

АСНОЎНЫЯ ЎЯЎЛЕННІ АБ НЕІНЕРЦЫЯЛЬНЫХ СІСТЭМАХ АДЛІКУ Ў КУРСЕ ФІЗІКІ АГУЛЬНААДУКАЦЫЙНАЙ ШКОЛЫ

У. А. Якавенка, А. А. Луцэвіч, Ч. М. Федаркоў

Вядома, што фізіка з'яўляецца адной з навук аб прыродзе. Гэта навука аб навакольным свеце, які вельмі разнастайны і ў той жа час матэрыяльны. Агульная ўласцівасць матэрыяльнага свету заключаецца ў тым, што ён бесперастанку змяняецца ў сувязі з асноўнымі ўласцівасцямі матэрыі: непарыўны рух у прасторы і развіццё з часам. Такім чынам, у гістарычна ўтворанай сістэме прыродазнаўчых навук фізіка вывучае найбольш агульныя ўласцівасці і законы руху элементаў матэрыяльнага свету.

Сярод розных тыпаў руху матэрыі механічны рух з'яўляецца прасцейшым. Паколькі прастора і час – гэта аднародныя велічыні, то вызначыць становішча цела адносна самой прасторы немагчыма. Яго можна вызначыць толькі адносна нейкага іншага цела, якое прымаецца за *цела адліку*. А сукупнасць цела адліку, сістэмы каардынат і прылады для вымярэння часу называецца *сістэмай адліку*.

Згодна першага закону Ньютана любая сістэма адліку, звязанная з целам адліку, якое знаходзіцца ў стане спакою ці рухаецца раўнамерна і прамалінейна, з'яўляецца *інерцыяльнай сістэмай*. Аб гэтым ужо гаворыцца вучням у 9 класе [1, с. 88]. Аднак трэба мець на ўвазе, што строга інерцыяльных сістэм адліку ў прыродзе не існуе. Таму інерцыяльныя сістэмы адліку з'яўляюцца ідэальнай фізічнай мадэллю рэальнай сістэмы адліку. Да рэальнай сістэмы адліку адносіцца сістэма, якая рухаецца з паскарэннем. Такую сістэму называюць *неінерцыяльнай*. Гэтым сістэмам у школьным дапаможніку адводзіцца некалькі сціпрых радкоў [1, с. 88 - 89]. Таму недастатковая ўвага да такіх сістэм з боку праграмы і аўтараў розных вучэбных дапаможнікаў прыводзіць нават да памылак пры абазначэнні інерцыяльных сістэм на асобных рысунках, сістэмы звязваюць з целам, якое рухаецца з паскарэннем, і лічаць яе інерцыяльнай.

На сучасным этапе развіцця метадычнай думкі і разважанняў практыкаў можна пачуць, што змест школьных вучэбных дапаможнікаў па фізіцы вельмі перагружаны. Але на наш погляд гэта не так, аналіз зместу паказвае, што ўся інфармацыя, якая падаецца ў дапаможніках з'яўляецца практычна жыццёвай, рэальнай. І на сёняшні дзень узровень развіцця навукова-тэхнічнага прагрэсу і грамадства ў цэлым патрабуе не толькі колькаснага павялічэння ведаў, але і іх якасці. Усё павінна развівацца з рэаліямі жыцця. І калі мы гаворым, што неінерцыяльныя сістэмы адліку з'яўляюцца рэальнымі сістэмамі, якія праяўляюцца пры кожным руху, то мусіць такім сістэмам трэба ўдзяліць крыху больш увагі.

Спытайце вучняў: чаму пры рэзкім ад'ездзе аўтобуса ад прыпынку ці рэзкім тармажэнні пасажыры, якія знаходзіліся ў салоне ў стане спакою, пачынаюць рухацца ў адпаведны бок? чаму пры пачатку руху ці тармажэнні (асабліва скарастнага) ліфта чалавек адчувае нейкае ўздзеянне на свае ногі? чаму касманаўты пры выхадзе ракеты на вызначаную арбіту зведваюць шматкратныя перагрузкі? чаму пры разгоне мерсэдэса вадзіцеля і пасажыраў прыціскае да сядзенняў? чаму пры аварыі аўтамабіля часта людзі, што знаходзіліся ў салоне, вылятаюць праз лабавое шкло? і г.д. І дасведчых адказаў Вы не атрымаеце, хаця пытанні не надуманыя, яны з рэальнага жыцця. А адказы ляжаць на паверхні – мы ж ведаем, што любое ўзаемадзеянне – гэта праяўленне сілы, якая з'яўляецца вектарнай характарыстыкай дзеяння аднаго цела на другое. І застаецца толькі сказаць, што ў любых сістэмах адліку, якія рухаюцца з паскарэннем \mathbf{a}_c , дзейнічае *сіла інерцыі* \mathbf{F}_{in} . Згодна другога закону Ньютана гэта сіла вызначаецца роўнасцю

$$\vec{F}_{in} = -m\vec{a}_c,$$

і мае напрамак супрацьлеглы напрамку паскарэння неінерцыяльнай сістэмы адліку.

У сістэме, якая паварочваецца вакол вызначанай восі з вуглавой скорасцю ω , на цела масай m , што рухаецца ў гэтай сістэме з нейкай лінейнай скорасцю \mathcal{V} , дзейнічае *дадатковая сіла інерцыі*, якая называецца *карыялісавай сілай*

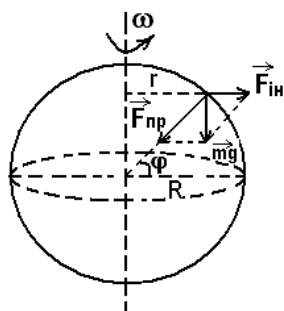
$$F_k = 2m\mathcal{V}\omega \sin \alpha,$$

дзе α - вугал паміж напрамкамі вектароў вуглавой і лінейнай скорасці. Напрамак сілы Карыяліса вызначаецца па правілу свярдзёлка, пры яго павароце ад вектара \mathcal{V} да вектара $\vec{\omega}$.

У школьных дапаможніках па фізіцы падаецца, што Зямля з'яўляецца інерцыяльнай сістэма адліку, таму што "Мы не замечаем неінерцыйнасці геоцэнтрычнай сістэмы из-за того, что Земля вращается вокруг своей оси медленно (один оборот за 24 ч)" [1, с. 89]. І ў той жа час, на гэтай жа старонцы аўтары пішуць, што "Пользоваться неінерцыйными системами «не запрещено». При решении задач динамики с использованием таких систем в уравнения вводят поправки на неінерцыйность". Правільна, мы ж ведаем, што Зямля здзяйсняе сутачнае вярчэнне вакол уласнай восі з перыядам $T=24$ гадзіны. І целы, якія знаходзяцца на паверхні Зямлі на розных шыратах рухаюцца з рознымі цэнтраімклівымі паскарэннямі $a_{ц}$, якія адпавядаюць паскарэнням неінерцыяльных сістэм a_c , пачаткам адліку якіх з'яўляюцца дадзеныя пункты зямной паверхні.

Для г. Мінска геаграфічная шырата $\varphi \approx 54^\circ$, радыус вярчэння $r = R \cos \varphi$, дзе $R \approx 6400$ км - сярэдні радыус Зямлі (рыс. 1). У сувязі з тым, што

цэнтраімклівае паскарэнне $a_{ц} = \omega^2 r = \frac{4\pi^2}{T^2} R \cos \varphi$, можна



Рыс.1

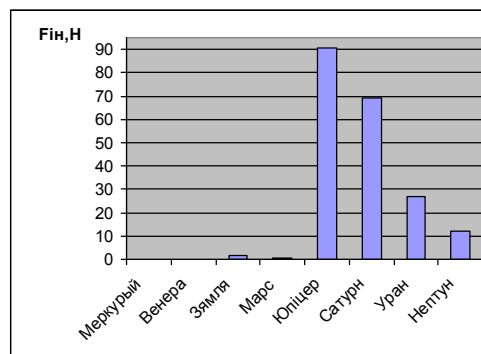
атрымаць, што паскарэнне неінерцыяльнай сістэмы, пачаткам адліку якой з'яўляецца Мінск, $a_c = a_{ц} \approx 0,02$ м/с². У гэтым выпадку на чалавека масай $m=70$ кг дзейнічае сіла інерцыі $F_{ин} = ma_c \approx 1,4$ Н і сіла прыцяжэння $F_{нр} = G \frac{M \cdot m}{R^2} \approx 680$ Н. Разлікі паказваюць, што

сіла інерцыі складае ўсяго 1/486 ад сілы прыцяжэння. Калі ж чалавек рухаецца ($\mathcal{V} \approx 5$ км/гадз) па паверхні Зямлі, якая здзяйсняе сутачнае вярчэнне з вуглавой скорасцю $\omega = 7,3 \cdot 10^{-5}$ рад/с, то ён зведвае і дзеянне сілы Карыяліса, якая лікава роўная $F_k \approx 11,5$ мН.

На розных планетах Сонечнай сістэмы праўленне сілы інерцыі неаднолькавае. Калі разглядзець яе дзеянне на цела масай $m=70$ кг, якое знаходзіцца на шыраце $\varphi \approx 54^\circ$, то, ведаючы радыус планеты і перыяд яе уласнага вярчэння, можна знайсці адпаведныя значэнні $F_{ин}$, якія ўказаны ў табліцы 1. Характар змянення сілы інерцыі ў залежнасці ад параметраў планеты адлюстраваны на дыяграме (рыс. 2).

Табліца 1.

Планета	R , км	T	$F_{ин}$
Меркурый	2439	58,65 сут	0,154 мН
Венера	6051	243 сут	0,022 мН
Зямля	6371	23 гадз 56 мін	1,390 Н
Марс	3395	24 гадз 37 мін	0,700 Н
Юпіцер	69900	9 гадз 50 мін	90,362 Н
Сатурн	58000	10 гадз 14 мін	69,232 Н
Уран	25000	10 гадз 49 мін	26,710 Н
Нептун	24300	15 гадз 48 мін	12,168 Н



Рыс. 2

* - даныя R – радыусаў планет і T – перыяду іх уласнага вярчэння ўзяты з [2].

Пры касмічных палётах на касманаўта ($m=70$ кг) у момант разгону ракеты да першай касмічнай скорасці ($v \approx 8$ км/с) ужо дзейнічае адчувальная сіла інерцыі, велічыня якой вызначаецца скорасцю ракеты і радыусам арбіты.

$$F_{in} = ma_c = m \frac{v^2}{2R}.$$

Калі радыус арбіты карабля $R \approx 200$ км, то сіла інерцыі $F_{in} \approx 11,2$ кН. Пры гэтым касманаўт зведае перагрузку $k = \frac{F_{in}}{mg} \approx 16$.

Пасажырскі ліфт пры пуску і спыненні рухаецца з сярэднім паскарэннем $a_c \approx 0,45$ м/с² [3, с. 44]. Гэта азначае, што на чалавека масай 70 кг дзейнічае сіла інерцыі $F = ma_c \approx 31,5$ Н, якая прыблізна ў 22 разы меншая сілы цяжару.

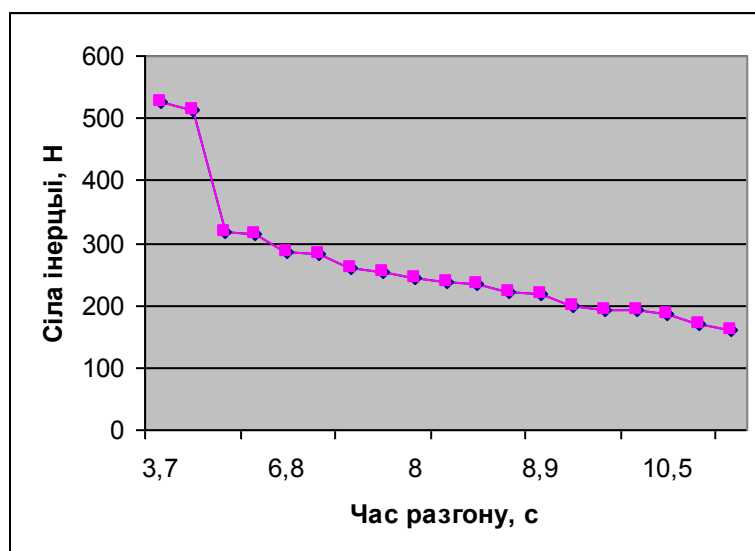
Значэнні сіл інерцыі, якія дзейнічаюць на вадзіцеляў ($m=70$ кг) сучасных легкавых аўтамашын у час разгону ад 0 да 100 км/гадз, прыведзены ў табліцы 2.

Табліца 2.

№ n/n	Марка аўтамабіля	Час разгону*, с	Сіла інерцыі, Н	№ n/n	Марка аўтамабіля	Час разгону, с	Сіла інерцыі, Н
1.	Ferrari 599 GTB Fiorano	3,7	526	11.	BMW X5 3.0i	8,3	234
2.	Marussia B2 2.8.Turbo	3,8	512	12.	Opel Antara 3.2 AT	8,8	221
3.	Audi TT Roadster	6,1	319	13.	Citroen C5 2.7 HDiAT	8,9	218
4.	Jaguar XK Coupe	6,2	314	14.	Hyundai Santa Fe 2.2 MT	9,8	198
5.	Ford Focus ST	6,8	286	15.	Mitsubishi Pajero IV 3D 3.8 AT	10,0	194
6.	Volkswagen Passat B7 3.2 FSI	6,9	282	16.	Honda CR-V	10,2	191
7.	Mercedes E 300	7,5	259	17.	Toyota Corolla	10,5	185
8.	Dodge Intrepid 3.5 RT	7,7	253	18.	Лада Приора 1.6 i 16V	11,5	169
9.	Chevrolet Traverse 3.6 4WD	8,0	243	19.	Toyota Ist	12,0	162
10.	Volvo 940 2.0 Turbo	8,2	237	20.	Volvo 940	12,5	156

* - час разгону аўтамашын розных марак, узяты з [4].

Графік залежнасці сілы інерцыі, якая дзейнічае на вадзіцеля, ад часу разгону аўтамабіля ($F_{in} = f(t)$) паказаны на рысунку 3.



З графіка бачна, што рэзкі скачок значэння сілы інерцыі адпавядае машынам спартыўнага тыпу, у якіх час разгону ляжыць у межах 3,5 – 4,0 с.

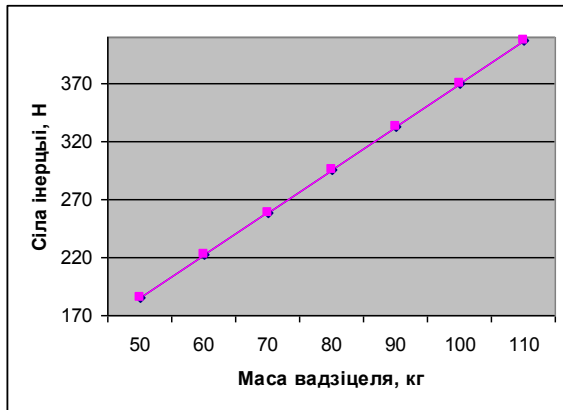
Для ўсіх астатніх аўтамашын сіла інерцыі раўнамерна памяншаецца з павелічэннем часу разгону.

Рыс. 3

Залежнасць сілы інерцыі, якая праяўляецца пры разгоне аўтамашыны Mercedes E 300, ад масы вадзіцеля паказаны ў табліцы 3 і адлюстравана графікам рысунка 4.

Табліца 3.

Маса вадзіцеля, кг	50	60	70	80	90	100	110
Сіла інерцыі, Н	185	222	259	296	333	370	407



Як паказвае графік у залежнасці сілы інерцыі ад масы вадзіцеля праяўляецца прамая прапарцыянальнасць.

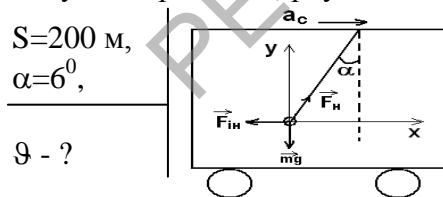
Рыс. 4

Такім чынам можна сказаць, што

- неінерцыяльныя сістэмы – гэта сістэмы, якія рухаюцца з паскарэннем;
- у неінерцыяльных сістэмах на цэлы дзейнічае сіла інерцыі;
- велічыня сілы інерцыі залежыць ад масы цела і паскарэння сістэмы;
- у неінерцыяльных сістэмах, якія паварочваюцца, на цэлы, што рухаюцца ў іх, дзейнічае дадатковая сіла інерцыі – сіла Карыаліса, якая залежыць ад масы цела, яго скорасці і вуглавой скорасці вярчэння сістэмы адліку;
- жывыя істоты пры руху ў неінерцыяльных сістэмах зведаюць перагрузкі.

Выкарыстанне неінерцыяльных сістэм адліку спрашчае рашэнне шэрага фізічных задач. Прывядзем некалькі прыкладаў:

1. Электрацягнік за час разгону да вызначанай скорасці прайшоў шлях $S=200$ км. Калі пры гэтым маятнік, падвешаны ў вагоне, адхіліўся на вугал $\alpha=6^\circ$, то скорасць \mathcal{G} , якую набыў электрацягнік, роўная ...м/с.



Сістэма адліку, звязанная з грузам маятніка, будзе неінерцыяльнай. У гэтай сістэме груз будзе знаходзіцца ў стане спакою

$$\vec{F}_{in} + \vec{F}_n + m\vec{g} = 0.$$

Праекцыі на восі каардынат: $x: -F_{in} + F_n \sin \alpha = 0$,

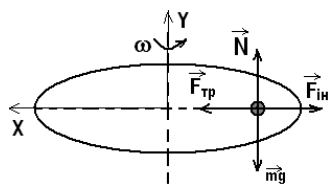
$y: F_n \cos \alpha - mg = 0$. Модуль сілы інерцыі роўны $F_{in} = ma_c$. З гэтых роўнасцей атрымліваем $tg \alpha = \frac{F_{in}}{mg} = \frac{ma_c}{mg} = \frac{a_c}{g}$, адкуль паскарэнне сістэмы $a_c = g tg \alpha$. Скорасць электрацягніка ў канцы разгону роўная $\mathcal{G} = \sqrt{2a_c S} = \sqrt{2gS tg \alpha}$, пры пачатковай скорасці $\mathcal{G}_0 = 0$.

$$\text{Лікавае значэнне скорасці: } \mathcal{G} = \sqrt{2 \cdot 10 \cdot 200 \cdot tg 6^\circ} \approx 20,5 \text{ м/с.}$$

2. На гарызантальным дыску, які паварочваецца вакол вертыкальнай восі, на адлегласці $R=8$ см ад восі вярчэння ляжыць цела. Калі пры вуглавой скорасці вярчэння

дыска $\omega=5$ рад/с цела пачынае слізаць з паверхні дыска, то каэфіцыент трэння слізання μ паміж дыскам і цела роўны

$$\begin{array}{l} R = 8 \text{ см,} \\ \omega = 5 \text{ рад/с,} \\ \mu - ? \end{array}$$



Сістэма адліку, звязанная з дыскам, з'яўляецца неінерцыяльнай. Цела ў гэтай сістэме стане спакою

$$\vec{F}_{mp} + \vec{N} + \vec{F}_{in} + m\vec{g} = 0.$$

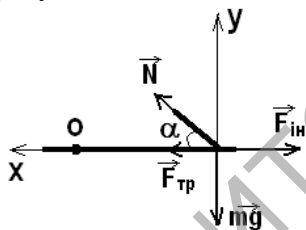
Праекцыі на каардынаты вості: х: $F_{mp} - F_{in} = 0$, у: $N - mg = 0$, адкуль $F_{mp} = F_{in} = ma_c$, $N = mg$. З улікам сувязі сілы трэння з сілай рэакцыі апоры $F_{mp} = \mu N$ і папярэдніх роўнасцей атрымліваем $ma_c = \mu mg$, адкуль каэфіцыент трэння слізання $\mu = \frac{a_c}{g}$. Калі паскарэнне сістэмы $a_c = \omega^2 R$, то

$$\mu = \frac{\omega^2 R}{g}.$$

Лікавае значэнне каэфіцыента трэння слізання: $\mu = \frac{5^2 \cdot 8 \cdot 10^{-2}}{10} \approx 0,2$.

3. Веласіпедыст едзе па гарызантальнай паверхні, апісваючы дугу радыусам $R=15$ м. Сіла трэння слізання паміж асфальтам і шынамі веласіпеда складае 50% ад сілы цяжару. Калі скорасць веласіпедыста $\vartheta=10$ м/с, то вугал α яго нахілу да гарызонта павінен быць роўным ... градусаў.

$$\begin{array}{l} R = 15 \text{ м,} \\ \vartheta = 10 \text{ м/с,} \\ k = 50\%, \\ \alpha - ? \end{array}$$



Сістэма каардынат, звязанная з веласіпедыстам, будзе неінерцыяльнай. І ў гэтай сістэме веласіпедыст будзе знаходзіцца ў стане спакою

$$\vec{F}_{mp} + \vec{N} + \vec{F}_{in} + m\vec{g} = 0.$$

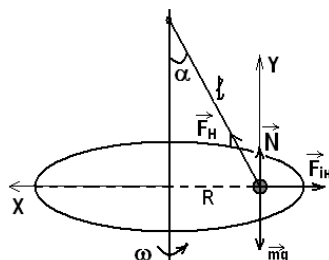
Праекцыі на каардынаты вості: х: $N \cos \alpha + F_{mp} - F_{in} = 0$, у: $N \sin \alpha - mg = 0$, і з улікам, што сіла інерцыі $F_{in} = ma_c$, паскарэнне сістэмы $a_c = \frac{g^2}{R}$, сіла трэння $F_{mp} = kmg$

атрымліваем выраз для вугла нахілу веласіпедыста $\alpha = \arctg\left(\frac{g}{\frac{g^2}{R} - kg}\right)$.

Лікавае значэнне вугла нахілу: $\alpha = \arctg\left(\frac{10}{\frac{10^2}{15} - 0,5 \cdot 10}\right) \approx 80^\circ$.

4. “Вокруг вертикально расположенного стержня может вращаться насаженный на него гладкий горизонтальный диск (см. рис.). На диске находится маленький шарик, прикрепленный к стержню нитью длиной $\ell = 18$ см. Если при вращении диска нить составляет угол $\alpha = 45^\circ$ со стержнем, а модуль силы натяжения нити в $\sqrt{2}$ раз больше модуля силы взаимодействия между шариком и диском, то период T вращения системы равен ... с.” [5, с. 4].

$$\begin{array}{l} \ell = 18 \text{ см,} \\ \alpha = 45^\circ, \\ T - ? \end{array}$$



Калі дыск разглядаць як неінерцыяльную сістэму, то вектарная сума сіл, якія дзейнічаюць на шарык у гэтай сістэме, роўная нулю

$$\vec{F}_n + \vec{N} + \vec{F}_{in} + m\vec{g} = 0.$$

Праекцыі на каардынатыныя восі: $x: y: F_n \cos \alpha + N - mg = 0$. З гэтых роўнасцей маем, што

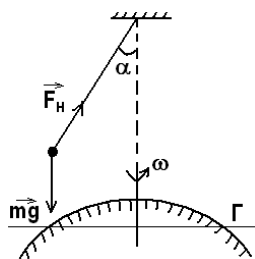
$$\frac{F_n \sin \alpha}{F_n \cos \alpha + N} = \frac{F_{in}}{mg}. \text{ Калі інерцыяльная сіла } F_{in} = ma_c = m\omega^2 R = m \frac{4\pi^2}{T^2} \ell \sin \alpha, \text{ а сіла}$$

$$\text{натяжэння } F_n = \sqrt{2} \cdot N \text{ згодна ўмовы задачы, то } \frac{\sqrt{2} \cdot \sin \alpha}{\sqrt{2} \cdot \cos \alpha + 1} = \frac{m \frac{4\pi^2}{T^2} \ell \sin \alpha}{mg}, \text{ адкуль}$$

$$\text{перыяд вярчэння сістэмы } T = 2\pi \sqrt{\frac{\ell(\sqrt{2} \cdot \cos \alpha + 1)}{\sqrt{2} \cdot g}}.$$

$$\text{Лікавае значэнне перыяду: } T = 2 \cdot 3,14 \sqrt{\frac{0,18(\sqrt{2} \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} + 1)}{\sqrt{2} \cdot 10}} = 1 \text{ с,}$$

У 1850г. французкі фізік Ж.Фуко на аснове ваганьняў маятніка даказаў, што Зямля паварочваецца вакол уласнай восі. Калі маятнік размясціць на Паўночным полюсе Зямлі і даць яму магчымасць вагацца, то ў сістэме, звязанай з Сонцам (геліацэнтрычнай), на яго дзейнічаюць дзве сілы: сіла цяжару $m\vec{g}$ і сіла нацяжэння падвесу \vec{F}_n (рыс. 4). Гэтыя сілы



Рыс. 5 неінерцыяльнай.

ляжаць у адной плоскасці і захоўваюць сваё становішча ў прасторы. У той жа час праекцыя гэтай плоскасці ваганьня на гарызонтальную плоскасць (лінія) паварочваецца ў напрамку, процілеглым вярчэнню Зямлі.

Паварот плоскасці ваганьняў маятніка ў сістэме, звязанай з Зямлёй (геацэнтрычнай) тлумачыцца дзеяннем сілы Карыаліса. А гэта гаворыць аб тым, што любая сістэма, звязаная з Зямлёй з'яўляецца

Аналагічную карціну можна назіраць пры ваганьнях маятніка (рыс.6), створанага пад кіраўніцтвам прафесара У.А.Якавенкі ў БДПУ імя М. Танка. Маятнік з даўжынёй падвесу 6,35 м і металічным шарам з алюмініевага сплаву масай 27 кг вагаецца з перыядам 5,5 с пры амплітудзе 1,25 м. На шыраце Мінска ($\varphi \approx 54^\circ$) плоскасць ваганьняў маятніка паварочваецца на 290° за суткі (за 1 гадзіну \sim на 12°). Згодна тэорыі паварот плоскасці ваганьняў маятніка абумоўлены толькі сутачным вярчэннем Зямлі вакол уласнай восі [6, с. 100 – 102].

Такім чынам, як бачым, увесці паняцці неінерцыяльнай сістэмы, сілы інерцыі і сілы Карыаліса зусім нескладана. І выкарыстанне рэальных (неінерцыяльных) сістэм і сіл, што дзейнічаюць на цэлы ў гэтых сістэмах, спрашчае рашэнне шэрага практычных фізічных задач і дае



абгрунтаванае тлумачэнне тым працэсам, якія адбываюцца ў такіх сістэмах. Пры гэтым не трэба ўводзіць ніякіх абмежаванняў і

дапушчэнняў.

Спіс выкарыстанай літаратуры

1. Исаченкова, Л. А. Физика : учеб. пособие для 9-го кл. общеобразоват. учреждений с рус. яз. обучения /Л. А. Исаченкова, Г. В. Пальчик, А. А. Сокольский ; под ред. А. А. Сокольского. — Минск : Нар. асвета, 2010. — 213 с.

2. Кикин, Д.Г., Самойленко, П.И. Физика (с основами астрономии): учеб. для техникумов.- М.: Высш.шк., 1995.- 416с.
3. Енохович, А. С. Справочник по физике и технике: учеб. пособие для уч-ся.- 3-е изд., перераб. и доп.-М.: Просвещение, 1989.- 224с.
4. Интэрнет – рэсурс – <http://www.automobile.ru/catalog>.
5. Репетиционный тест по физике 2010 – 2011 г.г., I этап, вариант 1. – Минск: РИКЗ, 2010.- 4с.
6. Яковенко, В.А. Общая физика. Механика: учеб. пособие / В.А. Яковенко, Г.А. Заборовский, С.В. Яковенко; под общ. ред. В.А. Яковенко. – Минск: РИВШ, 2008. – 320с.

РЕПОЗИТОРИЙ БГПУ