . 294.  $x = l/6$ . 295. 306 кг. 296.  $19^\circ$ . 297. 9,8 Н. 298. 1,5 см від центра диска у бік суцільної частини. 299. 9,7 см. 300.  $3,3 \cdot 10^{-2}$  м. 301. 25 кг. 302. 1 кг · м/с. 303. 1 кг · м/с, 1,5 кг · м/с. 305. 5 кг · м/с. 306. 4,7 м/с. 307.  $v = \frac{m_1 v_1}{m_1 + m_2}$ . 310. 30 м/с. 311. 100 Н.
315. 400 м/с. 316.  $2 \cdot 10^7$  кг. 317. 0,5 м/с. 320. 6,3 кН. 321. 16 кг · м/с, 48 кг · м/с. 322. 395 м/с. 323. 460 м/с. 324.  $2\mu \sqrt{\frac{2h}{g}} (gt + \sqrt{2gh})$ . 325. 2 м/с.
326. 4 м. 327. 0 Дж, 0,75 Дж, -2,25 Дж. 328. 0,8 м, 2 м. 329. 39 Дж. 330. 2000 кДж. 331. 8,1 кДж, 1,5 м/с. 332. 3,5 кДж. 333. 1 Дж. 334. 9,8 кДж. 335. 2,1 кДж. 336. 500 кДж. 337. 26 кДж. 338. 750 Вт. 340. 81 МДж. 341. 10 м. 343. -1 кДж. 344. 83 м. 345. 10 м/с. 346. 3150 Дж. 347. 2,6 МДж. 348. 0,14 кДж. 349. 45 кДж. 350. 1,4 кДж. 351.  $E_{\kappa}(m) = 2E_{\kappa}(2m)$ . 352. 12 км/с. 353. Не однакову. 354. Спортсмен. 355. 50 Вт. 356. 3 кВт. 357. 150 Вт. 358. 1,5 Дж. 359. 30 см. 360. -2 Дж, 2 Дж, -2 Дж. 361. 0,2 кН. 362. 1 см. 363. 18 м/с. 364. 0,01, 1 Дж. 365. 59 кДж. 366. 29 Н. 367. 7,5 Дж. 368. 1,25. 370. 1,43 с. 371. 0,1 м. 372.  $48^\circ$ . 373. 2 м/с. 377.  $4 \cdot 10^{-7}$  см,  $3,3 \cdot 10^{-20}$  см<sup>3</sup>. 381.  $5,3 \cdot 10^{-26}$  кг. 382.  $2,99 \cdot 10^{-26}$  кг,  $9,71 \cdot 10^{-26}$  кг. 383. 200 моль. 384. 1,5 л. 385. 2,2 кг. 386. На великих висотах. 387.  $5 \cdot 10^5$  Па. 388.  $2,1 \cdot 10^4$  Па. 389.  $6,2 \cdot 10^{-21}$  Дж. 390. 3,2 кПа. 391. 480 м/с,  $47^\circ$ С. 392. 28 кг. 393. 0,2 кг. 394.  $2 \cdot 10^6$  Па. 395. 32 л. 396. 14 г. 398.  $1,8 \cdot 10^{-3}$  м<sup>3</sup>. 399.  $3 \cdot 10^9$  Па. 400. 1,5 атм. 401. 3 м<sup>3</sup>. 402. 2 м<sup>3</sup>. 403. 1,7 атм. 412. 0,01 мг.
413.  $\sqrt{\frac{7}{8}}$ . 414. 437 м/с. 415. 576 К. 416. 0,5 см/с. 417.  $2,48 \cdot 10^{-20}$  Дж.
418. 7700 К. 419. 1,2 кН. 420.  $0,09 \text{ кг/м}^3$ ,  $1,4 \text{ кг/м}^3$ . 421.  $1 \text{ кг/м}^3$ . 422.  $5,9 \cdot 10^{-3}$  кг/моль. 425. 4 атм. 426. 10 Па. 427. 7,2 с. 428. 3 рази. 429. 1,7 кг, повітря зайде через щілини. 431.  $(n-1)273^\circ$ С. 432.  $2,8 \cdot 10^4$  Па. 433.  $9 \cdot 10^4$  Па. 434.  $1,37 \cdot 10^7$ . 435. 1,82 км/с. 436.  $T = \frac{2 \mu E}{3 R}$ ,  $33,6 \cdot 10^3$  К. 437. 1100. 438.  $0,44 \text{ кг/м}^3$ . 439.  $\approx 323$  К. 440.  $\approx 25 \cdot 10^5$  Па. 441.  $127^\circ$ С.



442. 20 м. 443.  $\approx 23,6$  м. 444.  $r = \sqrt[3]{\frac{3(p_0 + \rho g H)V_0}{4\pi(p_0 + \rho g h)}}$ . 445.  $\approx 9,4 \cdot 10^4$  Па.
446. 4,7 см. 447. 0,5 г. 448. 18,7 кДж. 449. 12,5 кДж. 451. 0,6 МДж. 452. Зростає в 1,5 раза. 453. Не змінилась. 454.  $U_{\text{гелію}} = 10U_{\text{аргону}}$ . 455. 6 Дж, 4 Дж. 456. 0,2 кДж. 457. 135 кДж. 458. 15 кДж. 460. -49 кДж. 461. 28,8 %. 462. 0,18 кг. 463.  $\approx 54$  дні. 464. Збільшиться на  $\approx 31$  кДж. 465. 3,3 МДж, 6,1 МДж. 466. Зменшилась у 3 рази. 467. Збільшилась у  $kn$  разів. 468. 400 кДж. 469.  $A_{\text{водню}} = 16 A_{\text{кисню}}$ . 470. 90 Дж, 0. 473. 1,6 К. 474. 4,9 кДж. 475. 40 Дж. 476. 2,4 кДж. 477. 1960 Дж. 478. 18 кДж. 479. 27,7 км/год. 480. 30 %, 400 К. 481. 24 %, 420 %. 485. 157 К, 8,8 кДж. 486. 76 К. 488. 2 л. 489. 0,1 л. 490. 40 %. 491. 30 г/м<sup>3</sup>. 493. 74 %. 494. 71 %. 498. 32,6 мм. 499. 0,37 м. 500. 800 кг/м<sup>3</sup>. 501. 1,6 МДж. 508. 0,6 мм. 509. 110 Н. 510. 1884 Н. 511. 2,7 мм,  $5 \cdot 10^{-4}$  (0,05 %). 512. 1 м. 513.  $4 \cdot 10^5$  Н. 514. 90 кН. 516. 14,5 мм рт. ст., насиченою. 517. Ненасичена, 37 мм рт. ст., перенасиченою. 518. 0,24 Па. 520. 7 г/м<sup>3</sup>, 52 %. 521. 6,5 г/м<sup>3</sup>. 522. 1,1 кПа, 50 %. 523. 1,37 кПа. 526. 74 мН/м. 528.  $\approx 2 \cdot 10^{-4}$  Н. 529.  $3,1 \cdot 10^{-2}$  Н/м. 530. 30 см, ні. 531. 0,02 мм. 534. 70. 535. 50 м. 536.  $5 \cdot 10^8$  Па, сталь. 537. 208 ГПа. 538. 100 МПа,  $2 \cdot 10^{-4}$ ,  $5 \cdot 10^{11}$  Па. 539. 2,28 см, 0,6 мм. 540. 50. 542.  $p_H = \frac{\rho_B}{\rho_{PT}}(H - h) - p_1 \frac{h}{H - h}$ . 543. 208 г. 545. 3,6 г. 546. 98,97 кПа, 200,27 кПа. 547. Ізохорно охолодити до 11 °С, ізотермічно стиснути до 27,6 л, зменшити об'єм, відповідно знижуючи температуру. 548.  $16 \cdot 10^3$  т, 3,2 мм. 553. 3,2 кг/м<sup>3</sup>. 554. 22,5 мН/м. 555. 6,37 см. 556. 26 кПа. 558.  $1,44 \cdot 10^{-8}$  Дж. 561. 5,1 км. 562. 2,2 см. 563. 177 м. 564. 948 МПа. 565. 0,706 Дж. 566.  $1,96 \cdot 10^{-13}$  Н · м.

## Відповіді до рубрики «Що я знаю і вмію робити»

- Розділ 2. 1.  $\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = \frac{Q_1}{T_1} = \frac{Q_2}{T_2}$ , або  $\frac{Q}{T} = \text{const.}$  2. Оскільки  $\Delta V = 0$ , то  $Q = \Delta U$ . Теплота йде на зміну його внутрішньої енергії  $U$ .
3. Під час ізобарного розширення. 4. 120 км.  $l = \frac{\eta v q V}{N}$ . 5. 18,4 т; 44 100 кВт.

## ПРЕДМЕТНО-ІМЕННИЙ ПОКАЖЧИК

## А

Абсолютне видовження 186  
Абсолютна шкала температур 149  
Адіабата 163

## Б

Броунівський рух 141

## В

Вага тіла 66, 67  
Виштовхувальна сила 84  
Відносне видовження 186  
Вільне падіння тіла 72  
Вологість повітря 173  
– абсолютна 174  
– відносна 175  
Внутрішня енергія 158

## Г

Газові закони 150  
Гігрометр 174, 177  
Гравітаційна взаємодія 60

## Д

Деформація 183  
– згину 185  
– зсуву 184  
– кручення 185  
– пластична 183  
– поперечного згину 185  
– пружна 183  
– розтягу 183  
– стискання 184  
Дифузія 142  
Діаграма розтягу 187

## Е

Енергія поступального руху 105  
Ентропія 169

## З

Закон  
– Бойля–Маріотта 151  
– всесвітнього тяжіння 61  
– Гей-Люссака 151  
– Гука 44, 186  
– збереження енергії 112  
– збереження імпульсу 100  
– Ньютона другий 55

– Ньютона перший 53  
– Ньютона третій 55  
– термодинаміки другий 166  
– термодинаміки перший 160  
– Шарля 152  
Запас міцності 188  
Змочування 180

## І

Ідеальний газ 147  
Ізопроекти 150  
Імпульс сили 99  
Імпульс тіла 99  
Інерціальні системи відліку 49

## К

Капілярні явища 181  
Кількість речовини 145  
Кількість теплот 159  
Кінетична енергія рухомого тіла 106  
Коефіцієнт поверхневого натягу 179  
Консервативні сили 112

## М

Маса 52  
– атомна 144  
– молекулярна 144  
Маса тіла 52  
Межа міцності 188  
Межа пружності 187  
Межа текучості 187  
Механіка 15  
Механічна напруга 186  
Механічний рух 15  
Модуль пружності 186  
Модуль Юнга 187  
Молекулярно-кінетична теорія 140  
Моль 145  
Момент сили 90

## Н

Наноматеріали 137  
Неінерціальні системи відліку 49  
Необоротність теплових процесів 167

## О

Основна задача механіки 15  
Основне рівняння молекулярно-кінетичної теорії газів 148

## П

Пара  
 – насичена 173  
 – ненасичена 173  
 Перевантаження 68  
 Період обертання 38  
 Потенціальна енергія піднятого над Землею тіла 108  
 – пружно деформованого тіла 109  
 Поверхневий натяг рідин 178  
 Потужність 111  
 Правило важеля 92  
 Принцип відносності Галілея 51, 122  
 Прискорення  
 – доцентрове 40  
 – тіла в його рівноприскореному прямолінійному русі 29  
 Процес адіабатний 162  
 – ізобарний 151  
 – ізопроцес 150  
 – ізотермічний 150  
 – ізохорний 152  
 Психрометр 176

## Р

Реактивний рух 101  
 Релятивістські явища 122  
 Релятивістський закон додавання швидкостей 122, 123  
 Рівновага тіла байдужа 95  
 – нестійка 94  
 – стійка 94  
 Рівнодійна сил 78  
 Рівняння стану ідеального газу 150  
 Робота механічна 106  
 – термодинамічного процесу 161  
 Рух відносний 21  
 – механічний 15  
 – нерівномірний 27  
 – прямолінійний рівномірний 16  
 – рівномірний по колу 37  
 – рівноприскорений 28

## С

Сила Архімеда 85  
 Сила пружності 43  
 – тертя ковзання 45  
 – кочення 44  
 – спокою 44  
 – тяжіння 65  
 Сили молекулярні 142  
 Система відліку інерціальна 49  
 Стала Авогадро 145  
 – Больцмана 149  
 – гравітаційна 62  
 – універсальна газова 149

## Т

Твердість 188  
 Теплові машини 163  
 Теплообмін 159  
 Термодинамічна система 158  
 Тиск насиченої пари 173  
 Точка роси 174

## Х

Холодильна машина 165  
 Холодильний коефіцієнт 165

## Ц

Центр мас тіла 93  
 Центр тяжіння 93  
 Цикл Карно 164

## Ч

Частота обертання тіла 39

## Ш

Швидкість руху тіла  
 – кутова 38  
 – лінійна 38  
 – миттєва 28  
 – прямолінійного рівномірного руху 17  
 – середня 27

## ЗМІСТ

|                                          |   |
|------------------------------------------|---|
| Дорогі десятикласниці та десятикласники! | 3 |
|------------------------------------------|---|

### ВСТУП

|                                                                                     |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------|----|
| § 1. Світоглядний потенціал природничих наук                                        | 5  |
| § 2. Роль фізичного та астрономічного знання в житті людини та суспільному розвитку | 9  |
| § 3. Фундаментальні фізичні теорії – основа сучасної фізичної науки                 | 11 |
| § 4. Астрономія як природнича наука                                                 | 12 |

### Розділ 1. МЕХАНІКА

|                                                                                                                       |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| § 5. Механічний рух тіл. Основна задача механіки                                                                      | 15  |
| § 6. Рівномірний прямолінійний рух. Швидкість руху тіла                                                               | 16  |
| § 7. Графічне зображення рівномірного прямолінійного руху                                                             | 18  |
| § 8. Відносність механічного руху. Закон додавання швидкостей                                                         | 21  |
| Задачі та вправи                                                                                                      | 23  |
| § 9. Рівноприскорений рух тіла. Прискорення                                                                           | 27  |
| § 10. Швидкість тіла і пройдений тілом шлях під час рівноприскореного прямолінійного руху та його графічне зображення | 30  |
| Задачі та вправи                                                                                                      | 33  |
| § 11. Рівномірний рух матеріальної точки по колу. Лінійна і кутова швидкості. Період і частота обертання тіла         | 37  |
| § 12. Доцентрове прискорення тіла                                                                                     | 39  |
| Задачі та вправи                                                                                                      | 41  |
| § 13. Сили в механіці                                                                                                 | 43  |
| Задачі та вправи                                                                                                      | 46  |
| § 14. Інерціальні системи відліку. Принцип відносності Галілея                                                        | 48  |
| § 15. Маса тіла                                                                                                       | 52  |
| § 16. Закони Ньютона                                                                                                  | 53  |
| Задачі та вправи                                                                                                      | 56  |
| § 17. Гравітаційна взаємодія. Закон всесвітнього тяжіння                                                              | 60  |
| Задачі та вправи                                                                                                      | 63  |
| § 18. Сила тяжіння та вага тіла                                                                                       | 65  |
| Задачі та вправи                                                                                                      | 69  |
| § 19. Рух тіла в полі сили тяжіння. Вільне падіння                                                                    | 71  |
| Задачі та вправи                                                                                                      | 74  |
| § 20. Рух тіла під дією кількох сил                                                                                   | 78  |
| Задачі та вправи                                                                                                      | 82  |
| § 21. Закон Архімеда                                                                                                  | 83  |
| Задачі та вправи                                                                                                      | 86  |
| § 22. Рівновага тіл                                                                                                   | 88  |
| § 23. Умова рівноваги тіла, що має вісь обертання. Момент сили                                                        | 89  |
| § 24. Центр мас і центр тяжіння тіла. Види рівноваги тіл                                                              | 92  |
| Задачі та вправи                                                                                                      | 96  |
| § 25. Імпульс. Закон збереження імпульсу                                                                              | 99  |
| Задачі та вправи                                                                                                      | 103 |
| § 26. Кінетична і потенціальна енергія                                                                                | 105 |
| § 27. Потужність                                                                                                      | 110 |
| § 28. Закон збереження механічної енергії                                                                             | 111 |
| Задачі та вправи                                                                                                      | 113 |
| § 29. Застосування законів збереження в механіці                                                                      | 118 |
| § 30. Межі застосування законів класичної механіки                                                                    | 120 |
| § 31. Основні положення спеціальної теорії відносності та їхні наслідки. Релятивістський закон додавання швидкостей   | 121 |

|                                         |     |
|-----------------------------------------|-----|
| Задачі та вправи . . . . .              | 123 |
| Перевірте свою компетентність . . . . . | 124 |
| Тестові завдання . . . . .              | 127 |

**Розділ 2. МОЛЕКУЛЯРНА ФІЗИКА ТА ТЕРМОДИНАМІКА**

|                                                                                                                                                 |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| § 32. Історія вивчення атома . . . . .                                                                                                          | 133 |
| § 33. Сучасні дослідження будови речовини. Новітні технології: наноматеріали . . . . .                                                          | 135 |
| § 34. Основи молекулярно-кінетичної теорії будови речовини . . . . .                                                                            | 139 |
| § 35. Маса атомів і молекул. Кількість речовини . . . . .                                                                                       | 144 |
| § 36. Ідеальний газ. Основне рівняння молекулярно-кінетичної теорії газів. . . . .                                                              | 146 |
| § 37. Абсолютна (термодинамічна) шкала температур. Рівняння стану ідеального газу . . . . .                                                     | 148 |
| § 38. Газові закони для ізопроцесів . . . . .                                                                                                   | 150 |
| Задачі та вправи . . . . .                                                                                                                      | 152 |
| § 39. Внутрішня енергія тіл . . . . .                                                                                                           | 157 |
| § 40. Перший закон термодинаміки . . . . .                                                                                                      | 160 |
| § 41. Робота термодинамічного процесу . . . . .                                                                                                 | 161 |
| § 42. Теплові машини. Холодильна машина . . . . .                                                                                               | 163 |
| § 43. Необоротність теплових процесів. Ентропія . . . . .                                                                                       | 167 |
| Задачі та вправи . . . . .                                                                                                                      | 170 |
| § 44. Властивості насиченої і ненасиченої пари. Вологість повітря . . . . .                                                                     | 173 |
| § 45. Властивості рідин. Поверхневий натяг рідини . . . . .                                                                                     | 178 |
| § 46. Змочування. Капілярні явища . . . . .                                                                                                     | 180 |
| § 47. Деформація твердих тіл. Механічна напруга твердих тіл. Закон Гука. Модуль Юнга . . . . .                                                  | 183 |
| Задачі та вправи . . . . .                                                                                                                      | 189 |
| Перевірте свою компетентність . . . . .                                                                                                         | 194 |
| Тестові завдання . . . . .                                                                                                                      | 196 |
| Фізичні задачі навколо нас . . . . .                                                                                                            | 200 |
| Практикум з розв’язування задач . . . . .                                                                                                       | 206 |
| <b>Лабораторний практикум . . . . .</b>                                                                                                         | 211 |
| <i>Робота № 1. Визначення прискорення руху тіла під час прямолінійного рівноприскореного руху. . . . .</i>                                      | 213 |
| <i>Робота № 2. Визначення прискорення вільного падіння за допомогою математичного маятника . . . . .</i>                                        | 216 |
| <i>Робота № 3. Визначення періоду, частоти, лінійної швидкості та доцентрового прискорення тіла під час рівномірного руху по колу . . . . .</i> | 217 |
| <i>Робота № 4. Визначення центра мас плоских фігур . . . . .</i>                                                                                | 218 |
| <i>Робота № 5. Дослідження руху тіла, кинутого під кутом до горизонту . . . . .</i>                                                             | 220 |
| <i>Робота № 6. Вивчення одного з ізопроцесів: дослідне підтвердження закону Бойля–Маріотта . . . . .</i>                                        | 227 |
| <i>Робота № 7. Визначення коефіцієнта поверхневого натягу рідини . . . . .</i>                                                                  | 231 |
| <i>Робота № 8. Визначення модуля пружності різних речовин . . . . .</i>                                                                         | 234 |
| Видатні українські фізики, які зробили значний внесок у розвиток механіки, молекулярної фізики та термодинаміки . . . . .                       | 239 |
| Словник фізичних термінів . . . . .                                                                                                             | 244 |
| Відповіді до задач і вправ . . . . .                                                                                                            | 249 |
| Предметно-іменний покажчик . . . . .                                                                                                            | 252 |

*Навчальне видання*

СИРОТЮК Володимир Дмитрович

## **ФІЗИКА**

(рівень стандарту, за навчальною програмою  
авторського колективу  
під керівництвом Ляшенка О.І.)

Підручник для 10 класу закладів  
загальної середньої освіти

*Рекомендовано Міністерством освіти і науки України*

**Видано за рахунок державних коштів. Продаж заборонено**

Головний редактор *Наталія Заблоцька*

Редактор *Олена Мовчан*

Обкладинка *Тетяни Куш*

Художній редактор *Василь Марущинець*

Технічний редактор *Цезарина Федосіхіна*

Комп'ютерна верстка *Юрія Лебедєва, Лариси Кулагіної*

Коректори *Лариса Леуська, Любов Федоренко*

Формат 70×100/16.

Ум. друк. арк. 20,8. Обл.-вид. арк. 19,42.

Тираж 39495 пр. Вид. № 1154.

Зам. №

Видавництво «Генеза», вул. Тимошенка, 2-л, м. Київ, 04212.

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи серія ДК № 5088 від 27.04.2016.

Віддруковано у ТОВ «ПЕТ», вул. Ольмінського, 17, м. Харків, 61024.

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи серія ДК № 4526 від 18.04.2013.



# ФІЗИКА ТА АРХІТЕКТУРА



**Морська еkleктика**  
(м. Одеса)

Будинок зведено в стилі «біонічної архітектури», він нагадує творіння відомого іспанського архітектора Антоніо Ґауді.

**Шоколадний будинок**  
(м. Київ)

Колишній особняк відомого купця і мецената Семена Могилівцева. Його побудував у 1901 р. архітектор Володимир Ніколаєв. Через коричневий колір та форму каменю, що нагадує плитку шоколаду, його називали шоколадним.



**Будинок із пляшок**  
(м. Запоріжжя)

Пляшки – дуже міцний і корисний матеріал у будівництві. Вони є своєрідним утеплювальним матеріалом, адже повітря в пляшці затримується і нагрівається (або охолоджується) до комфортної температури. Тобто влітку в будинку холодно, а взимку – тепло.



**Незвичайний будинок**  
(м. Дніпро)

Створений за мотивами робіт всесвітньо відомого іспанського архітектора Антоніо Ґауді.



**Ресторан-музей «Старий млин»**  
(м. Тернопіль)

Розміщений на чотирьох поверхах оригінальної будівлі, спорудженої на фундаменті парового млина, який працював тут до 1939 р. Під час будівництва використано близько 100 тис. оригінальних старовинних цеглин.



**Дім із контейнерів**  
(м. Харків)

Один із перших проєктів в Україні використання вторинних матеріалів. Будинок створено із трьох портових вантажних контейнерів площею 60 м<sup>2</sup> кожен. Один контейнер став основою конструкції. Два інших контейнери поставили перпендикулярно до першого. Такий прийом застосували для того, щоб забезпечити раціональний розподіл навантаження: край верхнього поверху спирається на схил.





## ФІЗИКА ТА АРХІТЕКТУРА



**Музей писанкового розпису**  
(м. Коломия)

Архітектурна споруда у формі писанки (заввишки 14 м та діаметром 10 м). Величезна писанка не елемент декору, а частина будівлі.

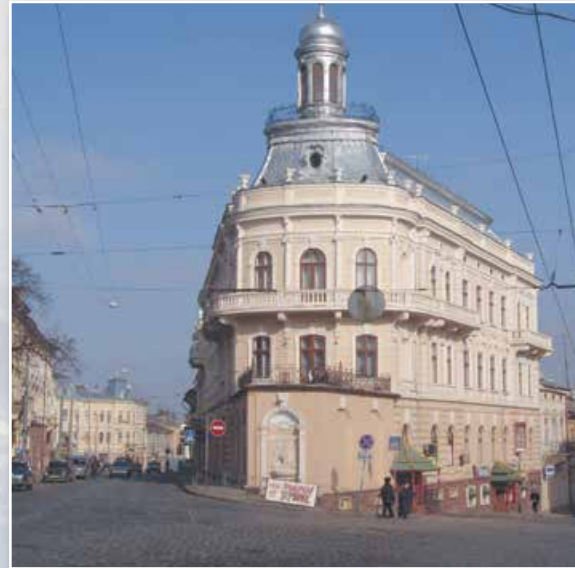
**Будинок скульптора  
Миколи Голованя**  
(м. Луцьк)

Архітектурна пам'ятка, яка розміщена на території історико-культурного заповідника «Старий Луцьк».



**Будинок-корабель**  
(м. Чернівці)

Один із перших кам'яних будинків у місті, споруджений у ХІХ ст.



**Будинок з химерами**  
(м. Київ)

Будинок у формі куба звів архітектор Владислав Городецький у 1903 р. З боку Банкової вулиці він має три поверхи, а з боку площі Івана Франка – шість. Фасад та інтер'єри прикрашено химерними скульптурами – морськими чудовиськами та екзотичними тваринами.

**Будинок-стіна**  
(м. Львів)

Секрет цього архітектурного «обману» досить простий. Торцеві стіни будівлі розміщено не під прямим кутом до фасаду, як зазвичай, а під гострим.

**Готель «Салют»**  
(м. Київ)

Незвичайну круглу будівлю зведено в 1984 р. Вона ніби звисає над дорогою.



**Перевернутий будинок**  
(Карпати)

У карпатському селі створили будинок, що стоїть догори дригом. Монтажні роботи проводили у зворотному порядку: адже в цьому будинку фундамент там, де зазвичай дах.