

*Гродзенскі дзяржаўны ўніверсітэт імя Янкі Купалы  
Кафедра агульнай фізікі  
Лабараторыя механікі  
ауд. 408*

**Лабараторная работа №4**

**ВЫВУЧЭННЕ ПРАМАЛІНЕЙНАГА РУХУ З ДАПАМОГАЙ  
МАШЫНЫ АТВУДА**

*для студэнтаў спецыяльнасці “ФІЗІКА”*

**Гродна, 2010**

## ВЫВУЧЭННЕ ПРАМАЛІНЕЙНАГА РУХУ З ДАПАМОГАЙ МАШЫНЫ АТВУДА

### Мэта работы:

*Вывучэнне прамалінейнага руху з дапамогай машыны Атвуда. Доследнае вызначэнне кінематычных і дынамічных характарыстык сістэмы.*

### Прылады і абсталяванне:

*Машына Атвуда, два грузы, даважкі, секундамер.*

### Тэарэтычныя асновы

*Паступальным рухам цела называецца такі рух, пры якім прастая, праведзеная праз два адвольныя пункты гэтага цела, застаецца паралельнай самой сабе. Прыватным выпадкам паступальнага руху з'яўляецца прамалінейны рух.*

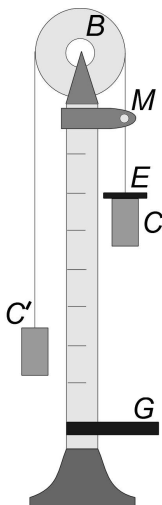
Згодна першаму закону Ньютана ў інерцыяльнай сістэме адліку цела, на якое не дзейнічаюць іншыя целы, або іх дзеянне скампенсаванае, будзе рухацца раўнамерна (з пастаяннай па модулю скорасцю) прамалінейна або знаходзіцца ў стане спакою. Калі ж на цела дзейнічае нейкая сіла, то згодна другому закону Ньютана яна можа або дэфармаваць цела, або прымусіць яго рухацца. Пры пастаяннай па модулю велічыні дзеючай сілы цела рухаецца з пастаянным паскарэннем – роўнапаскорана або роўназапаволена.

Калі ж велічыня сілы з цягам часу змяняецца, то назіраемы рух будзе паскораным або запаволеным, прычым паскарэнне таксама будзе з'яўляцца функцыяй часу.

### Доследная прылада

Для вывучэння прамалінейнага і, адпаведна, паступальнага руху, выкарыстоўваецца машына Атвуда, якая складаецца з вертыкальнай стойкі са шкалай, уздоўж якой рухаюцца

прывязаныя адзін да аднаго легкой ниткай (лескай) грузы  $C$  і  $C'$  (малюнак 1). На верхнім канцы стойкі замацаваны лёгкі блок  $B$ , які вярчаецца з невялікім трэннем. На грузы можна класці дадаткова даважкі  $E$  (перагрузкі), пры наяўнасці якіх сістэма пачынае рухацца пад дзеяннем пастаяннай сілы – сілы ціску даважкі на груз. Электрамагнітны пускацель  $M$  прызначаны для запуску грузаў. Унізе шкалы замацавана суцэльная платформа  $G$ . Час руху грузаў вымяраецца секундамерам.



**Мал. 1.** Машына Атвуда

### Тэорыя метада

Разгледзім два грузы аднолькавай масы  $m$ , звязаныя тонкай нерасцяжнай ниткай, перакінутай цераз блок  $R$ .

Няхай адзін з грузаў перамесціцца ўніз разам з перагрузкам на адлегласць  $h$ . Пры гэтым другі груз паднімецца на такую ж самую адлегласць. Такім чынам, работа, створаная пры перамяшчэнні сістэмы, вызначыцца работай вагі перагрузкі і будзе роўнай:

$$A = m_i gh \quad (1)$$

дзе  $m_i$  – маса перагрузкі,  $g$  – паскарэнне свабоднага падзення,  $h$  – адлегласць, на якую апусціцца груз.

Набытая сістэмай кінетычная энергія вызначаецца выразам:

$$E = \frac{(2m + m_i)v^2}{2} + \frac{J\omega^2}{2} \quad (2)$$

дзе  $m$  – маса аднаго груза,  $v$  – хуткасць паступальнага руху груза ў канцы шляху,  $J$  – момант інерцыі блока ў выглядзе дыску, адносна восі, якая праходзіць праз яго цэнтр,  $\omega$  – вуглавая хуткасць, набытая блокам.

Калі  $M$  – маса блока, а  $R$  – яго радыус, то момант інерцыі дыска вызначаецца з выразу:

$$J = \frac{MR^2}{2} \quad (3)$$

Паміж  $v$ ,  $\omega$ ,  $R$  для апісанага выпадку існуе судачыненне  $v = \omega R$ , таму выраз (2) можна запісаць у форме:

$$E = \frac{(2m + m_i)v^2}{2} + \frac{MR^2\omega^2}{4} = \left(2m + m_i + \frac{M}{2}\right) \frac{v^2}{2}.$$

З улікам судачынення для роўнапаскоранага руху, якое звязвае хуткасць паступальнага руху, паскарэнне і пройдзены шлях  $v^2 = 2ah$  атрымаем наступнае:

$$E = (2m + m_i + M/2)ah \quad (4)$$

Калі не ўлічваць дзеянне сіл трэння і супраціўлення, то створаная работа цалкам ідзе на набыццё сістэмай кінетычнай энергіі. Тэарэтычнае паскарэнне грузаў у такім выпадку можа быць вызначана як:

$$a_m = \frac{m_i}{2m + m_i + M/2} g \quad (5)$$

У рэальных умовах паскарэнне будзе меншым з-за сіл трэння (сілы трэння ў восі блока, напрыклад) і супраціўлення паветра.

## Практыкаванне 1

### ВЫВУЧЭННЕ ЗАКОНУ ШЛЯХУ

#### Тэорыя метаду

Калі на цела (сістэму) дзейнічае пастаянная па модулю і напрамку сіла (сума сіл), то можна назіраць роўнапаскораны паступальны рух, які характарызуецца паскарэннем  $a$ . Для нулявой пачатковай скорасці кінематычны закон руху можна запісаць у выглядзе так званага закону шляху:

$$h = \frac{at^2}{2}, \quad (6)$$

адкуль для паскарэння можна запісаць судачыненне, якое не залежыць ад вымяраемых часу і шляху, а вызначаецца толькі вагою даважка:

$$a = \frac{2h_1}{t_1^2} = \frac{2h_2}{t_2^2} = \dots = \frac{2h_n}{t_n^2} \quad (7)$$

#### Парадак выканання работы:

1. Вызначце масы грузаў  $m$  і перагрузкаў  $m_i$  з дакладнасцю 0,1 г.
2. На груз пакладзіце даважак. Пры замкнутым электрычным ланцугу (мінімальна неабходнае электрычнае напружанне падбярэце доследна) ўсталяўце неабходнае становішча грузаў: ніжнюю аснову груза на некаторай вышыні  $h_i$  (не вельмі малой) над суцэльнай платформай.
3. Пасля адначасовага размыкання ланцуга і запуску секундамера вымерайце час  $t_i$  да ўдару груза аб суцэльную платформу.
4. Вызначце час падзення  $t_i$  мінімум 5 разоў для дадзенай адлегласці.
5. Змяніце ўзаемнае палажэнне груза і суцэльнай платформы  $h_i$ . Вызначце час падзення  $t_i$  мінімум 5 разоў і для другой адлегласці.
6. Пункты 2–5 неабходна правесці для 4–5 розных даважкаў.  
*Заўвага! Не трымайце доўга ўключаны электрамагніт, які награвяецца і перастае функцыяніраваць.*
7. Доследнае паскарэнне вызначце з выразу (7).
8. Дадзеныя занясіце ў табліцу, магчымы варыянт якой:

№	$m$ , кг	$m_i$ , кг	$M$ , кг	$t_i$ , с	$h_i$ , м	$a_i$ , м/с <sup>2</sup>	$\langle a \rangle$ , м/с <sup>2</sup>	$a_m$ , м/с <sup>2</sup>

9. Параўнайце доследна атрыманае сярэдняе значэнне паскарэння з тэарэтычным, разлічаным з выразу (5).

10. Ацаніце хібнасці вымярэнняў. Зрабіце выснову.

Неабходныя дадзеныя: маса блока  $M = 130,95$  г.

## Практыкаванне 2

### ВЫВУЧЭННЕ ЗАКОНА СКОРАСЦІ

#### Тэорыя метаду

Пры выкананні гэтага практыкавання аналізуецца рух на двух участках: роўнапаскораным і раўнамерным. Спачатку груз пад дзеяннем вагі даважку будзе рухацца з пастаянным паскарэннем да калыцавой платформы, пры праходжанні якой груз далей будзе рухацца без перагрузкі, па інерцыі, г.зн. амаль раўнамерна (не ўлічваюцца сілы трэння і супраціўлення).

Закон скорасці для ўчастку роўнапаскоранага руху будзе мець выгляд:

$$v = at \quad (8)$$

З улікам таго, што шлях роўнапаскорана руху да калыцавой платформы можа быць вызначаны як

$$S_1 = \frac{at_1^2}{2}, \quad (9)$$

шлях раўнамернага руху ад калыцавой платформы да суцэльнай

$$S_2 = vt_2, \quad (10)$$

а скорасць напрыканцы роўнапаскоранага ўчастку (яна ж і скорасць раўнамернага руху):

$$v = at_1 \quad (11)$$

атрымаем выраз для паскарэння сістэмы:

$$a = \frac{S_2^2}{2S_1t_2^2}. \quad (12)$$

### Парадак выканання работы:

1. Паміж грузам і суцэльнай платформай размясціце кальцавую платформу.
2. На груз пакладзіце даважак. Пры замкнутым электрычным ланцугу ўсталюўце неабходнае становішча грузаў і кальцавой платформы.
3. Секундамерам вымерайце час  $t_i = t_2$  ад зняцця перагрузку кальцавой платформай да ўдару грузу аб суцэльную платформу (час раўнамернага руху).
4. Па шкале прылады вызначце велічыню ўчасткаў шляху, якія адпавядаюць роўнапаскоранаму і раўнамернаму руху.
5. Вызначце час падзення  $t_i = t_2$  мінімум 5 разоў для дадзенай адлегласці.
6. Змяніце палажэнне кальцавой платформы адносна суцэльнай. Вызначце час падзення  $t_2$  мінімум 5 разоў для новай адлегласці.
7. Пункты 2–6 выканайце для двух розных даважкаў.
8. Доследнае паскарэнне вызначце з выразу (12).
9. Дадзеныя занясіце ў табліцу, магчымы варыянт якой:

№	$m$ , кг	$m_i$ , кг	$t_i$ , с	$S_1$ , м	$S_2$ , м	$a_i$ , м/с <sup>2</sup>	$\langle a \rangle$ , м/с <sup>2</sup>	$a_m$ , м/с <sup>2</sup>

10. Параўнайце доследна атрыманае сярэдняе значэнне паскарэння з тэарэтычным, разлічаным з выразу (5).
11. Ацаніце хібнасці вымярэнняў. Зрабіце выснову.

### Практыкаванне 3

#### ВЫВУЧЭННЕ ДРУГОГА ЗАКОНА НЬЮТАНА

##### Тэорыя метаду

Калі даважкі перакладваць з аднаго грузу на другі, то маса ўсёй сістэмы не зменіцца, аднак выніковая знешняя сіла, прыкладзеная да сістэмы, будзе змяняцца, а з ёй і паскарэнне руху сістэмы. Для двух розных выпадкаў будзем мець:

$$F_1 = Ma_1,$$

$$F_2 = Ma_2,$$

$$S_1 = (1/2)a_1t_1^2,$$

$$S_2 = (1/2)a_2t_2^2.$$

Шляхам дзялення адпаведных выказаў атрымоўваем канчатковае судачыненне:

$$\frac{F_1}{F_2} = \frac{S_1t_2^2}{S_2t_1^2} \quad (13)$$

### **Парадак выканання работы:**

1. Падрыхтуйце прыладу да вымярэнняў як і ў першым практыкаванні.
2. Пакладзіце даважкі на розныя грузы.
3. Секундамерам вымерайце час  $t_1$  руху сістэмы ад размыкання ланцуга да ўдару грузу аб суцэльную платформу.
4. Пакладзіце абодва даважкі на адзін груз.
5. Секундамерам вымерайце час  $t_2$  руху сістэмы ад размыкання ланцуга да ўдару грузу аб суцэльную платформу.
6. Змяняючы тройчы палажэнне грузу адносна суцэльнай платформы, вызначце часы руху сістэмы  $t_1$  і  $t_2$  мінімум 3 разы для кожнай адлегласці. Разлічыце сярэднія значэнні велічынь.
7. Дадзеныя занясіце ў табліцу.
8. Прааналізуйце шляхам падстаноўкі вымераных велічынь судачыненне (13). Зрабіце выснову.

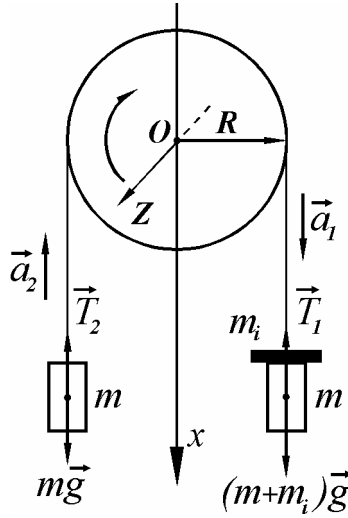
### **Практыкаванне 4**

### **ВЫЗНАЧЭННЕ СІЛЫ ТРЭННЯ Ў ВОСІ БЛОКА**

#### **Тэорыя метаду**

Запішам сістэму ўраўненняў для роўнапаскоранага руху сістэмы грузаў і блоку (малюнак 2), выкарыстоўваючы другі закон Ньютана для паступальнага руху грузаў і асноўнае ўраўненне дынамікі вярчальнага руху для вярчальнага руху дыска.





**Мал. 2.** Да разліку паскарэння прамалінейнага руху

У вектарным выглядзе ўраўнення для паступальнага руху:

$$\begin{cases} \vec{T}_2 + m\vec{g} = m\vec{a}_2, \\ (m + m_i)\vec{g} + \vec{T}_1 = (m + m_i)\vec{a}_1, \end{cases}$$

і вярчальнага руху:

$$\sum \vec{M} = J\vec{\epsilon},$$

дзе  $\vec{T}_1$ ,  $\vec{T}_2$  – адпаведныя сілы нацяжэння нітак,  $\vec{a}_1$ ,  $\vec{a}_2$  – паскарэнні грузаў,  $\sum \vec{M}$  – сума момантаў усіх сіл, якія дзейнічаюць на блок, адносна восі  $OZ$  (малюнак 2),  $J$  – момант інерцыі блока (адносна восі  $OZ$ ),  $\vec{\epsilon}$  – вуглавое паскарэнне.

Сістэма з трох ураўненняў у праекцыях на восі  $OX$  і  $OZ$  будзе мець выгляд:

$$\begin{cases} -T_2 + mg = -ma, \\ (m + m_i)g - T_1 = (m + m_i)a, \\ -T_1R + T_2R + M_{mp} = -J\epsilon, \end{cases}$$

або пасля спрашчэння запішам канчаткова:

$$\begin{cases} T_2 - mg = ma, \\ (m + m_i)g - T_1 = (m + m_i)a, \\ T_1 R - T_2 R - M_{mp} = J\varepsilon, \end{cases} \quad (14)$$

дзе  $R$  – радыус блока,  $M_{mp}$  – момант сілы трэння восі блока.

Пры атрыманні (14) было ўлічана, што з-за таго, што нітка нерасцяжная, модулі паскарэння грузаў аднолькавыя ( $|\vec{a}_1| = |\vec{a}_2| = a$ ).

Рашаючы сістэму ўраўненняў (14), атрымоўваем:

$$a = \frac{m_i g - M_{mp}/R}{2m + m_i + J/R^2} \quad (15)$$

Калі ўлічыць, што  $m_i \ll 2m + J/R^2$ , то

$$a(2m + J/R^2) = m_i g - M_{mp}/R. \quad (16)$$

З (16) відавочна, што паскарэнне лінейна залежыць ад сілы цяжару даважка  $m_i g$ . У прыватнасці, пры  $a = 0$   $M_{mp}/R = (m_i g)_{a=0}$ .

### Парадак выканання работы:

1. Скарыстайцеся вынікамі першага практыкавання для вызначэння паскарэння, надаваемага даважкам, выбраўшы сярэднія значэнні паскарэнняў для кожнага даважка.
2. Пабудуйце залежнасць  $a = f(m_i g)$ , узяўшы сярэднія значэнні паскарэння  $a$  і адпаведныя значэнні  $m_i g$  для кожнага з даважкаў.
3. Адрэзак на восі абсцыс ад пачатку каардынат, адсякаемы графікам  $a = f(m_i g)$ , дае велічыню  $M_{mp}/R$ . Па гэтай велічыні вызначце момант сілы трэння  $M_{mp}$  і сілу трэння, улічваючы, што яна прыкладзеная да паверхні восі.
4. Зрабіце выснову.

Неабходныя дадзеныя: радыус восі блока  **$R=9,5$  мм**

### **Пытанні для самакантролю:**

1. Што называюць матэрыяльным пунктам, сістэмай адліку?
2. Што называюць траекторыяй? Як падраздзяляюць рух па тыпе траекторыі?
3. Што называецца перамяшчэннем, шляхам? Пры якім руху модуль перамяшчэння і шлях супадаюць?
4. Акрэсліце паняцці: радыус-вектар, вектар сярэдняй скорасці, модуль сярэдняй скорасці, сярэдняя шляхавая скорасць.
5. Які рух называецца раўнамерным? Роўнапераменным?
6. Сфармулюйце першы і другі законы Ньютана.
7. Якія фізічныя велічыні называюцца масай, сілай?
8. Дайце поўнае тлумачэнне трэцяга закону Ньютана.