ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД
«УЖГОРОДСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ»
Фізичний факультет
Кафедра оптики

Методичні вказівки
з навчальної дисципліни

ЗАГАЛЬНА ФІЗИКА

для студентів спеціальності 014 – Середня освіта
(предметна спеціальність 014.07 «Середня освіта. Географія»)

Частина 1

Ужгород 2021

Методичні вказівки призначені для студентів І курсу спеціальності 014.07 «Сердня освіта. Географія», що навчаються в ДВНЗ «УжНУ».

Укладач: Шароді Ірина Степанівна - доцент, кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри оптики.

Схвалено науково-методичною комісією фізичного факультету
Протокол № 11 від 29 червня 2021 р.
Голова науково-методичної комісії ______________Карбованець М.І.

Вступ

Метою цього навчально-методичного посібника є надання допомоги студентам спеціальності 014.07 в оволодінні знаннями з фізики, передбачених навчальним планом.

Для вивчення теоретичного курсу фізики необхідно керуватися робочою навчальною програмою, наведеною в даному посібнику. При цьому слід пам’ятати, що обсягу інформації, викладеного під час лекційних занять, не завжди достатньо для отримання належного обсягу знань. Тому варто приділити увагу самостійній роботі з підручниками, рекомендованими викладачем. Перелік цих підручників наведений у кінці даного посібника. Лекційні ж заняття покликані лише окреслити основне коло понять, явищ та законів, які необхідно вивчити в межах даної дисципліни, і дати основні напрямки для самостійної роботи.

Для вивчення курсу фізики та успішного атестування за результатами його вивчення необхідно виконати такі головні умови:

1. Відвідувати всі передбачені розкладом заняття.
2. Під час лекційних занять виконувати конспектування лекційного матеріалу, під час практичних занять – намагатися самостійно розв’язати задачі, що розглядаються, а після занять виконувати аналіз навчального матеріалу з використанням навчальних посібників.
3. Виконати самостійну роботу за своїм варіантом.
4. Під час самостійного вивчення навчального матеріалу за підручниками керуватися робочою навчальною програмою з фізики, представленою в даному посібнику.
5. При потребі використовувати можливості консультування з викладачем з тих питань, вивчення яких викликає найбільші труднощі.
6. Перед здачею підсумкового контролю (модульний контроль, залік), переконатися, що здані та захищені всі лабораторні роботи циклу, виконано практичні завдання та предьявлено викладачу зошит з самостійної роботи для зарахування всіх активностей у підсумковий бал.
7. Під час підготовки до поточного чи підсумкового контролю (заліку/іспиту) з фізики необхідно знати, що до переліку теоретичних питань в білетах включено <u>всі</u> питання робочої навчальної програми.

ЗАГАЛЬНІ МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ

Згідно з навчальним планом підготовки бакалаврів за спеціальністю **014.07 «Середня освіта. Географія»** курс навчальної дисципліни „Загальна фізика ” має загальний обсяг 210 години.. Він складається з аудиторних занять, практичних, лабораторних та самостійної роботи студента. Загальний обсяг самостійної роботи студентів становить 56 та 58 години, відповідно у 1 та 2 семестрах. За результатами вивчення дисципліни передбачається проведення заліку в першому семестрі та іспиту – в другому.

ОПИС НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ

<table>
<tr><th>Найменування
Показників</th><th>Розподіл годин за навчальним планом</th></tr>
<tr><td>Кількість кредитів ЄКТС – 7</td><td>Рік підготовки:</td></tr>
<tr><td>Загальна кількість годин – 210</td><td>1- й</td></tr>
<tr><td>Кількість модулів –4</td><td>Семестр:</td></tr>
<tr><td rowspan="5">Тижневих годин
для денної форми навчання: 7

аудиторних – 3

самостійної роботи студента – 4</td><td>1-2- й</td></tr>
<tr><td>Лекції:</td></tr>
<tr><td>56</td></tr>
<tr><td>Практичні
(семінарські):</td></tr>
<tr><td>20</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Вид підсумкового контролю:
залік (1 семестр)
іспит (2 сем)</td><td>Лабораторні:</td></tr>
<tr><td>20</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Форма підсумкового контролю:
усна</td><td>Самостійна робота:</td></tr>
<tr><td>114</td></tr>
</table>

МЕТА НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ

Мета засвоєння дисципліни «Загальна фізика»:

- оволодіння фундаментальними поняттями, теоріями класичної і сучасної фізики та методами фізичного дослідження;
- розвиток умінь і навичок аналізувати фізичні явища (якісний підхід) і описувати їх за допомогою аналітичних співвідношень (кількісний підхід);
- розвиток просторового, логічного та алгоритмічного мислення;
- вироблення навичок самостійного вивчення наукової літератури з фізики та інших природничих дисциплін та набуття умінь застосовувати знання на

практиці;

- отримання досвіду виконання експериментальних досліджень і обробки результатів вимірювань;
- формування наукового світогляду і сучасного фізичного мислення.

ЗАСОБИ ДІАГНОСТИКИ ТА КРИТЕРІЇ ОЦІНЮВАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ НАВЧАННЯ

Засоби оцінювання та методи демонстрування результатів навчання

Методи навчання: словесні (лекція, пояснення, розповідь, інструктаж), практичні (вправи, лабораторні роботи), наочні методи (спостереження, ілюстрації, демонстрації).

Засоби оцінювання та методи демонстрування результатів навчання з навчальної дисципліни є:

-поточне усне опитування;

-модульне опитування;

-завдання на лабораторному обладнанні;

-спостерження за навчально-пізнавальною діяльністю студентів;

-залік;

-екзамен.

Самостійна робота включає: опрацювання теоретичних положень навчальноїдисципліни за результатами прослуханого лекційного матеріалу; вивчення окремих тем питань перебачених для самостійного опрацювання; поглиблене вивчення наукової літератури на задану тему та пошук додаткової інформації; підготовку до практичних занять (формування доповідей для виступу) та до лабораторних занять (теоретична підготовка до виконання роботи та вивчення роботи приладів,опрцювання даних та оформлення звіту виконаної лабораторної роботи).

ФОРМИ КОНТРОЛЮ ТА КРИТЕРІЇ ОЦІНЮВАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ НАВЧАННЯ

Форми поточного контролю: усне опитування на лабораторних заняттях; усні виступи на семінарських заняттях, самостійна робота.

Форма модульного контролю: модульні контрольні роботи в письмовій формі у вигляді розписових запитань або тестів.

Форма підсумкового семестрового контролю: залік, іспит.

Розподіл балів, які отримують здобувачі вищої освіти (модуль 1)

<table>
<tr><th colspan="6">Поточне оцінювання та самостійна робота</th><th>Модульна контрольна робота</th><th>Сума</th></tr>
<tr><td>С1</td><td>С2</td><td>С3</td><td>Ср1</td><td>Лр1</td><td>Лр2</td><td rowspan="2">40</td><td rowspan="2">100</td></tr>
<tr><td>10</td><td>10</td><td>10</td><td>10</td><td>10</td><td>10</td></tr>
</table>

С1, …– семінарські доповіді

Ср 1 – самостійна робота студента

Лр 1 – лабораторна робота

Оцінювання окремих видів навчальної роботи з дисципліни

Вид діяльності здобувача вищої освіти	Модуль 1	
	Кількість	Максимальна кількість балів (сумарна)
Практичні (семінарські) заняття	3	30
Лабораторні заняття (допуск, виконання та захист)	2	20
Самостійна робота	1	10
Модульна контрольна робота	1	40
Разом	**7**	**100**

Критерії оцінювання модульної контрольної роботи

При оцінюванні модульної контрольної роботи враховується обсяг і правильність виконаних завдань:

а) оцінка «відмінно» ставиться за правильне виконання всіх завдань;

б) оцінка «добре» ставиться за виконання 75% усіх завдань;

в) оцінка «задовільно» ставиться, якщо правильно виконано більше 50% запропонованих завдань;

г) оцінка “незадовільно” ставиться, якщо завдань виконано менше від 50%.

Неявка на модульну контрольну роботу – 0 балів.

Ці оцінки трансформуються в рейтингові бали у такий спосіб:

«5» – 40 балів; «4» – 30 бали; «3» – 20 балів; «2» – менше 19 балів; **«неявка»** на МКР – 0 балів.

Критерії оцінювання підсумкового семестрового контролю

Сума балів за всі види навчальної діяльності	Оцінка ECTS	Оцінка за національною шкалою	
		для екзамену, курсового проекту (роботи), практики	для заліку
90 – 100	**A***	відмінно	зараховано
82-89	**B***	добре	
74-81	**C***		
64-73	**D***	задовільно	
60-63	**E ***		
35-59	**FX***	незадовільно з можливістю повторного складання	не зараховано з можливістю повторного складання
0-34	**F***	незадовільно з обов’язковим повторним вивченням дисципліни	не зараховано з обов’язковим повторним вивченням дисципліни

Примітка:*

A* «Відмінно»– теоретичний зміст курсу освоєний цілком, необхідні практичні навички роботи з освоєним матеріалом сформовані, вище навчальні завдання, які передбачені програмою навчання виконані в повному обсязі, відмінна робота без помилок або з однією незначною помилкою.

B* **«**Дуже добре» – теоретичний зміст курсу освоєний цілком, необхідні практичні навички роботи з освоєним матеріалом в основному сформовані, всі навчальні завдання, які передбачені програмою навчання виконані, якість виконання більшості з них оцінено числом балів, близьким до максимального, робота з двома - трьома незначними помилками.

C* «Добре» – теоретичний зміст курсу освоєний цілком, практичні навички роботи з освоєним матеріалом в основному сформовані, всі навчальні завдання, які передбачені програмою навчання виконані, якість виконання жодного з них не оцінено мінімальним числом балів, деякі види завдань виконані з помилками, робота з декількома незначними помилками, або з однією – двома значними помилками.

D* «Задовільно» – теоретичний зміст курсу освоєний не повністю, але прогалини не носять істотного характеру, необхідні практичні навички роботи з освоєним матеріалом в основному сформовані, більшість передбачених програмою навчання навчальних завдань виконано, деякі з виконаних завдань, містять помилки,робота з трьома значними помилками.

E* «Достатньо» – теоретичний зміст курсу освоєний частково, деякі практичні навички роботи не сформовані, частина передбачених програмою навчання навчальних завдань не виконані,або якість виконання деяких з них оцінено числом балів, близьким до мінімального,робота, що задовольняє мінімуму критеріїв оцінки.

FX* «Умовно незадовільно» – теоретичний зміст курсу освоєний частково, необхідні практичні навички роботи не сформовані, більшість передбачених програм навчання, навчальних завдань не виконано, або якість їхнього виконання оцінено числом балів, близьким до мінімального; при додатковій самостійній роботі над матеріалом курсу можливе підвищення якості виконання навчальних завдань (з можливістю повторного складання), робота, що потребує доробки

F* «Безумовно незадовільно» – теоретичний зміст курсу не освоєно, необхідні практичні навички роботи не сформовані, всі виконані навчальні завдання містять грубі помилки, додаткова самостійна робота над матеріалом курсу не приведе до значимого підвищення якості виконання навчальних завдань.

ЗМІСТ НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ
Семестр I

Розділ I. МЕХАНІКА

Тема 1. Вступ. Системи одиниць.

Предмет фізики. Фізика і геофізика, екологія. Механіка. Матеріальна точка і системи матеріальних точок як об'єкти класичної механіки. Властивості простору і часу.

Фізичні вимірювання. Розмірність. Системи одиниць. Скалярні і векторні величини. Множення вектора на скаляр. Добуток векторів. Скалярний і векторний добуток векторів.

Елементи диференціювання та інтегрування. Фізичний зміст диференціалу.

Тема 2. Кінематика матеріальної точки.

Кінематика матеріальної точки. Системи відліку. Системи координат. Рух в механіці. Переміщення. Траєкторія, шлях.

Швидкість. Прискорення. Рівнозмінний поступальний рух. Криволінійний рух. Нормальне і тангенційне прискорення. Кутова швидкість, кутове прискорення.

Тема 3. Динаміка матеріальної точки.

Інерціальні системи відліку. Інертність, принципи відносності. Перший закон Ньютона. Сила. Основні сили в класичній механіці.

Другий закон Ньютона. Маса. Імпульс. Третій закон Ньютона. Закон збереження імпульсу.

Тема 4. Основи небесної механіки. Основи теорії тяжіння.

Закони Кеплера. Сонячна система.

Закон всесвітнього тяжіння. Гравітаційні сили. Гравітаційна і інертна маси, їх еквівалентність. Чорні діри.

Тема 5. Гравітаційне поле Землі. Гравіметрія.

Гравітаційне поле Землі. Сила тяжіння. Вага. Невагомість. Космічні швидкості. Космічні дослідження.

Тема 6. Основи теорії пружності. Тертя. Елементи гідродинаміки.

Пружні сили. Деформації, межа пружності. Розтягування, стиснення, зсув. Закон Гука. Модулі Юнга і зсуву.

Сили тертя спокою, ковзання і кочення. Рух рідини. Рівняння Бернуллі. Внутрішнє тертя. В'язкість. Закон Стокса. Числа Рейнольдса.

Тема 7. Неінерціальні системи відліку. Рух тіла зі змінної масою.

Неінерціальні системи відліку. Сили інерції. Перевантаження. Відцентрова сила інерції. Залежність ваги тіла від широти місцевості. Центрифуги і їх застосування в наукових дослідженнях. Сила Коріоліса.

Рух тіла з змінної масою. Реактивний рух; рівняння Мещерського; формула Ціолковського.

Тема 8. Робота. Енергія. Закони збереження.

Робота сили. Потужність. Енергія. Закон збереження і перетворення енергії. Кінетична і потенціальна енергії. Консервативна система.

Тема 9. Основи механіки твердого тіла.

Центр мас системи матеріальних точок. Абсолютно тверде тіло. Поступальний, обертовий і плоский рух.

Обертальний рух абсолютно твердого тіла навколо закріпленої осі. Момент інерції. Момент імпульсу. Момент сили. Закони збереження при обертальному русі.

ТЕМИ СЕМІНАРСЬКИХ ЗАНЯТЬ

1. Дослідження сили тяжіння.
2. Дослідження напруженості гравітаційного поля.
3. Дослідження космічних швидкостей.

ТЕМИ ЛАБОРАТОРНИХ ЗАНЯТЬ

1. Вступне заняття. Основи теорії похибок та обробки експериментальних даних.
2. Фронтальна лабораторна робота по обробці даних прямих вимірювань.
3. Визначення прискорення вільного падіння за допомогою маятника.

САМОСТІЙНА РОБОТА

Самостійна робота перебачає підготовку до семінарських та лабораторних занять, а також розв’язування задач після оволодіння теоретичною частиною теми, що вивчається студентом.

Зошит з самостійно виконаними завданнями студент має надати викладачу до виведення ним підсумкового балу. Захист роботи відбувається в процесі індивідуальної співбесіди викладача зі студентом.

ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА

Тема 1. Вступ. Системи одиниць.

Предмет фізики. Фізика і геофізика, екологія. Механіка. Матеріальна точка і системи матеріальних точок як об'єкти класичної механіки. Властивості простору і часу.

Фізичні вимірювання. Розмірність. Системи одиниць. Скалярні і векторні величини. Множення вектора на скаляр. Добуток векторів. Скалярний і векторний добуток векторів.

Елементи диференціювання та інтегрування. Фізичний зміст диференціалу.

Фізичні величини та їх одиниці

1. Види фізичних одиниць

Поняття фізичної величини — це найзагальніше поняття у фізиці та метрології. Під **фізичною величиною** слід розуміти властивість, спільну в якісному відношенні для багатьох матеріальних об'єктів та індивідуальну в кількісному відношенні для кожного з них. Так, усі об'єкти мають масу і температуру, проте для кожного окремого об'єкта як маса, так і температура різні та конкретні за певних обставин. Розглядаючи електричну схему, можна сказати, що по всіх гілках проходить струм, але у кожній гілці він різний за величиною.

Для встановлення різниці за кількісним вмістом властивостей у кожному об'єкті вводиться поняття "розмір фізичної величини".

Між розмірами кожної фізичної величини існує відношення, яке має ту саму логічну структуру, що й між числовими формами (цілими, раціональними чи дійсними числами, векторами). Тому множина числових форм з визначеними співвідношеннями між ними може слугувати моделлю фізичної величини, тобто множини її розмірів та співвідношення між ними.

Правила, відповідно до яких числові форми приписуються розмірам величин, обумовлюються присутністю тих чи інших відношень та множини їх розмірів. Виходячи з цього, можна виділити три групи фізичних величин, вимірювання яких здійснюється за принципово різними правилами.

До першої групи відносяться величини, множина розмірів яких визначається лише за відношеннями типу "тверде — м'яке", "тепле — холодне", "кисле — солодке" та ін. У математиці такі відношення дістали назву **відношення порядку й еквівалентності.** Наявність подібних відношень встановлюється теоретично, виходячи із загально-фізичних міркувань, або ж експериментально, за допомогою засобів вимірювання та експериментатора. Так, без особливих зусиль можна визначити, що мідь твердіша за гуму, але визначити відмінність сплавів міді з іншими металами (свинцем, оловом) за твердістю без засобів вимірювання просто неможливо, тому що за твердістю ці метали різняться незначно.

Друга група величин характеризується тим, що відношення порядку й еквівалентності стосується не тільки розмірів величин, а й відмінностей у парах цих розмірів. До другої групи відносяться такі величини, як потенціал, енергія, температура та інші. Можливість порівняння інтервалів їх розмірів зумовлена самими визначеннями цих величин. Так, інтервали температур будуть однаковими, якщо будуть однакові відстані між відповідними поділками на шкалі ртутного термометра. Йдеться не про температуру як ступінь нагрітості тіла, а лише про рівність інтервалів температур.

Для третьої групи величин крім згаданих раніше визначень характерні відношення, названі **операціями,** що подібні до арифметичного додавання та віднімання. Операція приймається визначеною, якщо її результати (сума чи різниця) за розмірами подібні до фізичної величини і вона може бути технічно реалізованою. За допомогою операції додавання можна реалізовувати операцію множення на число п. Результат такого множення відповідає сумі п розмірів певної вимірюваної величини. До таких величин відносяться: довжина, тиск, маса, термодинамічна температура тощо. Сума двох мас є масою такого тіла, яка врівноважує маси двох тіл. За наявності різниці двох тіл врівноваження терез проводиться масою тіла, поміщеного на легшу чашу (гирею).

До величин третьої групи можна віднести і множину інтервалів розмірів величин другої групи, тому що для них можливо встановити операцію, подібну до додавання. Оскільки всі арифметичні операції зводяться до додавання, то ці величини виявляються найпридатнішими для використання у фізиці. Тому їх найчастіше називають **фізичними.**

З розвитком науки і техніки визначення фізичних величин постійно уточнюється.

Уточнення визначень в напрямку, що дозволяє відкрити більше число відношень у множині їх розмірів і ввести їх до третьої або ж хоча б до другої групи величин, дає можливість спрощувати аналітичний вираз фізичних законів.

Властивості об'єкта, який характеризується певною основною для нього величиною, описуються за допомогою інших, раніше визначених величин. Це обумовлено наявністю об'єктивних взаємозв'язків між властивостями об'єктів, які можна записати за допомогою величин і подати у вигляді моделі об'єкта. Модель об'єкта описується сукупністю рівнянь, які й називаються **рівняннями між величинами.** За їх допомогою формулюється визначення певних величин та вказуються способи вимірювання останніх.

У будь-якому розділі науки кількість рівнянь завжди менша, ніж кількість вхідних величин, тому прийнято виділяти в окрему групу величини, кількість яких дорівнює різниці між кількістю величин і кількістю незалежних рівнянь.

Ці величини і відповідні їм одиниці вимірювання називаються **основними величинами** і **основними одиницями.** Решта величин і одиниць, які однозначно визначаються через основні, називаються **похідними.**

Сукупність вибраних основних і похідних величин називається системою величин. Так само визначається і система одиниць.

3. Міжнародна система одиниць

Наявність численних систем одиниць фізичних величин, а також значної кількості позасистемних одиниць спричинило багато незручностей при переході від однієї системи одиниць в іншу, а отже, потрібно було якнайшвидше уніфікувати одиниці вимірювання. Необхідна була єдина система одиниць фізичних величин, яка була б зручною для практичних вимірювань у різних галузях вимірювань та зберігала б принцип когерентності.

Так, система МКГСС успішно використовувалася у механіці та прикладних науках, але не узгоджувалась з практичними електричними одиницями. Розміри одиниць системи СГС широко використовувалися у фізиці, але були занадто незручні для використання у техніці.

У 1954 році X Генеральна конференція з мір і ваги встановила шість основних одиниць (метр, кілограм, секунда, ампер, градус Кельвіна, свічка) практичної системи одиниць для міжнародних відносин. На цей час членами Метричної конференції стали близько 40 найрозвинутіших держав. Одночасно Міжнародний комітет з мір і ваги створив комісію щодо розробки єдиної Міжнародної системи одиниць. Система одержала назву **Міжнародної системи одиниць,** скорочено СІ (SI — початкові букви французької назви Systeme International).

Ухвалення Міжнародної системи у 1960 році IX Генеральною конференцією з мір і ваги було важливим прогресивним актом, який закріпив велику багаторічну роботу з цього питання і узагальнив досвід роботи наукових організацій з метрології, стандартизації, фізики й електротехніки.

Міжнародна система одиниць прийнята Міжнародним союзом фізиків, Міжнародною електротехнічною комісією та іншими міжнародними організаціями. Організація об'єднаних націй з освіти, науки і культури (ЮНЕСКО) закликала усі країни ухвалити Міжнародну систему одиниць. Сьогодні 115 держав приєдналися до Метричної конвенції, і в більшості країв* система СІ визнана чинною законодавчо.

У 1981 році в СРСР уведено в дію стандарт ГОСТ 8.417—81 "Одиниці фізичних величин", у якому за основу взято Міжнародну систему одиниць, і затверджено до обов'язкового виконання.

У 1997 році Держстандарт України ухвалив постанову про введення у державі Міжнародної системи одиниць ДСТУ 3651.097 "Метрологія. Одиниці фізичних величин. Основні одиниці фізичних величин Міжнародної системи одиниць. Основні назви, положення та позначення".

Перевагами Міжнародної системи одиниць СІ слід визначити такі:

• універсальність, що забезпечує її використання в науці, техніці і господарстві;

• уніфікованість одиниць для всіх видів вимірювання. Так, замість кількох одиниць тиску (атм., мм. рт. ст., мм. вод. ст., бар та інші) у СІ визнана едина одиниця тиску — паскаль (Па); замість кількох одиниць роботи й енергії ухвалена одиниця — джоуль (Дж);

• когерентність (узгодженість) системи: коефіцієнти пропорційності у фізичних рівняннях для визначення похідних величин дорівнюють одиниці;

• використання зручних для практичних вимірювань основних та похідних одиниць;

• чітке розмежування одиниць маси (кілограм) і сили (ньютон);

• спрощений запис рівнянь і формул завдяки відсутності перехідних коефіцієнтів переведення з однієї системи в іншу;

• позбавлення необхідності визначати всі системи одиниць;

• сприяння розвитку міждержавних науково-технічних та економічних зв'язків.

4. Основні одиниці системи СІ

У 1954 році X Генеральна конференція з мір і ваги затвердила основні одиниці Міжнародної системи одиниць, які мають охоплювати всі галузі науки і техніки, бути основою для утворення похідних одиниць, забезпечувати зручність для практичних вимірювань і відтворюватися за допомогою установок і еталонів з найбільшою точністю.

У 1971 році XIV Генеральна конференція з мір і ваги затвердила сьому основну одиницю кількості речовини — моль.

Основні одиниці системи СІ зі скороченими позначеннями українськими та латинськими буквами наведені у табл. 1.

Таблиця 1. Основні одиниці системи **СІ**

Величина	**Одиниця вимірювання**	**Скорочені позначення одиниць**	
		Українські	**Латинські**
Довжина	метр	м	m
Маса	кілограм	кг	kg
Час	секунда	с	s
Сила електричного струму	ампер	А	A
Термодинамічна температура	кельвін	К	K
Сила світла	кандела	кд	kd
Кількість речовини	моль	моль	mol

Визначення основних одиниць відповідно до рішення Генеральної конференції з мір і ваги:

метр — довжина шляху, який проходить світло у вакуумі за 1/29979245 частину секунди;

кілограм — одиниця маси, що дорівнює масі Міжнародного прототипу кілограма;

секунда — 9 192 631 770 періодів випромінювання переходу між двома надтонкими рівнями основного стану атома цезію-133;

ампер — сила незмінного струму, який, проходячи через два паралельних прямолінійних провідники нескінченної довжини і занадто малого круглого перерізу, що розміщені на відстані метра один від одного у вакуумі, утворив би між провідниками силу в 2*10-7Н на кожний метр довжини;

кельвін — одиниця термодинамічної температури — 1/273,16 частини термодинамічної температури потрійної точки води;

кандела — сила світла, що випромінюється з площі у 1/600 000 м2 перерізу повного випромінювача у перпендикулярному до цього перерізу напрямку при температурі затвердіння платини та тиску 101325 Па;

моль — кількість речовини, яка вміщує стільки ж молекул (атомів, частинок), скільки вміщується атомів у нукліді вуглецю-12 масою в 0,012 кг.

5. Похідні одиниці системи СІ

Крім основних одиниць СІ є велика група похідних одиниць, які визначаються за законами взаємозв'язків між фізичними величинами або ж на основі визначення фізичних величин. Відповідні похідні одиниці СІ виводяться із рівнянь зв'язку між величинами. Залежно від наукового напрямку утворені похідні одиниці для простору, часу, механічних, теплових, електричних, магнітних, акустичних, світлових величин та величин іонізуючого випромінювання (додаток 1).

Поряд з основними та похідними одиницями Міжнародної системи СІ є ще позасистемні одиниці (додаток 2). Вони широко застосовуються у повсякденному житті. Крім названих, є ще позасистемні одиниці тимчасового використання (морська миля, яка дорівнює — 1852 м, гектар — 10 000 м2, ар — 100 м2, бар — 105 Па та ін.), а також відносні та логарифмічні величини.

6. Кратні та частинні одиниці

Найпрогресивнішим способом утворення кратних та частинних одиниць є прийнята у метричній системі мір десяткова кратність між великими і малими одиницями. Десяткові кратні та частинні одиниці від одиниць СІ утворюються шляхом використання множників та приставок від 10+18 до 1024 (табл. 2).

Таблиця 2. Множники і приставки для утворення кратних та частинних одиниць

Множник	**Приставка**		
	Назва	**Позначення**	
		Українське	**Міжнародне**
	2	**3**	**4**
1000000000000000000 = 1018	екса	Е	Е
1000000000000000 = 1015	пета	п	р
1000000000000 = 1012	тера	Т	Т
1000000000 - 109	гіга	Г	G
1000000 = 106	мега	М	М

1000 = 103	кіло	к	k
100 = 102	гекто	г	h
10 = 101	дека	да	da
0,1 = 10-1	деци	д	d
0,01 = 10-2	санти	с	c
0,001 = 10-3	мілі	м	m
0,000001 = 10-6	мікро	мк	μ
0,000000001 = 10-9	нано	н	n
0,000000000001 - 10-12	піко	п	p
0,000000000000001 – 10-15	фемто	ф	f
0,000000000000000001 = 10-18	атто	а	a
0,000 001 = 10-21	зенто	зп	z
0,000 001 = 10-24	йокто	й	y

6. Скалярні та векторні величини. Дії над векторами.

Фізичні величини, які використовують у фізиці для кількісної характеристики фізичних явищ і об'єктів, поділяються на два класи: скалярні і векторні величини.

Скалярними є величини, які виражають лише числом. До таких величин відносяться, наприклад, маса, довжина, площа, температура, робота і багато інших.

Скалярні величини зазвичай позначають літерами латинської та грецької абетки (ℓ, S, t, p, A тощо).

Математичні дії із скалярними величинами здійснюють за відомими вам правилами арифметики.

Векторними називають величини, які окрім числового значення характеризуються також напрямом.

Вектори позначають напівжирними літерами, наприклад, **a, b, c,** або світлими літерами зі стрілками над ними: $\vec{a}, \vec{b}, \vec{c}$. Числове значення вектора називають модулем вектора.

Векторну фізичну величину зображають стрілкою, довжина якої у вибраному масштабі дорівнює модулю вектора, а напрям збігається з напрямом фізичної величини.

Вектори можна додавати за правилами геометричного (векторного) додавання. При додаванні векторів $\vec{a} + \vec{b}$ отримаємо вектор $\vec{c}$.

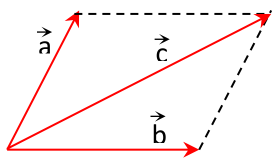


Рис. 1

Тобто, $\vec{a} + \vec{b} = \vec{c}$. Для визначення напряму і довжини вектора $\vec{c}$ користуються правилом паралелограма (рис. 1). Якщо вектори $\vec{a}$ і $\vec{b}$ мають спільний початок, то для їх додавання треба побудувати на цих векторах паралелограм, діагональ якого буде вектором суми векторів $\vec{a}$ і $\vec{b}$. Якщо ці вектори не мають спільного початку, то їх можна за допомогою паралельного перенесення привести до спільного початку.

Під час обчислень ми оперуємо числами (скалярами), тому виникає потреба від векторного запису перейти до скалярного. Для цього вводять поняття проекції вектора на координатну вісь.

Проекцією точки на вісь називають основу перпендикуляра, опущеного з цієї точки на вісь.

На рис. 2 точки A_x та A_y є проекціями точки А на осі Ох та Оу, відповідно.

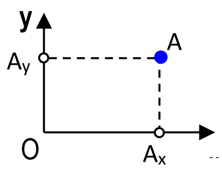


Рис. 2

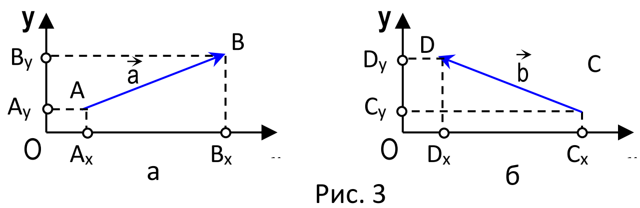


Рис. 3

Проекцією відрізка на вісь є відрізок на осі, обмежений проекціями початку і кінця даного відрізка.

Проекція вектора на вісь являє собою проекцію його відрізку на цю вісь. На рис. 3а та 3б зображено вектори $\vec{a}$ і $\vec{b}$, які мають різну орієнтацію відносно осей координат.

Відрізки A_xB_x і A_yB_y – це проекції вектора $\vec{a}$ на осі Ох та Оу, відповідно.

А відрізки C_xD_x і C_yD_y – це проекції вектора $\vec{b}$ на осі Ох та Оу, відповідно.

Проекції вектора на осі позначають тією самою літерою, що і сам вектор, і додають відповідний індекс. Наприклад, a_x – це проекція вектора $\vec{a}$ на вісь Ох.

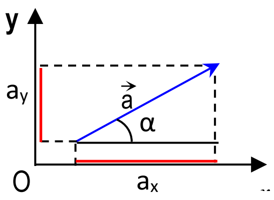


Рис. 4

Якщо вектор $\vec{a}$ складає з віссю Ох кут α (рис. 4), то його проекції можна знайти за формулами:

$$a_x = a \cdot \mathrm{Cos}\ \alpha; \qquad a_y = a \cdot \mathrm{Sin}\ \alpha$$

Проекцію вектора на обрану вісь вважають додатною, якщо від проекції початку вектора до проекції його кінця треба рухатися у напрямі цієї осі, і від'ємною, якщо треба рухатися у напрямі, протилежному напряму цієї осі. Наприклад, проекція вектора $\vec{a}$ на вісь Ох є додатною, а проекція вектора $\vec{b}$ на вісь Ох є від'ємною.

Тема 2. Кінематика матеріальної точки.

Кінематика матеріальної точки. Системи відліку. Системи координат. Рух в механіці. Переміщення. Траєкторія, шлях.

Швидкість. Прискорення. Рівнозмінний поступальний рух. Криволінійний рух. Нормальне і танґенційне прискорення. Кутова швидкість, кутове прискорення.

1. Кінематика механічного руху

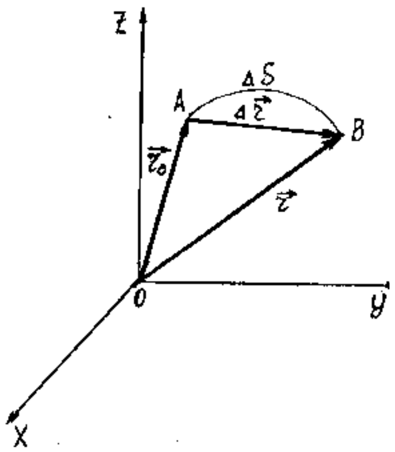
Перш ніж переходити до розгляду окремих питань механіки, введемо ряд основних понять.

Матеріальна точка – це тіло, розмірами і формою якого в даній задачі можна знехтувати.

Система відліку – це система координат з годинником, яка зв'язана з абсолютно твердим тілом, по відношенню до якого визначається положення інших тіл в різні моменти часу.

Якщо в деякій системі відліку тіло не може вважатись матеріальною точкою, то його можна подумки розбити на ряд дрібних частин, що взаємодіють між собою, кожна з яких може вважатись **матеріальною точкою.**

Поступальний рух – це такий рух, при якому будь-яка пряма, що проведена через дві довільні точки тіла, залишається паралельною сама до себе. При поступальному русі траєкторії всіх точок тіла однакові.



Обертовий рух – це такий рух, при якому всі точки рухаються по колах, центри яких перебувають на осі обертання. У загальному випадку довільний механічний рух можна представити як поєднання поступального та обертового рухів.

Положення матеріальної точки в системі відліку XOYZ (рис.1.1) можна задати через радіус-вектор цієї точки, тобто вектор, що з'єднує початок координат з точкою простору, де перебуває матеріальна точка в даний момент часу.

Якщо відомий закон зміни радіуса-вектора з часом, то можна записати кінематичне рівняння руху матеріальної точки в даній системі відліку у векторній формі.

$$\vec{r} = \vec{r}(t) \tag{1.1}$$

Спроектувавши кінець радіуса-вектора на координатні вісі, векторне рівняння (1.1) можна представити у вигляді трьох скалярних рівнянь руху

$$\begin{cases} x = x(t), \\ y = y(t), \\ z = z(t). \end{cases} \tag{1.2}$$

2.Швидкість і прискорення

Скалярну величину, яка рівна довжині траєкторії ΔS називають шляхом. Вектор, що з'єднує початкове положення матеріальної точки з її положенням в даний момент часу називають вектором *переміщення* $\Delta\vec{r}$.

$$\Delta\vec{r} = \vec{r} - \vec{r}_0 . \tag{1.3}$$

При прямолінійному русі вектор переміщення співпадає з відповідною ділянкою траєкторії, тобто його модуль рівний пройденому шляху. У випадку криволінійного руху вектор переміщення є січною, що проходить через дві точки траєкторії, які відповідають двом різним моментам часу.

Швидкість – це векторна величина, яка характеризує зміну радіуса-вектора рухомої точки з часом. Вектор середньої швидкості рівний відношенню приросту радіуса-вектора $\Delta\vec{r}$ рухомої точки до часу Δt, за який він відбувся

$$<\vec{\upsilon}>=\frac{\Delta\vec{r}}{\Delta t}. \qquad (1.4)$$

Якщо перейти до границі при $\Delta t\to 0$, то отримаємо вираз для миттєвої швидкості

$$\vec{\upsilon}=\lim_{\Delta t\to 0}\frac{\Delta\vec{r}}{\Delta t}=\frac{d\vec{r}}{dt}. \qquad (1.5)$$

Таким чином, миттєва швидкість – це швидкість в даний момент часу або в даній точці траєкторії. Вектор миттєвої швидкості дорівнює першій похідній радіуса-вектора рухомої точки по часу і напрямлений вздовж дотичної до траєкторії в будь-якій її точці. Врахувавши, що при $\Delta t\to 0$ $|d\vec{r}|=ds$, отримаємо:

$$\upsilon=\frac{ds}{dt}. \qquad (1.6)$$

В загальному випадку з (1.6) випливає, що шлях може бути обчислений за формулою

$$S=\int\upsilon(t)dt. \qquad (1.7)$$

Швидкість можна представити через її проекції на координатні вісі

$$\vec{\upsilon}=\upsilon_x\vec{i}+\upsilon_y\vec{j}+\upsilon_z\vec{k}, \qquad (1.8)$$

$$\upsilon=\sqrt{\upsilon_x^2+\upsilon_y^2+\upsilon_z^2}, \qquad (1.9)$$

де

$$\upsilon_x=\frac{dx}{dt},\quad \upsilon_y=\frac{dy}{dt},\quad \upsilon_z=\frac{dz}{dt}. \qquad (1.10)$$

Швидкість може змінюватись як за модулем так і за напрямком. Для характеристики зміни швидкості вводять вектор прискорення, який описує зміну швидкості з часом. Середнє прискорення рівне відношенню зміни швидкості до проміжку часу, за який вона відбулася

$$<\vec{a}>=\frac{\Delta\vec{\upsilon}}{\Delta t}=\frac{\vec{\upsilon}_2-\vec{\upsilon}_1}{t_2-t_1}. \qquad (1.11)$$

Миттєве прискорення – це прискорення в даний момент часу і воно визначається як границя до якої прямує середнє значення прискорення, якщо проміжок часу прямує до нуля

$$\vec{a}=\lim_{\Delta t\to 0}\frac{\Delta\vec{\upsilon}}{\Delta t}=\frac{d\vec{\upsilon}}{dt}=\frac{d^2\vec{r}}{dt^2}. \qquad (1.12)$$

Таким чином, миттєве прискорення дорівнює першій похідній швидкості по часу або другій похідній радіуса-вектора по часу.

В проекціях на координатні вісі

$$\vec{a}=a_x\vec{i}+a_y\vec{j}+a_z\vec{k}, \qquad (1.13)$$

$$a=\sqrt{a_x^2+a_y^2+a_z^2}, \qquad (1.14)$$

де

$$a_x=\frac{d\upsilon_x}{dt}=\frac{d^2x}{dt^2},\quad a_y=\frac{d\upsilon_y}{dt}=\frac{d^2y}{dt^2},\quad a_z=\frac{d\upsilon_z}{dt}=\frac{d^2z}{dt^2}. \qquad (1.15)$$

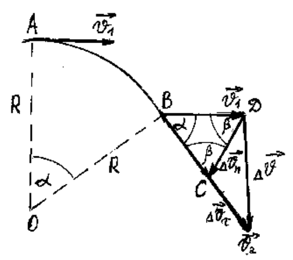


Рис. 1.2.

Коли матеріальна точка рухається по криволінійній траєкторії (рис.1.2), і вектор її швидкості змінюється як за напрямком $\Delta\vec{\upsilon}_n$ так і за модулем $\Delta\vec{\upsilon}_\tau$, то

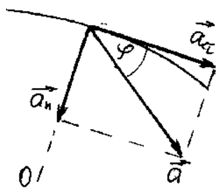
$$\Delta\vec{\upsilon}=\Delta\vec{\upsilon}_n+\Delta\vec{\upsilon}_\tau. \qquad (1.16)$$

Знайдемо миттєве прискорення матеріальної точки, скориставшись формулами (1.12) та (1.16)

$$\vec{a}=\lim_{\Delta t\to 0}\frac{\Delta\vec{\upsilon}_n+\Delta\vec{\upsilon}_\tau}{\Delta t}=\lim_{\Delta t\to 0}\frac{\Delta\vec{\upsilon}_n}{\Delta t}+\lim_{\Delta t\to 0}\frac{\Delta\vec{\upsilon}_\tau}{\Delta t}=\vec{a}_n+\vec{a}_\tau. \qquad (1.17)$$

Отже, повне прискорення рівне сумі нормального $\vec{a}_n$ і тангенціального $\vec{a}_\tau$ прискорень. Нормальне прискорення характеризує зміну швидкості за напрямком і напрямлене вздовж радіуса до центра кривизни траєкторії. Тангенціальне прискорення характеризує зміну швидкості за модулем і напрямлене вздовж дотичної до траєкторії. Числові значення цих прискорень рівні

$$a_\tau = \frac{d\upsilon}{dt} \tag{1.18}$$



та

$$a_n = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta \upsilon_n}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{AB \cdot \upsilon}{\Delta t \cdot R} = \frac{\upsilon}{R} \lim_{\Delta t \to 0} \frac{AB}{\Delta t} = \frac{\upsilon^2}{R}. \tag{1.19}$$

З рис.1.3 маємо

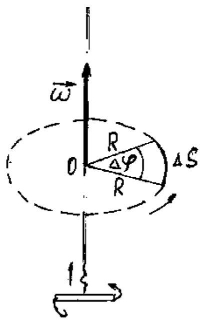
$$a = \sqrt{a_n^2 + a_\tau^2} = \sqrt{(\frac{\upsilon^2}{R})^2 + (\frac{d\upsilon}{dt})^2} \tag{1.20}$$

та

$$tg\varphi = \frac{a_n}{a_\tau}. \tag{1.21}$$

3.Кінематика обертового руху матеріальної точки

Нехай матеріальна точка рухається по коловій траєкторії радіусом R з центром в т.0. За час Δt радіус-вектор точки повернеться на деякий кут $\Delta \varphi$ (рис. 1.4). Кутовою швидкістю називають величину, яка є першою похідною кута повороту радіуса-вектора по часу



$$\omega = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta \varphi}{\Delta t} = \frac{d\varphi}{dt}. \tag{1.22}$$

Кутова швидкість – це вектор, напрям якого визначається за правилом свердлика.

Крім кутової швидкості, рух тіла по колу ще описують лінійною швидкістю, яка рівна відношенню довжини дуги, що її описує кінець радіуса-вектора, до часу, за який вона пройдена.

$$V = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta S}{\Delta t} = \frac{dS}{dt}. \tag{1.23}$$

Рис. 1.4.

Лінійна швидкість напрямлена по дотичній до дуги кола в кожній її точці. При рівномірному русі по колу використовують поняття періода T та частоти ν. Період – це час одного повного оберту, а частота – кількість обертів за одиницю часу. Кутову та лінійну швидкості можна виразити через період або частоту

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi\nu \tag{1.24}$$

та

$$V = \frac{2\pi R}{T} = 2\pi\nu R. \tag{1.25}$$

Звідси $V = \omega \cdot R$ або $\omega = \dfrac{V}{R}$. (1.26)

У векторній формі $\vec{V} = \vec{\omega} \times \vec{R}$ (1.27)

Кутове прискорення ε рівне першій похідній кутової швидкості по часу

$$\varepsilon = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta \omega}{\Delta t} = \frac{d\omega}{dt} = \frac{d^2\varphi}{dt^2}. \qquad (1.28)$$

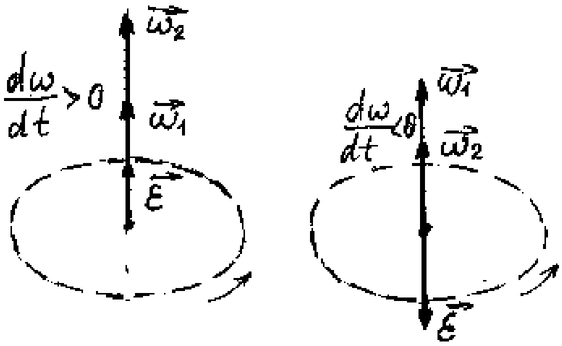
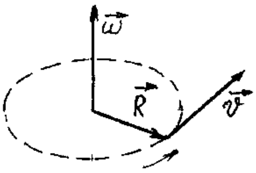


Рис. 1.5.

Вектор кутового прискорення напрямлений вздовж вісі обертання і співпадає з напрямком $\vec{\omega}$, якщо кутова швидкість зростає, і протилежний до напрямку $\vec{\omega}$, якщо кутова швидкість зменшується (рис.1.5).

Продиференціювавши вираз (1.27) по t і пам'ятаючи, що матеріальна точка рухається по колу (рис.1.6), тобто $R = \text{const}$, отримаємо



$$\frac{d\vec{V}}{dt} = \frac{d}{dt}(\vec{\omega} \times \vec{R}) = \frac{d\vec{\omega}}{dt} \times \vec{R} + \vec{\omega} \times \frac{d\vec{R}}{dt} = \vec{\varepsilon} \times \vec{R}$$

Оскільки $\frac{d\vec{V}}{dt} = \vec{a}_\tau$ то $\vec{a}_\tau = \vec{\varepsilon} \times \vec{R}$. (1.29)

Рис. 1.6.

ПИТАННЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЮ

1. Сформулювати основну задачу кінематики.
2. Дати класифікацію руху за видом траєкторії, швидкості руху
3. Відомі проекції швидкості тіла на осі x, y, z, знайти повну швидкість тіла.
4. Які види прискорення існують при рівномірному русі по колу.
5. Дати визначення ступеня свободи тіла. Скільки ступенів свободи має матеріальна точка, тверде тіло.
6. Дати визначення траєкторії, переміщення, шляху.
7. Записати рівняння руху для рівномірного прямолінійного руху.
8. Як за графіком залежності S(t) знайти швидкість тіла у момент часу t_0.
9. Записати співвідношення для визначення нормального та тангенціального прискорень.
10. Записати рівняння руху при рівнозмінному русі тіла по колу.
11. Дати визначення системи відліку, радіуса-вектора.
12. Записати співвідношення для визначення швидкості тіла, що рухається прямолінійно, рівноприскорено (рівноуповільнено) у довільний момент часу.
13. Які види прискорень існують при нерівномірному русі тіла по колу.
14. Записати рівняння руху тіла по колу з постійною швидкістю.
15. Дати визначення механічного руху.
16. Записати рівняння руху для прямолінійного рівноприскореного (рівноуповільненого) руху.
17. Дати визначення поступального руху.
18. Записати зв'язок між лінійними та кутовими характеристиками руху.
19. Як спрямовані тангенціальне та нормальне прискорення тіла.
20. Дати визначення миттєвої швидкості, миттєвого прискореня.
21. Записати рівняння руху тіла в найбільш загальній формі.

Тема 3. Динаміка матеріальної точки.

Інерціальні системи відліку. Інертність, принципи відносності. Перший закон Ньютона. Сила. Основні сили в класичній механіці.

Другий закон Ньютона. Маса. Імпульс. Третій закон Ньютона. Закон збереження імпульсу.

1.Закони динаміки. Поняття маси, сили, імпульсу, імпульсу сили. Інерціальні системи відліку.

Динаміка – це розділ механіки, в якому вивчають механічний рух з врахуванням діючих сил. В основі динаміки лежать закони Ньютона, які є результатом багатовікового досвіду.

Перший закон Ньютона: існують такі системи відліку в яких матеріальна точка (тіло) перебуває в стані спокою або рухається рівномірно і прямолінійно доти, поки дія з боку інших тіл не змусить її змінити цей стан.

Перший закон Ньютона називають законом інерції, а системи відліку, відносно яких виконується даний закон – **інерціальними системами відліку**. Якщо відома хоча б одна інерціальна система відліку, то всі інші системи відліку, які перебувають відносно неї в спокої або рухаються рівномірно і прямолінійно теж будуть інерціальними. Дослідним шляхом встановлено, що інерціальною системою відліку можна вважати систему відліку зв'язану з Сонцем.

Властивість тіла зберігати стан спокою або рівномірного прямолінійного руху без дії на нього інших тіл називають **інертністю**. Фізичну величину, яка є мірою інертності тіла, називають інертною масою. Разом з тим маса тіла характеризує здатність його взаємодіяти з іншими тілами згідно з законом всесвітнього тяжіння. В цьому випадку маса є мірою гравітаційної взаємодії і її називають гравітаційною масою. В сучасній фізиці з високою точністю встановлено, що інертна та гравітаційні маси рівні між собою для швидкостей значно менших від швидкості світла. Отже, **маса** – це міра інертних і гравітаційних властивостей тіла.

Сила – це векторна величина, яка є мірою взаємодії між тілами внаслідок чого тіла отримують прискорення або змінюють свою форму та розміри.

Другий закон Ньютона: прискорення, що його набуває матеріальна точка (тіло), прямо пропорційне рівнодійній всіх діючих сил, співпадає з нею за напрямком і обернено пропорційне масі матеріальної точки (тіла)

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m}. \tag{1.30}$$

При розв'язуванні задач часто використовують таку форму запису:

$$\vec{F} = m\vec{a} = m\frac{d\vec{\upsilon}}{dt} = \frac{d(m\vec{\upsilon})}{dt}. \tag{1.31}$$

Добуток маси матеріальної точки на її швидкість називають імпульсом матеріальної точки

$$\vec{P} = m\vec{\upsilon}\,. \tag{1.32}$$

Підставивши (1.32) в (1.31), отримаємо більш загальний вираз для другого закону Ньютона

$$\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt}\,. \tag{1.33}$$

Останнє співвідношення можна сформулювати так: швидкість зміни імпульсу матеріальної точки рівна рівнодійній всіх діючих на неї сил.

Добуток сили на час її дії називають імпульсом сили. Переписавши (1.33) у вигляді

$$\vec{F}dt = d\vec{P}\,, \tag{1.34}$$

отримаємо: зміна імпульсу тіла рівна імпульсу сили.

Третій закон Ньютона: сили, з якими взаємодіють дві матеріальні точки, рівні за модулем і протилежні за напрямком, діючи вздовж прямої, що з’єднує ці матеріальні точки

$$\vec{F}_{1,2} = -\vec{F}_{2,1}\,. \tag{1.35}$$

де $\vec{F}_{1,2}$ – сила, що діє на перше тіло з боку другого , а $\vec{F}_{2,1}$ – сила, що діє на друге тіло з боку першого.

Ці сили прикладені до різних тіл, тому не врівноважують одна одну. Третій закон динаміки справедливий лише в випадку контактних взаємодій, тобто при безпосередньому дотику та при взаємодії на відстані між нерухомими тілами.

2.Імпульс системи. Закон збереження імпульсу

Розглянемо деяку сукупність матеріальних точок, яку називають механічною системою. Сили, з якими окремі елементи системи взаємодіють між собою, називають внутрішніми силами, а сили, з якими на елементи системи діють зовнішні тіла, називають зовнішніми.

Запишемо другий закон Ньютона у вигляді (1.33) для кожного з n елементів (матеріальних точок) системи

$$\begin{aligned}
&\frac{d\vec{p}_1}{dt} = \vec{f}_{1,2} + \vec{f}_{1,3} + \vec{f}_{1,4} + \ldots + \vec{f}_{1,n} + \vec{F}_1,\\
&\frac{d\vec{p}_2}{dt} = \vec{f}_{2,1} + \vec{f}_{2,3} + \vec{f}_{2,4} + \ldots + \vec{f}_{2,n} + \vec{F}_2,\\
&\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots,\\
&\frac{d\vec{p}_n}{dt} = \vec{f}_{n,1} + \vec{f}_{n,2} + \vec{f}_{n,3} + \ldots + \vec{f}_{n,n-1} + \vec{F}_n,
\end{aligned} \tag{1.36}$$

де $\vec{f}_{ik}$ – внутрішня сила взаємодії *i*-ої та *k*-ої точок системи, $\vec{F}_i$ – сумарна зовнішня сила, що діє на і-ту точку системи.

Знайдемо суму лівих і правих частин рівностей (1.36), врахувавши, що $\vec{f}_{ik} = -\vec{f}_{ki}$

$$\sum_{i=1}^{n} \frac{d\vec{p}_i}{dt} = \sum_{i=1}^{n} \vec{F}_i \quad \text{або} \quad \frac{d}{dt}\sum_{i=1}^{n} \vec{P}_i = \sum_{i=1}^{n} \vec{F}_i . \tag{1.37}$$

Якщо система буде замкнутою, тобто матеріальні точки (елементи) системи взаємодіють тільки між собою, то $\frac{d}{dt}\sum_{i=1}^{n} \vec{P}_i = 0$, а це означає, що

$$\sum_{i=1}^{n} \vec{P}_i = \vec{P}_1 + \vec{P}_2 + \vec{P}_3 + ... + \vec{P}_n = const. \tag{1.38}$$

Отже, в замкнутій системі сума імпульсів всіх матеріальних точок (елементів) системи є величина стала – *закон збереження імпульсу*.

Отримати замкнуту систему важко, але можна досягнути рівності нулю суми проекцій зовнішніх сил на деякий напрям або вісь.

Закон збереження імпульсу справедливий не тільки в класичній механіці, але і для замкнутої системи мікрочастинок. Тому він є фундаментальним законом природи. Він є наслідком властивості симетрії простору – його однорідності.

3.Центр мас (інерції) системи. Закон руху центра мас

При розгляді руху тіл інколи використовують поняття центра мас. Центром мас називають таку уявну точку, радіус-вектор якої визначається як

$$\vec{r}_c = \frac{\sum_{i=1}^{n} m_i \vec{r}_i}{\sum_{i=1}^{n} m_i} = \frac{1}{M}\sum_{i=1}^{n} m_i \vec{r}_i . \tag{1.39}$$

Переписавши останній вираз у вигляді $M\vec{r}_c = \sum_{i=1}^{n} m_i \vec{r}_i$, продиференціюємо його по часу

$$M\frac{d\vec{r}_c}{dt} = \frac{d}{dt}\sum_{i=1}^{n} m_i \vec{r}_i , \quad \text{або} \quad M\vec{V}_c = \sum_{i=1}^{n} \vec{P}_i$$

Отриманий результат продиференціюємо ще раз

$$M\vec{a}_c = \frac{d}{dt}\sum_{i=1}^{n} \vec{P}_i = \vec{F} . \tag{1.40}$$

Отже, центр мас системи рухається так, як матеріальна точка, в якій зосереджена вся маса системи, і на яку діє рівнодійна всіх зовнішніх сил. В замкнутій системі центр мас буде рухатись рівномірно і прямолінійно або перебувати в стані спокою. Це означає, що внутрішні сили не можуть змінити положення центра мас.

У випадку однорідного гравітаційного поля центр мас системи співпадає з центром тяжіння.

4.Межі застосування класичного опису частинок

В класичній механіці стан матеріальної точки в будь-який момент часу характеризується її розташуванням (координатами) та швидкістю. Замість швидкості можна використовувати імпульс. Образом матеріальної точки є геометрична точка, яка описує з часом неперервну траєкторію. В квантовій механіці такий спосіб опису руху має принципові межі застосування: стан частинки в кожний момент часу не можна характеризувати точними значеннями координати та імпульсу. Якщо в деякий момент часу координата визначається з невизначеністю δx, а імпульс з невизначеністю δp, то обидві величини одночасно не можуть бути визначені так, щоб їх невизначеності бути як завгодно малими, вони пов'язані між собою співвідношенням

$$\delta x \cdot \delta p_x \geq h, \tag{1.41}$$

де h – стала Планка. Цей вираз називають співвідношенням невизначеності Гейзенберга. Воно визначає межу точності одночасного вимірювання координати та імпульсу, яка не може бути перевершена ніяким вдосконаленням приладів і методів спостереження.

Класична картина руху по неперервних траєкторіях лише приблизно відображає закони природи. Межі застосування визначаються співвідношеннями невизначеностей. Для макроскопічних тіл застосування класичного способу опису руху не викликає сумніву. Зовсім по іншому ведуть себе мікрочастинки. Отже, класична механіка – це механіка великих мас та малих швидкостей.

5.Основний закон динаміки поступального руху твердого тіла

Твердим тілом називають таке тіло, віддалі між будь-якими двома його точками залишаються незмінними.

Тверде тіло – це система з шістьма ступенями вільності і для опису його руху потрібно шість незалежних рівнянь які можна замінити двома незалежними векторними рівняннями одне з яких стосується поступального руху а інше – обертального. Будь-який рух твердого тіла може бути представлений як накладання двох рухів: поступального та обертального.

Подумки розділимо тіло на велике число частин, кожну з яких можна вважати матеріальною точкою і для кожної з них запишемо другий закон Ньютона

$$m_i \frac{d\vec{\upsilon}}{dt} = \vec{F}_i + \vec{f}_i \tag{1.42}$$

де $\vec{F}_i$ – зовнішня сила, $\vec{f}_i$ – внутрішня сила що діє на і-ту матеріальну точку, υ - швидкість поступального руху тіла.

Знайдемо суму всіх рівнянь для всіх точок тіла, врахувавши, що сума всіх внутрішніх сил $\vec{f}_i$ рівна нулю

$$\sum m_i \frac{d\vec{\upsilon}}{dt} = \sum \vec{F}_i \ . \tag{1.43}$$

Останнє рівняння – це рівняння руху центра мас

$$m \frac{d\vec{\upsilon}_c}{dt} = \vec{F}_{\text{зовн}}, \tag{1.44}$$

де m – маса тіла, $\vec{F}_{\text{зовн}}$ – рівнодійна всіх зовнішніх сил.

Отже, при поступальному русі центр мас твердого тіла рухається так, як би рухалась матеріальна точка з масою, рівною масі тіла, під дією всіх прикладених до тіла сил. Рівняння (1.44) є основним рівнянням динаміки поступального руху твердого тіла.

ПИТАННЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЮ

1. Дати математичне визначення кутової швидкості, кутового прискорення.
2. Які системи відліку називаються інерційними.
3. Що таке маса.
4. Записати вираз для визначення сили тертя ковзання, дати визначення величин, що входять у співвідношення.
5. Скільки інерційних систем існує у природі? Які це системи?
6. Записати другий закон Ньютона у найбільш загальній формі.
7. Дати визначення сили тяжіння.
8. Якими причинами обумовлена сила тертя.
9. Сформулювати перший закон Ньютона.
10. Нарисувати три довільно розташовані сили. Знайти їх рівнодійну.
11. Чим відрізняються сила тяжіння та вага тіла.
12. Сформулювати другий закон Ньютона.
13. Записати і дати формулювання закону всесвітнього тяжіння.
14. З яких складових складається сила опору середовища.
15. Записати вираз для визначення положення центру мас системи матеріальних точок.
16. Зобразити залежність сили тертя від швидкості ковзання.
17. Дати визначення сили.
18. Сформулювати третій закон Ньютона.
19. Що таке вага?
20. У якому випадку справедливий закон збереження імпульсу?
21. Записати закон збереження імпульсу та дати його формулювання.
22. Чому дорівнює сила тертя спокою у випадку в'язкого тертя?

Тема 4. Основи небесної механіки. Основи теорії тяжіння.

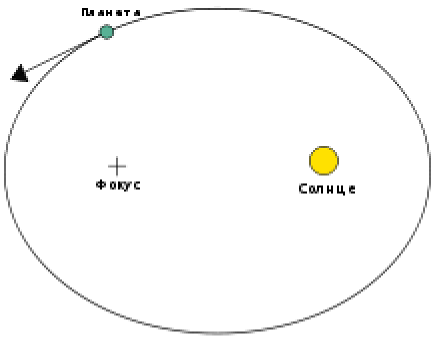
Закони Кеплера. Сонячна система.

Закон всесвітнього тяжіння. Гравітаційні сили. Гравітаційна і інертна маси, їх еквівалентність. Чорні діри.

1.Закони Кеплера

Закони Кеплера - три емпіричних співвідношення, інтуїтивно виведених Іоганном Кеплером на основі аналізу астрономічних спостережень Тихо Браге. Описують ідеалізовану геліоцентричну орбіту планети. У рамках класичної механіки виводяться з рішення задачі двох тіл граничним переходом $m_p / m_S \to 0$, де m_p, m_S - Маси планети і Сонця.

Перший закон Кеплера (закон еліпсів)



Перший закон Кеплера:

Кожна планета Сонячної системи обертається по еліпсу, в одному з фокусів якого знаходиться Сонце.

Форма еліпса і ступінь його подібності з колом характеризується відношенням $e = \frac{c}{a}$, Де c - Відстань від центру еліпса до його фокусу (половина міжфокусної відстані), a - велика піввісь. Величина e називається ексцентриситетом еліпса. При $c=0$ і $e=0$ еліпс перетворюється в коло.

Доведення першого закону Кеплера

Закон всесвітнього тяжіння Ньютона говорить, що "кожен об'єкт у Всесвіті притягує кожен другий об'єкт по лінії, що з'єднує центри мас об'єктів, пропорційно масі кожного об'єкта, і обернено пропорційно квадрату відстані між об'єктами". Це передбачає, що прискорення **a** має вигляд:

$$\mathbf{a} = \frac{d^2\mathbf{r}}{dt^2} = f(r)\hat{\mathbf{r}}.$$

Згадаймо, що в полярних координатах

$$\frac{d\mathbf{r}}{dt} = \dot{r}\hat{\mathbf{r}} + r\dot{\theta}\hat{\boldsymbol{\theta}},$$

$$\frac{d^2\mathbf{r}}{dt^2} = (\ddot{r} - r\dot{\theta}^2)\hat{\mathbf{r}} + (r\ddot{\theta} + 2\dot{r}\dot{\theta})\hat{\boldsymbol{\theta}}.$$

В координатній формі запишемо:

$$\ddot{r} - r\dot{\theta}^2 = f(r),$$
$$r\ddot{\theta} + 2\dot{r}\dot{\theta} = 0.$$

Підставляючи $\ddot{\theta}$ і $\dot{r}$ у друге рівняння, одержимо:

$$r\frac{d\dot{\theta}}{dt} + 2\frac{dr}{dt}\dot{\theta} = 0,$$

яке спрощується до вигляду:

$$\frac{d\dot{\theta}}{\dot{\theta}} = -2\frac{dr}{r}.$$

Після інтегрування запишемо вираз

$$\ln\dot{\theta} = -2\ln r + \ln\ell,$$
$$\ln\ell = \ln r^2 + \ln\dot{\theta},$$
$$\ell = r^2\dot{\theta},$$

для деякої константи ℓ, яка є кутовим моментом ($\ell = \mathbf{r} \times \mathbf{v}$).

Нехай

$$r = \frac{1}{u},$$

Тоді

$$\dot{r} = -\frac{1}{u^2}\dot{u} = -\frac{1}{u^2}\frac{d\theta}{dt}\frac{du}{d\theta} = -\ell\frac{du}{d\theta},$$
$$\ddot{r} = -\ell\frac{d}{dt}\frac{du}{d\theta} = -\ell\dot{\theta}\frac{d^2u}{d\theta^2} = -\ell^2u^2\frac{d^2u}{d\theta^2}.$$

Рівняння руху в напрямку $\hat{\mathbf{r}}$ стає рівним:

$$\frac{d^2u}{d\theta^2} + u = -\frac{1}{\ell^2u^2}f\left(\frac{1}{u}\right).$$

Закон всесвітнього тяжіння Ньютона пов'язує силу на одиницю маси з відстанню як:

$$f\left(\frac{1}{u}\right) = f(r) = -\frac{GM}{r^2} = -GMu^2$$

де G - універсальна гравітаційна константа і M - маса зірки.

В результаті

$$\frac{d^2u}{d\theta^2} + u = \frac{GM}{\ell^2}.$$

Це диференціальне рівняння має спільне рішення:

$$u = \frac{GM}{\ell^2}\left[1 + e\cos(\theta - \theta_0)\right].$$

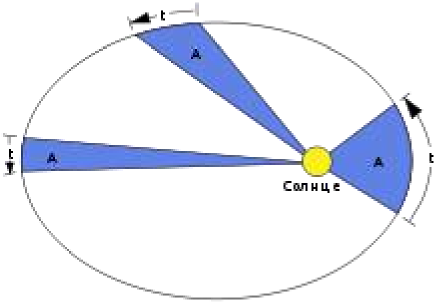
для довільних констант інтегрування e і θ_0.

Замінюючи u на $1 / r$ і вважаючи $\theta_0 = 0$, отримаємо:

$$r = \frac{1}{u} = \frac{\ell^2/GM}{1 + e\cos\theta}.$$

Ми маємо рівняння конічного перетину з ексцентриситетом e і початком системи координат в одному з фокусів. Таким чином, перший закон Кеплера прямо випливає із закону всесвітнього тяжіння Ньютона і другого закону Ньютона.

Другий закон Кеплера (закон площ)



Другий закон Кеплера:

Кожна планета рухається в площині, що проходить через центр Сонця, причому за рівні проміжки часу радіус-вектор, що з'єднує Сонце і планету, описує рівні площі.

Стосовно нашої Сонячної системи з цим законом пов'язані два поняття: **перигелій** - найближча до Сонця точка орбіти, і **афелій** - найбільш віддалена точка орбіти. Таким чином, з другого закону Кеплера випливає, що планета рухається навколо Сонця нерівномірно, маючи в перигелії більшу лінійну швидкість, ніж в афелії.

Щороку на початку січня Земля, проходячи через перигелій, рухається швидше, тому видиме переміщення Сонця по екліптиці на схід також відбувається швидше, ніж у середньому за рік. На початку липня Земля, проходячи афелій, рухається повільніше, тому і переміщення Сонця по екліптиці сповільнюється. Закон площ вказує, що сила, керуюча орбітальним рухом планет, спрямована до Сонця.

Доведення другого закону Кеплера.

За визначенням, кутовий момент $\mathbf{L}$ точкової частинки з масою m і швидкістю $\mathbf{v}$ записується у вигляді:

$$\mathbf{L} \stackrel{\mathrm{def}}{=} \mathbf{r} \times \mathbf{p} = \mathbf{r} \times (m\mathbf{v}).$$

де $\mathbf{r}$ - Радіус-вектор частинки а $\mathbf{p} = m\mathbf{v}$ - Імпульс частинки. Площа, яку описує радіус-вектор $\mathbf{r}$ за час dt, з геометричних міркувань дорівнює $dS = r\sin\theta v dt = |\mathbf{r} \times \mathbf{v}|dt = (|\mathbf{L}|/m)dt$,

Де θ являє собою кут між напрямками $\mathbf{r}$ і $\mathbf{v}$.

За визначенням:

$$\mathbf{v} = \frac{d\mathbf{r}}{dt}.$$

У результаті ми маємо

$$\mathbf{L} = \mathbf{r} \times m\frac{d\mathbf{r}}{dt}.$$

Продифференціюємо обі частини рівняння за часом:

$$\frac{d\mathbf{L}}{dt} = (\mathbf{r} \times \mathbf{F}) + \left(\frac{d\mathbf{r}}{dt} \times m\frac{d\mathbf{r}}{dt}\right) = (\mathbf{r} \times \mathbf{F}) + (\mathbf{v} \times \mathbf{p}) = 0$$

оскільки векторний добуток паралельних векторів дорівнює нулю. Зауважимо, що **F** завжди паралельний **r,** оскільки сила радіальна, і **p** завжди паралельний **v** за визначенням. Таким чином, можна стверджувати, що $|\mathbf{L}|$, а отже і пропорційна їй швидкість описування вектором площі $\frac{dS}{dt}$ - константа.

Третій закон Кеплера (гармонійний закон)

Квадрати періодів обертання планет навколо Сонця відносяться як куби великих півосей орбіт планет.

Справедливо не тільки для планет, але й для їх супутників.

$$\frac{T_1^2}{T_2^2} = \frac{a_1^3}{a_2^3},$$

Де T_1 і T_2 - періоди обертання двох планет навколо Сонця, а a_1 і a_2 - довжини великих півосей їхніх орбіт.

Ньютон встановив, що гравітаційне тяжіння планети певної маси залежить тільки від відстані до неї, а не від інших властивостей, таких як склад чи температура. Він показав також, що третій закон Кеплера не зовсім точний - насправді в нього входить і маса планети:

$$\frac{T_1^2(M+m_1)}{T_2^2(M+m_2)} = \frac{a_1^3}{a_2^3},$$

де M - маса Сонця, а m_1 і m_2 - маси планет.

Оскільки рух і маса виявилися пов'язані, цю комбінацію гармонійного закону Кеплера і закону тяжіння Ньютона використовують для визначення маси планет і супутників, якщо відомі їх орбіти і орбітальні періоди.

Доведення третього закону Кеплера

Другий закон Кеплера стверджує, що радіус-вектор тіла, що обертається, описує рівні площі за рівні проміжки часу. Якщо тепер ми візьмемо дуже малі проміжки часу в момент, коли планета перебуває в точках A і B (перигелій і афелій), то ми зможемо апроксимувати площу трикутниками з висотами, рівними відстані від планети до Сонця, і підстановкою, рівною добутку швидкості планети на час.

$$\tfrac{1}{2}\cdot(1-\epsilon)a\cdot V_A\,dt = \tfrac{1}{2}\cdot(1+\epsilon)a\cdot V_B\,dt$$

$$(1-\epsilon)\cdot V_A = (1+\epsilon)\cdot V_B$$

$$V_A = V_B\cdot\frac{1+\epsilon}{1-\epsilon}$$

Використовуючи закон збереження енергії для повної енергії планети в точках A і B, запишемо

$$\frac{mV_A^2}{2} - \frac{GmM}{(1-\epsilon)a} = \frac{mV_B^2}{2} - \frac{GmM}{(1+\epsilon)a}$$

$$\frac{V_A^2}{2} - \frac{V_B^2}{2} = \frac{GM}{(1-\epsilon)a} - \frac{GM}{(1+\epsilon)a}$$

$$\frac{V_A^2 - V_B^2}{2} = \frac{GM}{a}\cdot\left(\frac{1}{(1-\epsilon)} - \frac{1}{(1+\epsilon)}\right)$$

$$\frac{\left(V_B\cdot\frac{1+\epsilon}{1-\epsilon}\right)^2 - V_B^2}{2} = \frac{GM}{a}\cdot\left(\frac{1+\epsilon-1+\epsilon}{(1-\epsilon)(1+\epsilon)}\right)$$

$$V_B^2\cdot\left(\frac{1+\epsilon}{1-\epsilon}\right)^2 - V_B^2 = \frac{2GM}{a}\cdot\left(\frac{2\epsilon}{(1-\epsilon)(1+\epsilon)}\right)$$

$$V_B^2\cdot\left(\frac{(1+\epsilon)^2-(1-\epsilon)^2}{(1-\epsilon)^2}\right) = \frac{4GM\epsilon}{a\cdot(1-\epsilon)(1+\epsilon)}$$

$$V_B^2 \cdot \left(\frac{1+2\epsilon+\epsilon^2-1+2\epsilon-\epsilon^2}{(1-\epsilon)^2}\right) = \frac{4GM\epsilon}{a\cdot(1-\epsilon)(1+\epsilon)}$$

$$V_B^2 \cdot 4\epsilon = \frac{4GM\epsilon\cdot(1-\epsilon)^2}{a\cdot(1-\epsilon)(1+\epsilon)}$$

$$V_B = \sqrt{\frac{GM\cdot(1-\epsilon)}{a\cdot(1+\epsilon)}}.$$

Тепер, коли ми знайшли V_B, ми можемо знайти секторіальну швидкість. Оскільки вона стала, то можемо вибрати будь-яку точку еліпса: наприклад, для точки B отримаємо:

$$\frac{dA}{dt} = \frac{\frac{1}{2}\cdot(1+\epsilon)a\cdot V_B\,dt}{dt} = \tfrac{1}{2}\cdot(1+\epsilon)a\cdot V_B$$

$$= \tfrac{1}{2}\cdot(1+\epsilon)a\cdot\sqrt{\frac{GM\cdot(1-\epsilon)}{a\cdot(1+\epsilon)}} = \tfrac{1}{2}\cdot\sqrt{GMa\cdot(1-\epsilon)(1+\epsilon)}$$

Однак повна площа еліпса дорівнює $\pi a\sqrt{(1-\epsilon^2)}a$ (що дорівнює $\pi a b$, Оскільки $b = \sqrt{(1-\epsilon^2)}a$).

Час повного обороту, таким чином, запишемо у вигляді:

$$T\cdot\frac{dA}{dt} = \pi a\sqrt{(1-\epsilon^2)}a$$

$$T\cdot\tfrac{1}{2}\cdot\sqrt{GMa\cdot(1-\epsilon)(1+\epsilon)} = \pi\sqrt{(1-\epsilon^2)}a^2$$

$$T = \frac{2\pi\sqrt{(1-\epsilon^2)}a^2}{\sqrt{GMa\cdot(1-\epsilon)(1+\epsilon)}} = \frac{2\pi a^2}{\sqrt{GMa}} = \frac{2\pi}{\sqrt{GM}}\sqrt{a^3}$$

$$T^2 = \frac{4\pi^2}{GM}a^3.$$

Зауважимо, що якщо масою m НЕ можна нехтувати в порівнянні з M, то планета буде обертатися навколо Сонця з тією ж швидкістю і по тій самій орбіті, що і матеріальна точка, що обертається навколо маси $M + m$ (див. приведена маса). При цьому масу M в останній формулі потрібно замінити на $M + m$:

$$T^2 = \frac{4\pi^2}{G(M+m)}a^3.$$

Тема для дискусії

Як зміниться клімат Землі, якщо ексцентриситет земної орбіти буде дорівнювати 0,5, а велика піввісь залишиться такою, як зараз? Вважати, що кут нахилу осі обертання до площини екліптики залишиться 66,5°.

Завдання для спостереження

Визначте за допомогою астрономічного календаря, яка планета Сонячної системи розташовується найближче до Землі 10 березня поточного року. У якому сузір'ї її можна побачити сьогодні вночі?

ПИТАННЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЮ

1. Сформулюйте перший закон Кеплера. Що розташоване у фокусі орбіт планет? А супутників?
2. Дайте визначення перигелію та афелію. Якої швидкості набуває планета, проходячи ці точки орбіти?
3. У чому полягає наслідок другого закону Кеплера? У якій півкулі Землі тепла пора року триваліша за холодну?
4. Чому третій закон Кеплера є одним із найважливіших для розвитку космонавтики?
5. У скільки разів афелійна відстань більша перигелійної відстані, якщо ексцентрисетет орбіти дорівнює 0,5?
6. Чи змінюється швидкість планети, що рухається по еліптичниій орбіті? коловій орбіті?

Тема 6. Основи теорії пружності. Тертя. Елементи гідродинаміки.

Пружні сили. Деформації, межа пружності. Розтягування, стиснення, зсув. Закон Гука. Модулі Юнга і зсуву.

Сили тертя спокою, ковзання і кочення. Рух рідини. Рівняння Бернуллі. Внутрішнє тертя. В'язкість. Закон Стокса. Числа Рейнольдса.

1.Гідростатика нестисливої рідини. Закон Паскаля. Гідростатичний тиск. Закон Архімеда

Розділ фізики, в якому вивчають закони рівноваги та руху рідких та газоподібних тіл та їх взаємодію з твердими тілами називають гідроаеромеханікою. Рідини і гази розглядаються як суцільне середовище, що рівномірно заповнює деякий об'єм. Нестисливою рідиною називають таку рідину, густина якої не залежить від зовнішнього тиску.

Взаємодія окремих шарів газу або рідини між собою або з твердим тілом визначається тиском. Тиск – це скалярна величина, яка рівна нормальній складовій сили, яка діє на одиницю площі

$$P = \frac{\Delta F}{\Delta S}. \tag{1.98}$$

Тиск вимірюється в паскалях (Па). Один паскаль – це тиск, який створюється силою в 1Н, що діє нормально до площадки 1м^2.

У випадку рівноваги тиск рідин та газів підлягає закону Паскаля: тиск у всіх частинах об'єму рідини або газу однаковий і без змін передається у всі точки об'єму.

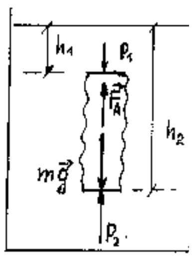


Рис.1.20

Якщо рідина густиною ρ перебуває в полі сили тяжіння, то на деякій глибині h тиск буде рівний сумі деякого зовнішнього тиску P_0 та *гідростатичного* – ρgh (рис. 1.20).

$$P = P_0 + \rho gh. \tag{1.99}$$

Завдяки різниці тисків на верхню та нижню поверхні тіла, що занурене в рідину або газ (Рис.1.20), виникає сила Архімеда, яка напрямлена вертикально вгору, прикладена в центрі тяжіння витисненої рідини або газу і чисельно рівна вазі витисненої рідини або газу

$$F_A = \rho_p g V_p, \tag{1.100}$$

де ρ_p – густина рідини або газу, V_p – об'єм витисненої рідини або газу.

2.Рух ідеальної рідини. Рівняння нерозривності. Рівняння Бернуллі

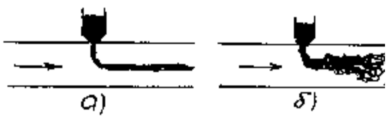


Рис.1.21

Щоб описати рух частинок рідини або газу можна для кожної точки простору задати вектор швидкості як функцію часу. Сукупність векторів υ, заданих для всіх точок простору, утворює поле вектора швидкості. Якщо провести лінії, дотичні до яких співпадають з напрямком вектора швидкості в кожній точці, то ми отримаємо лінії течії. Поверхню, утворену лініями течії, що проведені через усі точки малого замкнутого контура, називають трубкою течії.

Розрізняють ламінарну або шарувату течію та турбулентну. Ламінарною називають течію, в якій окремі шари при своєму русі не перемішуються (Рис.1.21а). В турбулентній течії відбувається перемішування окремих шарів, утворення завихрень в результаті виникнення нормальної (поперечної) складової швидкості (Рис.1.21б).

В реальних рідинах між окремими шарами рідини виникають сили в'язкого (внутрішнього) тертя. В окремих випадках вплив внутрішнього тертя невеликий і ним можна знехтувати. Абсолютно нестисливу і нев'язку рідину називають ідеальною.

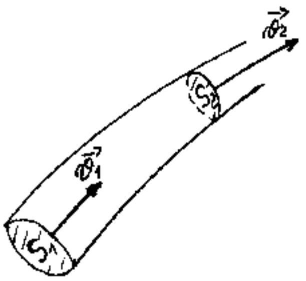


Рис.1.22

Розглянемо трубку течії, настільки тонку, що в кожному її перерізі швидкість можна вважати однаковою у всіх точках перерізу (Рис.1.22). Можна показати, що

$$S_1\upsilon_1 = S_2\upsilon_2$$

або

$$S\upsilon = \text{const} \quad . \tag{1.101}$$

Рівняння (1.101) називають рівнянням нерозривності, з якого слідує, що чим більша площа перерізу трубки течії, тим менша швидкість течії і навпаки.

Коли рідина рухається по трубі змінного перерізу і різної висоти (рис. 1.23), то для деякого її об'єму змінюється як кінетична так і потенціальна енергії об'єму рідини. Ця зміна обумовлена дією деяких зовнішніх сил, робота яких рівна зміні потенціальної і кінетичної енергії рідини

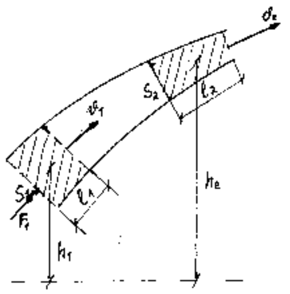


Рис.1.23

$$A = \Delta\, W\text{к} + \Delta\, W\text{п} .$$

Після підстановок і перетворень в лівій та правій частинах останнього співвідношення отримаємо вираз

$$\frac{\rho\upsilon_1^2}{2} + \rho g h_1 + p_1 = \frac{\rho\upsilon_2^2}{2} + \rho g h_2 + p_2 \tag{1.102}$$

або для довільного перерізу

$$\frac{\rho\upsilon^2}{2} + \rho g h + p = \text{const}, \tag{1.103}$$

де $\frac{\rho\upsilon^2}{2}$ – динамічний тиск, $\rho g h$ – гідростатичний тиск, p – статичний тиск.

Рівняння (1.103) вивів Бернуллі і воно носить його ім'я. Це рівняння виражає закон збереження енергії при стаціонарній течії ідеальної рідини. Для горизонтальної трубки течії $h_1 = h_2$ і рівняння Бернуллі приймає вигляд

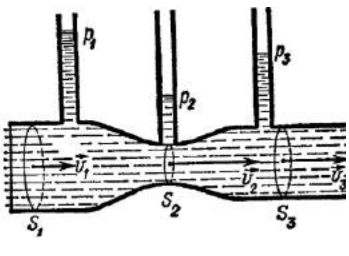


Рис.1.24

$$p + \frac{\rho\upsilon^2}{2} = \text{const} . \tag{1.104}$$

Звідси випливає, що в тих місцях труби, де більша швидкість течії, тиск буде меншим і навпаки (Рис.1.24). Якщо рідину налити в посудину площею перерізу S_1, в бічній поверхні якої є отвір площею S_2, то швидкість витікання рідини через отвір S_2 визначається за формулою Торічеллі

$$\upsilon = \sqrt{2g(h_1 - h_2)}. \tag{1.105}$$

Струмінь води, що витікає з бічного отвору посудини створює реактивну тягу, і якщо посудину поставити на візок, то останній почне рухатись разом з посудиною під дією цієї сили

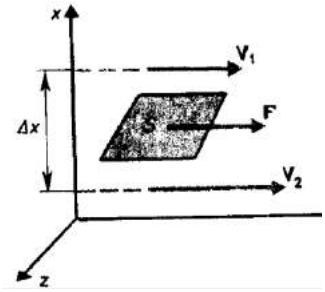
$$F_{\text{реакт.}} = 2\rho g h \cdot S_2. \tag{1.106}$$

3.Гідродинаміка в'язкої рідини. Сила Стокса

Для всіх реальних рідин в тій чи іншій мірі властиве внутрішнє тертя або в'язкість, що проявляється в протидії при переміщенні одного шару рідини (газу) відносно іншого. Змінюючи швидкість υ руху верхньої пластини (рис. 1.25), можна експериментально встановити співвідношення

$$F = \eta \left|\frac{d\upsilon}{dz}\right| S\ , \tag{1.107}$$

де η – в'язкість (динамічна в'язкість) рівний силі в'язкого тертя, яке виникає при градієнті швидкості 1м/с на 1м, на поверхні 1м^2 $([\eta] = \text{Па}\cdot\text{с})$, $\frac{d\upsilon}{dz}$ - градієнт швидкості, S – площа шару рідини.



Коефіцієнт в'язкості залежить від температури, причому для рідин він зменшується з підвищенням температури, а для газів - збільшується, що вказує на різний механізм внутрішнього тертя в рідинах і газах.

При рівномірному русі у в'язкому середовищі тіл кулястої форми сила в'язкого тертя визначається за формулою Стокса

$$F = 6\pi r \eta \upsilon, \tag{1.121}$$

де r – радіус тіла, η – коефіцієнт в'язкого тертя, υ – швидкість руху тіла кулястої форми у в'язкому середовищі.

ПИТАННЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЮ

1. Які типи деформацій бувають?
2. За якими характеристиками поділяються тверді тіла?
3. Записати закон Гука в загальному випадку.
4. Який фізичний зміст модуля Юнга?
5. Записати закон Гука для пружини.
6. Записати закон Гука для стержня.
7. Дати визначення лінії потоку.
8. Сформулювати та записати математично теорему про неперервність струменя.
9. Сформулювати закон Бернуллі.
10. Записати вираз для визначення реакції рідини, що витікає з посудини. Назвати всі фізичні величини, які входять до цього виразу.
11. Дати пояснення фізичного змісту коефіцієнта Рейнольда.
12. Дати визначення трубки струменю.
13. Визначити у якому перерізі трубки струму швидкість течії більша.
14. Зобразити трубку Піто, зонд, трубку Піто-Прандтля.
15. Яка течія називається ламінарною, турбулентною?
16. Записати формулу Пуазейля, назвати фізичні величини, що входять до цього виразу.
17. Яка течія рідини називається стаціонарною, нестаціонарною?
18. Діаметр трубки струму у перерізі А у два рази більший, ніж у перерізі В. Визначити: у якому перерізі та в скільки разів швидкість течії рідини більша.
19. Який тиск вимірює трубка Піто, Піто-Прандтля, зонд?
20. Записати співвідношення для сили Стокса, пояснити величини, що входять до цього виразу.
21. Дати визначення нестисливої рідини.
22. Швидкість течії рідини у перерізі А у дев'ять разів більша, ніж у перерізі В. У скільки разів діаметр трубки у перерізі А відрізняється від діаметру у перерізі В?
23. З яких складових складається повний тиск у рідинах?

24. Записати вираз для визначення модуля сили внутрішнього тертя. Назвати всі фізичні величини, які входять до цього виразу.
25. Зобразити сили, які діють на тіло несиметричної форми, що рухається у рідині.
26. Визначити напрямок течії рідини у точках M, N.
27. Записати рівняння Бернулі для загального випадку течії рідини.
28. З якою швидкістю витікає рідина з малого отвору у дні посудини висотою 8 м.
29. Зобразити профіль швидкостей у перерізі труби з рідиною, якщо рідина тече ламінарно, турбулентно.
30. Записати вираз для числа Рейнольдса; назвати всі фізичні величини , що входять до цього співвідношення.

Тема 7. Неінерціальні системи відліку. Рух тіла зі змінною масою.

Неінерціальні системи відліку. Сили інерції. Перевантаження. Відцентрова сила інерції. Залежність ваги тіла від широти місцевості. Центрифуги і їх застосування в наукових дослідженнях. Сила Коріоліса.

Рух тіла з змінної масою. Реактивний рух; рівняння Мещерського; формула Ціолковського.

1.Інерціальні системи відліку. Механічний принцип відносності

Інерціальними називаються системи відліку, відносно яких виконується перший закон Ньютона. Дослідження показують, що інерціальною є система відліку зв'язана з центром Сонця (геліоцентрична система). Система відліку зв'язана з центром мас замкнутої системи тіл (за законом збереження імпульсу) також інерціальна. Всі інші системи відліку, які рухаються відносно них прямолінійно і рівномірно будуть інерціальними. Розглянемо питання про справедливість законів Ньютона в інерціальних системах відліку.

Очевидно, що перший закон Ньютона в інерціальних системах відліку. виконується, бо саме формулювання першого закону Ньютона розглядають як означення інерціальної системи відліку.

Повернемося до векторної рівності $\vec{r}' = \vec{r} - \vec{u}t$. Візьмемо похідну по часу від обох частин цієї рівності, враховуючи, що $\vec{u} = const$

$$\frac{d\vec{r}'}{dt} = \frac{d\vec{r}}{dt} - \vec{u}.$$

Звідки

$$\vec{\upsilon}' = \vec{\upsilon} - \vec{u}. \tag{1.73}$$

Зауважимо, що формулу (1.73) називають правилом додавання швидкостей в класичній механіці. Із (1.73) бачимо, що швидкість $\vec{\upsilon}'$ залежить від швидкості $\vec{u}$, тобто швидкість тіла в різних інерціальних системах відліку різна; швидкість відносна.

Візьмемо похідну по часу від обох частин рівності (1.73)

$$\frac{d\vec{\upsilon}'}{dt} = \frac{d\vec{\upsilon}}{dt}.$$

Звідки

$$\vec{a}' = \vec{a}. \tag{1.74}$$

Отже, прискорення тіла в різних інерціальних системах відліку однакове; прискорення абсолютне.

Сили взаємодії між тілами залежать від взаємного розміщення тіл і від їх відносної швидкості. Із того, що $\vec{r}' = \vec{r} - \vec{u}t$ і $\vec{\upsilon}' = \vec{\upsilon} - \vec{u}$ маємо

$$\vec{r}_2' - \vec{r}_1' = \vec{r}_2 - \vec{u}t - (\vec{r}_1 - \vec{u}t) = \vec{r}_2 - \vec{r}_1$$
$$\vec{\upsilon}_2' - \vec{\upsilon}_1' = \vec{\upsilon}_2 - \vec{u} - (\vec{\upsilon}_1 - \vec{u}) = \vec{\upsilon}_2 - \vec{\upsilon}_1.$$

Бачимо, що взаємне розміщення тіл і їх відносна швидкість в обох системах відліку однакові. Отже, сили взаємодії між тілами в різних інерціальних системах відліку однакові, тобто

$$\vec{F}' = \vec{F}. \tag{1.75}$$

Із (1.74) і (1.75) слідує, що рівняння другого і третього законів Ньютона у системі відліку K' матимуть вигляд

$$m'\vec{a}' = \vec{F}'; \vec{F}_{12}' = -\vec{F}_{21}'.$$

Маса також однакова у всіх інерціальних системах відліку.

Таким чином, вигляд рівнянь законів Ньютона не змінюється при переході від однієї інерціальної системи відліку до іншої, тобто вони є інваріантними відносно перетворень координат Галілея.

Із інваріантності законів Ньютона і інших законів (таких як закон збереження імпульсу, закон збереження енергії) можна зробити такий важливий висновок: у всіх інерціальних системах відліку всі механічні явища при одних і тих же умовах протікають однаково. Це твердження носить назву механічного принципу відносності.

На практиці механічний принцип відносності проявляється, наприклад, в тому, що пасажир у вагоні із закритими вікнами не зможе встановити чи вагон знаходиться в стані спокою, чи в стані прямолінійного і рівномірного руху.

2.Неінерціальні системи відліку. Сили інерції

Неінерціальними називаються системи відліку, які рухаються з деяким прискоренням відносно інерціальних. Наприклад, в задачах про рух тіл на поверхні Землі користуються системами відліку пов'язаними з поверхнею Землі. Такі системи відліку неінерціальні, бо Земля здійснює добове обертання.

З'ясуємо питання про справедливість законів Ньютона в неінерціальних системах відліку. Для цього розглянемо дві системи відліку: інерціальну (K) і неінерціальну (K').

Повернемось до векторної рівності $\vec{r}' = \vec{r} - \vec{r}_0$. Взявши від цієї рівності другу похідну по часу, отримуємо

$$\frac{d^2\vec{r}'}{dt^2} = \frac{d^2\vec{r}}{dt^2} - \frac{d^2\vec{r}_0}{dt^2}.$$

Звідки

$$\vec{a}' = \vec{a} - \vec{w},$$

де $\vec{w}$ – прискорення неінерціальної системи відліку.

Нехай на тіло з боку інших тіл діє сила $\vec{F}$. За другим законом Ньютона прискорення тіла в інерціальній системі відліку

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

Тоді

$$\vec{a}' = \frac{\vec{F}}{m} - \vec{w}, \text{ або } m\vec{a}' = \vec{F} - m\vec{w}. \qquad (1.76)$$

Проведемо аналіз рівняння (1.76). Бачимо, що при $\vec{F} = 0$ прискорення $\vec{a}' \neq 0$. Отже, в неінерціальних системах відліку перший закон Ньютона не виконується.

Із рівняння (1.76) бачимо також, що $\vec{a}' \neq \frac{\vec{F}}{m}$, а другий закон Ньютона вимагає, щоб прискорення тіла було рівним $\frac{\vec{F}}{m}$. Отже, в неінерціальних системах відліку другий закон Ньютона не виконується.

При $\vec{F} = 0$ тіло рухається так ніби на нього діє сила, що дорівнює $-m\vec{w}$. Силу $\vec{F}_{ін} = -m\vec{w}$ називають силою інерції. Сили інерції не можна ставити в один ряд з силами тяжіння, силами пружності, або силами тертя. Останні є результатом взаємодії тіл. Сила інерції – це не результат взаємодії тіл, а властивість системи відліку. Для сили інерції не існує протидіючої сили. Отже, і третій закон Ньютона в неінерціальних системах відліку не виконується.

Ввівши поняття сили інерції, рівняння (1.76) можна записати у вигляді

$$m\vec{a}' = \vec{F} + \vec{F}_{ін} \,. \tag{1.77}$$

Воно є основним рівнянням динаміки в неінерціальних системах відліку.

Що стосується законів збереження імпульсу, енергії і момента імпульсу, то в неінерціальних системах відліку вони не виконуються, бо в неінерціальних системах відліку не існує замкнутих систем – для будь-якої системи тіл сила інерції є зовнішньою.

Приклади сил інерції

1. Сили інерції при прискореному поступальному русі систем відліку.

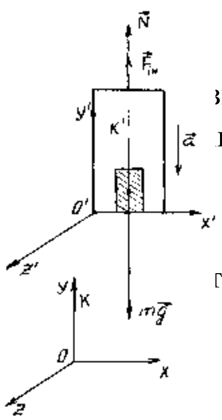


Рис. 1.16

На дні кабіни ліфту знаходиться деяке тіло (рис.1.16).

Нехай ліфт опускається вниз з прискоренням $\vec{a}$. Система відліку K зв’язану з поверхнею Землі, нехтуючи її добовим обертанням, будемо вважати інерціальною. За другим законом Ньютона

$$m\vec{a} = m\vec{g} + \vec{N} \,. \tag{1.78}$$

Система відліку K' зв’язану з ліфтом є неінерціальною. В системі K' тіло перебуває в стані спокою, тобто $\vec{a}' = 0$. Згідно (1.77)

$$0 = m\vec{g} + \vec{N} + \vec{F}_{ін} \,. \tag{1.79}$$

Із порівняння (1.78) і (1.79) маємо, що $\vec{F}_{ін} = -m\vec{a}$.

В проекції на вісь Oy рівняння дає $0 = -mg + N + F_{ін}$ Вага тіла P чисельно дорівнює N. Тоді

$$P = mg - F_{ін} \,.$$

Якщо ліфт нерухомий, то $F_{ін} = 0$ і вага тіла $P = mg$. У ліфті, що прискорено опускається вниз, вага тіла частково компенсується силою інерції.

При $a = g$ сила інерції $F_{ін} = mg$ і повністю компенсує вагу тіла $(P = 0)$. Такий стан називається станом “невагомості”.

1. Відцентрова сила інерції.

Диск рівномірно обертається навколо вертикальної осі з кутовою швидкістю ω (рис.1.17).

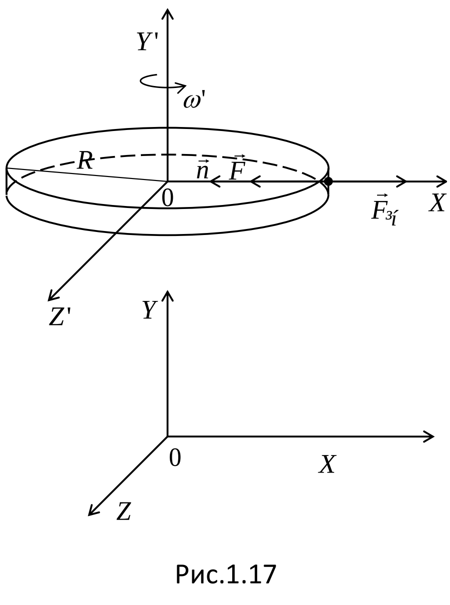


Рис.1.17

На виділену на ободі диску матеріальну точку з боку інших матеріальних точок діє сила пружності, позначимо її $\vec{F}$. Система відліку K нерухома (інерціальна). За другим законом Ньютона

$$m\omega^2 R\vec{n} = \vec{F} \,. \tag{1.80}$$

Система відліку K' обертається разом з диском (неінерціальна). Тоді згідно (1.77)

$$0 = \vec{F} + \vec{F}_{ін} \,. \tag{1.81}$$

Порівнюючи (1.80) і (1.81), отримуємо $\vec{F}_{ін} = -m\omega^2 R\vec{n}$ ($\vec{n}$ – одиничний вектор). Таку силу інерції називають відцентровою.

2. Коріолісова сила інерції.

На тіло, що рухається з швидкістю $\vec{\upsilon}$ в обертальній системі відліку, крім відцентрової сили інерції діє ще і коріолісова сила інерції $\vec{F}_{\kappa} = -2m\vec{\omega}\times\vec{\upsilon}$ або $\vec{F}_{\kappa} = 2m\vec{\upsilon}\times\vec{\omega}$.

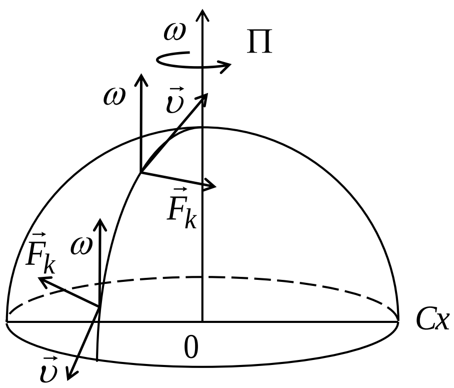


Рис. 1.18

Коріолісова сила інерції проявляє себе при русі тіл на поверхні Землі (наприклад, при русі тіла вздовж меридіану (рис. 1.18)).

Із рис. 1.18 видно, що незалежно від напряму руху тіла (на Пн. або на Пд.), у північній півкулі коріолісова сила інерції напрямлена вправо відносно напряму руху тіла, а у південній півкулі – вліво (напрям $\vec{F}_{\hat{e}}$ знаходиться за правилом правого гвинта).

Дія коріолісової сила інерції приводить до того, що в ріках північної півкулі більше руйнується правий берег, а в ріках південної півкулі – лівий. Для прикладу можна сказати, що ріка Волга з часів Івана Грозного (XVIст.) змістилася на 8км.

ПИТАННЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЮ

Тема 8. Робота. Енергія. Закони збереження.

Робота сили. Потужність. Енергія. Закон збереження і перетворення енергії. Кінетична і потенціальна енергії. Консервативна система.

1.Поняття енергії і роботи. Робота сили. Потужність

Невід'ємною властивістю матерії є рух. Рухи матерії відрізняються один від одного за формою (якістю). Наприклад, механічний, тепловий, електромагнітний та інші рухи за своєю формою різні.

У явищах природи здійснюються перетворення одних форм руху в інші. Дуже важливо, що в усіх перетвореннях руху змінюється лише якість руху, а кількість руху залишається незмінною. Отже, можна говорити про спільну для усіх форм руху кількісну міру.

Універсальною кількісною мірою усіх форм руху і взаємодій матерії є енергія. З різними формами руху матерії зв'язують різні форми енергії: механічну, теплову, електромагнітну, ядерну і інші.

При взаємодії тіл їхня енергія змінюється. Процес зміни енергії називається роботою, а робота як величина є мірою зміни енергії.

Для характеристики механічної взаємодії тіл була введена така величина як сила. Дія сили є причиною зміни енергії, або виконання роботи. Отже, для кількісної характеристики процесу зміни енергії можна використати таку фізичну величину як робота сили.

Елементарною роботою δA сили $\vec{F}$ називається величина, що дорівнює скалярному добутку вектора сили $\vec{F}$ на вектор елементарного переміщення $d\vec{r}$.

$$\delta A = \vec{F}d\vec{r} = \vec{F}\vec{v}dt = F \cdot \cos\alpha \cdot ds,$$

де α – кут між векторами $\vec{F}$ і $d\vec{r}$, ds – елементарний шлях.

Роботу сили на ділянці траєкторії від точки 1 до точки 2 можна знайти за допомогою криволінійного інтеграла

$$A = \int_1^2 \vec{F}d\vec{r} = \int_1^2 F\cos\alpha \cdot ds = \int_1^2 F_s ds, \qquad (1.61)$$

F_s – проекція сили на напрямок переміщення.

Якщо, наприклад, тіло рухається прямолінійно, сила $F = const$ і $\alpha = const$, то дістаємо

$$A = F\cos\alpha \int_1^2 ds = Fs\cos\alpha, \qquad (1.62)$$

де s – пройдений тілом шлях.

Для прикладу, знайдемо роботу сили тертя. Величина сили тертя визначається формулою $F_{тр} = \mu mg$, де μ – коефіцієнт тертя. За формулою (1.62) маємо

$$A_{тр} = \mu mgs\cos 180° = -\mu mgs. \qquad (1.63)$$

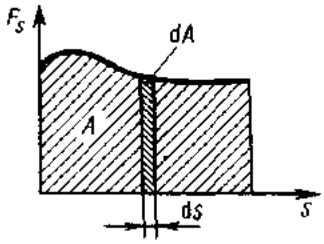


Рис. 1.12

Отже, робота сил тертя від'ємна (до цієї формули ми ще повернемось).

Нехай залежність F_s від шляху s представлена графічно (рис.1.12).

Тоді робота A дорівнює площі заштрихованої площадки.

Одиниця вимірювання роботи – джоуль (Дж): 1 Дж – робота, яку виконує сила в 1Н на шляху в 1м. (1Дж=1Н·м).

Для характеристики швидкості виконання роботи, введена така фізична величина як потужність (P). Її визначають формулою

$$P = \frac{dA}{dt} = \frac{\vec{F}d\vec{r}}{dt} = \vec{F}\vec{\upsilon} = F\upsilon\cos\alpha ,$$

де α – кут між векторами $\vec{F}$ і $d\vec{r}$.

Одиниця вимірювання потужності – ват (Вт): 1Вт – потужність, при якій за час 1с. виконується робота в 1Дж.

2.Кінетична енергія. Теорема про зміну кінетичної енергії

Розглянемо матеріальну точку масою m, на яку з боку інших тіл діє сила $\vec{F}$. За другим законом Ньютона

$$m\frac{d\vec{\upsilon}}{dt} = \vec{F} .$$

Знайдемо роботу сили $\vec{F}$

$$A = \int_1^2 \vec{F}d\vec{r} = \int_1^2 m\frac{d\vec{\upsilon}}{dt}d\vec{r} = \int_1^2 m\vec{\upsilon}d\vec{\upsilon} = \frac{1}{2}m\int_1^2 d(\vec{\upsilon}\vec{\upsilon}) = = \frac{1}{2}m\int_{\upsilon_1}^{\upsilon_2} d\upsilon^2 = \frac{1}{2}m\upsilon^2\Big|_{\upsilon_1}^{\upsilon_2} = \frac{m\upsilon_2^2}{2} - \frac{m\upsilon_1^2}{2}$$

(при виведенні враховувалось, що $\vec{\upsilon}d\vec{\upsilon} = \frac{1}{2}d(\vec{\upsilon}\vec{\upsilon}) = \frac{1}{2}d\upsilon^2$).

Вже згадувалось, що виконувана над тілом робота є мірою зміни його енергії

$$A = E_2 - E_1 .$$

Прирівняємо праві частини останніх рівностей

$$E_2 - E_1 = \frac{m\upsilon_2^2}{2} - \frac{m\upsilon_1^2}{2} .$$

Легко переконатись способом підстановки, що дане рівняння задовольняє функція

$$E = \frac{m\upsilon^2}{2} + C ,$$

де C – довільна стала величина.

Сталу C виберемо такою, щоб при швидкості $\upsilon = 0$ енергія E була рівною нулю. За такою умовою маємо $0 = 0 + C$. Звідки $C = 0$. Тоді

$$E = \frac{m\upsilon^2}{2} . \tag{1.64}$$

Таким чином, всяке рухоме тіло має енергію, що виражається формулою (1.64). Таку енергію, тобто енергію механічного руху називають кінетичною

$$E_к = \frac{m\upsilon^2}{2} .$$

При переході до системи з n взаємодіючих між собою матеріальних точок маємо виділити роботи як зовнішніх, так і внутрішніх сил. Тоді для якоїсь i – тої матеріальної точки будемо мати

$$\frac{m_i\upsilon_{i2}^2}{2} - \frac{m_i\upsilon_{i1}^2}{2} = A_i + A_i' ,$$

де A_i і A_i' – відповідно роботи зовнішніх і внутрішніх сил, що діють на і – ту матеріальну точку.

Провівши в цьому рівнянні сумування по індексу i від 1 до n, дістанемо

$$E_{k2} - E_{k1} = A + A' , \tag{1.65}$$

де $E_{k2}=\sum_{i=1}^{h}\frac{m_i\upsilon_{i2}^2}{2}$, $E_{k1}=\sum_{i=1}^{h}\frac{m_i\upsilon_{i1}^2}{2}$, $A=\sum_{i=1}^{h}A_i$, $A'=\sum_{i=1}^{h}A_i'$.

Рівняння (1.65) виражає зміст теореми про зміну кінетичної енергії системи: зміна кінетичної енергії системи дорівнює роботі всіх (як зовнішніх, так і внутрішніх) сил прикладених до системи.

3.Потенціальні і непотенціальні сили

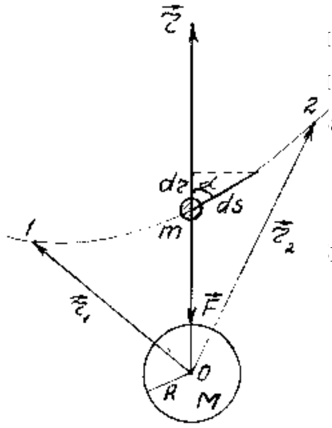


Рис. 1.13

Знайдемо роботу сил тяжіння, зокрема, сили тяжіння Землі, при ереміщенні матеріальної точки масою m вздовж деякої траєкторії, априклад з точки 1 в точку 2 (рис.1.13).

а законом всесвітнього тяжіння

$$F=G\frac{mM}{r^2}.$$

гідно (1.61) маємо

$$A=-\int_1^2 G\frac{mM}{r^2}\cos\alpha\cdot ds.$$

Знак мінус беремо тому, що сила тяжіння і переміщення мають протилежні напрямки.

З рис.1.13 бачимо, що $ds\cos\alpha=dr$.

Тоді

$$A=-\int_{r_1}^{r_2} G\frac{mM}{r^2}dr=\frac{GmM}{r}\bigg|_{r_1}^{r_2}.$$

Підставивши границі інтегрування, приходимо до формули

$$A=m\left(\frac{GM}{r_2}-\frac{GM}{r_1}\right). \tag{1.66}$$

Тепер, звернувшись до формули (1.63), проведемо порівняння виразів робіт сили тертя і сили тяжіння. Бачимо, що робота сили тертя залежить від довжини шляху, а робота сили тяжіння не залежить, тобто робота сил тяжіння не залежить від форми траєкторії. Це значить, що для різних форм траєкторій вирази робіт сили тяжіння будуть ідентичними. Сили, робота яких не залежить від форми траєкторії, а залежить тільки від координат початкової і кінцевої точок траєкторії називаються *потенціальними*.

Крім сили тяжіння, прикладами потенціальних сил можуть бути сили пружності і сили електростатичної взаємодії.

Сили, робота яких залежить від форми траєкторії називають непотенціальними. Характерним прикладом непотенціальних сил є сила тертя.

4.Потенціальна енергія та її зв'язок з потенціальними силами

Нехай деяке тіло рівномірно піднімається над Землею. Рівномірне піднімання тіла можливе за рахунок дії зовнішньої сили, що зрівноважує силу тяжіння.

Кінетична енергія тіла не змінюється, бо піднімання тіла здійснюється при сталій швидкості. Виконувана зовнішньою силою робота тратиться на збільшення енергії взаємодії в системі тіло – Земля. Таку частину механічної енергії називають потенціальною (E_n).

Робота A сили тяжіння дорівнює роботі зовнішньої сили взятій зі знаком мінус. Отже, можна написати, що

$$A = -(E_{n2} - E_{n1}) = E_{n1} - E_{n2}. \qquad (1.67)$$

Зміст цієї рівності полягає в тому, що робота потенціальних сил дорівнює зменшенню потенціальної енергії. Вона дозволяє за відомим виразом потенціальної сили знайти вираз потенціальної енергії з точністю до деякої довільної сталої. Зауважимо, що універсальної формули для вираження потенціальної енергії не має; її вираз залежить від характеру взаємодії.

Елементарна робота потенціальних сил дорівнює елементарному зменшенню потенціальної енергії

$$\delta A = -dE_n \quad \text{або} \quad \vec{F}d\vec{r} = -dE_n.$$

Для переміщення матеріальної точки вздовж осі Ox маємо

$$F_x dx = -dE_n.$$

Звідки $F_x = -\dfrac{\partial E_n}{\partial x}$ ($y = const$, $z = const$).

Для компоненти сил по осях y і z отримуються аналогічні вирази. Отже,

$$F_x = -\frac{\partial E_n}{\partial x};\ F_y = -\frac{\partial E_n}{\partial y};\ F_z = -\frac{\partial E_n}{\partial z},$$

або

$$\vec{i}F_x = -\vec{i}\,\frac{\partial E_n}{\partial x};\ \vec{j}F_y = -\vec{j}\,\frac{\partial E_n}{\partial y};\ \vec{k}F_z = -\vec{k}\,\frac{\partial E_n}{\partial z},$$

($\vec{i}$, $\vec{j}$, $\vec{k}$ – орти координатних осей).

Додавши почленно ліві і праві частини цих рівностей, отримуємо

$$\vec{i}F_x + \vec{j}F_y + \vec{k}F_z = -\left(\vec{i}\,\frac{\partial}{\partial x} + \vec{j}\,\frac{\partial}{\partial y} + \vec{k}\,\frac{\partial}{\partial z}\right)E_n.$$

Вектор $\left(\vec{i}\,\dfrac{\partial}{\partial x} + \vec{j}\,\dfrac{\partial}{\partial y} + \vec{k}\,\dfrac{\partial}{\partial z}\right)E_n$ називається градієнтом потенціальної енергії і позначається $grad\ E_n$

.

Таким чином,

$$\vec{F} = -\mathbf{grad}E_n$$

За отриманою формулою розв’язують обернену задачу, тобто за відомою потенціальною енергією знаходять потенціальну силу.

5. Потенціальна енергія гравітаційної взаємодії

Повертаючись до формул (1.66), (1.67) прирівняємо їх праві частини

$$E_{n1} - E_{n2} = -m\left(\frac{GM}{r_2} - \frac{GM}{r_1}\right).$$

Це рівняння перетворює в тотожність функція

$$E_n = -m\frac{GM}{r} + C. \qquad (1.68)$$

Довільну сталу C у виразі (1.68) виберемо такою, щоб при $r = \infty$ енергія E_n була рівною нулю. За такої умови $0 = 0 + C$. Звідки $C = 0$. Отже, потенціальна енергія гравітаційної взаємодії має вираз

$$E_n = -m\frac{GM}{r}. \qquad (1.69)$$

Формулу (1.69) застосовують у механіці космічних польотів. В задачах про рух тіл біля Землі користуються наближеним виразом потенціальної енергії.

Для його виведення запишемо (1.68) в дещо іншому вигляді

$$E_n = -m\frac{GM}{r} + C = -m\frac{GMR^2}{(R+h)R^2} + C \approx -mg\frac{R}{1+\frac{h}{R}} + C,$$

де R і h – відповідно радіус Землі і висота піднімання тіла, також бралось до уваги, що прискорення вільного падіння біля поверхні Землі $g = \frac{GM}{R^2}$.

Біля поверхні Землі $(R >> h)$

$$\frac{1}{1+\frac{h}{R}} \approx 1 - \frac{h}{R}.$$

Тоді

$$E_n = -mgR\left(1 - \frac{h}{R}\right) + C = -mgR + mgh + C.$$

Довільну сталу C виберемо такою, щоб при $h = 0$ енергія $E_n = 0$. За такої умови $0 = -mgR + C$. Звідки $C = mgR$. Отже, для потенціальної енергії тіла біля поверхні Землі, тобто в однорідному полі сил тяжіння можна користуватись формулою

$$E_n = mgh.$$

6. Потенціальна енергія пружної взаємодії

У разі повздовжнього розтягу або стиску тіла (наприклад, пружини вздовж осі Ox) сила пружності

$$\vec{F} = -kx\vec{i},$$

де k – коефіцієнт пружності, $x\vec{i}$ – вектор деформації ($\vec{i}$ орт осі Ox).

Робота сили пружності

$$A = -\int_{x_1}^{x_2} kxdx = -\frac{1}{2}k\left(x_2^2 - x_1^2\right).$$

За формулою (1.67) маємо

$$-\frac{1}{2}k\left(x_2^2 - x_1^2\right) = -\left(E_{n2} - E_{n1}\right).$$

Розв'язком цього рівняння є функція $E_n = \frac{1}{2}kx^2 + C$, де C – довільна стала. Її вибирають такою, щоб енергія недеформованого $(x = 0)$ тіла була рівною нулю. Така умова дає, що $C = 0$.

Отже, потенціальна енергія пружної взаємодії виражається формулою

$$E_n = \frac{1}{2}kx^2.$$

7. Повна механічна енергія. Закон збереження повної механічної енергії

Звернемось до теореми про зміну кінетичної енергії системи, формула (1.65)

$$E_{\kappa 2} - E_{\kappa 1} = A + A'.$$

Нагадаємо, що A' робота внутрішніх сил.

Припустимо, що внутрішні і частина зовнішніх сил є потенціальними. Згідно (1.67) робота таких сил дорівнює зменшенню потенціальної енергії системи

$$A' + A_1 = -\left(E_{n2} - E_{n1}\right),$$

де A_1 – робота зовнішніх потенціальних сил.

Тоді вихідну формулу можна записати у вигляді

$$E_{к2} - E_{к1} = A^* - (E_{п2} - E_{п1})$$

або

$$(E_{к2} + E_{п2}) - (E_{к1} + E_{п1}) = A^*, \tag{1.70}$$

де A^* – робота зовнішніх непотенціальних сил.

Енергію E, що дорівнює сумі кінетичної і потенціальної $(E_к + E_п)$ називають повною механічною енергією.

Із (1.70) слідує, що

$$E_2 - E_1 = A^* \text{ або } \Delta E = A^*.$$

Отже, зміна повної механічної енергії системи дорівнює роботі зовнішніх непотенціальних сил.

Якщо зовнішні непотенціальні сили відсутні, то

$$\Delta E = 0 \text{ або } E = (E_к + E_п) = const\,. \tag{1.71}$$

Рівність (1.71) виражає закон збереження повної механічної енергії: в системі тіл, між якими діють лише потенціальні сили, повна механічна енергія зберігається, тобто не змінюється з часом.

Механічні системи, на тіла яких діють лише потенціальні сили, називаються консервативними.

Існує ще один вид систем – неконсервативні системи в яких діють непотенціальні сили. Характерним прикладом неконсервативних систем є системи, в яких діють сили тертя. Робота сил тертя від'ємна $(A^* < 0)$. Тоді $\Delta E < 0$, тобто повна механічна енергія системи, в якій діють сили тертя, зменшується (дисипативна система) – механічна енергія перетворюється в теплову.

При зменшенні повної механічної енергії завжди виникає еквівалентна кількість енергії іншого виду. Енергія ніколи не зникає і появляється знову, вона лише перетворюється із одного виду в інший. В цьому і полягає фізична суть загального Закону збереження і перетворення енергії.

8. Графічне представлення енергії

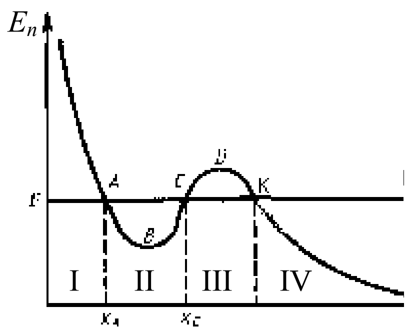


Рис. 1.14

В багатьох практичних задачах потенціальна енергія є функцією лише однієї змінної (наприклад, координати x), тобто $E_п = E_п(x)$. Якщо система консервативна, то для неї справедливий закон збереження повної механічної енергії $E = E_к + E_п$.

Графік залежності $E_п$ від x називається потенціальною кривою (рис.1.14).

Повна механічна енергія визначається прямою EE паралельною до осі абсцис. Потенціальна енергія $E_п$ визначається відрізком вертикалі між точкою на осі абсцис і графіком $E_п(x)$. Кінетична енергія $E_к$ визначається відрізком вертикалі між графіком $E_п(x)$ і прямою EE.

Аналіз потенціальних кривих дозволяє визначити характер руху тіла. Якщо E – задана повна механічна енергія, то тіло може рухатися тільки там, де $E_п(x) \le E$, тобто в областях II і IV. В області I і III тіло проникнути не може, так як потенціальна енергія не може стати більшою за повну (бо кінетична енергія не може бути від'ємною). Область II називають потенціальною ямою. Область III називають потенціальним бар'єром, через який тіло не може проникнути, маючи даний запас повної енергії. Рухаючись в області IV тіло може віддалитися на нескінченність. Такий рух називають інфінітним. Рухаючись в області потенціальної ями, тіло не може віддалитись на нескінченність; такий рух називають *фінітним*.

Повернемось до формули $\vec{F} = -gradE_n$, яка виражає зв'язок між потенціальною силою і потенціальною енергією. В одновимірному русі вона приймає вигляд $\vec{i}F_x = -\vec{i}\,\dfrac{\partial E_n}{\partial x}$.

Якщо $\dfrac{\partial E_n}{\partial x} = 0$, то $F_x = 0$, що дає умову рівноваги тіла. Рівновага може бути стійкою або нестійкою. Рівновага буде стійкою, коли потенціальна енергія мінімальна (наприклад, точка В) і нестійкою, коли потенціальна енергія максимальна (наприклад, точка Д).

ПИТАННЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЮ

1. Дати визначення потужності, записати співвідношення для потужності.
2. Поля якого виду є консервативними?
3. Записати закон збереження енергії для випадку, коли у системі діє неконсервативна сила.
4. Який удар називають абсолютно непружним?
5. .Дати визначення консервативної сили.
6. Записати зв'язок між потенціальною енергією та силою.
7. Які закони збереження справедливі для абсолютно непружного удару?
8. Записати співвідношення для визначення потенціальної енергії пружно стисненої пружини.
9. Записати співвідношення для визначення кінетичної енергії тіла, потенціальної енергії тіла у полі тяжіння Землі.
10. Сформулювати закон збереження енергії.
11. У яких одиницях вимірюється робота та потужність?
12. Яке поле сил називають однорідним, центральним?
13. Який удар називають абсолютно пружним?
14. Записати вираз для визначення роботи сили F у найбільш загальній формі.
15. Що таке градієнт?Дати математичне визначення.
16. Записати закон збереження механічної енергії.
17. Чому дорівнює робота, якщо сила і переміщення взаємно перпендикулярні?
18. Чим визначається потужність механізму?
19. Записати вираз для визначення повної механічної енергії тіла.
20. Які закони збереження справедливі для абсолютно пружного удару?
21. Записати математичне визначення оператора Гамільтона.
22. Як за графіком $F_s(S)$ визначити роботу сили на шляху S?
23. У якому випадку справедливий закон збереження механічної енергії?

Тема 9. Основи механіки твердого тіла.

Центр мас системи матеріальних точок. Абсолютно тверде тіло. Поступальний, обертовий і плоский рух.

Обертальний рух абсолютно твердого тіла навколо закріпленої осі. Момент інерції. Момент імпульсу. Момент сили. Закони збереження при обертальному русі.

1.Динаміка обертального руху твердого тіла відносно осі. Поняття моменту інерції, моменту сили та моменту імпульсу твердого тіла

Для опису обертального руху потрібно задати положення осі обертання та кутову швидкість обертання точок тіла в кожний момент часу. При поступальному русі мірою інертних властивостей матеріальної точки (тіла) є маса, а при обертального русі її аналогом буде момент інерції, який рівний добутку маси матеріальної точки на квадрат відстані до центра або осі обертання

$$I_i = m_i r_i^2 . \qquad 1.45)$$

У випадку системи матеріальних точок або твердого тіла, що обертається навколо деякої осі OZ**,** момент інерції буде рівний сумі моментів інерції всіх матеріальних точок, з яких складається дана система

$$I_z = \sum I_{iz} = \sum m_i r_{iz}^2 . \qquad (1.46)$$

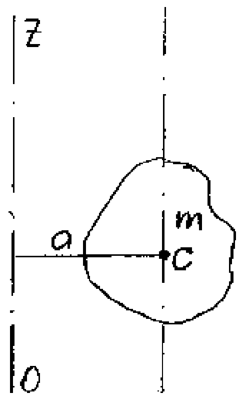
де r_{iz} – віддаль *i*-ої матеріальної точки від осі обертання OZ. Коли ж маса рівномірно розподілена по всьому об'єму тіла, то від суми можна перейти до інтеграла

$$I_z = \int r_z^2 dm. \qquad (1.47)$$

Шляхом інтегрування можна визначити момент інерції тіл правильної геометричної форми відносно осі, що проходить через центр мас (інерції) даних тіл

Таблиця 1.1

Тіло	Положення осі обертання	Момент інерції
Пустотілий тонкостінний циліндр радіусом *R*	Вісь симетрії	mR^2
Суцільний циліндр радіусом *R*	Вісь симетрії	$1/2mR^2$
Куля радіусом *R*	Вісь симетрії	$2/5mR^2$
Прямий тонкий стержень довжиною *l*	Вісь перпендикулярна до стержня і проходить через його середину	$1/12ml^2$



У випадку, коли вісь обертання OZ не проходить через центр інерції C, а віддалена від неї на деяку відстань a (рис.1.7), то для визначення моменту інерції тіла *I* відносно довільної осі OZ використовують теорему Штейнера: момент інерції тіла I відносно довільної осі OZ рівний моменту його інерції I_0 відносно паралельної осі, що проходить через центр мас тіла C, плюс добуток маси тіла m на квадрат віддалі a між осями

$$I = I_0 + ma^2 . \qquad (1.48)$$

Обертаюча дія сили визначається векторною величиною, яку називають моментом сили.

Рис.1.7.

Момент сили $\vec{M}$ відносно центра обертання O рівний векторному добутку радіуса-вектора $\vec{r}$, проведеного від центра обертання до точки прикладання сили, на силу $\vec{F}$.

$$\vec{M} = \vec{r} \times \vec{F} . \tag{1.49}$$

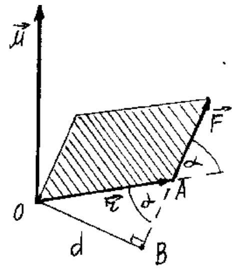


Рис. 1.8.

Напрям вектора моменту сили $\vec{M}$ (рис.1.8) визначається за правилом правого гвинта, обертаючи вектор $\vec{r}$ по найкоротшому шляху до суміщення з вектором $\vec{\text{F}}$. Вектор $\vec{M}$ перпендикулярний до площини, в якій лежать вектори $\vec{r}$ та $\vec{\text{F}}$, а його модуль рівний

$$M = r \cdot F \cdot \sin\alpha . \tag{1.50}$$

Як видно з (рис.1.8) добуток $r \cdot \sin\alpha = d$ – це найкоротша віддаль від напрямку дії сили $\vec{\text{F}}$ до центра обертання О, яку називають плечем сили ***d*.** Моментом сили відносно нерухомої осі OZ (рис.1.9) є скалярна величина M_z, яка рівна проекції вектора $\vec{M}$, відносно точки О на дану вісь.

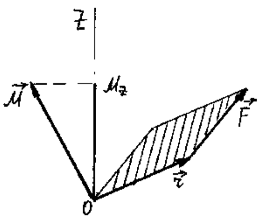


Рис. 1.9.

Нехай точка О є центром обертання деякого тіла (рис.1.10). вона може бути як в самому тілі, так і поза його межами. Запишемо другий закон Ньютона для *i*-ої точки даного тіла

$$\frac{d(m_i\vec{\upsilon}_i)}{dt} = \sum_{k=1}^{n} \vec{f}_{ik} + \vec{F}_i , \tag{1.51}$$

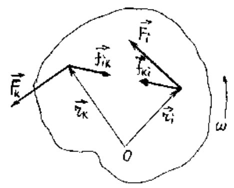


Рис.1.10.

де $m_i\vec{\upsilon}_i$ – імпульс *i*-ої точки, $\vec{F}_i$ – рівнодійна всіх зовнішніх сил, які діють на і-ту точку тіла, $\sum \vec{f}_{ik}$ – сума всіх внутрішніх сил, які діють на і-ту точку тіла з боку всіх інших його точок.

Після певних перетворень отримаємо

$$\frac{d}{dt}\left(\sum_{i=1}^{n} \vec{r}_i \times m_i\vec{\upsilon}_i\right) = \sum_{i=1}^{n} \vec{r}_i \times \vec{F}_i , \tag{1.52}$$

Введемо головний момент зовнішніх сил твердого тіла відносно точки

$$\vec{M} = \sum_{i=1}^{n} \vec{r}_i \times \vec{F}_i , \tag{1.53}$$

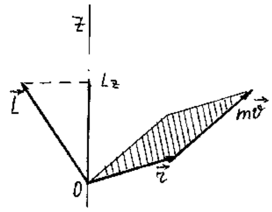
а також момент імпульсу твердого тіла відносно точки

$$\vec{L} = \sum_{i=1}^{n} \vec{r}_i \times m_i\vec{\upsilon}_i . \tag{1.54}$$

Тепер маємо

$$\frac{d\vec{L}}{dt} = \vec{M} . \tag{1.55}$$

Рівняння (1.55) - *основний закон динаміки обертового руху тіла* відносно центра О: швидкість зміни моменту імпульсу тіла рівна головному моменту всіх зовнішніх сил відносно центра обертання.



Коли тверде тіло обертається навколо деякої нерухомої осі OZ (рис.1.11), то основне рівняння динаміки обертового руху твердого тіла запишеться у вигляді

$$\frac{dL_z}{dt} = M_z , \tag{1.56}$$

Рис.1.11.

де L_z – момент імпульсу твердого тіла відносно осі, M_z – головний момент сил твердого тіла відносно осі (компоненти M_x=M_y=0)

При обертанні твердого тіла відносно осі обертання лінійні швидкості υ_i всіх його точок пов'язані з кутовою швидкістю ω співвідношенням

$$\upsilon_i = r_i \cdot \omega . \qquad (1.57)$$

Тому момент імпульсу можна записати як

$$L_z = \sum_{i=1}^{n} r_{iz} \cdot m_i \upsilon_i = \omega \sum_{i=1}^{n} m_i r_{iz}^2 = I_z \omega . \qquad (1.58)$$

Тоді основний закон динаміки обертового руху відносно осі OZ запишеться у вигляді

$$\frac{d(I_z \omega)}{dt} = M_z \quad \text{або} \quad I_z \cdot \varepsilon = M_z , \qquad (1.59)$$

де ε – кутове прискорення при обертовому русі тіла відносно осі OZ.

Таким чином, головний момент зовнішніх сил твердого тіла відносно осі дорівнює добутку моменту інерції твердого тіла відносно цієї ж осі на його кутове прискорення.

2. Закон збереження моменту імпульсу твердого тіла відносно осі

В замкнутій системі головний момент зовнішніх сил відносно осі M_z рівний нулю і тому (1.59) матиме вигляд $\frac{dL_z}{dt} = 0$, звідси слідує, що $L_z = const$, тобто

$$I_z \cdot \omega = \text{const}. \qquad (1.60)$$

Маємо вираз *закону збереження моменту імпульсу* твердого тіла відносно осі: якщо головний момент зовнішніх сил M_z відносно осі рівний нулю, то момент імпульсу твердого тіла відносно тієї ж осі зберігається.

Закон збереження моменту імпульсу є фундаментальним законом природи. Він пов'язаний з властивістю симетрії простору – його ізотропністю, тобто інваріантністю законів природи відносно вибору напрямку осей координат системи відліку.

ПИТАННЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЮ

1. .Записати співвідношення для визначення моменту інерції тіла.
2. .Записати основний закон динаміки обертального руху у найбільш загальній формі.
3. .Для яких систем справедливий закон збереження моменту імпульсу?
4. .Визначити напрямок моменту сили, що прикладена до тіла.
5. .Чому дорівнює потужність, що розвивається силою F при обертальному русі?
6. .Дати визначення пари сил. Записати математичне співвідношення.
7. .Сформулювати теорему Штейнера.
8. .Записати та сформулювати основний закон динаміки обертального руху для випадку I=const.
9. .Чому дорівнює момент сили при гравітаційній взаємодії?
10. .Записати вираз для роботи сили при обертальному русі.
11. .Чому дорівнює момент внутрішніх сил системи?
12. .Що таке плече сили?
13. .Дати визначення та записати математичний вираз для моменту сили..Як змінилось кутове прискорення тіла, якщо його момент інерції збільшився удвічі (M=const)?
14. Записати співвідношення для кінетичної енергії тіла, що обертається.
15. .Сформулювати закон збереження моменту імпульсу.
16. .Записати співвідношення для моменту імпульсу тіла.
17. .Чому дорівнює момент інерції диска, матеріальної точки?
18. .Які фізичні величини при обертальному русі відповідають силі, імпульсу, лінійній швидкості?
19. .Кутова швидкість тіла змінилась у 3 рази, як змінилась його кінетична енергія (J=const)?

20. Визначити напрямок моменту імпульсу тіла.
21. .Чому дорівнює момент інерції кулі радіуса R?
22. .Момент сили збільшився у 2 рази, у скільки разів змінилось кутове прискорення тіла, якщо момент інерції постійний?
23. .Що характеризує момент інерції тіла?

Питання до поточного контролю

Змістовний модуль І. Механіка

1. Дати визначення кінематики як розділу механіки і основних понять кінематики (матеріальна точка, траєкторія, шлях, переміщення).

2. Дати визначення середньої та миттєвої швидкості, середнього та миттєвого прискорення матеріальної точки.

3. Вивести формули для шляху і швидкості при рівномірному та рівнозмінному рухах

4. Дати визначення криволінійного руху, нормального та тангенціального прискорення матеріальної точки, записати вираз для модуля повного прискорення.

5. Дати визначення обертового руху та його основних характеристик (середня та миттєва кутова швидкість, середнє та миттєве кутове прискорення). Встановити зв'язок між кутовими і лінійними характеристиками.

6. Вивести (записати) формули для кута повороту і кутової швидкості при рівномірному та рівно змінному обертовому рухах.

7. Дати визначення динаміки як розділу механіки, сформулювати закони Ньютона. Розкрити поняття сили, записати вирази для сил тертя, тяжіння, пружності. Розкрити поняття маси, імпульсу матеріальної точки та механічної системи.

8. Вивести (записати) теорему про зміну імпульсу механічної системи та закон збереження імпульсу. З якою властивістю простору пов'язаний закон збереження імпульсу?

9. Дати визначення поняття «центр мас», сформулювати теорему про рух центра мас.

10. Дати визначення понять моменту сили, моменту інерції, моменту імпульсу. Встановити зв'язок між моментом імпульсу і моментом сили (рівняння моментів відносно центру і відносно осі).

11. Вивести (записати) Основний закон динаміки обертового руху твердого тіла.

12. Сформулювати і записати Закон збереження моменту імпульсу. З якою властивістю простору пов'язаний закон збереження моменту імпульсу?

13. Робота і потужність. Робота сталої та змінної сили.

14. Енергія. Кінетична, потенціальна та повна механічна енергія. Зв'язок між роботою та енергією. Умова рівноваги механічної системи.

15. Потенціальна енергія пружної та гравітаційної взаємодії (виведення).

16. Застосування законів збереження до пружного і непружного зіткнень двох тіл.

20. Гідродинаміка нестисливої рідини. Закон Паскаля, закон Архімеда. Рух ідеальної рідини. Рівняння нерозривності. Рівняння Бернуллі.

21. Гідродинаміка в'язкої рідини. Сила Стокса.

ТЕСТОВІ ПИТАННЯ
(ЗРАЗОК)

1. Який з виразів визначає вектор миттєвої швидкості?

a) $\frac{dS}{dt}$; b) $\frac{d\vec{r}}{dt}$; c) $\frac{d^2\vec{r}}{dt^2}$; d) $\frac{dv}{dt}$; e) $\frac{d\vec{v}}{dt}$.

2. Який з виразів визначає вектор повного прискорення?

a) $\frac{dx}{dt}\vec{i}+\frac{dy}{dt}\vec{j}+\frac{dz}{dt}\vec{k}$; b) $\frac{d\vec{r}}{dt}$; c) $\frac{d^2r}{dt^2}$; d) $\frac{dv}{dt}$; e) $\frac{d^2x}{dt^2}\vec{i}+\frac{d^2y}{dt^2}\vec{j}+\frac{d^2z}{dt^2}\vec{k}$.

3. Яким є рух матеріальної точки, якщо $a_n \neq 0$; $a_\tau < 0$?

a) рівномірний прямолінійний; b) рівномірний криволінійний;

c) рівнозмінний прямолінійний; d) рівнозмінний криволінійний;

e)прискорений криволінійний.

4. Яка з формул визначає другий закон динаміки в найбільш загальному вигляді?

a) $\vec{F}=m\vec{a}$; b) $\vec{a}=\frac{\vec{F}}{m}$; c) $\vec{F}\Delta t=\Delta(m\vec{v})$; d) $\vec{F}=\frac{d(m\vec{v})}{dt}$; e) $\vec{F}=\frac{d\vec{P}}{dt}$.

5. Рівняння руху тіла задано формулою $s=3+5t+4t^2+2t^3$. Яке середнє прискорення тіла на проміжку від другої до третьої секунди від початку руху?

a) 13 *м/с*^{2}; b) 35 *м/с*^{2}; c) 24 *м/с*^{2}; d) 22 *м/с*^{2}; e) 5 *м/с*^{2}.

6. Матеріальна точка обертається по колу радіусом 20 *м* і залежність кута повороту від часу задано рівнянням $\varphi=3-4t+2t^2$. Чому рівне повне прискорення точки в момент часу $t=1\ c$?

a) 1 *м/с*^{2}; b) 0,9 *м/с*^{2}; c) 0,8 *м/с*^{2}; d) 0,7 *м/с*^{2}; e) 0,6 *м/с*^{2}.

7. До бруска масою 200 *г*, що лежить на горизонтальній поверхні, прикладена сила 1 *Н*, яка напрямлена під кутом 30° до горизонту. При якому коефіцієнті тертя між бруском та поверхнею брусок буде рухатись рівномірно?

a) 0,49; b) 0,55; c) 0,59; d) 0,65; e) 0,60.

8. Куля масою *m*, що рухається з швидкістю υ_1=4м/с наздоганяє кулю масою *m*, що рухається з швидкістю υ_2=2м/с в тому ж напрямку. Яка частина механічної енергії куль буде втрачено в результаті непружньої взаємодії?

a) 0,1; b) 0,5; c) 0,55; d) 0,6; e) 0,65.

9. Кулька масою 50 *г* впала на горизонтальну плиту з висоти 10 *см* і підскочила на висоту 7,35 *см*. Який імпульс отримала плита?

a) 0,06 *Н с*; b) 0,07 *Н с*; c) 0,1 *Н с*; d) 0,13 *Н с*; e) 0,42 *Н с*.

10. До обода диска, що може обертатись навколо вісі симетрії прикладена дотична сила 5 *Н*. Якою буде лінійна швидкість точок, що лежать на ободі диска, через 10 *с* після початку дії сили, якщо маса диска 100 *кг*?

a) 0,2 *м/с*; b) 0,5 *м/с*; c) 1 *м/с*; d) 1,5 *м/с*; e) 2 *м/с*.

11. З однієї і тієї ж самої похилої площини спущена куля, диск, обруч та суцільний циліндр однакової маси та радіуса. Яке з тіл швидше скотиться з похилої площини?

a) куля; b) диск; c) обруч; d) циліндр; e) диск та циліндр.

12. На барабан масою 9 *кг* намотаний шнур, до кінця якого прив'язаний вантаж масою 2 *кг*. Знайти прискорення вантажу.

a) 9,8 *м/с*^{2}; b) 4,9 *м/с*^{2}; c) 3 *м/с*^{2}; d) 2 *м/с*^{2}; e) 1 *м/с*^{2}.

13. Диск масою 2*т* котиться без ковзання по горизонтальній площині з швидкістю 4 *м/с*. Яка кінетична енергія диска?

a) 8 *Дж*; b) 16 *Дж*; c) 24 *Дж*; d) 32 *Дж*; e) 40 *Дж*.

14. До обода диска масою 5 *кг* прикладена дотична сила 2 *Н*. Яку кінетичну енергію буде мати диск через 5 секунд після початку дії сили?

a) 5 *Дж*; b) 10 *Дж*; c) 15 *Дж*; d) 20 *Дж*; e) 25 *Дж*.

15. З якою швидкістю рухався вагон масою 20 *т*, якщо при ударі об стінку, кожен з двох буферів стиснувся на 10 *см*? Відомо, що пружина кожного з буферів стискається на 1 *см* під дією сили 10 *кН*.

a) 0,5 *м/с*; b) 1 *м/с*; c) 1,5 *м/с*; d) 2 *м/с*; e) 2,5 *м/с*.

8. РЕКОМЕНДОВАНІ ДЖЕРЕЛА ІНФОРМАЦІЇ

Основна література

1. Лопатинський І.Є., Зачек І.Р., Ільчук Г.А., Романишин Б.М. Фізика. Підручник. - Львів: Львівська політехніка, 2009. - 385 с. https://www.twirpx.com/file/2808600/
2. Карамзін В.В., Семенець В.В. Курс загальної фізики. Навчальний посібник ждя вищих навчальних закладів.- К.: Кондор, 2016. – 786 с.
3. Літнарович Р.М. Фізика з основами геофізики.Частина 2. Лабораторний практикум. МЕГУ, Рівне 2007,48с.

   https://essuir.sumdu.edu.ua/bitstream-download/123456789/2877.pdf
4. Лопатинський І.Є. Збірник задач з фізики/ Львів: Львівська політехніка, 2003. - 124 с. https://www.twirpx.com/file/2171246/
5. Чолпан П.П. Фізика: підручник. – К.: Вища школа, 2003. – 567 с.

Допоміжна література

1. Лабораторний практикум з фізики. Ч. 1. Лабораторія механіки та молекулярної фізики: Навчальний посібник / І.В. Бандрівчак, – 2-ге вид., випр. і доп. – Львів: Видавництво Національного університету "Львівська політехніка", 2008. – 188 с. https://studfile.net/preview/5200979/
2. Бушок Г.Ф., Венгер Є.Ф. Курс фізики: У 3 кн. Кн. 1. Фізичні основи механіки. Молекулярна фізика і термодинаміка: навч. посіб. – К.: Вища шк., 2002. – 375 с.
3. Бушок Г.Ф., Венгер Є.Ф. Курс фізики: У 3 кн. Кн. 2. Електрика і магнетизм: навч. посіб. – К.: Вища шк., 2003. – 278 с.
4. Бушок Г.Ф., Венгер Є.Ф. Курс фізики: У 3 кн. Кн. 3. Оптика. Фізика атома та атомного ядра: навч. посіб. – К.: Вища шк., 2003. – 311 с.
5. Бушок Г.Ф., Левандовський В.В., Півень Г.Ф. Курс фізики: Навч. Посібник: У 2 кн. Кн. 1. Фізичні основи механіки. Електрика і магнетизм. – 2 – ге вид. – К.: Лебідь, 2001. – 446 с.
6. Бушок Г.Ф., Левандовський В.В. Курс фізики: Навч. Посібник: У 2 кн. Кн. 2. Оптика. Фізика атома і атомного ядра. Молекулярна фізика і термодинаміка. – К.: Лебідь, 2001. – 424 с.

Інформаційні ресурси в мережі Інтернет

1	Вища фізика	http://www.acmephysics.narod.ru
2	Механика	http://mechanics.h1.ru
3	Механика для любознательных	http://mexanic.by.ru
4	Кинетические уравнения	http://kinetic.boom.ru
7	Неизвестная физика - электронная версия книги Машкова В.В.	http://www.neofizika.narod.ru
9	Освіта: Механіка	http://www.emomi.c
11	Природа & людина	http://nh.at.ua
14	Санкт-Петербургская образовательная сеть по физике	http://www.phys.spbu.ru/~monakhov/
15	Сборник научно-популярных статей по физике и астрономи	http://www.enlt.narod.ru

16	Странная физика	http://ph.narod.ru
17	Физика в анимациях	http://physics.nad.ru
18	Физика для всех	http://fizika-abc.at.ua
20	Энергия ветра Ветроэнергетика	http://windpower.boom.ru
21	Фізика і астрономія	fizika.net.ua
22	Фізична енциклопедія	http://www.phys-encyclopedia.net/index.html
23	Енциклопедія фізики і техніки	http://www.femto.com.ua/
24	Фізикам на допомогу	fizikall.ucoz.ru
25	Фізика і природознавство	http://nh.at.ua/dir/osvitnyo_informaciyni_resursy/zikave/9
26	Вся фізика	http://all-fizika.com/

ЗМІСТ