

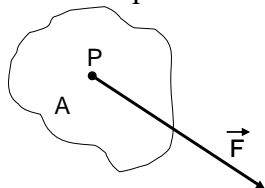
## ТЕМА 3. ДИНАМИКА НА МАТЕРИАЛНА ТОЧКА

### 1. Първи принцип на механиката

#### 1.1. Сила

Когато едно тяло действа на друго, то второто тяло получава определено ускорение. Ясно е, че действието на едно тяло върху друго се характеризира с определена посока. Ще считаме, че тази посока съвпада с посоката на създаденото от действието ускорение.

Физичната величина, която характеризира взаимодействията на телата в механиката се нарича сила. Силата е векторна величина – характеризира се с големина, посока и приложна точка – фиг.1.



Фиг. 1

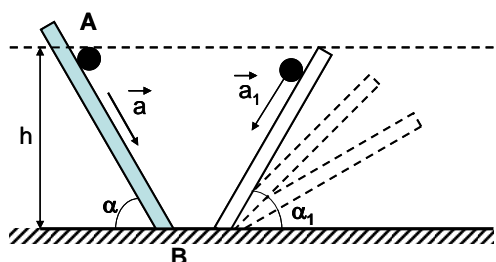
Ако на едно тяло действат няколко сили, то действието им може да се замени с тяхната *равнодействаща* (*резултантна*). Равнодействаща  $\vec{F}$  на няколко сили  $\vec{F}_1, \vec{F}_2, \vec{F}_3, \dots, \vec{F}_n$  е равна на тяхната векторна сума:

$$(1) \quad \vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_n = \sum_{i=1}^n \vec{F}_i$$

Ще казваме, че няколко сили, действащи на едно тяло, се *уравновесяват*, ако тяхната равнодействаща е равна на нула.

#### 1.2. Закон на Галилей за движението по инерция

От казаното за сила не става ясно каква е зависимостта между дадена сила и създаденото от нея ускорение. За да отговори на този въпрос, Галилей е направил следния опит:



Фиг. 2

От едно и също място **A** на височина **h** (фиг. 2) той е пуснал многократно едно топче да се движи без начална скорост надолу по наклонена равнина АВ. След като достигне долния край В, топчето започва да се изкачва по втора наклонена равнина, движейки се с ускорение  $\vec{a}_1$ . Галилей променял ъгъла  $\alpha_1$  на втората наклонена равнина и измервал времето за движение на топчето по нея. Най-дълго се

оказало това време, когато втората равнина заела хоризонтално положение. Като вземал след това различно гладки хоризонтални равнини, Галилей установил, че колкото е по-гладка хоризонталната равнина, толкова по-продължително е движението на топчето по нея. Този опитен факт му дал основание да предположи, че ако хоризонталната равнина е идеално гладка, т.е. ако не съществува сила на триене между нея и топчето, то би се движело по нея вечно праволинейно и равномерно. Като обобщил и анализирал резултатите от този и други опити, Галилей формирал следния закон: *Всяко тяло, на което не действат сили (или действащите на него сили се уравновесяват), се движи праволинейно и равномерно, или е в покой.* Този закон се нарича *закон на Галилей за движението по инерция*. Този фундаментален факт, бележи началото на формирането на физиката като наука в съвременния смисъл на това понятие.

Тяло, което не взаимодейства с други тела, се нарича *свободно тяло*. Праволинейното равномерно движение на свободно тяло се нарича *движение по инерция*.

### 1.3. Първи принцип на механиката

Както е известно, за определено движение може да се говори само спрямо дадена отправна система. Понеже в закона на Галилей за движението по инерция става дума за движение с постоянна скорост и за покой, възниква въпросът спрямо какви отправни системи е валиден той. Дали във всички отправни системи е валиден закона за инерцията?

В изградената от Нютон механика се приема като принцип следното твърдение: *Съществуват отправни системи, наречани инерциални, спрямо които всяко тяло, на което не действат сили (или действащите на него сили се уравновесяват), се движи с постоянна скорост или е в покой.* То се нарича първи принцип на Нютон и е основен закон на механиката.

Проблемът коя отправна система може да се разглежда като инерциална се решава от опита. Той ни показва, че отправна система, свързана със Земята, за неголеми интервали от време (много по-малки от едно денонощие) може да се разглежда като инерциална. Но тази система не е съвсем точно инерциална. По-близо до инерциалната е хелиоцентричната отправна система, която е свързана с центъра на Слънцето.

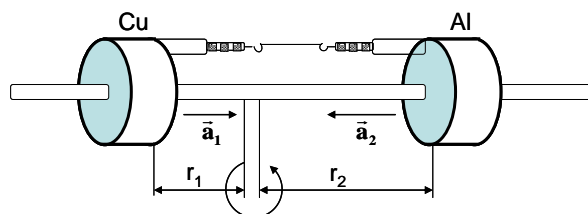
Съществуват и отправни системи, спрямо които законът на Галилей за движението по инерция не е в сила. Такива отправни системи се наричат *неинерциални*. Например при рязко спиране на влака (закъснително движение с голямо ускорение) незакрепените предмети, които са били първоначално в покой, започват да се движат спрямо влака, без да са подложени на външно въздействие. Следователно в отправна система, свързана с движещия се с ускорение влак, законът за инерцията не е в сила.

### 1.4. Принцип на относителността на Галилей

Съгласно принципът на относителността, формулиран от Галилей през 1636 г., всички инерциални отправни системи по своите механични свойства са еквивалентни една на друга. Във всички инерциални отправни системи свойствата на пространството и времето са еднакви, а законите на механиката имат еднаква математична форма. В съответствие с този принцип никакви механични опити, проведени в произволна инерциална система, не могат да установят дали системата се движи праволинейно и равномерно, или се намира в покой.

Движението е относително. Това означава, че траекторията на МТ и нейната скорост зависят от избора на отправна система. В същото време законите на класическата механика във всички инерциални отправни системи се записват еднакво.

### 1.5. Инертност и маса на телата



Фиг.4

*Опит:* Меден и алуминиев цилиндър с еднакви размери се надяват на тънка пръчка, по която те могат да се движат свободно с нищожно триене – фиг. 4. Цилиндриите са свързани с два силомера, а пръчката е поставена на оста на центробежна машина, която се превежда в равномерно въртене с ъглова

скорост  $\omega$ . Вижда се, че след известно време цилиндриите застават неподвижно спрямо пръчката, като медният цилиндър се намира на по-малко разстояние  $r_1$  от оста на въртене в сравнение с алуминиевия. Силомерите показват, че на цилиндриите действат сили с равни голедини, които им предават различни центростремителни ускорения

$$(2) \quad \mathbf{a}_1 = \omega^2 \mathbf{r}_1, \quad \mathbf{a}_2 = \omega^2 \mathbf{r}_2$$

Този опит показва, че еднакви сили предават на различни тела различни ускорения. Други опити и наблюдения ни убеждават, че определено изменение на

скоростта на едно тяло не става мигновено, а се осъществява за определен интервал от време. Тези опити потвърждават едно важно свойство на телата, което се нарича инертност.

*Инертността на телата се проявява в това, че под действие на равни сили различни тела получават различни ускорения. Тя се проявява и в това, че когато на едно тяло действа сила, изменението на скоростта му става не мигновено, а за определен интервал от време.*

Тяло, което под действие на дадена сила получава по-голямо ускорение, има по-малка инертност.

Свойството инертност може да се характеризира количествено. Количествена характеристика на инертността на телата е физична величина, която се нарича *маса*.

Определянето на масите на телата може да стане, като се сравняват ускоренията, които те получават под действието на равни сили. При това се приема, че масата  $m_1$  на едно тяло е толкова по-голяма от масата  $m_2$  на друго тяло, колкото пъти големината  $a_1$  на неговото ускорение е по-малка от големината  $a_2$  на ускорението, получено то второто тяло под действието на същата сила. Следователно е в сила зависимостта

$$(3) \quad \frac{m_1}{m_2} = \frac{a_2}{a_1}$$

и тъй като знаем как се изменят ускоренията, от (4) получаваме отношението на двете маси.

За да се определят масите на телата, избираме определено тяло за еталон и приемаме неговата маса за единица. Това тяло се нарича *еталон за маса*, а масата му е приета за *единица за маса*, и се нарича *килограм*.

Опитът показва, че *масата на едно тяло е постоянна, когато то се движи със скорост, много по-малка от скоростта на светлината във вакуум*.

Според класическата механика масата притежава свойството *адитивност*. Това означава, че ако съединим две тела с маси  $m_1$  и  $m_2$ , новополученото тяло има маса, равна на сумата  $m_1 + m_2$  от масите на телата.

Еталонът за маса е тяло, направено от платинено-иродиева сплав с форма на цилиндър с диаметър и височина 39 mm. Пази се в Международното бюро за мерки и теглилки в Севър, Франция. От него са направени първични копия, които се съхраняват в различни страни. Нашата страна разполага с такъв първичен еталон, който се съхранява в националния център по метрология.

## 2. Втори и трети принцип на механиката

Многобройните наблюдения показват, че ускорението на телата зависи както от тяхната маса, така и от действащите им сили. Резултатите от опита се обобщават от втория принцип на механиката.

Ускорението на едно тяло е правопрпорционално на резултантната сила, която му действа, и е обратно пропорционално на неговата маса:

$$(4) \quad \vec{a} = \frac{\vec{F}}{m}, \quad \vec{F} = m\vec{a}$$

Единицата за сила се нарича нютон (N). Съгласно с уравнение (5) 1 N е сила, която приложена към тяло с маса 1 kg му придава ускорение 1 m/s<sup>2</sup>.

Вторият принцип на механиката може да се запиши във вида:

$$(5) \quad \vec{F} = m \frac{d\vec{v}}{dt} = m \frac{d^2\vec{r}}{dt^2}$$

В някои случаи масата се изменя по време на движението. Например при реактивно движение става изхвърляне на изгорелите газове и масата на ракетата непрекъснато намалява. Когато  $m = \text{const}$ , уравнение (6) се записва във вида:

$$(6) \quad \vec{F} = \frac{d(m\vec{v})}{dt} = \frac{d\vec{p}}{dt}$$

Векторът  $\vec{p}$ , равен на произведението от масата и скоростта на тялото

$$(7) \quad \vec{p} = m\vec{v}$$

се нарича *импулс на тялото*. Импулсът е една от най-важните динамични характеристики на телата. Уравнението (7) изразява втория принцип на механиката в друга формулировка (дадена от самия Нютон): *Скоростта, с която се изменя импулсът на едно тяло (първата производна на импулса по времето), е равна на резултантната сила, действаща на тялото*.

При движението на тяло с постоянна маса (6) и (7) са еквивалентни. Формулировката на втория принцип на механиката, изразена чрез (7) е обаче по-обща. Тя описва съща така движението на тела с променлива маса, както и релативистките движения, извършващи се със скорости, близки до скоростта на светлината.

Уравнение (7) се записва във вида

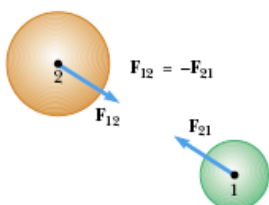
$$(8) \quad \vec{F}dt = d\vec{p}$$

Величината  $\vec{F}dt$  се нарича *импулс на силата  $\vec{F}$*  за безкрайно малкия интервал от време  $dt$ . Съгласно (9) *изменението на импулса на едно тяло за интервал от време  $dt$  е равно на импулса на действащата сила за същия интервал от време*.

Вторият принцип на механиката е в сила само за инерциални отправни системи. От (5) и (6) в частност следва, че при  $\vec{F} = \vec{0}$  ускорението е нула, а скоростта постоянна, т.е. тяло, на което не действа сила, се движи равномерно и праволинейно. Изводът обаче, че вторият принцип на механиката съдържа в себе си първия като частен случай закона за инерцията е неправилен, защото законът за инерцията постулира като обобщение от опита, че съществуват инерциални отправни системи и движение по инерция.

Механичното действие на две тела едно върху друго, винаги има характер на взаимодействие. Според третия принцип на механиката, който е обобщение на опита *силите на взаимодействие между две материални точки са равни по големина, противоположни по посока и действат в направление на правата, съединяваща двете точки* – фиг. 5.

$$(9) \quad \vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}$$



Фиг. 5

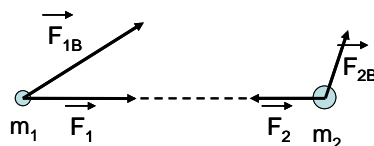
Третият принцип на механиката може да се формулира и по следния начин: *всяко действие поражда равно по големина и противоположно по посока противодействие*. Силите на действие и противодействие са приложени към различни тела, поради което не се уравновесяват.

### 3. Закон за запазване на импулса на система от тела

**Затворена система.** Да разгледаме произволна система от тела (материални точки). Всички останали тела във Вселената, които не влизат в тази система, са външни тела. Силите на взаимодействие между телата от системата се наричат *вътрешни сили*, а силите, с които външните тела действат на телата от системата – *външни сили*.

*Механична система, на която не действат външни сили, се нарича затворена система.*

**Закон за изменение на импулса.** Ще разгледаме най-проста механична система, съставена от две материални точки, които взаимодействат със сили  $\vec{F}_1$  и  $\vec{F}_2$ . На материалните точки действат външни сили  $\vec{F}_{1В}$  и  $\vec{F}_{2В}$  (фиг. 6).



Фиг.6

Записваме уравнението за втория принцип на механиката за всяка от МТ.

$$(10) \quad \frac{d\vec{p}_1}{dt} = \vec{F}_1 + \vec{F}_{1B}; \quad \frac{d\vec{p}_2}{dt} = \vec{F}_2 + \vec{F}_{2B}$$

и събираме двете уравнения:

$$(11) \quad \frac{d}{dt}(\vec{p}_1 + \vec{p}_2) = (\vec{F}_1 + \vec{F}_2) + (\vec{F}_{1B} + \vec{F}_{2B})$$

Съгласно с третия принцип на механиката силите на взаимодействие на двете МТ са равни по-големина и противоположни по посока, т.е.  $\vec{F}_1 = -\vec{F}_2$  и  $\vec{F}_1 + \vec{F}_2 = \vec{0}$ . Следователно

$$(12) \quad \frac{d\vec{p}}{dt} = \vec{F}_B,$$

където  $\vec{p} = \vec{p}_1 + \vec{p}_2$  е векторната сума от импулсите на двете материални точки, а  $(\vec{F}_B = \vec{F}_{1B} + \vec{F}_{2B})$  е векторната сума от външните сили. Доказва се, че полученият резултат остава в сила за механична система, съставена от произволен брой N материални точки. Векторната физична величина

$$(13) \quad \vec{p} = \sum_{i=1}^N \vec{p}_i$$

която е равна на сумата от импулсите на всички материални точки от системата, се нарича *импулс на механичната система*.

Уравнението (12) изразява закона за изменение на импулса на система от материални точки, който гласи: *скоростта на изменение на импулса  $\vec{p}$  на система от материални точки (производната на  $\vec{p}$  по времето) е равна на векторната сума от*

*всички външни сили  $\vec{F}_B = \sum_{i=1}^N \vec{F}_{Bi}$ , действащи на системата*. По аналогия със случая на

отделна материална точка, ще наричаме  $\vec{F}_B$  резултатна на всички външни сили.

**Закон за запазване на импулса.** За затворена система  $\vec{F}_B = \vec{0}$  и уравнение (12)

приема вида  $\frac{d\vec{p}}{dt} = \vec{0}$ , откъдето

$$(14) \quad \vec{p} = \text{const}$$

Уравнение (14) изразява закона на запазване на импулса, който гласи: *Импулсът на затворена механична система не се изменя с течение на времето*.

Ако посоката на резултатната външна сила  $\vec{F}_B$  не се изменя, можем да представим импулса на системата като сума от две компоненти:  $\vec{p} = \vec{p}_\perp + \vec{p}_\parallel$ , където компонентата  $\vec{p}_\parallel$  е успоредна на вектора  $\vec{F}_B$ , а компонентата  $\vec{p}_\perp$  е перпендикулярна на  $\vec{F}_B$ . Уравнение (13) се записва отделно за двете компоненти на импулса:

$$(15) \quad \frac{d\vec{p}_\perp}{dt} = \vec{0}, \quad \frac{d\vec{p}_\parallel}{dt} = \vec{F}_B,$$

откъдето следва, че само успоредната на външната сила компонента  $\vec{p}_\parallel$  на импулса на системата се променя с течение на времето, докато перпендикулярната компонента  $\vec{p}_\perp$  остава постоянна ( $\vec{p}_\perp = \text{const}$ ).

#### 4. Сили в механиката

Динамиката изучава движението на телата под действие главно на гравитационните сили, сили на триене и сили на еластичност. Гравитацията е едно от четирите фундаментални взаимодействия в природата. Силите на триене и еластичните сили са проява на друго фундаментално взаимодействие – електромагнитното.

##### 4.1. Гравитационни сили

Телата, които са пуснати от известна височина, падат към Земята с едно и също ускорение  $\vec{g}$ , наречено *земно ускорение*. Ускорението  $\vec{g}$  се дължи на силата  $\vec{G}$ , с която Земята привлича всяко тяло. Тази сила се нарича *сила на тежестта*.

$$(16) \quad \vec{G} = m\vec{g}$$

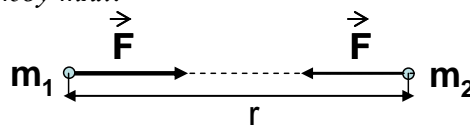
Нашият опит и наблюденията ни убеждават, че ако не отчитаме денонощното въртене на Земята около оста  $\acute{u}$ , силата на тежестта е перпендикулярна на земната повърхност и следователно е насочена към центъра на Земята.

Като обобщава резултатите от многобройните астрономически наблюдения, Нютон стига до извода, че небесните тела взаимно се привличат със сили, имащи същата природа, както силите, с които Земята привлича заобикалящите ни тела. Сили на всеобщо привличане (гравитация) действат между всички тела във Вселената. Нютон формулирал следния закон:

*Между всеки две тела (материални точки) от Вселената действат сили на взаимно привличане, наречени гравитационни сили, чиято големина е правопрпорционална на произведението от масите на телата и е обратно пропорционална на квадрата на разстоянието между тях.*

Ако материалните точки имат маси  $m_1$  и  $m_2$  и са разположени на разстояние  $r$  една от друга (фиг. 9), големината на гравитационната сила е:

$$(17) \quad F = \gamma \frac{m_1 m_2}{r^2},$$



Фиг. 9

където  $\gamma$  е универсална природна константа, наречена *гравитационна константа*. Стойността на гравитационната константа е определена експериментално. Тя е  $\gamma = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2 / \text{kg}^2$ . Съгласно с третия принцип на механиката гравитационните сили на привличане между две материални точки са равни по големина и противоположни по посока (фиг. 9). Те действат в направление на правата, съединяваща материалните точки.

**Принцип на еквивалентност.** В динамиката масата е мярка за инертността на телата. Затова масата, която участва във втория принцип на механиката, се нарича инертна маса –  $m_{\text{и}}$ . Гравитационните взаимодействия се характеризират с гравитационна маса –  $m_{\text{г}}$ . Сега ще се спрем по-подробно на този въпрос, тъй като съвсем не е очевидно защо две толкова различни на пръв поглед явления – инерция и гравитация, трябва да се описват с една и съща физична величина.

Под действие на силата на тежестта  $\vec{G}$  тяло с инертна маса  $m_{\text{и}}$  се движи с ускорение  $\vec{a}$ , чиято големина се определя от уравнението на втория принцип на механиката:  $\vec{G} = m_{\text{и}} \vec{a}$ . От друга страна, силата на тежестта е гравитационна сила, която се изразява от нютоновия закон за гравитацията  $\vec{G} = \gamma \frac{m_{\text{и}} M}{R^2}$ , в който участва гравитационната маса  $m_{\text{г}}$  на тялото. От тези две уравнения изразяваме ускорението  $\vec{a}$ :

$$\vec{a} = \frac{m_{\text{г}}}{m_{\text{и}}} \left( \gamma \frac{M}{R^2} \right),$$

където изразът в скобите е константа. Експериментално е установено с голяма точност, че всички тела, пуснати от една и съща точка, падат с еднаква ускорение  $\vec{a} = \vec{g} = \text{const}$ .

Следователно отношението  $\frac{m_r}{m_u}$  има една и съща стойност за всички тела и при подходящ избор на измерителните единици то може да се положи равно на единица, т.е.  $m_u = m_r = m$ .

Не съществува нито един експериментален факт, който да сочи възможни различия между гравитационната и инертната маса. Затова във физиката се формулира общ принцип, според който те са еквивалентни.

#### 4.2. Сили на еластичност

При малка деформация на едно тяло възниква сила, която връща тялото в състоянието, в което то е било преди деформацията. Всяка такава сила се нарича *сила на еластичност*. Сили на еластичност действат на едно разтегнато или свито гумено тяло, на едно усукано еластично тяло, на огъната стоманена пластина и др. (фиг. 11).

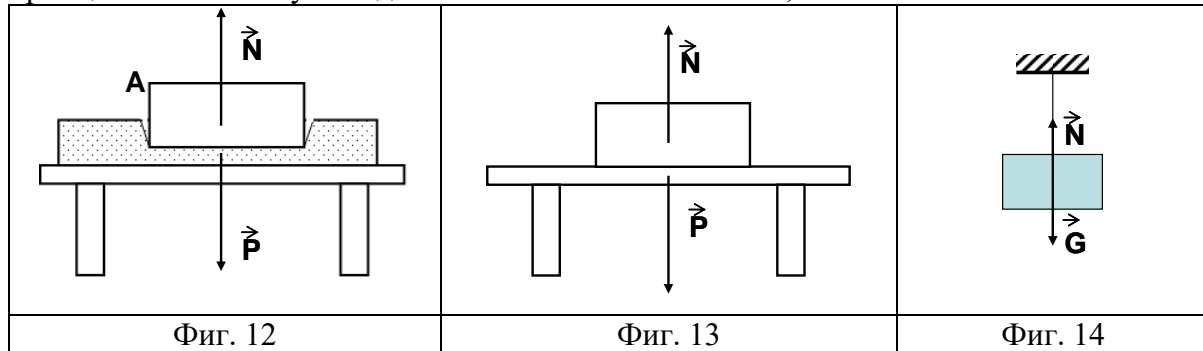
Силите на еластичност се обуславят от електромагнитни взаимодействия между атомите и молекулите на деформираното тяло. Когато тялото се свива, разстоянията между частиците му намаляват и между тях започват да действат електромагнитни сили на отблъскване. Те обуславят силата на еластичност, която действа на свитото тяло. Когато тялото се разтяга, разстоянията между частиците му се увеличават и между тях започват да действат електромагнитни сили на привличане. Те обуславят и появилата се в този случай сила на еластичност.

Опитно е установено, че за не големи деформации големината на силата на еластичност  $\vec{F}$ , действаща на една разтегната или свита пружина, или на пръчка, единият край на който е закрепен неподвижно, е правопрпорционална на големината на преместването  $\Delta\vec{r}$  на свободния ѝ край и че посоките на  $\vec{F}$  и  $\Delta\vec{r}$  са противоположни. Следователно

$$(18) \quad \vec{F} = -k\Delta\vec{r}$$

Положителната величина  $k$  е константа и се нарича *коэффициент на еластичност* на пружината или на пръчката. Той е характеристика на материала, от който са изработени съответните деформиращи се тела. Равенството (27) изразява т.нар. *закон на Хук*.

**Реакции.** Когато едно тяло  $A$  лежи върху гумена подложка, ясно се вижда деформацията на гумата – фиг. 12. Тя е предизвикана от действието контактната сила между тялото и поставката, която се нарича *тегло  $\vec{P}$  на тялото*. Съгласно третия принцип на Нютон гумата действа на тялото със сила  $\vec{N}$ , която е *сила на еластичност*.



Когато тялото е поставено върху една маса, то масата също се деформира, но тази деформация е незабележимо малка. Масата противодейства на теглото на тялото със сила  $\vec{N}$  (фиг. 13), която се нарича *реакция на опората* на масата. Ако едно тяло е окачено на нишка (фиг. 14), теглото му също действа на нишката, а тя му противодейства със силата  $\vec{N}$ . Тя също се нарича *реакция (сила на опън на нишката)*.

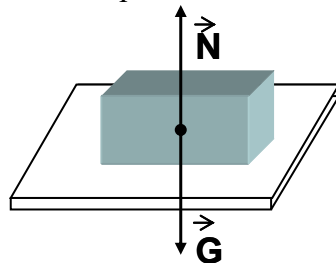


### 4.3. Сили на триене

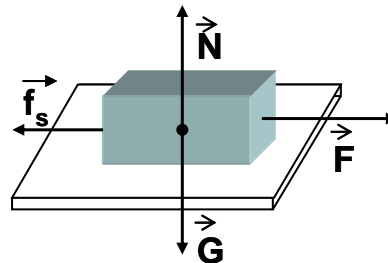
Движението на телата в реални условия винаги е съпроводено с действие на сили на триене. Триенето между повърхностите на две твърди тела, в отсъствие на течен или газов слой между тях, се нарича *сухо триене*, а триенето между два слоя от течност или газ – *вътрешно* или *вискозно триене*.

Силите на триене възникват в резултат на електромагнитното взаимодействие между молекулите на триещите се повърхности.

Да разгледаме тяло с маса  $m$ , поставено на хоризонтална поставка (фиг. 15а). Силата на тежестта  $\vec{G} = m\vec{g}$ , която действа на тялото, се уравнива от силата на нормална реакция на опората  $\vec{N}$  и тялото се



Фиг. 15а



Фиг. 15б

намира в покой. Да приложим към тялото хоризонтална сила  $\vec{F}$  и постепенно да увеличаваме нейната големина (фиг. 15б). При малки стойности на  $\vec{F}$  тялото остава в покой, което показва, че между допиращите се повърхности възникват сили на триене. Поставката действа на тялото със сила на триене  $\vec{f}_s$ , която е равна по големина и противоположна по посока на движещата сила  $\vec{F}$ . Силата на триене  $\vec{f}_s$  се нарича *сила на триене при покой* или *сила на статично триене*. В зависимост от големината на движещата сила  $\vec{F}$  силата на триене при покой може да се изменя от нула до някаква максимална стойност  $\vec{f}_{smax}$ . Когато силата  $F$  стане по-голяма от  $f_{smax}$ , тялото започва да се движи и възниква *сила на триене при хлъзгане*  $\vec{f}_k$ , която се нарича още *сила на кинетично триене*. Експериментално са установени следните закономерности:

1. Максималната сила на триене при покой не зависи от площта на триещите се повърхности.
2. За дадена двойка повърхности максималната сила на триене при покой е правопрпорционална на големината на силата на нормална реакция на опората  $N$

$$(19) \quad \vec{f}_{smax} = k_s N$$

Коефициентът на пропорционалност  $k_s$  се нарича *коефициент на статично триене*. Той зависи от вида и състоянието на триещите се повърхности.

3. Силата на триене при хлъзгане е по-малка от максималната сила на статично триене –  $f_k < f_{smax}$ . Тя не зависи от площта на триещите се повърхности и е правопрпорционална на големината на силата на нормална реакция на опората

$$(20) \quad \vec{f}_k = k_k N,$$

където  $k_k$  е коефициент на кинетично триене, който подобно на  $k_s$  зависи от вида и състоянието на триещите се повърхности.

4. Коефициентът на кинетично триене не зависи от скоростта на движение.

В редица случаи разликата между коефициентите на статично и кинетично триене е малка. Затова в много от задачите по механика тя се пренебрегва и се използва един и същи коефициент на триене  $k$  – както за определяне на максималната сила на триене при покой, така и на силата на триене при хлъзгане.



## 5. Движение в неинерциална отправна система

Както вече беше отбелязано, законите на механиката са валидни в инерциални отправни системи. Отправни системи, движещи се ускорително спрямо инерциална отправна система, се наричат *неинерциални*. За да са валидни законите на динамиката и за неинерциалните отправни системи, освен силите, обусловени от взаимодействията между телата, е необходимо въвеждането на особен вид сили – *инерчни сили*. При отчитане на инерчните сили вторият принцип на механиката е валиден за произволна отправна система. При това инерчната сила  $\vec{F}_i$  трябва да бъде такава, че заедно със силите, обусловени от взаимодействията между телата, да създава на тялото ускорение  $\vec{a}'$ , каквото то притежава в неинерциалната отправна система:

$$(21) \quad m\vec{a}' = \vec{F} + \vec{F}_i$$

Тъй като  $\vec{F} = m\vec{a}$  ( $\vec{a}$  е ускорението на тялото в инерциална отправна система), то

$$(22) \quad m\vec{a}' = m\vec{a} + \vec{F}_i$$

Инерчната сила е обусловена от ускорителното движение на неинерциалната система и затова в общия случай трябва да се отчитат следните случаи на тази сила: 1) инерчна сила при ускорително постъпателно движение на отправната система; 2) инерчна сила, действаща на тяло, което се намира в покой спрямо въртяща се отправна система; 3) инерчна сила, действаща на тяло, което се движи във въртяща се отправна система.

### 1) Преносна инерчна сила при постъпателно движение.

Да разгледаме следния пример: топче е закачено на нишка за тавана на кабината на вагон (фиг. 16).

Докато вагонът е неподвижен, или се движи праволинейно и равномерно, нишката е във вертикално положение и силата на тежестта  $\vec{G}$  на топчето се уравнива от силата на опън на нишката  $\vec{T}$ . Ако вагонът се преведе в постъпателно движение с ускорение  $\vec{a}_0$ , то нишката ще започне да се отклонява назад от вертикалата до такъв ъгъл  $\alpha$ , при който резултантната сила  $\vec{F} = \vec{G} + \vec{T}$  не обезпечи ускорението на топчето  $\vec{a}_0$ , т.е

$$(23) \quad \vec{F} = \vec{T} + m\vec{g} = m\vec{a}_0$$

Така резултантната сила е насочена по посока на движението на вагона.

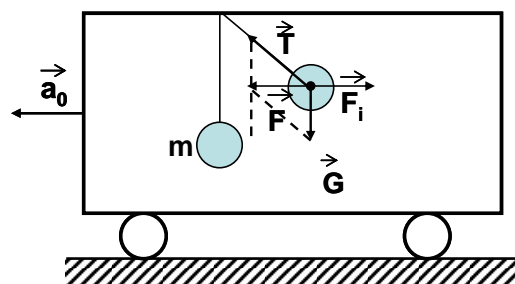
Относно отправна система, свързана с ускорително движещия се вагон, топчето се намира в покой. Това е възможно само ако силата  $\vec{F}$  се уравнива от сила, равна по големина и противоположно насочена. Именно тази сила се явява инерчна сила, тъй като топчето не взаимодейства с никакви други тела. Следователно инерчната сила е:

$$(24) \quad \vec{F}_i = -m\vec{a}_0$$

Знакът „-“, в зависимост (33) показва, че инерчната сила е насочена в посока, противоположна на посоката на ускорението на отправната система.

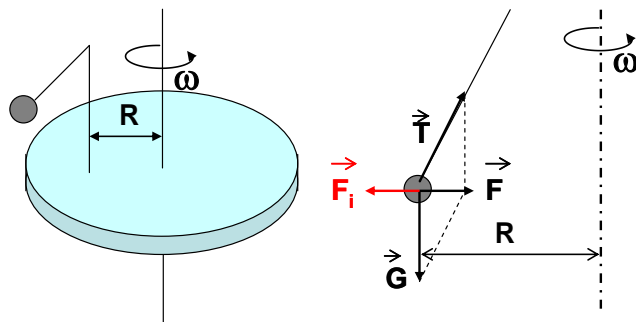
2) **Центробежна инерчна сила.** Нека диск се върти равномерно с ъглова скорост  $\omega$  около вертикална ос, минаваща през центъра му. На диска, на разстояние  $R$  от оста на въртене, се намира махало (топче с маса  $m$  е окачено на тънка нишка). При въртене на махалото заедно с диска топчето ще се отклонява от вертикалата на някакъв ъгъл (фиг. 17). В инерциална отправна система топчето равномерно се движи по окръжност радиус  $R$ . Следователно на него действа сила с големина

$$(25) \quad F = m\omega^2 R,$$



Фиг. 16

насочена перпендикулярно на оста на въртене на диска. Тя се явява равнодействаща на силата на тежестта  $\vec{G}$  на топчето и силата на опън на нишката  $\vec{T}$  –  $\vec{F} = \vec{G} + \vec{T}$ . Относно отправна система, свързана с въртящия се диск, топчето се намира в покой, което е възможно само ако силата  $\vec{F}$  се уравни от



Фиг. 17

сила, равна по големина и противоположно насочена. Тя се явява инерчна сила. Нарича се *центробежна инерчна сила* и е насочена по хоризонтала навън от оста на въртене на отправната система.

Центробежните сили намират приложение във всички центробежни механизми – центрофуги, сепаратори и др.