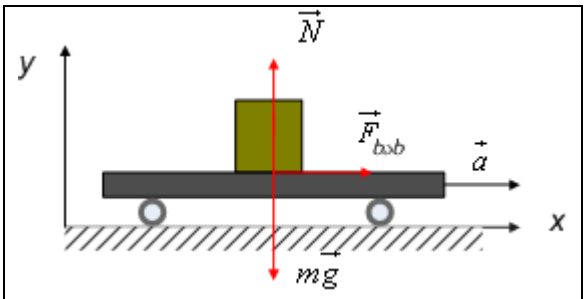
ავთანდილ შურღაია

ათვლის სისტემების შესახებ

ნიუტონისეული მექანიკის ძირითადი დებულებები სამართლიანია ათვლის ინერციული სისტემებისთვის, რომელთა რაოდენობა უთვალავია. არსებობს აგრეთვე ათვლის სისტემების პრინციპულად განსხვავებული კლასი. ამ სისტემებში სხეულის სიჩქარის ცვლილება არ არის გამოწვეული სხვა სხეულების მხრივ რაიმე ძალის მოქმედებით. მაგალითად, ავიღოთ თანაბრად და წრფივად მოძრავი ავტომობილი და გადავიღოთ ვიდეოკამერით, რომელიც აჩქარებულად მოძრაობს. ეკრანზე დავინახავთ, რომ სხეული მოძრაობს აჩქარებულად და არა თანაბრად.

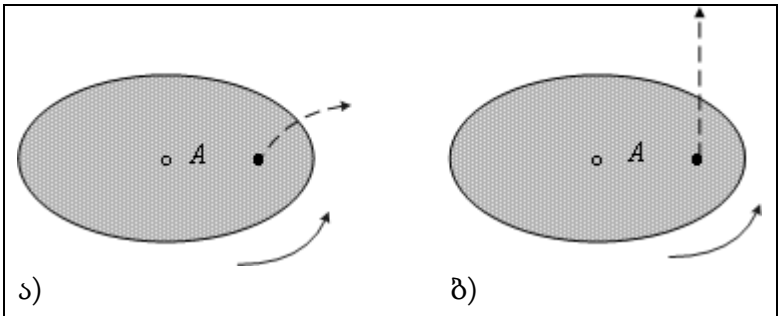


ნახ. 1. აჩქარებით მოძრავ ურიკაზე უძრავად მოთავსებული სხეული მოძრაობს იმავე აჩქარებით.

განვიხილოთ დედამიწის მიმართ თანაბარაჩქარებულად და წრფივად მოძრავი ურიკა, რომლის ზედაპირზე მოთავსებულია სხეული. წარმოვიდგინოთ, რომ სხეულიც ურიკასთან ერთად მოძრაობს. სხეულზე მოქმედი ძალებია სიმძიმის ძალა, ურიკის მხრიდან მოქმედი ხახუნის ძალა და ურიკის რეაქციის ძალა (იხ. ნახ. 1). დედამიწასთან დაკავშირებულ ათვლის სისტემაში სამი ძალის ტოლქმედი სხეულს ანიჭებს აჩქარებას და სხეული ურიკასთან ერთად მოძრაობს. განვიხილოთ სხეულის მოძრაობა ურიკასთან დაკავშირებულ ათვლის სისტემაში. ამ სისტემაში სხეული უძრავია, მიუხედავად იმისა, რომ სხეულზე ჰორიზონტალური მიმართულებით მოქმედი ხახუნის ძალა არ არის გაწონასწორებული რომელიმე სხვა ძალით (ვერტიკალური მიმართულებით რეაქციისა და სიმძიმის ძალები ერთმანეთს აბათილებს). მაშასადამე, ნიუტონის კანონის გამოყენებამ წინააღმდეგობამდე მიგვიყვანა: თუ წარმოვიდგენთ, რომ ურიკის ზედაპირი აბსოლუტურად გლუვია და ხახუნს ადგილი არ აქვს, მაშინ სხეული ურიკის მიმართ იმოძრავებს საპირისპირო მიმართულებით $-\vec{a}$ აჩქარებით, მაშინ როდესაც სხულზე მოქმედი სამი ძალიდან მხოლოდ ორი - სიმძიმისა და რეაქციისა - აბათილებს ერთმანეთს. ამ შემთხვევაშიც ნიუტონის კანონი რეალობასთან წინააღმდეგობაში მოდის. ამრიგად, ეს მარტივი მაგალითი გვიჩვენებს, რომ აჩქარებულად მოძრავ ათვლის სისტემაში ნიუტონის კანონები ირღვევა.

ათვლის ინერციულ სისტემებში, როგორც ვიცით, აჩქარების მიზეზს წარმოადგენს ძალა ან ძალების ტოლქმედი. ძალის საშუალებით ჩვენ რაოდენობრივად აღვწერთ სხეულების ურთიერთქმედებას. ძალის წარმოქმნის სხვა მიზეზი, გარდა სხეულთა ურთიერთქმედებისა, არ არსებობს. გარდა ამისა, ორი სხეული ერთმანეთთან ურთიერთქმედებს სიდიდით ტოლი და ურთიერთსაპირისპიროდ მიმართული

ძალებით. ათვლის არაინერციულ სისტემებში ამ დებულებების შენარჩუნება ვერ ხერხდება.
განვიხილოთ სხეულის მოძრაობა უძრავი ღერძის გარშემო თანაბრად მბრუნავ წრიულ სიბრტყეზე მყოფი დამკვირვებლის თვალსაზრისით (იხ. ნახ. 2).

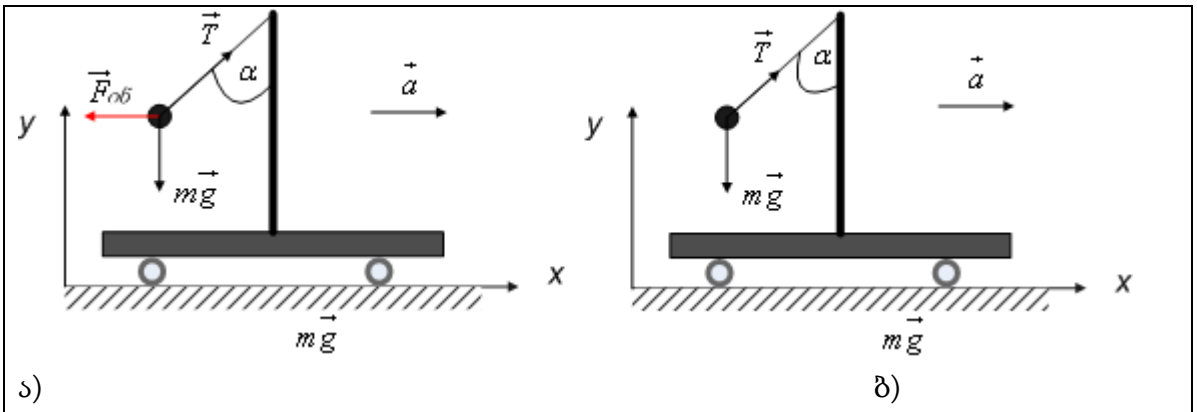


ნახ. 2. ა) სიბრტყეზე მყოფი A დამკვირვებელი ხედავს, რომ ბურთი აჩქარებულად მოძრაობს.
ბ) უძრავი დამკვირვებლის მიმართ ბურთი მოძრაობს წრფივად და თანაბრად.

ეს დამკვირვებელი, ცხადია, არის აჩქარებულად მოძრავი და, მაშასადამე, ათვლის არაინერციული სისტემა. ამ დამკვირვებლისთვის დანარჩენი სამყარო მოძრაობს მის გარშემო. დავუშვათ, მან ფრთხილად დადო ბურთი მბრუნავ სიბრტყეზე ისე, რომ სიბრტყის მიმართ საწყისი სიჩქარე არ მიანიჭა. სიბრტყე ჩავთვალოთ აბსოლუტურად გლუვად და ხახუნი არ გავითვალისწინოთ. ნიუტონის პირველი კანონის თანახმად, საწყის მომენტში უძრავად მყოფი ბურთი უძრავი უნდა დარჩეს - ამ სხეულზე მოქმედი სიმძიმისა და რეაქციის ძალები ერთმანეთს აბათილებს, სხვა ძალა კი სხეულზე არ მოქმედებს. სიბრტყეზე მყოფი დამკვირვებელი კი ხედავს, რომ ბურთი იწყებს მოძრაობას აჩქარებულად. უძრავი დამკვირვებელი, რომლის მიმართ სიბრტყე ასრულებს ბრუნვით მოძრაობას, ხედავს, რომ სხეულს გააჩნია ბურთის დადების წერტილის წირითი სიჩქარის ტოლი საწყისი სიჩქარე, რომლითაც სხეული აგრძელებს წრფივად და თანაბრად მოძრაობას იმ წრეწირის მხების გასწვრივ, რომელსაც ეკუთვნის ეს წერტილი. როგორც ვხედავთ, მბრუნავ სიბრტყესთან დაკავშირებულ ათვლის სისტემაში ნიუტონის პირველი კანონი ირღვევა.
იმისთვის, რომ ნიუტონის კანონები სამართლიანი იყოს ათვლის არაინერციულ სისტემებშიც, უნდა დავუშვათ, რომ აჩქარებას, გარდა სხეულების ურთიერთქმედებისა, იწვევს რაღაც სხვა მიზეზიც, რომელსაც არაფერი აქვს საერთო სხეულების ურთიერთქმედებასთან და, მაშასადამე, ძალებთან ჩვეული აზრით. თუმცა მოხდა ისე, რომ დაშვებული იქნა **ახალი ტიპის ძალის არსებობა, რომელსაც ისეთივე კავშირი აქვს აჩქარებასთან, როგორიც სხვა, ბუნებაში არსებულ რეალურ ძალებს**. ამ ძალის შემოტანით შესაძლებელი გახდა ნიუტონის მეორე კანონის შენარჩუნება და მას **ინერციის ძალა** ეწოდა. ეს ძალა არ არის დაკავშირებული სხეულების ურთიერთქმედებასთან. ეს არის ფიქტიური ძალა, რომლის არსებობა დაშვებულია

მხოლოდ ათვლის არაინერციულ სისტემებში. ამ ძალების არსებობა განპირობებულია მხოლოდ იმით, რომ ათვლის არაინერციული სისტემა აჩქარებულად მოძრაობს. მისმა შემოტანამ შესაძლებელი გახადა ნიუტონის პირველი და მეორე კანონების გამოყენება ათვლის არაინერციულ სისტემებშიც. ნიუტონის მესამე კანონი ასეთი სისტემებისთვის კვლავ უსამართლოა - ინერციის უკუქმედება არ არსებობს.

ამრიგად, ათვლის არაინერციულ სისტემებში აჩქარების მიზეზი, სხვა ძალებთან ერთად, არის ინერციის ძალაც, რომელიც არ უკავშირდება სხეულთა ურთიერთქმედებას. ინერციის ძალის გათვალისწინებით, სხეულისთვის, რომელიც მოძრაობს ათვლის არაინერციული სისტემის მიმართ რაღაც $\vec{a_0}$ აჩქარებით, ნიუტონის მეორე კანონი ჩაიწერება შემდეგი სახით: $\vec{F}+\vec{F}_{\text{ინ}} = m\vec{a_0}$, - სადაც $\vec{F}$ არის სხეულთა ურთიერთქმედებით გამოწვეული ძალების ტოლქმედი. ეს უკანასკნელი სხეულს ინერციული ათვლის სისტემის მიმართ ანიჭებს $\vec{a}$ აჩქარებას, ე.ი. $\vec{F}=m\vec{a}$. ასეთნაირად ჩაწერილი განტოლებიდან ინერციის ძალისთვის მივიღებთ: $\vec{F}_{\text{ინ}}=m(\vec{a_0}-\vec{a})$. ადვილი შესამჩნევია, რომ სიდიდე $\vec{a}'=(\vec{a}-\vec{a_0})$ არის აჩქარება, რომლითაც ათვლის არაინერციული სისტემა მოძრაობს ათვლის ინერციული სისტემის მიმართ (სხეულის აჩქარება $\vec{a}$ ათვლის ინერციული სისტემის მიმართ წარმოადგენს ათვლის არაინერციული სისტემის მიმართ მისი აჩქარების $\vec{a_0}$ და ათვლის ინერციული სისტემის მიმართ არაინერციული სისტემის აჩქარების $\vec{a}'$ ვექტორულ ჯამს). ამრიგად, ინერციის ძალას აჩქარებულად მოძრავ ათვლის სისტემაში აქვს შემდეგი სახე: $\vec{F}_{\text{ინ}} = -m\vec{a}'$. ეს ნიშნავს, რომ ინერციის ძალა სხეულს ანიჭებს იმ აჩქარების საპირისპიროდ მიმართულ აჩქარებას, რომლითაც ათვლის არაინერციული სისტემა მოძრაობს ათვლის ინერციული სისტემის მიმართ. თუ სხეული უძრავია ათვლის არაინერციულ სისტემაში (ან მოძრაობს თანაბრად და წრფივად), მაშინ $\vec{a}'=\vec{a}$ (სხეულიც მოძრაობს იმავე აჩქარებით ათვლის ინერციული სისტემის მიმართ, რომლითაც ათვლის არაინერციული სისტემა), ხოლო $\vec{F}_{\text{ინ}}=-m\vec{a}$. თუ ნიუტონის მეორე კანონს ასეთი სახით მივუსადაგებთ 1-ელ ნახატზე განხილულ მაგალითს ხახუნის გაუთვალისწინებლად, მაშინ სხეულის მოძრაობა ურიკაზე ურიკის მოძრაობის საპირისპირო მიმართულებით გამოწვეულია მხოლოდ ინერციის ძალით (ვგულისხმობთ, რომ სიმძიმისა და რეაქციის ძალები ერთმანეთს აბათილებს) და ეს ძალა ანიჭებს სხეულს ურიკის აჩქარების საპირისპიროდ მიმართულ აჩქარებას. ათვლის ინერციული სისტემის მიმართ კი ეს სხეული უძრავი იქნება.

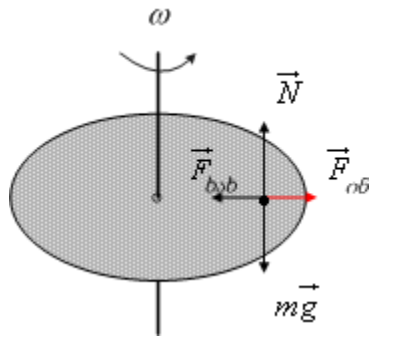


ა) ბ)

ნახ. 3. აჩქარებით მოძრავ ურიკაზე დამაგრებულ ძაფზე ჩამოკიდებული ბურთულას მოძრაობა: ა) ათვლის არაინერციულ სისტემაში; ბ) ათვლის ინერციულ სისტემაში

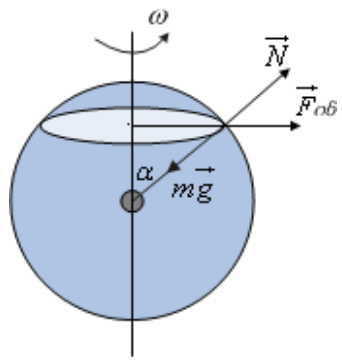
განვიხილოთ რამდენიმე მაგალითი და ვნახოთ, თუ როგორ შეიძლება ერთი და იმავე მოძრაობის აღწერა ათვლის როგორც ინერციულ, ისე არაინერციულ სისტემებში. ვთქვათ, ურიკა მასზე უძრავად დამაგრებული ვერტიკალური ღეროთი მოძრაობს მუდმივი $\vec{a}$ აჩქარებით (იხ. ნახ. 3). ღეროზე ჩამოკიდებულია ძაფზე დამაგრებული m მასის ბურთულა. ურიკის აჩქარებული მოძრაობა გამოიწვევს ძაფის გადახრას ვერტიკალის მიმართ რაღაც α კუთხით. ურიკასთან დამაგრებულ ათვლის არაინერციულ სისტემაში ბურთულაზე მოქმედებს სამი ძალა: სიმძიმის ძალა, ძაფის დაჭიმულობის ძალა და ინერციის ძალა. ვინაიდან ბურთულა ურიკის მიმართ უძრავია (იხ. ნახ. 2ა), ნიუტონის მეორე კანონი ამ სისტემაში ჩაიწერება ასე: $\vec{F}_{ინ}+\vec{T}+m\vec{g}=0$. თუ გავითვალისწინებთ ინერციის ძალის მნიშვნელობას, მაშინ $-m\vec{a}+\vec{T}+m\vec{g}=0$, რაც ემთხვევა ნიუტონის მეორე კანონს ათვლის ინერციული სისტემის მიმართ: $\vec{T}+m\vec{g}=m\vec{a}$. ადვილი მისახვედრია, რომ ორივე შემთხვევაში $a=g\tan\alpha$.

განვიხილოთ ისევ მბრუნავი სიბრტყე და მასზე მოთავსებული სხეული, ოღონდ გავითვალისწინოთ ხახუნი სხეულსა და სიბრტყეს შორის. ვთქვათ, სიბრტყის კუთხური სიჩქარე არ არის საკმარისი იმისთვის, რომ სხეული მოსწყდეს ზედაპირს.



ნახ. 4. სხეული ბრუნავს სიბრტყესთან ერთად. ინერციის ძალა მას ანიჭებს საპირისპირო აჩქარებას.

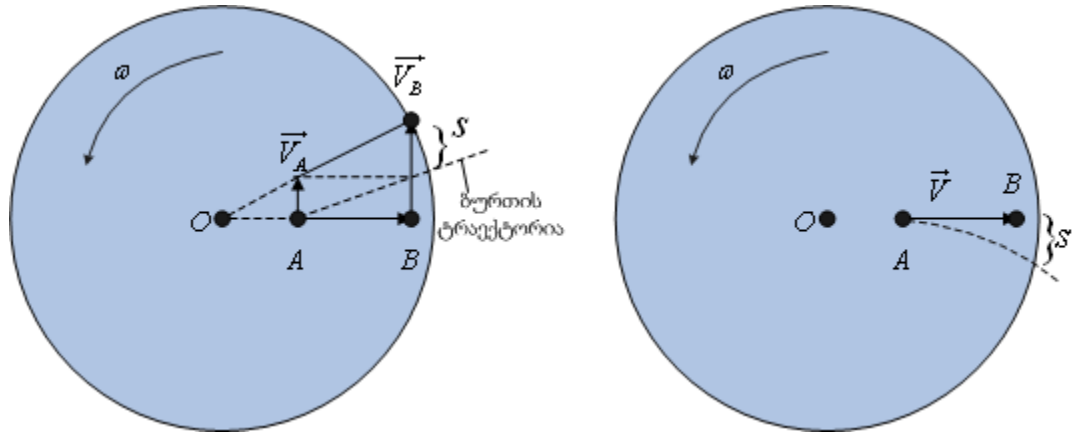
მაშინ სხეული ბრუნავს სიბრტყესთან ერთად. უძრავი დამკვირვებლისთვის (ათვლის ინერციულ სისტემაში), ნიუტონის მეორე კანონის თანახმად, $\vec{N}+m\vec{g}+\vec{F}_{ხახ}=m\vec{a}$ სხეულს აქვს ცენტრისკენული აჩქარება, რომელსაც მას რეალურად ანიჭებს ხახუნის ძალა (ვერტიკალური მიმართულებით აჩქარება არ გვაქვს და ძალები ერთმანეთს აბათილებს). სიბრტყეზე მყოფი დამკვირვებლისთვის (ათვლის არაინერციული სისტემა) სხეული უძრავია, ამიტომ, ნიუტონის პირველი კანონის თანახმად, ინერციის ძალის გათვალისწინებით, $\vec{N}+m\vec{g}+\vec{F}_{ხახ}+\vec{F}_{ინ}=0$. სიმძიმისა და რეაქციის ძალები აწონასწორებს ერთმანეთს, ხოლო ჰორიზონტალური მიმართულებით ინერციის ძალა აწონასწორებს ხახუნის ძალას, ანიჭებს რა სხეულს ცენტრისკენული აჩქარების საპირისპიროდ მიმართულ აჩქარებას.



ნახ. 5. α კუთხით განსაზღვრულ განედზე
ინერციის ძალა სხეულს ანიჭებს ცენტრისკენული აჩქარების საპირისპირო აჩქარებას

როდესაც ათვლის ინერციულ სისტემებზე ვსაუბრობთ, ვგულისხმობთ, რომ დედამიწის ბრუნვითი მოძრაობისა და მისი ცენტრისკენული აჩქარების უგულებელყოფა შესაძლებელია. თუ მკაცრად ვიმსჯელებთ, მაშინ დედამიწასთან დაკავშირებული ათვლის სისტემა არაინერციულია (იხ. ნახ. 5) და აუცილებელია ინერციის ძალის გათვალისწინება სიმძიმისა და დედამიწის რეაქციის ძალებთან ერთად. ინერციის ძალა სხეულს ანიჭებს აჩქარებას, რომელიც მიმართულია ცენტრიდან და სიდიდით ტოლია $F_{\text{ინ}} = m\omega^2 r$, სადაც r არის აღნიშნულ განედზე მბრუნავი სხეულის ტრაექტორიის რადიუსი. ინერციის ძალის მოქმედება იწვევს იმას, რომ სხეულის წონა ამ წერტილში სიმძიმის ძალაზე ნაკლებია.

მუდმივი კუთხური სიჩქარით მბრუნავ ათვლის სისტემაში არსებობს კიდევ ერთი ფიქტიური ძალა, რომელსაც **კორიოლისის ძალა** ეწოდება. ეს ძალა წარმოიქმნება ათვლის მბრუნავ არაინერციულ სისტემაში იმ შემთხვევაში, თუ ამ სისტემის მიმართ სხეული მოძრაობს. ეს ძალაც ინერციული ძალის სახეობაა. განვიხილოთ ასეთი მაგალითი. ω კუთხური სიჩქარით მოძრავ სიბრტყეზე A და B წერტილებში იმყოფება ორი ადამიანი ბრუნვის ღერძიდან r_A და r_B მანძილებზე (იხ. ნახ. 6).



ა) ბ)

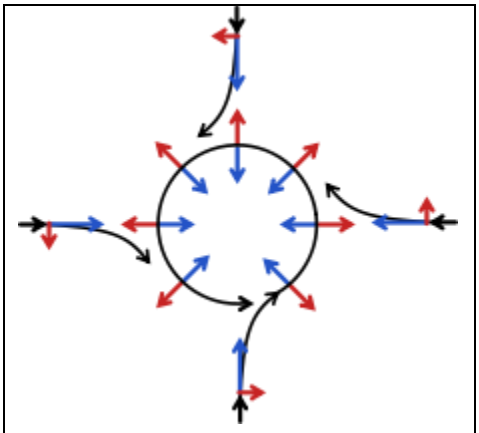
ნახ. 6. ა) ბურთის მოძრაობა რადიუსის გასწვრივ დანახული უძრავი ინერციული ათვლის სისტემიდან; ბ) მოძრაობა, დანახული სიბრტყესთან ერთად მბრუნავი არაინერციული ათვლის სისტემიდან

A წერტილში მყოფი ადამიანი B მიმართულებით სიბრტყეზე აგორებს ბურთს რადიუსის გასწვრივ ჰორიზონტალური $\vec{v}$ სიჩქარით. ათვლის ინერციული სისტემის თვალსაზრისით,

ბურთს გააჩნია არა მარტო ჰორიზონტალური სიჩქარე, არამედ ბრუნვის ტრაექტორიის მხები სიჩქარეც $\overrightarrow{v_A}$. ვიცით, რომ ამ მხები სიჩქარის სიდიდე დამოკიდებულია კუთხურ სიჩქარესა და რადიუსზე, კერძოდ, $v_A = \omega r_A$. B წერტილში მყოფ ადამიანს რომ ჰქონოდა იგივე $\overrightarrow{v_A}$ სიჩქარე, მაშინ ბურთი მიაღწევდა B წერტილს. ვინაიდან ამ წერტილის სიჩქარე $v_B = \omega r_B > v_A$, ბურთის მისვლის მომენტში B წერტილში მყოფი ადამიანი აღარ იქნება ამ წერტილში და ბურთი აღმოჩნდება მის უკან.
შევხედოთ ბურთის მოძრაობას ათვლის არაინერციული სისტემიდან. ამ სისტემაში ბურთის ტრექტორია გადაიხრება ბრუნვის საწინააღმდეგო მიმართულებით, ამიტომ ის ამ შემთხვევაშიც მოხვდება B წერტილის უკან. ცხადია, ეს გადახრა არ არის გამოწვეული ცენტრიდანული აჩქარებით (რომელიც გამოწვეულია რადიუსის გასწვრივ მიმართული ინერციის ძალით). ამ შემთხვევაში გვაქვს ტრაექტორიის გამრუდება ბურთის მოძრაობის სიჩქარის მართობული მიმართულებით.
გთავაზობთ ნაწყვეტს სადემონსტრაციო ვიდეოკლიპიდან, სადაც ცდით არის ნაჩვენები ის, რაც ჩვენ აღვწერეთ[1].

fizika_klipi_2.avi

ამ ეფექტს უკავშირებენ კორიოლისის აჩქარებას, რომელსაც ანიჭებს სხეულს კორიოლისის (ფიქტიური) ძალა და რომელიც მიმართულია $\vec{v}$ სიჩქარისა და ბრუნვის ღერძის მართობულად. თუ ბურთის ჰორიზონტალური სიჩქარის მიმართულებას საპირისპიროთი შევცვლით, კორიოლისის აჩქარებაც შეიცვლება საპირისპირო მიმართულებით. ეს ეფექტი გამოწვეულია იმით, რომ მბრუნავი არაინერციული სისტემის მიმართ სხვადასხვა წერტილი განსხვავებული წირითი სიჩქარით მოძრაობს.
ამრიგად, ათვლის არაინერციულ სისტემაში ნიუტონის მეორე კანონი უნდა ჩაიწეროს კორიოლისის ძალის გათვალისწინებით. გამოვთვალოთ კორიოლისის აჩქარების სიდიდე ათვლის ინერცულ სისტემაში. ბურთი მოძრაობს რადიუსის გასწვრივ $\vec{v}$ სიჩქარით. მის მიერ გავლილი მანძილი ტოლია $r_A - r_B = vt$. ამავე დროს, მხები მიმართულებით ბურთი გადის მანძილს $s = s_B - s_A = (v_B - v_A)t = (r_B - r_A)\omega t$. ამ ორი ფორმულის შედარებით მივიღებთ: $s = v\omega t^2$. ეს არის გვერდითი წანაცვლება, დანახული ათვლის არაინერციული სისტემიდან. ვინაიდან აჩქარებული მოძრაობისთვის $s = \frac{at^2}{2}$, კორიოლისის აჩქარებისთვის მივიღებთ: $a = 2v\omega$. ეს გამოსახულება სამართლიანია ნებისმიერი სიჩქარისთვის ბრუნვის ღერძის მართობულ სიბრტყეში.



ნახ. 7 დაბალი წნევის არეში ჰაერის ნაკადის სქემატური წარმოდგენა ჩრდილოეთ ნახევარსფეროში. ჰაერის ნაკადი მიისწრაფვის დაბალი წნევის არისკენ (ლურჯი ისარი). კორიოლისის ძალა (წითელი ისარი) მოქმედებს ნაკადის სიჩქარის მართობულად და გადახრის მას.

კორიოლისის ეფექტს აქვს რამდენიმე საინტერესო გამოვლინება დედამიწაზე. ის გავლენას ახდენს ჰაერის მასების მოძრაობაზე, აგრეთვე ამინდზე. ამ ეფექტის არარსებობის შემთხვევაში ჰაერი დაბალი წნევის არეში გადაადგილდებოდა (იხ. ნახ. 7)[2]. კორიოლისის ეფექტის გამო ჰაერის მასა ბრუნავს ასეთი არის გარშემო. ეს ეფექტია მდინარეთა ნაპირების ჩამორეცხვის მიზეზიც, კერძოდ, ჩრდილოეთ ნახევარსფეროში ჩრდილოეთიდან სამხრეთისკენ მდინარის დინებისას ჩამოირეცხება მარჯვენა – დასავლეთი სანაპირო, სამხრეთ ნახევარსფეროში კი, პირიქით, აღმოსავლეთი სანაპირო (მაგრამ ისევ მარჯვენა). აქვე აღვნიშნავთ, რომ ყოველდღიურ ცხოვრებაში ჩვენ საქმე გვაქვს მცირე სიდიდის სიჩქარეებთან, ამიტომ სხეულის მოძრაობისას ამ ეფექტით გამოწვეული გადახრა უმნიშვნელოა და შეუმჩნეველი. ეს ეფექტი შესამჩნევია, როდესაც, მაგალითად, დედამიწის გარშემო ორბიტაზე უშვებენ რაკეტას.

დასასრულ, უნდა აღვნიშნოთ, რომ ათვლის სისტემის არჩევა დამოკიდებულია კონკრეტულ ფიზიკურ ამოცანაზე. შესაძლოა, ამოცანის ამოხსნა უფრო მარტივი იყოს ათვლის არაინერციულ სისტემაში.

---

[1] სრული ვერსიის სანახავად იხ. ბმული:
http://www.youtube.com/watch?v=aeY9tY9vKgs

[2] ნახაზი აღებულია ვებ–გვერდიდან:
http://en.wikipedia.org/wiki/Coriolis_effect