

А.А. Луцэвіч, кандыдат педагагічных навук, дацэнт
кафедры методыкі выкладання фізікі БДПУ;

Ч.М. Федаркоў, кандыдат педагагічных навук,
дацэнт кафедры агульнай фізікі БДПУ;

Трэнне і яго эксперыментальнае вывучэнне

Фізічная з’ява, якая ў прыродазнаўстве і тэхніцы атрымала назву трэнне, шырока распаўсюджаная і незвычайна разнастайная па сваёй прыродзе. Пры гэтым трэба мець на ўвазе, што трэнне ніколі не праяўляе сябе самастойна, падобна, напрыклад, праяўленню гравітацыі. Але трэнне прысутнічае ўсюды, накладваючы свой адбітак на ўсе рухі і ўзаемадзеянні. Яно іграе як карысную, так і шкодную ролю пры працяканні фізічных працэсаў.

Трэнне заўжды суправаджаецца выдзяленнем цеплыні, прыводзіць да зношвання машын і механізмаў, перашкаджае любому перамяшчэнню аднаго цела адносна паверхні другога. Гэта прыводзіць да вялікага выдатку энергіі і паліва. Такім чынам, трэнне з’яўляецца рэальным абмежаваннем, якое накладваецца на фізічную мадэль з’явы. Таму не выпадкова тэарэтычныя і прыкладныя пытанні, звязаныя з трэннем, вывучаюцца і даследуюцца на ўсіх узроўнях фізічнай навукі.

Па вызначэнню знешняе трэнне – гэта “механічнае супраціўленне, якое ўзнікае ў плоскасці дотыку двух прыціснутых адно да аднаго цел пры іх адносным перамяшчэнні” [1, с.15].

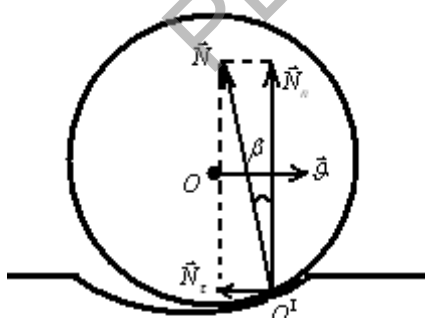
Першае вучэбнае знаёмства з фізічнай з’явай, якой з’яўляецца трэнне, вучні пачынаюць у 7-м класе, дзе і выконваюць лабараторную работу “Вывучэнне сілы трэння” [2]. У рамках школьнай фізікі разглядаюцца: тыпы трэння (спакою, слізгання, качэння), іх характар (сухое, вязкае), характарыстыкі трэння (сіла трэння, каэфіцыент трэння) і закон Амантона $F = \mu N$.

Студэнты фізічнага факультэта педагагічнай вунітэраэтычна і эксперыментальна вывучаюць сухое трэнне на больш высокім узроўні ў курсе “Агульная фізіка”, раздзел “Механіка”. Пры гэтым выконваецца лабараторная работа “Вывучэнне трэння качэння пры дапамозе нахіленага маятніка” [3].

Тэорыя, эксперымент і практыка паказваюць, што сіла трэння качэння ў шмат разоў меншая сілы трэння слізгання для аднолькавай пары цел. Таму ў тэхніцы ў большасці выпадкаў трэнне слізгання замяняюць трэннем качэння (шарыкавыя і ролікавыя падшыпнікі).

Першыя сур’ёзныя доследы трэння качэння былі праведзены Ш.Кулонам у выніку якіх была атрымана залежнасць $F = \mu \frac{N}{R}$, вызначае закон Кулона: сіла трэння качэння прама прапарцыйна сіле нармальнага ціску і адваротна прапарцыйна радыусу цыліндра (кола, шарыка і т.п.). Каэфіцыент трэння качэння μ мае размернасць даўжыні. У прадстаўленні Кулона каэфіцыент трэння качэння адыгрывае ролю пляча сілы нармальнага ціску.

Сучасныя ўяўленні аб прыродзе трэння качэння паказваюць, што яно абумоўлена дэфармацыяй паверхні, па якой коціцца цела, у выніку чаго перад целам узнікае валік, які перашкаджае руху [4]. У гэтым выпадку сіла нармальнага ціску \vec{N} праходзіць праз імгненную вось вярчэння O'



Рысунк 1 - Качэнне
цыліндра па паверхні

(рысунк 1). Вугал β звычайна малы.

Складальная \vec{N}_τ накіравана супраць руху цыліндра, вектара \vec{g} і з’яўляецца сілай трэння качэння. Адносна цэнтра цыліндра O сілы \vec{N}_n і \vec{N}_τ ствараюць вярчальныя моманты, якія пры

раўнамерным руху ($\vec{g} = \text{const}$) роўныя

$N_n \cdot \mu = N_\tau \cdot R$. Калі ўлічыць, што для малых вуглоў β $N_n \approx N$, то $N \cdot \mu \approx F \cdot R$,

адкуль $F \approx \mu \frac{N}{R}$ - выраз закону Кулона. Гэта азначае, што тэорыя трэння

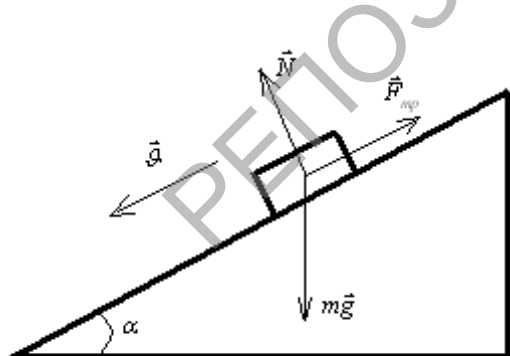
качэння, заснаваная на дэфармацыі паверхні, справядлівая. Значэнні каэфіцыента трэння качэння для розных пар цел ляжаць у межах: драўляны каток па драўніне – (0,05-0,08)см; стальны шарык па сталі – (0,0005-0,001)см; стальное кола па стальной рэйцы – 0,5мм; драўніна па сталі – (0,03-0,04)см; стальное кола па драўніне – (0,15-0,25)см [5]. Даныя паказваюць, што каэфіцыент трэння качэння залежыць і ад формы цела, якое коціцца.

У лабараторнай рабоце “Вывучэнне трэння качэння пры дапамозе нахіленага маятніка” каэфіцыент трэння качэння вызначаецца па памяншэнні амплітуды ваганняў шарыка па нахіленай плоскасці:

$$\mu = \frac{(\cos \varphi_n - \cos \varphi_0) \operatorname{tg} \beta}{n(\varphi_0 + \varphi_n)} R,$$

Дзе φ_0 і φ_n - вуглы адхілення маятніка, β - вугал нахілу маятніка, n – колькасць простых ваганняў шарыка, R – радыус шарыка.

Такім чынам, каб вызначыць значэнне каэфіцыента трэння качэння μ трэба мець даволі складаную эксперыментальную ўстаноўку, правесці вымярэнні пяці фізічных велічынь і патраціць значны час для падліку каля 20 простых ваганняў маятніка. Мы прапаноўваем іншы метадад вызначэння каэфіцыента трэння качэння – кінематычны. У аснове метаду ляжыць



**Рысунак 2 - Саслізганне
цела з нахіленай плоскасці**

прамалінейны рух цела па нахіленай плоскасці. Для вызначэння каэфіцыента трэння слізгання гэты метадад ужо выкарыстоўваецца (рысунак 2). Каэфіцыент μ вызначаецца па вуглу нахілу плоскасці да гарызонту:

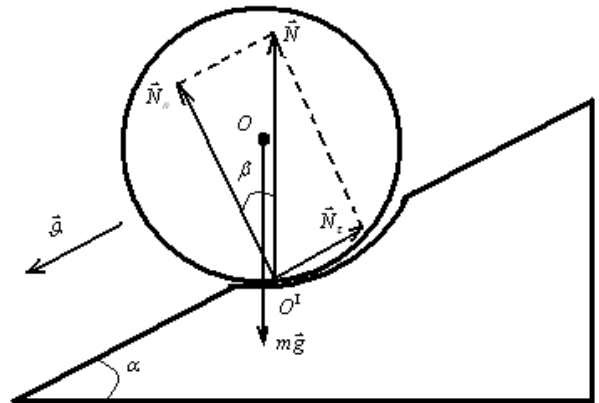
$$\mu = \operatorname{tg} \alpha.$$

Разгледзім качэнне цела (цыліндра, шарыка, кола і т.п.) па нахіленай плоскасці, вырабленай з вызначанага матэрыялу (рысунак 3).

З закону захавання энергіі маем

$$mgh - \left(\frac{m\mathcal{G}^2}{2} + \frac{I_0\omega^2}{2} \right) = A_{mp}, \quad (1)$$

дзе m – маса цела, h – першапачатковая вышыня, на якой знаходзіцца цела, \mathcal{G} – скорасць цела ў асновы плоскасці, I_0 – момант інерцыі цела адносна яго восі сіметрыі, ω – вуглавая скорасць, $A_{тр}$ – работа па пераадоленню сілы трэння качэння.



Рысунак 3 - Скочванне цыліндра з нахіленай плоскасці

У выпадку цыліндра, які коціцца, $I_0 = \frac{1}{2}mR^2$, $\omega = \frac{\mathcal{G}_n}{R} = \frac{\mathcal{G}}{R}$. Такім чынам, поўная кінетычная энергія цыліндра ў асновы нахіленай плоскасці

$$E_k = \frac{3}{4}m\mathcal{G}^2. \quad (2)$$

Па вызначэнні $A_{mp} = F \cdot L$, дзе L – шлях, які праходзіць цела па нахіленай плоскасці, калі скочваецца з вышыні h . Згодна закону Кулона $F \approx \mu \frac{N}{R}$. Для малых вуглоў β $N \approx N_n \approx mg \cos \alpha$. У выніку работа па пераадоленню сілы трэння качэння роўная:

$$A_{mp} = \frac{\mu mg \cos \alpha}{R} L. \quad (3)$$

З раўнанняў (1), (2) і (3) атрымліваем

$$mgh - \frac{3}{4}m\mathcal{G}^2 = \frac{\mu mg \cos \alpha}{R} L. \quad (4)$$

Пры раўнапаскораным руху цела без пачатковай скорасці $\mathcal{G} = at$, дзе $a = a_\tau = \varepsilon R$. Вуглавое паскарэнне ε знойдзем з асноўнага раўнання дынамікі вярчальнага руху

$$I\varepsilon = M, \quad (5)$$

дзе I – момант інерцыі цела адносна імгненнай восі вярчэння O' , M – момант сілы цяжару адносна гэтай жа восі. Згодна тэарэмы Штейнера

$I = I_0 + mR^2 = \frac{1}{2}mR^2 + mR^2 = \frac{3}{2}mR^2$. Момент сілы $M = mg \sin \alpha$ (рысунак 3). У

сувязі з чым раўнанне (5) атрымлівае выгляд: $\frac{3}{2}mR^2 \cdot \varepsilon = mgR \sin \alpha$, адкуль

вуглавое паскарэнне $\varepsilon = \frac{2g \sin \alpha}{3R}$. У выніку скорасць цела ў асновы нахіленай

плоскасці роўная

$$v = \frac{2}{3}gt \sin \alpha. \quad (6)$$

Калі падставіць выраз (6) у раўнанне (4), то атрымаем:

$$mgh - \frac{3}{4}m \cdot \left(\frac{2}{3}gt \sin \alpha\right)^2 = \frac{\mu mg \cos \alpha}{R}L,$$

адкуль атрымліваем выраз для каэфіцыента трэння качэння:

$$\mu = R \operatorname{tg} \alpha \cdot \left(1 - \frac{gt^2 \sin \alpha}{3L}\right). \quad (7)$$

Такім чынам, каб вызначыць каэфіцыент трэння качэння трэба правесці прасцейшыя вымярэнні чатырох велічынь: α – вугал нахілу плоскасці да гарызонту, L – шлях скочвання цела (як правіла, даўжыню плоскасці), t – час скочвання, R – радыус цела, якое скочваецца з нахіленай плоскасці.

З улікам радыуса цыліндра R яго цэнтр мас будзе знаходзіцца адносна асновы нахіленай плоскасці на вышыні $h + R \cos \alpha = h_0$. У сувязі з чым, формула (7) будзе мець выгляд:

$$\mu = \frac{R(3h_0 - gt^2 \sin^2 \alpha)}{3L \cos \alpha}. \quad (8)$$

З мэтай ацэнкі дакладнасці прапанаванага метаду быў праведзены правярачны эксперымент, вынікі якога занесены ў табліцу 1. У якасці цел, якія скочваліся, браліся целы цыліндрычнай формы. Час скочвання цела з нахіленай плоскасці вызначаўся з дапамогай электроннага секундамера са стартам-фінішам з дакладнасцю да 0,01с.

Табліца 1. Вынікі эксперыменту па вызначэнню каэфіцыента трэння качэння

№п/п	Матэрыял	L,м	α ,град	$\langle t \rangle$,с	R,мм	$\langle \mu \rangle$,мм
1.	Драўніна па драўніне	0,95	~ 4	2,04	25,3	0,60
2.	Драўніна па сталі	0,95	~ 4	2,10	25,3	0,48
3.	Драўніна па аргшкле	0,95	~ 4	1,90	25,3	0,85
4.	Сталь па сталі	0,95	~ 4	1,95	23,4	0,65
5.	Сталь па драўніне	0,95	~ 4	2,01	23,4	0,55
6.	Сталь па аргшкле	0,95	~ 4	1,79	23,4	0,91

Вынікі паказваюць, што значэнні каэфіцыента трэння качэння, атрыманыя эксперыментальным метадам, нядрэнна стасуюцца з таблічнымі данымі. Напрыклад, для выпадку качэння драўлянага цыліндра па драўлянай паверхні $\langle \mu \rangle = 0,60$ мм, а таблічнае значэнне $\langle \mu \rangle$ качэння драўлянага катка па драўлянай паверхні складае 0,65мм. Адносная хібнасць у гэтым выпадку роўная ~ 8%. Пры гэтым трэба мець на ўвазе, што значэнне каэфіцыента трэння качэння вельмі моцна залежыць ад стану і якасці апрацоўкі паверхні нахіленай плоскасці і цела, якое коціцца.

Прапанаваны метады па вызначэнні каэфіцыента трэння качэння можа быць пакладзены ў аснову лабараторнай работы ці дадатковага задання для ВДР.

Літаратура

1. Беларуская энцыклапедыя: У 18т. Т.16. – Мн.: БелЭн, 2003. – 576с.
2. Исаченкова Л.А., Лещинский Ю.Д. Физика: Учеб. пособие для 7-го кл. общеобразоват. шк. с рус. языком обучения. – Мн.: Нар.асвета, - 1998. – 192с.
3. Курс агульнай фізікі. Лабараторны практыкум: Вучэны дап. для ст-аў фіз.-мат. спец. вуну /В.А Бондар і інш.; Пад рэд Ул.А.Якавенкі. – Мазыр, Белы Вецер, 2000. – 436с.
4. Физический энциклопедический словарь. – М.: Сов.энцикл., 1983. – 928с.

5. Енохович А.С. Справочник по физике и технике: Учеб. пособ. – 3-е изд. перераб. и доп. – М.: Просвещение, 1989. – 224с.

РЕПОЗИТОРИЙ БГПУ