**Яблонь Л.С., Бойчук В.М.**

**КУРС ЛЕКЦІЙ З ФІЗИКИ**

**МЕХАНІКА**

**2014**

*Рекомендовано до друку Вченою радою фізико-технічного факультету ДВНЗ «Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника (протокол №6 від 11 березня 2014 р.)*

**Рецензенти:** д. ф.-м. н., проф. Гасюк І.М.,

к. ф.-м. н., доц. Ліщинський І.М.

**Яблонь Л.С.,** **Бойчук В.М.** Курс лекцій з фізики. Механіка. – Івано-Франківськ, 2014. – 112 с.

У пропонованому навчально-методичному посібнику зібрано лекції з курсу фізики (розділ «Механіка») для студентів технічних спеціальностей вищих навчальних закладів.

**ВСТУП**

Традиційне викладання курсу загальної фізики у вищих навчальних закладах диференційовано на лекції, лабораторні роботи, розв’язування задач і являє собою сукупність інфор­маційних технологій, специфіка якої ґрунтується на оптимізації ознайомлення студентів з ієрархічно організованим масивом специфічних понять і їх взаємозв’язків, вироблення набору орієнтаційних і швидкісних навичок з користування компонен­тами цього масиву. Інтенсивний розвиток сучасної комп’ютерної техніки і спеціалізованого програмного забезпечення, зростаюча оснащеність навчальних закладів персональними комп’ютерами, необхідність формування у студентів навичок вільного володіння сучасними інформаційними технологіями – визначають актуаль­ність комплексної комп’ютеризації процесу викладання вузівських фундаментальних і технічних дисциплін, у тому числі курсу загальної фізики.

Особливе зацікавлення представляє застосування комп’ютер­ної техніки для такої форми навчального процесу, як лекції. Викладання теоретичного матеріалу тут традиційно прийнято супроводжувати демонстраційними матеріалами – таблицями, експе­риментальними демонстраціями фізичних явищ, навчаль­ни­ми фільмами. Комп’ютеризація лекційної аудиторії для викла­дання фізики дозволяє істотно поліпшити якість передачі інформаційного потоку від лектора до студентів, а також реалізувати принципово нові механізми викладання лекційного матеріалу, пов’язані з застосуванням можливостей мульти­медійних технологій. Основною метою комп’ютеризації лекційної аудиторії є забезпечення якісного візуального доступу студентів до текстових, графічних, мультимедійних матеріалів, які лектор використовує для ілюстрації лекційного матеріалу.

Лекції розроблені відповідно до програми курсу загальної фізики (розділ «Механіка») та є додатком до мультимедійного курсу лекцій. Призначені для студентів всіх спеціальностей фізичного та інженерно-технічного профілю. Даний курс може бути використаний студентами в процесі самостійної роботи і лекторами, як основа для читання мультимедійних лекцій.

*Автори*

***Фізика – це заняття для веселих***

***і дотепних людей***

**Петро Капіца**

***Механіка – рай математичних наук***

**Леонардо да Вінчі**



**ЗМІСТ**

|  |  |
| --- | --- |
| 1. ВСТУП. ОСНОВНІ ФІЗИЧНІ АБСТРАКЦІЇ І ВИЗНА­ЧЕННЯ МЕХА­НІКИ | 8 |
| 1.1. Предмет фізики. Роль фізики у розвитку і становленні спеціа­ліста | 9 |
| 1.2. Основні завдання курсу фізики у вищих навчальних закладах | 9 |
| 1.3. Найбільш поширені математичні операції, які вико­ристо­вуються в курсі загальної фізики | 10 |
| 1.3.1. Векторні і скалярні величини | 10 |
| 1.3.2. Оператори | 13 |
| 1.4. Міжнародна система одиниць (System International – SІ) вимі­рю­вання фізичних величин | 14 |
| 1.5. Механіка і її структура | 16 |
| 1.6. Моделі в механіці | 16 |
| 1.7. Механічний рух | 17 |
| 1.8. Основні характеристики руху матеріальної точки | 18 |
| 1.8.1. Відносність руху. Системи від­ліку | 18 |
| 1.8.2. Радіус-вектор у декартовій системі координат. Кіне­ма­тич­ні рівняння руху точки. | 18 |
| 1.8.3. Траєкторія, довжина шляху, вектор переміщен­ня | 20 |
| 1.8.4. Швидкість матеріальної точки | 21 |
| 1.8.5. Прискорення матеріальної точки | 23 |
| 2. ОСНОВИ КІНЕМАТИКИ | 24 |
| 2.1. Поступальний прямолінійний рух | 25 |
| 2.1.1. Прямолінійний рівномірний рух | 25 |
| 2.1.2. Прямолінійний нерівномірний рух | 26 |
| 2.2. Криволінійний рух. Тангенціальне та нормальне прискорення | 26 |
| 2.3. Класифікація рухів з урахуванням тангенціальної та нормальної складових прискорення | 28 |
| 2.4. Кінематика обертального руху | 28 |
| 2.4.1. Фізичні величини, які описують обертальний рух | 29 |
| 2.4.2. Рівномірний обертальний рух | 30 |
| 2.4.3. Рівноприскорений обертальний рух | 31 |
| 3. ОСНОВИ ДИНАМІКИ | 32 |
| 3.1. Динаміка матеріальної точки | 33 |
| 3.1.1. Інерція. Інертність | 33 |
| 3.1.2. Маса. Адитивність і закон збереження маси. | 33 |
| 3.1.3. Інерціальні системи відліку. Перший закон Ньютона | 33 |
| 3.1.4. Поняття сили | 34 |
| 3.1.5. Механічні системи | 35 |
| 3.1.6. Імпульс. Закон збереження імпульсу | 35 |
| 3.1.7. Другий закон Ньютона. Межі його застосування | 36 |
| 3.1.8. Третій закон Ньютона | 37 |
| 3.1.9. Центр мас. Закон руху центру мас | 37 |
| 3.2. Робота і механічна енергія | 39 |
| 3.2.1. Робота, енергія, потужність | 39 |
| 3.2.2. Консервативні і дисипативні сили | 41 |
| 3.2.3. Кінетична енергія | 41 |
| 3.3.4. Потенціальна енергія | 42 |
| 3.2.5. Закон збереження енергії | 44 |
| 3.3. Сили в механіці | 45 |
| 3.3.1. Гравітаційні сили. Закон всесвітнього тяжіння | 45 |
| 3.3.2. Поле сил тяжіння. Напруженість і потенціал гравітаційного поля. | 47 |
| 3.3.3. Космічні швидкості | 49 |
| 3.3.4. Основні характеристики сили пружності | 50 |
| 3.3.5. Закон Гука | 52 |
| 3.3.6. Сили тертя | 53 |
| 4. РУХ ТІЛ У НЕІНЕРЦІАЛЬНИХ СИСТЕМАХ ВІДЛІКУ | 56 |
| 4.1. Неінерціальні системи відліку (НІСВ) | 57 |
| 4.2. Швидкість і прискорення в НІСВ | 58 |
| 4.3. Рівняння руху матеріальної точки відносно НІСВ | 61 |
| 4.4. Особливості сил інерції | 63 |
| 4.5. Поступальнйи та обертальний рухи у НІСВ | 63 |
| 4.6. Вплив обертання землі на рух тіл | 68 |
| 5. ОСНОВИ ДИНАМІКИ ОБЕРТАЛЬНОГО РУХУ ТВЕРДОГО ТІЛА | 69 |
| 5.1. Момент інерції | 70 |
| 5.2. Моменти інерції однорідних тіл | 70 |
| 5.3. Теорема Штейнера | 71 |
| 5.4. Кінетична енергія обертального руху | 71 |
| 5.5. Момент сили | 72 |
| 5.6. Основне рівняння динаміки обертального руху твердого тіла | 73 |
| 5.7. Момент імпульсу | 74 |
| 5.8. Закон збереження моменту імпульсу твердого тіла | 75 |
| 5.9. Порівняння основних величин і співвідношень для поступального руху тіла і його обертання навколо нерухомої осі | 77 |
| 5.10. Умови та види рівноваги твердого тіла | 77 |
| 6. МЕХАНІКА РІДИН І ГАЗІВ | 79 |
| 6.1. Основи механіки ідеальних рідин і газів. Основні поняття гідромеханіки | 80 |
| 6.2. Елементи гідростатики | 81 |
| 6.2.1. Закон Паскаля. Гідростатичний тиск | 81 |
| 6.2.2. Закон Архімеда | 82 |
| 6.3. Елементи гідрогазодинаміки | 83 |
| 6.3.1. Потік ідеальної рідини. Стаціонарний потік | 83 |
| 6.3.2. Теорема нерозривності течії | 83 |
| 6.3.3. Рівняння Бернуллі | 84 |
| 6.3.4. Формула Торічеллі | 85 |
| 6.4. Поняття про режими руху реальних рідин і газів | 87 |
| 6.4.1. Течія в’язкої рідини | 87 |
| 6.4.2. Види течій. Число Рейнольдса | 88 |
| 6.4.3. Закон Стокса | 89 |
| 7. МЕХАНІЧНІ КОЛИВАННЯ І ХВИЛІ | 91 |
| 7.1. Механічні коливання | 92 |
| 7.1.1. Гармонічні коливання та їх характеристики | 92 |
| 7.1.2. Диференціальне рівняння гармонічних коливань | 94 |
| 7.1.3. Пружинний маятник | 94 |
| 7.1.4. Математичний маятник | 95 |
| 7.1.5. Фізичний маятник | 96 |
| 7.2. Вплив зовнішніх сил на коливальні процеси | 98 |
| 7.2.1. Затухаючі коливання. Коефіцієнт затухання. Декремент затухання | 98 |
| 7.2.2. Вимушені коливання. Резонанс | 99 |
| 7.3. Механічні хвилі | 100 |
| 7.3.1. Хвильовий рух | 100 |
| 7.3.2. Фронт хвилі | 102 |
| 7.3.3. Рівняння плоскої хвилі | 103 |
| 8. ОСНОВИ РЕЛЯТИВІСТСЬКОЇ МЕХАНІКИ | 105 |
| 8.1. Основні уявлення класичної фізики | 106 |
| 8.2. Перетворення Галілея. Межі застосування механіки Ньютона. | 106 |
| 8.3. Постулати спеціальної теорії відносності | 108 |
| 8.4. Перетворення Лоренца і їх наслідки | 109 |
| 8.5. Основні співвідношення релятивістської динаміки | 110 |

**Лекція 1**

**ВСТУП.** ОСНОВНІ ФІЗИЧНІ АБСТРАКЦІЇ І ВИЗНАЧЕННЯ МЕХА­НІКИ

1.1. Предмет фізики. Роль фізики у розвитку і станов­ленні спеціа­ліста.

1.2. Основні завдання курсу фізики у вищих навчальних закладах.

1.3. Найбільш поширені математич­ні операції, які використо­вують­ся в курсі загальної фізики.

1.3.1. Векторні і скалярні ве­ли­­чи­­ни.

1.3.2. Оператори.

1.4. Міжнародна система одиниць (System International – SІ) вимі­рю­вання фізичних величин.

1.5. Механіка і її структура.

1.6. Моделі в механіці.

1.7. Механічний рух.

1.8. Основні характеристики руху ма­теріальної точки.

1.8.1. Відносність руху. Системи від­ліку.

1.8.2. Радіус-вектор у декартовій системі координат. Кіне­ма­тич­ні рівняння руху точки.

1.8.3. Траєкторія, довжина шля­ху, вектор переміщен­ня.

1.8.4. Швидкість матеріальної точки.

1.8.5. Прискорення матеріальної точки.

****

|  |  |
| --- | --- |
| **1.1. Предмет фізики. Роль фізики у розвитку і станов­ленні спеціа­ліста** | |
| Фізика – наука про найпростіші форми руху матерії і відповідні їм найбільш загальні закони природи. Досліджувані фізикою форми руху матерії (механічна, теплова, електрична, магнітна і т.д.) є складовими більш складних форм руху матерії (хімічних , біологічних та ін.), тому фізика є основою для інших природничих наук, таких як астрономія, біологія, хімія, геологія та ін.)  Фізика – база для створення нових галузей техніки – фунда­ментальна основа підготовки інженера. У своїй основі фізика – експериментальна наука: її закони базуються на фактах, встанов­лених дослідним шляхом. У результаті узагальнення експе­римент­альних фактів встановлюються фізичні закони – стійкі повторювані об'єктивні закономірності, що існують в природі, які встановлюють зв'язок між фізичними величинами. Ці закони являють собою строго певні кількісні співвідношення і формулюються на математичній мові. Закони фізики лежать в основі всіх природничих наук.  Виключно велика роль фізики в розвитку техніки. Накопи­чення фундаментальних знань призвело до появи найважливіших прикладних областей, наприклад, електротехніки, радіотехніки, мікроелектроніки, теорії машин і механізмів. Крім прикладного, фізика має загальноосвітнє значення. Сучасна фізика є частиною загальнолюдської культури. Із засобів масової інформації ми постійно дізнаємося про проблеми екології, економіки, енергетики. Всі ці питання неможливо зрозуміти, не знаючи сучасної фізики, яка бурхливо розвивається. | |
| **1.2. Основні завдання курсу фізики у вищих навчальних закладах** | |
| 1. Створення основ теоретичної підготовки в галузі фізики, що дозволить майбутнім інженерам орієнтуватися в потоці технічної інформації та забезпечить можливість використання фізичних принципів у тих областях, в яких вони спеціалізуються.  2. Формування наукового мислення, зокрема, правильного розуміння меж застосування різних фізичних понять і законів.  3. Вироблення прийомів і навичок вирішення конкретних завдань з різних областях фізики, що допоможе надалі вирішувати інженерні завдання. | |
| **1.3. Найбільш поширені математичні операції, які використо­вуються в курсі загальної фізики** | |
| **1.3.1. Векторні і скалярні величини** | |
| Фізичні величини, які характеризують фі­зич­ну систему і її стани (наприклад взає­мо­дію і механічний рух тіл) відображаються відповідними математичними об'єктами. Наприклад, щоб задати масу, температуру, об'єм тіла, треба визначити тільки їх числові значення у певних одиницях. Щоб задати силу або швидкість, треба обов'язково знати, крім числового значення, ще і їхній напрям у просторі, від чого залежить перебіг самого явища.  Фізичні величини, які виражаються тільки числом, називають **скалярними**, або **скалярами**. Математичні дії зі скалярними величинами визначаються відомими вам правилами арифметики. | |
| **Вектор**  **Дії над векторами**  **Додавання**  **векто­рів**  **Множення вектора на число**  **Проекція вектора на площині**  **Скалярний добуток векторів**  **Векторний добуток векторів** | Фізичні величини, які характери­зують­ся числовим значенням, напрямом і точкою прикладання, називають **вектор­ними**, або **векторами**. Числове значення вектора називають **модулем вектора**. Модуль век­то­ра – величина скалярна и додатна. Век­тор­ну фізичну величину зображають стріл­кою, довжина якої у вибраному масштабі дорівнює модулю вектора, а напрям збі­гається з напрямом фізичної величини (рис. 1.1). Якщо модуль вектора дорівнює ну­лю, то вектор зображується точкою.  Рис. 1.1. Вектор  Для додавання двох векторів і , їх переносять паралельно самим собі так, щоб початок одного з них збігався з кінцем іншого. Тоді вектор суми задається третьою стороною трикутника, що утво­рився, при­чому його початок збігається з початком першого вектора. Таке додаван­ня нази­вається **правилом трикутника** (рис. 1.2).  Рис. 1.2. Додавання векторів за правилом трикутника  Для додавання двох векторів і за **правилом паралелограма**, обидва ці вектора переносяться паралельно самим собі так, щоб їх початки збігалися. Тоді вектор суми задається діагоналлю побудо­ваного на них паралелограма, яка вихо­дить з їх спільного початку () (рис. 1.3).  Рис. 1.3. Додавання векторів за правилом паралелограма  Добутком вектора на число *n* нази­вають вектор, довжина якого дорів­нює , а напрям співпадає з напрямом вектора , якщо *n* > 0, або протилежний йому, якщо *n* < 0 (рис. 1.4).  *n* = – 2  *n* = 2  Рис. 1.4. Множення вектора на число  Будь-який вектор на площині OXY має дві проекції: , (рис. 1.5):  ,  .  Рис. 1.5. Проекція вектора на площині  Математична операція над двома [векторами](http://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%92%D0%B5%D0%BA%D1%82%D0%BE%D1%80), результатом якої є [скаляр](http://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D0%BA%D0%B0%D0%BB%D1%8F%D1%80), що обчислюється за формулою:  ,  де – кут між векторами і .  Б[ілінійна](http://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%91%D1%96%D0%BB%D1%96%D0%BD%D1%96%D0%B9%D0%BD%D0%B5_%D0%B2%D1%96%D0%B4%D0%BE%D0%B1%D1%80%D0%B0%D0%B6%D0%B5%D0%BD%D0%BD%D1%8F), антисиметрична операція на [векторах](http://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%92%D0%B5%D0%BA%D1%82%D0%BE%D1%80) у тривимірному просторі. Резуль­татом вектор­ного добутку є **вектор** (рис. 1.6), довжина якого чисельно дорівнює площі паралелограма, побудованого на векторах і , який перпендикулярний до площи­ни цих векторів і напрямлений так, щоб най­менше обертання від до навколо век­то­ра відбувалось проти годинникової стріл­ки, якщо дивитися з кінця вектора . Модуль вектора обчислюється за формулою:  ,  де – кут між векторами і .  Рис. 1.6. Векторний добуток векторів |
| **1.3.2. Оператори** | |
| **Оператор** позначає певну математичну операцію; виконуючи її, ми отримуємо замість даної функції істотно іншу функцію.  Наприклад, оператор , застосований до функції *f*(*x*, *y*, *z*), дає частинну похідну за *x*. | |
| **Векторний оператор Гамільтона (набла)**  **Градієнт функції**  **Циркуляція вектора**  **Потік вектора** | Застосування формул векторного ана­лізу значно спрощується, якщо внести векторний диференціальний оператор, який має назву **набла**. Цей оператор являє собою вектор з компонентами  .  Сам по собі цей вектор не має змісту. Але в поєднанні із скалярною або векторною функцією, на яку оператор набла символічно помножується, він на­би­рає змісту.  Якщо вектор набла помножити на скаляр, то внаслідок цього отримаємо вектор  ,  Який отримав назву **градієнта функції**.  Градієнт функції у даній точці напрямлений у бік її максимального зростання і за модулем дорівнює швидкості зростання функції у даному напрямку.  Циркуляція будь-якого вектора за довільним замкнутим контуром *Г* (рис. 1.7) дорівнює  =,  де – проекція вектора на напрямок .    Рис. 1.7. Циркуляція вектора  Потік вектора через площу *S* дорів­нює  .  де – проекція вектора на напрямок нормалі до площі *dS*, який збігається з напрямком вектора .  **Потік вектора** ­– це алгебраїчна вели­чина, його знак залежить від вибору на­прямку нормалі до елементарної пло­щадки  *dS*. Саме напрямок цієї нормалі визначає напрям вектора . |
| **1.4. Міжнародна система одиниць**  **(System International – SІ) вимі­рю­вання фізичних величин** | |
| Для встановлення кількісних співвідношень між фізичними величинами їх необхідно вимірювати, тобто порівнювати з відповідними еталонами. Для цього вводиться система одиниць, яка постулює **основні одиниці фізичних величин** і на їх базі визначає одиниці інших фізичних величин, які називаються **похідними одиницями**. | |
| **Основні одиниці**  **Метр** (м)  **Кілограм** (кг)  **Секунда** (с)  **Ампер** (А)  **Кельвін** (К)  **Моль** (моль)  **Кандела** (кд)  **Додаткові одиниці системи**  **Радіан** (рад)  **Стерадіан** (ср)  **Похідні одиниці системи** | – довжина шляху, яку проходить світло у вакуумі за с.  – маса, яка дорівнює масі міжнародного прототипу кілограма (платиноіридієвого циліндра, що зберігається у міжнародному бюро мір і ваг у Франції).  – час, який дорівнює 9192631770 періодам випромінювання, що відповідає переходу між двома надтонкими рівнями основного стану атома цезію-133.  – сила змінного струму, який при проходженні по двох паралельних прямолінійних провідниках нескінченої довжини і дуже малого поперечного перерізу, розміщених у вакуумі на відстані 1 м один від одного, створює між цими провідниками на кожен метр довжини силу, що дорівнює 2∙10-7 Н.  – частина термодинамічної темпе­ратури потрійної точки води.  – кількість речовини системи, яка містить стільки ж структурних елементів, скільки атомів міститься у 12 г ізотопу карбону 12С.  – сила світла у заданому напрямку джерела, що випускає монохроматичне випромінювання частотою 540∙1012 Гц, енергетична сила світла якого в цьому напрямку становить Вт/ср.  – кут між двома радіусами кола, довжина дуги між якими дорівнює радіусу.  – тілесний кут з вершиною у центрі сфери, який вирізає на поверхні сфери площу рівну площі квадрата зі стороною, що дорівнює радіусу сфери.  Встановлюються на основі фізичних законів, що пов’язують їх з основними одиницями вимірювання. |

|  |  |
| --- | --- |
| **1.5. Механіка і її структура** | |
| **Механіка**  **Сучасна механіка** – це  **ньютонівська чи класична механіка,**  **релятивістська механіка,**  **квантова механіка** | розділ фізики, в якому вивчаються законо­мірності механічного руху та взаємодії тіл.  в якій розглядаються рухи макро­скопічних тіл, що рухаються з швид­кос­тями, у багато ра­зів меншими від швид­кості світла у вакуумі.  яка вивчає закони руху тіл з швид­костями, порівняними із швидкістю світла у вакуумі. Вона ґрунтується на теорії відносності, створеній А.Ейнштей­ном у 1905-1914 рр.  вивчає закони руху атомів і елементарних частинок. |
| **Розділи механіки**  **Кінематика**  **Динаміка**  **Статика** | – частина механіки, яка вивчає рух тіл без вияснення причин, що обумовили цей рух.  вивчає закони руху тіл і причини, які викликають або змінюють цей рух.  вивчає закони рівноваги системи тіл. |
| **1.6. Моделі в механіці** | |
| Механіка для опису руху тіл залежно від умов конкретних задач використовує різні спрощені **фізичні моделі:** | |
| **Матеріальна точка**  **Абсолютно тверде тіло**  **Абсолютно пружне тіло**  **Фізичний простір**  **Час** | – тіло, геометричними розмірами якого за умов даної задачі можна знехтувати і вважати, що вся маса тіла зосереджена в геометричній точці. Вивчення руху мате­ріальної точки важливе не тільки тому, що воно дає можливість описати рух реального тіла, але і тому, що дозволяє побудувати точну теорію руху будь-якого реального тіла як сукупності матеріальних точок.  – тіло, деформацією якого в умовах даної задачі можна знехтувати і відстань між будь-якими двома точками цього тіла залишається сталою.  – тіло, деформація якого підкоряється закону Гука, а після припинення зовніш­ньої дії таке тіло повністю відновлює свої початкові розміри і форму.  **трьохвимірний** (положення тіла пов­ністю визначається трьома координатами); **ізо­троп­ний** (властивості за всіма виді­ле­ними напрямами одинакові і не змінюють­ся); **однорідний** (властивості простору у всіх його точках однакові).  **одновимірний** (на осі часу можна помістити стрілку, яка вказуватиме напрям); **однорідний** (властивості часу в усіх точках напряму часу однакові); **однаково протікаючий**. |
| **1.7. Механічний рух** | |
| **Механічний рух**  **Поступальний рух**  **Обертальний рух** | – це зміна взаємного положення тіла в просто­рі з часом.  Будь-який рух твердого тіламожна представити як **комбінацію поступаль­ного і обертального рухів**.  – це рух, при якому будь-яка пряма, що жорстко пов'язана з тілом, залишається паралельною своєму початковому положен­ню (рис. 1.8).    Рис. 1.8. Поступальний рух тіла  – це рух, при якому всі точки тіла рухаються по колах, центри яких лежать на одній і тій прямій, яка називається **віссю обертання.** |
| **1.8. Основні характеристики руху ма­теріальної точки** | |
| **1.8.1. Відносність руху. Системи від­ліку** | |
| Поняття руху має строго визначений зміст тільки тоді, якщо вказано тіло (або система тіл), відносно якого відбувається рух роз­глядуваного тіла. У цьому суть фундаментальної властивості при­ро­ди, зміст якої полягає в тому, що **будь-який рух відносний**. Відносність руху означає, що в різних системах відліку рух буде описуватися по-різному. | |
| **Система відліку**  **Тіло відліку** | – координатна система з годинником для відліку часу, пов’язана з реальним тілом.  – це довільно вибране реальне тіло, відносно якого визначається положення інших тіл. |
| **1.8.2. Радіус-вектор у декартовій системі координат.**  **Кіне­ма­тич­ні рівняння руху точки.** | |
| **Декартова система координат**  **Розклад радіус-вектора на складові вздовж координатних осей**  **Кінематичні рівняння руху точки**  **Число ступеней вільності**  ***і*** | – це три взаємно перпендикулярні осі Х, Y, Z, тіло відліку О та годинник для відліку часу.  Положення матеріальної точки М відносно цієї системи відліку можна задати двома способами:   * **координатами** х, y, z; * **радіус-вектором**  (рис. 1.9).     *Y*  Рис. 1.9. Представлення радіус-вектора в декартовій системі координат  Якщо ввести три одиничні вектори , , , напрямлені вздовж координатних осей, то радіус вектор можна представити у вигляді суми трьох векторів:  ,  а довжина вектора дорівнює  .  При русі точки її радіус-вектор і коор­ди­­нати змінюються і є функціями від часу. Ці рівняння називають **кінематич­ними рівняння­ми руху точ­ки**, задани­ми відпо­відно у **вектор­ній, коорди­натній** і **траєкторній** формах:  **;**  **,**  **.**  Кінематичні рівняння руху задають траєкторію руху тіла у параметричній формі, параметром служить час *t*.  – кількість незалежних координат, які повністю визначають положення тіл (матеріальних точок) у просторі.  Отже, матеріальна точка має три ступені вільності поступального руху (*i* = 3). Якщо матеріальна точка рухається вздовж прямої, то вона має тільки одну ступінь вільності (*i* = 1). Якщо матеріальна точка здійснює рух на площині, то вона володіє двома ступенями вільності (*і* = 2).  Абсолютно тверде тіло має шість ступенів вільності (*i* = 6): три поступального і три обертального рухів. |
| **1.8.3. Траєкторія, довжина шля­ху, вектор переміщен­ня** | |
| **Траєкторія**  **Довжина шляху** (**дугова координата**)  **Переміщення** | – лінія в просторі, яку описує матеріальна точка під час свого руху.  – довжина дуги, що відраховується вздовж траєкторії від деякої точки, яка взята за початок відліку.  Довжина шляху – скалярна функція часу (рис. 1.10): .    Рис. 1.10. Траєкторія та довжина шляху  – це векторна величина, яка вказує в якому напрямі і на яку відстань перемістилась матеріальна точка.  **Одиниця вимірювання** переміщення – **метр** (м). |
| **1.8.4. Швидкість матеріальної точки** | |
| **Середня швидкість**  **Миттєва швидкість**  **Модуль швидкості**    **Геометричний зміст швидкості**  **Геометричний зміст переміщення** | – фізична величина, що визна­чається відношенням переміщення, яке здійснила матеріальна точка за певний проміжок часу, до величини цього часу (рис. 1.11):  **Середня швидкість** – величина век­тор­на, її напрям завжди співпадає з напря­мом вектора переміщення.  – це фізична вели­чина, що визна­чається границею, до якої наближаєть­ся середня швидкість, за умови, коли проміжок часу прямує до нуля:  Миттєва швидкість – це векторна вели­чина, яка дорівнює першій похідній від век­то­ра переміщення за часом і напрямлена вздовж дотичної до траєкторії в бік руху (рис. 11).    Рис. 1.11. Середня та миттєва швидкість  дорівнює першій похідній пройденого шляху за часом, якщо рух відбувається тільки вздовж одного напряму:  **Одиниця вимірювання** швидкості – **метр за секунду** (м/с).  На рис. 1.12 зображено залежність про­йде­­ного шляху від часу. Вектор швидкості напрямлений вздовж дотичної до кривої *s*(*t*) у момент часу *t*. З рисунка видно, що кут нахилу дотичної до осі *t* дорівнює    Рис. 1.12. Геометричний зміст швидкості  Інтегруючи вираз в інтервалі часу від *t*1 до *t*2, отримаємо формулу, яка дозволяє обчислити шлях, пройдений тілом за час *t*2– *t*1, якщо відома залежність його швидкості від часу  Згідно визначення інтегралу, пройдений шлях являє собою площу, обмежену кривою в інтервалі часу від *t*1 до *t*2. |
| **1.8.5. Прискорення матеріальної точки** | |
| **Прискорення**  **Середнє**  **приско­рення**  **Миттєве прискорення** | Миттєва швидкість може змінюватися як за модулем, так і за напрямом. Тому для характеристики швидкості зміни швидкості вводять фізичну величину – **прискорення**. Це векторна величина, напрям вектора прискорення завжди співпадає з напрямом вектора зміни швидкості.  – вели­чина, яка дорівнює відно­шен­ню змі­ни швидкості тіла до інтерва­лу часу, протягом якого ця зміна відбулася  Прискорення у даний момент часу або у даній точці траєкторії руху; визначається границею, до якої прямує середнє прискорення при :  Таким чином, прискорення матеріаль­ної точки дорівнює першій похідній швидкості або другій похідній радіус-вектора рухомої точки за часом.  **Одиниця вимірювання** прискорення – **метр за секунду у квадраті** (м/с2). |

****

**Лекція 2**

ОСНОВИ КІНЕМАТИКИ

2.1. Поступальний прямолінійний рух.

2.1.1. Прямолінійний рівномір­ний рух.

2.1.2. Прямолінійний нерівно­мір­ний рух.

2.2. Криволінійний рух. Танген­ціаль­не та нормальне приско­рення.

2.3. Класифікація рухів з урахуван­ням тангенціальної та нормаль­ної складових прискорення.

2.4. Кінематика обертального руху.

2.4.1. Фізичні величини, які опи­сують обертальний рух.

2.4.2. Рівномірний обертальний рух.

2.4.3. Рівноприскорений обер­тальний рух.

|  |  |
| --- | --- |
| **2.1. Поступальний прямолінійний рух** | |
| **2.1.1. Прямолінійний рівномірний рух** | |
| **Прямолінійний рух**  **Рівномірний рух** | – рух, при якому напрям швидкості з часом залишається сталим.  ­– рух, при якому модуль швидкості з часом залишається сталим  **.**  При цьому переміщення дорівнює  Графік залежності шляху рівномірного прямолінійного руху матеріальної точки від часу (рис. 2.1) являє собою пряму, яка утворює з віссю часу кут    Рис. 2.1. Залежність шляху рівномірного прямолінійного руху матеріальної точки від часу  Графік швидкості рівномірного прямо­лінійного руху наведено на рис. 2.2.    Рис. 2.2. Графік швидкості рівномірного прямолінійного руху матеріальної точки |
| **2.1.2. Прямолінійний нерівно­мір­ний рух** | |
| **Нерівно­мір­ний рух** | – рух, при якому модуль швидкості з часом змінюється.  При цьому довжина шляху, який пройшло тіло за проміжок часу від *t*1 до *t*2, задається інтегралом:  Якщо модуль швидкості з часом зростає, то такий рух називається **приско­реним** (рис. 2.3, 1), якщо зменшується, то – **сповільненим** (рис. 2.3, 2).  Рис. 2.3. Графік швидкості нерівномірного прямолінійного руху матеріальної точки |
| **2.2. Криволінійний рух.**  **Тангенціальне та нормальне прискорення** | |
| **Криволінійний рух**  **Прискорення при криволінійному русі**  **Тангенціальне прискорення**    **Нормальне прискорення**    **Виведення формули нормального (доцентрового) прискорення** | – рух, при якому напрям швидкості з часом змінюється (рис. 1.11).  Якщо траєкторія матеріальної точки – плоска крива, то вектор прискорення лежить в цій площині. Тоді прискорення зручно розкласти на дві складові вздовж напрямів *n* і *τ*, де *n* – нормаль, *τ* – дотична до траєкторії в даній точці ( рис. 2.4).    Рис. 2.4. Представлення прискорення при плоскому криволінійному русі  Характеризує зміну швидкості за вели­чиною і напрямлене вздовж дотичної до даної точки траєкторії  Характеризує зміну швидкості за напрямом і напрямлене вздовж миттєвого радіуса кривизни *R* до центру.  Вектор співпадає за напрямом з і напрямлений до центру кривизни. З рис. 2.5. видно, що трикутники, побудовані на векторах швидкостей (, , ) і на радіусах (Δ AOB) подібні.    Рис. 2.5. Доцентрове прискорення  Тоді  Таким чином, у загальному випадку плоского криво­лінійного руху вектор при­ско­рення зручно представляти у вигляді суми двох проекцій:  ⇒ ,  де – кут між вектором прискорення і до­тич­­ною до траєкторії руху матеріальної точ­ки в даний момент часу. |
| **2.3. Класифікація рухів з урахуван­ням тангенціальної та нормаль­ної складових прискорення** | |
| **Прямолінійний рівномірний рух**  **Прямолінійний нерівномірний (рівноприскорений) рух**  **Рівномірний рух по колу**  **Криволінійний нерівномірний рух** | Якщо *t*0 = 0, то  **,** |
| **2.4. Кінематика обертального руху** | |
| При описі обертального руху зручно користуватися поляр­ними координатами *R* і *φ*, де *R* – **радіус** – відстань від полюса (центра обертання) до матеріальної точки, а *φ* – **полярний кут** (кут повороту) (рис. 2.6).    Рис. 2.6. Кінематика обертального руху  **Елементарні повороти** (позначаються або ) можна розглядати як **псевдовектори.** | |
| **2.4.1. Фізичні величини, які опи­сують обертальний рух** | |
| **Кутове переміщення**    **Кутова швидкість**  **Кутове прискорення**  **Лінійна швидкість** | – векторна величина, модуль якої дорівнює відно­шенню довжини дуги Δ*S*, пройденої точкою, що обертається, до радіусу *R*, а напрям співпадає з напрямом поступального руху правого свердлика.  **Одиниця вимірювання** кутового пере­міщення – **радіан** (рад):  1 рад =  Якщо за проміжки часу тіло здійснило обертан­ня на кут , то границю, до якої прямує від­ношення  при , нази­вають **кутовою швидкістю**:  Напрям кутової швидкості співпадає з напрямом кутового переміщення (вздовж осі обертання згідно правила правого свердлика).  **Одиниця вимірювання** кутової швид­кості – **радіан за секунду** (рад/с).  Обертання тіла із сталою кутовою швид­кістю називають **рівномірним**. **Нерів­номірне обертання** характери­зують за допомогою **кутового приско­рення**.  Якщо за малий проміжок часу кутова швидкість змінилась на величину , то границю, до якої прямує відношення при , називають **кутовим приско­ренням**:  Вектор кутового прискорення напрям­лений вздовж осі обертання в сторону вектора при­росту кутової швидкості (при прискореному обертанні його напрям співпадає з напрямом кутової швидкості, при сповільненому – протилежний йому).  **Одиниця вимірювання** кутового при­ско­рення – **радіан за секунду в квад­раті** (рад/с2).  Лінійна швидкість точки пов'я­зана з ку­то­вою швидкістю і радіусом траєкторії спів­відно­шен­ням: |
| **2.4.2. Рівномірний обертальний рух** | |
| При **рівномірному обертальному русі** () вико­нуєть­ся співвідношення:  Рівномірне обертання тіла характеризується також періодом обертання *Т* і частотою обертання *n*. | |
| **Період обертання**  ***Т***  **Частота обертання**  ***ν***  **Взаємозв’язок кутової швидкості з періодом і частотою**  **Взаємозв’язок лінійної швидкості з частотою**  **Взаємозв’язок прискорення з кутовою швидкістю** | – час, протягом якого тіло здійснює один повний оберт навколо осі обертання:  **Одиниця вимірювання** періоду обертан­ня – **секунда** (с).  – це кількість повних обертів, які тіло здійснює за одиницю часу:  **Одиниця вимірювання** частоти обертан­ня – **Герц** (Гц).  Кутова швидкість тіла, що рівномірно обертається, пов’язана з періодом і часто­тою співвідношенням: |
| **2.4.3. Рівноприскорений обер­тальний рух** | |
|  |  |

**Лекція 3**

ОСНОВИ ДИНАМІКИ

3.1. Динаміка матеріальної точ­ки.

3.1.1. Інерція. Інертність.

3.1.2. Маса. Адитивність і закон збе­реження маси.

3.1.3. Інерціальні системи відлі­ку. Перший закон Ньютона.

3.1.4. Поняття сили.

3.1.5. Механічні системи.

3.1.6. Імпульс. Закон збереження ім­пульсу.

3.1.7. Другий закон Ньютона. Ме­жі його застосування.

3.1.8. Третій закон Ньютона.

3.1.9. Центр мас. Закон руху цент­ру мас.

3.2. Робота і механічна енергія.

3.2.1. Робота, енергія, потужність.

3.2.2. Консервативні і дисипа­тив­ні сили.

3.2.3. Кінетична енергія.

3.2.4. Потенціальна енергія.

3.2.5. Закон збереження енергії.

3.3. Сили в механіці.

3.3.1. Гравітаційні сили. Закон всесвіт­ньо­го тяжіння.

3.3.2. Поле сил тяжіння. Напру­же­ність і потенціал гравітацій­ного поля.

3.3.3. Космічні швидкості.

3.3.4. Основні характеристики сили пружності.

3.3.5. Закон Гука.

3.3.6. Сили тертя.



|  |  |
| --- | --- |
| **3.1. Динаміка матеріальної точ­ки** | |
| **3.1.1. Інерція. Інертність** | |
| **Інерція**  **Інертність** | – явище збереження швидкості руху тіла за відсутності зовнішніх впливів чи при їх компенсації.  ­– властивість тіла зберігати стан спокою або рівномірного прямолінійного руху за відсутності дії на нього інших тіл.  При дії нерівноважної системи сил інертність проявляється в тому, що тіло змінює свій рух поступово і тим повіль­ніше, чим більша його маса. |
| **3.1.2. Маса. Адитивність і закон збе­реження маси** | |
| **Маса**  ***m*** | – кількісна міра інертності тіла.  При однаковій дії зі сторони навко­лиш­ніх тіл одне тіло може швидко змінювати свою швидкість, а інше у тих же умовах – значно повільніше. У цьому випадку друге тіло володіє більшою інертністю і має більшу масу.  **Одиниця вимірювання** маси – кілограм (кг).  **Маса – величина адитивна**, тобто маса системи тіл дорівнює сумі їхніх мас:  ***m* = *m*1 *+ m*2 *+ …***  В цьому полягає **закон збереження маси**. |
| **3.1.3. Інерціальні системи відлі­ку. Перший закон Ньютона** | |
| **Інерціальні системи відліку**  **Перший закон Ньютона** | – це системи відліку, відносно яких тіла зберігають стан спокою або рівномірного прямолінійного руху, якщо на них не діють інші тіла, або дія інших тіл компенсується.  **Існують такі системи відліку, від­нос­но яких тіла зберігають стан спокою або рівномірного прямолінійного руху, якщо на них не діють інші тіла, або дія інших тіл скомпенсована**  **, то** .  Перший закон Ньютона називають **законом інерції**, оскільки він формулює умову, при якій тіло зберігає свою швидкість, або стан спокою. |
| **3.1.4. Поняття сили** | |
| **Сила** | – це векторна величина, яка є мірою механічної дії на тіло інших тіл чи полів, в результаті чого тіло отримує прискорення чи змінює форму і розміри.  **Фізичне поле**, або просто **поле** – особлива форма матерії, яка пов’язує частинки речовини в єдині системи та передає з кінцевою швидкістю дію одних частинок на інші.  Механічна взаємодія може здійсню­ва­тись як між безпосередньо контактуючими тілами (наприклад, при ударі, терті і т. д.), так і між віддаленими тілами.  **Сила** **повністю задана**, якщо вка­зані її модуль *F*, напрям у просторі та точка прикладання.  Одночасна дія на матеріальну точку декількох сил еквівалентна дії однієї сили, яка називається **рівнодійною,** або **ре­зуль­туючою силою** і дорівнює їх гео­мет­ричній сумі.    Рис. 3.1. Зображення рівнодійної сили  **Одиниця вимірювання** сили – **ньютон** (Н). |
| **3.1.5. Механічні системи** | |
| **Механічна система** | – це сукупність матеріальних точок (тіл), які розглядаються як єдине ціле.  Сили, що діють між тілами цієї системи, нази­вають **внутрішні­ми силами**. Сили, що діють на систему з боку тіл, які не вхо­дять до її складу, називають **зовнішніми силами**. Якщо зовнішні­ми силами можна знехтувати, то таку систему на­зивають **замкнутою**. У замкнутій системі діють лише внутрішні сили; результуюча зов­ніш­ня сила, яка діє на систему, дорівнює нулю. |
| **3.1.6. Імпульс. Закон збереження ім­пульсу** | |
| **Імпульс**,  або **кількість руху** матеріальної точки  **Закон збереження імпульсу** | – векторна величина, яка дорівнює добут­ку маси мате­ріальної точки на її швид­кість і має напрям швидкості  .  **Імпульс замкнутої системи з часом не змінюється (зберігається):**  Закон збереження імпульсу є **наслід­ком однорідності простору**: при пара­лель­ному перенесенні в просторі замкне­ної системи тіл як цілого, її фізичні влас­ти­вості не змінюються (не залежать від вибору положення початку координат інер­ціальної системи відліку). |
| **3.1.7. Другий закон Ньютона. Межі його застосування** | |
| **Другий закон Ньютона**  **Межі застосування ІІ закону Ньютона** | – **основний закон динаміки посту­пального руху** – відповідає на питання, як здійснюється механічна дія матеріаль­ної точки під дією прикладених до неї сил.  **Прискорення тіла прямо пропор­ційне при­кла­деній до нього силі і обернено пропорційне його масі**. **Тіло при­ско­рюєть­ся в напрямку, який спів­падає з на­прям­ком прикладеної сили**:  Більш загальне формулюваннядруго­го закону Нью­то­на: **швидкість змі­ни кіль­кос­ті руху тіла дорівнює рів­но­дійній усіх сил, що діють на тіло**:  Векторна величина називається **елементарним імпульсом сили** за малий час *dt* її дії і дорівнює  Основний закон динаміки матеріаль­ної точки виражає **принцип при­чин­ності в класичній механіці** – одно­значний зв'я­зок між зміною впродовж пев­ного часу стану і положення в просторі матеріальної точки та діючими на неї силами, що дозволяє, знаючи початковий стан мате­ріальної точки, обчислити його в будь-який наступний момент часу.  Другий закон Ньютона є справедливим тільки в інерціальних системах відліку. Оскільки система відліку, пов’язана із Землею, є неінерціальною внаслідок її добового обертання навколо власної осі та обертання навколо Сонця, то закони Ньютона тут виконуються тільки наближено.  З іншого боку, виявляється, що II закон Ньютона у вигляді навіть у інер­ціальних системах відліку має наближе­ний характер, оскільки, як буде встанов­лено в спеціальній теорії відносності, під час руху з швидкостями, близькими до швидкості світла, маса тіла залежить від його швидкості.  Відхилення від законів класичної ме­ха­ніки Ньютона спостерігається також у мікросвіті, де уявлення та закони класич­ної механіки втрачають зміст і в дію всту­пають закони квантової механіки. |
| **3.1.8. Третій закон Ньютона** | |
| **Третій закон Ньютона** | **Будь-яка дія матеріальних точок одна на одну має характер взаємодії; сили, з якими діють одна на одну матеріальні точки завжди рівні за модулем, проти­лежно напрямлені і діють вздовж прямої, що з'єднує ці точки:**  Ці сили прикладені до різних мате­ріаль­них точок (тіл), **завжди діють парами і є силами одної природи.** |
| **3.1.9. Центр мас. Закон руху цент­ру мас** | |
| **Центр мас**  **системи матеріальних точок**  **Радіус-вектор центра мас**  **Координати центра мас**  **Закон руху центра мас** | У системі матеріальних точок існує точ­ка, яка при відсутності дії зовнішніх сил рухається по прямій лінії. Цю точку нази­вають **центром мас**, або **центром інерції**.  **Центром мас системи матеріаль­них точок** називають точку, в якій зібралася б уся маса системи матеріаль­них точок при взаємодії їх з силами притягання, що нескінченно зростають.  для тіл з дискретним розподілом мас визначається за формулою:  де – відповідно маси, радіуси-вектори матеріальних точок і маса всієї системи.  визначаються за допомогою таких виразів:  де – координати матеріальних точок, маси яких .  **Центр мас твердого тіла або системи тіл рухається так, як рухалася б під дією прикладених сил матеріальна точка, маса якої дорів­нює масі тіла або системи тіл:**  Із закону збереження імпульсу можна зробити висновок: **центр мас замкне­ної системи або рухається прямолінійно і рівномірно, або зали­шається нерухо­мим**. |
| **3.2. Робота і механічна енергія** | |
| **3.2.1. Робота, енергія, потужність** | |
| **Енергія**  ***W***  **Робота**  ***А***  **Частинні випадки обчислення роботи**  **Потужність**  ***N*** | – це універсальна міра різних форм руху і взаємодії.  З різними формами руху матерії пов'язують різні форми енергії: механічну, теплову, електромагнітну і т.д. Зміна механічного руху тіла викликається силами, що діють на нього з боку інших тіл.  **Одиниця вимірювання** енергії – **джоуль** (Дж).  – це кількісна характеристика процесу обміну енергією між взаємодіючими тілами.  Вона дорівнює скалярному добутку векторів сили і переміщення  Під час прямолінійного руху тіла під дією сталої сили , яка складає деякий кут *α* з напрямом переміщення (рис. 3.2), робота цієї сили дорівнює:  де – проекція вектора сили на напрям руху тіла.    Рис. 3.2    Якщо сила з часом змінюється, то для обчислення величини роботи траєкторію руху тіла поділяють на елементарні ділянки (рис. 3.3), в межах яких можна вважати величину сили сталою. Робота сили на кожній ділянці шляху , а на шляху *s*:  При отримаємо:    Рис. 3.3. Графічне представлення роботи  Таким чином, робота визначається площею криволінійної фігури під графіком *F(s)*.  **Одиниця вимірювання** роботи – **джоуль** (Дж).  – фізична величина, яка характеризує швидкість виконання роботи і дорівнює скалярному добутку вектора сили на вектор швидкості, з якою рухається точка прикладання цієї сили:  **Одиниця вимірювання** потужності – **ват** (Вт). |
| **3.2.2. Консервативні і дисипа­тив­ні сили** | |
| **Консервативні** (**потенціальні) сили**  **Дисипативні сили** | – сили, робота яких не залежить від форми траєкторії, а визначається тільки почат­ковим і кінцевим положенням тіла в просторі.  До них належать сили тяжіння, сили пружності. Сили будуть консервативними при умові, коли в системі немає переходу механічного руху в інші форми руху матерії або перетворення інших форм руху в механічний.  Поля консервативних сил називаються **потенціальними**.  – сили, робота яких при переміщенні тіла залежить від траєкторії руху. Прикладом дисипативних сил є сили тертя. |
| **3.2.3. Кінетична енергія** | |
| **Кінетична енергія *Wk*** | – це енергія механічного руху цієї системи.  Сила, діючи на тіло, що перебуває в стані спокою, і викликаючи його рух, здійснює роботу, а енергія рухомого тіла зростає на величину затраченої роботи. Таки чином **приріст кінетичної енергії тіла на елементар­ному перемі­щенні дорівнює елементарній ро­бо­ті *dA* на тому ж перемі­щенні:**  Отже, тіло масою *m*, яке рухається зі швидкістю , володіє **кінетичною енер­гією**:  Кінетична енергія залежить тільки від маси і швидкості тіла. Тому кінетична енергія є:   * функцією стану системи; * завжди додатна; * неоднакова в різних інерціаль­них системах відліку. |
| **3.2.4. Потенціальна енергія** | |
| **Потенціальна енергія**  ***Wр***  **Потенціальна енергія тіла, піднятого над землею**  **Потенціальна енергія в полі сили тяжіння Землі**  **По­тенціаль­на енергія пружини** | – це механічна енергія системи тіл, яка визначається їх взаємним розміщенням і характером сил взаємодії між ними.  Потенціальна енергія системи, так як і кінетична, є функцією стану системи. Вона залежить від того, яке положення системи умовно взято за початок відліку.  Піднімаючи тіло масою *m* на певну висоту *h* над вихідним рів­нем, ми виконуємо роботу проти сил тяжіння, завдяки чому тіло на­бу­ває **гравітаційної** **потенціальної енергії**:  **Робота дорівнює зміні потенціаль­ної енергії, узятої з протилежним зна­ком**:  Із закону всесвітнього тяжіння маємо  Робота дорівнює зміні потенціальної енергії  тоді  З отриманого рівняння видно, що потенціальна енергія гравітаційної взаємо­дії дорівнює  залежить від природи мате­ріалу, із якого виготовле­на пружина, і ні в якому разі не залежить від її інертної маси, як це спостерігається у випадку граві­таційної потенціальної енергії:  Потенціальна енергія визначається з точністю до довільної сталої. Початок відліку потенціальної енергії визначається з міркувань зручності. Точно можна визначити тільки різницю потенціальних енергій.  Залежно від вибору нульового зна­чен­ня потенціальної енергії може створитися ситуація, коли тіло буде мати від'ємну потенціальну енергію. У цьому випадку говорять, що тіло перебуває в **потен­ціль­ній ямі (**рис. 3.4). Поняття потенціальної ями має важливе значення у фізиці, зокрема, в квантовій механіці.    Рис. 3.4. Залежність величини потенціальної енергії від вибору її нульового значення |
| **3.2.5. Закон збереження енергії** | |
| **Повна механічна енергія системи**  **Закон збереження енергії** | – енергія механіч­ного руху і взаємодії; дорівнює сумі кінетичної і потен­ціальної енергій:  **У системі тіл, між якими діють тільки консервативні сили, повна механічна енергія зберігається:**  Механічні системи, на тіла яких діють тільки консервативні сили, називаються **консервативними системами**. У них можуть відбуватися тільки перетворення кінетичної енергії в потенціальну і навпаки в еквівалентних кількостях, так що повна механічна енергія залишається сталою.  **Дисипативні системи** – це системи, в яких механічна енергія поступово змен­шується за рахунок перетворення в інші (немеханічні) форми енергії. У системі, в якій діють такі неконсервативні сили, наприклад сили тертя, повна механічна енергія системи не зберігається, але при цьому завжди виникає еквівалентна кількість енергії іншого виду.  Таким чином, **енергія ніколи не зни­кає і не з'являється знову, вона тільки переходить з одного виду в інший**. |
| **3.3. Сили в механіці** | |
| **3.3.1. Гравітаційні сили. Закон всесвіт­ньо­го тяжіння** | |
| **Гравітація**  **Сила тяжіння**  **Вага тіла**  **Невагомість**  **Закон всесвітнього тяжіння**  **Фізичний зміст** **гравітаційної сталої**  **Інертна маса**  **Гравітаційна маса** | – це універсальна взаємодія між будь-якими видами матерії.  Класичну нерелятивістську теорію гравітації створив Ньютон. Він відкрив закон всесвітнього тяжіння. Гравітаційна взаємодія здійснюється через гравітаційне поле.  У системі відліку, пов'язаній з Землею, згідно другого закону Ньютона, на будь-яке тіло масою *m* діє сила:  Це **сила тяжіння** – сила, з якою тіло притягається до Землі. Під дією сили притягання до Землі всі тіла падають з однаковим прискоренням *g* = 9,81 м/c2, яке називається **прискоренням вільного падіння**.  – це сила, з якою тіло внаслідок притягання до Землі, діє на опору або натягує підвіс. Сила тяжіння діє завжди, а вага проявляється тільки тоді, коли на тіло крім сили тяжіння діють інші сили. **Сила тяжіння дорівнює вазі тіла** тільки в тому випадку, коли прискорення тіла відносно Землі дорівнює нулю:  У загальному випадку вага тіла, що рухається з прискорен­ням відносно Землі, дорівнює:  Якщо тіло вільно рухається в полі сили тяжіння, то і вага дорівнює нулю, тобто тіло буде невагомим.  – це стан тіла, при якому воно рухається тільки під дією сили тяжіння.  **Між будь-якими двома тілами діє сила взаємного притягання, прямо пропор­ційна добутку їхніх мас і обернено пропорційна квадрату від­стані між ними:**  де *G* = 6,67.10-11 Н.м2.кг-2 – **гравітаційна стала**, яка характеризує інтенсивність гравітаційної взаємодії.  можна визначити з самого закону: **це величина, яка чисельно дорівнює си­лі притягання між двома тілами масами по одному кіло­гра­му, розташованих на відстані один метр одне від одного**.  Масу тіла можна визначити шляхом вимірювання приско­ре­ння тіла під дією відомої сили, скориставшись другим законом Ньютона:  Маса, яка визначається таким чином, характеризує інерційні вла­сти­вості тіла, тобто його здатність набувати приско­рення під дією сил. Цю масу називають **інертною масою** і позначають *mін*.  Масу тіла можна також визначити, вимірюючи його силу тяжіння до іншого тіла, наприклад до Землі:  Визначена в такий спосіб маса нази­вається **гравітаційною ма­сою** і позна­чаєть­ся *mгр*. Вона характеризує здатність тіл створювати поле тяжіння, а також виражає ступінь взаємодії на тіла з боку інших гравітаційних полів. |
| **3.3.2. Поле сил тяжіння.**  **Напру­же­ність і потенціал гравітацій­ного поля** | |
| **Напруженість гравітаційного поля**  **Робота гравітаційного поля**  **Потенціальна енергія гравітаційного поля**  **Потенціал гравітаційного поля**  **Взаємозв’язок між напруженістю поля та його потенціалом** | Гравітаційна взаємодія між тілами здій­снюється за допомогою **поля тяжіння чи гравітаційного поля**.  **–** це силова характе­ристика поля тяжіння. Вона чисельно дорівнює силі, що діє на одиницю маси точкового тіла, внесеного в дану точку поля:  **Напруженість – величина вектор­на**, напрям її збігається з напрямом вектора сили тяжіння.  У гравітаційному полі Землі  звідки  де *R*З – радіус Землі, *М* – маса Землі, *h* – відстань від центра тяжіння тіла до поверхні Землі.  При переміщенні тіла масою *m* на відстань *dR* поле тяжіння здійснює роботу  (знак "мінус" означає, що сила і пере­міщення протилежно напрямлені).  При переміщенні тіла з відстані *R*1 на відстань *R*2:  **Робота не залежить від траєкторії переміщення, а визначається тільки початковим і кінцевим положеннями тіла.**  Отже, **сили тяжіння консервативні**, а **поле тяжіння є потенціальним**. Робота консервативних сил дорівнює зміні потенціальної енергії системи з протилеж­ним знаком:  дорівнює  – це скалярна енергетична характе­ристика поля, яка дорівнює  Таким чином, **потенціал поля тяжіння** – це величина, яка не залежить від маси тіла *m*, а залежить тільки від маси *M* і відстані *R* від цього тіла до точки поля.  У загальному випадку для будь-якого потен­ціаль­ного поля між напруже­ністю і потенціалом існує зв'язок:  Знак "мінус" вказує на те, що вектор напруженості напрямлений в сторону спадання потенціалу. |
| **3.3.3. Космічні швидкості** | |
| **Перша космічна швидкість**  **Друга космічна швидкість**  **Третя космічна швидкість** | – мінімальна швидкість, яку треба надати тілу, щоб воно могло рухатись навколо Землі по коловій орбіті, тобто перетворитись у штучний супутник Землі. При цьому сила тяжіння відіграє роль доцентрової сили, тобто:  де *R* – радіус Землі.  Звідки  **км/с**.  – найменша швидкість, яку треба надати тілу, щоб воно могло подолати притягання Землі і перетворитися в супутник Сонця. У цьому випадку кінетична енергія тіла повинна дорівнювати роботі, яка вико­нуєть­ся проти сил тяжіння:  звідки  **км/с**.  – швидкість, яку необхідно надати тілу на Землі, щоб воно покинуло межі Сонячної системи, подолавши притягання Сонця:  **км/с**. |
| **3.3.4. Основні характеристики сили пружності** | |
| **Сили пружності**  **Деформація**  **Пружна деформація**  **Пла­стич­на деформація**  **Абсолютна деформація розтягу**  **Відносна деформація**  **Механічна напруга**  **Відносний поперечний стиск (розтяг)**  **Коефіцієнт Пуассона** | виникають у результаті взаємодії тіл, що супрово­джується їх деформацією.  – це зміна форми і розмірів твердих тіл під дією зовнішніх сил. Розрізняють два види дефор­ма­цій: **пруж­ну** і **пластич­ну**.  – дефор­ма­ція, при якій тіло, після припи­нен­ня дії зовніш­ніх сил, пов­ністю відновлює свої роз­міри і форму.  Деформація має пружний характер за умови, що зовнішня сила не перевищує певного значення – **межі пружності**. Коли межа пружності перевищена, деформація стає пластичною.  – дефор­мація, яка повніс­тю або частко­во збе­рігаєть­ся в тілі після припинення дії зовнішніх сил.  Деформації можуть бути зведені до деформацій розтягу (чи стиску) і зсуву. Під час деформації розтягу (стиску) тіло зазнає зміни довжини.  – це величина, яка дорівнює різниці кінцевої і початкової деформацій:  Але величина абсолютної деформації не вказує, яку частку становить зміна довжини від початкової. Тому мірою деформації є **відносна деформація**.  – величина, яка дорівнює відношенню абсолютної деформації до початкових розмірів тіла:  Деформація викликає у тілі пружні сили, які характеризуються механічною напругою.  – це фізична величина, яка чисельно дорів­нює силі пружності, що припадає на одиницю площі перерізу тіла:  – величина, яка характеризує зміни поперечних розмірів тіл:  де *d*0 – поперечні розміри тіла до деформації.  – величина, яка дорівнює відношенню відносної поперечної дефор­мації тіла до відносної поздовжньої деформації:  Коефіцієнт Пуассона залежить тільки від матеріалу тіла і є однією із сталих, що характеризує пружні властивості тіла. |
| **3.3.5. Закон Гука** | |
| **Закон Гука** | Гук експериментально встановив, що при пружній деформації видовження *х* тіла (пружини) прямо пропорційне зовнішній силі:  де *k* – жорсткість пружини**.** Чим більшою є жорсткість пружини, тим менше вона розтягується під дією даної сили. Жорсткість пружини залежить від матеріалу, розмірів витка і довжини пружини.  Сила пружності відрізняється від зовнішньої тільки знаком:  Відзначимо, що закон Гука виконується тільки для пружних деформацій (рис. 3.5).    Рис. 3.5. Залежність механічної напруги від відносної деформації:  *А* – межа пропорційності,  *A'* – межа пружності,  *В* – межа текучості,  *D* – межа міцності.  Встановлено, що для незначних пруж­них деформацій механічна напруга про­порційна відносній деформації:  де *k* – коефіцієнт пропорційності, який називають **модулем пружності**; він чисельно дорівнює механічній напрузі, яка виникає при відносній деформації, рівній одиниці. Дана формула виражає **закон Гука**. Її можна поширити на будь-які види пружних деформацій.  Для випадку одностороннього розтягу (стиску):  де *Е* – **модуль Юнга**, який залежить від речовини тіла і його фізичного стану. Записавши  отримаємо **закон Гука**: **видовження тіла при пружній деформації пропорційне діючій на тіло силі:** |
| **3.3.6. Сили тертя** | |
| **Зовнішнє тертя**  **Сила тертя спокою**  **Сила тертя ковзання**  **Тертя кручення**  **Тертя кочення**  **Внутрішнє тертя** | Будь-який механічний рух тіла супро­воджується втратами ме­ханічної енергії. Це зумовлено наявністю **сил тертя**. Сили тер­тя перешко­джають руху. Вони є гальмівними силами (силами опо­ру). Тертя виникає між двома поверхнями твердих тіл або між їх частинка­ми. У першому випадку тертя називають з**ов­ніш­нім**, в другому – **внутрішнім або в’язким**.  Зовнішнє тертя по­ді­ляють на **тертя спокою (статичне)** і **тертя ковзання.**  зумовлена дією опори, на якій лежить тіло і дорівнює зовнішній силі (рис. 3.6).    Рис. 3.6. Залежність сисли тертя від зовнішньої сили  Коли модуль зовнішньої сили перевищить деяке значення *F*0, тіло почне ковзати по поверхні. Велична *F*0 – максимальне значення сили тертя спокою. Максимальна сила тертя спокою спрямована по дотичній до поверхонь і прямо пропорційна нормальній складовій рівнодійної сил, які діють на поверхню дотичних тіл. Відзначимо, що ця сила дорівнює силі тертя ковзання.    перешкоджає відносному руху тіл і спрямована вздовж поверхні їх контакту. Дослідним шляхом встановлено, що сила тертя ковзання дорівнює:  де – коефіцієнт тертя ковзання, який залежить від природи і стану по­верхонь, що дотикаються; *N* – сила нормального тиску.  Крім вищезазначених видів зовнішнього тертя, розрізняють тертя кручення та кочення.  – різновид тертя ковзання. Воно спостерігається, коли два дотичних тіла обертаються один навколо одного.  виникає, коли одне тіло котиться по поверхні іншого. Значення цієї сили дорівнює  де – коефіцієнт тертя кочення, *N* – нормальна складова сили тиску в точках дотику поверхонь, *r* – радіус тіла, що котиться.  виникає при відносному переміщенні частин суцільного тіла (наприклад, рідини або газу). |



**Лекція 4**

РУХ ТІЛ У НЕІНЕРЦІАЛЬНИХ СИСТЕМАХ ВІДЛІКУ

4.1. Неінерціальні системи відліку (НІСВ).

4.2. Швидкість і прискорення в неінер­ціальній системі відліку.

4.3. Рівняння руху матеріальної точки відносно неінерціальної системи відліку.

4.4. Особливості сил інерції.

4.5. Поступальний та обертальний рух у неінерціальній системі відліку.

4.6. Вплив обертання Землі на рух тіл.

|  |  |
| --- | --- |
| **4.1. Неінерціальні системи відліку** | |
| Закони Ньютона, як відомо, справед­ливі лише в тих сис­те­мах відліку, які рухаються одні відносно одних прямо­лі­ній­но і рівномірно. Такі системи відліку називаються **інерціальними системами відліку (ІСВ)**. У таких системах відліку основним рівня­н­ням руху матеріальної точки є рівняння, яке виражає другий закон Ньютона:  В інерціальних системах відліку єдиною причиною прис­ко­реного руху тіла є сили, які діють на нього з боку інших тіл.  **Неі­не­р­ціальні системи відліку (НІСВ)**– систе­ма­ми від­ліку, які рухають­ся відносно інерціальних систем від­ліку з при­скоренням.  Ма­те­ріаль­­на точка в НІСВ може рухатися прискорено під дією сил, виникнення яких не можна пояснити дією якихось окремих тіл. Їх поява зу­мовлена тим, що система відліку рухається прискорено відносно ІСВ, якою може бути, наприклад, Земля.  Ще Ньютон розумів, що пов’язана з поверхнею Землі система відліку неінер­ціаль­на, бо здійснює кілька прискоре­них рухів. Міркуючи про рух у космосі, він увів не пов’язану з якимось конкретним тілом **абсолютну інерціальну систему відліку (АІСВ)**: сукупність абсолютного простору і абсолютного часу. **Абсолютним просто­ром** він вважав те, що залишиться у Всесвіті після видалення з нього усіх тіл. Подібним чином він розглядав і **абсолют­ний час**, як зовсім незмінну і сталу у своїй плинності тривалість. Рух будь-яких тіл відносно АІСВ Ньютон називав **абсолют­ним**.  Зв’язані з реальними тілами системи відліку Ньютон вважав відносними, а рух тіл по відношенню до них називав **віднос­ним**.  Ейнштейн ґрунтовно переглянув основні положення механіки Ньютона з питання уявлення про простір, час і механічний рух, створивши теорію відносності. Заперечення абсолютності простору, часу і руху були настіль­ки важливими для автора нової теорії, що вибір її назви він здійснив так, щоб вона підкреслювала існування в приро­ді лише відносних рухів, відносних просторових і часових характеристик мате­рії, що повністю суперечило попереднім уявленням про повну незалежність інтерва­лів довжин і часу від вибору систем відліку.  Насправді ІСВ не існує. Поняття ІСВ – це певна абстракція, реальні системи відлі­ку можуть тільки наближатись за своїми властивостями до ІСВ. Правильне уявлення про ІСВ випливає з співставлення приско­рень тих тіл, з якими зв’язані найбільш вживані на практиці системи відліку. | |
| **4.2. Швидкість і прискорення** в неінерціальній системі відліку | |
| Оскільки усі існуючі СВ належать до неінерціальних, а ІСВ – абстракція, дослі­димо саме НІСВ. При цьому не вихо­ди­ти­мемо за межі класичної механіки, вва­жаючи однаковими інтервали часу і відста­ні, а також сили взаємодії тіл у системах відліку.  Знайдемо рівняння руху в НІСВ. Завдання полягає в тому, щоб встановити закони перетворення сил і прискорень при переході від ІСВ до НІСВ.  Вважатимемо ІСВ нерухомою, а швид­кість руху тіла відносно неї називатимемо **абсолютною**. Швидкість відносно НІСВ називатимемо **відносною**. Також вважа­ти­мемо, що ці швидкості малі в порівнянні з швидкістю світла у вакуумі.  Розглянемо рух матеріальної точки М відносно двох систем відліку (рис. 4.1).  7_10001.tif  Рис. 4.1. Рух матеріальної точки М відносно двох систем відліку  Положення матеріальної точки віднос­но нерухомої (інерціальної) системи і рухомої (неінер­ціальної) системи відліку визна­чаються, відповідно, радіус-векто­рами і :  де і – орти систем і .  З рис. 4.1 видно, що  ,  де – радіус-вектор початку координат рухомої системи відліку відносно нерухомої системи.  **Абсолютна швидкість** матеріальної точки:  З попереднього рівняння маємо для абсолютної швидкості:  Оскільки система рухається довільно, то:  Тут перший доданок – **відносна швидкість** матеріальної точки, тобто її швидкістю відносно рухомої системи відліку:  У загальному випадку рухома система відліку одночасно може брати участь у поступальному і обертальному рухах. Тоді – лінійні швидкості кінців ортів при обертальному русі системи відліку.  Якщо кутова швидкість обертання рухомої системи відліку , а за час *dt* дана система повернеться на кут , то, виконавши деякі перетворення, можна побачити, що  тоді  Таким чином можна записати, що  де  Величина  є абсолютною швидкістю того елемента рухомої системи, через який у даний момент часу проходить матеріальна точка М, рух якої розглядається. Цю швидкість також називають **переносною швидкістю** точки М. | |
| **Абсолютна швидкість матеріальної точки**  **Абсолютне прискорення**  **Відносне**  **приско­рення**  **Переносне прискорення**  **Коріолісове прискорення**  **Теорема Коріоліса** | Тоді можна записати, що  **абсолютна швидкість точки М дорівнює геометричній сумі відносної і переносної швидкостей.**  Аналогічно до швидкості вводяться поняття абсолютного, відносного, переносного прискорень.  – прискорення матеріальної точки у нерухомій (інерціальній) системі відліку.  – прискорення матеріальної точки відносно рухомої (неінерціальної) системи відліку.  – абсолютне прискорення тих елементів рухомої системи відліку, через які в даний момент часу проходить матеріальна точка М. Виконавши деякі перетворення, отримаємо, що  де  – прискорення поступального руху рухомої системи;  – переносне (дотичне чи тангенціальне) прискорення, зумовлене нерівномірністю обертання рухомої системи;  – доцентрове (нормальне) прискорення.  Величина  є **коріолісовим прискоренням**, яке зумовлене рухом матеріальної точки відносно рухомої системи, яка перебуває в обертальному русі.  Таким чином  Дане рівняння виражає **теорему Коріо­ліса**: **абсолютне при­ско­рення до­рів­нює векторній сумі переносного, коріолі­сового і відносного приско­рень.** |
| **4.3. Рівняння руху матеріальної точки відносно неінерціальної системи відліку.** | |
| **Рівняння руху матеріальної точки відносно неінерціальної системи відліку**  **Відцентрова сила**  **Коріолісова сила** | Перепишемо теорему Коріоліса у вигляді  Помноживши ліву і праву частини даного рівняння на масу матеріальної точки, отримаємо:  де – рівнодійна всіх сил, що діють на матеріальну точку збоку інших тіл, тобто це сила, що реально існує як результат взаємодії тіл.  На відміну від сили складові та цього рівняння мають інший характер. Вони виникають не в результаті взаємодії тіл, а внаслідок прискореного руху системи відліку, і їх називають **силами інерції**.  Складові  називаються **переносною силою інерції** і **коріолісовою силою**, відповідно. З урахуванням формули, яка виражає пере­носне приско­рен­ня, вираз для переносної сили набере вигляду:  де  – **поступальна сила інерції**, зу­мов­лена прискореним рухом початку координат рухомої системи;  – **тангенціальна сила інер­ції**, зумовлена нерівномірністю оберталь­но­го руху системи відліку;  – **відцентрова (нор­маль­на) сила інерції**.  Дії **відцентрової сили** зазнає, на­прик­лад, пасажир у автобусі на поворотах, пілот під час виконання фігур вищого пілотажу на великих швидкостях. Від­цент­рові сили існують тільки в системах відліку, які перебувають в обертальному русі. Дію відцентрової сили використо­вують у техніці: у відцентрових насосах, сепараторах, відцентровому регуляторі і т. д.  **Коріолісова сила** інерції виникає тільки тоді, коли матеріальна точка рухається відносно системи відліку, яка перебуває в обертальному русі. На відміну від інших сил інерції коріолісова сила відрізняється тим, що вона залежить від відносної швидкості (коріолісова сила завжди перпендикулярна до відносної швидкості). Так, наприклад, на частинки води у ріках північної півкулі, що течуть в меридіальному напрямку, діють коріо­лі­сові сили інерції, які напрямлені пер­пенди­кулярно до швидкості течії річки і викликають підмивання правого за течією берега. |
| **4.4. Особливості сил інерції** | |
| * Сили інерції не можна ставити в один ряд із силами тяжіння, пружності, тертя, тобто силами, зумовленими взаємодією тіл. Сили інерції – це не результат дії іншого тіла, а властивість системи відліку. * Для сили інерції не існує протидіючої сили. Отже третій закон Ньютона для сил інерції не виконується. Тому ці сили іноді називають фіктивними, однак така назва недоцільна, оскільки вони реально діють на матеріальну точку в неінерціальній системі відліку і їх можна виміряти динамометром. * Рух тіл під дією сил інерції аналогічний рухові тіл у зовнішніх силових полях. Сили інерції завжди є зовнішніми відносно будь-якої рухомої системи матеріальних тіл. * Характерною властивістю сил інерції є їх пропорційність масі тіл, внаслідок цієї властивості сили інерції аналогічні силам тяжіння. | |
| **4.5. Поступальний та обертальний рух у неінерціальній системі відліку** | |
| **Поступальний рух**  **у НІСВ**  **Обертальний рух**  **у НІСВ** | Нехай СВ рухається поступально з прискоренням . Тоді , і переносне прискорення . Прикла­дом такої системи може бути візок, що рухається з прискоренням під дією зовнішньої сили (рис. 4.2). На візку встановлено кронштейн, до якого підвішено кульку. Під час прискореного руху візка кулька відхиляється від вертикального напряму на деякий кут .  4_20001.tif  Рис. 4.2. Приклад поступального руху  відносно НІСВ  Розглянемо рух кульки в інерціальній та неінерціальній системах відліку. Спостерігач, який знаходиться в інер­ціальній системі відліку , відхилення кульки пояснює наступним чином. Коли візок рухається прискорено, кулька намагається зберігати свій попередній стан і відставатиме від візка, відхи­ляючись на деякий кут. Нитка відхи­ляється доти, поки рівнодійна сили тяжін­ня і натягу нитки не досягне величини:  .  Спостерігач, який знаходиться в неінер­ціальній системі відліку , стверджує, що відхилена кулька відносно візка перебуває в стані спокою, тобто рівнодійна сил, які діють на кульку, дорівнює нулю. Оскільки нитка з кулькою відхилена від вертикальної лінії на кут , то спостерігач стверджує, що на кульку, крім сил тяжіння і натягу нитки, діє сила . Їх рівнодійна  ,  або, враховуючи попередні виведення,  .  Тобто, спостерігач стверджує, що на кульку діє сила:  .  Наприклад, сила інерції діє на паса­жирів при раптовій зміні швидкості транс­портного засобу.  Нехай система здійснює обертальний рух із сталою швидкістю . При цьому тіло може перебувати або у стані спокою, або в русі відносно неї.  Спочатку розглянемо випадок, коли тіло перебуває в стані спокою відносно НІСВ. Прикладом такої системи відліку може бути диск, що обертається навколо вертикальної осі з кутовою швидкістю (рис. 4.3). разом з диском обертається насаджена на тонкий стержень кулька, яка з’єднана з центром диска пружиною.  4_30001.tif  Рис. 4.3. Тіло перебуває в стані спокою відносно обертальної НІСВ  Розглянемо рух кульки в інерціальній і неінерціальній системах відліку. Спосте­рігач в ІСВ, стежачи за рухом диска разом з кулькою, робить висновок, що на кульку повинна діяти доцентрова сила , величина якої дорівнює пружній силі розтягнутої пружини. Спостерігач, який знаходиться в рухомій системі, робить висновок, що на кульку діє сила, напрям­лена вздовж радіуса від центра, яка врівноважується пружною силою розтяг­нутої пружини; її називають **відцентро­вою**. Це переносна сила інерції, яка дорівнює  .  З векторного добутку випливає, що відцентрова сила інерції завжди напрям­лена вздовж радіусу від центра. Вона залежить не тільки від маси тіла, але й від його відстані від центру обертання системи.  Відцентрові сили можуть досягати великих значень у спеціально побудова­них центрифугах. Дія відцентрових сил інерції широко використовується в техніці (відцентрові насоси, сепаратори, центри­фуги).  Розглянемо випадок, коли тіло рухаєть­ся зі швидкістю відносно обертальної неінерціальної системи відліку. На це тіло, крім відцентрової сили, діє сила Коріоліса, або коріолісова сила інерції. Її прояв можна продемонструвати на такому досліді. Її прояв можна продемонстру­ва­ти на такому дослі­ді. Над горизонтальним диском встанов­люють нерухомий похилий жолоб, з якого на диск скочується кулька (рис. 4.4).  4_40001.tif  Рис. 4.4. Тіло рухається з деякою швидкістю відносно обертальної НІСВ  Якщо диск нерухомий, то кулька котиться вздовж радіуса ОА. Коли кулька скочується на диск, що обертається, то траєкторією руху кульки буде дуга ОВ. Спостерігач, який знаходиться в рухомій системі відліку, пояснює викривлення траєкторії руху кульки дією сили, що перпендикулярна до напряму швидкості її руху. Цією силою є сила Коріоліса:  Для того, щоб змусити кульку котитися вздовж радіуса ОА при рівномірному обертанні диска, на кульку слід подіяти з силою , яка за модулем дорівнює сила Коріоліса, але протилежно їй напрямлена. За своїм характером сила Коріоліса значно відрізняється від інших сил інерції. Вона діє тільки на тіла, які перебувають у русі відносно НІСВ, що обертаються, і залежить від швидкості їх руху. Сила Коріоліса не залежить від розміщення тіла відносно ситеми відліку.  Оскільки коріолісова сила завжди перпендикулярна до напрямку руху тіла, то вона над тілом не виконує роботу, а змінює напрям руху тіла, не змінюючи його швидкості. Спостерігач, який знаходиться в інерціальній системі відліку, рух кульки по траєкторії ОВ пояснює тим, що для того, щоб кулька, рухаючись із швидкістю , досягла токи А, необхідний час:  За цей час, внаслідок обертального руху диска, радіус ОА здійснить поворот на кут:  Внаслідок цього кулька потрапить не в точку А, а в точку В. Рівняння руху тіла відносно обертальної системи відліку має вигляд: |
| **4.6. Вплив обертання Землі на рух тіл** | |
| Вивчаючи рух тіл відносно земної поверхні, слід враховувати, що система відліку, зв’язана із Землею, є неінер­ціль­ною. Основною причиною неінерціаль­ності цієї системи є добове обертання Землі. З великим ступенем точності можна вважати, що її кутова швидкість стала. Вплив обертання Землі на рух тіл зводиться до дії на них відцентрової і коріолісової сил.  Дією сил Коріоліса пояснюється ряд явищ, що спосте­рі­гають­ся при русі тіл поблизу земної поверхні. Так, внаслідок добового обертання Землі, тіла, які вертикально падають, відхиляються на схід, а тіла, що рухаються вздовж земної поверхні, відхиляються в північній півкулі вправо, а в півден­ній – вліво від напрямку їх руху. Останнє призводить до підмивання відповідного берега у річок; зношення правої рейки залізнич­ної колії в північній півкулі і лівої – в південній (за ходом по­тягів); виникнення деяких повітряних і морських течій тощо. Сили Коріоліса враховуються при розрахунку польотів ракет та артилерійських снарядів на великі відста­ні. | |



**Лекція 5**

ОСНОВИ ДИНАМІКИ ОБЕРТАЛЬНОГО РУХУ ТВЕРДОГО ТІЛА

5.1. Момент інерції.

5.2. Моменти інерції однорідних тіл.

5.3. Теорема Штейнера.

5.4. Кінетична енергія обертального ру­ху.

5.5. Момент сили.

5.6. Основне рівняння динаміки обер­таль­ного руху твердого тіла.

5.7. Момент імпульсу.

5.8. Закон збереження моменту імпуль­су твердого тіла.

5.9. Порівняння основних величин і співвідношень для поступального руху тіла і його обертання навколо нерухомої осі.

5.10. Умови та види рівноваги твердого тіла.

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **5.1. Момент інерції** | | | | | | |
| **Момент інерції**  **Момент інерції матеріальної точки** відносно осі обертання  **Момент інерції системи** **(тіла)** відносно осі обертання  **Головний момент інерції** | | | характеризує інерціальні властивості тіла при обертальному русі, подібно до маси, яка характеризує інерціальні властивості тіла при поступальному русі. Він залежить від розподілу маси тіла відносно осі обертання.  дорівнює добутку маси цієї точки на квадрат відстані від осі:  – фізична величина, яка дорівнює сумі моментів інерції всіх матеріальних точок відносно цієї осі:  – це момент інерції відносно головної осі, яка проходить через центр мас.  **Одиниця вимірювання** моменту інерції – **кілограм на** **метр квадратний** (кг⋅м2). | | | |
| **5.2. Моменти інерції однорідних тіл масою *m*,**  **які мають правильну геометричну форму**  **і рівномірний розподіл маси по об’єму** | | | | | | |
| ***Тіло*** | | | | | ***Момент інерції*** | |
| однорідний циліндр (диск) радіусом *R* | |  | | |  | |
| тонке кільце (циліндр) радіусом *R* | |  | | |  | |
| товстостінний циліндр  з внутрішнім *r*  і зовнішнім *R* радіусами | |  | | |  | |
| суцільна куля | |  | | |  | |
| однорідний стержень | |  | | |  | |
| **5.3. Теорема Штейнера** | | | | | | |
| **Теорема Штейнера** | | | Якщо момент інерції тіла визначено відносно якоїсь осі, яка проходить через центр мас, то момент інерції цього тіла відносно будь-якої іншої паралельної осі визначається за **теоремою Штейнера**.  **Момент інерції відносно будь-якої осі дорівнює сумі моменту інерції відносно осі, що паралельна даній і проходить через центр мас тіла, і добутку маси тіла *m* на квадрат відстані *а* між осями**: | | | |
| **5.4. Кінетична енергія обертального ру­ху** | | | | | | |
| **Кінетична енергія обертального руху тіла**  **Кінетична енергія тіла, яке здійснює одночасно поступальний та обертальний рухи** | | | Під час обертання твердого тіла різні його точки мають різну лінійну швидкість, а отже, і різну кінетичну енергію.  Кінетична енергія обертального руху *і*-ої матеріальної точки:  **Кінетична енергія обертального руху всього тіла** дорівнює сумі кінетич­них енергій його елементів:  Оскільки величина  є моментом інерції тіла, то **кінетична енергія обертального руху тіла** дорів­нює:  Ця формула є справедливою, якщо тіло обертається навколо нерухомої осі.  Якщо тіло здійснює поступальний і обертальний рухи одночасно, то його **повна кінетична енергія** **до­рів­­нює сумі кінетичних енергій**: | | | |
| **5.5. Момент сили** | | | | | | |
| **Момент сили** відносно нерухомої точки *О*  (рис. 5.1)  **Момент сили** відносно нерухомої осі *Z* | | | – це фізична величина, яка визначається векторним добутком радіус-вектора , про­веденого з точки *О* в точку прикла­дання сили, на силу :    Рис. 5.1. Напрям моменту сили відносно нерухомої точки  Модуль моменту сили:  де – **плече сили** – найкоротша відстань від осі обертання до напряму дії сили.  Вважають момент додатним, якщо складова сили змушує обертатись тіло за годинниковою стрілкою, а від’ємним – при обертанні тіла проти годинникової стрілки.  – скалярна величина , яка дорівнює проекції на цю вісь вектора моменту сили, визначеного відносно довільної точки цієї осі.  **Одиниця вимірювання** моменту сили – **ньютон на** **метр** (Н⋅м). | | | |
| **5.6. Основне рівняння динаміки обер­таль­ного руху твердого тіла** | | | | | | |
| **Основний закон динаміки обертально­го руху твердого тіла**  в інтегральній формі | | | Під час повороту тіла під дією сили на нескінченно малий кут , точка прикладання сили проходить шлях і робота дорівнює:  Робота обертання тіла йде на збільшення його кінетичної енергії:  Тоді    або  Звідси **рівняння динаміки обертально­го руху твердого тіла** в інтегральній формі:  **Якщо вісь обертання співпадає з головною віссю інерції**, що проходить через центр мас, то має місце векторна рівність:  ,  де *J* – головний момент інерції тіла. | | | |
| **5.7. Момент імпульсу** | | | | | | |
| **Момент імпульсу матеріальної точки** відносно нерухомої точки *О*  **Момент імпульсу** відносно нерухомої  осі *z*  **Момент імпульсу твердого тіла** відносно осі  **Основний закон** **динаміки оберталь­ного руху твердого тіла** у диферен­ціальній формі | | | – фізична величина, яка визна­чається векторним добутком:  – скалярна величина *Lz*, яка дорівнює проекції на цю вісь вектора моменту імпульсу, визначеного відносно довільної точки *О* даної осі.  При обертанні абсолютно твердого тіла навколо нерухомої осі кожна точка тіла рухається по колу радіусом з швидкістю , перпендикулярною до радіусу. Момент імпульсу окремої частинки дорівнює  і співпадає за напрямом з вектором кутової швидкості .  дорівнює сумі моментів імпульсів окремих частинок:  Продиференціювавши за часом, отри­маємо:  У векторній формі  –**основний закон** **динаміки оберталь­ного руху твердого тіла** у диферен­ціальній формі.  **Одиниця вимірювання** моменту імпульсу – **ньютон на** **метр на секунду** (Н⋅м⋅с). | | | |
| **5.8. Закон збереження моменту імпуль­су твердого тіла.** | | | | | | |
| **Закон збереження моменту імпульсу**  **Приклади виконання та застосування моменту імпульсу**  **Лава Жуковського** (рис.5.2)  **Гіроскоп**  (рис. 5.3) | | | Якщо на тіло не діють ніякі зовнішні сили чи діють такі сили, результуючий момент яких відносно заданої осі *z* дорівнює нулю, то момент імпульсу тіла відносно цієї осі буде сталим.  **Момент імпульсу замкнутої систе­ми зберігається:**  При рівномірному обертанні твердого тіла відносно деякої осі *z* закон збереження моменту імпульсу рівносильний  Припустимо, що лава з людиною на ній обертається з кутовою швидкістю (рис. 5.2, *а*). Коли людина опустить руки з гирями (рис. 5.2, б), момент інерції її зменшиться. Оскільки ця дія відбувається за рахунок внутрішніх сил системи, то повний момент імпульсу системи має залишитися сталим. Отже, кутова швид­кість збільшиться:    Рис. 5.2. Лава Жуковського  – масивне симетричне тіло, яке обертається із значною швидкістю навколо осі симетрії. Гіроскопи стійко зберігають напрямок своїх осей обертання у просторі, і тому вико­ристо­вуються в техніці для визначення і регулювання напрямку руху тіл. Гіроско­пами є гірокомпас, автопілот та інші навігаційні прилади. Потрібно відзначити, що дзиґа, вісь обертання Землі, снаряду, коліс велосипеда і т.п. також є гіроскопами.  http://soft.mail.ru/Screens/news/2010/10/06/te_133538.jpg  **Рис. 5.3. Гіроскоп** | | | |
| **5.9. Порівняння основних величин і співвідношень для поступального руху тіла і його обертання**  **навколо нерухомої осі** | | | | | | |
| ***Поступальний рух*** | | | | ***Обертальний рух*** | | |
| маса | ***m*** | | | момент інерції | | *J* |
| переміщення |  | | | кутове переміщення | |  |
| швидкість |  | | | кутова швидкість | |  |
| прискорення |  | | | кутове прискорення | |  |
| сила |  | | | момент сили | |  |
| імпульс |  | | | момент імпульсу | |  |
| робота |  | | | робота | |  |
| кінетична енергія |  | | | кінетична енергія | |  |
| основний закон динаміки |  | | | основний закон динаміки | |  |
|  | | |  |
| **5.10. Умови та види рівноваги твердого тіла** | | | | | | |
| **Умови рівноваги твердого тіла**  **Види рівноваги твердих тіл**  (рис. 5.4) | | | 1. Сума всіх сил, що діють на тіло, дорівнює нулю:  2. Cума всіх моментів сил, що діють на тіло, дорівнює нулю:  **1. Стійка рівновага** спостерігається, коли тіло, виведене зі стану рівноваги, самочин­но повертається у вихідне положення.  **2. Нестійка рівновага**: тіло, виведене зі стану рівноваги, продовжує відхилятися від цього положення.  **3 Індиферентна (байдужа) рівновага**: тіло, виведене зі стану рівноваги, зали­шається у новому положенні.    Рис. 5.4. Види рівноваги:  1 – стійка, 2 – нестійка, 3 – індиферентна | | | |



6.1. Основи механіки ідеальних рідин і газів. Основні поняття гідро­меха­ніки.

6.2. Елементи гідростатики.

6.2.1. Закон Паскаля. Гідростатич­ний тиск.

6.2.2. Закон Архімеда.

6.3. Елементи гідрогазодинаміки.

6.3.1. Потік ідеальної рідини. Ста­ціонарний потік.

6.3.2. Теорема нерозривності течії.

6.3.3. Рівняння Бернуллі.

6.3.4. Формула Торічеллі.

6.4. Поняття про режими руху реаль­них рідин і газів.

6.4.1. Течія в’язкої рідини.

6.4.2. Види течій. Число Рейнольдса.

6.4.3. Закон Стокса.

**Лекція 6**

МЕХАНІКА РІДИН І ГАЗІВ

|  |  |
| --- | --- |
| **6.1. Основи механіки ідеальних рідин і газів.**  **Основні поняття гідро­меха­ніки** | |
| **Рідини**  **Вільна поверхня**  **Гідромеханіка**  **Нестислива рідина**  **Тиск** | Властивості рідин і газів багато в чому відрізняються. Молекули газу, здійснюючи хаотичний рух, рівномірно заповнюють весь наданий їм об'єм. На відміну від газів у рідинах, незважаючи на хаотичний рух молекул, середня відстань між сусідніми молекулами залишається майже незмін­ною.  – це фізичні тіла без конкретної форми, але з майже незмінним об'ємом, який називають **власним**. Рідини завжди обме­жені певними поверхнями, які відділяють їх від твердих тіл або газів.  – поверхня, що відділяє рідину від газу. Наявність вільних поверхонь у рідин дає їм можливість при певних умовах утворювати краплини.  Газоподібні тіла обмежені або поверх­нями рідин, або поверхнями твердих тіл. Вони не мають власного об'єму. Якщо до поверхні деякого об'єму рідини або газу прикладена незначна сила, то її дія приведе до переміщень одних частин відносно інших. Тому кажуть, що за звичайних умов рідини або гази не чинять опору при зміні форми об'єму, але чинять опір при зміні величини об'єму.  У ряді випадків, коли рідини і гази можна розглядати як суцільні середовища, що безперервно заповнюють певну частину простору, їх поведінку можна описувати однаковими законами – **законами гідро­­механіки.**  – розділ механіки, в якому вивчається стан рівноваги і руху рідин під дією зовнішніх сил.  У фізиці використовується **фізична модель нестисливої рідини**.  – рідина, густина якої однакова по всьому об'єму і не змінюється з часом.  На кожен елемент поверхні тіла, поміщеного у рідину, з сторони молекул рідини діє сила , яка напрямлена перпендикулярно до поверхні.  – фізична величина, яка дорівнює відно­шенню сили, що діє нормально на елемент поверхні, до величини площі цієї поверхні:  **Одиниця вимірювання** тиску – **паскаль** (Па). |
| **6.2. Елементи гідростатики** | |
| **6.2.1. Закон Паскаля. Гідростатичний тиск** | |
| **Закон Паскаля**  **Гідростатичний тиск**  **Гідростатичний парадокс** | Для рідин і газів, які перебувають у рівновазі, виконується **закон Паскаля: тиск у будь-якій точці рідини або газу, які перебувають у спокої однаковий у всіх напрямках і передається в усіх напрямках однаково**.  Якщо рідина нестислива, то її густина не залежить від тиску. Тоді при попереч­ному перерізі *S* стовпа рідини, його висоті *h* і густині *ρ* вага дорівнюватиме  а тиск на нижню основу змінюється лінійно з висотою:  Такий тиск називається **гідростатич­ним**.  Отже, величина гідростатичного тиску рідини залежить від густини рідини та висоти її стовпа і не залежить від форми посудини, в якій знаходиться рідина. Цим пояснюється так званий **гідростатичний парадокс: вага рідини в загальному випадку не дорівнює силі тиску рідини на дно посудини**.  Якщо тиск на вільну поверхню нерухомої рідини , то гідростатичний тиск рідини на глибині *h* буде: |
| **6.2.2. Закон Архімеда** | |
| **Закон Архімеда** | Сила тиску на нижні шари рідини буде більшою, ніж на верхні, тому на тіло, занурене у рідину, діє сила, яка визна­чається **законом Архімеда: на будь-яке тіло, занурене в рідину (або газ), діє з боку рідини (газу) виштовхувальна сила, яка дорівнює вазі витісненої тілом рідини (газу)**:  де *ρ* – густина рідини, *V* – об'єм зануреної частини тіла в рідину.  Сила Архімеда напрямлена вертикаль­но вгору і прикладена до центру ваги витісненого об'єму. |
| **6.3. Елементи гідрогазодинаміки** | |
| **6.3.1. Потік ідеальної рідини. Ста­ціонарний потік** | |
| **Ідеальна рідина**  **Течія рідини**  **Потік рідини**  **Стаціонарний потік**  **Лінія течії**  **Трубка течії** | Вивчаючи рух рідини, користуються ідеалізованим об’єктом або рідиною, яку називають **ідеальною.**  – це рідина, яка абсолютно нестислива і повністю позбавлена внутрішнього тертя.  – це рух рідини.  – це сукупність частин рухомої рідини.  – потік рідини або газу, в якому швидкість в усіх точках простору з часом не змінюється.  Для полегшення аналізу руху рідини або газу користуються **лініями і трубка­ми течії**.  – це лінія, дотична до якої в кожній точці збігається з вектором швидкості.  – частина рідини, обмежена лініями течії. |
| **6.3.2. Теорема нерозривності течії** | |
| **Рівняння нерозривності течії** | Розглянемо трубку течії, вибравши два перерізи *S*1 і *S*2, перпендикулярні до напряму швидкості (рис. 6.1). За час через переріз *S* проходить об'єм рідини .  http://fizmat.7mile.net/meh8_files/image022.jpg  Рис. 6.1. Трубка течії  Якщо рідина нестислива, то через *S*2 за 1 с пройде такий самий об'єм рідини, як і через *S*1:  або  .  **Добуток швидкості течії нестисли­вої рідини на поперечний переріз трубки течії є величина стала для даної трубки течії**. |
| **6.3.3. Рівняння Бернуллі** | |
| **Рівняння Бернуллі**  **Висновки** | Встановимо зв’язок між тиском і швидкістю стаціонарного руху ідеальної рідини. Вважатимемо, що рідина перебуває в полі земного тяжіння. Виділимо в ідеальній рідині трубку течії, обмежену перерізами *S*1 і *S*2 (рис. 6.2).  http://www.gamespl.com/images/chto-takoe-uravnenie-bernulli-2.gif  Рис. 6.2. До виведення рівняння Бернуллі  За законом збереження енергії зміна повної енергії рідини масою *m* у місцях перерізів *S*1 і *S*2 дорівнює роботі зовнішніх сил по переміщенню цієї маси рідини:    Звідси  Згідно рівняння неперервності, об'єм, який займає рідина, дорівнює  Використовуючи  де *ρ* – густина рідини,  отримаємо **рівняння Бернуллі** для ста­ціонарного потоку ідеальної рідини:  де *р* – статичний тиск, – динамічний тиск; – гідравлічний тиск.  Рівняння Бернуллі виражає закон збереження енергії для стаціонарного потоку ідеальної рідини.  З рівняння Бернуллі і рівняння нерозривності видно, що під час течії рідини по трубі, яка має різні перерізи, швидкість рідини більша в місцях звуження, а статичний тиск більший у ширших частинах труби. |
| **6.3.4. Формула Торічеллі** | |
| **Формула Торічеллі** | Застосуємо рівняння Бернуллі до випадку витікання рідини з невеликого отвору у широкій відкритій посудині. Виділимо в рідині трубку течії, яка має одним із перерізів відкриту поверхню рідини в посудині, а іншим – отвір, через який рідина витікає (рис. 6.3).  http://www.physics.ru/courses/op25part1/content/chapter1/section/paragraph22/images/1-22-3.gif  Рис. 6.3. Витікання рідини з отвору  У кожному із цих перерізів швидкість і висоту над деяким вихідним рівнем можна вважати сталими, внаслідок чого можна використати рівняння Бернуллі, записане для даного випадку:    Оскільки тиск в обох перерізах дорівнює атмосферному, а отже однаковий, а швидкість переміщення відкритої поверхні в широкій посудині можна вважати рівною нулю, то дане рівняння можна переписати у вигляді:  де – швидкість витікання рідини з отвору.  Скоротивши на , отримаємо  де – висота відкритої поверхні рідини над отвором.  Звідси  .  Ця формула отримала назву **формули Торічеллі**.  Отже, швидкість витікання рідини з отвору, розміщеного на глибині *h* під відкритою поверхнею, співпадає зі швид­кістю, яку отримує будь-яке тіло, падаючи з висоти *h*. Відмітимо, що цей результат отримано для ідеальної рідини. Для реальних рідин (мова про них піде нижче) швидкість витікання буде менша, причому тим сильніше відрізнятиметься від значен­ня, яке отримуємо з формули Торічеллі, чим більша в’язкість рідини. |
| **6.4. Поняття про режими руху реаль­них рідин і газів** | |
| **6.4.1. Течія в’язкої рідини** | |
| **В'язкість**  **Градієнт швидкості**  **Динамічна в’язкість** | – це властивість реальних рідин чинити опір переміщенню однієї частини рідини відносно іншої.  При переміщенні одних шарів реальної рідини відносно інших виникають **сили внутрішнього тертя**, які дотичні до площин дотикання шарів. Два шари, що рухаються один відносно іншого, взаємо­діють вздовж поверхні поділу з рівними за модулем і протилежними за напрямом силами внутрішнього тертя. Фізичні при­чи­ни появи таких сил різні для рідин і газів. У рідинах ці сили зумовлені головним чином зчепленням між молекулами, що належать різним шарам. У газах зчеплення між молекулами мале, а їх рухливість, навпаки, висока. Тому утворення сил внутрішнього тертя у газах відбувається в основному за рахунок обміну між молекулами рухомими шарами. Однак, досвід показує, що у рідинах і газах сили внутрішнього тертя підкоряються одному і тому ж закону.  показує, як швидко змінюється швидкість при переході від шару до шару в напрямі *х*, перпендикулярному напряму руху шарів:  Сила внутрішнього тертя пропорційна градієнту швидкості і площі поверхні шару, що розглядається:  де – коефіцієнт пропорційності, який залежить від природи і стану рідини. Його називають коефіцієнтом внутрішнього тертя або **динамічною в'язкістю** чи просто **в'язкістю**. **Фізичний зміст динамічної в'язкості:** динамічна в'язкість чисельно дорівнює силі, що діє на одиницю поверхні рідини при градієнті швидкості рівному одиниці.  Чим більша в'язкість, тим сильніше рідина відрізняється від ідеальної, тим більші сили внутрішнього тертя виникають у ній. |
| **6.4.2. Види течій. Число Рейнольдса** | |
| **Ламінарна течія**  **Турбулентна течія**  **Число Рейнольдса** | – течія, при якій окремі шари рідини неначе ковзають один відносно одного і не перемішуються. Швидкості частинок у будь-якому перерізі паралельні між собою. З цього випливає, що **ламінарна течія є стаціонарною**.  Ламінарна течія рідини спостерігається при невеликих швидкостях її руху. Зовнішній шар рідини, що дотикається до поверхні труби, в якій вона тече, з-за сил молекулярного зчеплення прилипає до неї і залишається нерухомим. Швидкості наступних шарів тим більші, чим більша відстань до поверхні труби, і найбільшою швидкістю володіє шар, що рухається вздовж осі труби.  Із збільшенням швидкості руху харак­тер течії істотно змінюється. Ламінарна течія стає нестійкою і переходить у **турбулентний потік**.  – течія, при якій частинки рідини здійснюють нерегулярні рухи по складних траєкторіях, а швидкості змінюються хаотично як за напрямом, так і за величиною. Внаслідок цього відбувається інтенсивне перемішування шарів рідини.  Кількісно перехід від однієї течії до іншої характеризується **числом Рейно­льд­са**:  де – кінематична в'язкість, *ρ* – густина рідини, – середня швидкість рідини вздовж перерізу труби, *d* – характерний лінійний розмір, наприклад діаметр труби.  За малих значень числа Рейнольдса () спостерігається ламінарний потік, перехід від ламінарного потоку до турбулентного відбувається в області . |
| **6.4.3. Закон Стокса** | |
| **Закон Стокса**  **Формула Стокса для кульки, що рухається в рідині** | При малих значеннях числа Рейнольдса, тобто при невеликих швидкостях руху, опір середовища зумовлений практично тільки силами тертя. Згідно закону, встановлено­му Стоксом, **сила опору в цьому випадку пропорційна коефіцієнту динамічної в’яз­кос­ті , швидкості руху тіла віднос­но рідини та характерному розміру тіла *d*:**  Коефіцієнт пропорційності залежить від форми тіла.  Зокрема, для кульки, якщо в якості величини *d* взяти її радіус *r*, коефіцієнт пропорційності дорівнюватиме . Отже, сила опору руху кульки в рідині при невеликих швидкостях, згідно закону Стокса, дорівнюватиме |

7.1. Механічні коливання.

7.1.1. Гармонічні коливання та їх характеристики.

7.1.2. Диференціальне рівняння гар­монічних коливань.

7.1.3. Пружинний маятник.

7.1.4. Математичний маятник.

7.1.5. Фізичний маятник.

7.2. Вплив зовнішніх сил на коли­валь­ні процеси.

7.2.1. Затухаючі коливання. Коефі­цієнт затухання. Декремент зату­хан­ня.

7.2.2. Вимушені коливання. Резо­нанс.

7.3. Механічні хвилі.

7.3.1. Хвильовий рух.

7.3.2. Фронт хвилі.

7.3.3. Рівняння плоскої хвилі.

**Лекція 7**

МЕХАНІЧНІ КОЛИВАННЯ ХВИЛІ



|  |  |
| --- | --- |
| **7.1. Механічні коливання** | |
| **7.1.1. Гармонічні коливання та їх характеристики** | |
| **Коливання**  **Вільні коливання**  **Вимушені коливання**  **Гармонічні коливання**  **Рівняння гармонічних коливань**  **Зміщення, *х***  **Амплітуда коливань, *А***  **Циклічна (колова) частота,**  **Фаза коливань,**  **початкова фаза,**  **Період, *Т***  **Частота,**  **Швидкість** руху матеріальної точки при гармоніч­них коливаннях:  **Прискорення матеріальної** точки при гармонічних коливаннях:  **Сила**, що діє на коливальну матеріальну точку ма­сою *m*:  **Кінетична енергія** матеріальної точки, що здійснює гармонічне коливання:  **Потенціальна енергія** матеріальної точки, що здійснює гармонічне коливання під дією квазіпружної сили:  **Повна енергія** | – рухи чи процеси, які володіють визначеною повторюваністю з часом.  – це коливання, які здійснюються за рахунок наданої енергії без подальшої зовнішньої дії на коливальну систему.  – це коливання, які відбуваються під дією зовнішньої сили, що періодично змінюється.  **–** це коливання, при яких фізичні величини, що характеризують коливальну систему, змінюються з часом за законом синуса або косинуса.  Характер гармонічного коливання зручно розкривати за кінематичною моделлю, яка являє собою матеріальну точку, що рівномірно рухається по колу з кутовою швидкістю *ω*. Залежність координати *х* матеріальної точки від часу *t* виразиться:  де  – відстань коливальної точки від положен­ня рівноваги;  – максимальне зміщення коливальної точки від положення рівноваги;  – кількість коливань, які здійснюються за секунд:  – величина, яка визначає зміщення тіла в момент часу *t*;  – величина, яка визначає зміщення тіла в момент початку відліку часу *t* = 0.  – час, протягом якого здійснюється одне повне коливання:  **Одиниця вимірювання** періоду – **секунда** (с).  – кількість коливань за одиницю часу:  **Одиниця вимірювання** частоти: **герц** (Гц).  Таким чином, сила пропорційна зміщен­ню матеріальної точки і напрямлена в сторону, протилежну до зміщення. Така залежність від зміщення характерна для пружних сил, тому сили, які аналогічним чином залежать від зміщення, називаються **квазіпружними.**  залишається сталою, тільки відбувається перетворення кінетичної енергії в потен­ціаль­ну і навпаки. |
| **7.1.2. Диференціальне рівняння гармонічних коливань** | |
| **Диференціальне рівняння гармонічних коли­вань**  **Гармонічний осцилятор** | – система, яка здійснює коливання, що описуються диференціальним рівнянням. Прикладами гармонічного осцилятора є пру­жин­ний, математичний і фізичний маятники. |
| **7.1.3. Пружинний маятник** | |
| **Пружинний маятник**  **Рівняння руху пружинного маятника**  **Циклічна** **частота і період пружинного маятника** | – це підвішений на пружині вантаж масою *m* (рис. 7.1), який здійснює гармонічні коливання під дією пружної сили:  де *k* – жорсткість пружини.    Рис. 7.1. Пружинний маятник  або  Порівнюючи це рівняння з рівнянням руху гармонічного осцилятора, видно, що пружинний маятник здійснює гармо­нічні коливання з **циклічною** **частотою і періодом**: |
| **7.1.4. Математичний маятник** | |
| **Математичний маятник**  **Рівняння руху математичного маятника**  **Циклічна** **частота**  **і період математичного маятника** | – матеріальна точку, підвішена на невагомій нитці, що коливається у вертикальній площині під дією сили тяжіння.  Найпростішим наближенням математичного маятника є кулька масою *m*, підвішена на невагомій нитці довжиною *l* (рис. 7.2).  http://school.xvatit.com/images/6/68/20048.jpg  Рис. 7.2. Математичний маятник  Коли система перебуває у стані спокою, то сила тяжіння зрівноважується силою натягу нитки. Якщо кульку відхилити на деякий кут , то рівнодійна сил натягу і земного тяжіння намагається повернути кульку у положення рівноваги. Рівнодійна цих сил дорівнює  Для малих кутів можна записати, що  Тоді рівнодійна сил дорівнюватиме  Рівняння руху математичного маятника матиме такий вигляд:  або  Порівнюючи це рівняння з рівнянням руху гармонічного осцилятора, видно, що матема­тичний маятник здійснює гармо­нічні коливання з **циклічною** **частотою і періодом**:  Отже, період коливань математичного маятника не зале­жить від амплітуди коливань і маси маятника, а визначається його довжиною і прискоренням вільного падіння. |
| **7.1.5. Фізичний маятник** | |
| **Фізичний маятник**  **Рівняння руху фізичного маятника** | – тверде тіло, здатне здійснювати коли­вання навколо нерухомої точки, яка не збігається з його центром маси (рис. 7.3).  http://physics-lectures.ru/lectures/82/images/image099.gif  Рис. 7.3. Фізичний маятник  При відхиленні маятника від положен­ня рівноваги на кут виникає оберталь­ний момент сили тяжіння. Він нама­гається повернути маятник у положення рівноваги. Якщо дією інших моментів сил знехтувати, то з основного рівняння динаміки обертального руху () отримаємо **рівняння руху фізичного маятника**:  де *J* – момент інерції тіла відносно горизонтальної осі, що проходить через точку підвісу *О*; *m* – маса маятника; знак "мінус" вказує на те, що повертаючий момент намагається повернути маятник до положення рівноваги, а кут відхилення відраховується від положення рівноваги у протилежному напрямі. Для малих кутів відхилення , тоді рівняння руху набуває вигляду  або  Порівнюючи це рівняння з рівнянням руху гармонічного осцилятора, видно, що фізичний маятник здійснює гармо­нічні коливання з **циклічною** **частотою і періодом**:  де *L* – **зведена довжина фізичного маятника**.  Отже, математичний маятник матиме такий самий період коливань, що й фізич­ний, за умови, що його довжина дорівнює зведеній довжині фізичного маятника. |
| **7.2. Вплив зовнішніх сил на коливальні процеси** | |
| **7.2.1. Згасаючі коливання. Коефіцієнт згасання. Декремент згасання** | |
| **Згасання коливань**  **Диференціальне рівняння вільних затухаю­чих коливань**  **Час релаксації** | – поступове ослаблення коливань з часом, зумовлене втратою енергії коливальною системою.  Згасання механічних коливань викликається в основному дією сили тертя.  де – коефіцієнт гасання;  – циклічна частота вільних незга­саючих коливань.  У випадку малих згасань () розв'язком цього рівняння буде:  де – **амплітуда згасаючих коливань**; – **циклічна частота згасаючих коливань**.  – проміжок часу, протягом якого амплі­туда згасаючих коливань змен­шуєть­ся в *е* раз:  Згасаючі коливання не є періодич­ними. Однак, при малих згасаннях можна умовно користуватися поняттям **періоду згасаючих коливань** як проміжком часу між двома послідовними максимумами коливальної фізичної величини:  Якщо і – амплітуди двох послідовних коливань, то відношення  називається **декрементом згасання**, а його логарифм  називається **логарифмічним декремен­том згасання**. Тут *N* – кількість коли­вань, які здійснюються за час зменшення амплітуди в *е* раз. |
| **7.2.2. Вимушені коливання. Резонанс.** | |
| **Вимушені коливання**  **Диференціальне рівняння виму­ше­них коливань**  **Резонанс** | – коливання, які виникають у колива­льній системі під час дії на неї зовнішньої сили, що періодично змінюється і називається **змушуючою** силою    де .  Дане рівняння відрізняється від диференціального рівняння для вільних згасаючих коливань наявністю члена, який не залежить від *х*. Його розв'язок дорівнює сумі загального розв'язку однорідного рівнян­ня і частинного розв'язку неоднорідного рівняння, де    Отже, вимушені коливання являють собою гармонічні коливання з амплітудою *А* і тією ж частотою, яку має змушуюча сила. Однак зміщення *х* зсунуте за фазою на відносно змушуючої сили. Це означає, що в момент, коли змушуюча сила досягає максимуму, зміщення необов'язково найбільше.  – явище різкого зростання амплітуди вимушених коливань при наближенні частоти змушуючої сили до частоти рівної чи близької власній частоті коливальної системи.  Амплітуда вимушених коливань має максимум при частоті , яка називається **резонансною частотою**:  Отже, і резонансна частота і резонансна амплітуда залежать від згасання системи. З наближенням до нуля резонансна частота зростає і прямує до значення частоти вільних коливань системи . При цьому резонансна амплі­туда зростає і при пере­тво­рюєть­ся у нескінченність. Звичайно, на практиці амплітуда нескін­ченною бути не може, так як у реальних коливальних системах завжди діють сили опору. Якщо система має мале затухання (), то наближено можна вважати, що резонанс наступає при частоті вільних коливань (). |
| 7.3. Механічні хвилі | |
| 7.3.1. Хвильовий рух | |
| **Хвиля** або **хвильовий процес**  **Поздовжні хвилі**  **Поперечні хвилі**  **Фазова швидкість**  **Довжина хвилі** | Коливання, що відбуваються у будь-якій точці середовища, не залишаються локалізованими в місцях їх збудження. Вони поширюються в середовищі із скінченою швидкістю. Їх поширення, зумовлене взаємодією між частинками середовища. Якщо взаємозв’язок між частинками середовища здійснюється си­ла­ми пружності, які виникають внаслідок деформації середовища при передаванні коливань від однієї частинки до іншої, то такі хвилі називаються **пружними**. До них належать звукові, сейсмічні та інші хвилі.  – процес поширення коливань у просторі.  **Основною властивістю всіх хвиль** є перенесення енергії без перенесення речовини.  Напрям поширення хвилі називають **променем**. Залежно від напряму коли­ван­ня частинок середовища відносно на­пря­му поширення хвиль їх поділяють на поперечні та поздовжні.  – хвилі, в яких частинки коливаються у напрямі їх поширення.  Вони можуть поширюватись у середовищах, в яких виникають пружні сили при деформаціях **стиску і розтягу** (у твердих, рідких і газоподібних тілах).  – хвилі, в яких частинки коливаються перпендикулярно до напряму поширення хвилі.  Вони можуть поширюватись тільки в середовищах, в яких виникають пружні сили при деформації **зсуву** (у твердих тілах).  – це швидкість передавання коливального руху від частинки до частинки середовища.  – відстань між двома найближчими частинками, фази коливань яких відрізняються на .  Інакше, це відстань, на яку поши­рюєть­ся хвиля за час, що дорівнює одному періоду: |
| **7.3.2. Фронт хвилі** | |
| **Хвильове поле**  **Хвильова поверхня**  **Фронт хвилі**  **Плоска хвиля**  **Сферична хвиля** | – ділянка середовища, де його частинки при поширенні хвиль здійснюють коли­вання.  – геометричне місце точок, які коли­ваються в однакових фазах.  – геометричне місце точок, якого досягне коливання до моменту часу *t*.  **Фронт хвилі являє** **собою** поверхню, що відділяє частину простору, в якому відбувається хвильовий процес, від тієї, де коливання ще не виникли (рис. 7.4).    *а б*  Рис. 7.4. Фронт хвилі: *а* – сферичної; *б* – плоскої  Залежно від фронту хвилі розрізняють **плоскі, сферичні, циліндричні** хвилі.  – хвиля, в якої хвильові поверхні являють сукупність площин, паралельних одна одній.  – хвиля, в якої хвильові поверхні мають вигляд концентричних сфер. Центри цих сфер називаються **центром хвилі**. |
| **7.3.3. Рівняння плоскої хвилі** | |
| **Рівняння плоскої хвилі** | Розглянемо хвильовий процес з кількісного боку і дістанемо аналітичний вираз – **рівняння хвилі**. Хвильовий процес буде відомим, якщо відома функціональна залежність величин зміщення коливальної частинки від координат її точки рівноваги *x*, *y*, *z* і часу *t*, тобто  Дана функція має бути періодичною. Для спрощення розглядатимемо плоску хвилю, яка поширюється у напрямі осі *х*. За такої умови хвильові поверхні будуть перпендикулярними до осі *х*, а зміщення коливальних точок цих поверхонь залежатимуть тільки від *х* і *t*. Нехай зміщення частинок, що лежать у площині *х* = 0, визначаються рівнянням  Щоб визначити зміщення частинок у площині, яка розташована на відстані *х* від початкової, треба врахувати, що точки цієї площини почнуть коливатись пізніше на час (де – швидкість поши­рення хвилі), за який хвиля поши­рюється від площини *х* = 0 до заданої. Отже, змі­щен­ня точок у такій площині визнача­тиметься рівнянням:  Дане **рівняння** належить до рівнянь так званої **монохроматичної біжучої хвилі**. Це рівняння можна подати у тако­му вигляді:  де  – довжина хвилі.  Величину  позначають через ***k*** і нази­вають **хвильо­вим числом**. Воно виражає кількість довжин хвиль, що вміщуються на відрізку . Тоді рівняння плос­кої хвилі можна подати у вигляді:  де  – **фаза плоскої хвилі**. |

**Лекція 8**

ОСНОВИ РЕЛЯТИВІСТСЬКОЇ МЕХАНІКИ

8.1. Основні уявлення класичної фізи­ки.

8.2. Перетворення Галілея. Межі застосування механіки Ньютона.

8.3. Постулати спеціальної теорії від­нос­ності.

8.4. Перетворення Лоренца і їх наслід­ки.

8.5. Основні співвідношення реляти­вістсь­кої динаміки.



|  |  |
| --- | --- |
| **8.1. Основні уявлення класичної фізи­ки** | |
| 1. Простір є трьохвимірним і евклідо­вим. 2. Час не залежить від простору. 3. Розміри твердих тіл (масштаби) і проміжки часу між даними подіями однакові в різних системах відліку. 4. Принцип відносності Галілея є однією з цеглинок фундаменту класичної фізики. Цей принцип стверджує існування інерціальних систем відліку. З вищезазна­чених уявлень випливають **перетворен­ня Галілея для простору – часу**. 5. Виконується **принцип відносності Галілея**, тобто всі закони механіки одна­кові у всіх інерціальних системах відліку, тобто вони є інваріантними відносно перетворень Галілея. 6. Виконується **принцип дальнодії**: взаємодія поширюється миттєво, тобто з нескінченною швидкістю. | |
| **8.2. Перетворення Галілея. Межі застосування механіки Ньютона** | |
| **Перетворення Галілея**  **Правило додавання швид­костей в класичній механіці**  **Прискорення**  **Маса**  частинки  **Сили взаємодії**  **Другий закон Ньютона** в рухо­мій системі відліку | Нехай і – дві інерціальні системи відліку (рис. 8.1); система рухається відносно системи з швидкістю і початок відліку часу відповідає моментові, коли початки координат і цих систем збігаються.8_1.jpg Рис. 8.1. Прямолінійний рівномірний рух однієї системи відносно іншої У цьому разі можна записати:Дані співвідношення називаються пе­ретво­реннями Галілея. Вони вира­жають просторово-часовий зв'язок довіль­ної події у різних інерціальних системах відліку.Продиференціювавши їх за часом, отримаємо:у системах відліку, що рухаються одна від­нос­но іншої рівномірно і прямолінійно, одна­кове: Отже, прискорення, на відміну від швидкості, має не відносний, а абсолют­ний характер: прискорення тієї самої частинки є однаковим в усіх інерціальних системах відліку.  Механіка Ньютона виходить також з очевидного (підтвердженого на досліді при ) положення про те, що **маса** частинки у всіх інерціальних системах відліку не залежить від швидкості її руху: Сили взаємодії можуть залежати від відстані між тілами (або частин­ками тіла), від відносної швидкості руху тіл, що взаємодіють, і часу. Але відстані і час не змінюються при переході від однієї інерціальної системи відліку до іншої. Не змінюється також при цьому і швидкість руху тіл одне відносно іншого (відносна швидкість ). Таким чином, у механіці Ньютона в усіх інерціальних системах відліку сила взаємо­дії між даними точками має те саме значення: Враховуючи вище сказане, **другий закон Ньютона** в рухо­мій системі відліку набуде вигляду:  що повністю збігається з математичним записом цього закону в нерухомій системі відліку . Отже, закон Ньютона має абсолютний характер.А це, в свою чергу, означає, що всі інерціальні системи відліку еквівалентні одна одній в механічному відношенні, всі закони механіки у цих системах відліку є однаковими, або інакше: закони механіки – **інваріантні** (незмінні) віднос­но перетворень Галілея. |
| 8.3. Постулати спеціальної теорії від­нос­ності | |
| **Постулати Ейнштейна** | В основу спеціальної теорії відносності А. Ейнштейном покла­дено два постулати:   1. **принцип відносності:** всі фізичні явища у всіх інерціальних системах відліку відбуваються однаково; 2. **принцип інваріантності швидкос­ті світла:** швидкість світла у вакуумі однакова у всіх інерціальних систе­мах відліку і не зале­жить від напря­му його поширення та руху джерела чи приймача.  Перший постулат – це узагальнення принципу відносності Галілея на довільні фізичні явища. Всі закони і їх рівняння є інваріантними, тобто не змінюються за формою під час переходу від однієї інер­ціаль­ної системи до іншої. Отже, всі інер­ціаль­ні системи відліку є еквівалентними, тобто рівноправними.Другий постулат показує, що швид­кість світла у вакуумі є інваріантною величиною. |
| **8.4. Перетворення Лоренца і їх наслід­ки** | |
| **Перетворення Лоренца**  **Релятивістський закон додавання швидкостей** | Нехай і – дві інерціальні системи відліку. Їх вибрано так, що однойменні осі координат паралельні і їх початки координат збігаються у момент часу *t* = 0. Система рухається відносно системи вздовж осі *х* з сталою швид­кістю (причому ). Тоді релятивістські перетво­рення координат і часу будуть мати вигляд:де При вони переходять у пере­тво­рен­ня Галілея. Таким чином, перетворен­ня Галілея є окремим випадком перетво­рень Лоренца.  Вони встановлюють взаємозв’язок прос­то­ру і часу – в закон перетворень коор­динат входить час, а в закон перетворень часу – просторові координати.  Наслідком цього є той факт, що якщо дві події у системі відбуваються одно­час­но, але в різних точках (), то в системі ці події, залишаючись просто­рово роз’єднаними, будуть і неодно­час­ни­ми.  Час події, яка відбувається в деякій точці простору, найменший в тій інер­ціаль­ній системі відліку, відносно якої ця точка нерухома. Таким чином, годинник, який рухається відносно інерціальної системи відліку, ходить повільніше, за годинник, що перебуває у стані спокою.  Якщо матеріальна точка рухається в системі вздовж осі зі швидкістю , а сама система рухається зі швид­кістю *u* відносно системи , то **релятивістський закон додавання швидкостей**: |
| 8.5. Основні співвідношення реляти­вістсь­кої динаміки | |
| **Релятивіст­ський імпульс** системи збе­рі­гається  **Основний закон релятивістської динаміки** **Релятивістська маса** частинки  **Повна енергія** тіла масою *m*  **Енергія спокою тіла**  **Кінетична енергія** | У релятивістській динаміці рівняння, що опи­сують рух тіл під дією сил, повинні бути незалеж­ними від системи відліку, інваріантними відносно пере­тво­рень Лоренца.де – маса спокою частинки, тобто маса, виміряна в тій інерціальній системі від­ліку, в якій частинка знаходиться в спокої.Закон збереження релятивістського імпульсу – наслідок однорідності просто­ру.Тіло, що перебуває в стані спокою воло­діє енергією спокою:Повна енергія замкнутої системи зберігається. Закон збереження енер­гії – наслідок однорідності часу. |

Любов Степанівна Яблонь

Володимира Михайлівна Бойчук

**Курс лекцій з фізики**

**Механіка**

Підписано до друку 18.03.2014 р. Формат 60х84/16.

Папір офсетний, друк цифровий.

Умовн. др. арк. 7.

Тираж 100 пр. Зам. № 23 від 18.03.2014 р.

Віддруковано:

Приватний підприємець Голіней О.М.,

76008, м. Івано-Франківськ, вул. Галицька, 128, тел.: (0342)580432