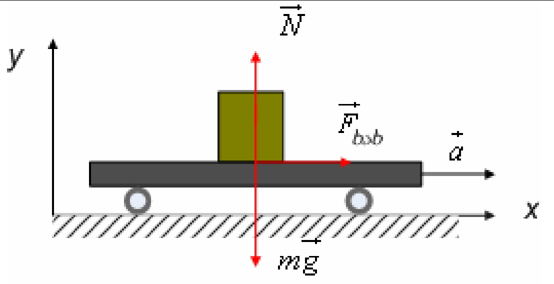
## ათვლის სისტემების შესახებ

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 მხრიდან რაიმე ძალის მოქმედებით. მაგალითისათვის ავიღოთ თანაბრად და წრფივად მოძრავი ავტომობილი და გადავიღოთ ვიდეოკამერით, რომელიც მოძრაობს აჩქარებულად. ეკრანზე ვნახავთ, რომ სხეული მოძრაობს აჩქარებულად და არა თანაბრად.

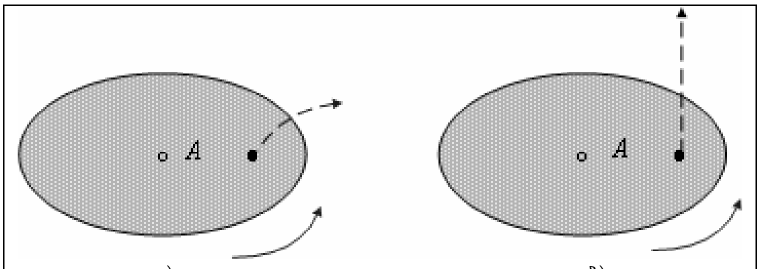
განვიხილოთ დედამიწის მიმართ თანაბარაჩქარებულად და წრფივად მოძრავი ურიკა, რომლის ზედაპირზე მოთავსებულია სხეული. წარმოვიდგინოთ, რომ სხეულიც ურიკასთან ერთად მოძრაობს. სხეულზე მოქმედი ძალებია სიმძიმის ძალა, ურიკის მხრიდან მოქმედი ხახუნის ძალა და ურიკას რეაქციის ძალა (იხ. ნახ.1). დედამიწასთან დაკავშირებულ 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 რეაქციის და სიმძიმის ძალები ერთმანეთს აბათილებენ). მაშასადამე ნიუტონის კანონის გამოყენებამ მიგვიყვანა წინააღმდეგობამდე. თუ წარმოვიდგენთ, რომ ურიკას 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 ძალა (სიმძიმის და რეაქციის) აბათილებს ერთმანეთს. ამ შემთხვევაშიც ნიუტონის კანონი რეალობასთან წინააღმდეგობაში მოდის. ამრიგად, ეს მარტივი მაგალითი გვიჩვენებს, რომ ნიუტონის კანონები აჩქარებულად მოძრავ ათვლის სისტემაში ირღვევა.




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

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

განვიხილოთ სხეულის მოძრაობა უძრავი ღერძის გარშემო თანაბრად მბრუნავ წრიულ სიბრტყეზე მყოფი დამკვირვებლის თვალსაზრისით (იხ. ნახ. 2).



ა) ბ)

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

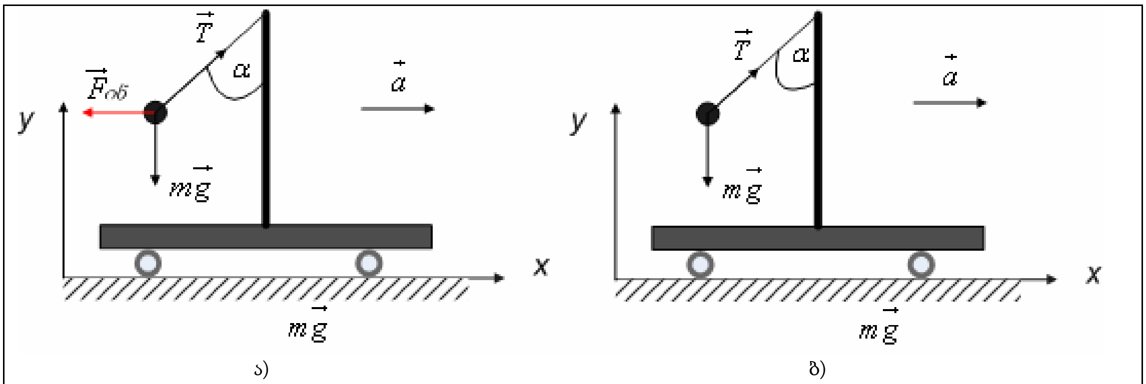
ეს დამკვირვებელი ცხადია არის აჩქარებულად მოძრავი და მაშასადამე ათვლის არაინერციული სისტემა. ამ დამკვირვებლისთვის დანარჩენი სამყარო მოძრაობს მის გარშემო. დაუშვათ მან ფრთხილად დადო ბურთი მბრუნავ სიბრტყეზე ისე, რომ სიბრტყის მიმართ საწყისი სიჩქარე არ მიანიჭა. სიბრტყე ჩავთვალოთ აბსოლუტურად გლუვად და ხახუნი არ მივიღოთ მხედველობაში. ნიუტონის პირველი კანონის თანახმად საწყის მომენტში უძრავად მყოფი ბურთი უნდა დარჩეს უძრავი: ამ სხეულზე მოქმედი სიმძიმის და რეაქციის ძალები ერთმანეთს აბათილებენ. 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 გასწვრის, რომელსაც ეკუთვნის ეს წერტილი. როგორც ვხედავთ ნიუტონის პირველი კანონი ირღვევა მბრუნავ სიბრტყესთან დაკავშირებულ ათვლის სისტემაში.

იმისათვის, რომ ნიუტონის კანონების სამართლიანი იყოს ათვლის არაინერციულ სისტემებშიც, უნდა დაუშვათ, რომ აჩქარებას სხეულების ურთიერთქმედების გარდა 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 როგორც 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 ძალა არის ფიქტიური ძალა, რომლის არსებობა დაშვებულია მხოლოდ ათვლის არაინერციული სისტემებში. ამ ძალების არსებობა განპირობებულია მხოლოდ იმით, რომ არაინერციული ათვლის სისტემა აჩქარებულად მოძრაობს. მისმა შემოტანამ შესაძლებელი გახადა ნიუტონის პირველი და მეორე კანონების გამოყენება ათვლის არაინერციულ სისტემებშიც. ნიუტონის მესამე კანონი ასეთი სისტემებისთვის კვლავ არასამართლიანია – ინერციის უკუქმე–დება არ არსებობს.

ამრიგად, ათვლის არაინერციულ სისტემებში აჩქარების გამომწვევი მიზეზი სხვა ძალებთან ერთად არის ინერციის ძალა, რომელიც არ არის დაკავშირებული სხეულების ურთიერთქმედებასთან. ინერციის ძალის გათვალისწინებით ნიუტონის მეორე კანონი სხეულისთვის, რომელიც მოძრაობს ათვლის არაინერციული სისტემის

მიმართ რაღაც $\vec{a_0}$ აჩქარებით, ჩაიწერება შემდეგი სახით: $\vec{F}+\vec{F}_{ინ} = m\vec{a_0}$, სადაც $\vec{F}$ არის სხეულების ურთიერთქმედებით გამოწვეული ძალების ტოლქმედი. ეს უკანასკნელი სხეულს ინერციული ათვლის სისტემის მიმართ ანიჭებს $\vec{a}$ აჩქარებას და ე.ი. $\vec{F}=m\vec{a}$. ასეთნაირად ჩაწერილი განტოლებიდან ინერციის ძალისთვის მივიღებთ: $\vec{F}_{ინ} = m(\vec{a_0}-\vec{a})$.ადვილი დასანახია, 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: $\vec{F}_{ინ} = -m\vec{a}\,'$. 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 იგივე აჩქარებით ათვლის ინერციული სისტემის მიმართ, როგორითაც ათვლის არაინერციული სისტემა), ხოლო $\vec{F}_{ინ}=-m\vec{a}$. თუ მიუყენებთ ნიუტონის მეორე კანონს ასეთი სახით ნახ. 1–ზე განხილულ მაგალითს ხახუნის გაუთვალისწინებლად, მაშინ სხეულის მოძრაობა ურიკაზე ურიკის მოძრაობის საპირისპირო მიმართულებით გამოწვეულია მხოლოდ ინერციის ძალით (ვგულისხმობთ, რომ სიმძიმის და რეაქციის ძალები ერთმანეთს აბათილებენ) და ეს ძალა ანიჭებს სხეულს ურიკის აჩქარების საპირისპიროდ მიმართულ აჩქარებას. ათვლის ინერციული სისტემის მიმართ კი ეს სხეული იქნება უძრავი.

განვიხილოთ რამდენიმე მაგალითი და ვნახოთ თუ როგორ შეიძლება ერთი და იგივე მოძრაობა აღვწეროთ ათვლის როგორც ინერციულ, ასე არაინერციულ

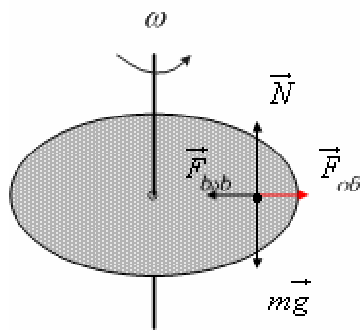



ნახ. 3. აჩქარებით მოძრავ ურიკაზე დამაგრებულ ძაფზე ჩამოკიდებული ბურთულას მოძრაობა
ა) ათვლის არაინერციულ სისტემაში. ბ) ათვლის ინერციულ სისტემაში.

სისტემებში. ვთქვათ ურიკა მასზე უძრავად დამაგრებული ვერტიკალური ღეროთი მოძრაობს მუდმივი $\vec{a}$ აჩქარებით (იხ. ნახ. 3). ღეროზე ჩამოკიდებულია ძაფზე დამაგ–რებული $m$ მასის ბურთულა. ურიკას აჩქარებული მოძრაობა გამოიწვევს ძაფის გადახრას ვერტიკალის მიმართ რაღაც $\alpha$ კუთხით, ურიკასთან დამაგრებული ათვლის არაინერციულ სისტემაში ბურთულაზე მოქმედებს სამი ძალა: სიმძიმის ძალა, ძაფის დაჭიმულობის ძალა და ინერციის ძალა. რადგან ბურთულა ურიკის

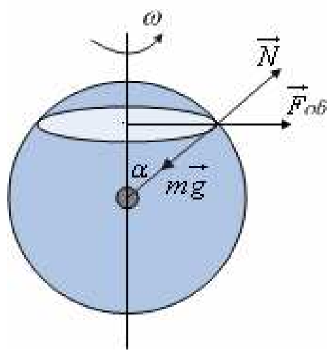
მიმართ უძრავ  მდგომარეობაშია (იხ. ნახ. 2ა), ნიუტონის მეორე კანონი ამ სისტემაში ჩაიწერება ასე: $\vec{F}_{\text{ინ}}+\vec{T}+m\vec{g}=0$. თუ გავითვალისწინებთ ინერციის ძალის მნიშვნელობას, მაშინ $-m\vec{a}+\vec{T}+m\vec{g}=0$, რაც ემთხვევა ნიუტონის მეორე კანონს ინერციული ათვლის სისტემის მიმართ: $\vec{T}+m\vec{g}=m\vec{a}$. ადვილი მისახვედრია, რომ ორივე შემთხვევაში $a=g\tan\alpha$.

განვიხილოთ ისევ მბრუნავი სიბრტყე და მასზე მოთავსებული სხეული. მხოლოდ გავითვალისწინოთ ხახუნი სხეულსა და სიბრტყეს შორის. ვთქვათ სიბრტყის კუთხური სიჩქარე არ არის საკმარისი იმისთვის, რომ სხეული მოწყდეს ზედაპირს. მა–შინ სხეული ბრუნავს სიბრტყესთან ერთად. უძრავი დამკვირვებლისთვის (ათვლის ინერციულ სისტემაში) ნიუტონის მეორე კანონის თანახმად $\vec{N}+m\vec{g}+\vec{F}_{\text{ხახ}}=m\vec{a}$ სხეულს გააჩნია ცენტრისკე–ნული აჩქარება, რომელსაც მას რეალურად ანიჭებს ხახუნის ძალა (ვერტიკალური მიმართულებით აჩქარება არ გვაქვს და ძალები ერთმანეთს აბათილებენ). სიბრტყეზე მყოფი დამკვირვებლის–თვის (ათვლის არაინერციული სისტემა) სხეული უძრავია. ამიტომ ნიუტონის პირველი  კანონის თანახმად ინერციის ძალის გათვალისწინებით $\vec{N}+m\vec{g}+\vec{F}_{\text{ხახ}}+\vec{F}_{\text{ინ}}=0$. სიმძიმის და რეაქციის ძალები აწონასწორებენ ერთმანეთს, ხოლო ჰორიზონტალური მიმართულებით ინერციის ძალა აწონასწორებს ხახუნის ძალას, ანიჭებს რა სხეულს ცენტრისკენული აჩქარების საპირისპიროდ მიმართულ აჩქარებას.




ნახ.4 სხეული ბრუნავს სიბ – რტყესთან ერთად. ინერციის ძალა მას ანიჭებს საპირისპირო აჩქარებას.

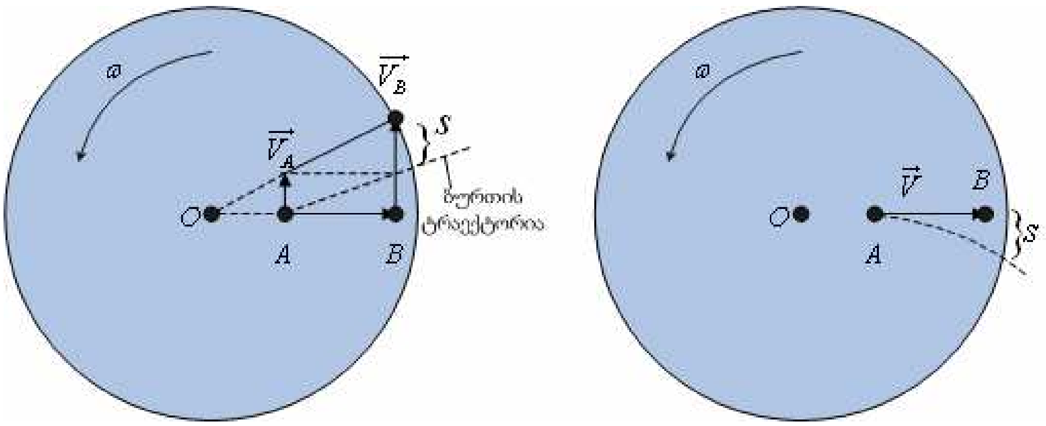
როდესაც ვსაუბრობთ ათვლის ინერციულ სისტემებზე, ვგულისხმობთ, რომ დედამიწის ბრუნვითი მოძრაობის და მისი ცენტრისკე–ნული აჩქარების უგულებელყოფა შესაძლე–ბელია. თუ მკაცრად ვიმსჯელებთ, მაშინ დედამიწასთან დაკავშირებული ათვლის სისტემა არაინერციულია (იხ. ნახ.5) და აუცილებელია ინერციის ძალის გათვალისწინება სიმძიმის 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 ნაკლებია სიმძიმის ძალაზე.




ნახ. 5 $\alpha$ კუთხით განსაზღვრულ განედზე ინერციის ძალა სხეულსანიჭებს ცენტრისკე ნული აჩქარების საპირისპირო აჩქარებას

მუდმივი კუთხური სიჩქარით მბრუნავ ათვლის სისტემაში არსებობს კიდევ ერთი ფიქტიური ძალა, რომელსაც ეწოდება **კორიოლისის ძალა**. ეს ძალა წარმოიქმნება ათვლის მბრუნავ არაინერციულ სისტემაში იმ შემთხვევაში, თუ ამ სისტემის მიმართ

სხეული მოძრაობს. ეს ძალაც არის ინერციული ძალის სახეობა. განვიხილოთ ასეთი მაგალითი. $\omega$ კუთხური სიჩქარით მოძრავ სიბრტყეზე $A$ და $B$ წერტილებ–ში იმყოფება ორი ადამიანი ბრუნვის ღერძიდან $r_A$ და $r_B$ მანძილებზე (იხ. ნახ. 6).




ა) ბ)

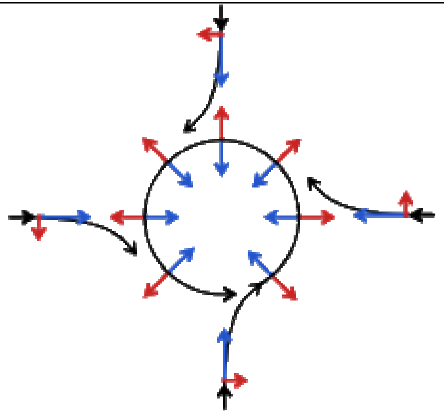
ნახ. 6 ა) ბურთის მოძრაობა რადიუსის გასწვრივ დანახული უძრავი ინერციული ათვლის სისტემიდან.
ბ) მოძრაობა, დანახული სიბრტყესთან ერთად მბრუნავი არაინერციული ათვლის სისტემიდან.

$A$ 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 სიჩქარეზე 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 სადემონსტარციო ვიდეოკლიპიდან, სადაც ცდით არის ნაჩვენები ის რაც ჩვენ აღვწერეთ**[1]. fizika_klipi_2.avi ამ ეფექტს უკავშირებენ კორიოლისის აჩქარებას, რომელსაც სხეულს ანიჭებს კორიოლისის (ფიქტიური) ძალა და რომელიც მიმართულია $\vec{v}$ სიჩქარის და ბრუნვის ღერძის მართობულად. თუ ბურთის ჰორიზონტალური სიჩქარის მიმართულებას საპირისპიროთი შევცვლით, კორიოლისის აჩქარებაც შეიცვლება საპირისპირო მიმართულებით. ეს ეფექტი

გამოწვეული იმით, რომ მბრუნავი არაინერციული სისტემის მიმართ სხვადასხვა წერტილები მოძრაობენ განსხვავებული წირითი სიჩქარეებით.

ამრიგად ათვლის არაინერციულ სისტემაში ნიუტონი 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 არაინერციული ათვლის სისტემიდან. რადგან აჩქარებული მოძრაობისთვის $s = \dfrac{at^2}{2}$, კორიოლისის აჩქარებისთვის მივიღებთ: $a = 2v\omega$. ეს გამოსახულება სამართლიანია ნებისმიერი სიჩქარისთვის ბრუნვის ღერძის მართობულ სიბრტყეში.

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 ეფექტი არის აგრეთვე მდინარეთა ნაპირების ჩამორეცხვის მიზეზი, კერძოდ ჩრდილოეთ ნახევარსფეროში ჩრდილოეთიდან სამხრეთისკენ მდინარის მოძრაობისას ჩამოირეცხება მარჯვენა – დასავ–ლეთი 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 ძალიან უმნიშვნელოა და შეუმჩნეველი. ეს ეფექტი შესამჩნევია, როდესაც, მაგალითად, დედამიწის გარშემო ორბიტაზე უშვებენ რაკეტას.



ნახ.7 დაბალი წნევის არეში ჰაერის ნაკა–დის სქემატური წარმოდგენა ჩრდილოეთ ნახევარსფეროში. ჰა–ერის ნაკადი მიისწრაფის დაბალი წნევის არისკენ (ლურჯი ისარი). კორიოლისის ძალა (წითელი ისარი) მოქმედებს ნაკადის სიჩქარის მართობულად და გადახრის მას.

დასასრულს უნდა აღვნიშნოთ, რომ ათვლის სისტემის არჩევა დამოკიდებულია კონკრეტულ ფიზიკურ ამოცანაზე. შესაძლებელია 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