

Лабораторна робота 1.2

ВИВЧЕННЯ ЗАКОНІВ КІНЕМАТИКИ І ДИНАМІКИ ПОСТУПАЛЬНОГО РУХУ ЗА ДОПОМОГОЮ МАШИНИ АТВУДА

1 МЕТА РОБОТИ

Метою роботи є експериментальна перевірка:

- залежності шляху від часу при рівноприскореному русі;
- другого закону Ньютона.

2 КОМПЛЕКТАЦІЯ УСТАНОВКИ

- 1 Машина Атвуда.
- 2 Чотири вантажі однакової маси $m = 66,0$ г кожний.
- 3 Плоскі важки масами 2 г – 1 шт., 1 г – 2 шт., 0,1 г – 5 шт.
- 4 Лічильник – секундомір.
- 5 Випрямляч селеновий ВР - 12.

3 ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ ТА ОПИС УСТАНОВКИ

ОСНОВНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОСТУПАЛЬНОГО РУХУ МАТЕРІАЛЬНОЇ ТОЧКИ

Механічним рухом називається переміщення одних фізичних тіл відносно інших. Закони Ньютона є застосовними у випадку, коли фізичні тіла можна розглядати як матеріальні точки. **Матеріальною точкою** називається тіло, розмірами якого можна знехтувати порівняно з розмірами області, в якій відбувається рух. Лінія, вздовж якої рухається тіло у просторі, називається **траєкторією**. Тіло, відносно якого розглядається рух інших тіл, називають **тілом (точкою) відліку**. **Системою відліку** називається тіло відліку, пов'язане з визначеною (наприклад, прямокутною) системою координат і вибраним способом вимірювання часу. Залежно від вибраної системи відліку рух того самого фізичного тіла може бути різним. Тіло, що не рухається в одній системі відліку, в іншій може рухатись з постійною швидкістю, і з прискоренням у третій. Розрізняють **інерціальні і неінерціальні системи відліку**. З вищесказаного випливає, що рух

у механіці має **відносний характер**. Для математичного опису руху застосовують поняття **радіус – вектора, шляху, переміщення, швидкості та прискорення**.

Радіус-вектор – це вектор, який проводиться від точки відліку до досліджуваної точки (рис.3.1).

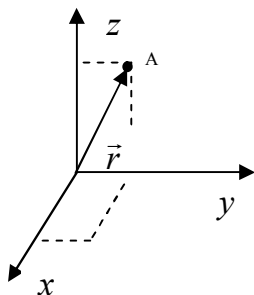


Рисунок 3.1 -
Радіус – вектор
точки А

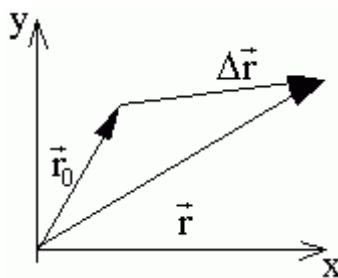


Рисунок 3.2 -
Переміщення точки

Радіус – вектор можна виразити через його проєкції (x, y, z) на координатні вісі і орти $(\vec{e}_x, \vec{e}_y, \vec{e}_z)$ цих осей:

$$\vec{r} = x\vec{e}_x + y\vec{e}_y + z\vec{e}_z. \quad (2.1)$$

Модуль радіуса-вектора дорівнює

$$|\vec{r}| = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}. \quad (2.2)$$

Шлях – це довжина траєкторії (S) .

Переміщенням називається вектор, який з'єднує початкове і кінцеве положення тіла $(\Delta\vec{r})$. Одиницею вимірювання шляху і переміщення є метр $[S] = 1\text{ м}$.

Швидкість - вектор, що характеризує напрямок і швидкість переміщення точки. **Швидкість** (\vec{v}) – це фізична величина, що показує, яке переміщення здійснює матеріальна точка за одиницю часу:

$$\vec{v} = \frac{d\vec{r}}{dt}. \quad (2.3)$$

Тоді

$$\vec{v} = \frac{d\vec{r}}{dt} = \frac{dx}{dt}\vec{e}_x + \frac{dy}{dt}\vec{e}_y + \frac{dz}{dt}\vec{e}_z = v_x\vec{e}_x + v_y\vec{e}_y + v_z\vec{e}_z, \quad (2.4)$$

$$\vec{v} = v_x\vec{e}_x + v_y\vec{e}_y + v_z\vec{e}_z. \quad (2.5)$$

Швидкість у даний момент часу називають **миттєвою швидкістю**. Одиницею вимірювання швидкості є $[v] = 1 \frac{м}{с}$.

За видом траєкторії розрізняють **прямолінійний і криволінійний рухи**.

Прискорення - вектор, що характеризує напрямок і швидкість зміни швидкості точки відносно точки відліку. **Прискорення** – це фізична величина, що показує, як з часом змінюється швидкість руху матеріальної точки:

$$\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt}, \quad (2.6)$$

$$\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt} = a_x\vec{e}_x + a_y\vec{e}_y + a_z\vec{e}_z. \quad (2.7)$$

Одиницею вимірювання прискорення є $[\vec{a}] = 1 \frac{м}{с^2}$.

Для спрощення вивчення криволінійного руху вектор прискорення розкладають на два компоненти: **тангенціальне** \vec{a}_τ (**дотичне** до траєкторії) і **нормальне** \vec{a}_n (**доцентрове**):

$$\vec{a} = \vec{a}_\tau + \vec{a}_n \quad a = \sqrt{a_\tau^2 + a_n^2}, \quad (2.8)$$

$$\vec{a}_\tau = \frac{dv}{dt}\vec{\tau}, \quad \vec{a}_n = \frac{v^2}{R}\vec{n}. \quad (2.9)$$

\vec{a}_τ змінює тільки модуль швидкості, а \vec{a}_n - тільки її напрям.

Миттєвий радіус кривизни траєкторії визначається радіусом кола, вписаного в ділянку траєкторії в даний момент часу.

ОСНОВИ ДИНАМІКИ ПОСТУПАЛЬНОГО РУХУ

Предметом вивчення динаміки є будь-які взаємодії тіл, що приводять до прискорених рухів.

В основу динаміки Ньютона покладено теорію руху матеріальної точки, яка ґрунтується на трьох законах (постулатах) Ньютона, встановлених шляхом аналізу дослідних даних. Закони Ньютона є справедливими для точкових тіл.

ПЕРШИЙ ЗАКОН НЬЮТОНА

I закон Ньютона (1687 р) (закон інерції) ґрунтується на принципі відносності Галілея, встановленому у 1636р.

Принцип відносності Галілея : усі механічні явища відбуваються однаково у всіх інерціальних системах відліку.

I закон Ньютона: існують такі системи відліку, у яких вільне тіло знаходиться у стані спокою або рухається рівномірно і прямолінійно

$$\vec{F} = 0, \Rightarrow \vec{v} = const . \quad (2.10)$$

Вільним називається тіло, на яке не діють інші тіла або їх дії скомпенсовані.

I закон Ньютона називають **законом інерції**, оскільки він встановлює існування інерціальних систем відліку. Системи відліку, у яких вільне тіло знаходиться у спокої або рухається рівномірно і прямолінійно, називають **інерціальними системами відліку**.

Маса і сила – це первинні поняття динаміки, які не мають формальних визначень. В інерціальній системі відліку змінити

стан руху тіла може тільки вплив на нього інших тіл. Кількісною характеристикою ступеня впливу одних тіл на інші є **сила** (\vec{F}). **Сила** \vec{F} - **векторна величина**. Це означає, що сила, крім модуля, має як точку прикладання, так і напрямок.

Виявляється, що під дією тієї самої сили різні тіла по-різному змінюють свою швидкість. Отже, прискорення, отримане тілом, залежить не тільки від сили, але і від властивостей самого тіла. Властивість тіл зберігати свій стан руху, називається **інертністю**. Кількісною мірою інертності є **маса тіла** (m). У міжнародній системі одиниць СІ одиницею вимірювання маси є кілограм: $[m] = 1\text{кг}$.

ДРУГИЙ ЗАКОН НЬЮТОНА

Другий закон Ньютона (закон руху) – основний закон механіки поступального руху. Він встановлює кількісний зв'язок між прискоренням тіла в інерціальній системі відліку і силами, які викликали це прискорення. **В інтегральній формі другий закон Ньютона** формулюється так: прискорення прямо пропорційне рівнодійній всіх діючих на тіло сил і обернено пропорційне масі самого тіла

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m}. \quad (2.11)$$

Для характеристики стану руху тіла вводиться фізична величина – **імпульс тіла** (\vec{p})

$$\vec{p} = m\vec{v}. \quad (2.12)$$

Імпульс характеризує дію сили в часі. Одиницею вимірювання сили є $[\vec{F}] = \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}^2} = 1\text{Н}$ – один Ньютон.

Другий закон Ньютона в диференціальній формі: в інерціальних системах відліку швидкість зміни імпульсу матері-

альної точки дорівнює рівнодійній всіх сил, прикладених до точки, і спрямована в той самий бік

$$\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt}. \quad (2.13)$$

У такому вигляді другий закон Ньютона є справедливим також для тіл змінної маси, в тому числі і при русі тіл з великими швидкостями, коли починає виявлятися залежність маси тіла від його швидкості (у релятивістській механіці).

ТРЕТІЙ ЗАКОН НЬЮТОНА

Під час взаємодії тіл виникають сили. **Третій закон Ньютона (закон взаємодії)** кількісно характеризує цю взаємодію. **Будь-які тіла, що взаємодіють, діють одне на одне з однаковими за модулем та протилежно спрямованими силами**

$$\vec{F}_{1,2} = -\vec{F}_{2,1}. \quad (2.14)$$

Ці сили діють вздовж лінії, що сполучає тіла. Потрібно відзначити, що сили в третьому законі Ньютона прикладені до різних тіл взаємно не компенсуються, тому їх не можна додавати як звичайні вектори. Сили, що фігурують у третьому законі Ньютона, завжди мають однакову природу та виникають парами.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА УСТАНОВКА

Машина Атвуда – пристрій, який дозволяє вивчати основні закони кінематики і динаміки поступального руху. При цьому можна змінювати величину рушійної сили – вагу перевантаження – не змінюючи маси системи або, не змінюючи величини сили, змінювати масу рухомої системи.

На рисунку 3.3 зображена схема машини Атвуда. Вона складається з: блока 1, який обертається навколо осі з малим те-

ртям; лінійної шкали 2; двох платформ 3,4 для вантажів, які задані ниткою 5, перекинutoю через блок 1; електромагніту 6, який фіксує блок.

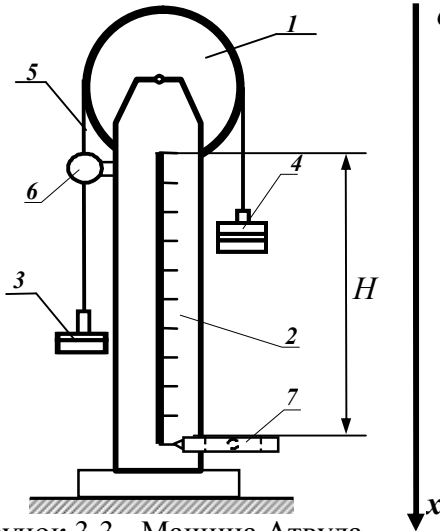


Рисунок 3.3 - Машина Атвуда
 1 – блок; 2 - шкала для вимірювання шляху руху платформ; 2 – електромагнітний затискач; 3,4 – платформи для важків; 5 – нитка; 6 – електромагніт; 7 – приймальний столик.

Котушка електромагнітного затискача 6 підключена через кнопковий вмикач на корпусі випрямляча ВР4-12 до його клем. Контакти електромагнітного затискача 6 (вони розімкнуті при натиснутій кнопці) підключені послідовно з контактами приймального столика 7, які замикаються при піднятті площадки приймального столика 7. Обидві пари контактів підключені до клем секундоміра, який фіксує час при їх замиканні.

З машиною Атвуда працюють таким чином. Встановивши на праву платформу 4 перевантаження m_D , піднімають платформу до

вирівнювання її нижньої площини з нульовою позначкою шкали. Після цього натискають пускову клавішу на корпусі випрямляча, піднімають площадку 8 і натискають клавішу "Сброс" на секундомірі, встановлюючи нуль його відліку. Після цього відпускають пускову клавішу. Затискач 6 звільнює нитку 5, одночасно замикаючи контакти, які вмикають секундомір. При проходженні вантажу 4 через площадку приймального столика 7, спрацьовує фотореле, розмикаючи контакти, які вимикають секундомір. Та-

ким чином, вдається точно виміряти час проходження вантажем вибраної відстані H .

При піднятті вантажу з перевантаженням m_{Π} на висоту H системі надається потенціальна енергія

$$W_{nom} = m_{\Pi} g H, \quad (2.15)$$

де g – прискорення вільного падіння.

Загальна потенціальна енергія вантажів при цьому не змінюється. Під час руху платформ потенціальна енергія перевантаження витрачається на кінетичну енергію обертального руху блока, виконання роботи проти сил тертя $F_{тер}$ на шляху H та надання платформам кінетичної енергії

$$m_{\Pi} g H = \frac{1}{2} (2m + m_{\Pi}) v^2 + \frac{I \omega^2}{2} + F_{тер} H, \quad (2.16)$$

де $I = \frac{m_B r_B^2}{2}$ – момент інерції блока; ω – його кутова швидкість.

Шляхом встановлення на правому вантажі додаткового важка малої маси можна компенсувати силу тертя. Оскільки робота проти сил тертя при цьому буде виконуватися за рахунок потенціальної енергії додаткового перевантаження, нею можна у виразі (2) знехтувати. Тоді, враховуючи, що

$$h = \frac{at^2}{2}, \quad v = at, \quad \omega = \frac{v}{r_B} = \frac{at}{r_B},$$

отримаємо

$$m_{\Pi} g \frac{at^2}{2} = \frac{at^2}{2} \left[(2m + m_{\Pi}) + \frac{m_B}{2} \right],$$

звідси

$$m_{II}g = M_E a,$$

де

$$M_E = 2m + m_{II} + \frac{m_B}{2}. \quad (2.17)$$

M_E - еквівалентна маса системи. **Еквівалентна маса** системи складається з m - мас вантажів, m_{II} - перевантажень і m_B - маси блока. Рух усієї системи можна уявити як рух точкового тіла з масою, яка дорівнює цій еквівалентній масі.

Величина прискорення при рівноприскореному русі без початкової швидкості дорівнює

$$a = \frac{2H}{t^2}. \quad (2.18)$$

Якщо праву платформу при кожному вимірюванні піднімати на однакову висоту H , то відношення прискорень буде становити

$$\frac{a_1}{a_2} = \frac{t_2^2}{t_1^2}. \quad (2.19)$$

ВИВЧЕННЯ ЗАКОНУ РУХУ ВАНТАЖІВ

Знайдемо закон руху вантажу. Направимо вісь X униз (рис. 3.4). На платформу 4 діють дві сили: сила тяжіння $\vec{F}_T = (m + m_{II})\vec{g}$ і сила натягу нитки \vec{T}_2 . Рівнодійна цих сил викликає рух вантажу з прискоренням \vec{a} . За другим законом Нью-

тона $m\vec{a} = \sum_i \vec{F}_i$. Спроектуємо вектори сил і прискорення на вісь

X :

$$(m + m_{\Pi})a = (m + m_{\Pi})g - T_2.$$

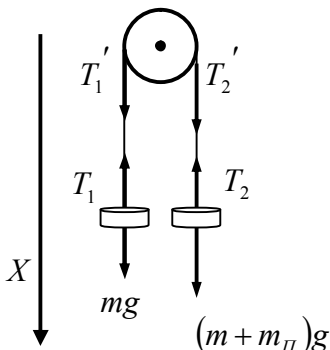


Рисунок 3.4 - Сили, які діють в машині Атвуда

Якщо нитка нерозтяжна, то прискорення лівої платформи дорівнює $-\vec{a}$. Тоді для неї одержуємо рівняння

$$-ma = mg - T_1.$$

Оскільки момент інерції блока малий, то ним можна знехтувати $I \approx 0$, тоді сили натягу нитки будуть однаковими $T_1 = T_2$.

Тоді

$$(m + m_{\Pi})a = (m + m_{\Pi})g - ma - mg$$

Звідки

$$a = \frac{m_{\Pi}}{(2m + m_{\Pi})} g. \quad (2.20)$$

З (3.19) випливає, що рух вантажів є рівноприскореним. Величина прискорення визначається співвідношенням мас перевантаження і платформ. **Закон шляху** для прямолінійного рівноприскореного руху показує функціональну залежність переміщення тіла від часу $H = H(t)$. Знайдемо $H(t)$ як рішення диференціального рівняння другого порядку:

$$\frac{d^2 H}{dt^2} = a, \text{ при}$$

$$a = const.$$

При першому інтегруванні маємо:

$$v = \frac{dH}{dt} = \int a dt = at + const ,$$

при $t = 0$, $v = v_0$, тоді $const = v_0$, тоді

$$v = v_0 + at .$$

Після другого інтегрування отримаємо

$$H(t) = v_0 t + \frac{at^2}{2} .$$

У розглянутому випадку $v_0 = 0$ і

$$H(t) = \frac{at^2}{2} . \tag{2.21}$$

ПЕРЕВІРКА ІІ ЗАКОНУ НЬЮТОНА

За допомогою машини Атвуда можна виконати перевірку **основного закону динаміки поступального руху**.

При цьому: 1) можна **змінювати величину рушійної сили** – вагу перевантаження – не змінюючи маси системи (шляхом перекладання важків з однієї платформи на іншу), тоді $m = const, a \sim F$; 2) не змінюючи величини рушійної сили, **змінювати масу рухомої системи** (шляхом додавання однакових важків до кожної платформи системи), тобто $\vec{F} = const, a \sim \frac{1}{M_E}$.

4 ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ І ПЕРЕВІРКА ЗАКОНУ РУХУ

Потрібно підтвердити, що при однакових масах платформ m і масі перевантаження $m_{\text{п}} = \text{const}$ (тобто при сталій рушійній силі), прискорення є сталим $a = \text{const}$ і не залежить від шляху H .

1.1 Компенсувати силу тертя в системі за допомогою декількох важків масою по 0,1 г, установлюючи їх на праву платформу. При скомпенсованому терті права платформа при легкому поштовху вниз має рухатися із сталою швидкістю.

1.2 Покласти на ліву платформу перевантаження масою $1g$, на праву – $2g$ і $1g$.

1.3 Підняти праву платформу так, щоб її нижня площина збігалася з нульовою позначкою шкали 2.

1.4 Виконати 5 вимірювань часу падіння вантажів, при перевантаженні $2g$, стежачи за відсутністю розгойдування вантажів.

1.5 За формулою $a = \frac{2H_1}{t^2}$ підрахувати прискорення. Результати вимірювань і підрахунків занести в таблицю 1.

1.6 Підняти праву платформу так, щоб її нижня площина збігалася з позначкою 10 см шкали 2. Повторити дії пунктів 1.4, 1.5 для шляху H_2 . Результати вимірювань і підрахунків занести в таблицю 1.

1.7 Підняти праву платформу так, щоб її нижня площина збігалася з позначкою 20 см шкали 2. Повторити дії пунктів 1.4, 1.5 для шляху H_3 . Результати вимірювань і підрахунків занести в таблицю 1.

1.8 Порівняти отримані значення середніх прискорень $\langle a_1 \rangle : \langle a_2 \rangle : \langle a_3 \rangle$ для різних висот падіння H_1, H_2, H_3 .

Зробити висновок.

ТАБЛИЦЯ 1 - Перевірка закону шляху

<i>Маса перевантаження $m_{II} = 2g$</i>								
<i>висота підняття вантажу</i> $H_1 =$			<i>висота підняття вантажу</i> $H_2 =$			<i>висота підняття вантажу</i> $H_3 =$		
<i>номер досліджу</i>	<i>час падіння, с</i>	<i>прискорення $a, \text{м/с}^2$</i>	<i>номер досліджу</i>	<i>час падіння, с</i>	<i>прискорення $a, \text{м/с}^2$</i>	<i>номер досліджу</i>	<i>час падіння, с</i>	<i>прискорення $a, \text{м/с}^2$</i>
1			1			1		
2			2			2		
3			3			3		
4			4			4		
5			5			5		
<i>Середн.</i>	X		<i>Середн.</i>	X		<i>Середн.</i>	X	

II ПЕРЕВІРКА ЗАЛЕЖНОСТІ ВЕЛИЧИНИ ПРИСКОРЕННЯ ВІД СИЛИ ПРИ СТАЛІЙ МАСІ СИСТЕМИ

$$m = \text{const}, a \sim F.$$

- 2.1** Покладіть на ліву платформу перевантаження масою $1g$, на праву – $2g$ і $1g$.
- 2.2** Виконайте п'ять вимірювань часу падіння вантажів при перевантаженні $2g$, стежачи за відсутністю розгойдування вантажів.
- 2.3** Перекладіть з лівої платформи на праву перевантаження в $1g$, збільшивши тим самим рушійну силу вдвічі. При цьому маса системи не зміниться.
- 2.4** Виконайте п'ять вимірювань часу падіння платформи при перевантаженні $4g$, стежачи за відсутністю розгойдування вантажів. Результати вимірювань запишіть у таблицю 2.
- 2.5** Підрахуйте прискорення вантажів та їх відношення, порівняйте з відношенням сил

$$\frac{a_1}{a_2} \approx \frac{F_1}{F_2}.$$

2.6 Оцініть похибку вимірювання за формулою

$$\delta = \frac{|a_1/a_2 - F_1/F_2|}{F_1/F_2} 100\%.$$

Зробіть висновок.

ТАБЛИЦЯ 2- Перевірка залежності $a \sim F$

Номер досліджу	Час падіння, с	Маса перевантаження, г	Висота підняття вантажа, м	Номер досліджу	Час падіння, с	Маса перевантаження, г	Висота підняття вантажа, м
1				6			
2				7			
3				8			
4				9			
5				10			
Середн.				Середн.			

**III ПЕРЕВІРКА ЗАЛЕЖНОСТІ ВЕЛИЧИН
ПРИСКОРЕННЯ ВІД МАСИ СИСТЕМИ ПРИ
СТАЛІЙ ВЕЛИЧИНІ РУШІЙНОЇ СИЛИ**

$$\vec{F} = const, a \sim \frac{1}{M_E}.$$

3.1 Пригвинтіть додаткові вантажі до правої і лівої платформ системи.

3.2 Виконайте п'ять вимірювань часу падіння вантажів при перевантаженні $2g$ (або $4g$ – за зазначенням викладача), стежачи за відсутністю розгойдування вантажів.

Результати вимірювань запишіть у таблицю 3.

ТАБЛИЦЯ 3 - Перевірка залежності $a \sim \frac{1}{M_E}$

Номер досліджу	Час падіння, c	Маса перевантаження, z	Висота підняття вантажа, M	Еквівалентна маса системи, M_E, z	Еквівалентна маса системи, M'_E, z
11					
12					
13					
14					
15					
Середнє					

3.3 Підрахуйте прискорення системи при рушійній силі $2z$ (або $4z$) за формулою (2.18) .

3.4 Підрахуйте еквівалентну масу системи за формулою (2.17) і після їх встановлення (M'_E) за формулою

$$M'_E = 4m + m_{II} + \frac{m_B}{2} .$$

3.5 Підрахуйте прискорення системи при різних еквівалентних масах, знайдіть їх відношення, та порівняйте з відношенням цих мас.

$$\frac{a_2}{a_3} = \frac{M'_E}{M_E} .$$

3.6 Зробіть висновок. Оцініть похибку вимірювань

$$\delta = \frac{|a_2/a_3 - M'_E/M_E|}{M'_E/M_E} 100\% .$$

5 КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1 Дати визначення механічного руху, матеріальної точки та точки відліку.

2 Основне завдання механіки. Системи відліку. Інерціальні та неінерціальні системи відліку.

3 Дайте визначення величин „радіус-вектор”, „шлях”, ”переміщення”, „швидкість”, „прискорення”. Одиниці вимірювання цих величин.

4 Дайте визначення тангенціального, нормального та повного прискорень. Миттєвий радіус кривизни.

5 Чи може залежність шляху S від часу t зображуватися графіками, показаними на рис.3.5 (а,б,с)?

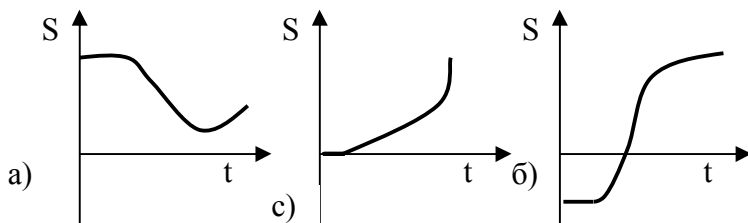


Рисунок3.5

6 Що можна сказати про прискорення частинки, якщо при її русі має місце умова: а) швидкість частинки $\vec{v} = const$; б) модуль швидкості $v = const$?

7 В яких випадках за умови $\vec{a} = const$ рух частинки є:

а) прямолінійним; б) не прямолінійним?

8 Якщо нормальне прискорення частинки стало за модулем, що можна сказати про форму траєкторії частинки у випадках, коли проекція тангенціального прискорення на напрямок руху:

а) дорівнює нулю; б) додатна; в) від'ємна?

9 Дати визначення сили. З'ясуйте фізичний зміст поняття "маса"? Чому маса системи, яка фігурує в даній роботі, називається еквівалентною?

10 Сформулюйте закони динаміки Ньютона. У яких системах відліку вони справедливі?

11 Принцип відносності Галілея і перший закон Ньютона.

12 Конструкція машини Атвуда.

13 Вантажі масами m_1 і m_2 в машині Атвуда починають рух в момент часу $t = 0$. Знайти: а) імпульси тіл p_1 і p_2 до моменту τ після початку руху; б) імпульс системи на цей момент. Вважати $m_1 > m_2$.

14 Як визначити похибки в даній роботі?

6 СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Савельев И.В. Курс физики. - М.:Наука,1989.- Т.1.
2. Пономаренко В.И., Ильин Ю.М. Курс общей физики. - К.:ВИПОЛ,1997. - Т.1.
3. Черняк Л.М. Лекції з загальної фізики. – Суми: Вид-во Алан – ЕКС, 2003. книга 1.
4. Барановський В.М., Бережний П.В., Горбачук І.Т., Дущенко В.П., Шут М.І. Загальна фізика. Лабораторний практикум.- К: Вища школа, 1990.