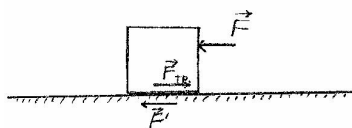


Кога силата на триене е насочена напред и кога – назад? (отново по темата “външни – вътрешни” сили)

Преди да стигнем до отговора на въпроса от заглавието, ще започнем с нещо по-конкретно – с въпроса как всъщност ходим? Неговият отговор изглежда ясен – отблъскваме се от земята и се придвижваме напред. Отблъскваме се благодарение на силата на триене между подметките на обувките и повърхността на пода – ако няма триене, ходенето е невъзможно – това се учи още в 6. клас по човекът и природата. По същия начин, ако няма триене между колелата и пътното покритие, и превозните средства няма да може да се придвижват, ще боксуват на място. Ето защо често казваме, че тези движения се осъществяват под действие на триенето. Необходимо е обаче едно много важно уточнение – на **триенето в покой**¹! А за този вид триене вече не се учи нито 6. клас, нито в по-горните класове по физика и астрономия. И ако все пак някъде то се споменава, това става някак между другото, като за нещо, което като че ли е познато. Този факт констатирам със съжаление, защото без да се познава действието на тази сила, не е възможно да се разбере как фактически се движат по земята превозните средства.

На фиг. 1 е показано неподвижно твърдо тяло, което лежи върху неподвижна хоризонтална поставка. Ако тялото не упражнява нормален натиск върху поставката, няма никаква сила на триене в покой – и най-малката външна сила \vec{F} , действаща в хоризонтална посока, ще придаде известно ускорение на тялото. Това показва, че триенето в покой има някаква връзка с нормалния натиск. Известно е обаче, че няма случай, в който на едно тяло да действа **само** сила на триене в покой. В това отношение триенето в покой си прилича със силата, която наричаме реакция на опората – няма случай, в който реакцията на опората да е единствената сила, която действа на едно тяло. С други думи и *триенето в покой*, и *реакцията на опората* са частни случаи на сили, дължащи наличието си на третия принцип на Нютон, частни случаи, които поради значението им в редица често срещани ситуации, са “удостоени” със специални названия.

И така, триенето в покой се появява винаги като следствие от действието на някаква друга сила, която ще наречем условно *активна* сила, докато триенето в покой е нейната *пасивна* реакция. Когато на тялото действа само силата на тежестта, то упражнява нормален натиск



фиг. 1.

върху поставката, но никакво триене в покой няма – или, ако искате, има, но големината му е нула. Сила на триене в покой $\vec{F}_{тр.}$ се появява² само, когато върху тялото

¹ Знам, че мнозина физици избягват термина “триене в покой”. У нас един от тях беше, например, проф. Златев – авторът на най-прецизния наш учебник по механика за средното училище. Техните аргументи не са за пренебрегване, защото наистина по своите същност и свойства тази сила е съвсем различна от триенето при хлъзгане. Аз не знам обаче с какъв термин може да се замени триенето в покой. Една възможност е със “сцепление”, но тази дума има по-широк смисъл и някак си не е утвърдена. Затова предпочитам да използвам “триене в покой”, съзнавайки цялата условност, която трябва да се влага в термина. Вероятно по-малко възражения би предизвикал буквалният превод на английското static friction, но не знам защо този термин не е разпространен у нас.

² Повече за появата на триенето в покой виж поместения в този сборник материал, озаглавен “Защо все пак локомотивът тегли вагоните?”

действа сила \vec{F} , успоредна на контактната повърхност. Когато \vec{F} е достатъчно малка (по-долу ще кажем колко малка), тялото остава неподвижно и върху поставката се оказва приложена същата по големина и посока сила \vec{F}' (т.е. тялото, поставката и, ако искате, заедно с нея и цялата земя се държат като едно тяло). Реакция на силата \vec{F}' по смисъла на третия принцип на Нютон е силата на триене в покой $\vec{F}_{\text{тр.}}$. Този начин за описание на ситуацията оправдава названието активна сила за \vec{F} , и пасивна за $-\vec{F}_{\text{тр.}}$. Вижда се, че върху тялото са приложени две сили с равни големина и противоположни посоки $-\vec{F}$ и $\vec{F}_{\text{тр.}}$, вследствие на което то остава неподвижно.

Какво става, ако големината на активната сила постепенно расте? Заедно с нея расте и триенето в покой и тялото остава неподвижно, но това не продължава неограничено. Достига се една *максимална* сила на триене при покой $\vec{F}_{\text{тр.}}^{\text{max.}}$, чиято големина зависи от нормалния натиск и от свойствата на двете допиращи се повърхности. **Само за нея** е валидна познатата формула $F_{\text{тр.}}^{\text{max.}} = kN$, където N е нормалният натиск, а k – т.нар. коефициент на триене в покой. За него обикновено се казва, че е малко по-голям от коефициента на триене при хлъзгане³.

Когато активната сила \vec{F} надмине големината на $\vec{F}_{\text{тр.}}^{\text{max.}}$, уравновесяването на двете сили се нарушава и тялото получава ускорение *в посока на активната сила*. Триенето в покой изчезва и на негово място се появява триене при хлъзгане, като понататъшният вид на движението се определя от баланса между външната сила и триенето при хлъзгане.

И така, на половината от поставения в заглавието въпрос намерихме отговора: когато на тялото действа **външна** сила, и силата на триене в покой (докато то е неподвижно), и триенето при хлъзгане (след като се задвижи) са насочени **назад**, т.е. в посока, противоположна на силата, предизвикваща движението.

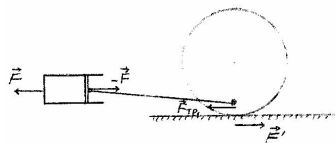
Както ходенето, обаче, така и движението на автомобилите, се осъществява при триене в покой – точките от колелата на автомобила, които в даден момент контактуват с настилка, както и подметката на опорния крак при ходене, са неподвижни! При това, за нормално движение е необходимо триенето в покой да е **по-малко** от $\vec{F}_{\text{тр.}}^{\text{max.}}$ (в противен случай започва боксуване, поднасяне, подхлъзване и т.н.). Това поставя въпроса какъв е наистина по-подробният баланс на силите, благодарение на който става възможно нашето и на превозните средства придвижване? При това, за да не звучи проблемът твърде общо, ще се ограничим с движенията на **колесни** превозни средства, а не, например, на шейни, самолети, ракети, кораби и т.н.

В изобразената на фиг. 1 ситуация активната сила бе *външна*. За да разберем как ходим и как се движат превозните средства, трябва да разгледаме баланса на силите, когато активната сила е *вътрешна*. От механиката е известно, че никакво взаимодействие между частите на една система, т.е. – никакви вътрешни сили, не могат да променят движението на центъра на масите на системата. Ако няма външни сили, т.е. ако системата е изолирана, затворена, центърът на масите е или неподвижен, или се движи праволинейно и равномерно. Това твърдение е просто едно следствие от третия принцип на Нютон: на всяко действие съответства равно по големина и

³ И това сигурно е така в повечето случаи. Не липсват обаче и изключения. Известно е например, че фирмите, които произвеждат вакси за ски-бегачите, са разработили вакси, които имат голям коефициент за триене в покой и много по-малък коефициент на хлъзгане със снега. Това позволява на състезателя, когато е стъпил само на единия си крак, да се оттласне напред, без ската му да се хлъзне назад. В следващия момент, когато с другата ска докосне снега, тя вече се хлъзга лесно по него напред.

противоположно по посока противодействие. От вътрешните сили зависят само движенията на частите на системата една спрямо друга. (Разбира се, ако системата не е затворена, тези движения зависят и от външните сили.)

Нека разглежданата система е автомобил. Всички детайли на двигателя и предавателни механизми в ходовата част (зъбни колела и т.н.) представляват части на системата и силите, породени от взаимодействията им, са *вътрешни* сили – те не могат да задвижат автомобила. На фиг. 2 е представена една свръх-опростена схема на задвижването на автомобила⁴: цилиндър с бутало, което изтласква прът, шарнирно свързан с буталото и с водещото колело.



Фиг. 2.

Налягането на горещите газове в цилиндъра поражда две вътрешни сили: приложената върху дъното на цилиндъра и насочена по посока на движението сила \vec{F} , и приложената върху пръта и насочена назад сила $-\vec{F}$. Чрез закрепения неподвижно към рамата цилиндър силата \vec{F} се предава на целия автомобил, а посредством пръта в точката от земята, която контактува с колелото, се прилага една сила \vec{F}' , равна по големина и по посока на силата $-\vec{F}$. Тъкмо тази сила \vec{F}' предизвиква като ответна реакция приложената в колелото сила на триене в покой $\vec{F}_{\text{тр}}$. Вижда се, че за разлика от случая с фиг. 1, в този случай роля на активна сила играе *вътрешна* сила, а именно силата $-\vec{F}$. Силите $-\vec{F}$ и $\vec{F}_{\text{тр}}$ се уравновесяват взаимно и върху автомобила остава приложена единствено силата \vec{F} – това е всъщност силата, под чието действие автомобилът се движи. При това забележете – докато в предишния случай (фиг. 1) движението започва едва когато активната (външната) сила надмине една определена стойност, сега и най-малката активна (вътрешна) сила ще предизвика ускоряване на тялото. И още една съществена разлика от преди: сега триенето в покой е насочено **напред**, т.е. по посока на движението.

А какво става, когато големината на активната сила $-\vec{F}$ надмине $F_{\text{тр}}^{\text{max}}$? В този случай колелото започва да боксува, т.е. точката от колелото, която е в контакт с настилка, вече не е неподвижна. Нейната скорост е насочена назад (т.е. противоположно на \vec{F}). Това означава, че, както и на фиг. 1, триенето в покой се заменя с триене при хлъзгане, което е насочено в посока, обратна на скоростта, т.е. – отново напред. В този случай триенето при хлъзгане компенсира вътрешната сила $-\vec{F}$.

Така отговорихме и на втората половина на въпроса в заглавието: триенето (и в покой и при движение) е насочено напред, по-посока на движещата сила, когато тази сила е **вътрешна**.

От сравнението на фиг. 1 и фиг. 2 се виждат основните разлики между двата случая:

– когато активната сила е *външна*, тялото се задвижва само в случай, че тя е **по-голяма** от максималната сила в покой $F_{\text{тр}}^{\text{max}}$, движението е в посока на активната сила,

⁴ Всъщност, това е точно схемата за задвижване колелата на старите, парни локомотиви. Колцина обаче днес помнят как изглеждаха парните локомотиви?

а триенето (и при покой, и при хлъзгане) е в посока **назад**, т.е. противоположно на посоката на движение;

– когато активната сила е *вътрешна*, тялото се задвижва независимо от големината ѝ. Движението се осъществява благодарение на това, че или силата на триене в покой (когато вътрешната сила е по-малка от $F_{\text{тр.}}^{\text{max.}}$), или триенето при хлъзгане (когато вътрешната сила е по-голяма от $F_{\text{тр.}}^{\text{max.}}$) уравнилици една от вътрешните сили. И в двата случая обаче триенето (и при покой, и при хлъзгане) е насочено **напред**, т.е. по посока на движението.

И така, въпреки възприетия начин на изразяване, който вероятно дължим на инженерите, при превозните средства не триенето, а една от вътрешните сили (\vec{F}) е истинската сила, която определя движението на тялото. Триенето (в покой или при хлъзгане) е външна сила, защото е резултат от взаимодействие с външни за системата тела – напр. настилката. То обаче е приложено върху движещото се тяло и неговата роля е само да компенсира, да уравнилици една от вътрешните сили.

По подобен начин се обяснява и механиката на ходенето. Всички взаимодействия на мускулите с костите пораждат *вътрешни* сили, които две по две се компенсират. Една от тях обаче, която е насочена назад, се оказва приложена чрез подметките на обувките в пода, върху който стоим. Възникналата сила на триене в покой е приложена в нашето стъпало – тя компенсира една от вътрешните сили. Партньорът⁵ на последната сила (партньор в смисъла на “действие–противодействие”), остава не компенсиран и предизвиква движението.

А как стои въпросът с равномерното движение? Ако се ограничим само с казаното дотук излиза, че телата трябва да се движат ускорено – щом им действа неуравновесена (вътрешна или външна) сила \vec{F} , те би трябвало да се движат с постоянно ускорение. След като се задвижат обаче, и автомобилите, и хората обикновено се движат с постоянна скорост. Какъв е балансът на силите в тези случаи?

За да обясним равномерното движение на превозните средства, трябва да отчетем, че върху тях действа както външната сила на въздушното съпротивление, така и една друга сила, за която до тук не стана дума, но която някога се изучаваше в училище – силата на триене при търкаляне⁶. Въздушното съпротивление зависи от скоростта, така че след като се задвижи, превозното средство се ускорява до момента, в който големините на вътрешната сила \vec{F} и сумата от външните сили, които препятстват движението, се изравнят.

При ходене ситуацията се усложнява от факта, че центърът на масите на човешкото тяло периодично се издига и спуска, при което вътрешните сили трябва да извършват работа и за преодоляване на силата на тежестта.

Накратко. Искане ми се да завърша тези разглеждания с едно окончателно съпоставяне на двата случая на движение – движение под действие на външна сила и движение под действие на вътрешна сила.

Тяло, лежащо върху поставка, под действие на **външна** сила остава неподвижно, докато големината на тази сила не стане **по-голяма** от максималната сила на триене в покой. Ускорението е по посока на външната сила, а посоката на силата на триене (при покой или при хлъзгане) е **противоположна** на посоката на външната сила. Движението е равномерно, ако големината на външната сила е равна на големината на общото съпротивление, изпитвано от тялото (триенето при *хлъзгане* плюс съпротивлението на въздуха и др.п.).

⁵ Не искам да използвам термина “двойка сили”, който в механиката има по-друг смисъл.

⁶ Не смесвайте триенето в покой с триене при търкаляне!

Движение, породено от вътрешна сила е възможно, независимо от големината на вътрешната сила, стига да има външна сила, която да компенсира една от вътрешните. Роля на такава сила играе триенето. Когато големината на вътрешната сила е по-малка от максималната сила на триене в покой, движението е устойчиво (в смисъл на управляемост), а когато е по-голяма – настъпва боксуване, занасяне, хлъзгане и т.н. Посоката на триенето (и при покой, и при хлъзгане) **съвпада** с посоката на ускорението. Движението е равномерно, ако големината на вътрешната сила е равна на общото съпротивление, изпитвано от тялото (в случая – съпротивлението на въздуха, триене при търкаляне и др.п.).

“Малък” проблем. Дали след всичко това ще можете да направите баланс на силите, които се проявяват, когато бутаме един автомобил със загасен мотор и той се движи равномерно, като колелата му не са блокирали?

И един по-голям проблем, свързан с обучението. В програмата по човекът и природата за 6. клас в “Тема 2. Видове сили” като очакван резултат е формулирано изискването ученикът да може да “Описва ролята на силата на триене при движение на човека и на превозните средства.” Предвид направените дотук разглеждания е ясно, че обясненията не са за шестокласници. Какво може да “опише” всъщност ученикът? Според мен нищо, освен да посочи примери, от които да се вижда, че в някои случаи триенето е полезно, в други – вредно. При това, забележете, в примерите, които обикновено използваме за илюстриране на ползата от триенето, винаги става дума за **триене в покой**, като при това **в уроците не сме направили разлика между триене при хлъзгане и триене в покой**. За наш късмет шестокласниците приемат всяка наша дума като истина от последна инстанция и не се замислят над това, което им говорим. И аз не бих искал да съм на мястото на учител, който току що е казал на учениците, че ние не бихме могли да ходим, ако няма триене, а някой ученик стане и попита: “Вие ни казахте, че триенето е сила, която възниква при движение на едно тяло по повърхността на друго тяло. Когато се оттласкваме от пода обаче подметката е **неподвижна** спрямо пода – за какво триене става дума тогава?”

Аз нямам отговор за посочения проблем – шести клас е твърде рано за физически коректно изясняване на ситуацията, а в по-горните класове няма време да се занимаваме с тези въпроси. От друга страна, ако искаме да дадем практическа насоченост на обучението – точно с такива въпроси трябва да занимаваме учениците, защото с тях е свързана и безопасността на движение, и пестенето на енергия и т.н.