

თამარ სანიკიძე
რამინ ანთია

სამედიცინო ფიზიკა
და
ბიოფიზიკა
ტ. II

თბილისი 2017

მინიჭებულია საქართველოს მეცნიერებათა ეროვნული
აკადემიის გრიფი (19.11.2014)

დამტკიცებულია თბილისის სახელმწიფო სამედიცინო
უნივერსიტეტის აკადემიური საბჭოს მიერ (სხდომის
ოქმი №24/13, 22.07.2016) სახელმძღვანელოდ

სახელმძღვანელო გათვალისწინებულია სამედიცინო და ბიოლოგიური ფაკულტეტების სტუდენტებისა და ამ დარგში მომუშავე სპეციალისტებისათვის

გამოცემა პირველი – “სამედიცინო ფიზიკა”, 2009

გამოცემა მეორე – “სამედიცინო ფიზიკა და ბიოფიზიკა”, ტ. II, 2017

პირველი გამოცემის რედაქტორი -

მეცნიერებათა დოქტორი, პროფესორი
ელეონორა ჩიკვაძე

მეორე გამოცემის რედაქტორი -

მეცნიერებათა დოქტორი, პროფესორი
თამაზ მშინარიშვილი

ტექნიკური რედაქტორები -

თამარ კანთელაძე
მ. დ. ივანე დათუნაშვილი

უფლება წინამდებარე გამოცემაზე ეკუთვნის ავტორებს, წიგნში შეტანილი მასალა არ შეიძლება გადატანილ იქნეს ელექტრონულ ან ჩვეულებრივ ბეჭდურ ფორმაში ავტორების წერილობითი თანხმობის გარეშე

	მეორე გამოცემის რედაქტორისაგან	9
I	ბიოლოგიური თერმოდინამიკა	13
II	ბიომექანიკა	25
II.1	ბიომასალების ვისკოზურ-ელასტიკური თვისებები	27
II.2	მექანიკური მოძრაობა ცოცხალ ორგანიზმში	30
II.2.1	კუნთების მექანიკური თვისებები	30
II.2.2	პერიოდული რხევები და მექანიკური ტალღები	36
II.2.2.1	მექანიკური რხევები	38
II.2.2.2	მექანიკური ტალღები	45
II.2.2.3	ბგერა	49
II.2.2.3.1	ბგერითი ტალღების ფიზიკური მახასიათებლები	53
II.2.2.4	ბგერითი ტალღების სიხშირეთა სკალა	57
II.2.2.4.1	აკუსტიკური ბგერები	57
	აკუსტიკური ბგერის სუბიექტური და ობიექტური მახასიათებლები	62
	აკუსტიკური ბგერების გამოყენება მედიცინაში	66
II.2.2.4.2	ულტრაბგერები	69
	ულტრაბგერა და ცხოველები	69
	ულტრაბგერის გენერაცია	70
	ულტრაბგერის ურთიერთქმედება ცოცხალ ქსოვილებთან	72
	ულტრაბგერის გამოყენება მედიცინაში	79
II.2.2.4.3	ინფრაბგერა	81
	ცხოველების რეაქცია ინფრაბგერაზე	83
	ინფრაბგერის გამოყენება მედიცინაში	84
II.2.3	დოპლერის ეფექტი	84
III	სითხეების და აირების ბიომექანიკა	89
III.1	სითხეების ბიომექანიკა	89
III.1.1	ჰიდროსტატიკის ძირითადი ცნებები და კანონზომიერებანი	89
	სითხის წნევა	89
	პასკალის კანონი	91
	ზიარი ჭურჭლის პრინციპი	92
	არქიმედეს კანონი	93
	ზედაპირული დაჭიმულობა	94
	ლაპლასის კანონი	100
	კაპილარული ეფექტი	102
	წყლის ორთქლის წნევა სფეროს (ბუშტუკებს) შიგნით	104
III.1.2	ჰიდროდინამიკის ძირითადი ცნებები და კანონზომიერებანი	106
	სითხის ჭაღლის (ნაკადის) სტაციონარობის განტოლება	107
	ბერნულის განტოლება	108
	შინაგანი ხახუნი სითხეებში	111
	ლამინარული და ტურბულენტური დინება. რეინოლდსის რიცხვი	114
	ბლანტი სითხის ლამინარული დინება ცილინდრულ მილში.	
	პუაზეილის ფორმულა	116

	პემოდინამიკის ფიზიკური საფუძვლები	118
III.1.3	გული – სისხლის მიმოქცევის სისტემის ძირითადი კომპონენტი	118
III.1.3.1	სისხლის მიმოქცევის ფიზიკური მექანიზმები. რეზისტენტობა	122
III.1.3.2	სისხლის ფიზიკური მახასიათებლები (სიბლანტე, სისხლის ღინების ლამინარობა/ტურბულენტობა)	126
	მექანიკური ძალები	133
	სისხლძარღვის სიგრძის, ფორმისა და დიამეტრის გავლენა სისხლის ღინებაზე	135
	სისხლძარღვების კელრბის ელასტიკურონადა მექანიკური ძაბვა	143
III.1.3.3	სისხლის წნევა	150
	წნევის გაზომვა	152
III.2	აეროდინამიკის ძირითადი მექანიზმები რესპირაციულ სისტემაში	156
	აირის ტრანსპორტი რესპირაციულ სისტემაში	156
	ფილტვების მოცულობა და წნევა	159
	სასუნთქი გზების რეზისტენტობა	162
	ზუდაპირული დაჭიმულობის როლი სუნთქვის ბიომექანიკაში	165
	აირთა ცვლა ალვეოლებში	171
IV	ელექტრომაგნიტური ურთიერთქმედებები ცოცხალ სისტემებში	176
IV.1	ელექტრომაგნიტიზმი	176
IV.2	ელექტრობის ძირითადი ცნებები და კანონები	179
IV.2.1	ელექტროსტატიკა	180
	კულონის კანონი	184
	ელექტრული ველი, ველის დაძაბულობა.	187
	ელექტრული ველის პოტენციალი; პოტენციალთა სხვაობა	187
	ელექტრული დიპოლი	189
	ნეიტიერების პოლარიზაცია; წყლის პოლარული მოლეკულა	193
	გამტარები და დიელექტრიკები ელექტრულ ველში	195
IV.2.2	ელექტროდინამიკა	199
	ელექტრული დენი, მუდმივი ელექტრული დენი	199
	ელექტროლიზი	204
IV.3	კონდენსატორი	205
IV.3.1	მაგნიტიზმის ძირითადი ცნებები და კანონები	208
IV.3.2	მაგნიტური ველის ინდუქცია და დაძაბულობა	212
	ელექტრომაგნიტური ინდუქცია	219
	მაგნიტური ინდუქციის ნაკადი	220
	ლენცის წესი	220
IV.3.3	ინდუქციური კოჭი (სოლენოიდი)	223
IV.4	ნეიტიერებათა მაგნიტური თვისებები	224
IV.4.1	ცვლადი დენი	228
	ცვლადი დენის გენერატორები	232
V	ბიოელექტრობა და ბიომაგნეტიზმი	237
V.1	ბიოელექტრობა	237
V.1.1	ცოცხალი უჯრედის ელექტრული თვისებები	237

	უჯრედის ელექტრული კომპონენტები	238
	სხეულის წინააღობა	244
V.1.2	ელექტრობის ეფექტი ადამიანის სხეულზე	244
V.2	ქსოვილთა და ორგანოთა ელექტროპოტენციალები (ბიოპოტენციალები), მათი რეგისტრაცია	249
	გულის ელექტრული აქტივობა	250
	ზოგიერთი ელექტროფიზიოლოგიური პარამეტრის რეგისტრაციის მეთოდი	252
	ელექტროკარდიოგრაფია	253
	ელექტროენცეფალოგრაფია	255
V.3	ქსოვილთა და ორგანოთა ელექტროსტიმულაცია	257
V.4	ბიომაგნეტიზმი	259
V.5	დედამიწის მაგნიტური ველი	261
VI	ელექტრომაგნიტური ველი და ელექტრომაგნიტური ტალღები	265
VI.1	ელექტრომაგნიტური ტალღების ძირითადი მახასიათებლები	267
VII	ფოტოელექტრული ეფექტი; ელექტრომაგნიტური გამოსხივების დუალური თვისებები	276
VIII	ატომის და ატომბირთვის სტრუქტურა	281
VIII.1	ატომის სტრუქტურა	281
VIII.2	ატომის თანამედროვე კვანტურ-მექანიკური მოდელი	289
VIII.3	ატომბირთვის სტრუქტურა	300
VIII.4	ურთიერთქმედების სახეები ბუნებაში	308
IX	ელექტრომაგნიტური გამოსხივება	310
IX.1	სხვადასხვა სიხშირის ელექტრომაგნიტური გამოსხივების მოკლე დახასიათება	312
	რადიოტალღები	312
	ინფრაწითელი გამოსხივება.	313
	ხილული სინათლე	314
	ულტრაიისფერი გამოსხივება	325
	რენტგენის (X) სხივები	328
	γ-სხივები	335
IX.2	ოპტიკური კვანტური გენერატორი – ლაზერი	338
IX.3	ფოტობიოლოგიური პროცესები	338
IX.3.1	ლუმინესცენცია	344
	ზოგიერთი უნივერსალური მუდმივების ცხრილი	351
	ერთეულთა სისტემა	352
	ფიზიკურ ერთეულთა სისტემაში გამოყენებული ათის ჯერადი და წილადი ნაწილები	353
	საგნობრივი საბიებელი	354
	გამოყენებული ლიტერატურის სია	357

მეორე გამოცემის რედაქტორისაგან

ერთი მხრივ ნათელია, რომ ჩვენ ირგვლივ არსებულ მოვლენათა შორის სიცოცხლე ყველაზე უფრო ამოუხსნელი რამ არის. მეორე მხრივ, შეიძლება ითქვას, რომ ისეთი დიდი გავლენა კაცობრიობის განვითარების ისტორიაში, არქონია არც ერთ მეცნიერებას, როგორც ეს ფიზიკამ შეძლო. მითიური წარმოდგენებიდან ტექნიკის განვითარების უმაღლეს მწვერვალამდე, ფიზიკამ პასუხი გასცა უამრავ კითხვას. ფიზიკა თავისი მკაცრი კანონებით დგას სიცოცხლის მართვის სათავეებთან, იგი წარმართავს ცოცხალი ორგანიზმის სასიცოცხლო ორგანოების ფუნქციონირებას. დღეისათვის, თანამედროვე მედიცინაში, ძნელად თუ მოიძებნება სფერო, რომელშიც ფიზიკა არ ასრულებს მნიშვნელოვან როლს. თუმცა მისი გამოყენების ფართო სპექტრიდან გამომდინარე, თითქმის შეუძლებელია მისი უკიდვანო საზღვრების დადგენა. ამასთან, XXI-ე საუკუნეში ბუნებაში, მათ შორის ცოცხალ სისტემებში, მოვლენის ასახსნელად აუცილებელია ზუსტი და საბუნებისმეტყველო მეცნიერებების ერთობლივი მიდგომების ჩართვა; დიდი აღმოჩენები კეთდება დისციპლინათაშორის ზღვარზე, როგორებიცაა ფიზიკა-ბიოლოგია, ფიზიკა-ქიმია და სხვა.

ფიზიკურ პრინციპებზე აგებული სადიანოსტიკო და თერაპიული მეთოდები უძველესი დროიდან გამოიყენებოდა მედიცინაში და წარმოადგენს თანამედროვე მედიცინის განვითარების აუცილებელ პირობას. ორგანიზმში ფიზიოლოგიური და პათოლოგიური პროცესების მიმდინარეობისას ფიზიკა მოწოდებულია ლოგიკურად და გასაგებად ახსნას ამ პროცესების განვითარების მექანიზმები, აღმოაჩინოს დარღვევების მიზეზები და დაეხმაროს კორექციის ეფექტური გზების მოძიებაში. ეს ყველაფერი კი შეუძლებელია ცოცხალ ორგანიზმში მიმდინარე პროცესების ფიზიკური საფუძვლების, მათი მარეგულირებელი კანონების ღრმა ცოდნის გარეშე.

სწორედ ამას ემსახურება წინამდებარე სახელმძღვანელო. ის არ განეკუთვნება არც სასკოლო და არც უმაღლესი დონის ფიზიკის სახელმძღვანელოებს, რაც სრულიად გასაგებია, ვინაიდან სამედიცინო დაწესებულების სტუდენტებს ესაჭიროებათ მხოლოდ ცოცხალი სისტემებისათვის დამახასიათებელი პროცესების ფიზიკური საფუძვლების ცოდნა, სამედიცინო დიანოსტიკურ-თერაპიული მეთოდის მუშაობის ფიზიკურ პრინციპებში გარკვევა. ეს ცოდნა კი დაეხმარება პრაქტიკოს მედიკოსებს გამოარჩიოს ერთმანეთისაგან რეალური და არტეფაქტური შედეგები, სწორად დასვას დიაგნოზი, გაერკვიოს პათოლოგიური პროცესის მექანიზმები.

სახელმძღვანელოსათვის დამახასიათებელია თავისებური მიდგომა თითოეული საკითხის განხილვისადმი. კერძოდ, ჯერ არის გადმოცემული ფიზიკური მოვლენის ან კანონის არსი, მოყვანილია მაგალითები და შემდგომ აღწერილია ეს მოვლენა და კანონი მათემატიკური სახით. ასეთი მიდგომა აუცილებლად გაუადვილებს სტუდენტს სწავლის პროცესს, მისცემს მას საშუალებას უფრო ღრმად ჩასწვდეს მოვლენათა არსს, რაც მას გამოადგება, როგორც მომავალ სპეციალისტს.

უდავოა, რომ წარმოდგენილი სახელმძღვანელო დაეხმარება სამედიცინო და ბიოლოგიური ფაკულტეტის სტუდენტებს და ამ დარგში მომუშავე სპეციალისტებს სამედიცინო ფიზიკის დაუფლებაში, ხელს შეუწყობს მოაზროვნე, ჭკვიანი, პროფესიონალი სპეციალისტების აღზრდას.

პროფესორი თამაზ მძინარიშვილი

რეცენზია

სიცოცხლის შემსწავლელ მეცნიერებათა განვითარების თანამედრე ეტაპზე ფიზიოლოგიურ და პათოფიზიოლოგიურ პროცესებში სიდრმისეული გარკვევა მოითხოვს მოლეკულურ დონეზე მიმდინარე რთულად ორგანიზებული და კოორდინირებული ფიზიკური და ფიზიკო-ქიმიური პროცესების ღრმა ცოდნას.

ორგანიზმის ცხოველმყოფელობის ფიზიკური და ფიზიკო-ქიმიური მახასიათებლებისა (ტემპერატურა, წნევა, ელექტრული პოტენციალები, სხვადასხვა ბიოლოგიურ სითხეთა და ქსოვილთა ვისკოზო-ელასტიური თვისებები, სისხლის ნაკადი და სხვა) და მათი ცვლილებების განსაზღვრა ფართოდ გამოიყენება სამედიცინო პრაქტიკაში პათოლოგიათა ობიექტური დიაგნოსტიკების ტრადიციულ მეთოდებში.

სხივური ვიზუალიზაციის მეთოდების განვითარების თანამედროვე ეტაპზე და სამედიცინო პრაქტიკაში მათი დანერგვის თანამედროვე ტემპების ფონზე მომავალი მედიკოსისათვის პრინციპული მნიშვნელობა ენიჭება სხვადასხვა ტიპის ფიზიკური ველებისა და გამოსხივების მატერიალთან ურთიერთქმედების მექანიზმების ღრმა ცოდნას, რომელმაც უნდა უზრუნველყოს ერთის მხრივ, სამედიცინო ვიზუალიზაციის თანამედროვე პრინციპებისა და მეთოდებში გარკვევა, ხოლო მეორეს მხრივ, კი ამ ფიზიკური აგენტების დამაზიანებელი მოქმედების გაგნობიერება.

ბიოლოგიურ და სამედიცინო ფიზიკას, სხვა საბაზისო დისციპლინათა სისტემაში განსაკუთრებული როლი უკავია მომავალი მედიკოსისათვის სპეციფიური - ზუსტი მეცნიერებისათვის დამახასიათებელი აზროვნების ფორმირების თვალსაზრისით, რადგან იგი წარმოადგენს ზუსტი მეცნიერებების დამაკავშირებელ რგოლს სამედიცინო მეცნიერებებთან. ცოდნის ამ სფეროში მათემატიკური ფორმალიზმის ფართო გამოყენებამ მომავალ მედიკოსს უნდა განუვითაროს ისეთი ზოგადი უნარები, როგორიცაა ამოცანის ფორმალიზაცია და პრობლემის იდენტიფიცირება, კლინიკურ-დიაგნოსტიკური პროცედურების დაგეგმვა, მიღებული შედეგების სტრუქტურირება, ანალიზი და სინთეზი.

წინამდებარე სახელმძღვანელოში „სამედიცინო ფიზიკა და ბიოფიზიკა“ (ორ ტომად) განხილულია ცოცხალი ორგანიზმის ცხოველმყოფელობის ფიზიკური საფუძვლები. თავისი მოცულობის, სტრუქტურისა და დეტალიზაციის ხარისხით სახელმძღვანელო სრულიად აკმაყოფილებს სამედიცინო ფიზიკისა და ბიოფიზიკის საბაზისო სწავლების საერთაშორისო სტანდარტს ერთსაფეხურიანი სამედიცინო განათლებს დონეზე. ასევე შეიძლება გამოყენებული იყოს რეზიდენტურისა და დოქტურანტურის საფეხურის მსმენელებისათვის, როგორც დამხმარე ლიტერატურა.

საქართველოს მეცნიერებათა ეროვნული აკადემიის აკადემიკისი

ფრიდონ თუღუა

I ბიოლოგიური თერმოდინამიკა

თერმოდინამიკა – მეცნიერება ენერგიის გარდაქმნის შესახებ. ცოცხალი ორგანიზმის არსებობა, მასში მიმდინარე ცხოველქმედების პროცესები მკიდრდება დაკავშირებული ენერგიის გარდაქმნასთან, ენერგეტიკული ბალანსის ცვლილებებთან. თერმოდინამიკა არ იძლევა ინფორმაციას მოვლენების ბუნებისა და განვითარების მექანიზმების შესახებ. თერმოდინამიკის საგანია – ენერგიის გარდაქმნები ამა თუ იმ პროცესის ენერგეტიკული უზრუნველყოფის შესაბამისად.

უპირველესად განვიხილოთ თერმოდინამიკის ზოგიერთი ცნება და კანონი.

სისტემა – გარემომცველი არისაგან შემოსაზღვრული მატერიალური ობიექტების ერთობლიობა.

გარემომცველ არესთან ურთიერთქმედების მიხედვით თერმოდინამიკური სისტემა იყოფა 3 ტიპად: იზოლირებულ, ჩაკეტილ და ღია სისტემად.

- **იზოლირებულ სისტემაში** გარემომცველ არესთან ნივთიერებისა და ენერგიის გაცვლა არ ხდება.

- **ჩაკეტილ სისტემაში** გარემომცველ არესთან ხორციელდება მხოლოდ ენერგიის გაცვლა (და არა ნივთიერების).

- **ღია სისტემაში** მუდმივად მიმდინარეობს ნივთიერებისა და ენერგიის გაცვლა გარემომცველ არესთან.

ცოცხალი ორგანიზმი ღია თერმოდინამიკურ სისტემას მიეკუთვნება.

ენერგია – ეს არის მატერიის განსაზღვრული სახის მოძრაობის ზომა მისი ერთი ფორმიდან მეორეში გადასვლის დროს. როგორც მატერიის მოძრაობის მაჩასიათებელი, ენერგია ყოველთვის განსაზღვრავს სისტემის უნარიანობას, შეასრულოს მუშაობა. განსახვედრებენ ენერგიის რაიმეცნებ ტიპს:

მექანიკური ენერგია – ენერგიის ფორმა, რომელიც ასახავს მაკროსხეულების ურთიერთქმედებას, მოძრაობას და მათ უნარიანობას, შეასრულონ მუშაობა გადაადგილების დროს. მექანიკური ენერგია იყოფა კინეტიკურ (განისაზღვრება სხეულის მოძრაობის სიქარით) და პოტენციურ ენერგიად (განისაზღვრება მაკროსხეულების, ან მათი ნაწილების ურთიერთმდებარეობით).

სითბური ენერგია - ნივთიერების ატომთა და მოლეკულების სითბური ქაოსური მოძრაობის ენერგიების ჯამია. ნაწილაკების სითბური მოძრაობის მანევრებელი ტემპერატურაა. ერთატომიანი მოლეკულების საშუალო კინეტიკური ენერგია E_j განისაზღვრება ფორმულით :

$$E_j = \frac{3}{2} k T, \quad (1.1)$$

სადაც $k = 1,380 \times 10^{-23} \frac{J}{K}$ – ბოლცმანის მუდმივაა, T - აბსოლუტური ტემპერატურა (ტემპერატურა კელვინის სკალით)*.

ქიმიური ენერგია – ატომებისა და მოლეკულების ურთიერთქმედების ენერგია; რეალურად ეს არის ატომებისა და მოლეკულების გარეგან ორბიტალებზე მოძრავე ელექტრონების ენერგია.

ელექტრული ენერგია – ელექტრულად დამუხტული ნაწილაკების ურთიერთქმედების ენერგიაა, რომელიც იწვევს მათ მოძრაობას ელექტრულ ველში.

*აბსოლუტური ტემპერატურის ცნება შემოღებულია ვილიამ ტომპსონის – ლორდ კელვინის მიერ; $0^{\circ}K = -273,15^{\circ}C$.

ცოცხალ ორგანიზმში ენერგიის გარდაქმნა ხორციელდება ამ ოთხი ტიპის ენერგიის საზღვრებში.

სისტემის შინაგანი ენერგია – ამ სისტემის ყველა სახის ენერგიის (მექანიკური, სითბურის, ქიმიურის, ელექტრულის და სხვ.) ჯამი.

მუშაობა – ეს არის ენერგიის ერთი სახიდან მეორეში გარდაქმნის ზომა. თერმოდინამიკა ეფუძნება ორ ძირითად კანონს.

თერმოდინამიკის I კანონი

თერმოდინამიკის I კანონი ფორმულირებულ იქნა კაცობრიობის მრავალწლიანი გამოცდილების საფუძველზე. ის მდგომარეობს შემდეგში:

მატერიალური სისტემის სრული ენერგია მუდმივი რჩება ამ სისტემაში განვითარებული ცვლილებების მიუხედავად. სისტემის ენერგიის შეცვლა შესაძლებელია მხოლოდ გარემომცველ არესთან ენერგიის გაცვლის შემთხვევაში.

მაშასადამე, თერმოდინამიკის I კანონი წარმოადგენს ენერგიის შენახვის კანონის (რომლის მიხედვით ენერგია არც იკარგება და არც ჩნდება, მხოლოდ ეკვივალენტური რაოდენობით გადადის ერთი ფორმიდან მეორეში) რაოდენობრივ გამოსახულებას.

თუ სისტემასა და გარემომცველ არეს შორის ენერგია გაიცვალა და შესრულდა მუშაობა, სისტემის შინაგანი ენერგიის ცვლილება ΔU განისაზღვრება ფორმულით:

$$\Delta U = \Delta Q + \Delta A, (1.2)$$

სადაც ΔQ – გადაცემული სითბოს რაოდენობა, ΔA – შესრულებული მუშაობა.

განტოლება (1.2) თერმოდინამიკის I კანონის მათემატიკური გამოსახულებაა: **სისტემის შინაგანი ენერგიის ცვლილება გადაცემული სითბოსა და შესრულებული მუშაობის ჯამის ტოლია.**

ცოცხალ ორგანიზმებში სრულდება სხვადასხვა სახის **მუშაობა** – **ქიმიური, მექანიკური, ოსმოსური და ელექტრული.**

ქიმიური მუშაობა სრულდება სხვადასხვა სახის მაღალმოლეკულური ნივთიერების სინთეზის (დაბალმოლეკულური ნივთიერებებიდან) და სხვადასხვა ქიმიური რეაქციის მიმდინარეობის დროს. მაღალმოლეკულური ნაერთების (ცილების, ნუკლეინური მჟავების, პოლისაქარიდების) სინთეზი ჩვეულებრივად დიდი რაოდენობით ენერგიის დახარჯვას მოითხოვს და ამიტომ ეს პროცესი შეიძლება ჩაითვალოს, როგორც მუშაობის შესრულება.

მექანიკური მუშაობა სრულდება მექანიკური ძალების საწინააღმდეგოდ სხეულის კომპონენტების გადაადგილების დროს. მუშაობა სრულდება, მაგალითად, კუნთების მიერ მათი შეკუმშვის დროს.

ოსმოსური მუშაობა სრულდება მემბრანის (ან მემბრანების) გავლით სხვადასხვა ნივთიერების გადატანისას დაბალი კონცენტრაციის არიდან მაღალი კონცენტრაციის არეში. გადატანა ხორციელდება სპეციფიკური მექანიზმების საშუალებით გრადიენტის საწინააღმდეგოდ და მოითხოვს ენერგიის დახარჯვას.

ელექტრული მუშაობა სრულდება დამუხტული ნაწილაკების (იონების) ელექტრულ ველში გადატანით განსხვავებული პოტენციალის წერტილებში და ელექტრული დენის გავლის დროს.

ორგანიზმში ელექტრული მუშაობა სრულდება უჯრედებში ბიოპოტენციალების გენერაციისა და გაღიზიანების გავრცელების დროს. ეს მუშაობა

განსაკუთრებით მაღალ მნიშვნელობას აღწევს იმ ცხოველებში, რომლებსაც გააჩნიათ ელექტრული ორგანო, რომლის საშუალებით ისინი იგერიებენ თავდასხმელებს და ამარცხებენ მსხვერპლს. მაგალითად, გველთევზა ($U = 1399$, $I = 1$), ელექტრული ლოქო ($U = 350 - 450$, $I = 0,5$) და *Torpediniformes* ($U = 220$, $I = 30$). ცოცხალი ორგანიზმების ყველა ქსოვილი გამოასხივებს სუსტ, დაბალი სიხშირის ელექტრომაგნიტურ ტალღებს, რომელთა რეგისტრაცია შესაძლებელია მგრძნობიარე ხელსაწყოების საშუალებით; თბილსისხლიანების მთელი ორგანიზმი გამოასხივებს ინფრაწითელ ელექტრომაგნიტურ ტალღებს. ზოგიერთ ცხოველს გააჩნია სიბნელეში ნათების (ხილული სიხშირის ელექტრომაგნიტური ტალღების გამოსხივების) უნარი. ბიოლოგიური ობიექტების ნათება ხორციელდება უჯრედების ქიმიური ენერგიის ხარჯზე.

ცოცხალ ორგანიზმში ყველა ტიპის მუშაობისთვის პირველადი ენერგიის წყაროს საკვები ნივთიერებების (ცილების, ცხიმების, ნახშირწყლების) დაუანგვის დროს გამოიყოფილი ქიმიური ენერგია წარმოადგენს. მაგრამ ეს ენერგია არ გამოიყენება ორგანიზმის მიერ პირდაპირ, არამედ ტრანსფორმირდება სხვა-დასხვა ნივთიერების მაკროერგულ ბმებში, რომელთა შორის ადენოზინ-ტრიფოსფორმევა (ATP) უმნიშვნელოვანესია. შემდეგ ATP დიფუნდირებს უჯრედის შესაბამის უბანში (კომპარტამენტში), სადაც მისი ენერგია მუშაობის შესასრულებლად საჭიროებისამებრ გამოიყენება.

ATP-ის ენერგიის ხარჯზე ხორციელდება კენტების შეკუმშვა, აქტიური ტრანსპორტი (ნივთიერებათა გადატანა მემბრანაში გრადიენტის საწინააღმდეგოდ), ნივთიერებათა სინთეზი (საწყისი და შუალედური სუბსტრატების ფოსფორილირება). მართალია, უჯრედის ელექტრული მუშაობა და პასიური ტრანსპორტის სხვადასხვა ტიპი სრულდება უჯრედული გრადიენტების ენერგიის რეალიზაციის ხარჯზე, მაგრამ თვით გრადიენტების წარმოქმნას ესაჭიროება ნივთიერებების აქტიური გადატანა, რომელიც მიმდინარეობს ATP-ის ენერგიის გამოყენებით.

ცოცხალ ორგანიზმში მთელი სიცოცხლის განმავლობაში მიმდინარეობს სითბური ენერგიის (სითბოს) წარმოქმნა. არჩევენ პირველადი და მეორეული სითბოს წარმოქმნის პროცესებს. პირველადი სითბოს წარმოქმნა - ენერგიის გაფანტვა ნივთიერებათა ცვლის დროს (ბიოქიმიური პროცესების შეუქცევადობის* გამო). ანუ ორგანიზმში მიმდინარე პროცესების მარტივ ქმედების კოეფიციენტი 100%-ზე ნაკლებია.

სასარგებლო მუშაობა, რომელიც სრულდება ორგანიზმში, საბოლოოდ ასევე გარდაიქმნება სითბოდ. მაგალითად, ენერგია, რომელსაც იყენებს გული, სისხლძარღვებში სისხლის მიმოქცევისთვის (მეჰანიკური მუშაობის შესრულებისთვის) იხარჯება სისხლძარღვებში ხახუნის გადალახვაზე და გამოიყოფა სითბოს სახით. სხეულში ელექტრული დენის გავლის დროს ელექტრული ენერგია იხარჯება ქსოვილების ელექტრული წინააღობის გადალახვაზე და გარდაიქმნება სითბოდ (ხშირ შემთხვევაში სითბოს რაოდენობა იმდენად დიდია, რომ იწვევს ქსოვილების დამწვრობას). ეს პროცესები - მეორეული სითბოს წარმოქმნის პროცესებია. მეორეული სითბოს უდიდესი ნაწილი წარმოიქმნება კენტების კუმშვითი აქტივობის დროს. მეორეული სითბოს წარმოქმნა ქსოვილების აქტივობის პროპორციულია.

*პროცესების შეუქცევადობაში ეგულისხმობთ იმ გარემოებას, რომ მუშაობის შესრულების დროს მთელი ენერგია არ ხმარდება მუშაობის შესრულებას, ენერგიის ნაწილი შეუქცევადად იფანტება გარემოში სითბოს სახით.

მაშასადამე, პირველადი სითბოს წარმოქმნა – ენერგიის უშუალო გაფანტვის შედეგია; მეორეული სითბოს წარმოქმნა – მუშაობის შესრულებისთვის გამოყენებული ენერგიის ნაწილის სითბოდ გარდაქმნის შედეგია. ვინაიდან ცოცხალ ორგანიზმში მუდამ სრულდება სხვადასხვა სახის მუშაობა, მუდამ მიმდინარეობს პირველადი და მეორეული სითბოს წარმოქმნა.

ზემოთქმულიდან გამომდინარეობს, რომ ორგანიზმში მოქმედებს არა სითბური, არამედ ქიმიური (ქიმიურ-მექანიკური, ქიმიურ-ელექტრული, ქიმიურ-ოსმოსური) მანქანის მსგავსად.

მუშაობის დროს გამოყოფილი ენერგია (მეორეული სითბო) წარმოადგენს დამატებით „დანაკარგს“ (მანქანის ნაწილების ხახუნის შედეგად გამოყოფილი სითბოს მსგავსად). მაგრამ ცოცხალ ორგანიზმში ეს სითბო არ არის უსარგებლო – ის ხმარდება სხეულის ტემპერატურის მუდმივობის შენარჩუნებას, რაც განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია თბილისის ხლიდან ცხოველებში ბიოქიმიური რეაქციების ოპტიმალურ პირობებში მიმდინარეობისთვის.

ჩვენსავებში, რომ თუ ორგანიზმში ასრულებს ფიზიკურ მუშაობას, მუშაობის დროს დახარჯული ენერგიის ნაწილი სითბოს სახით გადაეცემა გარემოს (პირველადი სითბო), ხოლო ნაწილი გარდაიქმნება ორგანიზმის სითბურ ენერგიად (მეორეული სითბო).¹

ცოცხალ ორგანიზმებში თერმოდინამიკის კანონების დადგენის პირველი მცდელობა იყო ჯერ კიდევ XVIII საუკუნეში ლაფუაზის და ლაპლასის მიერ. მრავალი კვლევის შედეგად დამტკიცდა, რომ ცოცხალი ორგანიზმში არ წარმოადგენს ენერგიის ახალ წყაროს, არამედ იყენებს საკვები ნივთიერებების (ცილების, ცხიმების, ნახშირწყლების) დაჟანგვის დროს გამოყოფილ ქიმიურ ენერგიას. დაგროვებულს ATP-ის მაკროერგულ ბმებში. აქედან გამომდინარე, *თერმოდინამიკის I კანონის ფორმულირება შესაძლებელია შემდეგნაირადაც:*

ორგანიზმში მუშაობის ყველა სახე სრულდება ეკვივალენტური ენერგიის ხარჯზე, რომელიც გამოიყოფა საკვები ნივთიერებების დაჟანგვის დროს.

თერმოდინამიკის პირველი კანონიდან გამომდინარეობს *პეისის კანონი*, რომლის მიხედვითაც *შუალედურ სტადიებზე მიმდინარე რიგი ქიმიური პროცესის სითბური ეფექტები განისაზღვრება მხოლოდ სისტემის საწყისი და საბოლოო მდგომარეობით და არ არის დამოკიდებული დამატებითი გარდაქმნების შუალედურ ეტაპებზე.*

ცოცხალ ორგანიზმში მიმდინარე ბიოქიმიური რეაქციები საკმაოდ რთულია, მიმდინარეობს მრავალი შუალედური სტადიის გაყვლით. მაგრამ პეისის კანონის საფუძველზე, რთული ბიოქიმიური რეაქციის საწყისი და საბოლოო პროდუქტების ცოდნის შემთხვევაში, შესაძლებელი ხდება ამ რეაქციების სითბური ეფექტის გამოთვლა. პეისის კანონი გამოიყენება საკვები ნივთიერებების კალორიულობის გამოსათვლელად.

ცოცხალ სისტემებს (ორგანიზმებს) ფუნქციონირებისთვის ესაჭიროება ენერგია. მოსვენების მდგომარეობაშიც სხეულს ხარჯავს ენერგიას სასიცოცხლო ფუნქციების (სისხლის მიმოქცევის, ენერგიის მოხმარების, უჯრედების ზრდის და პროლიფერაციისთვის და ა. შ.) შენარჩუნებისთვის. ფიზიკური აქტივობის პირობებში საჭირო ენერგიის რაოდენობა იზრდება. ცოცხალი ორგანიზმის (ადამიანის) მიერ მოხმარებული ენერგიის რაოდენობა დამოკიდებულია მის წონასა და სხეულის აგებულებაზე. დადგენილია, რომ ენერგიის რაოდენობა, რომელსაც ხარჯავს ორგანიზმში სხვადასხვა სახის ფიზიკური აქტივობის დროს, მისი სხეულის ზედაპირის ფართობის პროპორციულია. აქედან გამომდინარე, ენერგიის მოხმარება, ჩვეულებრივ, აისახება *მეტაბოლური აქტივობის* ერთეულებში ($\frac{\text{კალ}}{\text{სთ}}$, ან SI სისტემაში $\frac{\text{ჯ}}{\text{წმ}^2}$). *მეტაბოლური აქტივობის* ენერგია ადამიანის სხეულის სხვადასხვა ფიზიკური აქტივობის დროს მოყვანილია ცხრილში 1.

ადამიანის სხეულის ზედაპირის ფართობის გამოანგარიშებისთვის გამოიყენება ფორმულა:

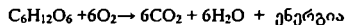
$$\text{სხეულის ფართობი (მ}^2\text{)} = 0,202 \times W^{0,425} \times H^{0,725},$$

სადაც W – ადამიანის სხეულის წონაა კგ-ში და H – მისი სიმაღლე მეტრებში.

70 კგ წონის და 1,55 მ სიმაღლის ადამიანის სხეულის ზედაპირის ფართობი დაახლოებით, 1,70 მ²-ა, შესაბამისად, მისი მეტაბოლური აქტივობა მოსვენების მდგომარეობაში $40 \frac{\text{კალ}}{\text{სთ}} \times 1,70 \text{ მ}^2$

= 68 კალაქს. ეს მეტაბოლური აქტიუობა ცნობილია **ბაზალური მეტაბოლური აქტიუობის** სახელწოდებით.

როგორც ვიცით, ქიმიური ენერგია წარმოიქმნება ცხოველების ორგანიზმში საკვები ნივთიერებების მოლეკულებისგან. ასე, მაგალითად, 1 გრამი გლუკოზის დაჟანგვის დროს გამოიყოფა 3,81 კალ:



სხვადასხვა საკვები პროდუქტის კალორიულობა განსხვავებულია. მაგალითად, ნახშირ-წყლები და ცილები გამოყოფს დაახლოებით 4 $\frac{\text{კალ}}{\text{გ}}$ -ს, ლიპიდები – 9 $\frac{\text{კალ}}{\text{გ}}$ -ს, ხოლო ალკოჰოლის დაჟანგვისას გამოიყოფა 7 $\frac{\text{კალ}}{\text{გ}}$. საინტერესოა, რომ ალკოჰოლის მაღალი კალორიულობა, წარმოქმნის პრობლემას მსმელი ადამიანებისათვის, ეინაიდან მათი ორგანიზმი მოიხმარს ძირითადად ალკოჰოლის დაჟანგვის შედეგად წარმოქმნილ ენერგიას, ისინი არ იღებენ საკვებ პროდუქტებს საჭირო რაოდენობით. შედეგად მათ უეითარდებათ ეიტამინების, მინერალების და სხვა ნორმალური მეტაბოლიზმისთვის საჭირო ნაერთების ნაკლებობა.

ცხრილი 1

ადამიანის მეტაბოლური აქტიუობის ენერგია სხვადასხვა ფიზიკური დატვირთვის დროს
(Paul Davidovich "Physics in Biology and Medicine", third edition, 2007)

აქტიუობა	მეტაბოლიზმის დონე ($\frac{\text{კალ}}{\text{სთ.გ}}$)
ძილის მდგომარეობა	35
სხეულის პოზიონტალური მდგომარეობა	40
დამჯდარი მდგომარეობა	50
ყეხზე დგომა	60
წელი სიარული	140
საშუალო ინტენსიუობის ფიზიკური მუშაობა	150
ველოსიპედით მოძრაობა	250
სირბილი	600
კანკალი	250

თერმოდინამიკის II კანონი

თერმოდინამიკის II კანონი მდგომარეობს იმაში, რომ **ენერგიის გარდაქმნის ყველა პროცესს თან ახლავს ენერგიის გაფანტვა**

ენერგიის გაფანტვა სითბოს **Q** სახით გარდაუვალია; ეს სითბო შემდგომში არ შეიძლება გამოყენებულ იქნეს მუშაობის შესრულებისთვის. ცოცხალ ორგანიზმში ენერგიის (მექანიკური, ქიმიური, ელექტრული, ოსმოსური) ნაწილი გარდაიქმნება სითბოდ და გამოიყოფა ორგანიზმიდან.

ენერგიის გაფანტვა სითბოს სახით განპირობებულია იმ გარემოებით, რომ სითბურ ენერგიას არ შეუძლია მთლიანად გარდაიქმნას სხვა სახის ენერგიად (ეინაიდან ეს არის მიკრონაწილაკების ქაოსური მოძრაობის ენერგია), იმ დროს, როცა ენერგიის სხვა სახეებს შეუძლია მთლიანად სითბოდ გარდაქმნა. თუ სისტემაში სრულდება მუშაობა, მისი საწყის მდგომარეობაში დაბრუნებისთვის აუცილებელია დამატებითი ენერგიის დახარჯვა, რადგან საწყისი ენერგიის ნაწილი შეუქცევადად გარდაიქმნა სითბოდ.

ზემოთქმულის გათვალისწინებით, თერმოდინამიკური პროცესები იყოფა **შექცევად** და **შეუქცევად** პროცესებად.

თერმოდინამიკური პროცესი შექცევადია, თუ სისტემის საწყის მდგომარეობაში გადასვლას არ სჭირდება გარედან დამატებითი ენერგიის შემოტანა. შექცევადი პროცესის დროს სისტემის საწყის მდგომარეობაში დაბრუნება

ხორციელდება გარემომცველ არეში რაიმე ცვლილებების გარეშე, თუმცა ასეთი პროცესები შეუძლებელია რეალურად არსებობდეს.

თერმოდინამიკური პროცესი შეუქცევადია, თუ სისტემის საწყის მდგომარეობაში დაბრუნება დაკავშირებულია გარედან ენერგიის შემოტანის აუცილებლობასთან.

მაშასადამე, შექცევადი პროცესები მიმდინარეობს სისტემის ენერგიის სითბოდ გარდაქმნის (გაფანტვის) გარეშე, ხოლო შეუქცევადი პროცესებისთვის დამახასიათებელია ენერგიის გაფანტვა სითბოს სახით. რაც უფრო დიდი ენერგიის რაოდენობა გადადის სითბოში, მით უფრო დიდია პროცესის შეუქცევადობის ხარისხი.

ბუნებაში არ არსებობს მკაცრად შექცევადი პროცესები (ვინაიდან არ შეიძლება უგულვებელყოთ ისეთი მოვლენები, როგორიცაა ხახუნი და ა.შ.).*

თერმოდინამიკური პროცესების მიმდინარეობის შესაძლებლობა, მათი მიმართულება და საზღვრები ხასიათდება ისეთი პარამეტრებით, როგორებიცაა *ენტროპია* და *თავისუფალი ენერგია*.

ენტროპია (S) – შექცევადი იზოთერმული (მუდმივი ტემპერატურის პირობებში მიმდინარე) პროცესის დროს წარმოქმნილი სითბოს რაოდენობის (Q) შეფარდება აბსოლუტურ ტემპერატურასთან (T), რომელზეც სრულდება პროცესი:

$$S = \frac{Q}{T},$$

ან, თუ ვიგულისხმებთ ენტროპიის ცვლილებებს:

$$\Delta S = \frac{\Delta Q}{T}. \quad (1.3)$$

აქედან, $\Delta Q = T \Delta S$. თუ ჩავსვამთ ΔQ –ს მნიშვნელობას თერმოდინამიკის I კანონის გამოსახულებაში (1.2), მივიღებთ:

$$\Delta U = A + T \Delta S,$$

სადაც A – შესრულებული მუშაობაა, მას უწოდებენ *თავისუფალი ენერგიის ცვლილებას* (ΔF).

მაშინ:

$$\Delta U = \Delta F + T \Delta S \quad (1.4)$$

$$\text{ან } U = F + TS$$

სისტემის *შინაგანი ენერგია* U თავისუფალი ენერგიისა (F) და ბმული ენერგიის TS ჯამის ტოლია.

*უნდა აღინიშნოს, რომ შექცევადობის თერმოდინამიკური კრიტერიუმი განსხვავდება ბიოქიმიურისაგან. ბიოქიმიკაში შექცევადი პროცესი – პროცესია, რომელიც ვითარდება უკუმიმართულებით, იმის მოუხედავად, რომ სისტემის საწყის მდგომარეობაში გადასვლა დაკავშირებულია ენერგიის არაკომპენსირებულ დანაკარგებთან.

თავისუფალი ენერგია არ წარმოადგენს ენერგიის სპეციფიკურ ფორმას. თავისუფალი ენერგია სისტემის შინაგანი ენერგიის ის ნაწილია, რომელიც შეიძლება დაიხარჯოს მუშაობის შესასრულებლად.

ბმული ენერგია – შინაგანი ენერგიის ის ნაწილია, რომელიც არ გამოიყენება მუშაობის შესრულებისთვის და იფანტება სითბოს სახით.

ბმული ენერგია **TS** განისაზღვრება ენტროპიით, თუ პროცესი მიმდინარეობს მუდმივი ტემპერატურის პირობებში (იზოთერმული). რაც უფრო დიდია ენტროპია, მით უფრო დიდია ბმული ენერგიის რაოდენობა. ხოლო რაც მეტია სისტემის ბმული ენერგია, მით უფრო ინტენსიურია ენერგიის გაფანტვა სითბოს სახით და მით უფრო მაღალია პროცესის შეუქცევადობის ხარისხი. მაშასადამე, **ენტროპია** - ენერგიის გაფანტვის, დეგრადაციის, ანუ პროცესის შეუქცევადობის ზომაა. თუ სისტემაში სრულდება მუშაობა, ეს მუშაობა სრულდება თავისუფალი ენერგიის ხარჯზე და პროცესის შექცევადობის შემთხვევაში თავისუფალი ენერგიის ცვლილების ტოლია:

$$A = \Delta F = \Delta U$$

შეუქცევადი პროცესის შემთხვევაში შესრულებული მუშაობა თავისუფალი ენერგიის ცვლილებაზე (სითბოდ გაფანტვის გამო) ნაკლებია ($A < \Delta F$).

თერმოდინამიკის II კანონი ახდენს ზემოთ გამოთქმული მოსაზრების განსოგადებას. ის გულისხმობს, რომ იზოლირებულ სისტემაში ნებისმიერი პროცესი, მისი შეუქცევადობის შემთხვევაში, იწვევს თავისუფალი ენერგიის შემცირებას; თუ პროცესი შექცევადია, სისტემის თავისუფალი ენერგია არ იცვლება. მაშასადამე, სისტემის თავისუფალი ენერგია ან რჩება მუდმივი, ან მას გააჩნია ტენდენცია შემცირებისაკენ; თავისუფალი ენერგია იზრდება მხოლოდ სისტემაში გარეგანი ენერგიის შემოსვლის შემთხვევაში.

იზოლირებულ სისტემაში შეუქცევადი პროცესების მიმდინარეობის დროს თავისუფალი ენერგია მცირდება; ამ დროს, შესაბამისად, ბმული ენერგია იზრდება, ხოლო ჯამური ენერგია არ იცვლება. აღნიშნული შესაბამისობაშია თერმოდინამიკის I კანონთან. ვინაიდან ბმული ენერგიის ზომა – **S** ენტროპიაა, შეუქცევადი პროცესების დროს სისტემის ენტროპია იზრდება ($\Delta S > 0$).

- **თერმოდინამიკის II კანონი** მათემატიკურად შეიძლება გამოვსახოთ შემდეგნაირად:

$$\Delta S = \frac{\Delta Q}{T} \geq 0$$

ანუ ენტროპიის ცვლილება სისტემაში ყოველთვის დადებითია (ნულის ტოლია შექცევადი პროცესების დროს, ნულზე მეტია შეუქცევადი პროცესების დროს). მაშასადამე, ბუნებაში პროცესები მიმდინარეობს თავისუფალი ენერგიის შემცირების და ენტროპიის ზრდის მიმართულებით.

სისტემაში ენერგიის გარდაქმნის პროცესი გაგრძელდება მანამდე, სანამ თავისუფალი ენერგია არ გაუტოლდება ნულს, ხოლო ენტროპია – თავის მაქსიმალურ მნიშვნელობას. სისტემის მდგომარეობას, როდესაც თავისუფალი ენერგიის რაოდენობა ნულის ტოლია, ხოლო ენტროპია მაქსიმალური, **თერმოდინამიკურ წონასწორობას უწოდებენ**. თერმოდინამიკური წონასწორობის პირობებში სისტემას არ შეუძლია მუშაობის შესრულება. ამ მდგომარეობიდან სისტემა თავისთავად ვერ გამოვა, მას ესაჭიროება გარეგანი ენერგიის ნაკადი.

არაცოცხალ ბუნებაში ყველა პროცესი მიისწრაფის თერმოდინამიკური წონასწორობისაკენ.

ენტროპია (ენერგიის გაფანტვის ზომა) ასრულებს, აგრეთვე, სისტემის ამა თუ იმ მდგომარეობაში ყოფნის ალბათობის (სტატისტიკური ზომის) როლს.

თერმოდინამიკის II კანონის თანახმად, თავისთავადი შეუქცევადი პროცესები იწვევს სისტემის ენტროპიის ზრდას, ხოლო ენტროპიის მომატება – სისტემის მოცემულ მდგომარეობაში ყოფნის თერმოდინამიკური (და მათემატიკური) ალბათობის ზრდას ნიშნავს. მაშასადამე, სპონტანური პროცესები უზრუნველყოფს სისტემის ყველაზე მაღალი ალბათობის მქონე მდგომარეობაში გადასვლას, რომლის ენტროპია მაქსიმალურია. ასე მაგალითად, აირების, ან წყალში გახსნილი ნაწილაკების შემთხვევაში ყველაზე მაღალი ალბათობა გააჩნია ნაწილაკების (ან აირების) მოლეკულების უწყსრივო თანაბარ განაწილებას, რაც ენტროპიის მაქსიმალურ მნიშვნელობას შეესაბამება. მეორე მხრივ, რაც უფრო დიდია მოცემული მდგომარეობის თერმოდინამიკური ალბათობა, მით უფრო მეტია ამ მდგომარეობის მიღწევის შესაძლებლობების რაოდენობა და მით უფრო მოუწესრიგებელია ეს მდგომარეობა. მაშინ, თერმოდინამიკის II კანონის თანახმად, სისტემის შეუძლია თავისთავად გადასვლა მეტად მოწესრიგებული მდგომარეობიდან ნაკლებად მოწესრიგებულში. საპირისპირო მიმართულებით გადასვლისთვის აუცილებელია ენერგიის გარედან მიწოდება. დაეუშვათ, გვაქვს აირით გასვებული დახურული სიერცი, რომელშიც გამოყოფილია ამ აირის განსხვავებული კონცენტრაციის შემცველი ორი მოცულობა (არე). რამდენიმე ხანში თავისთავადი პროცესის, დიფუზიის, შედეგად, სისტემა გადავა ნაკლებად მოწესრიგებულ და მეტი ალბათობის მქონე მდგომარეობაში, რომლის დროსაც აირის მოლეკულები თანაბრად განაწილდება სიერცის მთელ მოცულობაში.

როგორც აღენიშნეთ, სისტემა ასრულებს მუშაობას თავისუფალი ენერგიის ხარჯზე. შეუქცევადი პროცესის დროს თავისუფალი ენერგიის ნაწილი იფანტება სითბოს სახით, და შესრულებული მუშაობა ყოველთვის ნაკლებია, ვიდრე ამ მუშაობის შესრულებისთვის დახარჯული თავისუფალი ენერგიის რაოდენობა. ამ შემთხვევაში სისტემის მარგი ქმედების კოეფიციენტი η (შესრულებული მუშაობისა და დახარჯული თავისუფალი ენერგიის შეფარდება); ერთზე ნაკლებია:

$$\eta = \frac{A}{\Delta F} < 1$$

თერმოდინამიკის II კანონის თანახმად, შექცევადი პროცესებისათვის **მარგი ქმედების კოეფიციენტი η** ერთის ტოლია, ხოლო შეუქცევადი პროცესებისთვის – ერთზე ნაკლებია.

ცოცხალ სისტემებში მიმდინარე ბიოფიზიკური და ბიოქიმიური პროცესები თერმოდინამიკური თვალსაზრისით შეუქცევადია, მათი მარგი ქმედების კოეფიციენტი η ერთზე ნაკლებია. ცოცხალ ორგანიზმში მუშაობის შესრულების დროს ენერგიის ნაწილი გარდაიქმნება სითბოს სახით. ცხრილში 2 მოცემულია მარგი ქმედების კოეფიციენტის η მნიშვნელობები სხვადასხვა ბიოლოგიური პროცესისთვის.

ყველა ცოცხალი უჯრედისათვის დამახასიათებელია კონცენტრაციული, ოსმოსური და ელექტრული გრადიენტის არსებობა, რომლებიც წარმოიქმნება ნივთიერებათა აქტიური ტრანსპორტის მექანიზმების საშუალებით. ნებისმიერ

თერმოდინამიკურ სისტემას შეუძლია მუშაობის შესრულება მხოლოდ გრადიენტების არსებობის პირობებში; სისტემაში მუშაობის შესრულება ყოველთვის დაკავშირებულია რაიმე გრადიენტის ენერგიის რეალიზაციასთან. მაგალითად, მოქმედების პოტენციალის გენერაცია დაკავშირებულია ნატრიუმის და კალიუმის გრადიენტების ენერგიის რეალიზაციასთან. პირველ მომენტში ნატრიუმის იონების დიფუზიის ინიციაცია იწვევს მემბრანის დეპოლარიზაციას და მისი ზედაპირული მუხტის ინვერსიას, შემდეგ კალიუმის იონის საპირისპირო მიმართულებით დიფუზიის ხარჯზე მემბრანული პოტენციალი უბრუნდება საწყის მნიშვნელობას. აგზნების გავრცელება უჯრედში ხორციელდება კონცენტრაციული და ელექტრული გრადიენტების ხარჯზე. ოსმოსური გრადიენტის არსებობისას ვითარდება ოსმოსი – გამხსნელის მოლეკულების გადასვლას გახსნელი ნივთიერების მაღალი კონცენტრაციის არეში.

ცხრილი 2

მარგი ქმედების კოეფიციენტის η მნიშვნელობები სხვადასხვა ბიოლოგიური პროცესისთვის.

ბიოლოგიური პროცესი	η %
გლიკოლიზი	36
ჟანგვითი ფოსფორილირება	55
ფოტოსინთეზი	75
კუნთების შეკუმშვა	40
ბაქტერიების ნათება	96-მდე

თუ მუშაობა შესრულდა, გრადიენტის (ენერგიის) სიდიდე მცირდება და წარმოიქმნება საპირისპირო მიმართულების ახალი გრადიენტი. მაგალითად, კალიუმის კონცენტრაციული გრადიენტის ხარჯზე ხორციელდება მისი დიფუზია ციტოპლაზმიდან უჯრედშორის სითხეში. ამ დროს წარმოიქმნება საპირისპირო მიმართულების ელექტრული გრადიენტი (მემბრანული პოტენციალთა სხვაობა). თუ სისტემაში პროცესები შექცევადია, წარმოიქმნება გრადიენტის სიდიდე მისი გამომწვევი გრადიენტის ტოლფასია. შეუქცევადი პროცესების დროს წარმოიქმნება გრადიენტის სიდიდე საწყისზე უფრო დაბალია, რაც სისტემის თავისუფალი ენერგიის შემცირების და ენტროპიის ზრდაზე მეტყველებს. სისტემის საერთო თერმოდინამიკური გრადიენტი, რომელიც მის მუშაობის უნარიანობას განსაზღვრავს, ამ შემთხვევაში მცირდება. ვინაიდან ყველა რეალური პროცესი შეუქცევადია, თერმოდინამიკის II კანონის თანახმად, იზოლირებულ სისტემაში ყველა პროცესი მიმართულია გრადიენტის შემცირებისკენ. ასეთი პროცესების მაგალითებია: ნივთიერების დიფუზია მაღალი კონცენტრაციის არიდან დაბალი კონცენტრაციის არეში, სითბოს გადაცემა ცხელი სხეულიდან უფრო ცივი სხეულისთვის და ა. შ. თერმოდინამიკური წონასწორობის მდგომარეობაში სისტემაში თერმოდინამიკური პარამეტრების გრადიენტები არ არსებობს. უჯრედების კედლის პროცესში მისი გრადიენტები მცირდება, მკედარ უჯრედებში გრადიენტები ნულის ტოლია.

ცოცხალ ორგანიზმში მუდამ ხორციელდება პროცესები როგორც გრადიენტის მიმართულებით (პასიური ტრანსპორტი), ასევე გრადიენტის მიმართულების საწინააღმდეგოდ (აქტიური ტრანსპორტი). ეს იმას ნიშნავს, რომ ბიოლოგიური სისტემების მუშაობის უნარიანობა დროში არ მცირდება და თვით სისტემა არ უახლოვდება თერმოდინამიკურ წონასწორობას. ამის გამო

ცოცხალი სისტემების თერმოდინამიკა განიხილება როგორც ღია სისტემების თერმოდინამიკა.

ღია სისტემაში მუდამ მიმდინარეობს გარემომცველ არესთან ნივთიერებისა და ენერგიის გაცვლა. ამიტომ ასეთ სისტემაში თავისუფალი ენერგიის ΔF და ენტროპიის ΔS ცვლილება ორ ნაწილად იყოფა: თავისუფალი ენერგიისა და ენტროპიის ცვლილება განპირობებული სისტემის შიგნით ბიოქიმიური და ბიოფიზიკური პროცესების მიმდინარეობით (ΔF_i , ΔS_i) და ამ სისტემის გარემომცველ არესთან ურთიერთქმედებით (ΔF_e და ΔS_e).

ვინაიდან ყველა ბიოქიმიური და ბიოფიზიკური პროცესი ორგანიზმში შეუქცევადია და ვითარდება ენერგიის ნაწილის სითბოს სახით გაფანტვის ფონზე, სისტემის თავისუფალი ენერგია მცირდება, ხოლო ენტროპია იზრდება ($\Delta F_i < 0$; $\Delta S_i > 0$). მაგრამ ცოცხალ ორგანიზმში მიმდინარეობს, აგრეთვე, საპირისპიროდ, გრადიენტების საწინააღმდეგოდ მიმართული პროცესებიც, რომლებიც იწვევს სისტემის თავისუფალი ენერგიის ზრდას. უნდა აღინიშნოს, რომ გრადიენტის საწინააღმდეგოდ მიმართულ პროცესებს ორგანიზმში ყოველთვის გააჩნია ზოკალური, ადგილობრივი ხასიათი და ისინი ყოველთვის შეუღლებულია გრადიენტის მიმართულებით მიმდინარე პროცესებთან. მაგალითად, იონების აქტიური ტრანსპორტი – გრადიენტის საწინააღმდეგოდ მიმართული პროცესია, რომელიც უზრუნველყოფს თავისუფალი ენერგიის დაგროვებას; ეს პროცესი ყოველთვის შეუღლებულია ატფ-ის პიდროლიზთან. ამ დროს ატფ-ის ენერგიის გარდაქმნის ეფექტურობა 100%-ზე ნაკლებია და სისტემის საერთო თერმოდინამიკური პოტენციალი (თავისუფალი ენერგია) მცირდება. რომ არა გარემომცველ არესთან ენერგიის და ნივთიერების მუდმივი ცვლა, ცოცხალი ორგანიზმის მისწრაფება წონასწორობის მდგომარეობისაკენ გამოიწვევდა მის სიკვდილს. სინამდვილეში ასე არ ხდება, რაც იმას ნიშნავს, რომ ღია სისტემის თავისუფალი ენერგია ივსება გარედან შემოსული ენერგიის ხარჯზე, და ამ პროცესს თან ახლავს ენტროპიის (რომელიც წარმოიქმნება ცოცხალი ორგანიზმის შიგნით) გაფანტვა ($\Delta F_e > 0$; $\Delta S_e < 0$). ორგანიზმში თავისუფალი ენერგიის შევსება მუდამ ხორციელდება საკვები ნივთიერებების შემოსვლის, ხოლო ენტროპიის შემცირება – ორგანიზმიდან ნივთიერებათა ცვლის საბოლოო პროდუქტების და სითბოს გამოყოფის ხარჯზე.

იზოლირებული ორგანიზმის ენტროპია რჩება მუდმივი; ღია და ჩაკეტილ სისტემებში “ორგანიზმი – გარემომცველი არე” სისტემის ენტროპია იზრდება, რაც სრულიად შეესაბამება თერმოდინამიკის მეორე კანონს. ანუ, ორგანიზმში ენტროპიის წარმოქმნის სიჩქარე ორგანიზმის შიგნით წარმოქმნილი და ორგანიზმის გარეთ გატანილი ენტროპიის ჯამის ტოლია.

თუ ენტროპიის წარმოქმნის და გარეთ გატანის სიჩქარე ერთმანეთის ტოლია, ენტროპიის ცვლილებები ორგანიზმში არ მოხდება. სისტემის მდგომარეობას, რომელშიც სისტემის პარამეტრები დროის განმავლობაში არ იცვლება, მაგრამ მუდმივად მიმდინარეობს ენერგიისა და ნივთიერების ცვლა სისტემასა და გარემომცველ არეს შორის, *სტაციონარული მდგომარეობა* ეწოდება.

სტაციონარულ და თერმოდინამიკურ წონასწორობას შორის მსგავსება მდგომარეობს სისტემის პარამეტრების უცვლელობაში დროის ნებისმიერ მომენტში. მაგრამ პარამეტრების მუდმივობა სტაციონარული მდგომარეობის დროს მიიღწევა არა მიმართული პროცესების არარსებობით (როგორც თერმოდინამიკური წონასწორობის შემთხვევაში), არამედ მიმდინარე პროცესების სიჩქარის და მიმართულების სტაბილურობით და ურთიერთაწონასწორობით.

ცოცხალი ორგანიზმი წარმოადგენს სტაციონარულ მდგომარეობაში მყოფ ღია თერმოდინამიკურ სისტემას. ცოცხალი ორგანიზმისთვის დამახასიათებელია მისი პარამეტრების დროში მუდმივობა (ეს მდგომარეობა ცნობილია *ჰომეოსტაზის* სახელწოდებით). იგი – ორგანიზმის სტაციონარული მდგომარეობაა.

თბილისის ხილის ცხოველების ორგანიზმი სტაციონარულ მდგომარეობაში ხასიათდება სხედასხვა პარამეტრის, თხევადი არეების ქიმიური შემადგენლობის, ოსმოსური წნევის, სისხლის pH-ის, სხეულის ტემპერატურის და ა.შ. მუდმივობით. სტაციონარულ მდგომარეობაში მყოფი ორგანიზმის შემადგენელი უჯრედი ხასიათდება კონცენტრაციული, ოსმოსური, ელექტრული გრადიენტების და სხვა ფიზიკურ-ქიმიური პარამეტრების მუდმივობით.

ვინაიდან ცოცხალ ორგანიზმში მიმდინარე პროცესები შეუქცევადი ხასიათისაა, მისი ენტროპიის ზრდის სიქარე დადებითია:

$$\frac{\Delta S}{\Delta t} > 0$$

პრიოგენიზა ჩამოაყალიბა სტაციონარული მდგომარეობის ძირითადი კანონი (პრიოგენის თეორემა): სტაციონარულ მდგომარეობაში შეუქცევადი პროცესების მიმდინარეობით განპირობებული ენტროპიის ცვლილების სიქარე დადებითია და ყველა შესაძლებელი მნიშვნელობიდან მინიმალური მაჩვენებლის ტოლია.

შესაბამისად, ვინაიდან ენტროპია თავისუფალი ენერგიის გაფანტვის ზომაა, სტაციონარულ მდგომარეობაში თავისუფალი ენერგიის გაფანტვა მინიმალურია. ანუ სისტემას სტაციონარული მდგომარეობის შენარჩუნებისათვის ესაჭიროება თავისუფალი ენერგიის მინიმალური რაოდენობა - ორგანიზმი ცდილობს, იმუშაოს მეტად მომგებ ენერგეტიკულ რეჟიმში. ამ თვისებას დიდი მნიშვნელობა ენიჭება სტაციონარული მდგომარეობის შენარჩუნებისთვის. თუ სისტემა რაიმე მიზეზის გამო გამოვა სტაციონარული მდგომარეობიდან, მაშინ პრიოგენის კანონის თანახმად, მასში განვითარდება ისეთი ცვლილებები, რომლებიც უზრუნველყოფს სისტემის სტაციონარულ მდგომარეობამდე მიახლოებას ეს თვისება ცნობილია *აუტორეგულაციის (აუტოსტაბილიზაციის)* სახელწოდებით.

ცოცხალი ორგანიზმის სტაციონარული მდგომარეობის შენარჩუნება ხორციელდება აუტორეგულაციის უარყოფითი უკუკავშირის მექანიზმების საშუალებით. ასეთი მექანიზმები მოქმედებს ძუძუმწოვრებში. ასე, მაგალითად, გარემომცველი არის ტემპერატურის მომატება ცოცხალ ორგანიზმში თერმორეგულაციის მექანიზმის ამოქმედებას, სითბოწარმოქმნელი პროცესების დათრგუნვას და სითბოს გაცემის ინტენსიფიკაციას იწვევს. ეს მექანიზმი გარემოს ტემპერატურის ცვლილებების ფართო ინტერვალში ძუძუმწოვრების სხეულის ტემპერატურის მუდმივ დონეზე შენარჩუნებას უზრუნველყოფს.

ნახშირორჟანგის მაღალი კონცენტრაციის შემცველი ჰაერის ჩასუნთქვისას სისხლში არ ფიქსირდება მისი დამაბულობის *სტაბილური* მომატება, ვინაიდან ნახშირორჟანგი ქემორეცეპტორების საშუალებით იწვევს სუნთქვითი ცენტრის აგზნებას და გაზთა ცვლის ინტენსივობის გაძლიერებას, რაც სისხლში მისი შემცველობის ნორმამდე შემცირებას უზრუნველყოფს.

ორგანიზმში საკვებთან ერთად მარილების დიდი რაოდენობის მიღების შემთხვევაში სისხლის ოსმოსური წნევა მნიშვნელოვნად არ იცვლება, თირკმლის მიერ პიპერტონული შარდის გამოყოფის შედეგად.

ორგანიზმში აუტორეგულაციური მექანიზმების არსებობა მისი ფიზიკური მახასიათებლების (ტემპერატურა, აირების შემადგენლობა, სხედასხვა

ნივთიერების კონცენტრაცია, ნათება და ა.შ.) ოპტიმალურ საზღვრებში სტაბილობას განსაზღვრავს. თუ გარემომცველი არის ფიზიკური მასახიათებლების მოცემულ საზღვრებში ცვლილებისას ცოცხალი ორგანიზმის აუტორეგულაციურ სისტემას შესწევს ბიოლოგიური სისტემის სტაციონარული მდგომარეობის შენარჩუნების უნარი, ის განიცდის ადაპტაციას და გადარჩება; წინააღმდეგ შემთხვევაში ორგანიზმში განვითარდება შეუქცევადი ცვლილებები, რაც მას დაღუპვამდე მიიყვანს.

საკონტროლო კითხვები და ამოცანები:

1. რატომაა სისტემის მიერ შესრულებული მუშაობა ყოველთვის ნაკლები, ვიდრე ამ მუშაობაზე დახარჯული ენერგიის რაოდენობა?
2. მოიყვანეთ მაგალითები, რომლებიც ადასტურებს თერმოდინამიკის მეორე კანონის სისწორეს.
3. რა განსხვავებაა სტაციონარულ და თერმოდინამიკურ წონასწორულ მდგომარეობებს შორის?
4. როგორ იცვლება ენტროპია სისტემის წონასწორულ მდგომარეობაში გადასვლისას?
5. როგორ იცვლება სისტემის ენტროპია სტაციონარულ მდგომარეობაში?
6. როგორ იცვლება წყლის თავისუფალი ენერგია მისი გაყინვის დროს?
7. როგორ იცვლება რკინის სხმულის ბმული ენერგიის სიდიდე მისი გადნობის პროცესში?
8. როგორ იცვლება წყლის თავისუფალი ენერგია მისი აორთქლების დროს?

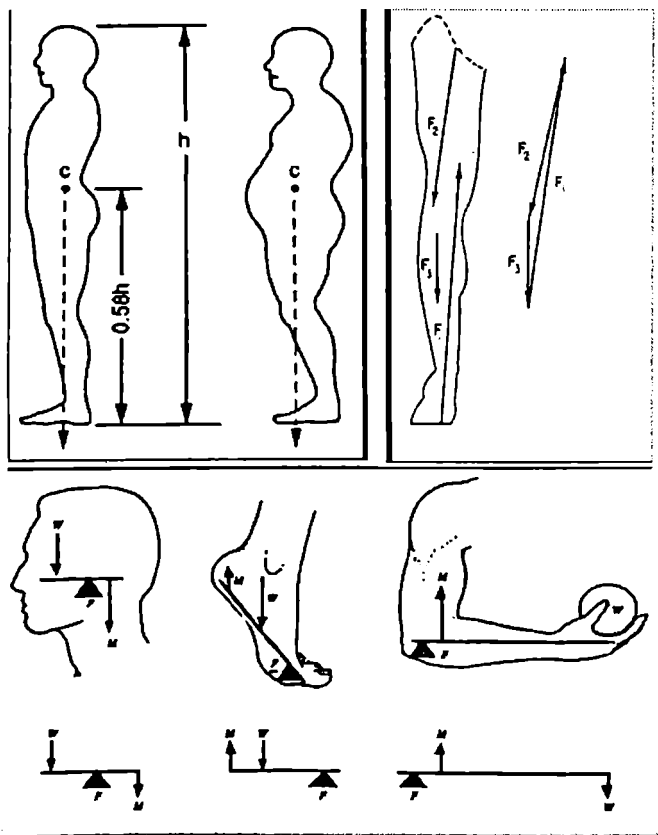
II ბიომექანიკა

ცოცხალი ორგანიზმის ცხოველქმედების პროცესები (გადაადგილება, გულის მუშაობა, სისხლის მიმოქცევა, სუნთქვა და სხვ.) მჭიდროდაა დაკავშირებული მექანიკურ მოძრაობასთან. ბიომექანიკა ბიოფიზიკის ნაწილია, რომელიც შეისწავლის ანატომიური სტაბილობის (კიდურების მოძრაობის, სიარულის, ფრენის, ცურვის), აგრეთვე სისხლის მიმოქცევის, მექანორეცეპციის და ა.შ. პროცესებს. ბიოფიზიკის ამ ნაწილის განვითარება მიმდინარეობდა უძველესი დროიდან ფიზიკური მექანიკის განვითარების პარალელურად. რენესანსის დროს გალილეო გალილეი, რენე დეკარტი, ისააკ ნიუტონი, ლეონარდო დავინჩი თავიანთ პიონერულ კვლევებში ინტერესდებოდნენ ცოცხალი ორგანიზმების მოძრაობის მექანიკური საფუძვლებით. ბიომექანიკის პირველ კლასიკურ წიგნში "De Motu Animalium" (რომი 1680) ალფონსო ბორელი განიხილავდა ცხოველების მოძრაობის, ცურვის, ფრენის, აგრეთვე ადამიანის კიდურების მოძრაობის და ხერხემლის წონასწორული მდგომარეობის პირობებს. ბორელიმ პიზაში დააფუძნა "იატრო-ფიზიკის" სკოლა (iatro-physics, *iatric* – ბერძნულად ნიშნავს "სამედიცინო ხელყოენა"), სადაც ადამიანის სხეული განიხილებოდა როგორც მექანიკური მანქანა და შეისწავლიდა ცოცხალი ორგანიზმის მოძრაობის საბაზისო ფიზიკურ საფუძვლებს.

თანამედროვე სამედიცინო დიაგნოსტიკისა და თერაპიის, სტომატოლოგიის, სპორტული მედიცინის, სამედიცინო ეკოლოგიის განვითარება მჭიდროდაა დაკავშირებული ბიომექანიკის სხვადასხვა საკითხის (ბიოლოგიური ქსოვილების მექანიკური (ვისკოზურ-ელასტიკური) თვისებები, ადამიანის სხეულის მექანიკური მოძრაობის კანონზომიერება, სისხლის მიმოქცევა (ჰემორეოლოგია) და ა.შ.) ღრმა შესწავლასთან და პრაქტიკაში გამოყენებასთან. ბიომექანიკა შეისწავლის ცოცხალ ორგანიზმში მექანიკური პროცესების მიმდინარეობას სხვადასხვა (მოლეკულურ, ქსოვილურ, ორგანოების და მთელი ორგანიზმის) დონეზე. ბიომექანიკის ინტერესთა სფერო მოიცავს იმ მექანიკური ურთიერთქმედებების კვლევას, რომლებიც აღმოცენდება კიდურებში სხეულის სტატიკური და დინამიკური მდგომარეობის (ფრინველებისა და მწერების აეროდინამიკა, თევზების ჰიდროდინამიკა, ადამიანის სხეულის მექანიკური წონასწორობის პირობები), სისხლის მიმოქცევის, უჯრედებში მიმდინარე მექანიკური მიკროპროცესების (მაგალითად, უჯრედების ციტოპლაზმის რხევითი, ბრუნვითი, შადრევნისებრი და სხვ. მოძრაობები) როლს მეტაბოლიზმის რეგულაციაში. ადამიანის სხეულის ბიომექანიკის, მისი მოძრაობის მექანიკური კანონზომიერებების შესწავლა განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია ორთოპედიის, ქირურგიის, სპორტული მედიცინის, სტომატოლოგიის განვითარებისთვის და შრომის უსაფრთხოების უზრუნველყოფისთვის.

რა განსაზღვრავს კუნთებისა და სახსრების შეთანხმებულ მოძრაობას დატვირთვის დროს? როგორ შეიძლება საყრდენ-მამოძრავებელი სისტემის პათოლოგიური ცვლილების ქირურგიული კორექცია? რა მასალებითაა შესაძლებელი დაზიანებული ძვლების, სახსრების, კბილების, ან სისხლძარღვების ხელოვნურით შენაცვლება? ამ კითხვებზე პასუხის გაცემის დროს უნდა მივიღოთ მხედველობაში არა მხოლოდ იმპლანტანტების ცოცხალ ქსოვილთან ტოლერანტობა, არამედ გამოყენებული მასალებისა და ცოცხალ ქსოვილთა მექანიკური თვისებების შეთავსებადობა.

სხეულის მოძრაობის დროს ამ პროცესში მონაწილე ელემენტები განიცდის დეფორმაციას, ურთიერთქმედებს ერთმანეთთან დეფორმაციის საპასუხოდ აღბრუნების რეაქციის ძალებით და წარმოქმნის ურთიერთშეთანხმებული მოძრაობის კომპლექსურ სისტემას - საყრდენ-მამოძრავებელ სისტემას. ევოლუციის პროცესში მოხდა საყრდენი ძვლებისა და კუნთოვანი სისტემების ელასტიკური ელემენტების ოპტიმიზაცია სტაბილური შეკუმშვის მიმართ. ცოცხალი ორგანიზმების მოდელირებისთვის (სხეულის დინამიკური მოდელის შექმნისთვის) იყენებენ ელემენტების კომბინაციებს, რომლებიც შეერთებულია სტაბილური ჭიმვადობისა და კუმშვადობის მქონე ელემენტების (კუნთების და მყესების) საშუალებით და ინარჩუნებენ სტაბილურობას წნევის ძალათა განსაზღვრული თანაფარდობის პირობებში (სურათი 1).



სურათი 1

სხეულის დინამიკურობის და წონასწორული მდგომარეობის ძირითადი მექანიკური საფუძვლების სქემა

II.1 ბიომასალის ვისკოზურ-ელასტიკური თვისებები

არსებობს სხეულის დეფორმაციის რამდენიმე სახე - ჭიმვა, გრეხა, კუმშვა და ა.შ. სხეულის დეფორმაციის უმარტივესი სახეა - ჭიმვა. დაეუშვათ, გარეშე ძალის ზემოქმედებით დრეკადი ცილინდრული ფორმის სხეული სიგრძით L და განივეკეთის ფართობით S განიცდის წრფივ დეფორმაციას ΔL სიდიდით. აბსოლუტური დეფორმაცია ΔL სხეულის დეფორმებადობას ვერ ასახავს, რადგან იგი დამოკიდებულია საწყის სიგრძეზე, ამიტომ შემოტანილია ისეთი სიდიდე, რომელიც არაა დამოკიდებული L -ზე,

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (\text{II.1.1})$$

და მას ფარდობით დეფორმაციას უწოდებენ. ის დეფორმაციის ზომას წარმოადგენს, პროპორციულია მოქმედი ძალისა და უკუპროპორციულია სხეულის განივეკეთის ფართობისა:

$$\varepsilon = \alpha \frac{F}{S}$$

ფარდობას $\frac{F}{S} = \sigma$ მექანიკურ ძაბვას უწოდებენ, ე.ი. $\varepsilon = \alpha \sigma$ (II.1.2).

აღენიშნოთ $\alpha = \frac{1}{E}$, მაშინ $\varepsilon = \frac{\sigma}{E}$, ან $\frac{\Delta L}{L} = \frac{\sigma}{E}$.

E -ს დრეკადობის მოდულს, ან იუნგის მოდულს უწოდებენ. მისი ფიზიკური შინაარსი მარტივია: $E = \sigma$, როცა $\frac{\Delta L}{L} = 1$, ე.ი. $\Delta L = L$.

ამრიგად, იუნგის მოდული რიცხობრივად იმ ძაბვის ტოლია, რომელიც სხეულის სიგრძეს გაზრდიდა ორჯერ.

იუნგის მოდულის ერთეულია $[E] = \frac{F}{S^2} = \frac{J}{m^3}$.

ჰუკის კანონიდან ცნობილია, რომ დრეკად დეფორმირებულ სხეულებში აღიძვრება დეფორმაციის საწინააღმდეგოდ მიმართული ძალა ($F = -kx$) და მაშასადამე, მექანიკური ძაბვა, რომელიც დეფორმაციის სიდიდის (ε) პირდაპირ-პროპორციულია (II.1.2).

სურათზე 2 წარმოდგენილი გრაფიკიდან ჩანს, რომ სხეულის მცირე დეფორმაციის შემთხვევაში (წრფივი უბანი) სხეულში აღძვრული მექანიკური ძაბვა (σ) მისი ფარდობითი დეფორმაციის ($\varepsilon = \frac{\Delta L}{L}$) პირდაპირპროპორციულია; ამ უბანზე სამართლიანია ჰუკის კანონი. გრაფიკზე 1 წერტილის შესაბამისი ძაბვა დრეკადობის ზღვარია. ამ ზღვარზე უფრო მეტი ძაბვა ძლიერ დეფორმაციას იწვევს და მას აქვს დრეკად-პლასტიკური ხასიათი (გრაფიკზე უბანი 1 - 2), ხოლო 3 წერტილის შესაბამის ძაბვაზე მასალა ირღევეა (სიმტკიცის ზღვარი).

მასალები, რომლებიც ექვემდებარება ჰუკის კანონს, ცნობილია წრფივად-ელასტიკური, ან ჰუკისებური მასალების სახელწოდებით. ჩვეულებრივ, ΔL

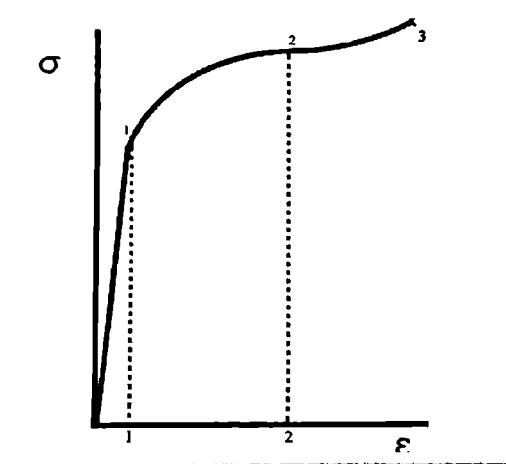
გაცილებით მცირე L -თან შედარებით. პუკისებური მასალების დრეკადი დეფორმაციის პოტენციური ენერგია განისაზღვრება ფორმულით:

$$U = 0,5 k (\Delta L)^2. \quad (\text{II.1.3})$$

სადაც k - დრეკადობის კოეფიციენტი (სიხისტე).

განტოლებიდან (II.1.3) ჩანს, რომ:

- არადეფორმირებული (წონასწორულ მდგომარეობაში მყოფი) ($\Delta L = 0$) სხეულის პოტენციური ენერგია ნულის ტოლია.
- დეფორმირებული სხეული მიისწრაფის შეამციროს თავისი პოტენციური ენერგია და დაუბრუნდეს საწყის (არადეფორმირებულ) მდგომარეობას (მსგავსად სხეულისა, რომელიც ეარდება პირს და ამცირებს თავის გრავიტაციულ პოტენციურ ენერგიას).



სურათი 2

მექანიკური ძაბვის (σ) დამოკიდებულება დეფორმაციაზე (ϵ).

- 1 - დრეკადი დეფორმაციის ზღვრული მნიშვნელობა; 1 - 2 - $\sigma = f(\epsilon)$ დამოკიდებულების არაწრფივი უბანი (არ ექვემდებარება პუკის კანონს);
- 3 - დეფორმირებული მასალის რღვევა (სიმტკიცის ზღვარი)

(Nico A.M. Schellart. "Compendium of Medical Physics, Medical Technology and Biophysics", Amsterdam, 2009)

პუკისებური მასალების ელასტიკურობა (დრეკადობა) განისაზღვრება იუნგის მოდულის (E) საშუალებით. ცხრილში 3 მოყვანილია იუნგის მოდულის მნიშვნელობა სხვადასხვა მასალისათვის.

არსებობს სხეულები (მასალები), რომლებიც ამჟღავნებენ როგორც დრეკად, ასევე პლასტიკურ თვისებებს. ასეთი სხეულების დეფორმაციის სიდიდე არ ექვემდებარება პუკის კანონს, დამოკიდებულია არა მხოლოდ სხეულის

ელასტიკურობაზე (დრეკადობაზე), არამედ მასალის ბლანტ თვისებებზეც, ეი ვისკოზურ-ელასტიკურ თვისებებზე.

✓კაუჩუკის მსგავსი მასალები არ ექვემდებარება ჰუკის კანონს და ცნობილია "არაჰუკისებური" მასალების სახელწოდებით. კაუჩუკის სიხისტე დამოკიდებულია არა მხოლოდ დატვირთვის ხარისხზე, არამედ ძალიან მგრძნობიარეა ტემპერატურის მიმართ.

ცხრილი 3

იუნგის მოდული E ზოგიერთი მასალისთვის
ოთახის ტემპერატურაზე

(Nico A.M. Schellart. "Compendium of Medical Physics, Medical Technology and Biophysics", Amsterdam, 2009)

მასალა	ელასტიკურობის მოდული E (პა)
კაუჩუკი	0,001
ფოლადი	200
ტიტანი	$(80 - 125) \cdot 10^3$
სისხლძარღვების კედელი	0,0001-0.001
კენთი	0.00001
მყესი	0.1
ადამიანის მილისებური ძელები	0.1-10

მასალის ელასტიკურობა (დრეკადობა) ფასდება თერმული ენერგიის სიდიდით, რომელიც გამოიყოფა დეფორმაცია-რელაქსაციის ციკლის განმავლობაში და განპირობებულია სხეულის ვისკოზური წინააღმდეგობით.

ბიოლოგიური ქსოვილები დეფორმაციის დიდ ინტერვალში ავლენს ვისკოზურ-ელასტიკურ თვისებებს. კუნთოვანი ქსოვილის ვისკოზურ-ელასტიკური თვისებები მის განსაკუთრებულ, ძვლებისაგან განსხვავებულ, მექანიკურ ქცევას (ენერგიის გაფანტვას მექანიკური დატვირთვის დროს) განსაზღვრავს.

ელასტიკურობა – მნიშვნელოვანი პარამეტრია, რომელიც გამოიყენება მედიცინაში ჩონჩხის და ხრტილოვანი სტრუქტურების, მყესების, კუნთების, სისხლძარღვების და ალვეოლების დახასიათების დროს. ხშირად საჭიროა პაციენტის კუნთის, სისხლძარღვების და ალვეოლების, ძვლების ელასტიკურობის (ან კუმშვის ამტანობის) მოდულის გამოთვლა (ეს პარამეტრები, ჩვეულებრივად, დამოკიდებულია პაციენტის ასაკზე). სმენის ორგანოს გამოკვლევის დროს მნიშვნელოვანია შუა ყურის (დაფის აკის) ელასტიკურობის (იცივლება შუა ყურის გაძალების დროს), კოხლეარული მემბრანების მექანიკური თვისებების გამოკვლევა. ბიომასალათა ელასტიკურობის მოდულის სიდიდე მნიშვნელოვანია სხვადასხვა ტიპის იმპლანტანტებისთვის, როგორებიცაა სტენტები, მილები, ზონდები, კარდიალური სარქველები, ხელოვნური გული, სტომატოლოგიური და ორთოპედიული პროთეზები.

ასაკთან ერთად ბიომასალები ხდება უფრო მტვერედი, მყიფე, მათ გააჩნიათ დაბალი ზღვრული სიმტკიცე. ძვლისთვის – ყოველი 10 წლის შემდეგ იუნგის მოდულის (E) მნიშვნელობა იზრდება 2%-ით.

დაბაბულობის ზღვარი ბიომასალების ძალზე მნიშვნელოვანი მახასიათებელი პარამეტრია. მყესებისა და კუნთებისთვის (არადატვირთულ მდგომარეობაში) დაბაბულობის ზღვარი აღწევს 10%-ს (ხანდახან 30%-მდე); იოგების დაბაბულობის ზღვარი 50%-ია (აქ იგულისხმება ბიომასალების უსაფრთხო დატვირთვის (DL) ზღვარი).

II.2 მექანიკური მოძრაობა ცოცხალ ორგანიზმში

ძუქუქწორებში ცხოველქმედების პროცესებთან დაქაქმირებული მექანიკური მოძრაობა (ცადადგილება, გულის ცემა, თვლების დახამხამება, სუნთქვა, ნაწლავების, სისხლძარღვების პერიოდული რხევითი მოძრაობა და ა. შ.) ხორციელდება კუნთების საშუალებით.

II.2.1 კუნთების მექანიკური თვისებები

არჩევენ სხვადასხვა სახის კუნთებს: ჩონჩხის კუნთებს, გლუვ კუნთებს და გულის კუნთს. ჩონჩხის კუნთოვანი სისტემა საოცრად ეფექტური აპარატია სწრაფი, ნებითი მოძრაობების შესასრულებლად; გულის კუნთი და გლუვკუნთოვანი სისტემა – სპეციალიზებულია უნებლიე მოძრაობების განსახორციელებლად.

ყველა ტიპის კუნთი აქტიურად იკუმშება და ახორციელებს მოძრაობას. მათ შეეკმშვას უზრუნველყოფს რთული შიგაუჯრედული ცილოვანი სისტემა, რომელიც უფრო პრიმიტიული ფორმით სხვა ტიპის უჯრედებშიც გვხვდება.

კუნთოვანი ქსოვილის დაახლოებით 75% წყალია, მკერძე ნივთიერებათაგან მთავარია ცილები – 16.5%, კერძოდ, კუმშვადი ფიბრილური ცილები (მიოზინი, აქტინი) და სარკოლამზური ცილები (მორგლობინი, გლობულინები, ფერმენტები და სხვა). შეკუმშვისთვის დიდი მნიშვნელობა აქვს ატფ-ს და სხვა მაკროერგულ ნაერთებს. სხვა ნივთიერებებიდან აღსანიშნავია ნახშირწყლები, ცხიმები, მინერალური ნივთიერებანი (Na, K, Ca, Mg-ის იონები). კუნთის შეკუმშვისათვის საჭიროა ჟანგბადის არსებობა, თუმცა ჩონჩხის კუნთებს აქვთ უნარი გარკვეული დროის მანძილზე იმუშაოს ანაერობულ პირობებშიც (ასეთ შემთხვევაში კუნთის დაღლა უფრო მალე ვითარდება).

ცოცხალი ორგანიზმის ნებისმიერი მოძრავი სისტემა თვითმოძრაობისა და ენერგიის უზრუნველყოფის საკუთარი წყაროს არსებობით ხასიათდება და მუშაობს საგანგებოდ ლოკალიზებულ სტრუქტურულ ბლოკებს შორის ურთიერთობის ხარჯზე. აღსანიშნავია ის გარემოება, რომ კუნთების კუმშვის პროცესში ქიმიური ენერგია პირდაპირ მექანიკურ ენერგიად (მექანიკურ მუშაობად) ტრანსფორმირდება (სითბურ, ან ელექტრულ ენერგიად შუალედური გარდაქმნის გარეშე), ანუ, ქიმიურ-მექანიკურ სისტემას წარმოადგენს. ამ გარდაქმნის მექანიზმების შესწავლა ფრიად მნიშვნელოვანია ტექნიკური თვალსაზრისით და ახალი ტიპის ძრავების შექმნის პერსპექტივებს სახავს.

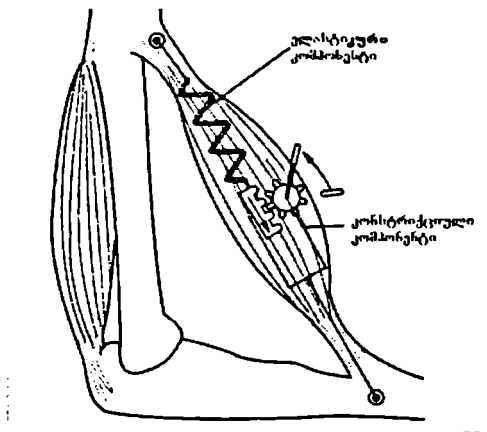
ჩონჩხის კუნთი ელასტიკურია. გაჭიმვისას იგი იძაბება; დაძაბვა დამოკიდებულია გაჭიმვის ხარისხზე. დაძაბვის გამო გამჭიმავი გარეგანი ძალის მოქმედების შეწყვეტის შემდეგ კუნთი კვლავ მოკლდება, რაც კუნთის ელასტიკური თვისებებით არის განპირობებული.

კუნთის დეფორმებადობა მისი ფიზიკური მახასიათებლებით - ჭიმვადობით და დრეკადობით, პლასტიკურობით, სიბლანტით და სიმტკიცის ზღვრით განისაზღვრება.

კუნთი მექანიკური ძალის ზემოქმედებისას იჭიმება. კუნთის გაჭიმვის სიდიდე განსაზღვრავს იმ ძაბვას, რომელიც მასში გაჭიმვის შედეგად აღიძვრება (კუკის კანონის თანახმად):

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} = - \frac{1}{E} \times \frac{F}{S} \quad (\text{II.2.1.1})$$

სადაც ΔL - კუნთის აბსოლუტური დაგრძელება; L - კუნთის საწყისი სიგრძე; F - კუნთში აღძრული დრეკადობის ძალა; S - კუნთის განივი კვეთის ფართობი, შეფარდება $\frac{F}{S}$ - კუნთის მექანიკური დაძაბულობა (σ), E - დრეკადობის კოეფიციენტი (იუნგის მოდული), რომელიც, უნევენებს იმ დაძაბულობის სიდიდეს, რომელიც აუცილებელია სხეულის საწყის სიგრძესთან შედარებით 2-ჯერ გაგრძელებისთვის, იგი კუნთის დრეკადობას და ჭიმვადობას (ელასტიკურობას) განსაზღვრავს (სურათი 3). ნიშანი "მინუსი" დეფორმაციის შედეგად აღძრული ძალის დეფორმაციის საწინააღმდეგო მიმართულებაზე მიუთითებს, ეს ძალა ცდილობს სხეულის (კუნთის) საწყისი ზომების აღდგენას.



სურათი 3

კუნთების დრეკადობისა და ჭიმვადობის ამსახველი სქემა

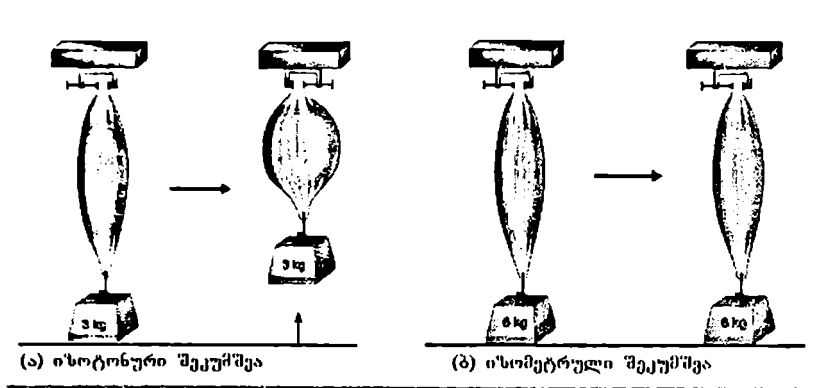
კუნთის ახასიათებს კუმშვადობა და ელასტიკურობა. ამავე დროს კუნთი არ წარმოადგენს იდეალურად დრეკად სხეულს და კაუჩუკის მსგავსად ხასიათდება ეისკოზურ-ელასტიკური თვისებებით (კუნთისა და კაუჩუკის დრეკადობის მოდულები $\approx 10 \frac{\text{კგ}}{\text{სმ}^2}$ -ის ტოლია).

ობიექტის უნარი, ძალის ზემოქმედების შედეგად მოიმატოს ზომა, მის *კიბეადობას* განსაზღვრავს.

კუნთის *პლასტიკურობა* (დეფორმაციის შენარჩუნების უნარი გარეშე ძალის ზემოქმედების შეწყვეტის შემდეგ) მისი *ნარჩენი დეფორმაციით* განისაზღვრება. რაც მეტია ნარჩენი დეფორმაცია, მით მეტია კუნთის პლასტიკურობა. კუნთის *პლასტიკურობა* განისაზღვრება მისი ვისკოზური თვისებებით (*სიბლანტით*); პარამეტრი *სიბლანტე* დამახასიათებელია დინამიკური პროცესისათვის, კუნთის სიბლანტე ელინდება მხოლოდ მისი დეფორმაციის დროს.

კუნთს, როგორც ყველა დრეკად სისტემას, ახასიათებს *სიმტკიცის (დაძაბულობის) ზღვარი*.

განასხვავებენ კუნთის *იზომეტრულ* (კუნთის უცვლელი სიგრძის შენარჩუნებით) და *იზოტონურ* (კუნთის მუდმივი დაძაბვის შენარჩუნებით) შეკუმშვას (სურათი 4).



სურათი 4

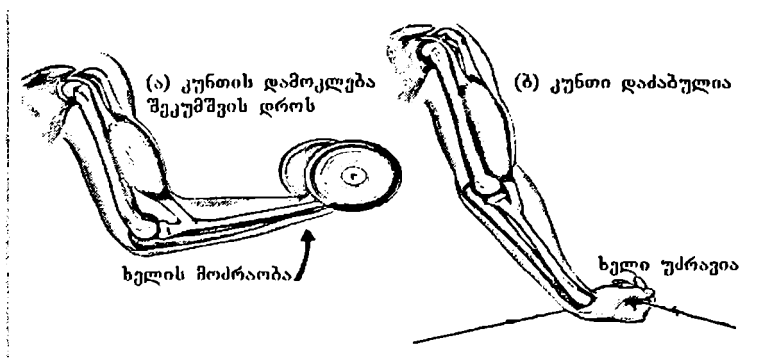
კუნთების იზოტონური (ა) და იზომეტრული (ბ) შეკუმშვა

იზოტონური კუნთები - დინამიკური კუნთებია; მათი შეკუმშვის დროს სხეულის ნაწილი მოძრაობს (სურათები 5ა, 5ბ, 5გ). განასხვავებენ კონცენტრულ (მოკლდება დაძაბვის დროს) და ექსცენტრულ (გრძელდება დაძაბვის დროს) იზოტონურ კუნთებს (სურათი 6ბ, 6გ).

იზომეტრული კუნთები - სტატიკური კუნთებია; მათი შეკუმშვის დროს სხეული უძრავი რჩება (სურათები 5ბ, 5ა).

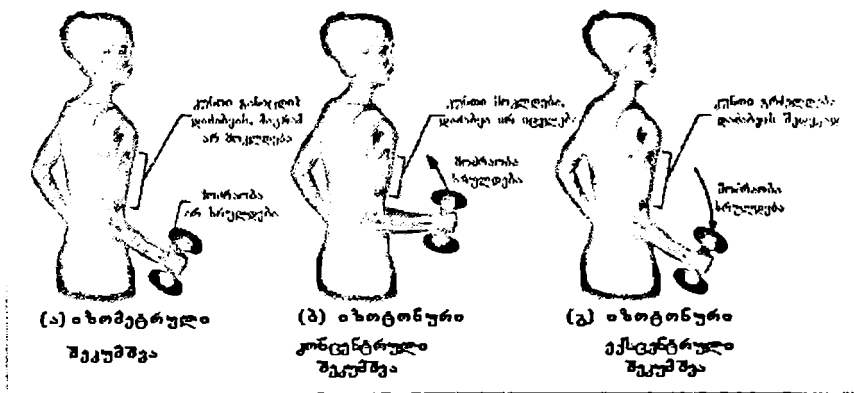
ზოგიერთი კუნთი მუდამ დაძაბულ მდგომარეობაშია (იმ შემთხვევაშიც, როდესაც კუნთი შეკუმშული არ არის). კუნთების დაძაბვა მოსვენებულ მდგომარეობაში ცნობილია *ტონუსის* სახელწოდებით. მოსვენებული კუნთის ტონუსის შენარჩუნება ძელებისა და ხრტილების სტაბილიზაციას უზრუნველყოფს.

წმინდა იზომეტრული, ან წმინდა იზოტონური შეკუმშვის მიღება შესაძლებელია მხოლოდ ლაბორატორიულ პირობებში, იზოლირებული კუნთების დატვირთვის დროს. ცოცხალ ორგანიზმში კუნთების შეკუმშვა არასოდეს არის წმინდა იზომეტრული, ან წმინდა იზოტონური.



სურათი 5

იზოტონური (დინამიკური) და იზომეტრული (სტატიკური) კუნთები



სურათი 6

იზომეტრული და იზოტონური (კონცენტრული და ექსცენტრული) კუნთები

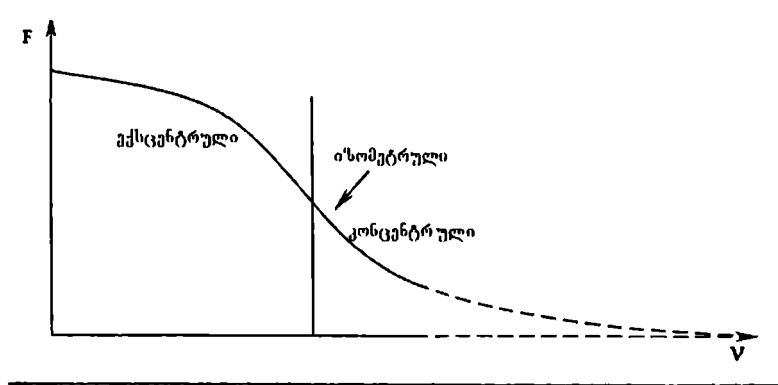
წონის კუნთები უერთდება ძელებს მეცხების საშუალებით და ქმნის ბერკეტულ სისტემას. უმრავლეს შემთხვევაში კუნთის ბერკეტის მხარი შესაბამისი ძელის ბერკეტის მხარზე ნაკლებია. შესაბამისად, კიდურების მოძრაობის დროს გვაქვს მოგება მოძრაობის ამპლიტუდაში და შესაბამისი წაგება ძალაში. ადამიანის კიდურებში მოძრაობის ამპლიტუდაში მექანიკური მოგება 2,5 - 20-მდე მერყეობს. ბეჭის ორთავა კუნთისათვის მექანიკური მოგება ამპლიტუდაში უდრის ≈ 10 -ს (იგულისხმება შეფარდება $\frac{A_2}{A_1}$, სადაც A ამპლიტუდაა). ძელების მოძრაობის დროს კუნთებისა და ძელების ბერკეტების მხრებს შორის შეფარდება იცვლება,

რაც იწვევს კუნთების დაძაბვის ცვლილებას. ამის გამო ბუნებრივ პირობებში სუფთა იზოტონური მოძრაობა არ სრულდება.

იზოტონური კუნთის შეკუმშვის (დამოკლების) სიჩქარე დამოკიდებულია კუნთის დაძაბვაზე. იზოლირებული კუნთების დატვირთვის პროცესში მიღებული ექსპერიმენტული შედეგების საფუძველზე ჰილმა გამოიყენა *კუნთის შეკუმშვის ძირითადი განტოლება*, ეგრეთ წოდებული *“ჰილის განტოლება”*, რომლის თანახმად, დამოკიდებულება კუნთის შეკუმშვის (დამოკლების) სიჩქარესა (V) და მის მიერ განვითარებულ ძალას (F) შორის (სურათი 7) შემდეგი ფორმულით აისახება:

$$(F + a)(v + b) = \text{const}, \quad (11.2.1.2)$$

სადაც a და b – კონსტანტებია.



სურათი 7

დამოკიდებულება კუნთის შეკუმშვის სიჩქარესა (V) და განვითარებულ ძალას (F) შორის

შეკუმშვის სიჩქარის მიხედვით არჩევენ “სწრაფ” და “ნელ” კუნთებს. თუ განტოლებაში (11.2.1.2) აღვნიშნავთ:

$$F' = F + a$$

$$v' = v + b,$$

ნამრავლი $F'v'$ ($6 \times \frac{a}{b} = \frac{x}{b} = \text{ვტ}$) კუნთის შეკუმშვის დროს განვითარებულ სიმძლავრეს ასახავს. ვინაიდან $Fv < F'v'$, შეგვიძლია დავასკვნათ, რომ კუნთი გარეთა მუშაობის გარდა შიგა მუშაობასაც ასრულებს (თუ დატვირთვა F იზრდება a სიდიდით, სიჩქარე v უნდა შემცირდეს b სიდიდით), რაც განპირობებულია შინაგანი ვისკოზურობის გამო ენერგიის დანაკარგებით. აქედან გამომდინარე,

კუნთის სიმძლავრე ფიზიოლოგიურ პირობებში მუდმივი სიდიდეა, არ არის დამოკიდებული დატვირთვის სიდიდეზე და კუნთის შეკუმშვის სიჩქარეზე.

გაჭიმვის/შეკუმშვის დროს კუნთის ქსოვილი ლოკალურ კრისტალიზაციას (ფიბრილური ტიპის მაკრომოლეკულური ცილოვანი სტრუქტურების მოწყვლადობა) განიცდის. კრისტალიზაციის შედეგად გამოიყოფა თავისუფალი ენერგია.

კუნთის შეკუმშვის დროს გამოყოფილი სითბოს გაზომვისას პილმა დაადგინა, რომ კუნთის შეკუმშვის პროცესში გამოყოფილი ენერგია კუნთის აქტივაციის (Q) და შეკუმშვის ენერგიის (kAL) ჯამის ტოლია ($Q + kAL$). აქტივაციის ენერგია Q არ არის დამოკიდებული დატვირთვის სიდიდეზე და კუნთის შინაგანი ვისკოზურობით განისაზღვრება; შეკუმშვის ენერგია kAL , კუნთის დამოკლების AL სიდიდის პირდაპირპროპორციულია. თუ შეკუმშვა იზოტონურია, კუნთი ასრულებს მუშაობას, რომელიც დატვირთვის (F) და კუნთის დამოკლების (AL) ნამრავლის ტოლია:

$$A = FAL \quad (11.2.1.3)$$

თერმოდინამიკის პირველი კანონის თანახმად, კუნთის შინაგანი ენერგიის ცვლილება ΔU გამოყოფილი სითბოსა და დახარჯული ენერგიის ჯამის ტოლია:

$$\Delta U = Q + FAL \quad (11.2.4)$$

განტოლებებიდან (1.8, 1.9) კუნთების შეკუმშვის მარგი ქმედების კოეფიციენტი η ტოლია:

$$\eta = \frac{A}{\Delta U} = \frac{FAL}{Q + FAL} \quad (11.2.5)$$

ამ ფორმულიდან გამომდინარეობს, რომ კუნთების შეკუმშვის მარგი ქმედების კოეფიციენტი განსაზღვრულ ფარგლებში დატვირთვის ზრდასთან ერთად იზრდება.

ექსპერიმენტული შედეგების საფუძველზე პილმა დაადგინა, რომ კუნთების შეკუმშვის მარგი ქმედების კოეფიციენტი $\approx 40\%$ -ის ტოლია.

ვინაიდან იზოტონური ჩონჩხის კუნთები ძვლებისა და ხრტილების სტაბილიზაციის მიზნით მუდამ დაძაბულ მდგომარეობაშია, ისინი გამოყოფენ ენერგიას Q სითბოს სახით, რომელიც ადამიანის სხეულის ნორმალური ტემპერატურის შენარჩუნებას უზრუნველყოფს. ჩონჩხის მუსკულატურა სითბოს საკმაოდ დიდი რაოდენობით გამოყოფს. გაცივებული სხეულისათვის ხშირად დამახასიათებელია კანკალი, რომლის დროსაც კუნთების შეკუმშვის პროცესში გამოყოფილ სითბოს სხეული ტემპერატურის მომატების მიზნით (ადაპტაციური რეაქცია) იყენებს.

ინტენსიური ვარჯიშის დროს სხეულის ტემპერატურა მკვეთრად მატულობს (კუნთების კუმშვითი მუშაობის შედეგად). ამ დროს დამახასიათებელია სხეულზე ოფლის გამოყოფა – წყლის (ოფლის) აორთქლებაზე დახარჯული ენერგია სხეულის ტემპერატურის დაქვეითებას უწყობს ხელს და იცავს მას გადახურებისაგან.

სითბო, რომელიც განსაზღვრულ პირობებში (სიცოცხლის დროს კანკალი) ადაპტაციური რეაქციის გამოვლინებას წარმოადგენს, შეიძლება სიცოცხლესთან შეუთავსებელი გახდეს (ავთვისებიანი ჰიპერთერმია). ზოგიერთი ზოგადი საანესთეზიო პრეპარატისადმი (ჰალოთანი, ეთერი, სუქცინილქოლინი) განსაკუთრებით მგრძნობიარე პირებში (გვხვდება 1/15000 შემთხვევა ბავშვებში და 1/50000 – მოზრდილებში) ამ პრეპარატების ზემოქმედებით ნონჩხის მუსკულატურის კუნთების აქტივაციის შედეგად გამოიყოფა სითბო ძალიან დიდი რაოდენობით. არაკონტროლებადი ავთვისებიანი ჰიპერთერმია იწვევს სხეულის ტემპერატურის სწრაფ ზრდას და სიკვდილის მიზეზიც შეიძლება გახდეს.

II.2.2 პერიოდული რხევები და მექანიკური ტალღები

თუ ფიზიკური სიდიდის (მაგალითად, კოორდინატი, წნევა, ძაბვა და ა.შ.) ცვლილებების პროცესი დროის მიხედვით პერიოდულად მცირდება, მაშინ ამბობენ, რომ ასეთი სიდიდე განიცდის რხევას. მერხევი სიდიდის ბუნების მიხედვით განასხვავებენ მექანიკურ, ელექტრომაგნიტურ, სითბურ და სხვა სახის რხევებს. რხევების მაგალითად კრისტალური მესრის კვანძებში მოთავსებული ნაწილაკების, საათის ქანქარის რხევა, ძაფზე დაკიდებული ბურთულას მოძრაობა წონასწორობის მდგომარეობის მიმართ და მრავალი სხვა.

ცოცხალ სისტემებში პერიოდული რხევითი პროცესების მრავალი მაგალითი არსებობს. ასეთი პროცესების რიცხვს მიეკუთვნება მაგალითად, გულის მუშაობა, ცოცხალი ორგანიზმების ცირკადული რითმები ბიოქიმიურ, ფიზიოლოგიურ და ქცევით პროცესებში, ცენტრალური ნერვული სისტემის ფუნქციონირების, ჰორმონების სეკრეციის პერიოდიზმი და ა.შ.

ცირკადული რითმები, ანუ ბიოლოგიური პროცესების ენდოგენური პერიოდიზმი, შეუღლებული დღე-ღამის, წელიწადის დროების, ტემპერატურის ცვალებადობის და ა.შ. ციკლთან, დამახასიათებელია ცოცხალი ორგანიზმებისათვის ყველა დონეზე (ადამიანები, ცხოველები, მცენარეები, ცალკეული უჯრედები).

ზოგჯერ სხვადასხვა უჯრედი ქმნის სინქრონული ელექტრული სიგნალის გამოშუქებების უნარის მქონე კომუნიკაციებს; ამ გზით ხორციელდება თავის ტვინის ენდოკრინულ ჯირკვლებთან კომუნიკაცია, რაც აუცილებელია ჰორმონების გამოყოფის პერიოდიზმის რეგულაციისათვის. ამ ჰორმონების რეცეპტორების საშუალებით ხორციელდება სხვადასხვა ორგანოს ფუნქციონირების სინქრონიზაცია. ამ გზით ხდება ძილ-ღვიძილის, სხეულის ტემპერატურის, წყურვილის, მაღის და სხვა ფიზიოლოგიური პროცესების კოორდინაცია და კონტროლი ბიოლოგიური რითმების მიერ. ისეთი ფაქტორები, როგორებიცაა ამინდის ცვალებადობა, დღის ხანგრძლივობა (სინათლე-სიბნელის ციკლი), არეგულირებს ცოცხალ ორგანიზმში ფიზიოლოგიურ ქცევას, განსაზღვრავს მიგრაციას, კიბერნაციას, რეპროდუქციულ პროცესებს. ასე მაგალითად, ცნობილია, რომ მოზრდილი ადამიანის სხეულის ტემპერატურა აღწევს თავის მაინიმუმურ მნიშვნელობას დაახლოებით დღის 5.00 საათზე (ფიზიოლოგიურ გაღვიძებამდე 2 საათით ადრე).

საინტერესოა, რომ მხედველობის უნარს მოკლებული მიწისქვეშ მცხოვრები ცხოველები (მაგალითად, თხუნელა) ინარჩუნებენ სინათლე-სიბნელის ციკლთან დაკავშირებულ ენდოგენურ სინქრონიზაციას სხვა გარეგანი სტიმულების გარეშეც. ეს ნიშნავს, რომ ამ ცხოველების

გამოსახულების წარმოქმნის უნარს მოკლებულ თვალბეჭდში სინათლის მიმართ მგრძნობიარე ფოტორეცეპტორები ინარჩუნებს თავის ფუნქციას და მონაწილეობს ფიზიოლოგიური პერიოდოზების რეგულაციაში. კერძოდ, ძუძუმწოვრებში ეს ფოტორეცეპტორები აინდუცირებს თავის ტვინის ნათხების მიერ მელატონინის სეკრეციას. მელატონინის დონე (სისხლში ან ნერვულში) მკვეთრად მატულობს ღამის საათებში (სიბნელეში), მაშინ, რიდესაც მისი დონე დღისით ძალიან დაბალია. აღსანიშნავია, რომ ზოგიერთ უსინათლო ადამიანში შენარჩუნებულია მელატონინის სინთელდამოკიდებული გამოყოფის პერიოდიზმი, რაც მათ თვალბეჭდში ფოტორეცეპტორების ნორმალურ ფუნქციონირებაზე მეტყველებს.

პერიოდიზმი შემწვანული სხედასხვა შინაგანი ორგანოს – ფილტვების, ღვიძლის, პანკრეასის, ულნების, თირკმლის, კანის ფუნქციონირებშიც. მაგალითად, დადგენილია, რომ პეპატოციტების პერიოდიზმი რეგულირდება შიმშილის გრძნობის მიერ.

გონადორტროპინის და სასქესო ჰორმონების გამოყოფის პერიოდული ხასიათი მნიშვნელოვანია სქესობრივი მომწიფების, რეპროდუქციული სისტემის ფუნქციონირების, სხეულზე თმისზრდის სისხლის და მრავალი სხვა პროცესის რეგულაციისათვის.

კარგადაა ცნობილი პანკრეასის ბეტა უჯრედების მიერ ინსულინის სეკრეციის პულსური ხასიათი (პერიოდი 3 - 6 წუთი), რაც ძალიან მნიშვნელოვანია ორგანიზმში ინსულინის რეცეპტორების მგრძნობელობის შენარჩუნებისათვის (ღიაბეტი ტიპი 2-ისთვის დამახასიათებელი ინსულინო-რეზისტენტობის განვითარების პრევენციისთვის). თუ გაავითვალისწინებთ, რომ პანკრეასის მილიონი ღანკუქანის კუნძულიდან თითოეული შეიცავს 2000-მდე ბეტა უჯრედს, ცხადია, რომ ინსულინის პულსური სეკრეცია სინქრონიზაციის რთული მექანიზმის არსებობას მითითებს. აქედან გამომდინარე, გასაგებია, რომ ღიაბეტით დაავადებული პაციენტების მკურნალობისთვის მტკადა ეფექტურია ინსულინის ბუნებრივის მსგავსად პორციული შეყვანა. ძუძუმწოვრებში ინსულინის სეკრეციის პულსური ხასიათი ჰორციელდება ბეტა უჯრედებში კალციუმის იონების კონცენტრაციის ატფ-დამოკიდებული რეგულაციის მექანიზმით.

ცოცხალი ორგანიზმის პერიოდიზმის რეგულაცია ჰორციელდება გენურ, მოლეკულურ, სუბუჯრედულ, უჯრედულ, ქსოვიურ, სისტემურ და მთელ ორგანიზმის დონეზე. ცოცხალი ორგანიზმის პერიოდიზმი რეგულაციაში ცენტრალური ნერვული სისტემა, სინათლე-მგრძნობიარე სტრუქტურები და ინდივიდუალური ორგანიზმის ბიოქიმიური, ფიზიოლოგიური და ქცევითი რითმები მონაწილეობენ.

ცენტრალური ნერვული სისტემის პერიოდიზმი განპირობებულია მისი სტრუქტურების პერიოდული განმეორებითი აქტივაციით, რომელიც ჰორციელდება ნეირონების პოპულაციაში უშეალოდ შიგანეირიული, ან ნეირონთაშორისი ურთიერთქმედების მექანიზმების საშუალებით. ამ მექანიზმებს მიეკუთვნება, მაგალითად, მემბრანული ქვესტრუქტურული პოტენციალის, მოქმედების პოტენციალის ინტენსიობის, სამიზნე ნეირონებში სინაპსების აქტივობის ცვალებადობა. ნეირონების დიდ პოპულაციაში ეს ცვალებადობა შეიძლება იწვევდეს ელექტრული (ან მაგნიტური) ეფლის მაკროსკოპულ რხევას, რომელიც ელინდება ელექტროენცეფალოგრაფიის (ან მაგნიტოენცეფალოგრაფიის) მეთოდებით. ასევეცა გულის ელექტრული იმპულსების ცვალებადობის (რომელიც რეგისტრირდება ელექტროკარდიოგრაფიის საშუალებით) მექანიზმი. ეს პერიოდული განხსენიებულია სხედასხვა ფიზიოლოგიური (ძილ-ღვიძლი) ან პათოლოგიური (პარკინსონის დაავადება, ეპილეფსია და სხვ.) პერიოდული პროცესებისგან.

შეწყველების ორგანიზმში (პირის ღრუში) პაერის წნევის პერიოდული ცვალებადობა ბეტრების წარმოქმნას უსზრუნელოფუს, რაც ძალზე მნიშვნელოვანია ადამიანების ურთიერთობისთვის.

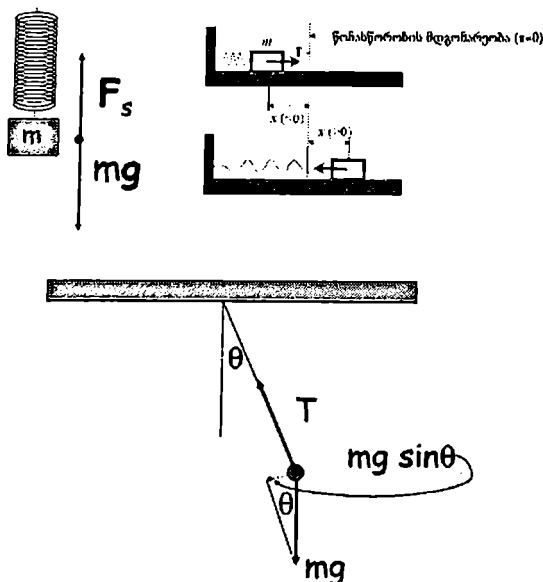
როგორც ვედადეთ, ცოცხალ ორგანიზმში სხედასხვა ფიზიოლოგიური პარამეტრის - მემბრარული პოტენციალის, რეცეპტორების აქტივობის, ბიოლოგიურად აქტიური ნაერთების (პორმონების), ატფ-ის გამოყოფისა და სინთეზის, პაერის წნევის და მრავალი სხვ. - პერიოდული ცვალებადობა (ანუ რხევა) ორგანიზმის ცხოველქმედების რეგულაციაში მნიშვნელოვან როლს ასრულებს. ამ პერიოდულობის დარღვევას კი მიძიე პათოლოგიების გამოწვევა შეუძლია (ღიაბეტი ტიპი 2, მელატონინის ემპარისობა, პარკინსონის დაავადება, ეპილეფსია და ა.შ.). აქედან გამომდინარე, ნათელია პერიოდიზმის მექანიზმების დარღვევების მიზეზების დადგენის და რეგულაციის გზების ძიების აუცილებლობა.

სამედიცინო ფიზიკის ამ ნაწილში ჩვენ განვიხილავთ *მექანიკურ რხევებს*, მათს მახასითებელ პარამეტრებს და კანონზომიერებებს, *რადგან ნებისმიერი ბუნების რხევებისათვის ეს პარამეტრები ანალოგიურია*.

II.2.2.1 მექანიკური რხევები

ნებისმიერი მერხევი სხეული არ არის *იზოლირებული* გარემოსაგან, იგი მექანიკური სისტემის შემადგენელი ნაწილია, ამიტომ მერხვე სხეულზე სისტემის დანარჩენი სხეულები გარკვეული ძალებით მოქმედებს. ამ ძალებს *შინაგანი ძალები* ეწოდება. მაგალითად, მათემატიკური ქანქარას შემთხვევაში მექანიკური სისტემა შედგება სამი სხეულისაგან: დედამიწა, მერხევი სხეული და ძაფი. შინაგანი ძალებს წარმოადგენს ძაფის დაჭიმულობისა და სიმძიმის ძალები. როდესაც მერხევი სისტემა არ არის იზოლირებული, მერხვე სხეულზე გარდა შინაგანი ძალებისა, მოქმედებს აგრეთვე ე.წ. გარეშე ძალები, გამოწვეული სისტემის გარეთ მყოფი სხეულების ზემოქმედებით (მაგალითად, პაერის წინააღმდეგობის ძალა).

თუ l სიგრძის უკიმად ძაფზე დაეკიდებთ m მასის მცირე ზომის მძიმე ტეირთს, მაშინ ეს ქანქარა შეიძლება ჩაითვალოს *მათემატიკურ ქანქარად*. წონასწორობის დროს სიმძიმის $P = mg$ ძალას აწონასწორებს ძაფის დრეკადობის T ძალა. თუ სხეულს წონასწორობიდან მცირე θ კუთხით გადაეხრით, მაშინ T ძალა უკვე ეერ გააწონასწორებს mg -ს (იხ. სურათი 8).



სურათი 8

პერიოდული მექანიკური რხევების მაგალითები და მერხვე სხეულზე მოქმედი ძალები

ამ ორი ძალის ტოლქმედი, როგორც ნახაზიდან ჩანს, მიმართულია წონასწორობის მდგომარეობისკენ და უდრის $mg \sin \theta$. თუ სხეულს ხელს გაეშვება, ამ ძალის მოქმედებით და ინერციის გამო ის დაიწყებს პერიოდულ მოძრაობას (რხევას) წონასწორული მდგომარეობის მიმართ.

ერთი სრული რხევის შესრულებისთვის საჭირო დროის ინტერვალს (T) (რომლის განმავლობაში მერხვეი სხეული ბრუნდება საწყის მდგომარეობაში) რხევის პერიოდი ეწოდება. რხევის სიხშირე ν გვიჩვენებს დროის ერთეულში შესრულებული რხევათა რიცხვს:

$$\nu = \frac{1}{T} \quad (\text{II.2.2.1.1})$$

SI სისტემაში T იზომება წამებში (წმ), სიხშირე - პერცებში (პც).

$$1 \text{ პც} = \frac{1}{\text{წმ}} = 1 \text{ წმ}^{-1}.$$

გამოთვლებში ხშირად გამოიყენება ე.წ. ციკლური სიხშირე $\omega = 2\pi\nu$.

ციკლური სიხშირე 2π წამში შესრულებული რხევათა რიცხვია.

მათემატიკური ქანქარას რხევის პერიოდი $T=2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$, სადაც l - ძაფის სიგრძეა, g - სიმძიმის ძალის აჩქარება.

ზამბარიანი ქანქარას რხევის პერიოდი $T=2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$, სადაც k - ზამბარის სი-

ხისტება, m - მერხვეი სხეულის მასა.

რხევას, რომელიც მხოლოდ შინაგანი ძალებით სრულდება თავისუფალი რხევა ეწოდება. აღსანიშნავია ის გარემოება, რომ თავისუფალი რხევა ყოველთვის მიღწევადია. ასეთი რხევების ამპლიტუდა დროის მიხედვით მონოტონურად მცირდება და ადრე, თუ გვიან იგი ყოველთვის უტოლდება ნულს. ამას განაპირობებს მერხვე სისტემაზე მოქმედი წინააღმდეგობის ძალები, რომელთა დაძლევაზე იხარჯება ენერგია.

როდესაც მერხვე სხეულზე შინაგანი ძალებთან ერთად მოქმედებს გარეშე პერიოდული ძალებიც, ასეთ პირობებში აღძრულ რხევას იძულებითი რხევა ეწოდება.

როდესაც წინააღმდეგობის ძალა მცირეა, რხევა შეიძლება გაგრძელდეს საკმაოდ დიდხანს და დროის გარკვეულ ინტერვალში იგი შეიძლება განვიხილოთ როგორც მიუღწევადი თავისუფალი რხევა.

ასეთი სახის თავისუფალი რხევის სრულყოფილი აღწერისთვის აუცილებელია, ვიცოდეთ წონასწორობიდან მერხვეი სხეულის გადაადგილების (კოორდინატის) X დროზე დამოკიდებულება:

$$X = X(t)$$

ამ დამოკიდებულების მოსაძებნად საჭიროა გამოვიყენოთ სხეულის მოძრაობის ძირითადი განტოლება (ნიუტონის მეორე კანონი):

$$\vec{F} = m\vec{a}$$

ჩვენს შემთხვევაში $F = mg \sin \theta$, ე.ი. $ma = mg \sin \theta$, $a = g \sin \theta$, ე.ი. აჩქარება პერიოდული ფუნქციაა (რადგან $\sin \theta$ პერიოდული ფუნქციაა). ამიტომ დამოკიდებულება მერხვეი სხეულის მდებარეობასა (კოორდინატსა) და დროს შორის - $X(t)$ პერიოდული ფუნქციით უნდა განისაზღვრებოდეს. ელემენტარული გარდაქმნებით* მტკიცდება, რომ

$$X = A \sin (\omega t + \varphi), \quad (\text{II.2.2.12})$$

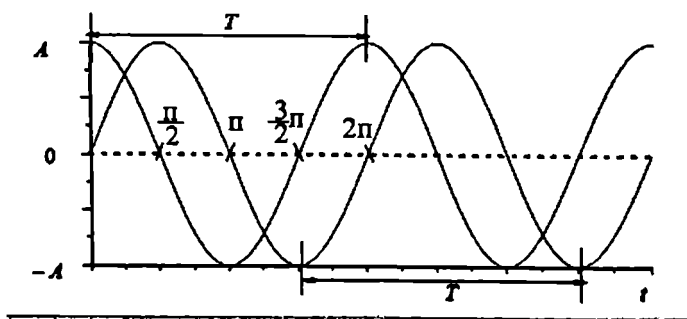
სადაც A - რხევის ამპლიტუდაა, X -ის მაქსიმალური მნიშვნელობა; ω - რხევის ციკლური სიხშირეა; $(\omega t + \varphi)$ - რხევის ფაზაა, რომელიც განსაზღვრავს სხეულის კოორდინატს X დროის ნებისმიერ მომენტში; φ - საწყისი ფაზა (რხევის ფაზა $t = 0$ მომენტში).

როდესაც მერხვეი სიდიდის ცვლილება (X -ის ცვლილება) აღიწერება სინუსის, ან კოსინუსის ფუნქციით, ასეთ რხევას პარმონიული რხევა ეწოდება. განტოლება (II.2.2.12) - პარმონიული რხევის განტოლებაა.

პარმონიული რხევის აღწერა შეიძლება როგორც სინუსის, ისე კოსინუსის ფუნქციის საშუალებით (რხევის საწყისი ფაზები იქნება სხვადასხვა) (იხილე სურათი 9):

$$X = A \sin (\omega t + \varphi) = A \cos (\omega t + \beta), \quad (\text{II.2.2.1.3})$$

სადაც $\varphi = \beta + \pi/2$.



სურათი 9

ქანქარის X კოორდინატის დროზე დამოკიდებულების ასახვა სინუსისა და კოსინუსის ფუნქციებით

ყოველ პარმონიულად მერხვე სისტემას შეესაბამება მექანიკური ენერგიის გარკვეული მარაგი. ჩვენს მიერ განხილულ პარმონიულ რხევებში წინააღმდეგობის ძალა იმდენად მცირეა, რომ იგი დროის მცირე ინტერვალში არ იწვევს სის-

* ეს გარდაქმნები მოითხოვს უმაღლესი მათემატიკის ელემენტების გამოყენებას, რასაც თავს შევჩერებულად ვარიდებთ.

ტემის მოძრაობის არსებით ცვლილებებს. ამიტომ განხილული მერხევი სისტემის ენერგიის მარაგი დროის იმ ინტერვალში თითქმის მუდმივი რჩება და რხევაც, ცხადია, არ მიიღევა. მერხევი სისტემის სრული მექანიკური ენერგია პოტენციური და კინეტიკური ენერგიების ჯამს შეადგენს და იგი განხილულ შემთხვევაში მუდმივი სიდიდეა:

$$E_j = E_p = \text{const.}$$

ამიტომ წონასწორულ მდგომარეობაში მერხევი სხეულის კინეტიკური ენერგია მაქსიმალურია, ხოლო პოტენციური ენერგია ნულის ტოლია. წონასწორული მდგომარეობიდან მაქსიმალურად გადახრილი მერხევი სხეულის კინეტიკური ენერგია ნულის ტოლია, ხოლო პოტენციური ენერგია მაქსიმალურია.

რეალურად ყოველი მერხევი სისტემა პერიოდულად ცვლადი ან დრეკადი ძალის გარდა განიცდის წინააღმდეგობის ძალის ზემოქმედებას; ამ ძალის დაძლევაზე იხარჯება სისტემის ენერგიის ნაწილი. ამის გამო რხევის ამპლიტუდა თანდათან მცირდება და გარკვეული დროის შემდეგ რხევა მიიღევა. ამრიგად, *ნებისმიერი თავისუფალი რხევა ყოველთვის მიღევალია.*

თუ გავითვალისწინებთ მერხვე სისტემაზე მოქმედ ყველა ძალას, მიღევალი რხევის ამპლიტუდისათვის მივიღებთ შემდეგ გამოსახულებას:

$$A(t) = A_0 e^{-\beta t} \quad (\text{II.2.2.14})$$

სადაც A_0 გვიჩვენებს მიღევალი რხევის ამპლიტუდის მნიშვნელობას დროის საწყის ($t = 0$) მომენტში; β - მიღევალობის კოეფიციენტი. დამოკიდებულია გარემოს წინააღმდეგობის ძალებზე, e - ნეპერის რიცხვი ($e = 2.72$).

როგორც ვხედავთ, რხევის მიღევალობის სიქარვე β -ზეა დამოკიდებული. რაც უფრო დიდია β , მით უფრო სწრაფად მიიღევა რხევა. სიდიდე $\frac{1}{\beta}$ გვიჩვენებს დროის იმ ინტერვალს, რომლის განმავლობაში რხევის ამპლიტუდა $e = 2.72$ -ჯერ შემცირდება.

მართლაც, თუ $t = \frac{1}{\beta}$, $A(t) = A_0 e^{-\beta t} = A_0 e^{-\beta / \beta} = A_0 e^{-1} = A_0 / e$.

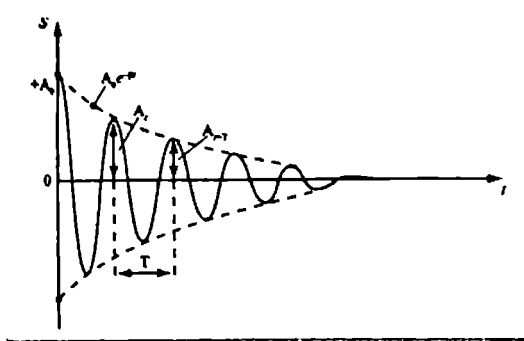
მიღევალი რხევებისათვის კოორდინატის - $X(t)$ და ამპლიტუდის - $A(t)$ დროზე დამოკიდებულების გარაფიკული გამოსახულება მოცემულია სურათზე 10. ამგვარად, მიღევალი რხევების ამპლიტუდა $A(t)$ დროზეა დამოკიდებული, და რხევის განტოლება იღებს ასეთ სახეს:

$$X = A(t) \sin (\omega_0 t + \varphi) = A_0 e^{-\beta t} \sin (\omega_0 t + \varphi)$$

მიღევალი რხევის სიხშირის (ω) კავშირი მერხევი სხეულის საკუთარ ციკლურ სიხშირესთან (ω_0) გამოიხატება შემდეგი განტოლებით:

$$\omega^2 = \omega_0^2 - \beta^2$$

თუ მიღევალობის კოეფიციენტი $\beta < \omega_0$ -ზე, რხევა განხორციელდება, რადგან $\omega > 0$. წინააღმდეგ შემთხვევაში ($\beta \geq \omega_0$) რხევას ადგილი არ ექნება. ამრიგად, მიღევალი რხევის სიხშირე ყოველთვის ნაკლებია, ვიდრე საკუთარი სიხშირე.



სურათი 10

მიღებული რხევის გრაფიკი და ამპლიტუდის (A) დროზე დამოკიდებულება (წყვეტილი ხაზი)

(Paul Davidovich "Physics in Biology and Medicine", third edition, 2007)

რხევის მიღვეადობას ახასიათებენ მიღვეადობის ლოგარითმული დეკრემენტით:

$$\lambda = \ln \frac{A(t)}{A(t+T)}$$

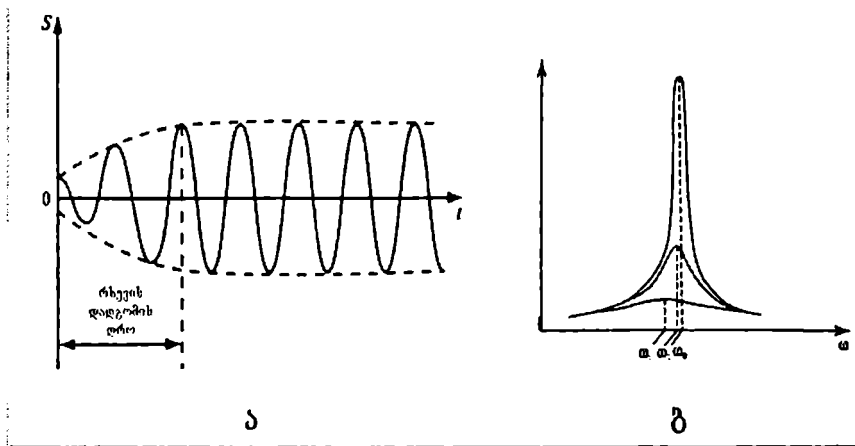
აქ $A(t)$ - ამპლიტუდაა დროის t მომენტში, $A(t + T)$ - ამპლიტუდაა ერთი პერიოდის შემდეგ. (II.2.2.14) ფორმულის გათვალისწინებითაა მარტივი გარდაქმნებით მივიღებთ რომ $\lambda = \beta T$.

მაშასადამე, თავისუფალი რხევების განხილვისას ენახეთ, რომ როდესაც რხევითი პროცესი მიმდინარეობს მხოლოდ შინაგანი ძალების მოქმედებით, იგი ყოველთვის მიღვეადია. რხევის მიღვეადობას განაპირობებს გარემოს მხრიდან მერხვე სხეულზე მოქმედი წინააღმდეგობის ძალა, რომლის დაძლევაზე თანდათანობით იხარჯება მერხვეი სისტემის მთელი ენერგია. მიუღვეადი რხევის მისაღებად საჭიროა მერხვე სისტემას პერიოდულად გადაეცეთ ენერგიის გარკვეული რაოდენობა. ენერგიის ასეთ გადაცემას შეეძლებოდა მერხვე სისტემაზე გარეშე პერიოდული ძალის მოქმედებით.

რხევას, რომელიც მიმდინარეობს გარეშე პერიოდულად ცვლადი ძალის მოქმედებით, იძულებითი რხევა ეწოდება.

დადგენილია, რომ იძულებითი რხევის ამპლიტუდა დამოკიდებულია გარეშე პერიოდული ძალის სიხშირეზე (ω). ω -ს გარკვეული მნიშვნელობისთვის (როცა ის ახლოსაა რხევის საკუთარ სიხშირესთან - ω_0) იძულებითი რხევის ამპლიტუდა აღწევს მაქსიმალურ მნიშვნელობას. ამ მოვლენას **რეზონანსი** ეწოდება, ხოლო გარეშე პერიოდული ძალის სიხშირის ამ მნიშვნელობას - **რეზონანსულ სიხშირეს** ეწოდებენ (სურათი 11). მრიგად, **რეზონანსი ეწოდება იძულებითი რხევის ამპლიტუდის მკვეთრ ზრდას, როდესაც მოქმედი ძალის სიხშირე სხეულის რხევის საკუთარი სიხშირის ტოლია.**

რეზონანსი ელინდება არა მარტო მექანიკურ, არამედ სხვა სახის რხევებშიც (ელექტრული, აკუსტიკური, სითბური და სხვ.) რეზონანსის მოვლენას ფართო გამოყენება აქვს მეცნიერებასა და ტექნიკაში (მაგალითად, რადიოტექნიკაში, აკუსტიკაში და ა. შ.).



სურათი 11

რეზონანსი. ა - რხევის ამპლიტუდის დამყარების შემდეგ მისი მნიშვნელობა არ იცვლება; ბ - ამპლიტუდის დამოკიდებულება იძულებითი რხევის სიხშირესა (ω) და რხევის საკუთარ სიხშირეს, ω_0 შორის ბალანსზე (როცა $\omega = \omega_0$ ამპლიტუდა მკვეთრად იზრდება).

(Paul Davidovich "Physics in Biology and Medicine", third edition, 2007)

გარდა სასარგებლო მოქმედებისა, რეზონანსს ახასიათებს მანეჟ მოქმედებაც. მისი არსებობა აუცილებლად უნდა გავითვალისწინოთ ტექნიკაში (სხვადასხვა ტექნიკური მოწყობილობის კონსტრუირებისას), მედიცინაში და ა.შ. ცოცხალი ქსოვილებისა და ორგანოებისთვის დამახასიათებელია საკმაოდ დიდი მიღწევადობის კოეფიციენტი. ამის გამო ჩვეულებრივს პირობებში რეზონანსის მოვლენას არ მივყავართ მათ დაზიანებამდე. მაგრამ, თუ გარეშე მექანიკური ენერგია საკმაოდ ძლიერია, რეზონანსის პირობებში მას ადამიანის ორგანიზმის დაზიანება შეუძლია. ეს გარემოება აუცილებლად უნდა იყოს გათვალისწინებული სხვადასხვა მექანიზმის კონსტრუირებისას, რომელთა სიახლოვეს უხდება ყოფნა ადამიანს მუშაობის პროცესში.

დასასრულ, განვიხილოთ იძულებითი რხევების ერთ-ერთი კერძო სახე. რომელსაც **ავტორხევებს** უწოდებენ. როგორც ვნახეთ, იძულებითი რხევისას მერხევი სისტემა განიცდის გარეშე პერიოდული ძალის ზემოქმედებას. სწორედ ამ ზემოქმედების მომენტში მერხევი სისტემა იძენს იმ ენერგიას, რომელსაც იგი ხარჯავს წინააღმდეგობის ძალების დასაძლევად. ჩვეულებრივად, იძულებით რხევებში გარეშე ძალთა ზემოქმედების დროის შერჩევა არაა დამოკიდებული მერხევი სისტემაზე. ამიტომ ეს ზემოქმედება შეიძლება არ თანხედებოდეს დროში

რხევის ტაქტს. ასეთ პირობებში, გარეშე ძალის ზემოქმედების მიუხედავად, რხევა გაპლიერების ნაცვლად შეიძლება შესუსტდეს, ან სრულიად შეწყდეს.

ჩვეულებრივ, მიღევად რხევებში რხევის სიხშირე და ამპლიტუდა დამოკიდებულია მერხვეი სისტემის პარამეტრებზე. იძულებითი რხევის შემთხვევაში რხევის სიხშირეს განსაზღვრავს გარე პერიოდული ძალის სიხშირე.

ავტორხევების შემთხვევაში კი რხევითი სისტემა და ენერგიის წყარო გაერთიანებულია ერთ სისტემად, რხევით სისტემასა და ენერგიის წყაროს შორის არსებული უკუკავშირის მექანიზმის წყალობით, რხევა წარმოებს სისტემის საკუთარი სიხშირით და წარმოადგენს მიუღევად რხევას. *ავტორხევები ზოგადად იძულებითი რხევებისაგან იმით განირჩევა, რომ გარეშე ზემოქმედების მომენტს თვით მერხვეი სისტემა აწესრიგებს და ეს ზემოქმედება მერხვე სისტემაში არსებული ენერგიის წყაროდან ხდება.*

ავტორხევის მაგალითად შეიძლება მოვიყვანოთ საათი, სადაც ქანქარა პერიოდულად განიცდის ბიძგებს შეკუმშული ზამბარის ან მაღლა აწეული ტვირთის მოქმედებით. ამ ბიძგების დროს შეკუმშული ზამბარის პოტენციური ენერგია გარდაიქმნება ქანქარას კინეტიკურ ენერგიად. ამავე დროს ბიძგების სიხშირე შეესაბამება ქანქარას რხევის საკუთარ სიხშირეს.

ადამიანში ავტორხევების ტიპური მაგალითია გულის მუშაობა. გულის მუშაობის რიტმი დამოკიდებულია იმ საშუაოს სიდიდესა და ხასიათზე, რომელსაც ადამიანი ასრულებს, თავის მხრივ გული ორგანიზმისაგან დროის ნებისმიერ მომენტში მოითხოვს დატვირთვის შესაბამის ენერგიას. გულისა და მთლიანი ორგანიზმის ასეთი შეთანხმებული მუშაობის გამო გული მიუღევად პერიოდულ ავტორხევას ასრულებს.

საკონტროლო კითხვები და ამოცანები:

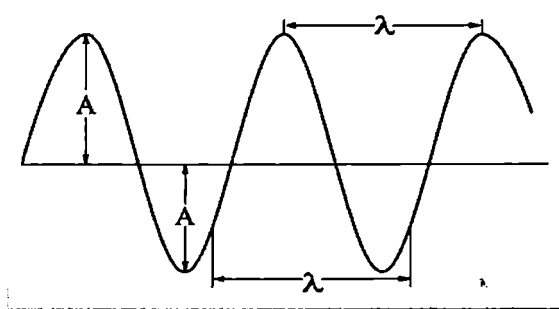
1. როგორ რხევებს ეწოდება პარმონიული? მიეკუთვნება თუ არა მიღევადი რხევა პარმონიულ რხევათა რიცხვს?
2. როგორ ჩაიწერება რხევის განტოლება ქანქარისთვის, თუ რხევის ამპლიტუდა 20 სმ-ია, ხოლო სიხშირე – 0,3 ჰც ($F_{\text{ხახუნის}} = 0$). რატომაა ფრჩხილებში მითითებული პირობა გასათვალისწინებელი?
3. დაფზე ჩამოკიდებული სხეულის მიერ შესრულებული რხევები რატომაა მიღევადი? რა განსხვავებაა ამ რხევებსა და საათის ქანქარას მიერ შესრულებულ რხევებს შორის?
4. გული იკუმშება $v = 100$ დარტემა/წუთში სიხშირით. რას უდრის საშუალოდ გულის ცემის ერთი დარტემის პერიოდი T ?

II.2.2 მექანიკური ტალღები

თუ დრეკად გარემოში რომელიმე ნაწილაკს მოვიყვანთ რხევით მოძრაობაში, ნაწილაკების ურთიერთქმედების გამო ეს მოძრაობა გადაეცემათ მის მეზობელ ნაწილაკებს, რომლებიც თავის მხრივ რხევით მოძრაობაში მოიყვანენ მათ მეზობლად მდებარე ნაწილაკებს და ა.შ..

ამგვარად, დრეკად გარემოში გავრცელება რხევითი მოძრაობა.

დრეკად გარემოში რხევითი მოძრაობის გავრცელების პროცესს *მექანიკურ ტალღას* უწოდებენ (სურათი 12).



სურათი 12

მექანიკური ტალღა (λ – ტალღის სიგრძე, A – ამპლიტუდა)

მანძილს, რომელზედაც გავრცელება ტალღა რხევის პერიოდის (T) განმავლობაში, ეწოდება *ტალღის სიგრძე* (λ) (სურათი 12).

$$\lambda = VT$$

$$V = \frac{\lambda}{T} = \lambda \nu, \text{ რადგან } T = \frac{1}{\nu}, \quad (\text{II.2.3.1.1})$$

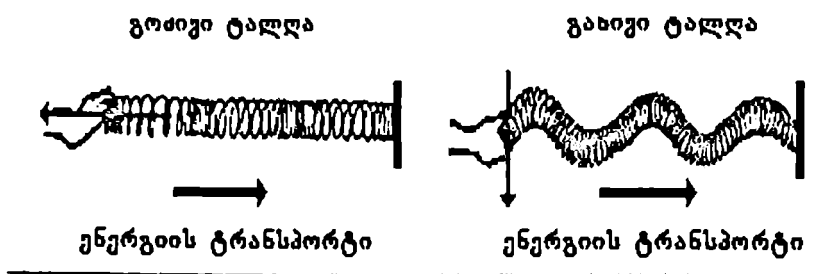
სადაც V – ტალღის გავრცელების სიჩქარე, T – რხევის პერიოდი, ν – რხევის სიხშირე.

ცხადია, რომ რაც უფრო შორსაა ნაწილაკი რხევის წყაროდან, მით უფრო გვიან იწყებს იგი რხევას. ე.ი. ტალღაში ნაწილაკები ერთ ფაზაში არ ირხევა. რაც უფრო შორსაა ნაწილაკი რხევის წყაროდან, მით უფრო ჩამორჩება მას იგი რხევის ფაზით. ნაწილაკები, რომელთა ფაზათა სხვაობა 2π -ს ჯერადია, ერთ ფაზაში ასრულებს რხევას. ამიტომ *ერთნაირ ფაზაში მერხვევ ორ უახლოეს ნაწილაკს შორის მანძილს (რომელთა რხევის ფაზათა სხვაობა უდრის 2π -ს) ტალღის სიგრძე ეწოდება* (სურათი 12).

უნდა აღინიშნოს, რომ გარემოში რხევის გავრცელება, ე.ი. ტალღური პროცესის აღძერა არაა დაკავშირებული ნაწილაკთა გადატანით მოძრაობასთან და ნივთიერების გადატანასთან. ამ დროს მხოლოდ ნაწილაკები ირხევა

წონასწორული მდგომარეობის მიმართ და მექანიკური ენერგია გადაიტანება ტალღის გავრცელების მიმართულებით.

იუ ცალკეული ნაწილაკის რხევის მიმართულება ემთხვევა ტალღის გავრცელების მიმართულებას. **ტალღა გრძივია**. **ტალღას** უწოდებენ **განივს** იმ შემთხვევაში, თუ ტალღის გავრცელების დროს ნაწილაკები ირხევა ტალღის გავრცელების პერპენდიკულარულად (სურათი 13).



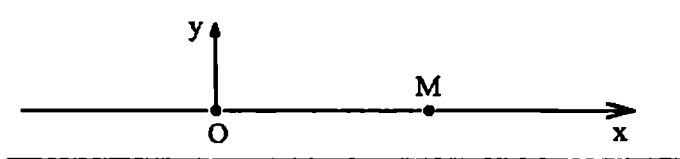
სურათი 13

განივი და გრძივი მექანიკური ტალღები

თუ მყარ სხეულებში ადგილი აქვს ძერის დეფორმაცია, აღიმდრება განივი ტალღა. სითხის ზედაპირული ტალღებიც განივია, ოღონდ ამ შემთხვევაში ტალღის წარმოქმნა გრავიტაციული და ზედაპირული დაჭიმულობის ძალით ხდება. განივია აგრეთვე ტალღა, რომელიც სისხლძარღვთა კედლის გასწვრივ ვრცელდება სისხლის მიმოქცევის პროცესში.

გრძივი ტალღები აღიმდრება და ვრცელდება როგორც მყარ, ასევე თხევად და აირად გარემოში.

ტალღური პროცესის აღწერისთვის აუცილებელია ვიცოდეთ ამ პროცესის დამახასიათებელი ფიზიკური სიდიდის ცვლილების კანონზომიერებანი სივრცესა და დროში. მექანიკური ტალღების შემთხვევაში ასეთ ფიზიკურ სიდიდეს წარმოადგენს მერხვეი ნაწილაკის გადაადგილება X ეთქვათ, ტალღა ვრცელდება OX ღერძის გასწვრივ შთანთქმის (მიღეუადობის) გარეშე. ასე რომ, ყველა წერტილის რხევის ამპლიტუდა ერთნაირია და A -ს ტოლია (სურათი 14).



სურათი 14

ტალღა ვრცელდება OX ღერძის გასწვრივ

O წერტილში მდებარე ნაწილაკის რხევის განტოლებაა:

$$Y = A \sin \omega_0 t, \quad (\text{II.2.3.1.2})$$

საწყისი ფაზა $\phi = 0$. OX ღერძის ნებისმიერ M წერტილში რხევა მიაღწევს რალაც τ დროის შემდეგ (ანუ დაგვიანებით), ამიტომ ამ წერტილში რხევის განტოლებას ექნება შემდეგი სახე:

$$Y = A \sin [\omega_0(t - \tau)]$$

თუ ტალღის გავრცელების სიჩქარე V , ხოლო M წერტილის კოორდინატია X ($OM = X$), მაშინ τ -ს მნიშვნელობის ($\tau = \frac{OM}{V} = \frac{X}{V}$) გათვალისწინებით, მივიღებთ:

$$Y = A \sin [\omega_0(t - \frac{OM}{V})] = A \sin [\omega_0(t - \frac{X}{V})] \quad (\text{II.2.3.1.3})$$

ამ განტოლებას ბრტყელი ტალღის განტოლებას უწოდებენ. განტოლებაში Y - გარემოს ნაწილაკის გადაადგილებაა წონასწორული მდგომარეობიდან, A - მაქსიმალური გადაადგილება (ამპლიტუდა), ω_0 - ციკლური სიხშირე, $X - M$ წერტილის კოორდინატია. როგორც ამ განტოლებიდან გამომდინარეობს, წონასწორული მდგომარეობის მიმართ გარემოს ნაწილაკების რხევა დამოკიდებულია ამ წერტილების კოორდინატებსა და დროზე. რადგან M წერტილი ნებისმიერად იყო არჩეული, ამიტომ ეს განტოლება განსაზღვრავს დრეკად გარემოში ნებისმიერი ნაწილაკის გადაადგილებას Y , როგორც x და t -ს ფუნქციას.

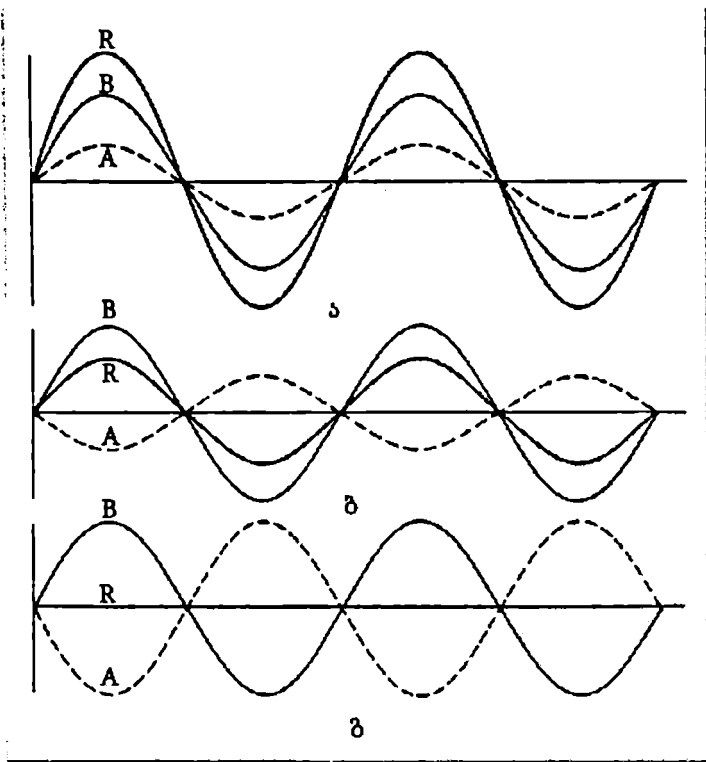
ნებისმიერი ბუნების ტალღების და მათ შორის მექანიკური ტალღების ძირითადი თვისებებია - *ინტერფერენცია, დიფრაქცია, არეკვლა და გარდატეხა*.

როდესაც ორი ან მეტი ტალღა ერთდროულად ვრცელდება გარემოში ისინი ერთმანეთთან შეხვედრისას წარმოქმნიან ახალ ტალღას, გაძლიერებულს, ან შესუსტებულს. ეს მოვლენა ცნობილია *ინტერფერენციის* სახელწოდებით. მდგრადი ინტერფერენცია დამახასიათებელია კოჰერენტული ტალღებისთვის. ორი ტალღა კოჰერენტულია, თუ მათ შორის ფაზათა სხვაობა მუდმივია, ან გაანინათ ერთნაირი ფაზები (სურათი 15).

დიფრაქცია - ტალღის მიერ დაბრკოლების შემოვლის პროცესია. ბგერითი ტალღების დიფრაქცია გეხვდება ყოველდღიურ ცხოვრებაში, როდესაც ჩვენ გვესმის ხმა, რომელიც მოდის რომელიმე დიდი საგნის უკან მდებარე წყაროსაგან.

ტალღის არეკვლა, როდესაც ტალღა გავრცელებისას ორი გარემოს გაყოფის ზედაპირიდან აირეკლება და ბრუნდება უკან. სრულად არეკლილი ტალღის ენერგია და გავრცელების სიჩქარე უცვლელი რჩება.

ტალღის გარდატეხა, როდესაც ტალღა ვრცელდება ერთი არიდან მეორეში და იცვლის მიმართულებას. გარდატეხის დროს ტალღის სიხშირე არ იცვლება, იცვლება ტალღის სიგრძე (ერთი არიდან მეორეში გადასვლის შედეგად ტალღის გავრცელების სიჩქარის ცვლილებების გამო).



სურათი 15

ერთნაირი სიხშირის ტალღების ინტერფერენცია: ა - ერთნაირი ფაზის და სხეადასხვა ამპლიტუდის ორი ტალღის ალგებრული ჯამი ($R = A + B$), ტალღა ძლიერდება; ბ - საწინააღმდეგო ფაზისა და სხეადასხვა ამპლიტუდის ორი ტალღის ალგებრული ჯამი ($R = A + B$), ტალღა სუსტდება; გ - საწინააღმდეგო ფაზისა და ერთნაირი ამპლიტუდის ორი ტალღის ($R = 0$) ალგებრული ჯამი, ტალღა ჩაქრება (ისრით „→“ ნაჩვენებია ტალღის გავრცელების მიმართულება) (Paul Davidovich "Physics in Biology and Medicine", third edition, 2007)

მექანიკური ტალღის განმარტებიდან გამომდინარეობს, რომ, როგორც წესი, გარემოში რხევა ვრცელდება არა ერთი, არამედ რხევის წყაროდან ყველა მიმართულებით. ასე რომ, ტალღურ პროცესში მონაწილეობს გარკვეულ მოცულობაში მყოფი ნაწილაკების საკმაოდ დიდი რიცხვი. დროის მიხედვით ეს მოცულობა თანდათან იზრდება. მისი ზრდის სისწრაფე დამოკიდებულია მოცემულ გარემოში ტალღის გავრცელების სიჩქარეზე (V). ზედაპირს,

რომელსაც მიაღწევს ტალღა დროის მოცემულ მომენტში, ტალღის *ფრონტი ეწოდება*, ხოლო ზედაპირს, რომელზედაც განლაგებული ნაწილაკები ერთი და იმავე ფაზაში ირხევა, *ტალღის ზედაპირი* ეწოდება. ამ განმარტებიდან გამომდინარეობს, რომ ტალღას გააჩნია მხოლოდ ერთი ფრონტი, ხოლო ტალღის ზედაპირი კი - მრავალია.

II.2.3 ბგერა

ბგერა - მექანიკური ტალღაა, რომელიც ვრცელდება დისკრეტულ დრეკად გარემოში - აირში, სითხეში, მყარ გარემოსა და პლაზმაში. ბგერა ვაკუუმში არ ვრცელდება.

რადგან ბგერა მექანიკურ ტალღას წარმოადგენს, მისთვის დამახასიათებელია ყველა ის თვისება და კანონზომიერება, რომელიც გამოვლენილია მექანიკური ტალღებისთვის. ბგერა შეიძლება განიხილებოდეს, როგორც გარემოს მექანიკური კუმშვა-გაფართოება. დრეკადი გარემოს თვისებები, ელასტიურობა და დეფორმებადობა გასათვალისწინებელია ბგერითი ტალღის შესწავლის დროს. ტალღა იწვევს წნევის ცვალებადობას დრეკად გარემოში და მისი შემადგენელი ნაწილაკების რხევას, რომელიც გამოიხატება მათი გადანაცვლებით სივრცესა და დროში. ბგერა აირებში, პლაზმასა და სითხეებში გრძივი ტალღების სახით ვრცელდება. ასეთი ტალღები ცნობილია, აგრეთვე, *კომპრესიული (კუმშვითი) ტალღების* სახელწოდებით. დრეკადი გარემოს თვისებებს სითხეები და აირები აელენს მხოლოდ შეკუმშვის და გაფართოების დროს; ფენების ურთიერთ-წანაცვლებისას მათში დრეკადი გარემოს თვისებები არ ვლინდება, არ აღიძვრება ძალები, რომლებიც დააბრუნებენ წანაცვლებულ ფენებს საწყის მდგომარეობაში, რომელთა არსებობა აუცილებელია გარემოში განივი ტალღების აღძვრისთვის, ამიტომ მათში განივი ტალღა არ ვრცელდება. მყარი სხეული კი ნებისმიერი სახის დეფორმაციისას, მათ შორის ფენების ურთიერთწანაცვლებისას (ძვრის დეფორმაცია), აელენს დრეკადი გარემოს თვისებებს, ამიტომ მყარ სხეულში ბგერა ვრცელდება როგორც გრძივი, ასევე განივი ტალღების სახით.

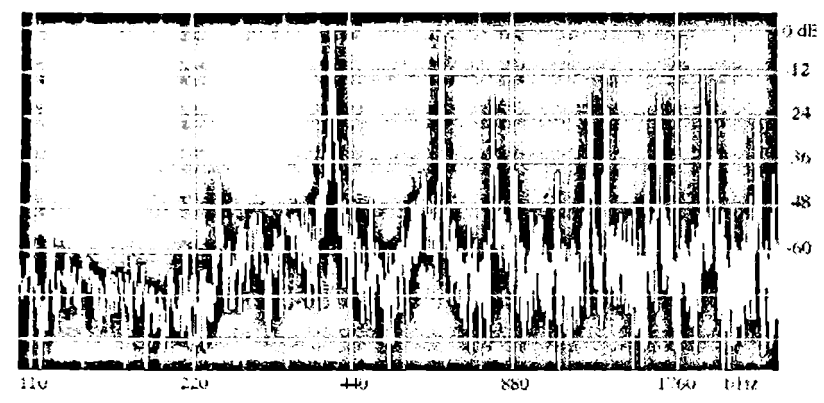
გრძივი ბგერითი ტალღები - ესაა ლოკალური კუმშვით და გაფართოებით განპირობებული ცვალებადი წნევის და სიმკრივის ფლუქტუაციები წონასწორული მდგომარეობის გარშემო.

განივი ბგერითი ტალღები განპირობებულია მყარი სხეულის ცვლადი დეფორმაციით (ფენების ურთიერთწანაცვლებით) ტალღების გავრცელების პერპენდიკულარული მიმართულებით.

ბგერითი ტალღა ნებისმიერი ბუნების მექანიკური რხევების გავრცელებაა დრეკად გარემოში; მათში რხევითი პროცესები აღიწერება არაპარმონიული პერიოდული ფუნქციებით. ცნობილია, რომ ნებისმიერი არაპარმონიული პერიოდული ფუნქცია შეიძლება წარმოვიდგინოთ როგორც სხვადასხვა სიხშირის პარმონიული ფუნქციის ჯამი (ფურიეს მწკრივი)*. ეს იმას ნიშნავს, რომ ყოველი რეალური ბგერა შეიძლება განვიხილოთ, როგორც სხვადასხვა სიხშირის მარტივი (პარმონიული) რხევის ზედდების შედეგი. ზედდებაში მონაწილე სიხშირეთა ერთობლიობას რთული ბგერის *აქუსტიკურ (ან პარმონიულ) სპექტრს* უწოდებენ.

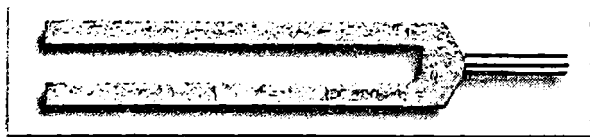
*ეს დებულება მათემატიკურად დამტკიცებულია ფურიეს მიერ

როდესაც აკუსტიკური სპექტრი წყვეტილია, ე.ი. მოიცავს სიხშირეთა მხოლოდ განსაზღვრულ დისკრეტულ მნიშვნელობებს, მაშინ მას *რთულ ტონს (ბგერას)* უწოდებენ (სურათი 16). ადამიანის ხმა და მუსიკალური ინსტრუმენტების უმრავლესობა წარმოქმნის რთულ ბგერებს. ბგერას, რომლის აკუსტიკური სპექტრი სიხშირეთა უწყვეტ თანმიმდევრობას მოიცავს, *ხმაური* ეწოდება.



სურათი 16
რთული ბგერის აკუსტიკური სპექტრი

როდესაც მუსიკალური ბგერის აკუსტიკური სპექტრი მხოლოდ ერთ რომელიმე სიხშირეს მოიცავს, მაშინ მას *მარტივ ტონს* უწოდებენ. მარტივ ტონს იძლევა, მაგალითად, *კამერტონი* (სურათი 17), სიმი (შეხების შემთხვევაში), ადამიანის სტვენა და ა.შ., ხოლო რთულ ტონს – ყველა მუსიკალური ინსტრუმენტი, ადამიანის მეტყველების აპარატი და სხვა.



სურათი 17
კამერტონი

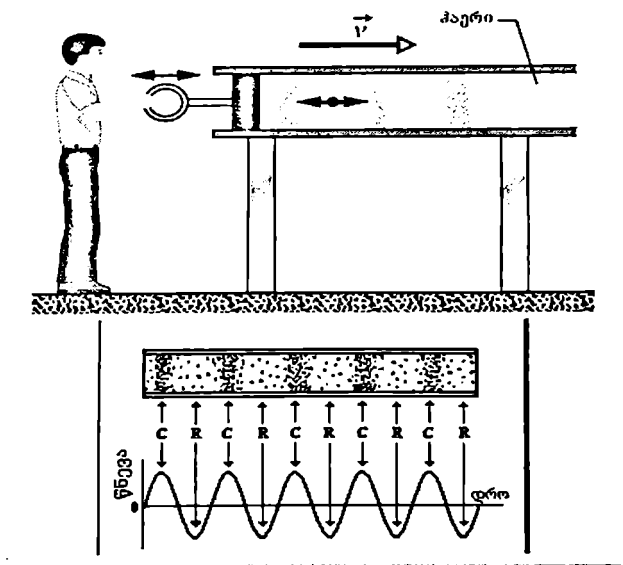
რთული ტონის აკუსტიკურ სპექტრში ყველაზე დაბალი სიხშირის (*f*) მარტივ ტონს (პირველ ჰარმონიკას) *ძირითადი ტონი* ეწოდება, ხოლო დანარჩენ ტონებს – *ობერტონები*. ობერტონების სიხშირე ძირითადი ტონის სიხშირის მთელი ჯერადია ($2f$, $3f$ და ა.შ.). ბგერითი ტალღის უმარტივესი სახე სინუსოიდური ტალღაა. იგი გრძივი ტალღაა. ასეთი ტალღა დამახასიათებელია *მარტივი ტონისთვის*. მარტივი ტონის (ტალღის) გავრცელება გარემოს ნაწილაკების

რხევას იწვევს; ეს რხევა შეიძლება გამოვსახოთ სინუსის ან კოსინუსის ფუნქციით (იხ. ტალღის განტოლება):

$$Y(x,t) = Y_0 \sin [\omega_0(t - \frac{x}{V})], \quad (\text{II.2.3.2.1})$$

სადაც $Y(x,t)$ - გარემოს ნაწილაკის გადაადგილებაა წონასწორული მდგომარეობიდან, Y_0 - გარემოს ნაწილაკის მაქსიმალური გადახრა - ამპლიტუდა, ω_0 - ციკლური სიხშირე ($\omega_0 = 2\pi\nu$), V - ბგერითი ტალღის გავრცელების სიჩქარე მოცემულ გარემოში, ხოლო $\frac{x}{V}$ კი x მონაკვეთის გავლისთვის საჭირო დრო. განტოლება (II.3.3.1) მართებულია როგორც გრძივი, ასევე განივი ტალღისთვის. $Y(x,t)$ საშუალებით შეიძლება გამოისახოს ტალღის ნებისმიერი პარამეტრი - ტალღის წნევა, გარემოს სიმკრივე, გარემოს ნაწილაკის მდებარეობა.

ბგერითი ტალღის გავრცელება დისკრეტულ გარემოში იწვევს გარემოს ნაწილაკების (აირის მოლეკულების) ფიზიკურ გადაადგილებას წონასწორობის მდგომარეობის მიმართ (სურათი 18). ბგერითი ტალღის გავრცელების დროს გარემოს ნაწილაკები განიცდის პერიოდულ გადაადგილებას (ირხვეიან). ამ დროს ბგერითი ტალღის ენერგია გადაიცემა გარემოს ნაწილაკებზე და ამ ენერგიის ნაწილი კინეტიკურ ენერგიად გარდაიქმნება.



სურათი 18

დისკრეტულ გარემოში ბგერითი ტალღის გავრცელების შედეგად გარემოს ნაწილაკები ასრულებს რხევით მოძრაობას, ნაჩვენებია გარემოს ნაწილაკების კუმშვა (C) - გაფართოება (R) და წნევის შესაბამისი ცვლილებები.

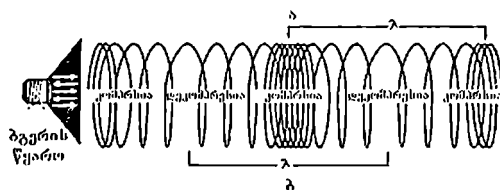
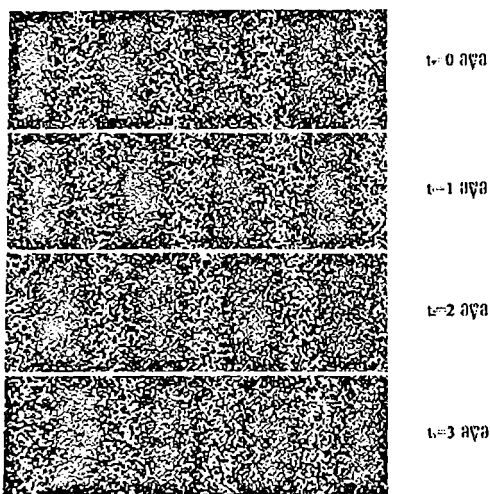
(Nico A.M. Schellart. "Compendium of Medical Physics, Medical Technology and Biophysics", Amsterdam, 2009)

ბგერითი ტალღა – კომპრესიული ტალღაა. გარემოზე მისი მექანიკური ზემოქმედება ტალღის მიერ წარმოქმნილი წნევის პერიოდული ცვალებადობითაა განპირობებული და მისი ეფექტი წნევის ცვალებადობის ამპლიტუდით (რაც ტალღის ინტენსივობას შეესაბამება) განისაზღვრება. მაგალითად, ძლიერი აკუსტიკური ტალღის სმენის აპარატის კომპონენტებზე (დაფის აკზე, ძელოვან აპარატზე, ბაზალურ მემბრანაზე) დამაზიანებელი მოქმედება და ა.შ.

როგორც აღვნიშნეთ, ბგერა აირში ვრცელდება გრძივი ტალღის სახით; რხევას განიცდის აირის მოლეკულები, აგრეთვე აირის წნევის, ან სიმკრივის მახეულებები.

სურათზე 19 ილუსტრირებულია გრძივი ბგერითი ტალღის გავრცელება. ნაწილაკის რხევა წონასწორობის მდგომარეობის გარშემო იწვევს წნევის ცვალებადობას (მომატებას და შემცირებას). ბგერითი ტალღის წნევას p ემატება გარემომცველი არის (ატმოსფერული) წნევა.

ბგერის გავრცელების მიმართულება →



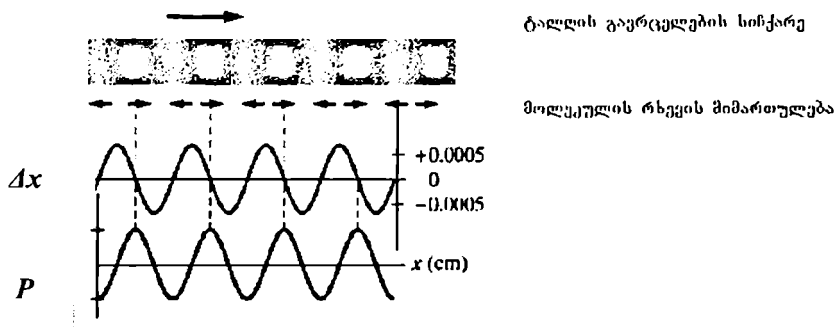
სურათი 19

ა – ტალღის (შეკუმშვა-გაფართოების) გავრცელება ყოველი
თითო მილიწამის შემდეგ; ბ – გრძივი ტალღის გავრცელების მოდელი
(Nico A.M. Schellart. "Compendium of Medical Physics, Medical Technology and Biophysics",
Amsterdam, 2009)

ბგერითი ტალღის გაერცელება დისკრეტულ გარემოში აღძრავს გარემოს ნაწილაკების (აირის მოლეკულების) რხევას წონასწორობის მდგომარეობის გარშემო. მოლეკულების გადაადგილება განაპირობებს პოტენციური ენერგიის დაგროვებას, რომელიც მუდმივად გარდაიქმნება მოლეკულის მოძრაობის კინეტიკურ ენერგიად. აღსანიშნავია, რომ აირებში ნაწილაკების ქაოსური მოძრაობის (და არა ტალღის გაერცელების) სიჩქარე (20°C -ზე) დაახლოებით

$100 \frac{\text{მ}}{\text{წმ}}$ -ის ტოლია. ბგერითი ტალღით გამოწვეული ნაწილაკების მოძრაობის

სიჩქარე მერყეობს რამდენიმე $\frac{\text{მმ}}{\text{წმ}}$ -დან - $\frac{\text{მმ}}{\text{წმ}}$ -ის ფარგლებში. ტალღის გაერცელების დროს ხდება ბგერითი ტალღით ინდუცირებული და ქაოსური მოძრაობის ზედდება (სურათი 20).



სურათი 20

გარემოს ნაწილაკების რხევისა და წნევის ცვლილებების გრაფიკული გამოსახულება

(Nico A.M. Schellart. "Compendium of Medical Physics, Medical Technology and Biophysics", Amsterdam, 2009)

II.2.2.3.1 ბგერითი ტალღების ფიზიკური მახასიათებლები

ბგერითი ტალღების ფიზიკურ მახასიათებლებს მიეკუთვნება: სიხშირე, ტალღის სიგრძე, პერიოდი, ამპლიტუდა, ინტენსივობა, გაერცელების სიჩქარე და მიმართულება (ცხრილი 4). ტალღის გაერცელების გარემო ხასიათდება ფიზიკური პარამეტრებით – *აკუსტიკური იმპედანსით* (წინააღობით).

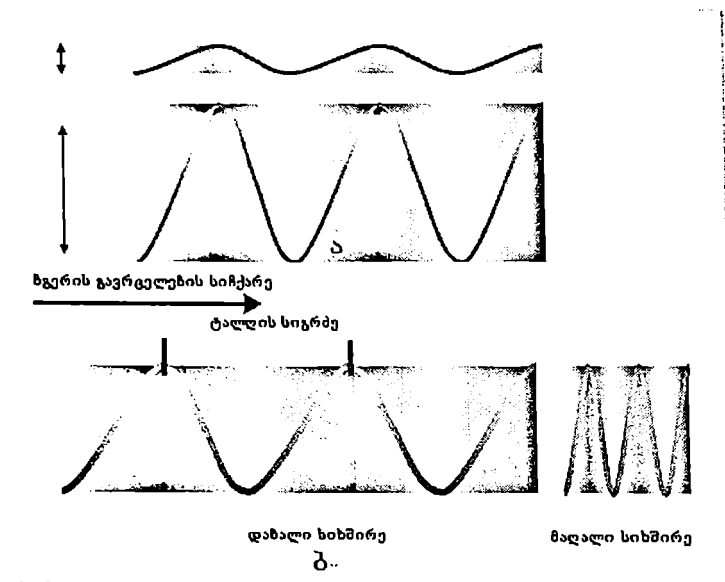
ბგერითი ტალღის ამპლიტუდა – მაქსიმალური სხვაობა მაღალ და დაბალ წნევებს, ან გარემოს სიმკვრივეებს შორის (სურათი 21ა).

ბგერითი ტალღის სიხშირე – პიკების რაოდენობა, რომელიც გადის რაიმე ფიქსირებულ წერტილში 1 წამში (სურათი 21 ბ).

ბგერითი ტალღის წნევა (ბრტყელი ტალღისათვის):

$$p = \rho a V, \quad (\text{II.2.3.2.1})$$

სადაც a - გარემოს ნაწილაკის მოძრაობის სიჩქარეა, ρ - გარემოს სიმკვრივე, V - ტალღის გავრცელების სიჩქარე ამ გარემოში.



სურათი 21

ა - სხვადასხვა ამპლიტუდის და ტოლი სიხშირის ბგერითი ტალღები;
 ბ - სხვადასხვა სიხშირის და ტოლი ამპლიტუდის ბგერითი ტალღები

ცხრილი 4

ბგერითი ტალღების და ტალღის გავრცელების გარემოს ფიზიკური
 მახასიათებლები და მათი განზომილებები

შიდიკი	დრო, პერიოდი	სიხშირე	სიგრძე, გადაადგილება	ფართობი	მოცულობა	სიჩქარე	მასა	სიმკვრივე	ძალა	ჭემა	აკუსტიკური იმპედანსი	ინტენსიობა
სიმბოლო, ფორმულა	t, T	$\nu = \frac{1}{T}$	L	S	V	$\nu = \frac{l}{T}$	m	$\rho = \frac{m}{V}$	F	$p = \frac{F}{S}$	Z	I
ერთეუ- ლები (SI)	წმ	წმ ⁻¹ (ჰც)	მ	მ ²	მ ³	$\frac{მ}{წმ}$	კგ	$\frac{კგ}{მ^3}$	ნ	$\frac{ნ}{მ^2}$, პა	$\frac{კგ}{წმ^2}$, რაილი	$\frac{ვტ}{მ^2}$

აკუსტიკური იმპედანსი (ტალღური წინაღობა), ან ბგერის იმპედანსი Z – იმ გარემოს მნიშვნელოვანი ფიზიკური მახასიათებელია, რომელშიც ვრცელდება ბგერითი ტალღა. დამოკიდებულია გარემოს სიმკვრივეზე და მის დრეკად თვისებებზე, იმპედანსი არ არის დამოკიდებული ტალღის სიხშირეზე.

$$Z = \rho V, \quad (\text{II.2.3.2.2})$$

სადაც ρ - გარემოს სიმკვრივეა, V - ბგერითი ტალღის გავრცელების სიჩქარე. იმპედანსის ერთეული – 1 რაილი = $\frac{\text{კგ}}{\text{მ}^3} \times \frac{\text{მ}}{\text{წმ}} = \frac{\text{კგ}}{\text{მ}^2 \text{წმ}}$.

ცხრილში 5 ნაჩვენებია ბგერითი ტალღის გავრცელების სიჩქარის, გარემოს სიმკვრივისა და აკუსტიკური იმპედანსის მნიშვნელობები სხვადასხვა ბიოარისთვის.

ცხრილი 5

ბგერითი ტალღის გავრცელების სიჩქარის, გარემოს აკუსტიკური იმპედანსისა და სიმკვრივის მნიშვნელობები სხვადასხვა ბიოარისთვის

(Nico A.M. Schellart. "Compendium of Medical Physics, Medical Technology and Biophysics", Amsterdam, 2009)

მასალები	სიმკვრივე ρ (კგ/მ ³)	სიჩქარე V (მ/წმ)	იმპედანსი Z (რაილი)
ჰაერი (20°C)	1.20	343	412
წყალი (37°C)	$1 \cdot 10^3$	1525	$1.52 \cdot 10^6$
თაღის ტენი	$1.02 \cdot 10^3$	1530	$1.56 \cdot 10^6$
კუნთი	$1.04 \cdot 10^3$	1580	$1.64 \cdot 10^6$
ცხიმი	$0.92 \cdot 10^3$	1450	$1.33 \cdot 10^6$
ტრაბეკულური ძვალი	$0.9 \cdot 10^3$	1540	$1.39 \cdot 10^6$
კორტიკული ძვალი	$1.9 \cdot 10^3$	4040	$7.68 \cdot 10^6$

როგორც უკვე იყო აღნიშნული, ტალღის გავრცელებისას არ ხდება რაიმე ნივთიერის (მასის) გადატანა. ტალღას გადააქვს მხოლოდ ენერგია. მექანიკური ტალღის ენერგია ტოლია:

$$E = \frac{A^2 m \omega^2}{2}$$

სადაც m – ტალღის მიერ დაკავებული რაიმე მოცულობაში არსებული მერხევი ნაწილაკების ჯამური მასაა, $\omega = 2\pi\nu$ ციკლური სიხშირე, A – რხევის ამპლიტუდა.

დროის გარკვეულ ინტერვალში რაიმე ზედაპირის გაველით გადატანილი ენერგიის ფარდობას დროის ამ ინტერვალთან, ენერგიის ნაკადს უწოდებენ:

$$\Phi = \frac{\Delta E}{\Delta t}, \text{ ან } \Phi = \frac{dE}{dt}$$

განსხვავება ამ ორ გამოსახულებას შორის მხოლოდ ისაა, რომ პირველი ფორმულა გვიჩვენებს ენერგიის საშუალო ნაკადს, ხოლო მეორე – მყისიერ ნაკადს (ნაკადს დროის რაიმე მომენტში) $[\Phi] = \frac{1\text{ჯ}}{1\text{წმ}} = 1\text{ვტ.}$

ენერგიის ნაკადს, რომელიც გადის ტალღის გავრცელების მიმართულების მართობული ზედაპირის ფართის ერთეულზე (1 მ^2). ენერგიის ნაკადის სიმკვრივეს ან *ინტენსივობას* უწოდებენ; $[I] = \frac{3\text{ჯ}}{\text{წმ}^2}$:

$$I = \frac{\Phi}{S}$$

ბგერითი ტალღის ინტენსივობა – ბგერითი ტალღის ენერგეტიკული მახასიათებელია.

ბგერითი ტალღა მისი გავრცელების მიმართულებით რაიმე ზედაპირზე მოქმედებს წნევით. დადგენილია, რომ ეს წნევა დამოკიდებულია როგორც მერხვეი ნაწილაკების სიჩქარეზე (a), ასევე გარემოს სიმკვრივესა (ρ) და მასში ტალღის გავრცელების სიჩქარეზე (V):

$$P = \rho V a.$$

ნამრავლი ρV ხვედრითი აკუსტიკური იმპედანსია (Z). ამრიგად, $P = Z a$.

ბგერითი ტალღის ინტენსივობის ნაცვლად ხშირად უფრო მოხერხებულია ბგერითი ტალღის წნევის გაზომვა. მათ შორის მარტივი კავშირია:

$$I = \frac{P^2}{2\rho a} \quad (\text{II.2.3.2.3})$$

აქ a – გარემოს ნაწილაკის რხევის სიჩქარეა (ფორმულაში იგულისხმება წნევის საშუალო მნიშვნელობა).

ბგერითი ტალღის გავრცელების სიჩქარე დამოკიდებულია მისი გავრცელების გარემოს (მყარი, თხევდი, აირი) თვისებებზე, წნევაზე და ტემპერატურაზე. კერძოდ, მოცემული ტემპერატურის და წნევის პირობებში გრძივი მექანიკური ტალღის გავრცელების სიჩქარე დამოკიდებულია გარემოს დრეკადობასა (ელასტიკურობასა) და სიმკვრივეზე:

$$V = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (\text{II.2.3.2.4})$$

სადაც E – იუნგის მოდულია, ρ – სიმკვრივე.

გარემოს ელასტიკურობა, სიმკვრივე და, შესაბამისად, ამ გარემოში ბგერითი ტალღის გავრცელების სიჩქარე იცვლება გარემომცველი პირობების (წნევა, ტემპერატურა) ცვლილებასთან ერთად. მაგალითად, აირებში ბგერის გავრცელების სიჩქარე მნიშვნელოვნადაა დამოკიდებული აირის ტემპერატურაზე. ჰაერში ზღვის დონეზე 20°C ტემპერატურაზე ბგერითი ტალღის გავრცელების

სიჩქარე დაახლოებით $343 \frac{\text{მ}}{\text{წმ}} = 1230 \frac{\text{კმ}}{\text{სთ}}$ ტოლია. ქვემოთ მოყვანილი ფორმულა გამოსახავს ბგერითი ტალღის გავრცელების სიჩქარის ტემპერატურაზე დამოკიდებულებას ჰაერში:

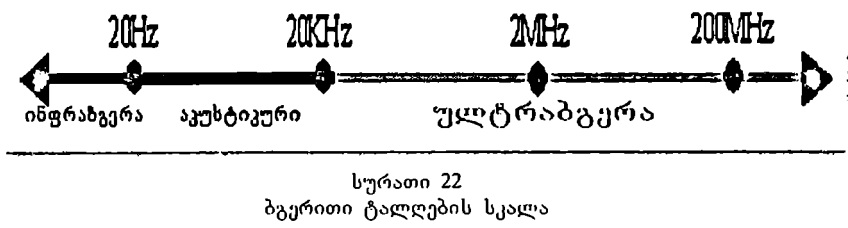
$$V \approx (331 + 0,60 t^{\circ}\text{C}) \frac{\text{მ}}{\text{წმ}} \quad (\text{II.2.3.2.5})$$

ფორმულიდან გამომდინარეობს, რომ მოცემულ პირობებში აირის ტემპერატურის ზრდასთან ერთად ბგერის გავრცელების სიჩქარე იზრდება.

სუფთა წყალში 20°C ტემპერატურაზე ბგერითი ტალღის გავრცელების სიჩქარე დაახლოებით $1482 \frac{\text{მ}}{\text{წმ}}$ -ის ($5335 \frac{\text{კმ}}{\text{სთ}}$), ხოლო, ფოლადში - დაახლოებით $5960 \frac{\text{მ}}{\text{წმ}}$ -ის ($21460 \frac{\text{კმ}}{\text{სთ}}$) ტოლია.

II.2.4 ბგერითი ტალღების სიხშირეთა სკალა

სურათზე 22 ნაჩვენებია ბგერითი ტალღების *სიხშირეთა სკალა*. დაბალი სიხშირის ბგერითი ტალღები ($\nu < 20$ კც) ცნობილია *ინფრაბგერების* სახელწოდებით, 20-დან 20000 კც-მდე - *აკუსტიკური* ბგერები, 20000 კც-ზე მაღალი სიხშირის ბგერითი ტალღები - *ულტრაბგერები*.

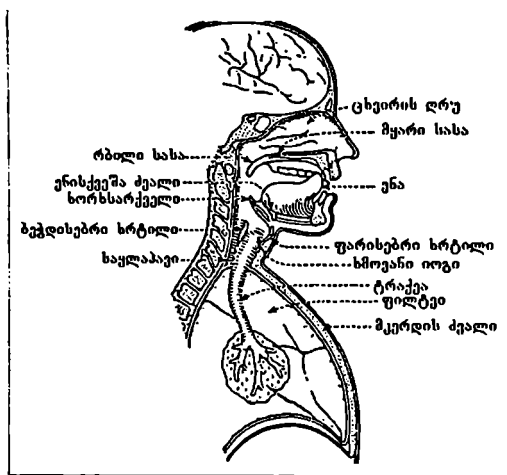


II.2.4.1 აკუსტიკური ბგერები

ბგერითი ტალღები წარმოიქმნება ფილტვებიდან ამოსუნთქული ჰაერის ტრაქტაში და პირის ღრუში მოდულაციის შედეგად.

ბგერითი ტალღა, ჩვეულებრივ, წარმოიქმნება მხოლოდ ამოსუნთქვის დროს!!! ამოსუნთქული ჰაერი ვრცელდება ხორხში; ამ პროცესში მონაწილე კუნთები აკონტროლებს ხმის იოგების შეკუმშვას და, მაშასადამე, ამოსუნთქული ჰაერის წნევას. პირის ღრუ ასრულებს რეზონატორის ფუნქციას (პირის ღრუს მოცულობის ცვლილებით), მონაწილეობს ბგერის მახასიათებლების მოდულაციაში (სურათი 23). ხმოვანი ბგერები (ა, ე, ი, ო, უ) წარმოიქმნება მხოლოდ

რეზონატორის (პირის ღრუს) მოცულობის მოდულაციის შედეგად. თანხმოდანი ბგერების წარმოქმნისათვის საჭიროა ენისა და/ან ტუჩების მოძრაობა. ხმის ბგერის მახასიათებლები დამოკიდებულია პირის ღრუს, როგორც რეზონატორის, მოცულობასა და ფორმაზე.



სურათი 23

ადამიანის ბგერების წარმოქმნის ანატომიური აპარატი

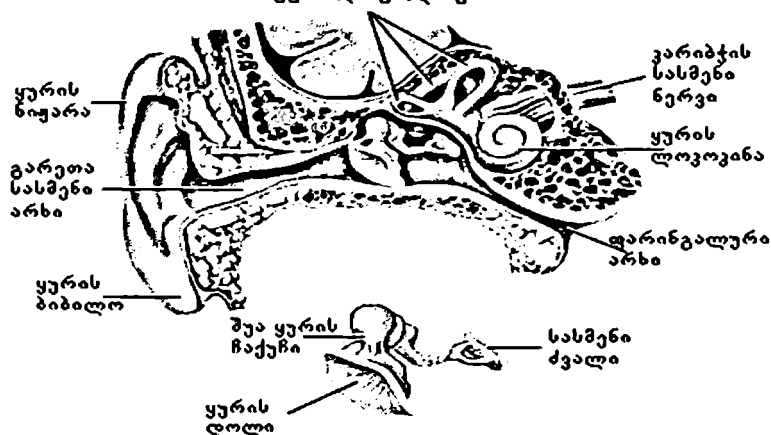
ადამიანის სმენის ორგანოს, ყურს, შესწევს უნარი შეიგრძნოს ღრეკად გარემოში გავრცელებული მექანიკური ტალღები, რომელთა სიხშირეები 20 – 20000 პერცის ინტერვალშია.

სმენის ფიზიკური მექანიზმი

ადამიანის ყურის სტრუქტურა მოცემულია სურთზე 24. ყურის ნიჟარა მოქმედებს როგორც კოლექტორი, რომელიც ბგერით ტალღებს გავრცელების მიმართულებას აძლევს ყურის გარეთა სასმენ არხში.

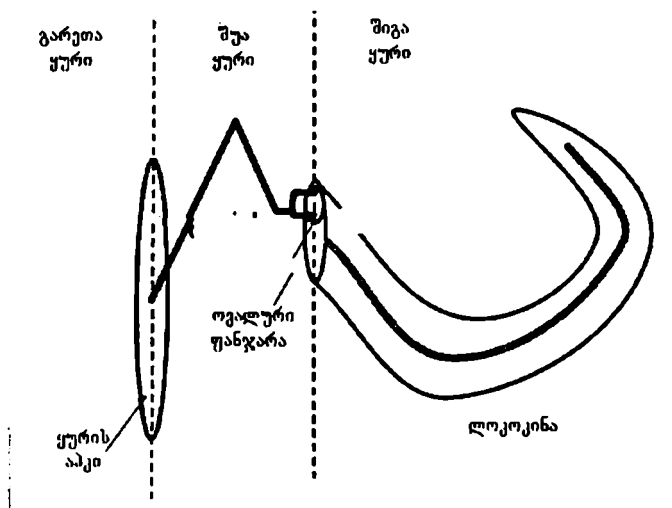
სასმენი არხი აძლიერებს ბგერითი ტალღის ინტენსივობას მისი კვეთის ფართობის შემცირებით. უმრავლეს შემთხვევაში ადამიანის აუდიოსისტემა სიგნალის გადაცემისთვის იყენებს მხოლოდ ბგერის წნევას და არა ნაწილაკების გადაადგილებას. ბგერითი ტალღა იწვევს დაფის აპკის რხევას, რხევა ერცვლდება პაერით სავსე შუა ყურში და იწვევს სამი პატარა ძვლის რხევით მოძრაობას. შუა ყურის ძვლების რხევითი მოძრაობა ბერკეტის სისტემის საშუალებით აძლიერებს ყურის აპკის რხევის ამპლიტუდას, გადასცემს გაძლიერებულ ტალღას და იწვევს შიგა ყურის ლოკოკინას ოვალური ფანჯრის მემბრანის რხევას (სურათი 24, 25). ოვალური ფანჯრის ფართობი დაფის აპკის ფართობზე მნიშვნელოვნად (40-ჯერ) მცირეა, რაც კიდევ უფრო ზრდის ბგერითი ტალღის ინტენსივობას. ოვალური ფანჯრის მემბრანა რხევის დროს იწვევს ლოკოკინას შიგნით სითხის რხევას და განაპირობებს ლოკოკინას გაშლას.

ნახევრადრკალოვანი არხი



სურათი 24

ადამიანის სმენის აპარატი - ყური



სურათი 25

შუა და შიგა ყურის მუშაობის სქემა

(The Physiology of the Sense Transformations For Perception and Action"

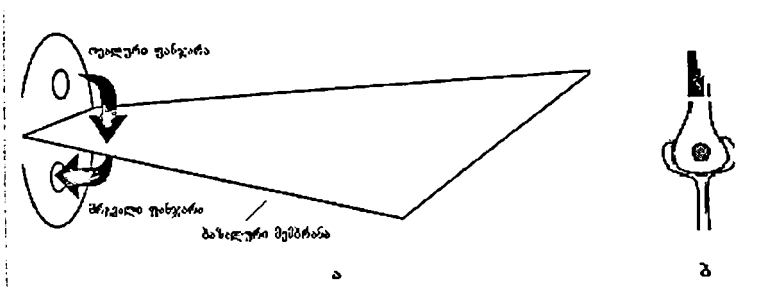
<http://www.physpharm.fmd.uwo.ca/undergrad/sensesweb/>)

იმპედანსის წარმოქმნა. სმენადობის სიხშირისათვის (1000 ჰც) გარემოს (აირის) მერხვეი ნაწილაკის მოძრაობის სიჩქარე და ყურის აკის გადაადგილება ძალზე მცირეა ($0,1 \cdot 10^6 \mu\text{მ}$; წელის მოლეკულის დიამეტრზე ნაკლებია). აქედან გამომდინარე, სმენითი ალქმის მიღწევისათვის ამ რხევას სჭირდება გაძლიერება. ლოკოკინაში სითხის აკუსტიკური იმპედანსი ($Z = \rho V$, სადაც ρ – გარემოს სიმკრეფე და V – ბგერითი ტალღის გაერცელების სიჩქარე) დაახლოებით 4000-ჯერ მაღალია, ვიდრე აირის. შესაბამისად, ლოკოკინაში სითხის რხევა გაცილებით უფრო მეტ ენერგიას მოიხსოვს, ვიდრე აირში. იმპედანსის სხვაობა იქმნება ყურის აკის მიერ, რომელიც ბგერის წნევის ზემოქმედებით იწყებს მექანიკურ რხევას და გადასცემს ამ რხევას ლოკოკინას ღრუში არსებულ სითხეს. შუა ყურის ძვლები ბერკეტის მსგავს სისტემას წარმოქმნის, რომელიც უზრუნველყოფს ტალღის ოვალური ფანჯრის მცირე ფართობის ზედაპირის მეტად უფრო ენერგიულ რხევად ტრანსფორმაციას, რომელიც თავის მხრივ აინდუცირებს რხევის გაერცელებას ლოკოკინას სითხეში; აღსანიშნავია, რომ რხევა ლოკოკინას სითხეში ბევრად უფრო ინტენსიურია, ვიდრე შუა ყურის სიერცეში (ტალღა ძლიერდება).

შუა ყურს ორი ძირითადი ფუნქცია გააჩნია: შიგა ყურის ხმაამაღალი ბგერებისაგან დაცვა და იმპედანსის წარმოქმნა, რაც აგრეთვე ხელს უწყობს პირველი ფუნქციის შესრულებას.

ხმაამაღალი ბგერებისაგან დაცვა. შუა ყურის კუნთოვანი სისტემა ამცირებს ძელოვანი კომპლექსის მიერ გადაცემული ბგერითი ტალღის ინტენსივობას შიგა ყურის ხმაამაღალი ბგერებისაგან დაცვის მიზნით. ეს კუნთები იკუმშება (იზრდება იმპედანსი) მანამდე, სანამ ბგერითი ტალღა გაერცელებდებოდა შუა ყურში (პროგრამული პასუხი) და განსაკუთრებით მაღალი ბგერების საპასუხოდ (რეფლექსური პასუხი).

შუა ყურში გაერცელებული ტალღის ზემოქმედებით ოვალური ფანჯრის მემბრანა იწყებს ვიბრაციას, რის შედეგად რხევა კომპრესიული ტალღის სახით გადაეცემა შიგა ყურის სითხეს. ამის შედეგად დაბალი კომპრესიის უნარის მქონე ლოკოკინას სითხე უზრუნველყოფს ბგერითი ტალღის გაერცელებას ბაზალური მემბრანის გასწვრივ და განაპირობებს მეორე, მრგვალი ფანჯრის მემბრანის საპირისპირო დეფორმაციას (შუა ყურის მიმართულებით) (სურათი 26ა), რაც ხელს უწყობს შიგა ყურში წნევის გაწონასწორებას. შედეგად, კომპრესიული ტალღა ერცელებოდა შიგა ყურში ბაზალური მემბრანის გასწვრივ. რხევითი ტალღა იწყება ბაზალური მემბრანის ოვალური ფანჯრის მხრიდან და თავდება ლოკოკინას მეორე ბოლოზე. ბაზალური მემბრანის რხევასთან ერთად ირხევა ბაზალურ მემბრანაზე განლაგებული ბუსუსები (ბუსუსოვანი უჯრედები) (სურათი 26ბ).

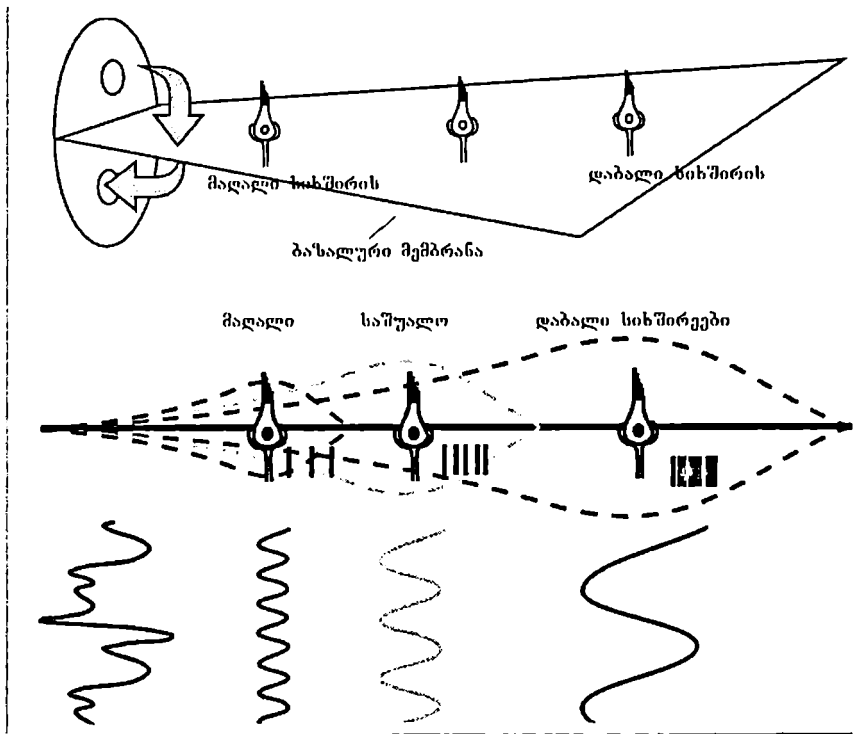


სურათი 26

შიგა ყურის ბაზალური მემბრანა (ა); ბაზალური მემბრანის ბუსუსების სტრუქტურა (ბ)
(The Physiology of the Sense Transformations For Perception and Action)
<http://www.physpharm.fmd.uwo.ca/undergrad/sensesweb/>

ბუსუსოვანი უჯრედებზე პერიოდულად ცვალებადი წნევის ზემოქმედების შედეგად იცვლება მათი მექანიკური გარდაქმნის წვევადმოქმედებით K⁺-ის სელექციური არხების განვლილობა. რაც აინდუცირებს მემბრანის დეპოლარიზაციას და მოქმედების პოტენციალის აღმოცენებას

ჰელმოლცის მიერ დადგენილ იქნა, რომ შიგა ყურის ბაზალური მემბრანა უფრო ვიწრო და ხისტი ოვალური ფანჯრის სიახლოვეს და ფართოვდება ლოკოკინას მეორე ბოლოსკენ, იქ ბაზალური მემბრანა ნაკლებად ხისტი, შედარებით მოდუნებულია. ამის გამო ბაზალური მემბრანის თითოეული მონაკვეთი ირხევა ბგერითი ტალღის განსაზღვრული სიხშირით. მაღალი სიხშირით ირხევა ბაზალური მემბრანის ოვალური ფანჯრის მიმდებარე მონაკვეთზე განლაგებული ბუსუსოვანი უჯრედები, ხოლო დაბალი სიხშირით ირხევა ბუსუსები, განლაგებული ბაზალური მემბრანის მეორე მხარეს. ანუ, ბგერის სიხშირეები ტოპოგრაფიულად განაწილებულია (კოდირებულია) ბაზალური მემბრანის ზედაპირზე (სიხშირის კოდირება) (სურათი 27).



სურათი 27

ბგერის სიხშირეების ტოპოგრაფიული განაწილება (კოდირება) ბაზალური მემბრანის ზედაპირზე (სიხშირის კოდირება)

(The Physiology of the Sense Transformations For Perception and Action"
<http://www.physpharm.fmd.uwo.ca/undergrad/sensesweb/>)

ხმამაღალი ბგერა იწვევს ბაზალურ მემბრანაში ვიბრაციას უფრო დიდი ამპლიტუდით, ვიდრე დაბალი ინტენსივობის ბგერა. ინტენსიური რხევა იწვევს დიდი რაოდენობით ბუსუსების აქტივაციას. მაშასადამე, თითოეული ბუსუსი განსაზღვრავს ინდივიდუალური სიხშირის ხმამაღლობას.

აკუსტიკური ბგერის სუბიექტური და ობიექტური მახასიათებლები

ჩვენ განვიხილეთ ბგერითი ტალღის ფიზიკური მახასიათებლები (აკუსტიკური სპექტრი, სიხშირე, ამპლიტუდა, ინტენსივობა, პერიოდი და ა.შ.), რომელთა შეფასება შეიძლება სხვადასხვა ფიზიკური მეთოდით. ეს პარამეტრები ბგერითი ტალღების **ობიექტური მახასიათებლებია**. განასხვავებენ აგრეთვე ბგერითი (აკუსტიკური) ტალღების **სუბიექტურ მახასიათებლებს**. ეს არის **ბგერის სიმაღლე, ხმამაღლობა და ტემბრი** – მახასიათებლები, რომელთა შეფასება შესაძლებელია ადამიანის სუბიექტური აღქმის საფუძველზე, ყურის საშუალებით.

ბგერის სიმაღლე (ტონი) – ბგერის სუბიექტური მახასიათებელია. იგი შეიძლება დაეუკავშიროთ ბგერის ობიექტურ მახასიათებელს – სიხშირეს. რაც უფრო დიდია ბგერის სიხშირე, მით უფრო მეტია ბგერის სიმაღლე (მაღალია ტონი) და პირიქით.

ხმამაღლობა – ბგერის სუბიექტური მახასიათებელია, ფაქტობრივად, ბგერის ობიექტურ მახასიათებელს, ინტენსივობას (და მაშასადამე, ამპლიტუდას) წარმოადგენს. ორი ერთნაირი ინტენსივობის და სხვადასხვა სიხშირის ბგერას ადამიანი სხვადასხვანაირად შეიგრძნობს. მას ერთი უფრო ხმამაღალი მოეჩვენება, ეიდრე მეორე. კერძოდ, უფრო ხმამაღალი მოეჩვენება ის ბგერა, რომელიც უფრო ახლოა 2500 – 3000 ჰც-ის ინტერვალთან, ვინაიდან ამ ინტერვალში ადამიანის სმენადობა მაქსიმალური მგრძნობელობით ხასიათდება.

ტემბრი – ბგერის სუბიექტური მახასიათებელია, დამოკიდებული მის აკუსტიკურ სპექტრზე. ადამიანის სმენის ორგანოს შესწევს უნარი განასხვავოს ერთმანეთისაგან ორი ერთნაირი სიმაღლის და ხმამაღლობის ბგერა, თუ ისინი სხვადასხვა ბგერის წყაროს მიეკუთვნებიან. ასეთ ბგერებს ახასიათებს ერთნაირი სიხშირე, მაგრამ სხვადასხვა აკუსტიკური სპექტრი.

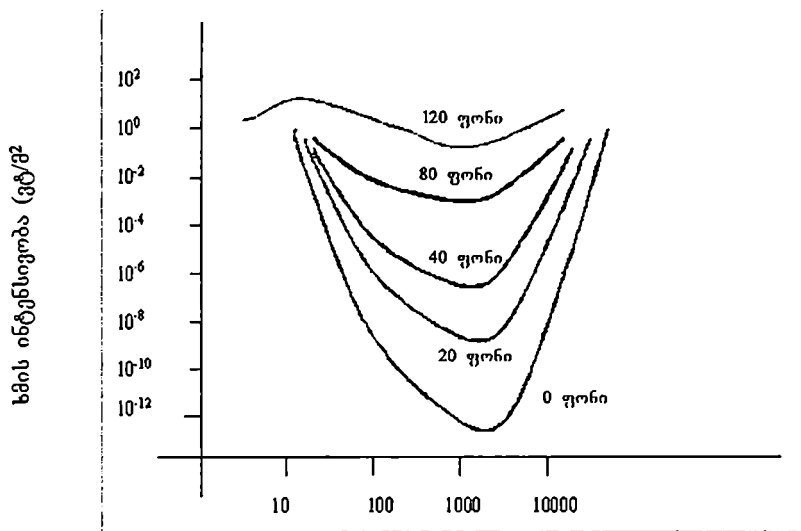
ნორმალურ მდგომარეობაში ადამიანის სმენის ორგანოს (1000 – 3000 ჰც-ს ფარგლებში) შესწევს უნარი შეიგრძნოს ბგერითი ტალღების ინტენსივობა საკმაოდ ფართო ინტერვალში. ინტენსივობის ეს ინტერვალი მოიცავს $\approx 10^{-12}$ -დან 10^{-2} -მდე ვტ/მ²-ს ($10^{-12} \leq I \leq 10$). ინტენსივობის ქვედა მნიშვნელობას $I_0 = 10^{-12}$ ვტ/მ² **სმენადობის ზღვარი** ეწოდება, რადგან მასზე ნაკლები ინტენსივობის ბგერებს ადამიანის სმენის ორგანო ვერ აღიქვამს. ინტენსივობის ზედა ზღვარს $I_g = 10$ ვტ/მ², უწოდებენ **ტიკილის შეგრძნების ზღვარს**. როდესაც ბგერის ინტენსივობა აღემატება ამ ზღვარს, ადამიანის სმენის ორგანო მას შეიგრძნობს როგორც ტიკილს და ვერ აღიქვამს, როგორც ბგერას.

სურათზე 28 ნაჩვენებია სმენადობის და ტიკილის ზღვრის ბგერის სიხშირეზე დამოკიდებულება. როგორც ვხედავთ, ბგერის ინტენსივობის (ხმამაღლობის) ზრდასთან ერთად ეს პარამეტრი ნაკლებადაა დამოკიდებული სიხშირეზე.

თუ განვიხილავთ შეფარდებას $\frac{I}{I_0}$, მივიღებთ, რომ ის იცვლება $1 \leq \frac{I}{I_0} \leq 10^{13}$ ინტერვალში. პრაქტიკულად ასეთ დიდ რიცხვებთან მუშაობა შეუძლებელია, ამიტომ ბგერის ინტენსივობის შესაფასებლად სარგებლობენ ლოგარითული სკალით. ლოგარითული სკალის მიხედვით ბგერის **ინტენსივობის დონე** L განისაზღვრება ფორმულით:

$$L = \lg \left(\frac{I}{I_0} \right) \quad (\text{II.2.3.3.1})$$

ინტენსივობის დონის (L) ერთეულია - ბელ, 1 ბელი - ბგერის ის ინტენსივობაა, რომელიც 10-ჯერ აღემატება სმენადობის ზღვარს I_0 -ს.



სურათი 28

სმენადობის და ტკივილის ზღვრის ბგერის სიხშირეზე დამოკიდებულება.
ზედა მრუდი - ტკივილის ზღვარი (120 ფონი*)

მართლაც, $L = I$; $\lg(\frac{I}{I_0}) = 1$; $\frac{I}{I_0} = 10$; $I = 10 I_0$.

ამრიგად, ინტენსივობის დონე 1 ბელია, თუ მიღებული (მოსული) ბგერის ინტენსივობა 10-ჯერ აღემატება სმენადობის ზღვარს. ეს საკმაოდ დიდი ერთეულია; ამიტომ იყენებენ მის მათემატიკურ ნაწილს - დეციბელს. ფიზიოლოგიაში ინტენსივობის დონის (L) ნაცვლად იყენებენ ხმამაღლობის (E) დონეს.

ხმამაღლობის დონის შეფასებისთვის საჭირო სკალას საფუძველად უდევს ვებერ-ფეხნერის ფსიქოფიზიკური კანონი, რომლის თანახმად, თუ ხმამაღლობის დონე იზრდება გეომეტრიული პროგრესიით, ბგერის შეგრძნება გაიზრდება მხოლოდ არითმეტიკული პროგრესიით. ასე მაგალითად, თუ ბგერის ინტენსივობა გაიზარდა 1000-ჯერ, ჩვენ ამ ბგერას შევიგრძნობთ მხოლოდ სამჯერ ძლიერად ($\lg 1000 = 3$). ვებერ-ფეხნერის ეს კანონი მათემატიკურად ასე ჩაიწერება.

$$E = k \lg(\frac{I}{I_0})$$

* ფიზიოლოგიაში ინტენსივობის დონის ნაცვლად იყენებენ „ხმამაღლობის“ დონეს; ერთეულად მიღებულია ფონი.

სადაც E – ხმამაღლობაა, k – კოეფიციენტი, დამოკიდებული ბგერის სიხშირეზე და ინტენსივობაზე. k კოეფიციენტი რომ ყოფილიყო მუდმივი, მაშინ ხმამაღლობისა და ინტენსივობის დონეთა სკალა დაემთხვეოდა ერთმანეთს. ამიტომ პირობითად 1000 ჰც სიხშირეზე ჩათვალეს, რომ ხმამაღლობა და ინტენსივობა ემთხვევა ერთმანეთს, მაშინ $k = 1$ და $E = 10 \lg \left(\frac{I}{I_0} \right)$. რომ განასხვაონ ინტენსივობის სკალა ხმამაღლობისაგან, დეციბელს *ფონი* უწოდეს.

მე-6. და მე-7 ცხრილში მოყვანილია სხვადასხვა მანძილზე სხვადასხვა ინტენსივობის (დბ-ში) ბგერების ფიზიკური მახასიათებლები (წნევა, გარემოს (აირის) ნაწილაკთა მოძრაობის სიჩქარე) და ყურის აპკზე მათ მიერ ინდუცირებული რხევების ინტენსივობა.

ცხრილი 6

სხვადასხვა ინტენსივობის ბგერების წყაროები და მათი შესაძლო ეფექტები
სმენის ორგანოზე

(Nico A.M. Schellart. "Compendium of Medical Physics, Medical Technology and Biophysics", Amsterdam, 2009)

ხმამაღლობა (დბ)	ბგერის წყარო	ეფექტი
0	სმენადობის ზღვარი	
30	საათის წიკწიკი	
40	წყნარი საუბარი	
50	ქუჩის წყნარი ჯრიაშედი	
70	მტვერსასრუტი ოთახში	
90	მიწის ბურღი 7 მეტრით დაშორებით	ხანგრძლივი იწვევს სმენის დაზიანებას
100	ხმაურიანი ქარხანა	დისკომფორტის ზღვარი
120	ხმამაღალი დისკოთეკა	დისკომფორტის ზღვარი
140	თვითმფრინავი 25 მეტრის დაშორებით	ტკივილის ზღვარი
160	თოფის გასროლა ყურთან	ყურის აპკის დაზიანება

სურათზე 29 ნაჩვენებია დიაგრამა ასახავს სხვადასხვა სიხშირის ბგერების წყაროებს და ინტენსივობებს (ხმამაღლობას).

ცხრილი 7

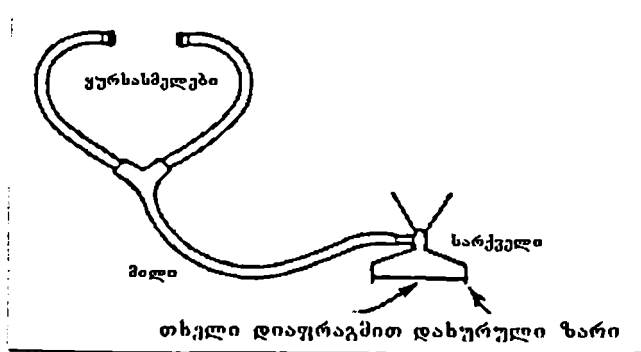
სხედასხეა ბგერის ფიზიკური მახასიათებლები
(Nico A.M. Schellart. "Compendium of Medical Physics, Medical Technology and Biophysics",
Amsterdam, 2009)

ბგერა	წყაროდან მანძილი	სმამალლობის დონე	წნევა	ნაწილაკის რხევის სიჩქარე	ყურის აპკის რხევის ამპლიტუდა
		დბ	მპა	მმ/წმ	მმ
1000 კც		0	20	0,05	$0,1 \times 10^6$
ფოთლის შრიადი	5	10	63	0,16	$0,1 \times 10^6$
ჩურჩული	2	20	200	0,5	1×10^6
ხალხის ხმაური	107	60	$20 \cdot 10^3$	50	$0,1 \times 10^3$
ნორმალური საუბარი	2	65	$20 \cdot 10^3$	89	$0,2 \times 10^3$
პნემატური ჩაქერი	2	90	$0,63 \cdot 10^6$	$1,6 \cdot 10^3$	$3,1 \times 10^7$
თეიმფერინავი	50	100	$2 \cdot 10^5$	$5 \cdot 10^4$	0,01
ტკივილის ზღვარი		120	$20 \cdot 10^4$	$50 \cdot 10^4$	0,1

აკუსტიკური ბგერების გამოყენება მედიცინაში

ბგერა, ისევე, როგორც სინათლე, ინფორმაციის წყაროს წარმოადგენს და ბუნებრივია. ის იძლევა ინფორმაციას შინაგანი ორგანოების მდგომარეობის შესახებაც.

დაავადების დიაგნოსტიკისთვის ფართოდ გაერცელებული ბგერითი მეთოდი **აუსკულტაცია** (მოსმენა), რომლის ისტორიაც ჩვენს წელთაღრიცხვამდე II საუკუნიდან იწყება. აუსკულტაციისთვის იყენებენ სტეტოსკოპს ან ფონენდოსკოპს (სურათი 30).



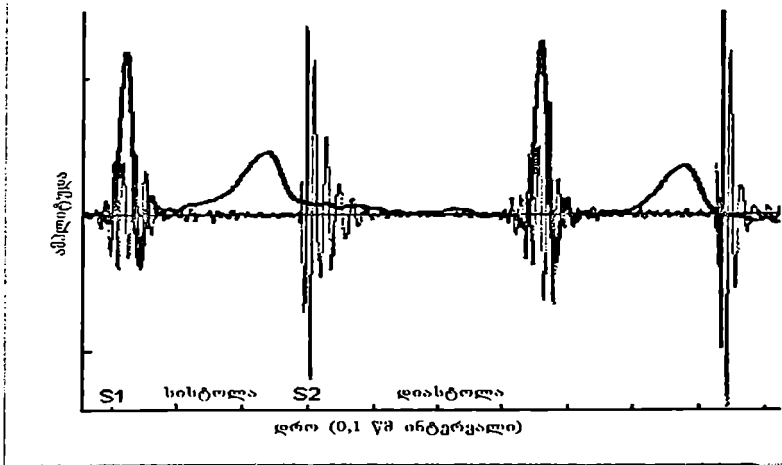
სურათი 30
ფონენდოსკოპი

ფონენდოსკოპი შედგება ღრუ კაფსულისა და მემბრანისგან. კაფსულის გეომეტრია ისეა შერჩეული, რომ უზრუნველყოს რეზონანსი. შესაბამისად, მოისმინება გაძლიერებული ბგერა, რაც აგრეთვე აირგამტარი მილის სიგრძეზეცაა დამოკიდებული.

ფონენდოსკოპის დიაფრაგმა და გუმბათი აირგამტარი მილის საშუალებით უერთდება ყურებს; დიაფრაგმა თავსდება გულმკერდის ზედაპირზე, კანზე. სხეულის შიგნითა ორგანოების ბგერები იწვევს დიაფრაგმის ვიბრაციას. დიაფრაგმის ვიბრაციის შედეგად წარმოქმნილი აკუსტიკური კუმშვითი ტალღები რეზონატორის (კაპსულის) გავლით მილის საშუალებით აღწევს ადამიანის ყურს.

ფონენდოსკოპის გუმბათი უზრუნველყოფს დაბალი, ხოლო დიაფრაგმა – მაღალი სიხშირეების გადაცემას. აკუსტიკური ფონენდოსკოპის ნაკლი ისაა, რომ ბგერის ინტენსივობა შედარებით დაბალია. ბავშვებისათვის დამუშავებულია პატარა ზომების ფონენდოსკოპები (ან ელექტრონული ფონენდოსკოპები ნაყოფისათვის). ელექტრონული ფონენდოსკოპები გეაძლევს საშუალებას, დაეფიქსირათ დაბალი ინტენსივობის ბგერები. ელექტრონულ ფონენდოსკოპებში გამოიყენება გადამწოდები, რომლებიც უზრუნველყოფენ სუფთა ბგერების მიღებას გამაძლიერებლის საშუალებით.

ფონოკარდიოგრაფია. გულის აუსკულტაციისათვის (გულის მიერ ინდუცირებული პულსირებული ბგერების ფიქსაცია) გამოიყენება კლასიკური აკუსტიკური ფონენდოსკოპი (და აგრეთვე ელექტრონული სტეტოსკოპი). ფონოკარდიოგრაფია – მეთოდია, რომელიც იძლევა არა მარტო გულის მიერ წარმოქმნილი ბგერითი ტალღების ფიქსაციის, არამედ მათი ვიზუალიზაციის და ანალიზის საშუალებას. ხელსაწყოს ფონოკარდიოგრაფი ეწოდება (სურათი 31).



სურათი 31

ფონოკარდიოგრამის (მაღალი სიხშირის რხევები) და ელექტროკარდიოგრამის სუპერპოზიცია

(Nico A.M. Schellart. "Compendium of Medical Physics, Medical Technology and Biophysics", Amsterdam, 2009)

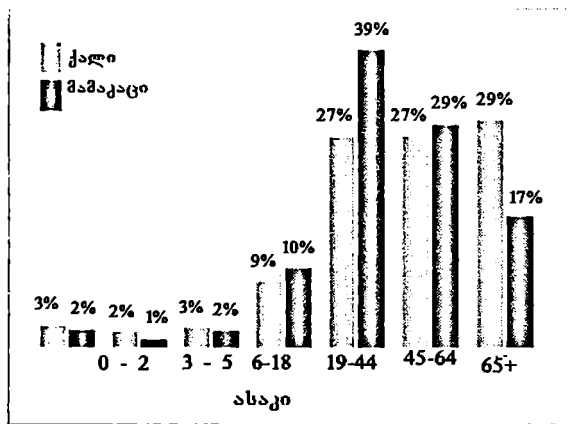
ფონოკარდიოგრაფია ფართოდ გამოიყენება კარდიოვასკულურ სისტემაში გავრცელებული პულსური ტალღის წნევისა და ბგერის ფიქსაციისათვის. სტანდარტულ სადიაგნოსტიკო გამოყენების გარდა ფონოკარდიოგრაფია გამოიყენება პულსური ტალღის სიჩქარის გასაზომად.

სმენა და აუდიომეტრია

სმენის ორგანოს კომპონენტების სხვადასხვა სახის დაზიანება ადამიანებში სმენის დარღვევებს იწვევს. ასე, მაგალითად, ექსტრემალურად ხმამაღალ ბგერებს (აფეთქება, თოფის გასროლა) შეუძლია დაფის აპკის დარღვევა, შიგა ყურის ბაზალური მემბრანის, ან ბუსუსების დაზიანება, შუა ყურის ძელოვანი აპარატის მოძრაობის უნარიანობის შეზღუდვა.

შუა ყურის ინფექციების შედეგად შესაძლებელია იქ სითხის დაგროვება და, იშვიათ შემთხვევაში, დაფის აპკის დაზიანება. შიგა ყურის ინფექციები იწვევს ბუსუსოვანი უჯრედების დაზიანებას. ტოქსინები და ზოგიერთი ანტიბიოტიკი შეაღწევს ბუსუსოვან უჯრედებში ღია არხების საშუალებით და იწვევს მათ მოწამლვას.

ფიზიოაკუსტიკური ტესტებით დადგენილია, რომ ბავშვების სმენის აპარატს (ყურს) შეუძლია ისეთი მაღალი სიხშირის ბგერების აღქმა, რასაც ვერ აღიქვამს მოზრდილი და მოხუცებული ადამიანი. სმენადობის სიხშირის ზედა ზღვარი ადამიანებში ასაკთან ერთად ქვეითდება. ასაკთან ერთად სმენის აპარატის სხვადასხვა კომპონენტი იცვითება; ამ ორგანოში სისხლის მიმოქცევის დარღვევა უჯრედების სიკვდილს განაპირობებს – ეს ყველაფერი ხელს უწყობს სმენის ასაკადამოკიდებულ დაქვეითებას (სურათი 32).



სურათი 32

სმენის დაქვეითების შემთხვევათა სიხშირე (%) სქესისა და ასაკის მიხედვით

აუდიომეტრია – ფიზიკური მეთოდია, რომლითაც იკვლევენ ადამიანის სმენის ორგანოს მგრძნობელობის დამოკიდებულობას ბგერის სიხშირეზე. ე.ი. აუდიომეტრული გამოკვლევით ვადგენთ მოცემული სიხშირის ბგერითი ტალღის სმენადობის ზღვარს (იმ მინიმალურ ინტენსივობას I_0 რომელსაც ჯერ კიდევ

შეიგბნობს სმენის ორგანო). ამ დამოკიდებულების გრაფიკულ გამოსახვას აუდიოგრამას უწოდებენ (იხ. სურათი 28).

II.2.2.2 ულტრაბგერები

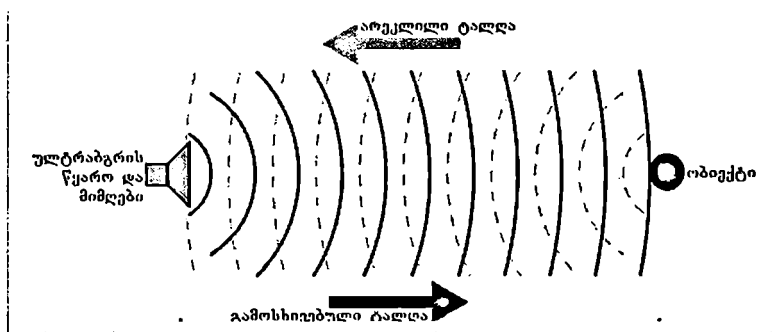
დრეკად გარემოში გაერცვლებულ ტალღებს, რომელთა სიხშირე იცვლება $2 \times 10^4 - 2 \times 10^9$ კც დიაპაზონში, ულტრაბგერა ეწოდება. ადამიანის სმენის ორგანოს არ შესწევს 20000 კც-ზე მაღალი სიხშირის ბგერითი ტალღების აღქმა, რაც განპირობებულია შუა ყურის სტრუქტურით (ასრულებს ფილტრის როლს). ულტრაბგერის აღქმა ადამიანს შეუძლია იმ შემთხვევაში, თუ ულტრაბგერითი ტალღა ეცემა უშუალოდ თავის ქალას ძვლებზე და აღწევს შიგა ყურის ლოკოინას შუა ყურის გაეღის გარეშე. ამ შემთხვევაში მაღალი სიხშირის ბგერები ზემოქმედებას ახდენს ადამიანის გონებაზე (ჰიპერსონური ეფექტი).

ულტრაბგერითი ტალღების მაღალი სიხშირის გამო მათი ტალღების სიგრძე მცირეა. მაგალითად, პაერში ულტრაბგერის ტალღის სიგრძე არ აღემატება 15 მმ-ს ($\lambda \leq 15$ მმ). სხვა გარემოში ულტრაბგერითი ტალღის სიგრძე დამოკიდებულია გარემოს სიმკვრივეზე და მისი მინიმალური მნიშვნელობა განისაზღვრება გარემოს მოლეკულებს შორის საშუალო მანძილით. ულტრაბგერითი ტალღის სიგრძის ასეთი სიმცირე საშუალებას იძლევა, მივიღოთ ულტრაბგერითი ტალღების მიმართული ნაკადი. ასეთი ნაკადის მისაღებად აუცილებელია, რომ ულტრაბგერითი ტალღის წყაროს ხაზოვანი ზომები გაცილებით აღემატებოდეს ტალღის სიგრძეს. ამ პირობების დაცვა საკმაოდ ადვილია ულტრაბგერისათვის. რაც შეეხება აკუსტიკურ ბგერით ტალღებს (და მით უმეტეს ინფრაბგერებს), აღნიშნული პირობის დაცვა პრაქტიკულად შეუძლებელია.

ულტრაბგერა და ცხოველები

ზოგიერთი ცხოველის - ძაღლის, კატის, დელფინის, ლამურას, თაგვის, სმენადობის ზედა ზღვარი უფრო მაღალი სიხშირეების ინტერვალშია, რის გამოც მათ შეუძლიათ ულტრაბგერის აღქმა.

ლამურები ულტრაბგერის (100000 კც) აღქმის გარდა თვითონაც გამოასხიებენ ულტრაბგერას და იყენებენ მას სიბნელეში მოძრაობის დროს (ექოლოკაცია (სურათი 33).



სურათი 33
ექოლოკაცია

საინტერესოა, რომ ღამურების მიერ ინდუცირებული ულტრა-ბგერითი ტალღები, რომლებსაც ისინი სივრცეში ორიენტაციისათვის და ნადირობის დროს იყენებენ. აღქმადია ბუზებისთვის და ასრულებს მათთვის გამაფრთხილებელი სიგნალის როლს.

ვეფხვის ხახიდან გამოსხივდება ულტრაბგერები, რომლებიც გადაფარავენ ღამურების ექოლოკაციას და ვეფხვის ხახა ღამურებისთვის ხდება “უხილაი”.

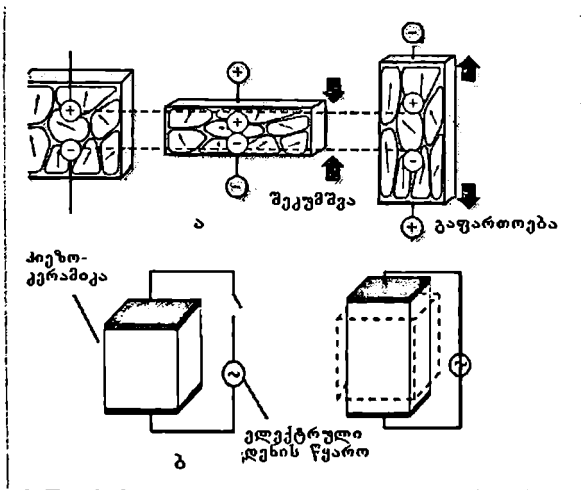
ულტრაბგერის გენერაციის სისტემა ასევე გააჩნიათ ეშაპებსაც, რომელსაც ისინი გარემოში ორიენტაციისთვის იყენებენ.

ულტრაბგერის გენერაცია

ულტრაბგერითი ტალღის მისაღებად, ჩვეულებრივ, გამოიყენება ელექტრო-სტრიქციის (შებრუნებული პიეზოელექტრული ეფექტი) და მაგნიტოსტრიქციის მეთოდი. განვიხილოთ ახლა მოკლედ ამ მეთოდების ფიზიკური არსი.

ელექტროსტრიქციის მეთოდი

მრავალრიცხოვანი გამოკვლევებით დადგენილია, რომ ზოგიერთი პიეზოელექტრული (piezo ან piezin ბერძნულად ნიშნავს კუმშვადი) ტიპის კრისტალის (მაგალითად. კვარცის, ბარიუმის, ტიტანატის და სხვა) მექანიკური შეკუმშვისას ხდება მუხტების გადანაწილება – როცა ერთი ზედაპირი იმუხტება დადებითად, მეორე აუცილებლად უარყოფითადაა დამუხტული და გაფართოებისას კი პირიქით (სურათი 34ა). ესაა პირდაპირი პიეზოეფექტი.



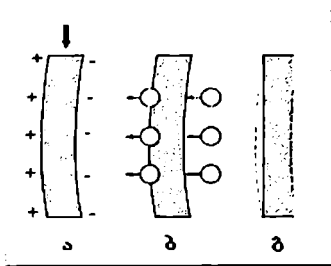
სურათი 34

პირდაპირი (ა) და შებრუნებული (ბ) პიეზოელექტრული ეფექტი
(Nico A.M. Schellart. "Compendium of Medical Physics, Medical Technology and Biophysics", Amsterdam, 2009)

პიეზოკრისტალი მუდმივ ელექტრულ ველში მოთავსებისას განიცდის მექანიკურ დეფორმაციას. ერთი მიმართულების ველში იგი იჭიმება, ხოლო საწინააღმდეგოდ მიმართულ ველში – იკუმშება. ეს მოვლენა შებრუნებული პიეზო-

ევექტის სახელითაა ცნობილი. ამ ევექტის ასხნა მარტივად შეიძლება, თუ გავითვალისწინებთ, რომ ფირფიტა, რომელსაც ვათავსებთ ელექტრულ ველში, დიელექტრიკული ტიპის კრისტალს წარმოადგენს და მისი კრისტალური მესერი შეიძლება წარმოვიდგინოთ როგორც ორი მესრის შერწყმა. აქედან ერთი შედგენილია დადებითი იონებისაგან, მეორე კი უარყოფითი. ელექტრულ ველში მოთავსებისას ეს მესრები წაინაცვლება ერთი მეორის საპირისპიროდ, რაც, ცხადია, გამოიწვევს კრისტალის ზომების შეცვლას (სურათი 34).

საინტერესოა, რომ ძელების კრისტალური სტრუქტურის დეფორმაციისას მათში აღმოცენდება პიეზოელექტრული პოტენციალები. არსებობს მოსაზრება, რომ ეს პოტენციალები მონაწილეობს ძელებში ხანგრძლივი მექანიკური ზეწოლის საპასუხო ადაპტაციური რეაქციების განვითარებაში, ძელოვანი ქსოვილების რემოდულაციაში და საკვები ნივთიერებების გავრცელებაში. მეტაბოლიტებით მდიდარი სითხის ნაკადი ვრცელდება ძელოვან ქსოვილში ეიწრო არხების საშუალებით. ბუნებრივია, მამოძრავებელი მექანიზმის გარეშე ამ ნაკადის სიჩქარე არ იქნებოდა საკმარისი ძელებში საჭირო საკვები ნივთიერებების გავრცელებისთვის. ითვლება, რომ სწორედ პიეზოელექტრული პოტენციალები, რომლებიც აღმოცენდებიან ძელოვანი ქსოვილის დეფორმაციის შედეგად სხეულის ნორმალური მოძრაობის დროს, ზემოქმედებას ახდენენ იონებისა და სხვა საკვები ნივთიერებების ნაკადებზე და უზრუნველყოფენ მათ გადაადგილებას ოსტეობლასტებში (სურათი 35).



სურათი 35

ა - მუხტების წარმოქმნა ძელის ზედაპირზე მისი დეფორმაციის შედეგად; ბ - პიეზოელექტრული პოტენციალებით ინდუცირებული საკვები ნაერთების გადანაწილება ძელოვან ქსოვილში; გ - ძელების რეკონსტრუქცია.

(Paul Davidovich "Physics in Biology and Medicine", third edition, 2007)

ცხადია, ასეთი ფირფიტის ხაზოვანი მანევრებელი (მაგალითად, მისი სიგრძე), პერიოდულად ცვლად ელექტრულ ველში იქნება ასევე დროის პერიოდული ფუნქცია. მისი რხევის (შეკუმშვა-გაფართოების) სიხშირე ტოლი იქნება ელექტრული ველის რხევის სიხშირისა. თუ ასეთი ფირფიტა ერთდროულად მოთავსებულია ცვლად ელექტრულ ველში და დრეკად გარემოში (აირში ან სითხეში), ცხადია, ამ გარემოში იგი აღძრავს მექანიკურ ტალღებს, ეი გადაიქცევა მექანიკური ტალღების წყაროდ. როდესაც ელექტრული ველის სიხშირე აღემატება 20000 კც, გარემოში გავრცელებადი ულტრაბერძნითი ტალღები. აღძრული იძულებითი რხევების ამპლიტუდა დამოკიდებულია ელექტრული ველის სიხშირესა და ფირფიტის საკუთარი რხევის სიხშირეს შორის სხვაობაზე. რაც უფრო მცირეა ეს სხვაობა, მით უფრო დიდია რხევის ამპლიტუდა (რეზონანსის ამპლიტუდა). **მაგნიტოსტრიქციის მეთოდი.**

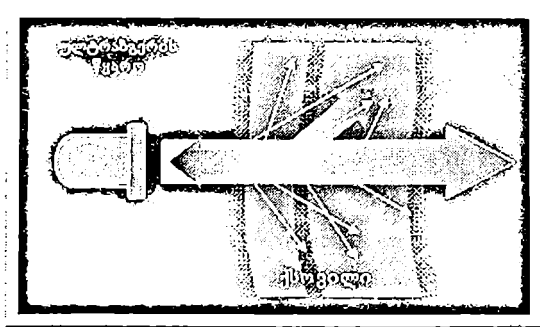
ეს მეთოდი თავისი არსით ანალოგიურია ულტრაბერძნითი ტალღების მიღების ელექტროსტრიქციის მეთოდისა, ოღონდ ამ შემთხვევაში ცვლადი ელექტრული

ველის ნაცვლად გამოიყენება ცვლადი მაგნიტური ველი, ხოლო სხეულად, რომელიც ცვლადი მაგნიტური ველის ზემოქმედებით ნივთიერებაში აღძრავს მექანიკურ ტალღებს (კერძოდ, ულტრაბგერას), გამოიყენება პარამაგნიტური ნივთიერებანი (რკინა, ნიკელი, კობალტი, ზოგიერთი მათი შენადნობი და სხვა). თუ ინდუქციურობის კოჭას ღრუში მოვათავსებთ რომელიმე მაგნიტური ნივთიერებისაგან დამზადებულ ღეროს და კოჭას მივეუერთებთ ცვლადი დენის წყაროს, აღიძვრება ცვლადი მაგნიტური ველი. ამ ველის ზემოქმედების შედეგად მაგნიტური ღეროს ხაზოვანი ზომები დროის მიხედვით პერიოდულად იცვლება, რის გამოც იგი იქცევა რხევის წყაროდ. როდესაც ასეთი ზემოქმედების ქვეშ მყოფი ღერო მოთავსებული იქნება დრეკად გარემოში (აირში ან სითხეში), მაშინ ამ გარემოში გავრცელდება მექანიკური ტალღა და იგი იქნება ულტრაბგერითი, თუ ინდუქციურობის კოჭაში გამავალი ცვლადი დენის სიხშირე 20 000 კც-ზე მეტია. როდესაც ცვლადი დენის სიხშირე გაუტოლდება კოჭას გულარის საკუთარ სიხშირეს, აქაც, ისევე როგორც ელექტროსტრიქციის შემთხვევაში, ადგილი ექნება რეზონანსს. მექანიკურ ტალღაში რხევის ამპლიტუდა რეზონანსულად გაიზრდება და შესაბამისად, გაიზრდება ულტრაბგერითი ტალღის ინტენსივობაც.

ულტრაბგერის ურთიერთქმედება ცოცხალ ქსოვილებთან

სანამ განვიხილავდეთ მედიცინაში ულტრაბგერის გამოყენების ასპექტებს, მოკლედ შევიჩრდებთ ულტრაბგერითი ტალღის ცოცხალ ქსოვილთან ურთიერთქმედების მექანიზმებზე. ულტრაბგერის ზემოქმედება ცოცხალ ქსოვილზე სამი ძირითადი ეფექტით ვლინდება: *მექანიკური, სითბური და ფიზიკურ-ქიმიური*.

ულტრაბგერითი ტალღა, როგორც ნებისმიერი სხვა ტალღა, სხვადასხვა დისკრეტულ გარემოში გავრცელებისას, ამ გარემოს მიერ *არეკელას, შთანთქმას, გაფანტვას, გარდატეხას და სიხშირის დოპლერისეულ წანაცვლებას** განიცდის (სურათი 36).



სურათი 36

ულტრაბგერითი ტალღის არეკლა, შთანთქმა, ტრანსმისია, გაფანტვა, გარდატეხა

არეკელა - ულტრაბგერითი ტალღები აირეკლება გამოსაკვლევი ობიექტის გარეთა და შიგა ზედაპირებიდან. არეკლილი ენერგიის გაზომვა და რეგისტრაცია

ცია ულტრაბგერითი დიაგნოსტიკის საფუძველს წარმოადგენს.

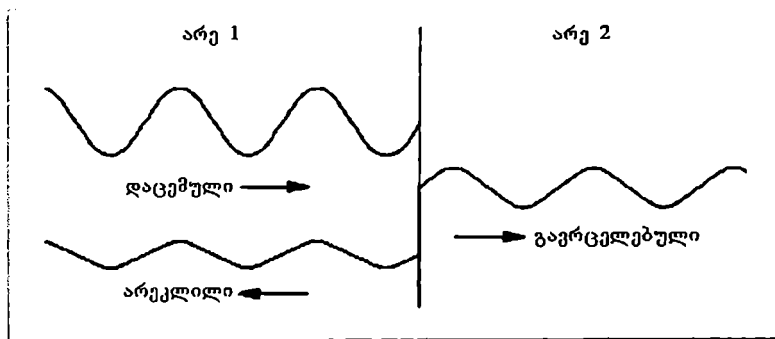
ტრანსმისია (გადაცემა) - ულტრაბგერითი ტალღის ენერგიის ნაწილი ვრცელდება გამოსაკელეე ობიექტში მექანიკური (კომპრესიული) ტალღის სახით.

გაფანტვა - ტალღის ენერგიის ნაწილი იფანტება გარემოს ნაწილაკებთან ურთიერთქმედების შედეგად (გარემოს არაპროზგენურობის გამო).

გარდატეხა - ულტრაბგერითი ტალღები ორი განსხვავებული არის (გარემოს) საზღვარზე გავრცელების დროს იცვლის გავრცელების მიმართულებას.

სიხშირის დოპლერისეული წანაცვლება - ულტრაბგერითი ტალღების სიხშირე (და ტალღის სიგრძე) იცვლება მოძრავ ობიექტებთან ურთიერთქმედების დროს.

ულტრაბგერითი ტალღა ენერგიის მატარებელია; როდესაც ტალღა ვრცელდება განსხვავებული აკუსტიკური იმპედანსის მქონე გარემოში, მისი ენერგიის ნაწილი **აირეკლება** (ეკოტალღა) (სურათი 37).



სურათი 37

ბგერითი ტალღის არეკლა სხვადასხვა იმპედანსის ქსოვილების საზღვარზე (სურათზე კარგად ჩანს ამპლიტუდების ცვლილება)

არეკლილი ტალღის უკან დაბრუნებისთვის, საჭირო დროის ინტერვალის მიხედვით საზღვრევენ ეკოტალღის ამრეკლი ზედაპირის მდებარეობას. არეკვლის კოეფიციენტი R გამოითვლება ფორმულით:

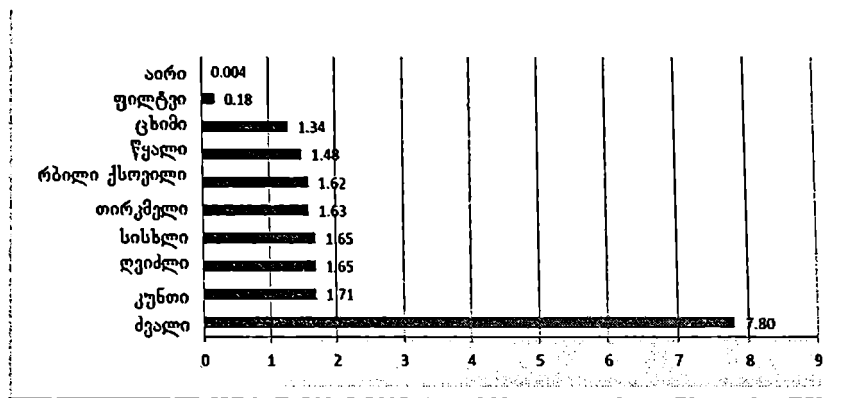
$$R = \frac{A_1}{A_2} = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \quad (II.2.3.2.I)$$

სადაც A_1 და A_2 - არეკლილი და გავრცელებული ტალღების ამპლიტუდებია, Z_1 და Z_2 - ტალღების აკუსტიკური იმპედანსი I და II გარემოში, შესაბამისად.

არეკლილი ტალღის ინტენსიუობა მცირდება, სიხშირე უცვლელი რჩება.

38-ე სურათზე მოცემულ დიაგრამაზე ნაჩვენებია სხვადასხვა ბიოლოგიური ქსოვილის აკუსტიკური იმპედანსი. გასაგებია, რაც უფრო დიდია ტალღის გავრცელების ორი გარემოს აკუსტიკური იმპედანსების სხვაობა, მით უფრო დიდია არეკლილი ენერგიის ნაწილი.

დოპლერის ეფექტი დაწერილებით ქვემოთ იქნება განხილული.



სურათი 38

სხვადასხვა ბიოლოგიური ქსოვილის აკუსტიკური იმპედანსი – $Z \times 10^6$ კგ/მ²წმ

სისხლი-რბილი ქსოვილის საზღვრის შემთხვევაში არეკვლის კოეფიციენტი $R=0.034$ -ს. როდესაც იგივე ბგერა აირეკლება უკვე ძვლის ქსოვილის ზედაპირიდან, R 20-ჯერ უფრო მაღალია.

ულტრაბგერითი გამოსახულებები მიიღება არეკლილი ტალღებით ქსოვილების აკუსტიკური იმპედანსის განსხვავებების ხარჯზე. გასაგებია, რომ აკუსტიკური ენერგიის ძლიერი არეკვლის პირობებში ქსოვილის ვიზუალიზაცია (მაგალითად, ძვლის) შეუძლებელია.

ცხრილში 8 მოცემულია სხვადასხვა წვეილი ქსოვილის საზღვრის ზედაპირიდან არეკლილი ენერგიის ინტენსივობა.

ცხრილი 8

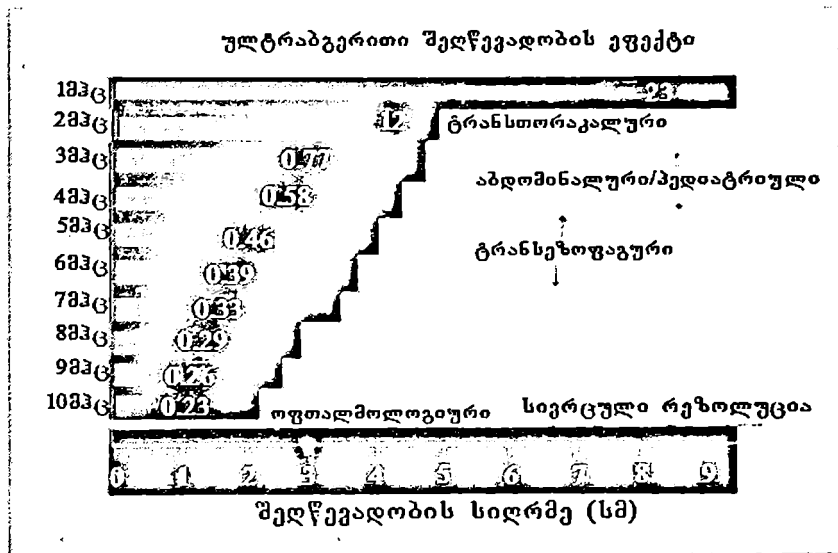
არეკვლის კოეფიციენტი სხვადასხვა ქსოვილის საზღვრის ზედაპირზე

ქსოვილის ზედაპირი	არეკვლის კოეფიციენტი
ღვიძლი-თირკმელი	0.0003
ღვიძლი-ცხიმი	0.00011
ცხიმი-კუნთი	0.015
კუნთი-ძვალი	0.41
კუნთი-ფილტვი	0.65
კუნთი-აირი	0.99
სისხლი-აირი	0.99

კუნთი-ძვლის საზღვრის ზედაპირიდან აირეკლება ულტრაბგერითი ტალღის ენერგიის 41% (რის შედეგადაც მიიღება ნეკნებს შორის მოთავსებული გულის

გამოსახულება); კუნთი-ფილტვების საზღვრის ზედაპირიდან აირეკლება აკუსტიკური ენერგიის 65% (რის გამოც ფილტვების ფონზე ძალიან ძნელია გულის ვიზუალიზაცია); კუნთი-აირის საზღვრის ზედაპირიდან აირეკლება აკუსტიკური ენერგიის 99% (ვიზუალიზაციისათვის აუცილებელია გულის გამოყენება, რომელიც შეამცირებს არეკლილი ტალღის ინტენსივობას).

ქსოვილებში გაერცელებისას ულტრაბგერითი ტალღის ენერგიის გაფანტვა გარემოს ნაწილაკებთან ურთიერთქმედების შედეგია (სურთი 39), ენერგიის ნაწილი კი ამ ნაწილაკების სითბურ ენერგიად გარდაიქმნება. სწორედ ამ მოვლენას ულტრაბგერის *სითბური მოქმედება* ეწოდება.



სურათი 39

დამოკიდებულება გამოსაკვლევი ქსოვილის მდებარეობის სიღრმესა და გამოყენებული ულტრაბგერითი ტალღების სიხშირეს შორის
(Nico A.M. Schellart. "Compendium of Medical Physics, Medical Technology and Biophysics", Amsterdam, 2009)

სუფთა წყალში გაერცელებისას ბგერითი ტალღის ენერგიის შთანთქმა შეიძლება გამოითვალოს შემდეგი ფორმულით:

$$a = 0.00049 \nu^2 e^{-T/27 + p/170}, \quad (II.3.2.2)$$

სადაც ν – ულტრაბგერითი ტალღის სიხშირეა (კც), T – ტემპერატურა ($^{\circ}\text{C}$), p – ჰიდროსტატიკური წნევა. ფორმულიდან (II.3.2.2) გამომდინარეობს, რომ ტალღის

სიხშირის ზრდასთან ერთად იზრდება მისი ენერგიის შთანთქმა გარემოს მიერ, შესაბამისად, მისი შეღწევადობა ქვეითდება.

დადგენილია, რომ ულტრაბგერითი ტალღის ენერგიის შთანთქმა მკვეთრად იზრდება წყალში გახსნილი მარილის კონცენტრაციის ზრდის პროპორციულად (ზღვის წყალში, ქსოვილოვან სითხეში ულტრაბგერითი ტალღის ენერგიის შთანთქმა გაცილებით მაღალია, ვიდრე დისცილირებულ წყალში). შესაბამისად, ბიოლოგიური ქსოვილის მიერ ულტრაბგერითი ტალღის ენერგიის შთანთქმის ინტენსივობა დამოკიდებულია ამ ქსოვილში წყლისა და ცილის შეფარდებაზე - ბიოლოგიურ ქსოვილებში ცილის შემცველობის ზრდასთან ერთად იზრდება ენერგიის შთანთქმის (აბსორბციის) ინტენსივობა.

ულტრაბგერითი ტალღის სხვადასხვა გარემოში (ქსოვილში) გავრცელების დროს მისი ენერგიის ქსოვილის მიერ შთანთქმის (აბსორბციის) პროცესს ტალღის *შესუსტება* ეწოდება. შესუსტება იზომება დბ/სმ ყოველი 1 000 000 პე-ზე (1 მპე). მე-9 ცხრილში მოცემულია ულტრაბგერითი ტალღის შესუსტება და მისი შეღწევადობის სიღრმე სხვადასხვა ბიოლოგიურ ქსოვილში. ცხადია, რაც უფრო ძლიერია ტალღის შესუსტება, მით უფრო ნაკლები იქნება მისი შეღწევადობა.

ტალღის სიხშირის ზრდასთან ერთად იზრდება მისი შესუსტება მოცემულ ქსოვილში. შესაბამისად, ღრმად განლაგებული ქსოვილების ვიზუალიზაციისათვის იყენებენ უფრო დაბალი სიხშირის, ხოლო ზედაპირულად განლაგებული ქსოვილების ვიზუალიზაციისათვის - შედარებით მაღალი სიხშირის ულტრაბგერით ტალღებს (სურათი 39, ცხრილი 9).

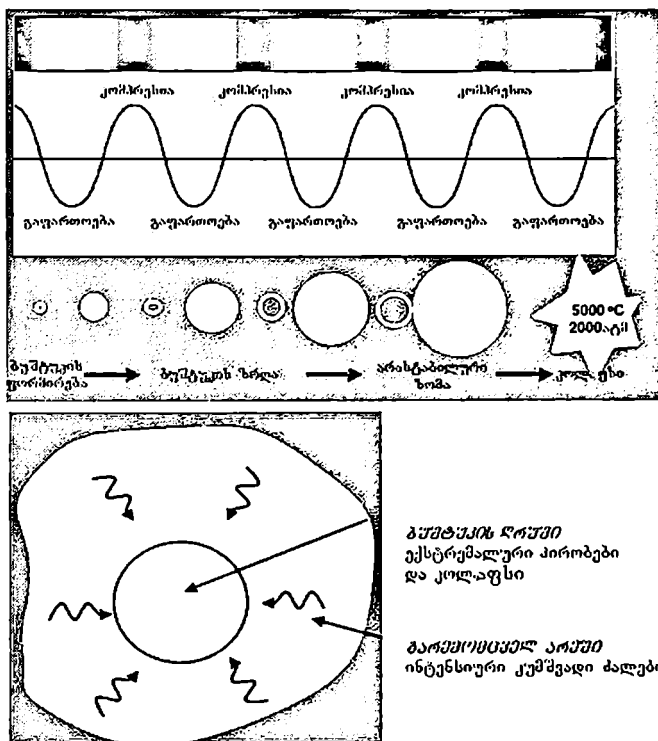
ცხრილი 9

ულტრაბგერითი ტალღის შეღწევადობა სხვადასხვა ქსოვილში

ულტრაბგერითი ტალღის შეღწევადობა სხვადასხვა ქსოვილში			მეტრიკული შეღწევადობა
ქსოვილი	შესუსტების კოეფიციენტი დბ/სმ	შეღწევადობის სიღრმე (ფარდობითი ერთეულები)	
წყალი	0.0002	5000	მეტრიკული აბსორბცია (შთანთქმა)
სისხლი	0.18	5.56	
რბილი ქსოვილი	0.3 - 0.8	1.25 - 3.33	
თავის ტვინი	0.3 - 0.5	2.00 - 3.33	
ღვიძლი	0.4 - 0.7	1.43 - 2/50	
ცხიმი	0.5 - 1.8	0.56 - 2.00	
გლუვი	0.2 - 0.6	1.67 - 5.00	
მესკულატურა			
ხრტილები	0.9 - 1.1	0.91 - 1.11	
ძვალი	13 - 26	0.04 - 0.08	
ფილტვი	40	0.025	

ქსოვილში ენერგიის გავრცელება (ულტრაბგერითი ტალღის სახით) დაკავშირებულია ქსოვილის მიერ ენერგიის შთანთქმასთან, რაც პირდაპირი (თერმული ეფექტი), ან არაპირდაპირი გზით (კავიტაციის ეფექტი) ქსოვილში

სხვადასხვა სახის დაზიანებას იწვევს. ულტრაბერის მოქმედებით სითხეში მცირე ზომის აირით სავსე ბუშტების წარმოქმნის მოვლენას **კავიტაცია** ეწოდება. კავიტაცია ვითარდება ენერგიის (წნევის) ლოკალური გადანაწილების შედეგად (სურათი 40). **კავიტაციური ბუშტების** წარმოქმნის ადგილას სითხის წნევა ვარდება, რაც აირის დაგროვებას და აირის ბუშტუკის წარმოქმნას განაპირობებს.



სურათი 40

კავიტაციური ბუშტუკი (წარმოქმნის დინამიკა და კოლაფსი)
(Nico A.M. Schellart. "Compendium of Medical Physics, Medical Technology and Biophysics",
Amsterdam, 2009)

კავიტაციის ფიზიკური მექანიზმი დუღილის მსგავსია. ამ პროცესების ინიცია-
ციისთვის აუცილებელია ენერგიის ლოკალური გადანაწილება.

მთავარი განსხვავება დუღილსა და კავიტაციას შორის მდგომარეობს
ორთქლის წარმოქმნის თერმოდინამიკურ მექანიზმში. დუღილი იწყება, როდესაც
სითხეში გაცხელების დროს გამოყოფილი ჰაერის და წყლის ორთქლის
ბუშტებში წნევა იზრდება გარემომცველი სითხის წნევასთან შედარებით და
არსებობს საკმარისი ენერგია სითხის აირად მდგომარეობაში (ფაზაში)

გადასვლისთვის. ულტრაბგერითი კავიტაციის დროს ბგერითი ტალღის გავრცელება სითხეში იწვევს სითხის მოლეკულების რხევას წონასწორობის მდგომარეობის გარშემო. შეკუმშვის დროს მანძილი მოლეკულებს შორის მცირდება. ხოლო გაფართოების პროცესში (უარყოფითი წნევა) – იზრდება. გაფართოების ადგილას წარმოიქმნება აირის მცირე ზომის ბუშტუკები. კავიტაციის დაწყებისთვის აუცილებელია ბუშტუკების ჩასახვის ზედაპირის არსებობა (და არა მთელ გარემოში ენერგიის ცვლილება); ეს ზედაპირი შეიძლება იყოს ჭურჭლის კედლები, სითხის მინარევები, ან გაუსხნელი აირის მიკრობუშტუკები, რომელთა პიდროფილური ზედაპირი უზრუნველყოფს მათ სტაბილიზაციას. ანუ, კავიტაციის დროს წამყვანი როლი ენიჭება ლოკალური წნევის ცვალებადობას.

ულტრაბგერითი ტალღის გავრცელების დროს ლოკალური წნევის მნიშვნელოვანი შემცირებისას (ბუშტუკებში ნაჯერი ორთქლის წნევასთან შედარებით) მცირე ბუშტუკები იწყებს შეუზღუდავ ზრდას, სანამ ბუშტუკი წნევა არ მიაღწევს ზღვრულ მნიშვნელობას. ამის შემდეგ ბუშტუკები სწრაფად სკდება ხმაურის წარმოქმნით.

კავიტაციური ბუშტუკები არსებობს მხოლოდ მილიწამების განმავლობაში. ბუშტუკების სწრაფი გასკდომის (კოლაფსის) შედეგად ბუშტუკი აირის ენერგია სწრაფად გადაეცემა გარემომცველ სითხეს, რაც იწვევს მთელი რიგი თერმული და ბიოქიმიური პროცესების ინიციაციას (სურათი 40). მაშასადამე, ულტრაბგერის ლოკალური თერმული ეფექტი ძირითადად დამოკიდებულია ულტრაბგერითი ტალღის ინტენსივობასა და გარემოს სიმკვრივეზე.

სითხეში ბგერითი ტალღის გავრცელების დროს კავიტაციის რისკს (MI) ტალღის სისშირე და მისი ინტენსივობა (წნევა) განსაზღვრავს:

$$MI = \frac{P}{\sqrt{\nu_0}} \quad (II.3.3.2)$$

სადაც P – ბგერითი ტალღის წნევა, ν_0 – სისშირე.

ფორმულიდან (II.3.3.2) ჩანს, რომ კავიტაციის რისკი MI იზრდება ულტრაბგერითი ტალღის სისშირის შემცირებასთან და ინტენსივობის (წნევის) ზრდასთან ერთად. კავიტაციის რისკის უსაფრთხო მნიშვნელობა $MI < 1,2$. კავიტაციის პროცესში წარმოქმნილი ბუშტუკების მოძრაობის და აფეთქების შედეგად შესაძლებელია გარემოს დაზიანება (მიკროტრავმების განვითარება).

აირის მიკროსკოპული ბუშტუკები, რომლებიც ჩვეულებრივად არსებობს სითხეში, აკუსტიკური ტალღის ზემოქმედებით იწყებს რხევას. კავიტაციური ბუშტუკების რხევის დროს გარემოში ვრცელდება აკუსტიკური ენერგია. განასხვავებენ ორი ტიპის კავიტაციას – *ინერციულ (არასტაბილურ)* და *სტაბილურ კავიტაციას*.

თუ კავიტაციის გამოწვევი ულტრაბგერითი ტალღის ენერგია არ არის საკმარისი სითხეში ბუშტუკის სრული კოლაფსის ინდუცირებისთვის, ტალღის ზემოქმედებით სითხეში ბუშტუკების ზომა და ფორმა პერიოდულად იცვლება. ბუშტუკები პულსირებს წრფივად წონასწოვრული მდგომარეობის გარშემო და გამოსხივებს რეზონანსულ ენერგიას. ასეთ კავიტაციას *სტაბილური კავიტაცია* ეწოდება. სტაბილური კავიტაციის დროს ბგერითი ტალღის ინტენსივობა შედარებით დაბალია.

თუ ბგერითი ტალღის ენერგია მაღალია, ბუშტუკები სწრაფად იზრდება ერთი, ორი, ან სამი აკუსტიკური რხევის ციკლის განმავლობაში და გადაიქცევა დიდ ბუშტუკად (ზომით $\approx 100 \mu\text{m}$). ამ დროს ბუშტუკი აირის წნევა რამდენიმე ათას ატმოსფეროს და ტემპერატურა რამდენიმე ათას გრადუსს აღწევს. შემდეგ

ბუმტუკები სკდება და გამოასხივებს ენერგიას (შოკურ ტალღას) (სურათი 40). ამ პროცესს არასტაბილური კავიტაცია ეწოდება.

როდესაც კავიტაციური ბუმტუკები სკდება, მათი ენერგია თავისუფლდება გარემომცველ სითხეში - სითხის ამ უბანში მკვეთრად იზრდება ტემპერატურა და ვრცელდება შოკური ტალღები, რომლებიც წარმოადგენს ხმაურის წყაროს.

შოკური ტალღები ახდენს დამაზიანებელ ზემოქმედებას ბიოლოგიურ ორგანიზმებზე და სხვა მასალებზე. მაღალი ტემპერატურა, მოლეკულების მაღალი სიჩქარე, მოლეკულების იონიზაცია და თავისუფალი რადიკალების წარმოქმნა, ზეწოლის ძალები - ყველა ეს პროცესი ულტრაბგერითი ტალღის ზემოქმედების ფიზიკური და ქიმიური (თავისუფალი რადიკალები ადვილად შედიან რეაქციებში სხვა ნაერთებთან და ბიოქიმიური პროცესების მიმართულებას ცვლიან) ეფექტების გამოვლინებაა.

სტაბილური კავიტაცია იწვევს მნიშვნელოვნად ნაკლებ დაზიანებას, ვიდრე არასტაბილური კავიტაცია.

ულტრაბგერის გამოყენება მედიცინაში

ულტრაბგერითი ტალღა ლაბორატორიულ პირობებში პირველად მიიღეს XIX საუკუნის დასასრულს, მაგრამ პრაქტიკული გამოყენება მან საკმაოდ დიდხანს ვერ მოიპოვა. 1918 წელს ცნობილმა ფრანგმა ფიზიკოსმა ლანჟევენმა წამოაყენა წინადადება ულტრაბგერითი ტალღებით შეესწავლათ ზღვის ფსკერის რელიეფი და მოექცნათ ზღვაში ჩაძირული სხვადასხვა ობიექტი. ამგვარად, ულტრაბგერის პრაქტიკული გამოყენების დასაწყისის თარიღად ითვლება 1918 წელი. შემდგომში ულტრაბგერა გამოიყენეს მეცნიერების და ტექნიკის სხვადასხვა დარგში.

ადამიანის სხეულის შესასწავლად ულტრაბგერითი ტალღა პირველად გამოიყენება ლუდვიგმა ნაწლავის კედლის სისქის შესწავლის მიზნით (Ludwig, National Medical Research Institute. Bethesda, Maryland. 1940).

ულტრაბგერის ის თვისება, რომ ორი გარემოს გამყოფ ზედაპირზე იგი ნაწილობრივ აირეკლება, გამოიყენეს ულტრაბგერითი დეფექტოსკოპიის მეთოდში. გამოსაკვლევი ობიექტის შიგნით არსებულ ნებისმიერი ზომის ხინჯზე ულტრაბგერები განიცდის არეკვლას. არეკლილი ტალღის დაფიქსირებით და შესწავლით ადვილად შეიძლება განისაზღვროს ხინჯის ზომები, მისი მდებარეობა სიღრმეში. ეს მეთოდი ფართოდ გამოიყენება მედიცინაში სხვადასხვა ქსოვილში დეფექტების შესასწავლად.

სამედიცინო დიაგნოსტიკაში გამოიყენება ულტრაბგერის სიხშირეები 1 - 18 მკ (1მკ = 10⁶კ). სიხშირეთა მაღალი დიაპაზონი გამოიყენება სხეულში ღრმად მდებარე ობიექტების და მცირე დეტალების შესასწავლად. აქვე უნდა აღინიშნოს, რომ სიხშირის ზრდასთან ერთად იზრდება ტალღის ენერგიის შთანთქმა გარემოს მიერ. ასე რომ, ტალღის ენერგია ქსოვილის სიღრმეში მცირდება, ამიტომ ღრმა დიაგნოსტიკისათვის სიხშირეთა დიაპაზონი შეზღუდულია (3 - 5 მკ). ღრმა დიაგნოსტიკა საკმაოდ დიდ სირთულეებთან არის დაკავშირებული.

ულტრაბგერის გავრცელების სიჩქარე აგრეთვე იცვლება სხვადასხვა ქსოვილში. როგორც უკვე აღვნიშნეთ, ულტრაბგერით დიაგნოსტიკაში გამოსაკვლევი ობიექტის შესახებ ინფორმაციის მისაღებად გამოიყენება არეკლილი ტალღა. ადამიანის სხეულში ულტრაბგერითი ტალღები აირეკლება სხვადასხვა ქსოვილის (განსხვავებული სიმკვრივის) გაყოფის საზღვრიდან (სისხლის უჯრედები სისხლის პლაზმაში, მცირე სტრუქტურები ორგანოებში და ა. შ.).

მნიშვნელოვანია არეკლილი ულტრაბგერითი ტალღის 3 ძირითადი პარამეტრი:

- დაბრუნებული ტალღის მიერ გავლილი მანძილი, რომელიც იძლევა ინფორმაციას გამოსაკვლევი ობიექტის მდებარეობის, მისი ზომების შესახებ;

- არეკლილი ტალღის ინტენსივობა, რომელიც მეტყველებს გამოსაკვლევი ობიექტის სიმკვრივის (შესაბამისად, მასში წყლის და ცილების კონცენტრაციის) შესახებ;

- სისხირის დოპლერისეული წანაცვლება, რომელიც მოძრავი ობიექტის გამოკვლევის შემთხვევაში იძლევა ინფორმაციას მისი მოძრაობის სიჩქარის შესახებ (იხილე დოპლერის ეფექტი).

ზემოთ მოყვანილი ინფორმაციიდან ნათლად ჩანს, რომ ულტრასონოგრაფიული (ულტრაბგერითი) გამოსახულების მიხედვით შეგვიძლია, ვიმსჯელოთ გამოსაკვლევი ობიექტის ზომების და ფორმის, აგრეთვე ქსოვილის ქიმიური შემადგენლობის (ცილის და წყლის) ქსოვილში ზედაპირული სიმსივნური წარმონაქმნების არსებობის, შეშუპების განვითარების, სითხის დაგროვების შესახებ და ა.შ. ამავ დროს, ქსოვილის ქიმიური (ბიოქიმიური) ცვლილებები, რომლებიც არ იწვევენ ობიექტის აკუსტიკური სიმკვრივის (იმპედანსის) შეცვლას, არ ფიქსირდება ულტრაბგერითი დიაგნოსტიკის საშუალებით, ანუ, ულტრასონოგრაფია იძლევა ინფორმაციას ქსოვილის სტრუქტურული და არა ფუნქციური ცვლილებების შესახებ.

ულტრასონოგრაფია ითვლება ერთ-ერთ ყველაზე უსაფრთხო სადიაგნოსტიკო მეთოდად. მაგრამ ვინაიდან ულტრაბგერითი დიაგნოსტიკა დაკავშირებულია ცოცხალ ქსოვილებში ენერგიის მატარებელი ულტრაბგერითი ტალღების გავრცელებასთან, უნდა გვახსოვდეს ულტრაბგერითი ენერგიის ეფექტების (მექანიკური, ფიზიკურ-ქიმიური და თერმული) შესახებ. ყოველივე ზემოთ აღნიშნული სადიაგნოსტიკო ულტრაბგერითი ტალღების შეზღუდული სისხირისა და ინტენსივობის დიაპაზონებში გამოყენებას მოითხოვს, რადგან ინტენსიურ ულტრაბგერით ტალღას შეუძლია ქსოვილების (თვალი, ხერხემალი, სისხლძარღვების ენდოთელიუმში) და უჯრედების დაზიანება და ფუნქციის მოშლა (კალიუმის განდევნა ერთროციტებიდან, თრომბოციტების აგრეგაცია), კემორაგიების გამოწვევა, სიმსივნური გადაგვარების სტიმულაცია.

ითვლება, რომ ადამიანის ქსოვილებში ულტრაბგერითი ტალღის გამოყენება უსაფრთხოა შემდეგ საზღვრებში:

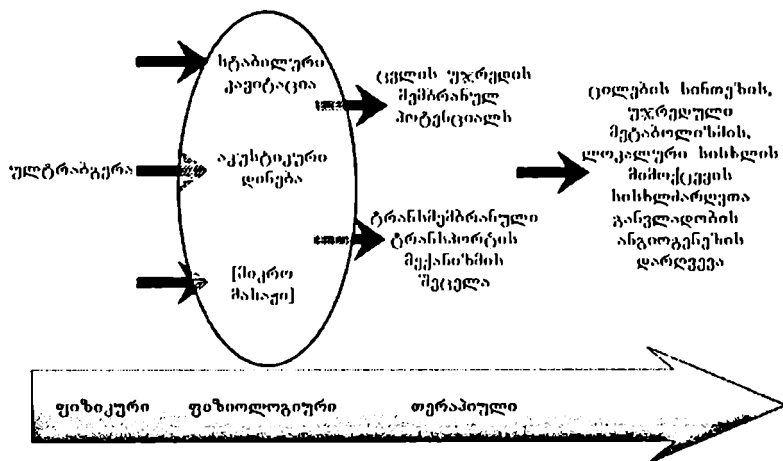
- სისხირე - მეტაერცების ქვედა ინტერვალში (3-5 მკ),
- ინტენსივობა - 100 მვტ/სმ² საზღვრებში,
- დასიხევის ხანგრძლივობა - 1 - 500 წმ.

ულტრაბგერა ფართოდ გამოიყენება მედიცინაში სამკურნალო მიზნით. ზომიერ ფარგლებში მისი თერმული ეფექტები გამოიყენება კოლაგენური ფიბრების ჰიმეადობის, სისხლის ნაკადის, ნერვების გამტარებლობის გაძლიერების, შემაერთებელი ქსოვილის სიხისტის, კუნთების სპაზმის შემცირების, ტკივილის მოდულაციის, დაბალი ინტენსივობის ანთებითი პროცესების მკურნალობის მიზნით.

ულტრაბგერის ფიზიკური (მექანიკური) მოქმედება (კავიტაცია) აგრეთვე გამოიყენება ფიზიოლოგიური ეფექტების მიღწევის მიზნით (სურათი 41).

დაბალი ინტენსივობის ულტრაბგერითი ტალღის მიერ წარმოქმნილი მიკროდინამიკური უჯრედული მემბრანების გასწვრივ ზემოქმედებას ახდენს მემბრანების სტრუქტურასა და ფუნქციებზე, ზრდის იონური არხების განვლადობას. კავიტაცია გამოიყენება დიდი ზომის მოლეკულების ბიოლოგიურ

უჯრედებში ტრანსპორტირებისთვის (სონოპორაცია), მემბრანაში წამლების (ანესტეტიკების, კორტიკოსტეროიდების) შეღწევის (იონოფორები) გაადვილების მიზნით, მიკროდინებები უზრუნველყოფს ფიბრობლასტების აქტივობის, ცილის სინთეზის სტიმულაციას, ხელს უწყობს სისხლის მიმოქცევის გაძლიერებას, ძელების შეხორცებას. ულტრაბერითი სტაბილური კაეიტაცია გამოიყენება სტომატოლოგიაში პიგიენის მიზნით.



სურათი 41

ულტრაბერის ფიზიკური, ფიზიოლოგიური და თერაპიული ეფექტები (სქემა)

(Nico A.M. Schellart. "Compendium of Medical Physics, Medical Technology and Biophysics", Amsterdam, 2009)

ულტრაბერა გამოიყენება თირკმლის კენჭების დესტრუქციის პროცესში ლიტოტრიფიის დროს, სხვადასხვა დაავადების მეურნალობის დროს ქსოვილის არათერმული არაინვაზიური ფრაქციონირების პროცესში, არაინვაზიური დიპოსაქციის მიზნით, კიბოს თერმული არაინვაზიური მეურნალობის პროცესში.

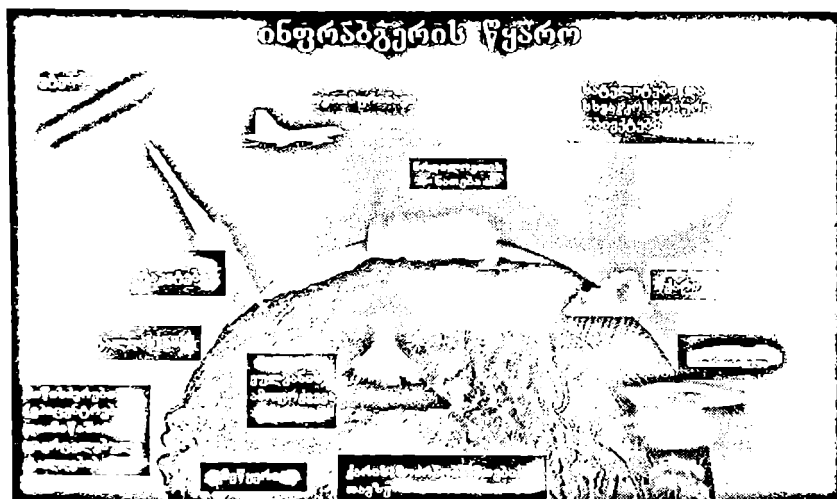
II.2.2.43 ინფრაბერა

ინფრაბერა წარმოადგენს დრეკად გარემოში გაერცელებულ მექანიკურ ტალღას, რომლის სიხშირე არ აღემატება 20 კჰ-ს. ინფრაბერას ადამიანის სმენის ორგანო ვერ აღიქვამს.

ვინაიდან ინფრაბერის სიხშირე ძალიან დაბალია, ხოლო ტალღის სიგრძე – მაღალი, პაერში გაერცელებისას მისი ენერგია ძალიან სუსტად შთაინთქმება

(ინფრაბგერის მიმართ გარემოს შთანთქმის კოეფიციენტი მცირეა), რის გამოც ინფრაბგერის გარემოში გაურცელების უნარი საკმაოდ დიდია. ინფრაბგერას შეუძლია ძალიან დიდი მანძილის დაფარვა მცირე დისიპაციით (ენერგეტიკული დანაკარგით). ტალღის სიგრძის სიდიდის გამო (გრძელი ტალღა) იგი გამოირჩევა დიფრაქციის მაღალი უნარით.

ინფრაბგერის ბუნებრივი წყაროები - მიწისძვრა, ვულკანების ამორფქევა, ქარიშხალი, ოკეანის ტალღები, ზეგები, ჩანჩქერები, ელევა, ქარის დროს შენობების, ხეების, ტელეგრაფის ბოძების რხევა და სხვა (სურათი 42). ძლიერი შტორმის დროს შუა ოკეანეში აღმოცენებული ტალღები წარმოქმნის 0.2 კც სიხშირის ინფრაბგერას, რომელსაც მიკრობარი ეწოდება (მიკრობარი - ოკეანის ბუნებრივი აკუსტიკური გამოსხივება). მიკრობარები "ზღვის ხმის" სახელწოდებითაა ცნობილი. მიკრობარები მიეკუთვნება ატმოსფერულ ინფრაბგერულ ტალღებს. რომლებიც შტორმების დროს წარმოიქმნება არაწრფივი წყლის ტალღებისა და ატმოსფეროს ურთიერთქმედებით (აირების ან სითხეების დიდ ნაკადებში ტურბულენტური მოძრაობის შედეგად). ატმოსფეროში ინფრაბგერების დაბალი სიხშირის ტალღების სუსტი აბსორბციის გამო, მიკრობარები რამდენიმე ათას კილომეტრზე ვრცელდება, რაც ადვილად ფიქსირდება დედამიწაზე არსებულ დეტექტორებზე.



სურათი 42
ინფრაბგერის წყაროები

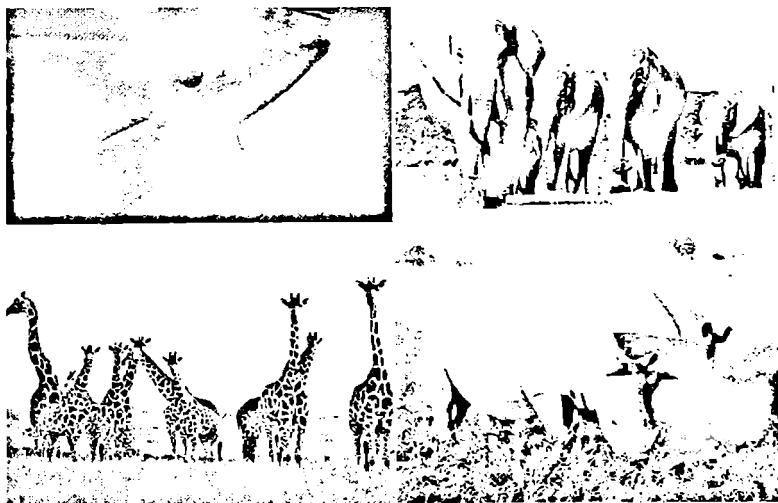
ბუნებრივად აღმოცენებულ ინფრაბგერაზე პირველად დაკვირვება მოხდა 1883 წელს ვულკან კრაკატოას ამოფრქვევისას - წარმოქმნილმა ტალღამ 7-ჯერ შემოიურა დედამიწას და დაფიქსირდა ბარომეტრებზე მსოფლიოს ყველა კუთხეში.

ინფრაბგერის მეშვეობით შესაძლებელია დედამიწის, ტორნადოების მონიტორინგი და დედამიწის შიდა ფენებში ნავთობის მარაგის ძიება. მეცნიერები აქტიურად მუშაობენ ინფრაბგერის ახალი დეტექტორების შექმნაზე. ინფრაბგერის პიეზოკერამიკური სენსორები გამოიჩინეს მაღალი მგრძნობელობით, პატარა ზომებითა და ეკონომიურობით (აღიქვამს 0.0005-100 პკ-მდე სიხშირის ტალღებს).

ინფრაბგერის ხელოვნური წყაროებია - სხვადასხვა ტექნიკური მოწყობილობები (დიზელის ძრავები, კომპრესორები, ელმავლები, სამრეწველო ენტილატორები, დიდი გაბარიტების მანქანები და მექანიზმები (რომლებიც ახორციელებენ 20 პერცზე ნაკლები სიხშირის ბრუნვით ან რხევით მოძრაობებს), ხმოვანი დარტყმები და ქიმიური ან ბირთვული აფეთქებები. ბირთვული იარაღის გამოცდის მაკონტროლებელი ორგანიზაცია (The Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty Organization, CTBTO) ინფრაბგერას იყენებს ბირთვული ტექნიკის მონიტორინგისთვის. ის ასევე გამოიყენებოდა არტილერიის აღმოჩენის მიზნით პირველი მსოფლიო ომის დროს.

ცხოველების რეაქცია ინფრაბგერაზე

ვეშაპები, სპილოები, ბემეორტები, ჟირაფები და ალიგატორები ერთმანეთთან დიდ დისტანციაზე (რამდენიმე ასეულ კილომეტრზე) კომუნიკაციის დროს ინფრაბგერას იყენებენ. ასევე გამოთქმულია ვარაუდი, რომ ფრინველები სანავიგაციოდ იყენებენ ქარის მიერ წარმოქმნილ ინფრაბგერებს. სპილოები რამდენიმე კილომეტრის რადიუსით აერცვლებენ ინფრაბგერებს, რომლებიც სხვა სპილოების მიერ ტერფებზე არსებული რეცეპტორების საშუალებით აღიქმება (სურათი 43).



სურათი 43
ცხოველები და ინფრაბგერა

აღსანიშნავია, რომ ინფრაბგერები 2-15 კვ სიხშირის დიაპაზონში განსაკუთრებით არასასურველია ადამიანის ორგანიზმისთვის. ამის მიზეზია რეზონანსული მოვლენები. საქმე ისაა, რომ ადამიანის შინაგანი ორგანოების რხევის საკუთარი სიხშირეები სწორედ ამ ინტერვალს მიეკუთვნება. ამიტომ, როდესაც ინფრაბგერის სიხშირე გაუტოლდება შინაგანი ორგანოების რხევის საკუთარ სიხშირეს, ეს უკვე რეზონანსია. შინაგანი ორგანოების რეზონანსულმა რხევამ შეიძლება გამოიწვიოს ამ ორგანოების მეტად მძიმე დაზიანებები. მაგალითად, დაახლოებით 7 კვ-ის სიხშირის ინფრაბგერა რეზონანსშია თავის ტვინის ბიოდენების დრეიტთან და იწვევს ნეირონების დაზიანებას; 1 – 3 კვ-ის სიხშირის ინფრაბგერას შეუძლია სუნთქვის რიტმის დარღვევა (რაც ორგანიზმში ჟანგბადის უმქარისობას იწვევს); 5-9 კვ-ის სიხშირის ინფრაბგერებით ზემოქმედებისას ორგანიზმში განიცდის ტკივილს გულმკერდის არეში, 8-12 კვ-ის დროს ტკივილს წელის არეში, ხოლო 12 კვ-ზე მაღალი სიხშირის ულტრაბგერების ზემოქმედებისას მტკივნეული სიმპტომებია პირის ღრუში, ყელის არეში. შარდის ბუშტში, სწორ ნაწლავში და ზოგიერთ კუნთში.

ინფრაბგერის გამოყენება მედიცინაში

ბოლო დროს ინფრაბგერითი მეთოდები სულ უფრო და უფრო მეტად გამოიყენება თერაპიული მიზნებისათვის: ინფრაბგერითი პნევმომასაჟი (სიხშირე 4 კვ) ხელს უწყობს მიოპიის (ახლომხედველობის) პროგრესირების შეჩერებას; თერმოთერაპიული მასაჟი (სიხშირით 10 კვ) საკმაოდ სასარგებლო აღმოჩნდა ქრონიკული ქოლერისტიტით დაავადებულ-თათვის; ანტიბაქტერიული წამლების ინფრაბგერითი იონოფორეზი წარმატებით გამოიყენება ბაქტერიული კერატიტით დაავადებულ პაციენტებში.

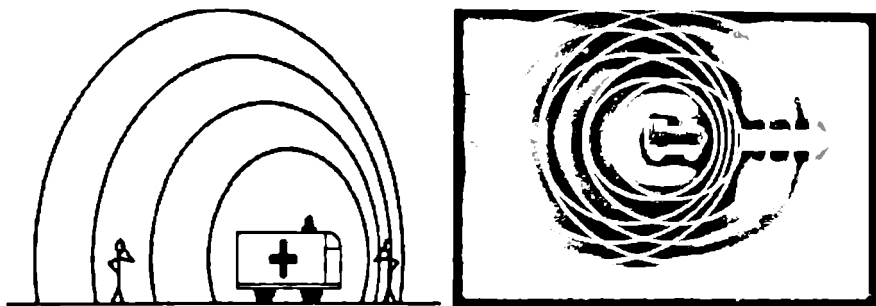
II.2.3 დოპლერის ეფექტი

ეფექტი აღმოჩენილ იქნა ქრისტიან დოპლერის მიერ 1842 წელს და ავტორის პატივსაცემად მას *დოპლერის ეფექტი* უწოდეს. ეფექტის არსი მდგომარეობს შემდეგში: თუ ტალღის წყარო უძრავია მიმღების (დამკვირვებლის) მიმართ, დამკვირვებლის მიერ აღქმული (რეგისტრირებული) სიხშირე (და ტალღის სიგრძე) ტოლია წყაროს მიერ გამოსხივებული სიხშირის (და ტალღის სიგრძის).

თუ ტალღის წყარო მოძრავია დამკვირვებლის მიმართ, მაშინ ამ უკანასკნელის მიერ რეგისტრირებული სიხშირე განსხვავდება წყაროს სიხშირისაგან. კერძოდ, თუ დამკვირვებელი უახლოვდება წყაროს, მაშინ რეგისტრირებული სიხშირე მეტია, მოშორების შემთხვევაში კი ნაკლები. ანალოგიური ეფექტია გარემოს (რომელშიც ვრცელდება ტალღა) მოძრაობის შემთხვევაშიც: თუ გარემო მოძრაობს ტალღის გაერცელების მიმართულებით (მაგალითად, ქარი დამკვირვებლისკენ), დამკვირვებლის მიერ აღრიცხული სიხშირე მეტია, წინააღმდეგ შემთხვევაში – ნაკლები (იხილე სქემატური სურათი 44).

ამრიგად, სიხშირის ცვლილება (ე.წ. სიხშირის დოპლერისეული წანაცვლება) დამოკიდებულია არა მხოლოდ წყაროს და დამკვირვებლის მოძრაობის ფარდობითი სიჩქარის სიდიდეზე, არამედ გარემოს მოძრაობის სიჩქარეზე და მის მიმართულებაზეც. ეს ეფექტი ვლინდება ნებისმიერ ტალღურ პროცესებში:

მექანიკური (ბგერითი ტალღები, წყლის ტალღები), ელექტრომაგნიტური, გრავიტაციული და სხვ. ტალღების შემთხვევაში.



სურათი 44

მოძრავი მანქანის მიერ ინდუცირებული ბგერითი ტალღის სიხშირის ცვლილება უძრავი დამკვირვებლის პოზიციიდან

(Nico A.M. Schellart. "Compendium of Medical Physics, Medical Technology and Biophysics", Amsterdam, 2009)

ბგერითი ტალღების შემთხვევაში ტალღის მიმდებარის (დამკვირვებლის) და წყაროს ფარდობითი სიჩქარე ისაზღვრება ტალღის გავრცელების გარემოს მიმართ.

როგორც აღვნიშნეთ, დოპლერის ეფექტი განპირობებულია ტალღის წყაროს, ან მიმდებარის ურთიერთმოძრაობით. ისეთი ტალღების შემთხვევაში, რომელთა გავრცელებისათვის დრეკადი გარემო არ არის აუცილებელი (ერცვლდება ვაკუუმშიც; მაგალითად, სინათლის ტალღები), საკმარისია მხოლოდ დამკვირვებლისა და წყაროს სიჩქარეების შედარებითი სხვაობის განსაზღვრა. 44-ე სურათზე ნაჩვენებია, როგორ იზრდება მანქანის მიერ ინდუცირებული ბგერითი ტალღის სიხშირე (ტალღა "იკუმშება") მოძრავი მანქანის წინ და მცირდება (ტალღა იწელდება) მანქანის უკან მდგომი დამკვირვებლის მიმართ. გახსოვდეთ, რომ მანქანის მიერ ინდუცირებული ბგერითი ტალღის სიხშირე (მანქანის მიმართ) უცვლელია. ამ ცვლილებას აფიქსირებს (ობიექტურად) მხოლოდ მიმდებარე (დამკვირვებელი). ამრიგად, სიხშირეც (ისევე, როგორც სიჩქარე, მასა და სხვ.) ფარდობითი სიდიდეა.

იმისთვის, რომ გავიგოთ დოპლერის ეფექტის არსი, განვიხილოთ შემდეგი მაგალითი: დაუშვათ, რომ ადამიანი (მსროლელი) ისვრის ბურთებს მუდმივი სიხშირით (1 ბურთი/წამში) თქვენკენ. ჩავთვალოთ, რომ ბურთები გარემოში მოძრაობს მუდმივი სიჩქარით. თუ მსროლელი უძრავია, თქვენ სტაციონარულად მხდებით 1 ბურთს/წამში. მაგრამ, თუ მსროლელი დაიწყებს მოძრაობას თქვენი მიმართულებით, თქვენ მიიღებთ ბურთებს უფრო ხშირად, ვინაიდან მანძილი თქვენსა და მსროლელს შორის თანდათან მცირდება, შესაბამისად, მცირდება ბურთის გასაღვლელი მანძილი და დრო (აუცილებელი ამ მანძილის გაგვლისათვის). საწინააღმდეგო შემთხვევაში, თუ მსროლელი თქვენ გშორდებათ, სიხშირე, რომლითაც თქვენ მიიღებთ მის მიერ გასროლილ ბურთებს, შემცირდება.

განვიხილოთ დოპლერის პრინციპი ბეგრითი ტალღის მაგალითზე. თუ ბეგრითი ტალღის მიმღები (დამკვირვებელი) უძრავია და წყარო (მანქანა სირენით) მოძრაობს U სიხარით (სურათი 44). ბეგრითი ტალღა ერთი პერიოდის (T) განმავლობაში გავრცელდება TV მანძილზე (V - ტალღის გავრცელების სიჩქარეა ვაკუუმის მიმართ). თვით ტალღის წყარო ამ დროის განმავლობაში დასცილდება საწყის (ტალღის ინდექსების) წერტილს TU მანძილით. ამიტომ პერიოდის (T) განმავლობაში ტალღა წყაროს მიმართ $TV \pm TU$ მანძილზე აღმოჩნდება. ტალღის სიგრძის განმარტების თანახმად, ეს მანძილი მოცემულ გარემოში გავრცელებული ტალღის სიგრძის (λ) ტოლია, ე.ი. გვაქვს:

$$\lambda = TV \pm TU = TV \left(1 \pm \frac{U}{V}\right) \quad (II.2.3.4.1)$$

ამ განტოლებაში „+“ ნიშანი იწერება მაშინ, როდესაც ტალღის წყარო (მანქანა) შორდება მიმღებს და „-“ ნიშანი, როდესაც ტალღის წყარო უახლოვდება მიმღებს. თუ გაითვალისწინებთ კავშირს ტალღის სიგრძესა და მის სიხშირეს შორის ($\nu = \frac{V}{\lambda}$), ადვილად დაადგენთ მიმღების მიერ დაფიქსირებულ ტალღის სიხშირეს (ν) (წყაროს მიერ ინდექსირებული სიხშირე - $\nu_0 = \frac{1}{T}$).

$$\nu = \frac{V}{\lambda} = \frac{V}{TV \left(1 \pm \frac{U}{V}\right)} = \frac{\frac{1}{T}}{\left(1 \pm \frac{U}{V}\right)} = \frac{\nu_0}{\left(1 \pm \frac{U}{V}\right)} \quad (II.2.3.4.2)$$

ფორმულიდან (II.13.4.2) გამოვძინარკობს, რომ როდესაც ტალღის წყარო (მანქანა) უახლოვდება დამკვირვებელს, დამკვირვებლის მიერ დაფიქსირებული ბეგრის სიხშირე მეტია მანქანის მიერ ინდექსირებულ სიხშირეზე ($\nu > \nu_0$). ხოლო, როდესაც შორდება, დამკვირვებლის მიერ დაფიქსირებული ბეგრის სიხშირე ნაკლებია ტალღის წყაროს მიერ ინდექსირებულ სიხშირეზე ($\nu < \nu_0$).

ამგვარად, როდესაც მიმღები უახლოვდება რხევის წყაროს მის მიერ აღრიცხული რხევის სიხშირე აღემატება ტალღის წყაროს მიერ ინდექსირებულ სიხშირეს ($\nu > \nu_0$), და პირიქით, როდესაც მიმღები შორდება ტალღის წყაროს - $\nu < \nu_0$ -ზე.

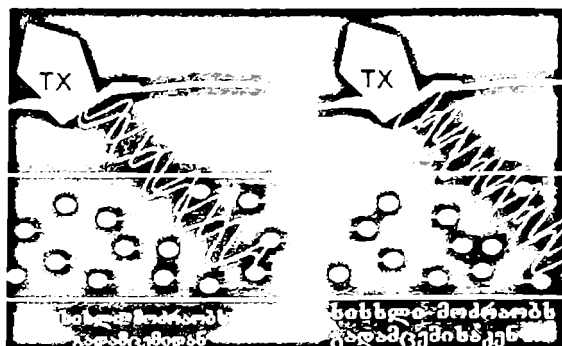
ბეგრის სიხშირის დოპლერისეული წანაცვლება უდევს საფუძვლად ხელსაწყოს, რომლითაც ფიქსირდება ავტომაქნების მოძრაობის სიჩქარე.

დოპლერის ეფექტის მედიკო-ბიოლოგიური გამოყენება.

როგორც ზემოთ აღინიშნა, დოპლერის ეფექტი ვლინდება მაშინაც, როდესაც ბეგრითი ტალღის წყარო და მიმღები ერთმანეთის მიმართ უძრავნი არიან, ხოლო დრეკადი გარემო, რომელშიც ვრცელდება მექანიკური ტალღა, მოძრაობს რაიმე სიჩქარით რხევის წყაროდან მიმღებისაკენ, ან პირიქით. მოძრავი გარემო მისი მოძრაობის მიმართულების მიხედვით თითქოს შლის ან კუმშავს მექანიკურ ტალღას (ამცირებს ან ზრდის მექანიკური ტალღის სიხშირეს). სიხშირის ეს ცვლილება, ცხადია, დამოკიდებულია გარემოს მოძრაობის სიჩქარეზე. სწორედ ეს ფენომენი უდევს საფუძვლად დოპლერის ეფექტის მედიკო-ბიოლოგიურ გამოყენებას. მაგალითად, ამ ეფექტის საფუძველზე სისხლძარღვთა სისტემაში ზომავენ სისხლის დინების ხაზოვან სიჩქარეს. ამისათვის სისხლძარღვში სპეციალური კათეტერის საშუალებით შეყავთ (სურათი 45), ან სისხლძარღვის გარე ზედაპირზე (კედლის დაუზიანებლად) ათავსებენ (სურათი 46) რხევის წყარო და მიმღები.

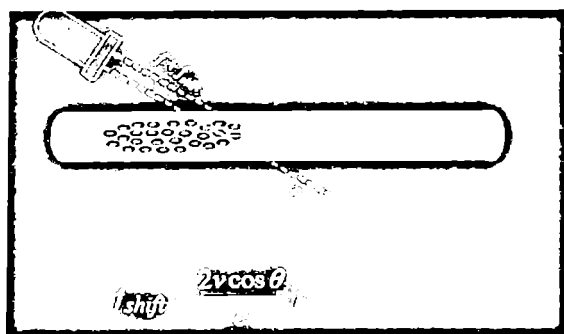
მიმღების საშუალებით აფიქსირებენ სისხლძარღვში გავრცელებული მექანიკური ტალღის სიხშირეს ν -ს. ეს სიხშირე, როგორც ზემოთ იყო აღნიშნული, დოპლერის ეფექტის გამო განსხვავდება ტალღის წყაროს სიხშირისაგან (ν_0). მათ შორის სხვაობა ($\Delta\nu = \nu - \nu_0$) დამოკიდებულია სისხლის

დინების სიჩქარეზე და იძლევა ამ სიჩქარის განსაზღვრის საშუალებას (სურათი 45).



სურათი 45

დოპლერის ეფექტის გამოყენება სისხლდარღვევებში სისხლის დინების სიჩქარის განსაზღვრისთვის (სქემა); დოპლერის სიხშირე იცვლება, როდესაც ულტრაბგერა აირეკლება მოძრავი ობიექტისაგან



სურათი 46

სისხლში ერითროციტების მოძრაობის სიჩქარის გაზომვა დოპლერის ეფექტის გამოყენებით (f_{shift} – სიხშირის დოპლერისეული წანაცვლება; f – ულტრაბგერის სიხშირე; v – სისხლის ნაკადის (ერითროციტების) სიჩქარე; c – ულტრაბგერის სიჩქარე; θ – კუთხე სისხლის ნაკადის მიმართულებასა და ულტრაბგერის ტალღის მიმართულებას შორის). ლტრაბგერის წყარო და მიმღები ერთ უძრავ კამერაშია სისხლდარღვის კედელთან რაიმე θ კუთხით დახრილი. მიმღები აფიქსირებს ერითროციტიდან არეკედილი ტალღის სიხშირეს, რაც ცხადია (ობიექტი შორდება წყაროს) უფრო ნაკლებია გამოსხივებულ სიხშირეზე ($f_{-ზე}$)

დოპლერის ეფექტის გამოყენებით შეიძლება გავსოზოთ აგრეთვე გარემოში მოძრავი ობიექტების სიჩქარე. მაგალითად, სისხლში ერითროციტების (სურათი 46). გულის კამერების კედლების მოძრაობის, ნაწლავების კედლების რჩევის სიჩქარე, რასაც, ცხადია, დიდი მნიშვნელობა აქვს მედიცინისთვის. ზოგადად, ეს მეთოდი დოპლეროგრაფიის სახელითაა ცნობილი.

საკონტროლო კითხვები და ამოცანები:

1. რას ეწოდება გრძივი და განივი ტალღა? რა განსხვავებაა მათ შორის? მოიყვანეთ გრძივი და განივი ტალღების მაგალითები.

2. ტალღის რომელი პარამეტრებია დამოკიდებული ტალღის წყაროზე და რომელი - მისი გავრცელების არეზე? რას ეწოდება ენერგიის ნაკადი, ტალღის ინტენსივობა? რაში მდგომარეობს განსხვავება ამ ცნებებს შორის? რა ერთეულებში იზომება ეს პარამეტრები?

3. წყალში ვრცელდება ორი ტალღა; ამ ტალღების ამპლიტუდები ერთმანეთის ტოლია. პირველი ტალღის სიხშირე უდრის 10^2 ჰც, მეორის - 10^4 ჰც-ს. როგორია შეფარდება ამ ტალღების ინტენსივობებს შორის?

4. გრუხუნის ხმა გაისმა ელვის გამოჩენიდან 7 წამის შემდეგ, დამკვირვებლიდან რა მანძილის დაშორებით მოხდა განმუხტვა (ელვის გაჩენა)? (ბგერის გავრცელების სიჩქარე $V = 330$ მ/წმ)

5. ქუჩის ხმაური შეადგენს 70 დბ (სმენადობის ზღერის მიმართ). გაველილმა მანქანამ გაზარდა ხმაურის დონე 30 დბ-ით. რას უდრის ამ შემთხვევაში ქუჩის ხმაურის ინტენსივობა?

6. ბგერითი და ულტრაბგერითი ტალღების ამპლიტუდები და გავრცელების სიჩქარე ერთმანეთის ტოლია. რამდენჯერ აღებატება ულტრაბგერითი ტალღის ინტენსივობა ბგერითი ტალღის ინტენსივობას, თუ მისი სიხშირე 1000-ჯერ მეტია ბგერითი ტალღის სიჩქარეზე?

7. ქარმონიული ბგერითი ტალღის სიხშირე თანდათან იზრდება, ხოლო მისი ინტენსივობა არ იცვლება. როგორ იცვლება ამ დროს ხმამაღლობა?

8. ულტრაბგერა სიხშირით 2,3 მკვ ვრცელდება ქსოვილში. რას უდრის მისი ტალღის სიგრძე? შეადარეთ ამ ტალღის სიგრძის მნიშვნელობა ულტრაბგერითი ტალღის სიგრძესთან სიხშირით 2,3 კკვ, რომელიც ვრცელდება იმავე გარემოში.

9. ულტრაბგერითი ტალღა ვრცელდება ერთი და იმავე სიხშირის ცხიმოვან და ძვლოვან ქსოვილებში. რომელ ქსოვილშია გამოყოფილი სითბოს რაოდენობა მეტი? რომელ ქსოვილში შემცირდება მნიშვნელოვნად ტალღის ინტენსივობა?

10. ულტრაბგერის გავრცელების სიჩქარე 1500 მ/წმ-ია, სიხშირე - 1,2 მკვ. ტალღა აირეკლება 2 სმ-ის სიღრმეზე მდებარე ორი გარემოს გამყოფი ზედაპირიდან. გამოთვალეთ დროის შუალედი, რომლის შემდეგაც დეტექტორი დააფიქსირებს დაბრუნებულ ტალღას.

11. პირველი გარემოს სიშვრივე 1,2-ჯერ აღებატება მეორე გარემოს სიშვრივეს. რას უდრის ამ არეების გამყოფი ზედაპირიდან დაბრუნებული ულტრაბგერითი ტალღის ინტენსივობა, თუ ჩათვლით, რომ ტალღის გავრცელების სიჩქარე ორივე არეში ერთიდაიგივეა?

III სითხეების და აირების ბიომექანიკა

III.1 სითხეების ბიომექანიკა

როგორც ცნობილია, ცოცხალი ორგანიზმის დიდ ნაწილს სხედასხვა სითხე (ე.წ. *ბიოლოგიური სითხეები*) შეადგენს. ბიოლოგიურ სითხეებს მიეკუთვნება, მაგალითად, სისხლი, ლიმფა და სხვა.

სითხე – მატერიის ისეთი სახეა, რომელიც სხედასხვა სახის ზემოქმედების პირობებში ვერ ინარჩუნებს წონასწორულ მდგომარეობას და ზემოქმედების პირობებში განიცდის დეფორმაციას, ან იწყებს მოძრაობას (*დინებას*) შემოსაზღვრული სივრცის გარკვეულ ნაწილში) აირებისაგან განსხვავებით სითხეების კუმშვადობა ძალიან მცირეა (1% წნევის ყოველ 100 ატმოსფეროზე).

მექანიკის ნაწილს, რომელიც შეისწავლის სითხეებს „მოსვენების“, ანუ უძრავ (წონასწორულ) მდგომარეობაში *სითხეების სტატიკა* ეწოდება, ხოლო სითხეებს მოძრაობის პროცესში – *სითხეების დინამიკა*.

ჰიდროსტატიკა - ფიზიკის ნაწილია, რომელიც სწავლობს უძრავი სითხეების ფიზიკურ თვისებებს და მათს წონასწორულ მდგომარეობებს.

ჰიდროდინამიკა – ფიზიკის ნაწილია, რომელიც სწავლობს უკუმშველი სითხეების დინების და მათ მყარ სხეულებთან ურთიერთქმედების კანონზომიერებებს.

ცხადია, რომ ბიოლოგიური სითხეების (განსაკუთრებით სისხლის) მექანიკური (*სტატიკური და დინამიკური*) თვისებების შესწავლას დიდი მნიშვნელობა ენიჭება. ბიომექანიკის იმ ნაწილს, რომელიც სწავლობს სისხლის მიმოქცევას სისხლძარღვთა სისტემაში, *ჰემოდინამიკა* ეწოდება. ცხადია, ჰემოდინამიკის საფუძველს წარმოადგენს ის კანონზომიერებანი, რომლებიც დადგენილია *ჰიდროდინამიკაში* ბლანტი სითხეების დინების შესწავლისას. სისხლის მიმოქცევის კანონზომიერების სრულყოფილი დადგენისთვის საჭიროა მისი სტატიკური (უძრაობის მდგომარეობაში) თვისებების გათვალისწინებაც. ბუნებრივია, კიდრე შევედგებოდეთ სისხლის მიმოქცევის ფიზიკური საფუძვლების შესწავლას, გავეცნოთ ჰიდრომექანიკის (ჰიდროსტატიკისა და ჰიდროდინამიკის) ძირითად პრინციპებს.

III.1.1 ჰიდროსტატიკის ძირითადი ცნებები და კანონზომიერებანი

სითხის წნევა

უძრავი სითხის შიგნით მოქმედებს წნევის ძალა, რომელიც, თუ მის ზედაპირზე სხვა ძალები არ მოქმედებს, მხოლოდ მისი წონით არის გამოწვეული.

სითხის წნევა ეწოდება სითხის ფენის ან სითხის მხრიდან მყარი სხეულის ზედაპირის ფართობის ერთეულზე *მართობულად* მოქმედ ძალას:

$$P = \frac{F}{S}, \quad (\text{III.1.1.1})$$

სადაც P – სითხის წნევაა, F – წნევის ძალა, S – ზედაპირის ფართობი.

გამოთვალათ, თუ რა წნევას ქმნის რაიმე h სიმაღლის უძრავი სითხის სვეტი ზედაპირზე, რომელზეც ის მოქმედებს. ვთქვათ, გვაქვს ცილინდრული ჭურჭელი, რომლის ფუძის ფართობია S და მასში ასხია h სიმაღლის სითხე, რომლის სიმკრივეა ρ . ძალა, რომლითაც სითხის ეს სვეტი მოქმედებს ჭურჭლის ფსკერზე, მისი წონის ტოლია:

$$F = mg$$

სადაც m - სითხის ამ სვეტის მასაა, g - სიმძიმის ძალის აჩქარება.

ფორმულის (III.1.1.1) თანახმად, წნევა ტოლია:

$$P = \frac{F}{S} = \frac{mg}{S} = \frac{\rho V g}{S} = \frac{\rho S h g}{S} = \rho g h.$$

სადაც $m = \rho V$ და $V = S h$ (V - ცილინდრის მოცულობა).

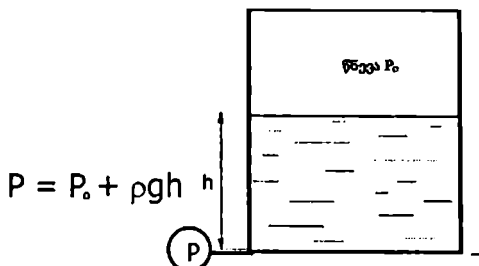
ამრიგად, h სიმაღლის სითხის სვეტი (უძრავი) ქმნის წნევას, რომელიც სვეტის სიმაღლის პროპორციულია. ცხადია, დამდგარი წყლის (ტბა, ზღვა) h სიღრმეზე წნევა $P = \rho g h$.

შეგნიშნათ, რომ ჩვენ გამოთვალეთ სითხის წნევა, რომელიც გამოწვეულია გრავიტაციული ძალით. უფრო კონკრეტულად - წონით, და უწონობის პირობებში უძრავი სითხე წნევას ვერ შექმნის. თუკი გავითვალისწინებთ იმ ფაქტს, რომ სითხის ზედაპირზეც (როგორც დედამიწაზე არსებულ ყველა სხეულზე) მოქმედებს ატმოსფერული წნევა, მაშინ სრული წნევა, რომელსაც ჭურჭლის ფსკერი განიცდის, ტოლია:

$$P = P_0 + \rho g h,$$

სადაც P_0 - ატმოსფერული წნევაა (სურათი 47).

უძრავი სითხის წნევას *ჰიდროსტატიკური წნევა* ეწოდება. იგი განპირობებულია სითხეზე გრავიტაციული ძალის მოქმედებით (სითხის წონით).



სურათი 47

ჭურჭლის ფსკერზე სრული წნევა ტოლია h სიმაღლის უძრავი სითხის სვეტის ჰიდროსტატიკური წნევისა და სითხის ზედაპირზე არსებული წნევათა ჯამისა

SI სისტემაში წნევა იზომება პასკალებში (პა). წნევა 1 პასკალის ტოლია, თუ 1მ² ფართობის ზედაპირზე მოქმედებს ზედაპირის მართობული 1 ნიუტონი ძალა: $1 \text{ პა} = 1 \text{ ნ/მ}^2$. პრაქტიკაში გამოიყენება აგრეთვე წნევის სხვა ერთეულებიც: ვერცხლისწყლის სვეტის წნევა მმ-ში (1 მმ Hg = 133 პა); ტექნიკური ატმოსფერო (ატმ) 1ატმ = 1 კგა/სმ²; ფიზიკური ატმოსფერო - ატმ (1 ატმ ის წნევაა, რომელსაც იწვევს ატმოსფერული ჰაერის ზღვის დონეზე), 1 ატმ = 760 მმ Hg = $1,01 \cdot 10^5$ პა.

პასკალის კანონი

სითხის, ან სითხეზე წარმოებული წნევა თანაბრად გადაეცემა სითხის ყველა წერტილის ყველა მიმართულებით (პასკალის კანონი).

სითხის წნევა ჭურჭელში ერთნაირია რაიმე პორიზონტალური კვეთის სიბრტყის ყველა წერტილში (სურათი 48).

პასკალის კანონიდან გამომდინარე, ორგანიზმის თხევად არეებში ჭარბმა წნევამ და მისმა გავრცელებამ შეიძლება გამოიწვიოს სხვადასხვა პათოლოგიური პროცესი: ვიწრო ტანსაცმელმა, ან სხეულის ზედაპირის ტრავმამ ამიონური სითხის გავლით შეიძლება დააზიანოს ნაყოფი, თვალზე ზეწოლის, ან ბლაგვი საგნის ზემოქმედებისას თვალისშიგა სითხეში ჭარბი წნევის გავრცელების შედეგად შესაძლებელია რეტინას ან ოპტიკური ნერვის დაზიანება, სითხის ანორმალურმა დაგროვებამ პლევრულ ან პერიკარდიულ არეში შეიძლება გამოიწვიოს გულის ან ფილტვის დაზიანება.



სურათი 48

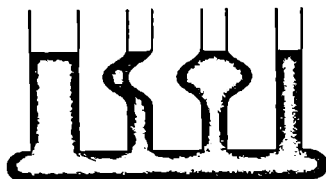
სითხის წნევა პორიზონტალურ სიბრტყეზე

სითხის ზედაპირზე არსებული ატმოსფერული წნევა და ზოგადად, ზედაპირზე წარმოებული წნევა უცვლელად გადაეცემა ჭურჭლის ფსკერსაც! ეს დასკვნა გამომდინარეობს პასკალის კანონიდან.

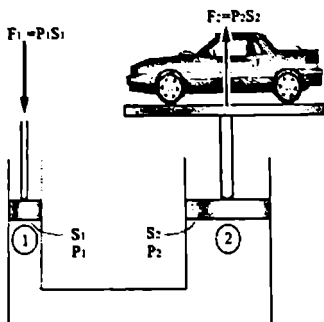
მართალია, სიღრუსტატიკის ძირითადი კანონი $P = \rho g h$ გამოყვანილია უკუმშველი სითხისთვის, მაგრამ იგი საკმაოდ მაღალი სიზუსტით შეიძლება გამოყენებულ იქნეს ნებისმიერი სითხისთვის, რადგან, როგორც ზემოთ მიუუთითეთ, სითხეები პრაქტიკულად უკუმშველია და სიმკრივეც, პრაქტიკულად, ერთნაირია ($\rho = \text{const}$).

უძრავი სითხის წნევა (სიღრუსტატიკური წნევა) იზოტროპული პარამეტრია, ე. ი. ერთნაირია ზედაპირიდან h სიღრმეზე ნებისმიერ წერტილში.

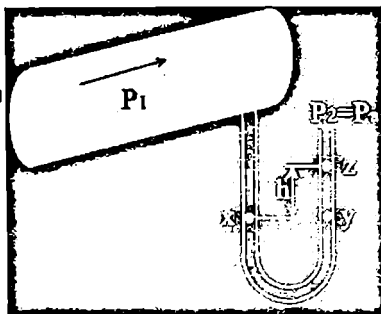
პასკალის კანონიდან გამომდინარეობს ერთგვაროვანი სითხის დონეების ტოლობა სხვადასხვა ფორმის ზიარ ჭურჭელში (სურათი 49 ა).



ა



ბ



გ

სურათი 49

ერთგვაროვანი სითხის დონეების ტოლობა ზიარტურტელში (ა);
ძალაში მოგება მარტივი მექანიზმით (ბ), სითხიანი მანომეტრით წნევის
გაზომვის სქემა სისხლძარღვში (გ) (h – სითხის დონეთა სხვაობაა, წნევა
 $P_I = \rho gh$, სხეულის წნევა $P_I = P_e + P_I$)

ზიარტურტელის პრინციპი.

თუ U-ს მაგვარი თავდია მიღის სხედასხვა მუხლში ასხია ρ_1 და ρ_2
სიმკვრივის სითხე, მაშინ პასკალის კანონის თანახმად,

$$P_1 = P_2,$$

$$\text{ე.ი. } \rho_1 g h_1 = \rho_2 g h_2;$$

$$\frac{h_1}{h_2} = \frac{\rho_2}{\rho_1}.$$

თუ $\rho_1 = \rho_2$, მაშინ $h_1 = h_2$. ამგვარად, ზიარტურტელში ერთგვაროვანი სითხე
ერთ დონეზეა. პასკალის კანონი უდევს საფუძვლად მრავალ ტექნიკურ
მოწყობილობას და მექანიზმს. გავეცნოთ ზოგიერთ მათგანს.

49ბ სურათზე ნაჩვენებია მარტივი მექანიზმი – ჰიდრავლიკური ამწე. თუ S_1 ფართობის მცირე დეგუშე ეიმოქმედებთ F_1 ძალით, მაშინ განვითარდება წნევა $P_1 = \frac{F_1}{S_1}$. იგივე წნევა იმოქმედებს მეორე დეგუშის S_2 ფართობზე ($P_1 = P_2 =$

პასკალის კანონი) და წნევის ძალა $F_2 = P_1 S_2 = \frac{F_1}{S_1} \cdot S_2 = F_1 \frac{S_2}{S_1}$. ე. ი. ძალაში

ვიგებთ იმდენჯერ, რამდენჯერაც დიდი დეგუშის ფართობი მეტია მცირე დეგუშის ფართობზე (სიმცირის გამო ხახუნის ძალა მხედველობაში არაა მიღებული). ადვილია იმის ჩვენება, რომ ეს მექანიზმი (და არც ერთი სხვა მექანიზმი) მუშაობაში მოგებას არ იძლევა.

პასკალის კანონი უდევს საფუძვლად *მანომეტრების* მუშაობას. სითხიანი მანომეტრი (სურათი 49გ) შედგება სითხის (ვერცხლისწყალი, წყალი, სპირტი, ზეთი) შემცველ U -ს მაგვარი თავლია მილისაგან. მანომეტრებს იყენებენ სტატიკური წნევის განსაზღვრის მიზნით. მისი ერთი ბოლო ღიაა (მოქმედებს მხოლოდ ატმოსფერული წნევა), მეორე შეერთებულია გამოსაკვლევ ობიექტთან. თუ მანომეტრის ორივე მუხლში სითხის დონე ერთნაირია, გამოსაკვლევი ობიექტის წნევა ატმოსფერულს უდრის; როდესაც მანომეტრის თავლია მუხლში სითხის დონე ქვემოთდება, გამოსაკვლევი ობიექტის წნევა ატმოსფერულზე დაბალია; როდესაც სითხის დონე მანომეტრის თავლია მუხლში აიწევს მაღლა, გამოსაკვლევი ობიექტის წნევა ატმოსფერულზე მაღალია, მანომეტრის მუხლებში სითხის დონეთა შორის სხვაობა Δh განსაზღვრავს წნევის მნიშვნელობას. მაღალი წნევის გაზომვის დროს გამოიყენება დიდი სიმაკრივის მქონე სითხე (ვერცხლისწყალი).

სამედიცინო კვლევებსა და პრაქტიკაში ისტორიულად ისე დამკვიდრდა, რომ ძირითადად ვერცხლისწყლიან (სინდიკის) მანომეტრს იყენებენ და ამიტომ წნევას ვერცხლისწყლის სვეტის მილიმეტრებში ზომავენ, მაგალითად, 120 მმ Hg ეს ის წნევაა, რომელსაც ქმნის 120 მმ სიმაღლის ვერცხლისწყლის სვეტი. მისი გადაყვანა წნევის SI სისტემის ერთეულში – პასკალში, ადვილია, ($P = \rho gh$; $P = 13600 \text{ კგ/მ}^3 \times 9,8 \text{ მ/წმ}^2 \times 120 \cdot 10^{-3} \text{ მ} = 15993 \text{ პა}$), თუმცა ადამიანის წნევის პასკალებში გამოსახვა პრაქტიკაში მოუხერხებელი აღმოჩნდა.

არქიმედეს კანონი

სითხეში ან აირში მოთავსებულ სხეულზე მოქმედებს ამომგდები ძალა, რომელიც სხეულის მოცულობის მიერ გამოდევნილი სითხის ან აირის წონის ტოლია (III.1.1.4) (სურათი 50):

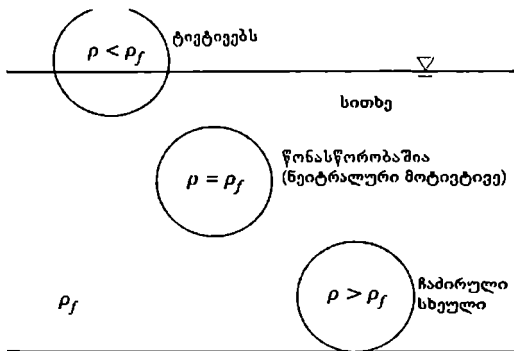
$$F_A = \rho_f g V_{\text{სხ}} \quad (\text{III.1.1.4})$$

სადაც ρ_f – სითხის ან აირის სიმკვრივეა, g – სიმძიმის ძალის აჩქარება ($\approx 9,8 \text{ მ/წმ}^2$), $V_{\text{სხ}}$ – სითხეში ჩაძირული სხეულის, ან სხეულის ნაწილის მოცულობაა.

ადამიანის ორგანიზმში ცერებრული სითხის სიმკვრივე 1007 კგ/მ³, რაც მხოლოდ უმნიშვნელოდ (1,2%-ით), ნაკლებია ტვინის ქსოვილის სიმკვრივეზე (1040 კგ/მ³), რაც განაპირობებს იმას, რომ ტვინი ამ სითხეში ჩვეულებრივ თითქმის შეწონილ მდგომარეობაში იმყოფება (არქიმედეს ძალის მოქმედების გამო).

სადიაგნოსტიკო მიზნით ზეურგის ტვინის სითხის ამოღების დროს შეწონილობის პირობები ირღვევა, ნერვები და სისხლძარღვები განიცდის დამატებით ზეწოლას გარემომცველი ქსოვილების მხრიდან, რაც დისკომფორტს იწვევს. ამ შემთხვევაში აუცილებელია დაცვითი ღონისძიებების ჩატარება, სანამ ცერებრული სითხის მოცულობა არ აღდგება.

პაციენტებს მოტორული უკმარისობით კუნთების გადაღლის და ატროფიის პრევენციის მიზნით ხშირად ურჩევენ სამკურნალო ვარჯიშების ჩატარებას წყალში.



სურათი 50

სითხეში მოთავსებული სხეულის სიმკვრივის (ρ) სხეულები.

სხეულის მდებარეობა დამოკიდებულია მასზე მოქმედი არქიმედეს ამომგდების ძალის სიდიდეზე (როდესაც $\rho_{სხ} < \rho_f$ - სხეული ტივტივებს სითხის ზედაპირზე,

$\rho_{სხ} = \rho_f$ - სხეული წონასწორობაშია სითხეში, $\rho_{სხ} > \rho_f$ -

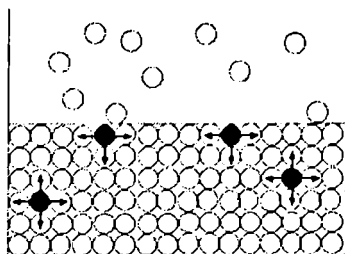
სხეული ჩაძირულია (ρ_f - სითხის სიმკვრივე)

ზედაპირული დაჭიმულობა

ზედაპირული დაჭიმულობა განპირობებულია მოლეკულური ურთიერთქმედების ძალებით. სითხის სიღრმეში თითოეული მოლეკულა განიცდის მიზიდულობას გარემომცველი მოლეკულების მიერ ყველა მიმართულებით; შედეგად ჯამური მიზიდულობის ძალა ნულის ტოლია. სითხის ზედაპირზე განლაგებულ მოლეკულებზე გარემომცველი სითხის მოლეკულების მიზიდულობის ძალა მიმართულია სითხის შიგნით, მოსაზღვრე არის (აირის) მოლეკულების მიზიდულობა გაცილებით სუსტია (აირის დაბალი სიმკვრივის და სხვა მიზეზთა გამო), და ვერ აბალანსებს სითხის შიგნით მიმართულ ძალას (სურათი 51), რის გამოც ყველა ზედაპირული მოლეკულა ცდილობს, “ჩაიძიროს” თავი სითხეში, რაც იმას ნიშნავს, რომ სითხე “ცდილობს”, მიიღოს ზედაპირის მინიმალური ფართობი.

მასასადამე, სითხის ზედაპირზე ყველა მოლეკულა ექვემდებარება მოლეკულურ მიზიდვას სითხის შიგნით, და მოლეკულების ეს ფენა წააგავს

გაჭიმულ დრეკად აქვს, რომელიც ცდილობს ზედაპირის ფართობის შემცირებას. ეს ურთიერთქმედება ბალანსირდება მხოლოდ სითხის რეზისტენტობით კუმშვადობის მიმართ; ასე რომ, წონასწორობისას ამ ძალების ტოლქმედი ნულის ტოლია. მაშასადამე, სითხე ზედაპირული დაჭიმულობის ძალის მოქმედებით დებულობს ზედაპირის მინიმალურ ფართობს (წყლის მცირე მოცულობა (წყეტი) სფეროს ფორმისაა, სფეროს ზედაპირის ფართობი კი ყველაზე მცირეა იმავე მოცულობის სხვა გეომეტრიულ სხეულებთან შედარებით).



სურათი 51

მოლეკულური მიზიდულობის ძალები
სითხის ზედაპირულ და სიღრმისეულ მოლეკულებს შორის
(აქ არ არის ნაჩვენები სითხის მოლეკულებზე აირის მოლეკულების მხრიდან მოქმედი მიზიდულობის ძალები მათი სიმცირის გამო)

ზედაპირული დაჭიმულობის ძალა ზედაპირის შემომსაზღვრელი კონტურის სიგრძის პროპორციულია:

$$F = \sigma l.$$

σ -ს ზედაპირული დაჭიმულობის კოეფიციენტს, ან, უბრალოდ, ზედაპირულ დაჭიმულობას უწოდებენ:

$$\sigma = \frac{F}{l} \quad (\text{III.1.1.5})$$

ზედაპირული დაჭიმულობის ერთეულია $[\sigma] = \text{ნ/მ}$; იგი რიცხობრივად ტოლია ზედაპირის კონტურის (პერიმეტრის) სიგრძის ერთ ერთეულზე მოქმედი ძალისა.

სითხის მოცულობაში არსებული მოლეკულების ხარჯზე ზედაპირის ფართობის გასაზრდელად საჭიროა მუშაობის შესრულება, რაც სითხის ზედაპირის თავისუფალი ენერგიის გაზრდას ხმარდება:

$$A = \sigma S$$

$$\sigma = \frac{A}{S} \quad (\text{III.1.1.6})$$

(III.1.1.6)-დან ზედაპირული დაჭიმულობის ერთეულია $[\sigma] = \frac{\chi}{\theta^2} = \frac{\text{გ}}{\text{სმ}^2}$. ამრიგად, ზედაპირული დაჭიმულობა განისაზღვრება იმ მუშაობით, რომელიც საჭიროა სითხის მოლეკულების ხარჯზე ზედაპირის ფართობის ერთი ერთეულით გასაზრდელად. ეს ნიშნავს, რომ ზედაპირული დაჭიმულობა ზედაპირის ფართობის ერთეულის ენერგიის ეკვივალენტურია, ანუ, იგი სითხის ზედაპირის თავისუფალ ენერგიას განსაზღვრავს. σ დამოკიდებულია ტემპერატურაზე; ტემპერატურის გაზრდით იგი მცირდება და კრიტიკულ ტემპერატურაზე $\sigma = 0$.

სითხის მდგრადი წონასწორობის დროს თავისუფალი ზედაპირული ენერგია მინიმალურია; გარე ძალების არარსებობის შემთხვევაში ენერგიის მინიმუმს ფართობის მინიმუმი (ე.ი. სფერო) შეესაბამება (წყლის ან ეთერის წყლის მცირე ზომის წვეთები).

სითხის ზედაპირის ფართობის მინიმიზაცია მისი ზედაპირული ენერგიის მინიმიზაციას ნიშნავს. ცხადია, სითხის ზედაპირი გლუვია (ვინაიდან მათემატიკურად გლუვი ზედაპირის ფართობი ყოველთვის მინიმალურია (შეადარეთ სფეროს (წყლის) ფართობი იმავე მოცულობის კუბის ფართობს)).

სითხის ზედაპირული დაჭიმულობის სიდიდე დამოკიდებულია არამარტო სითხის, არამედ მოსაზღვრე არის თვისებებზეც. იმ შემთხვევაში, როდესაც ლაპარაკია რაიმე ჭურჭელში მოთავსებული სითხის ზედაპირულ დაჭიმულობაზე, უნდა განვიხილოთ როგორც სითხე/აირი, ასევე სითხე/მყარი სხეულის (ამ შემთხვევაში იგულისხმება ჭურჭლის კედელი) მოსაზღვრე ზედაპირები. როგორც წესი, ზედაპირული დაჭიმულობა სითხე/აირის შემთხვევაში სრულიად განსხვავებულია ამ პარამეტრის მნიშვნელობისგან სითხე/მყარი სხეული მოსაზღვრე ზედაპირისთვის. ცხადია, რომ ამ ზედაპირების გეომეტრიული ფორმა დამოკიდებულია მოქმედ ძალების შორის ბალანსზე.

ორი ზედაპირის (თხევადი და მყარი) საზღვარზე წარმოიქმნება *კიდური კუთხე θ* , რომელიც დამოკიდებულია სითხის მოლეკულებსა და სითხის და მყარი სხეულის (ჭურჭლის კედელი) მოლეკულებს შორის ურთიერთქმედების ძალაზე. სითხის ზედაპირს *მენისკი* ეწოდება (სურათი 52).

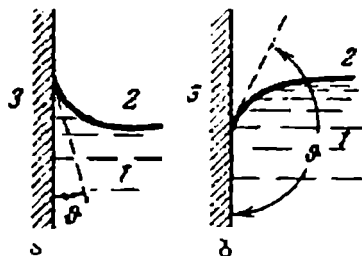
მენისკი *ჩაზნეკილია*, თუ ურთიერთქმედება სითხისა და მყარი სხეულის მოლეკულებს შორის უფრო ძლიერია, ვიდრე სითხის მოლეკულებს შორის ($0 < 90^\circ$). ასეთ სითხეს *დამასველებელი სითხე* ეწოდება. მენისკი *ამოზნეკილია*, თუ ურთიერთქმედება სითხისა და მყარი სხეულის მოლეკულებს შორის უფრო სუსტია, ვიდრე სითხის მოლეკულებს შორის ($\theta > 90^\circ$). ასეთ სითხეს *არადამასველებელი სითხე* ეწოდება.

კიდური კუთხე θ გამოიყენება მოცემული მყარი სხეულის მიმართ სითხის დამასველებლობის უნარის შესაფასებლად (სურათი 52). ადგენილია, რომ:

$$\cos \theta = \frac{\sigma_{23} + \sigma_{13}}{\sigma_{12}} \quad (\text{III.1.1.7})$$

აქ σ ზედაპირული დაჭიმულობაა, მისი ინდექსები შეესაბამება 52-ე სურათის აღნიშვნებს.

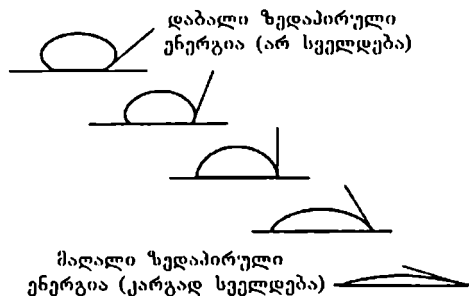
თუ მენისკი ამოზნექილია ($\theta > 90^\circ$), კოსინუსის მნიშვნელობა უარყოფითია, რაც ნიშნავს, რომ სითხე/მყარი სხეულის ზედაპირული დაჭიმულობა პრევალირებს (არადამასველებელი სითხე). წინააღმდეგ შემთხვევაში (დამასველებელი სითხე) მენისკი ჩაზნექილია ($\theta < 90^\circ$), კოსინუსის მნიშვნელობა დადებითია და სითხე/მყარი სხეულის ზედაპირული დაჭიმულობა დაბალია (სურათი 52).



სურათი 52

მოსაზღვრე ზედაპირები (სითხე /მყარი სხეული - (1-3), სითხე /აირი - (1-2) და მყარი სხეული /აირი - (3-2) და სითხის მენისკის ფორმა დამასველებელი (ა) და არადამასველებელი (ბ) სითხის შემთხვევაში

როდესაც ამბობენ, რომ სითხე დამასველებელია, ეს ნიშნავს, რომ ელინდება სითხის ადჰეზია ტურკლის კედლის მიმართ და ამ დროს სრულდება მუშაობა მყარი სხეულის ზედაპირთან კონტაქტის გაზრდის და სისტემის საერთო პოტენციური ენერგიის მინიმიზაციის მიზნით (სურათი 53).

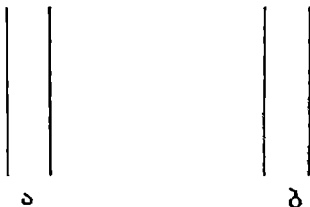


სურათი 53

ერთიდაიგივე ზედაპირის შემთხვევაში სხვადასხვა სითხის კიდური კუთხის და მისი ზედაპირული ენერგიის ცვლილება (ზედაპირული დაჭიმულობის სხვადასხვა მნიშვნელობების დროს)

აღსანიშნავია, რომ წყალი/ვერცხლის კონტაქტის შემთხვევაში კიდური კუთხე 90° -ის ტოლია. თუ კონტაქტში წყალი/ტეფლონი, კიდური კუთხე 180° -ის ტოლია: ამ უკანასკნელ შემთხვევაში სითხე/მყარი სხეული და სითხე/აირი ზედაპირების დაჭიმულობა ერთმანეთის ტოლია.

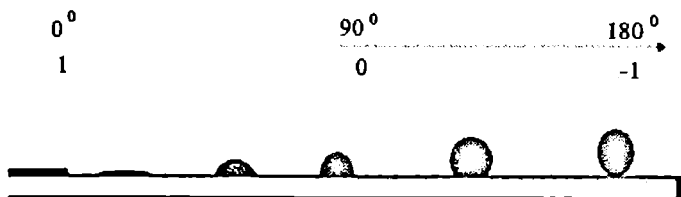
სურათზე 54 ნაჩვენებია წყალი/მინა და ვერცხლის/წყალი/მინა წყვილებისთვის სითხეების ზედაპირების ფორმები.



სურათი 54

მენისკის ფორმა მინის კაპილარში წყლის (დამასველებელი) (ა) და ვერცხლისწყლის (არადამასველებელი) (ბ) შემთხვევაში

სურათზე 55 ნაჩვენებია სითხე/მყარი სხეული ურთიერთქმედების მაგალითები სხვადასხვა სითხის შემთხვევაში, ხოლო მე-10 ცხრილში – კიდურის კუთხის მნიშვნელობები წყლის სხვადასხვა მასალებთან კონტაქტის დროს.



სურათი 55

სითხის დამასველებლობის უნარი კიდური კუთხით სხვადასხვა ზედაპირული დაჭიმულობის მქონე სითხის წვეთებისათვის

სითხის ზედაპირული დაჭიმულობის ფენომენი ელინდება სითხის წვეთების წარმოქმნის (სურათი 56) და დუღილის დროს, აირის ბუშტების წარმოქმნის პროცესებში და კაპილარულ მოვლენებში.

მედიცინაში, სადიაგნოსტიკო მიზნით, ხშირად საჭიროა სხვადასხვა ბიოლოგიური სითხის (ზურგის ტეინის სითხე, ნაღვლის წვენი და სხვ.) ზედაპირული დაჭიმულობის კოეფიციენტის განსაზღვრა.

უმარტივესი მეთოდი ზედაპირული დაჭიმულობის კოეფიციენტის განსაზღვრისა კაპილარული მილიდან წვეთის მოწყვეტის მეთოდია.

კაპილარიდან წვეთი მოწყდება მაშინ, როცა წვეთის წონა ტოლია ან მეტი ზედაპირული დაჭიმულობის ძალის:

$$mg \geq F_{\sigma} = 2 \pi R \sigma$$

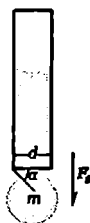
$$\sigma = \frac{mg}{2\pi R},$$

სადაც R – წვეთის მოწყვეტისას შევიწროებული ნაწილის რადიუსია, F_{σ} – ზედაპირული დაჭიმულობის ძალა.

ცხრილი 10

კიდური კუთხის მნიშვნელობები წყლის სხვადასხვა ზედაპირთან კონტაქტის შემთხვევაში

მყარი ზედაპირი	კონტაქტური (კიდური) კუთხე (გრად)
კბილის ემაილი	36
ნეილონი	70
კბილის დენტინი	39
კანი	55-120
გაწმენდილი კანი	80 – 100
თმა	89
პოლიეთილენი	94
პარაფინი	110



სურათი 56

სითხის წვეთის წარმოქმნა

დადგენილია, რომ შევიწროებული ნაწილის რადიუსი ყოველთვის ნაკლებია კაპილარის რადიუსზე (R_j), თანაფარდობა ასეთია:

$$R = 0,62 R_j$$

მწერებს შეუძლიათ წელის ზედაპირზე გადაადგილება, მისი ზედაპირის დარღვევის გარეშე: მწერების ფეხების ფორმა და არადამასველებლობა უზრუნველყოფს მათი სიმძიმის ძალის განაწილებას წელის ზედაპირზე (თხილაძურების მსგავსად), ისე რომ, წვალი განიცდის მინიმალურ დეფორმაციას და წარმოიქმნება შესაბამისი ზედაპირული დაჭიმულობის ძალა, რომელიც აკომპენსირებს მწერის წონას და უზრუნველყოფს წელის ზედაპირზე მის განეგრებას (სურათი 57).



სურათი 57

წელის ზედაპირზე მოსიარულე მწერი.

(Paul Davidovich "Physics in Biology and Medicine", third edition, 2007)

ლაპლასის კანონი

სითხის ნებისმიერი არაბრტყელი ზედაპირი წარმოქმნის დამატებით წნევას (ΔP) მის შიგნით, რომელიც დამოკიდებულია სიმრუდეზე (მაგალითად, წვიმის დროს წელის ზედაპირზე წარმოქმნილი ბუშტები, საპნის ბუშტი და სხვ.). ზედაპირის მიერ წარმოქმნილი დამატებითი წნევა დამოკიდებულია ამ ზედაპირის საშუალო სიმრუდეზე (K) და განისაზღვრება ლაპლასის კანონით.

ამ კანონის თანახმად, სითხის გამრუდებული ზედაპირის ქვეშ წნევის ნამატი $\Delta P = 2K\sigma$ (სადაც K ზედაპირის საშუალო სიმრუდეა, σ - სითხის ზედაპირული დაჭიმულობის კოეფიციენტი):

$$K = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right),$$

აქ R_1 და R_2 - ზედაპირის სიმრუდის მთავარი რადიუსებია (ზედაპირის რადიუსებია მიღებული ურთიერთმართობული კვეთის დროს).

K -ს მნიშვნელობის გათვალისწინებით სითხის გამრუდებული ზედაპირის ქვეშ წნევა ტოლია:

$$P = P_0 + 2\sigma \quad K = P_0 + \sigma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right),$$

სადაც P_0 - ატმოსფერული წნევაა. წნევის ნამატი, რომელიც ზედაპირის სიმრუდითაა გამოწვეული ტოლია:

$$\Delta P = \sigma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$$

ამოზნეკილი ზედაპირის შემთხვევაში ΔP მეტია, ხოლო ჩაზნეკილის შემთხვევაში ნაკლები, ვიდრე სწორი ზედაპირის შემთხვევაში.

იქ, სადაც სიმრუდის რადიუსი დიდია, ზედაპირი გვეჩვენება ბრტყლად (მაგალითად, ზღვის ან ოკეანის ზედაპირი, სადაც სიმრუდის რადიუსი დედამიწის საშუალო რადიუსის ტოლია).

გრძელი ცილინდრის შემთხვევაში ცილინდრის ღერძის გასწვრივი მიმართულებით სიბრტყე უსასრულოდ დიდრადიუსიანი სფერული სეგმენტის ზედაპირის სახით შეიძლება წარმოვიდგინოთ ($R_2 \rightarrow \infty$ ცილინდრის ზედაპირის სიმრუდის რადიუსია ღერძის გასწვრივ მიმართულებით). მაშინ მივიღებთ:

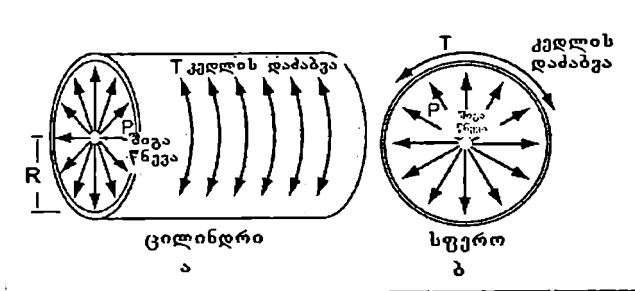
$$\frac{1}{R_2} = \frac{1}{\infty} = 0.$$

თუ R_1 აღვნიშნავთ R (R_1 - ცილინდრის განივკვეთის რადიუსია), ცილინდრის შემთხვევაში (სურათი 58ა, 59ა) ვღებულობთ:

$$\Delta P = \frac{\sigma}{R}. \quad (\text{III.1.1.8})$$

სფერული ზედაპირისთვის $R_1 = R_2 = R$ (სურათი 58 ბ) და

$$\Delta P = \frac{2\sigma}{R} \quad (\text{III.1.1.9})$$



სურათი 58

წნევა (P) სითხის გამრუდებული ზედაპირის ქვეშ ცილინდრული (ა) და სფერული (ბ) ზედაპირის შემთხვევაში

(Nico A.M. Schellart. "Compendium of Medical Physics, Medical Technology and Biophysics", Amsterdam, y 2009)

ორი სფერული ზედაპირის (ბუშტის) შიგნით დამატებითი წნევა, ცხადია, ორჯერ მეტი იქნება:

$$\Delta P = \frac{4\sigma}{R}$$

$$\text{სხეულის ცილინდრული ზედაპირის შემთხვევაში } \Delta P = \frac{2\sigma}{R}.$$

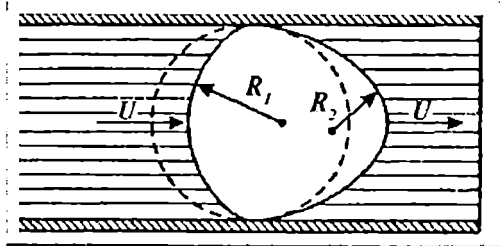
ლაპლასის კანონი ფართოდ გამოიყენება სისხლძარღვთა მედიცინასა და კარდიოლოგიაში. აქ იგულისხმება არა სითხის (სისხლის) გამრუდებული ზედაპირის არამედ დრეკად-დეფორმირებული ქსოვილის დაჭიმულობის ძალა.

თუ განვიხილავთ გულის კამერებს სფეროების სახით, შეგვიძლია გამოვთვალოთ წნევა, რომელიც გენერირდება გულის კამერების კედლების მიერ შეკუმშვის დროს. დილატაციური კარდიომიოპათიის დროს გული ფართოვდება და პარკუტის რადიუსი R იზრდება, შესაბამისად, იზრდება გულის კამერის (პარკუტის) კედელზე მოქმედი წნევის ძალა F_p და ეწინააღმდეგება შეკუმშვისას პარკუტის კედლის დაჭიმულობის ძალას. ნათელია, რომ ამ შემთხვევაში სისტოლ/დიასტოლას დროს შემცირდება პარკუტებიდან სისხლის გადატუმბვის წნევა, რაც განაპირობებს სისხლის მიმოქცევის დარღვევას.

დილატაციური გულის ფუნქციონირების გაუმჯობესებისთვის გულის პარკუტების ქირურ-გიული რემოდელირებისას ითვალისწინებენ ლაპლასის პრინციპს.

ლაპლასის კანონი გამოიყენება აგრეთვე სითხეში აირის ბუშტის შიგა წნევის გამოსათვლელად. აირის ბუშტის მოხვედრა სისხლში მეტად სახიფათოა, მაგრამ, სამწუხაროდ, ხდება მსხვილი ვენების დაზიანების და არაკვალიფიციურად შესრულებული ინექციების დროს.

სისხლის მიმოქცევაში აირის ბუშტის გაჩენის დროს მისი სფერული ფორმა ირღვევა სისხლის ნაკადის ზემოქმედების გამო (სურათი 59): წინა ნახევარსფერო წაწვეტებულია (ეინაიდან, სისხლძარღვის ცენტრში მოძრაობის სიჩქარე მაქსიმალურია), მისი რადიუსი R_2 შემცირებულია, ხოლო უკანა ნახევარსფერო იმავე მიზეზით გაბრტყელებულია, მისი რადიუსი $R_1 > R_2$.



სურათი 59

სფერული ფორმის პაერის ბუშტის დეფორმაცია სისხლძარღვებში

კაპილარული ეფექტი

სითხის სვეტის სიმაღლე კაპილარში დამოკიდებულია სითხისა და მილის მოლეკულებს შორის ურთიერთქმედების ხასიათზე. კერძოდ, დამასველებელი სითხის შემთხვევაში კაპილარში მენისკი ჩაზნექილია (სფერული ზედაპირი). სითხის შიგნით (მენისკის ქვედა მხარეს) წნევა მცირდება ატმოსფერულ წნევასთან შედარებით ΔP სიდიდით, რომელიც ლაპლასის კანონის თანახმად,

* დეტალურად განხილული იქნება მომდევნო თავში.

ტოლია $\Delta P = \frac{2\sigma}{R}$. წნევის ამ სხვაობის კომპენსაცია ხდება პიდროსტატიკური წნევით (ρgh), რასაც ქმნის კაპილარში h სიმაღლის სვეტი. შესაბამისად, ელემენტობა $\rho gh = \frac{2\sigma}{R}$; $h = \frac{2\sigma}{\rho g R}$. ამრიგად, ჩაზნექილი მენისკის (დამასველებელი სითხის) შემთხვევაში სითხის დონე კაპილარში მაღლა აიწევს h სიმაღლეზე.

ამავე ფიზიკური მოვლენის საფუძველზე ანალიზური მსჯელობით მივიღებთ, რომ არადამასველებელი სითხისათვის (ამ შემთხვევაში ΔP დადებითია, ე.ი. წნევა მეტია ატმოსფერულთან შედარებით ΔP სიდიდით) სითხის დონე დაბლა დაიწევს სიდიდით.

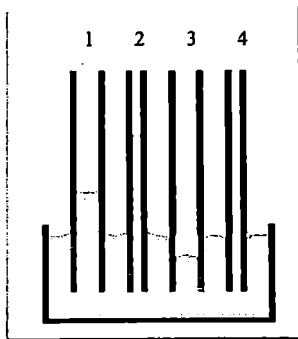
$$h = \frac{2\sigma}{\rho g R}$$

აქ σ - ზედაპირული დაჭიმულობის კოეფიციენტი, ρ - სითხის სიმკვრივე, g - სიმძიმის ძალის აქცერება, R - მენისკის სიმრუდის რადიუსი.

თუ R -ის ნაცვლად შემოვიტანთ კაპილარის რადიუსს r ($r = R \cos \theta$), მაშინ :

$$h = \frac{2\sigma}{\rho g r} \cos \theta,$$

აქ θ - კიდური კუთხეა. ეს ფორმულა გვიჩვენებს კაპილარულ მილში სითხის აწევის ან დაწევის სიდიდეს (იხილე სურათი 60).



სურათი 60

სითხის სვეტის სიმაღლე სხვადასხვა მასალისგან დამზადებული

კაპილარულ მილებში (1, 2 - კიდური კუთხე $\theta < 90^\circ$, $\cos \theta$ დადებითია, სითხე დამასველებელია, მენისკი ჩაზნექილია, $h > 0$, სითხის დონე მაღალია;

3, 4 - კიდურა კუთხე $\theta > 90^\circ$, $\cos \theta$ უარყოფითია, ეს სითხე 3, 4 კაპილარის მასალისთვის არადამასველებელია, მენისკი ამოზნექილია, $h < 0$, სითხის დონე დაბალია)

სითხის სვეტის სიმაღლე ერთნაირი დიამეტრის თავლია კაპილარში დამოკიდებულია სითხისა და მილის მოლეკულებს შორის ურთიერთქმედების ხასიათზე.

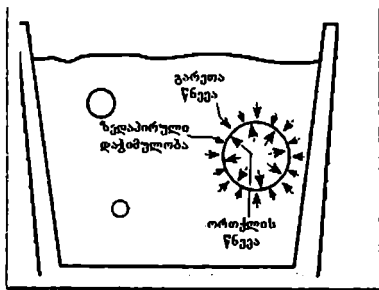
კაპილარულ ეფექტს გამოყენების მრავალი სფერო გააჩნია როგორც ყოველდღიურ ცხოვრებაში (ანთებული სანთელი, საშრობი ქაღალდი), ასევე ბიოლოგიასა (სითხის ასვლის პროცესი მცენარეების წესებიდან ღეროებში) და მედიცინაში (სისხლის ანალიზის აღების დროს იყენებენ მინის კაპილარებს; ქირურგიული ოპერაციების დროს ჭრილობის გასუფთავების მიზნით იყენებენ კაპილარული თვისებების მქონე მასალას; კბილების სარესტავრაციო მასალების ადჰეზიური თვისებების და კაპილარული ეფექტის გათვალისწინება ძალზე მნიშვნელოვანია მასალისა და კბილის ქსოვილებს შორის მოლეკულური კონტაქტის გაზრდის თვალსაზრისით).

წყლის ორთქლის წნევა სფეროს (ბუშტუკებს) შიგნით დუღილის პროცესში.

წყლის ტემპერატურის მომატებისას მასში ჯერ გამოიყოფა პაერი, ანუ, ის გაზები, რომლებიც პაერის შემადგენლობაშია, რადგან გაზების ხსნადობა სითხეებში ტემპერატურაზე უკუპროპორციულადაა დამოკიდებული. შემდგომ ამ ბუშტუკებში პაერს შეერევა წყლის ორთქლიც. ტემპერატურის ზრდასთან ერთად იზრდება წყლის მოლეკულების რიცხვი, რომლებიც ორთქლის მდგომარეობაში გადადიან. იზრდება ბუშტუკებში წნევაც, რასაც ხელს უწყობს ზედაპირული დაჭიმულობის ძალები, რომლებიც ცდილობენ, შეამცირონ სფეროს მოცულობა. არკიმედეს ძალის ზემოქმედებით ეს ბუშტები ამოდიან წყლის ზედაპირზე. ამ დროს ორთქლის და აირის წნევა ბუშტუკების შიგნით აღემატება გარემომცველ წნევას.

ტემპერატურის მომატებით გამოწვეული წნევა ბუშტის შიგნით იზრდება უფრო ნელა, ვიდრე ზედაპირული დაჭიმულობის ძალის მიერ ინდეცირებული საპირისპირო წნევა და როცა ბუშტის შიდა წნევა გადაჭარბებს გარეთა წნევას (სურათი 61), ბუშტუკი გაისკდება, იწყება დუღილი. ე.ი. ორთქლად იქცევა სითხე მთელი ზედაპირიდან (როგორც ატმოსფეროსთან, ისე ჭურჭლის კედლებთან შეხებაში მყოფი ზედაპირიდან).

ზედაპირული დაჭიმულობა განაპირობებს წნევათა სხვაობას არსებობას საანის ბუშტის ან სითხის წვეთის შიგა და გარეთა არეებს შორის. რადგან წყლის ზედაპირული დაჭიმულობა ბევრად აღემატება საანინი ხსნარის ზედაპირულ დაჭიმულობას, ამიტომ წყლის ბუშტი სწრაფად და მეტი ძალით იკუმშება, წნევა მკვეთრად იზრდება, რასაც წყლის აკი ვერ უძლებს და სკდება. ამიტომაც, რომ საანის ბუშტის "გაბერვა" შეიძლება, წყლის - ვერა.

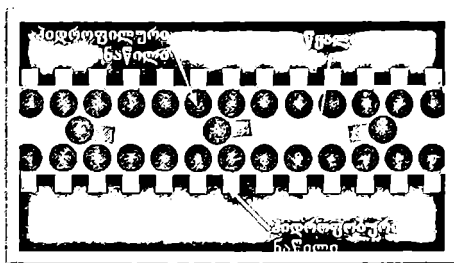


სურათი 61

დუღილისათვის აუცილებელია ორთქლის წნევა აღემატებოდეს გარემომცველი არის წნევას (Nico A.M. Schellart. "Compendium of Medical Physics, Medical Technology and Biophysics", Amsterdam, y 2009)

საანის ბუშტი. საანის ბუშტის სფერული ფორმა განპირობებულია ზედაპირული დაჭიმულობის ძალების მოქმედებით (ზედაპირის ფართობი მინიმუზაცია). სითხეებს (მაგალითად, წყალს) არ გააჩნია აირით საესე სტაბილური ბუშტის წარმოქმნის უნარი მისი ძლიერი

ზედაპირული დაჭიმულობის გამო (ბუშტი იჩუტება). საპნის მოლეკულები დაახლოებით 60%-ით ამცირებს წყლის ზედაპირული დაჭიმულობის მნიშვნელობას, რაც ახანგრძლივებს საპნის ბუშტის არსებობას. საპნიან წყალში წარმოქმნილი აიროვანი ბუშტის აკი 3 ფენისაგან შედგება – წყლის ფენა, მოთავსებულია საპნის მოლეკულების ორ შრეს შორის (სურათი 62).



სურათი 62

საპნის ბუშტის აკის სტრუქტურა. იგი შეიცავს საპნის ამფიფილურ მოლეკულებს, რომლების პიდროფილური ნაწილი მიიზიდება, ხოლო პიდროფობური – განიზიდება წყლის თხელი შრის მიერ

საპნის მოლეკულები – ანფიფილური მოლეკულებია, რომლებსაც გააჩნია როგორც პიდროფილური, ასევე პიდროფობური ნაწილი. პიდროფილური ნაწილი მიიზიდება, ხოლო პიდროფობური – განიზიდება წყლის თხელი შრის მიერ (სურათი 62); შედეგად წარმოიქმნება ორი სითხეაირი მოსაზღვრე ზედაპირი – ერთი ბუშტის შიგნით, მეორე – ბუშტის გარეთ.

საპნის ბუშტი სტაბილურია, თუ აირის წნევა მის შიგნით აწონასწორებს აკის ზედაპირული დაჭიმულობის წნევას. საპნიანი ბუშტის აკის გაწელებისას, საპნის მოლეკულების კონცენტრაცია ზედაპირზე მცირდება. შესაბამისად, ზედაპირული დაჭიმულობა იზრდება; ამიტომ საპნის ბუშტის რადიუსის გაზრდისას ის სკდება.

განესაზღვროთ აირის წნევა საპნის ბუშტის შიგნით. განვიხილოთ საპნის ბუშტის ცენტრში გამავალი კვეთი. თუ არ მივიღებთ მხედველობაში საპნის აკის სისქეს (მცირე სხეულობას საპნის ბუშტის კვეთის შიგა და გარეთა რადიუსს შორის), კვეთის წრის სიგრძე $2\pi R$ -ის ტოლია. შიგა და გარეთა ზედაპირზე მოქმედი ზედაპირული დაჭიმულობის ძალები ტოლია და მაშინ ჯამური ძალა უდრის:

$$F = 2\sigma \cdot 2\pi R \quad (\text{III.1.10})$$

სადაც σ – ზედაპირული დაჭიმულობის კოეფიციენტი, R – ბუშტის რადიუსი ($2\pi R$ – ბუშტის ცენტრალური კვეთის წრეწირის სიგრძე).

ვინიდან ბუშტის ცენტრალური კვეთის ფართობი $S = \pi R^2$, წნევა საპნის ბუშტის შიგნით უდრის:

$$P = P_{ატმ} + \frac{F}{S} = P_{ატმ} + \frac{4\sigma}{R} \quad (\text{III.1.11})$$

წყლის წვეთის შემთხვევაშიც წნევა წყლის წვეთის შიგნით უდრის:

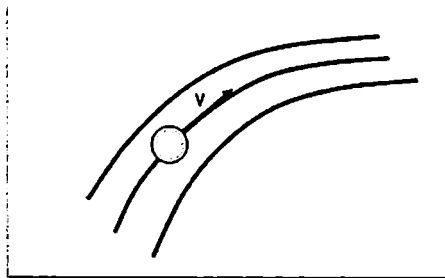
$$P = P_{ატმ} + \frac{F}{S} = P_{ატმ} + \frac{4\sigma}{R} \quad (\text{III.1.12})$$

იგივე შედეგი გვექონდა ლაპლასის კანონის განხილვისას. მართლაც, ნახევარი სფეროს შემთხვევაში წნევის ნამატი $\Delta P = \frac{2\sigma}{R}$, ხოლო წყლის წვეთი ორი ნახევარსფეროა, ამიტომ:

$$\Delta P' = 2\Delta P = \frac{4\sigma}{R}$$

III.12 ჰიდროდინამიკის ძირითადი ცნებები და კანონზომიერებანი

ცნობილია, რომ ბუნებაში არსებული ნივთიერებები და მათ შორის სითხე, წყვეტილი, დისკრეტული აგებულებისაა, მაგრამ იმის გამო, რომ სითხეებს ახასიათებს მეტად რთული მოლეკულური აღნაგობა, გამარტივების მიზნით მათ იხილავენ ძალიან მცირე ელემენტების (ნაწილაკების) უწყვეტ ერთობლიობად, ე.ი. უწყვეტ გარემოდ. ასეთი სტრუქტურული წარმოდგენისას დინების სრულყოფილი დახასიათებისათვის აუცილებელია ვიცოდეთ მისი ყოველი ნაწილაკის სიჩქარე და აჩქარება, აგრეთვე მათი დროზე დამოკიდებულება. ამ მიზნისათვის ხელსაყრელია ვისარგებლოთ ე.წ. **დენის წირის** ცნებით, რომელიც ასე განისაზღვრება: **წირს სითხის ნაკადში, რომლის ყოველ წერტილში გავლებულ მხებს აქვს ამ წერტილში სითხის ნაწილაკის სიჩქარის მიმართულება, დენის წირი ეწოდება.** დენის წირების განლაგება დროის მოცემულ მომენტში წარმოდგენას გვაძლევს დროის ამ მომენტში სითხის ნაწილაკების სიჩქარეთა განაწილებაზე (სურათი 63). როდესაც სითხეში დენის წირების განლაგება არ იცვლება დროის მიხედვით, მაშინ, ცხადია, ასევე არ შეიცვლება სითხის ნაწილაკთა სიჩქარეების განაწილება. სითხის ასეთ დინებას სტაციონარული ეწოდება.



სურათი 63
დენის წირი

სტაციონარული დინების დროს დენის წირები ერთმანეთს არ გადაკვეთს, რადგან წინააღმდეგ შემთხვევაში ერთ ნაწილაკს ერთდროულად სიჩქარის ორი მნიშვნელობა უნდა შეესაბამებოდეს (ერთ წერტილში ორი მხების გავლება შეუძლებელია).

სითხის დინების შესწავლის გამარტივების მიზნით ზოგჯერ უშვებენ, რომ სითხის ფენებს შორის არ არის ხახუნი, ე.ი. სითხეს არ გააჩნია **სიბლანტე** (იხ. ქვემოთ) და უკუმშველია. სითხეს, რომელსაც არ ახასიათებს სიბლანტე და კუმშვადობა, **იდეალური სითხე** ეწოდება. იდეალური სითხის მოძრაობის შესწავლა, ცხადია, გაცილებით მარტივია, ვიდრე რეალურისა. მაგრამ მათთვის დადგენილი კანონზომიერებანი მხოლოდ გარკვეული სიზუსტით შეესაბამება **რეალური სითხეების** დინების ხასიათს. შესაბამისობა მხოლოდ მაშინაა, როდესაც სითხეზე მოქმედი გარეშე ძალები (მაგალითად, სიმძიმის ძალა, წნევის ძალა) სიდიდით გაცილებით აღემატება სითხეში მოქმედ შინაგანი ხახუნის (სიბლანტის) ძალებს. ასეთ შემთხვევაში შინაგანი ხახუნის ძალები გარეშე

ძალეობთან შედარებით შეიძლება უგულებელვყოთ და სითხე განვიხილოთ, როგორც იდეალური.

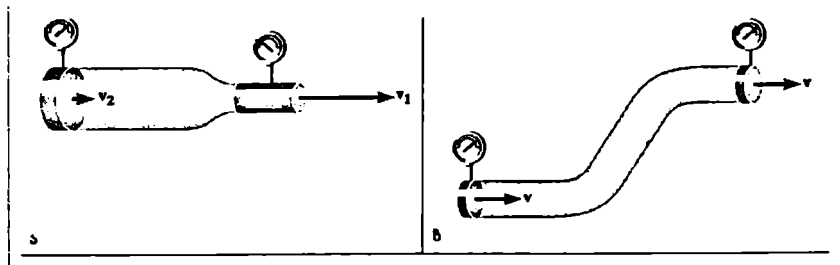
ახლა განვიხილოთ იდეალური სითხისთვის დამახასიათებელი ზოგიერთი კანონზომიერება, სახელდობრ, *სტაციონარობის და ბერნულის განტოლებები*.

სითხის ჭავლის (ნაკადის) სტაციონარობის განტოლება.

წარმოვიდგინოთ სითხეში რაიმე ჩაკეტილი კონტური, რომლის ყოველ წერტილში გადის დენის წირი. ცხადია, წირთა ასეთი სისტემა შემოფარგლავს სივრცის გარკვეულ ნაწილს. პიდროდინამიკაში სივრცის ამ ნაწილს *დენის მილს* უწოდებენ. როდესაც სითხის დინება სტაციონარულია, დენის მილის ზედაპირი არ გადაიკვეთება სითხის ნაწილაკების მიერ. სითხე მასში ისე მიედინება, როგორც მყარკედლებიან მილში. განვიხილოთ დენის მილის რომელიმე კვეთი, რომლის ფართობი აღვნიშნოთ S -ით, ხოლო სითხის დინების სიჩქარე ამ კვეთში – v -თი. ადვილი მისახვედრია, რომ ნამრავლი Sv გამოსახავს მილის განივ კვეთში დროის ერთეულში გასული სითხის მოცულობას. სითხის უკუმშველობის გამო Sv ნამრავლი, ცხადია, არ უნდა იყოს დამოკიდებული დენის მილში S განივკვეთის მდებარეობაზე (სურათი 64):

$$Sv = const \quad (\text{III.12.1})$$

განტოლებას (III.12.1) სითხის *ჭავლის სტაციონარობის განტოლებას* უწოდებენ. დვილად მისახვედრია, რომ Sv რაიმე განივკვეთში დროის ერთეულში გამოვლილი სითხის მოცულობაა (მოცულობითი სიჩქარე).

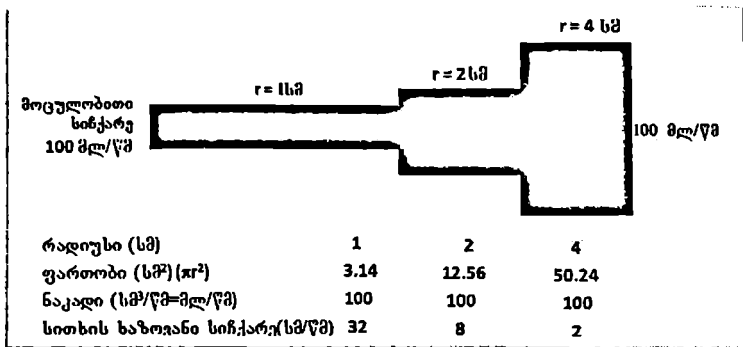


სურათი 64

სტაციონარული დენის მილის კვეთის ფართობის შემცირებასთან ერთად იზრდება სითხის მოძრაობის სიჩქარე (ა); უცვლელი განივკვეთის ფართობის შემთხვევაში, მიუხედავად მილის ფორმის ცვლილებისა, სიჩქარე არ იცვლება (ბ)

ჭავლის სტაციონარობის განტოლების აზრი ილუსტრირებულია სურათზე 65. როგორც სურათიდან ჩანს, მილის კვეთის ფართობის შემცირებასთან ერთად იზრდება სითხის მილში მოძრაობის სიჩქარე; თუ კვეთის ფართობი მუდმივია, სიჩქარეც მუდმივი რჩება.

ე.ი. მოცემული დენის მილის ყოველ წერტილში ნებისმიერი განივკვეთისთვის Sv ნამრავლი ერთი და იგივე (მუდმივი) სიდიდეა: $S_1 v_1 = S_2 v_2 = S_3 v_3 = S_n v_n$.



სურათი 65

ხაზოვანი სიჩქარის საშუალო მნიშვნელობა სხვადასხვა რადიუსიან მილში სტაციონარული დინების დროს ($V = 100 \text{ მლ/წმ} = \text{const}$)

ამრიგად, **სტაციონარული** ეწოდება სითხის დინებას, თუ მისი ყოველი წერტილის სიჩქარე (როცა $S = \text{const}$) დროის მიხედვით არ იცვლება, ან თუ ცვლადია მილის განივი კვეთი, მაშინ მოცულობითი სიჩქარე $Sv = \text{const}$.

აღნიშნულ სხეულში სისხლძარღვები მნიშვნელოვნად განსხვავდება დიამეტრის მიხედვით. სისხლძარღვის დიამეტრის უმნიშვნელო ცვლილებები სისხლის ნაკადის მახასიათებლების მნიშვნელოვან ცვლილებებს იწვევს. როდესაც სისხლი მიედინება სისხლძარღვების სისტემაში, დროის ერთეულში სისხლძარღვის განივი კვეთის ფართობში უნდა გაიაროს ერთი და იმავე მასის სისხლმა. შესაბამისად, თუ სისხლძარღვის კვეთის ფართობი იცვლება, შეიცვლება სითხის დინების სიჩქარეც (სურათი 65).

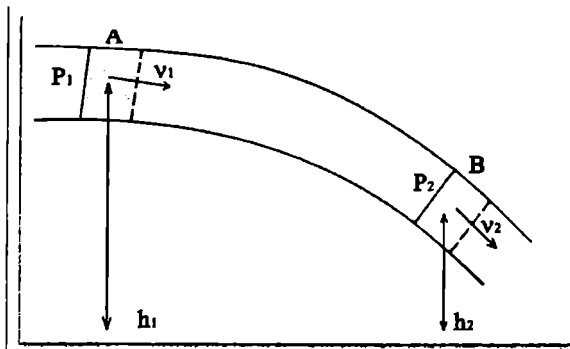
65-ე სურათის მონაცემებიდან ჩანს, რომ სტაციონარული დინებისას სისხლის ნაწილაკების საშუალო სიჩქარე სისხლძარღვის რადიუსის მე-4 ხარისხის უკუპროპორციულია (კუაზელის კანონი, იხილე ქვემოთ). შესაბამისად, სისხლძარღვების დიამეტრის მცირე ცვლილებაც კი იწვევს ამ სისხლძარღვების სისხლის გამტარებლობის მნიშვნელოვან ცვლილებებს.

ბერნულის განტოლება.

განვიხილოთ იდეალური სითხის სტაციონარული დინება. დავადგინოთ ამ პირობებში თანაფარდობა სითხის წნევისა და მისი ნაწილაკების მოძრაობის სიჩქარეებს შორის დადამიწის მიზიდულობის ველში. ეთქვათ, სითხე მიედინება დედამიწის მახლობლად, მისი ზედაპირისადმი დახრილ რაიმე მილში (სურათი 66).

თუ დაეუშვებთ, რომ სითხესა და გარემოს შორის სითბო არ იცვლება, m მასისა და V მოცულობის იდეალური სითხის სრული მექანიკური ენერგია დინებისას იქნება მუდმივი (იდეალურ სითხეში ხომ შინაგანი ხახუნია არსებობს!):

$$E_{\text{სრ}} = \text{const}$$



სურათი 66
ბერნულის განტოლების საილუსტრაციოდ

სრული ენერგია შეიძლება წარმოედგინოთ სამი კომპონენტის ჯამის სახით:

1 - წნეის პოტენციური ენერგია ($E_p = PV$);

2 - სიმძიმის ძალის პოტენციური ენერგია ($E_j = mgh$);

3 - კინეტიკური ენერგია ($E_k = \frac{mv^2}{2}$) (სადაც P წნეეა, V სითხის მოცულობა, v - m მასის სითხის სიჩქარე).

$$E_{\text{სრ}} = PV + mgh + \frac{mv^2}{2} = \text{const.}$$

ამგეარად, სტაციონარული დინების დროს რაიმე m მასის ორი ნებისმიერი A და B წერტილისთვის (უსასრულოდ მცირე მოცულობისთვის), შეიძლება დაეწეროს:

$$P_1 V + mgh_1 + \frac{mv_1^2}{2} = P_2 V + mgh_2 + \frac{mv_2^2}{2}.$$

თუ გაეთვალისწინებთ, რომ $m = \rho V$ და ტოლობის ორივე მხარეს წევრ-წევრად გავყოფთ მოცულობაზე (V), მივიღებთ:

$$P_1 + \rho gh_1 + \frac{\rho v_1^2}{2} = P_2 + \rho gh_2 + \frac{\rho v_2^2}{2},$$

ჟ. ი.

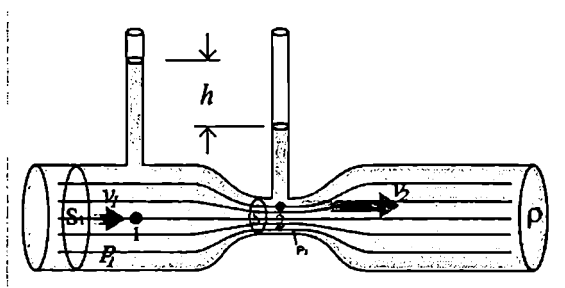
$$P + \rho gh + \frac{\rho v^2}{2} = \text{const} \quad (\text{III.1.2.2})$$

ამ უკანასკნელს ბერნულის განტოლებას უწოდებენ. იგი ჰიდროდინამიკის ძირითად განტოლებას წარმოადგენს. როდესაც სითხე მიედინება

პორიზონტალურ მილში, მაშინ $h_1 = h_2$ და ბერნულის განტოლება მიიღებს უფრო მარტივ სახეს:

$$P + \frac{\rho v^2}{2} = \text{const} \quad (\text{III.12.3})$$

P -ს უწოდებენ ჰიდროსტატიკურ ან, უბრალოდ, სტატიკურ წნევას. იგი სითხეს ახასიათებს როგორც უძრავ, ისე მოძრავ მდგომარეობაში; $\frac{\rho v^2}{2}$ -ს უწოდებენ დინამიკურ წნევას. იგი მხოლოდ მოძრავი სითხისათვისაა დამახასიათებელი. ამ განტოლებებიდან გამომდინარეობს დასკვნა, რომელსაც ხშირად ბერნულის წესს უწოდებენ. კერძოდ, პორიზონტალურ მილში მოძრავი არაბლანტი სითხის წნევა მცტია იქ, სადაც სიჩქარე ნაკლებია და პირიქით (სურათი 67).



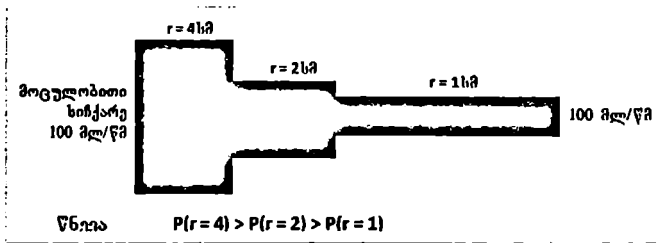
სურათი 67

სითხის დინება სხვადასხვა განივევების მილში

$$(S_1 > S_2; P_1 > P_2; v_1 < v_2; P_1 - P_2 = \rho gh)$$

სტატიკური და დინამიკური წნევათა ჯამს სრულ წნევას უწოდებენ.

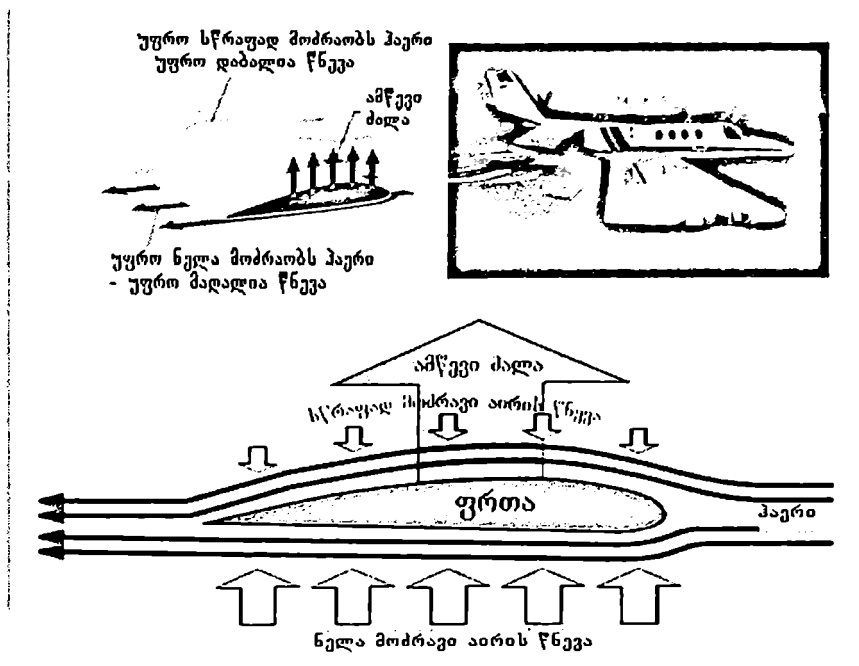
როგორც 68-ე სურათიდან ჩანს, სტაციონარული დინებისას მილის რადიუსის შემცირება იწვევს სიჩქარის (კინეტიკური ენერგიის) ზრდას ($E_k(r=4) < E_k(r=2) < E_k(r=1)$) და წნევის (პოტენციური ენერგიის) შემცირებას.



სურათი 68

სითხის ხაზოვანი სიჩქარის და წნევის ცვლილება მილის რადიუსის მიხედვით

ბერნულის განტოლებას ფართო პრაქტიკული გამოყენება გააჩნია. მაგალითად, აეროდინამიკაში: თვითმფრინავის ფრთის ამოზნექილი ფორმა განაპირობებს ფრთის ზევით ქაერის სიჩქარის გაზრდას და წნევის შემცირებას. ბერნულის განტოლების თანახმად, წნევა ფრთის ქვემოთ უფრო მაღალია, ეიდრე ფრთის ზევით, რაც თვითმფრინავის ქაერში აწევას უზრუნველყოფს (სურათი 69).



სურათი 69

ბერნულის განტოლების შედეგის გამოვლინება აეროდინამიკაში

ბერნულის განტოლება გამოიყენება სისხლძარღვთა და სასუნთქი გზების პათოფიზიოლოგიაში წნევის გამოთვლის და გაზომვის მიზნით (მაგალითად, სტენოზის შემთხვევაში).

შინაგანი ხახუნი სითხეებში.

ბუნებაში არსებული სითხეებისთვის (რეალური სითხეებისთვის) მოძრაობის დროს დამახასიათებელია შინაგანი ხახუნი, ანუ *სიბლანტე*.

რეალური სითხის მოლეკულები გარკვეული ძალით ურთიერთქმედებენ. ეს ურთიერთქმედება განსაკუთრებით ნათლად ვლინდება სითხის დინების დროს. სითხის ცალკეული ფენები ერთმანეთზე მოქმედებს მათი ზედაპირისადმი მხების გასწვრივ მიმართული ძალებით. მათ შინაგანი ხახუნის ძალებს უწოდებენ, მოვლენას კი – შინაგან ხახუნს.

სიბლანტე - დინამიკური პარამეტრია, ვლინდება მხოლოდ სითხის მოძრაობის დროს და ასახავს სითხის შინაგან რეზისტენტობას დინების მიმართ. მაგალითად, ერთნაირ პირობებში (წნევა, ტემპერატურა) ტოლი რადიუსის მქონე მილებიდან წყალი უფრო მეტი გამოვა, ვიდრე თაფლი. ვულკანების ამოფრქვევის დროს მაღალი სიბლანტის მქონე მაგმა ქმნის ვულკანის მაღალ, ციცაბო კრატერს, ხოლო დაბალი სიბლანტის მქონე მაგმა - განიერ, დაბალ კრატერს.

იდეალური სითხეები - არაბლანტი სითხეებია, რეალური სითხეები - ბლანტი. რეალური სითხის ფენებს შორის წნევის ძალების გარდა ზედაპირისადმი მხებად მიმართული შინაგანი ხახუნის ძალებიც მოქმედებს; ამ ძალების დაძლევაზე იხარჯება მოძრავი სითხის ენერგია. მასზე მეტყველებს ის ფაქტი, რომ სითხეზე ძალების მოქმედების შეწყვეტის შემდეგ, სითხის სიჩქარე თანდათან მცირდება და ბოლოს სითხე ჩერდება. ეს აიხსნება სითხის ფენებს შორის მოძრაობის საწინააღმდეგოდ მიმართული შინაგანი ხახუნის ძალების მოქმედებით.

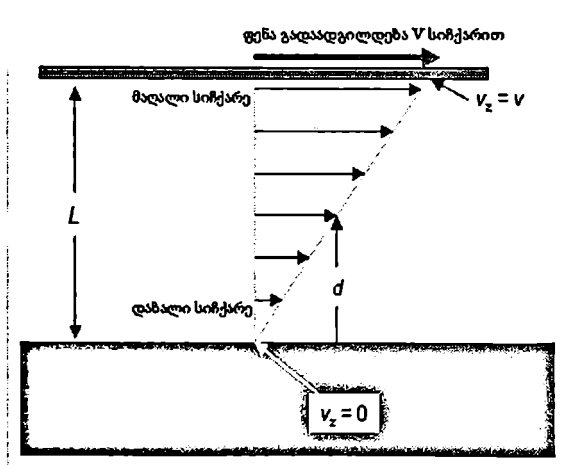
ნიუტონის მიხედვით შინაგანი ხახუნის ძალა

$$F_{\eta} = - \eta \frac{dv}{dx} S \quad (\text{III.1.2.4}),$$

სადაც η - სიბლანტის კოეფიციენტი, $\frac{dv}{dx}$ - სიჩქარის გრადიენტი, S - ფენების შეხების ფართობი; ნიშანი “-“ მიუთითებს ამ ძალის მიმართულებაზე.

განვიხილოთ სითხის დინება ღარში, რომლის ფსკერი უძრავია, სითხე დამასველებელია. სითხის ზედაპირზე ტივტივებს მსუბუქი ფირფიტა S ზედაპირის ფართობით და გადაადგილდება სითხესთან ერთად.

წარმოვიდგინოთ სითხე ცალკეული ფენების ერთობლიობად. ღარის ფსკერს მიკრული ფენა უძრავია. მისი მეზობელი ფენა მოძრაობს რაღაც v_1 სიჩქარით, მომდევნო - v_2 სიჩქარით და ა.შ.; მასთან $v_1 < v_2 < v_3 < \dots < v_n$ -ზე (სურათი 70).



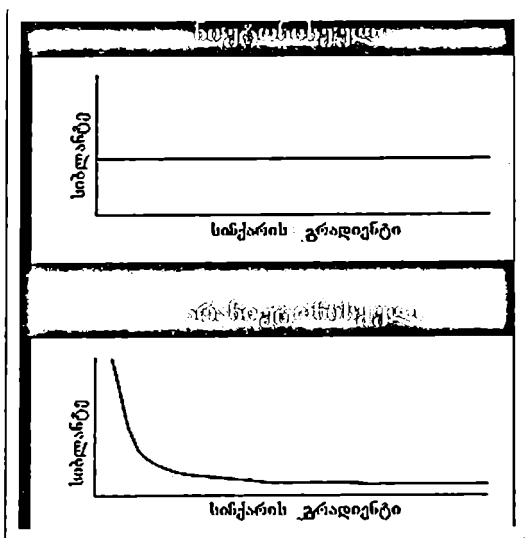
სურათი 70

ნიუტონისეული სითხის ფენების სიჩქარეთა განაწილების სქემა

დაბალი სიბლანტის მქონე სითხე მაღალი დენადობით ხასიათდება და პირიქით. სიბლანტის კოეფიციენტის მიხედვით სითხეები შეიძლება დავეყოთ ორ ჯგუფად, ე.წ. *ნიუტონისეულ და არანიუტონისეულ სითხეებად*.

ნიუტონისეულ სითხეთა ჯგუფს (იმ სითხეებს, რომლებისათვის სამართლიანია ნიუტონის ფორმულა) მიეკუთვნება ის სითხეები, რომელთა სიბლანტის კოეფიციენტი η დამოკიდებულია მხოლოდ სითხის თვისებებსა და ტემპერატურაზე და არ არის დამოკიდებული დინების დინამიკურ მანქვენებლებზე (ე.ი. წნევაზე და სიჩქარის გრადიენტზე). ასეთ პირობებში $\eta = const$ სითხის ყველა წერტილში.

სითხეებს, რომელთა სიბლანტის კოეფიციენტი, გარდა სითხის თვისებებისა და ტემპერატურისა, დამოკიდებულია აგრეთვე სითხის დინების რეჟიმზე (ე.ი. წნევაზე და სიჩქარის გრადიენტზე), *არანიუტონისეული სითხეები* ეწოდებათ (სურათი 71).



სურათი 71

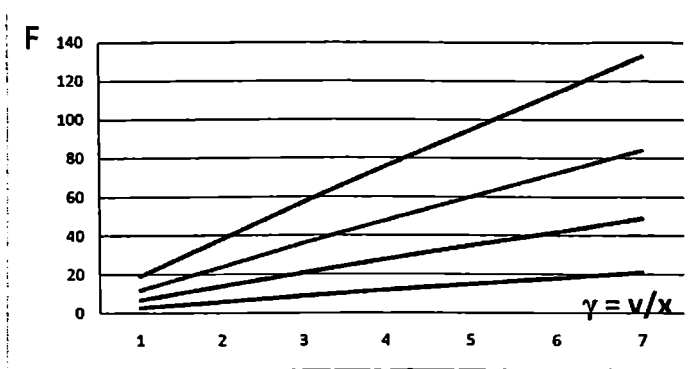
დამოკიდებულება სიბლანტესა (η) და სიჩქარის გრადიენტს შორის

სურათზე 72 ნაჩვენებია დამოკიდებულება შინაგანი ხახუნის ძალასა და სიჩქარის გრადიენტს შორის ნიუტონისეულ სითხეებში: წრფის დახრილობის კუთხე ($tg \alpha = \frac{F}{\gamma}$) სხვადასხვა სითხისთვის სხვადასხვაა. ე.ი. მათ განსხვავებული

სიბლანტის კოეფიციენტი აქვთ $\eta_4 > \eta_3 > \eta_2 > \eta_1$ ($\eta S = tg \alpha$).

ნიუტონისეულ სითხეებს მიეკუთვნება: წყალი, გამდნარი მეტალები და მათი მარილები, დაბალმოლეკულური ორგანული შენაერთების წყალხსნარები და სხვა.

არანიუტონესული სითხეების ჯგუფს მიეკუთვნება სუსპენზიები, ემულსიები, მაღალმოლეკულური ორგანული შენაერთები, როგორცაა, მაგალითად, სისხლი.



სურათი 72

ნიუტონისეული სითხეების დინამიკური პარამეტრების

ერთიერთდამოკიდებულება $F = f\left(\frac{dv}{dx}\right)$ (ფორმულა (III.1.2.4) წრფივი

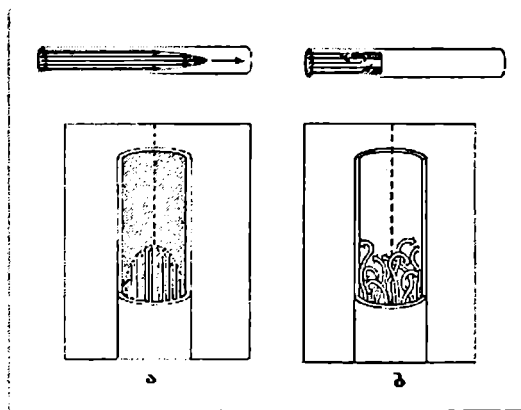
განტოლებათა, მაგალითად როგორც $Y = kX$; $k = \frac{Y}{X} = \tau g \alpha$)

ლამინარული და ტურბულენტური დინება. რეინოლდსის რიცხვი.

გამოკვლევებმა გვიჩვენა, რომ როდესაც რეალური სითხე მიედინება მილში, დინებას შეიძლება ჰქონდეს ორი ერთმანეთისაგან მეკუთრად განსხვავებული ხასიათი. რეინოლდსმა შეისწავლა სითხეების დინების ხასიათის დამოკიდებულება დინების სიჩქარეზე და დაადგინა, რომ დინების შედარებით მცირე სიჩქარის დროს სითხე შეიძლება წარმოვიდგინოთ ერთმანეთზე დალაგებული ფენების სახით, რომელნიც გადაადგილდებიან ერთმანეთის მიმართ შერევის გარეშე. სითხის ნაწილაკები მოძრაობს მილის კედლების პარალელურად და არ გადადის ერთი ფენიდან მეორეში. ყოველ წერტილში სითხის სიჩქარე მუდმივი სიდიდეა და არ იცვლება დროის მიხედვით. სითხეების ასეთ დინებას **ლამინარული დინება** ეწოდება. ცხადია, ლამინარული დინებისას სითხის მოძრაობა სტაციონარულია და მილის კვეთში სიჩქარის განაწილებას აქვს სურათ 73ა-ზე მოცემული სახე.

აღმოჩნდა, რომ დინება ლამინარულია მხოლოდ მაშინ, როდესაც სითხის დინების სიჩქარე v ყველა სხვა უცვლელ პირობებში ნაკლებია კრიტიკულ მნიშვნელობაზე v_k . როდესაც სითხის დინების სიჩქარე $v \geq v_k$, დინების ხასიათი არსებითად იცვლება. სითხის მოძრაობა უკვე არ შეიძლება წარმოვიდგინოთ, როგორც დალაგებული ფენების მოძრაობა, ეს ფენები ერთმანეთს შეერევა. ამ დროს სითხის ნაწილაკთა ტრაექტორიები აღარ არის მილის კედლების პარალელური; სითხის მოცემულ წერტილში დინების სიჩქარე არ არის მუდმივი, იგი იცვლება ქაოსურად, ყოველგვარი კანონზომიერების გარეშე. სითხეების ასეთ დინებას **ტურბულენტური დინება** ეწოდება. ცხადია, ტურბულენტური დინება არ არის სტაციონარული, რადგან ასეთი დინებისას მილის განიკვეთში

სიჩქარეთა განაწილება არ იქნება მუდმივი. ტურბულენტური დინებისას სითხის ყოველ წერტილს შეიძლება შეეუსაბამოთ მხოლოდ საშუალო სიჩქარის განსაზღვრული მნიშვნელობა. ტურბულენტური ნაკადი ხასიათდება სითხის ნაწილაკების არარეგულარული ქაოსური მოძრაობით (სურათი 73).



სურათი 73

სითხის ლამინარული (ა) და ტურბულენტური (ბ) დინება

ცდების შედეგად დადგინდა, რომ სითხის დინების ხასიათის გამოსავლენად არ არის საკმარისი მხოლოდ მისი სიჩქარის ცოდნა. აღმოჩნდა, რომ სხვადასხვა დიამეტრის მილში, თუ სითხე ერთი და იმავე სიჩქარით მიედინება, მოძრაობას შეიძლება ჰქონდეს ერთმანეთისაგან მკვეთრად განსხვავებული ხასიათი – ზოგ მილში დინება იქნება ლამინარული, ზოგში კი ტურბულენტური. აღმოჩნდა აგრეთვე, რომ დინების ხასიათი მნიშვნელოვნად დამოკიდებულია თვით სითხის ბუნებაზე: მის სიბლანტესა (η) და სიმკვრივეზე (ρ) და განისაზღვრება რეინოლდსის რიცხვით Re . იგი გამოისახება შემდეგი ფორმულით:

$$Re = \frac{2\rho vr}{\eta}, \quad (III.1.2.5)$$

სადაც r - მილის რადიუსია, v - სითხის მოძრაობის საშუალო სიჩქარე.

მაშასადამე, მილში სითხის ტურბულენტური დინების სიჩქარის კრიტიკული მნიშვნელობა დამოკიდებულია მის სიბლანტეზე η , სიმკვრივეზე ρ და მილის რადიუსზე r . თუ რეინოლდსის რიცხვის მნიშვნელობა $R < 2000$ დინება ლამინარულია. როცა R აღემატება კრიტიკულ მნიშვნელობას ($R > 3000$), დინება ტურბულენტურია, ხოლო როცა $2000 \leq R \leq 3000$, დინება გარდამავალია – ხან ლამინარული, ხან კი ტურბულენტური. ცხრილში II მოცემულია ლამინარული და ტურბულენტური დინების დახასიათება.

ლამინარული დინება	ტურბულენტური დინება
სითხის ნაკადები მოძრაობს განსხვავებული სიჩქარით და არ ერევა ერთმეორეში	ნაკადი ხასიათდება სითხის ნაწილაკების არარეგულარული მოძრაობით
მილში სიჩქარის განაწილების პროფილის ფორმა პარაბოლაა, მაქსიმალური სიჩქარეა მილის ცენტრში, მინიმალური – მილის კედლებთან.	ნაკადის სიჩქარის პროფილი საკმაოდ ბრტყელია მილის ცენტრალურ ნაწილში და სიჩქარე სწრაფად მცირდება მილის კედლებთან
საშუალო სიჩქარე დაახლოებით $\frac{1}{2} V_{\text{მაქს}}$ ტოლია	საშუალო სიჩქარე უდრის დაახლოებით ნაკადის სიჩქარეს მილის ცენტრში
$R < 2000$	$R > 3000$

ამგვარად, რეინოლდსის რიცხვით შეიძლება განისაზღვროს სითხის დინების ხასიათი. აქედან გამომდინარეობს, რომ ორი სხვადასხვა სითხის დინებას ექნება სრულიად ერთნაირი ხასიათი, როდესაც მათი რეინოლდსის რიცხვები ტოლია (ფორმულა III.3.1.2.5), მიუხედავად იმისა, რომ მათ შეესაბამება განსხვავებული სიბლანტის, სიმკვრივის მატყუნებლები, დინების სიჩქარეები და მილების რადიუსები. ყოველივე ეს ნიშნავს, რომ *რეინოლდსის რიცხვი წარმოადგენს სითხეების დინებათა მსგავსობის კრიტერიუმს*. ეს გარემოება საშუალებას გვაძლევს, შევისწავლოთ მოცემული სითხის დინების ხასიათი სრულიად განსხვავებული სითხის საშუალებით, რომელიც სრულიად სხვა პირობებში მიედინება. ამგვარად, შეგვიძლია ეაწარმოოთ სხვადასხვა პიდროდინამიკური სისტემის მოდელირება, თუ გვეცოდინება გამოსაკვლევი პიდროდინამიკური სისტემის რეინოლდსის რიცხვი. მაგალითად, შეგვიძლია ეაწარმოოთ სისხლძარღვთა სისტემის მოდელირება, რაც, ცხადია, მეტად მნიშვნელოვანია მედიცინისთვის.

რეინოლდსის რიცხვი მედიცინაში გამოიყენება სისხლძარღვებში სისხლის ნაკადის, ან სასუნთქ გზებში აირის ნაკადის დახასიათებისთვის.

ბლანტი სითხის ლამინარული დინება ცილინდრულ მილში. პუაზეილის ფორმულა.

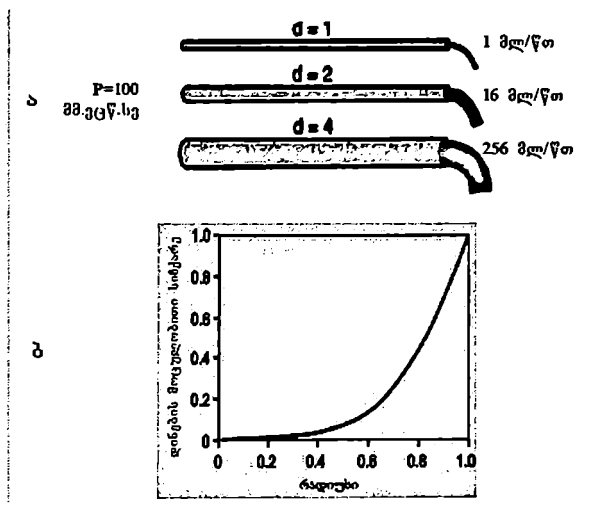
ბლანტი სითხის ლამინარული დინების შესწავლას არსებითი მნიშვნელობა აქვს მედიცინისთვის, რადგან სისხლძარღვთა სისტემა, რომელშიც მიედინება ბლანტი სითხე – სისხლი, წარმოადგენს ელასტიკური კედლების მქონე ცილინდრული ფორმის და სხვადასხვა დიამეტრის მილების სისტემას.

განვიხილოთ ბლანტი სითხის დინება ცილინდრული ფორმის პორიზონტალურ მილში, რომლის განივკვეთის ფართობი მთელ სიგრძეზე ერთი და იგივეა. თუ ბლანტი სითხე თანაბრად მიედინება მილში, სითხის ნაწილაკების სიჩქარეთა განაწილება რადიუსის გასწვრივ ერთნაირი იქნება მილის ნებისმიერ განივკვეთში ცენტრიდან ტოლი მანძილებით დაშორებულ წერტილებში. მილის ცენტრალური ღერძის გასწვრივ დინების სიჩქარე უდიდესია, ხოლო მილის

ზედაპირის მიკრული ფენა უძრავია. მილში სითხის ნაწილაკების სიჩქარეთა განაწილება ნაჩვენებია 73ა სურათზე.

პუაზეილის ფორმულა

საინტერესოა, ვიცოდეთ *დროის ერთეულში* მილიდან გასული სითხის მოცულობის V (ან ნაკადის ინტენსივობის J) დამოკიდებულება მილისა და ბლანტი სითხის მახასიათებლებზე (სურათი 74).



სურათი 74

ა - სისხლის ნაკადის (მოცულობითი სიჩქარის) დამოკიდებულება სისხლძარღვის დიამეტრზე (ა) და რადიუსზე (ბ) მუდმივ წნევათა სხვაობის (გრადიენტის) პირობებში

ფრანგმა ექიმმა და ფიზიკოსმა პუაზეილმა დაადგინა, რომ ეს დამოკიდებულება შეიძლება შემდეგი ფორმულით გამოისახოს:

$$V = J = \pi \frac{\Delta P}{8 l \eta} R^4, \quad (\text{III.1.2.6})$$

სადაც $\Delta P = P_2 - P_1$, წნევათა სხვაობა მილის თავსა და ბოლოს შორის, l და R - მილის სიგრძე და რადიუსი, შესაბამისად, η - სითხის სიბლანტე. (III.1.2.6) გამოსახულებას *პუაზეილის ფორმულა* ეწოდება.

თუ მილის სიგრძე, რადიუსი და ΔP არ იცვლება, მაშინ დროის ერთეულში მილიდან გასული სითხის მოცულობა შეიცვლება სიბლანტის უკუპროპორციულად. სითხის ნაკადის ინტენსივობა იზრდება მილის რადიუსის ზრდასთან ერთად (პირდაპირპროპორციულია R^4). ეს იმას ნიშნავს, რომ მილის რადიუსის 2-ჯერ შემცირებისას დროის ერთეულში მილში გავლილი სითხის მოცულობა

(ნაკადის ინტენსივობა) შემცირდება $24-16$ -ჯერ (სურათი 76). ეს განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია სისხლძარღვთა შეფასების დროს.

პუაზეილის ფორმულა – რეოლოგიის ფუნდამენტური კანონია, იგი სითხის ლამინარული დინების სიჩქარის (მოცულობით სიჩქარის) და მისი სისხლის მიმოქცევის სხვა პარამეტრებზე დამოკიდებულების განსაზღვრის საშუალებას იძლევა. პუაზეილის განტოლება მიღში სითხის ნაკადის შესახებ სწორია მხოლოდ ლამინარული დინებისთვის.

III.13 ჰემოდინამიკის ფიზიკური საფუძვლები

სისხლი ადამიანის ორგანიზმის უმნიშვნელოვანესი სითხეა. სისხლის მასა სხეულის მასის 7%-ს შეადგენს. 65-70 კგ ადამიანის სხეულში 4,5-5 კგ სისხლია (დაახლოებით ამდენივე ლიტრი (სისხლის სიმკვრივე $\rho = 1,04 \times 10^3$ გ/მ³)). ცოცხალ ორგანიზმში სისხლი მუდმივ მოძრაობაშია. მოზრდილი ადამიანის სხეულში სისხლის მიმოქცევის სიჩქარე $\approx 5\ 000$ მლ/წთ.

სისხლის მიმოქცევის სისტემის ძირითადი ფუნქციაა ორგანიზმის სხვადასხვა ქსოვილთან ჟანგბადის, წყლის, ელექტროლიტების, საკვები ნივთიერებების, პორმონების და იმუნური უჯრედების, აგრეთვე, ტოქსიკური ნაერთების (ნახშირ-ორჟანგი და არასასურველი მეტაბოლიტები) ტრანსპორტირება. ამის გარდა, სისხლის მიმოქცევის სისტემას სხვა ფუნქციებიც აქვს – მისი საშუალებით მიმდინარეობს ორგანიზმის თერმორეგულაცია. სისხლის მიმოქცევის სისტემა ორი ნაწილისაგან შედგება: 1 - გული, 2 - სისხლძარღვთა ჩაკეტილი სისტემა. რომელიც სისხლის მიმოქცევის დიდ და მცირე წრეს ქმნის. გულს უმნიშვნელოვანესი როლი ენიჭება, იგი ასრულებს მუშაობას სისხლის მიმოქცევის სისტემაში სისხლის ტრანსპორტირებაზე.

განვიხილოთ სისხლის მიმოქცევის ზოგიერთი ფიზიკური კანონზომიერება.

III.13.1 გული – სისხლის მიმოქცევის სისტემის ძირითადი კომპონენტი

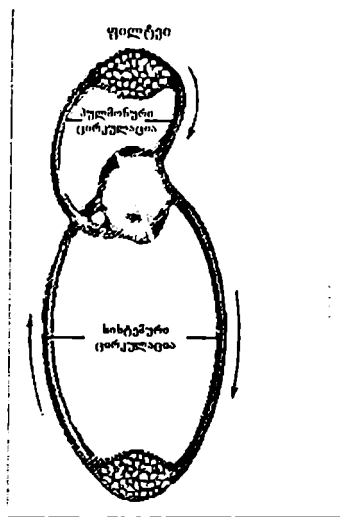
სისხლის მიმოქცევის სისტემა ორ ცირკულაციურ წრეს წარმოქმნის - სისტემური (დიდი წრე) და პულმონური ცირკულაცია (მცირე წრე) (სურათი 75).

სითხეების დინებას მყარ ან ელასტიკურკედლებთან მიღებში მილის საწყის და ბოლო წერტილებს შორის არსებული წნევათა სხვაობა განაპირობებს.

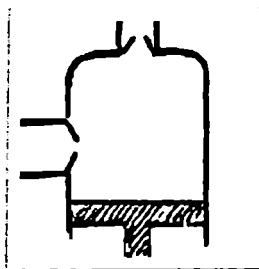
სისხლძარღვებში სისხლის დინებისათვის საჭირო წნევათა სხვაობას წარმოქმნის გული. სისხლის მიმოქცევის სისტემაში იგი ჩვეულებრივი ტუმბოს როლს ასრულებს. ის წარმოადგენს *ორკამერიან ტუმბოს* (სურათი 76): მარცხენა პარკუტის კუნთების შეკუმშვისას სისხლი ჩაიტუმბება აორტაში დაახლოებით 17კპა (≈ 125 მმ Hg) წნევით (დიდი ცირკულაციური ციკლი). მარჯვენა პარკუტიდან სისხლი შედარებით დაბალი წნევით (3,5კპა ≈ 25 მმ Hg) იტუმბება პულმონურ არტერიაში.

აღსანიშნავია, რომ ჩვეულებრივი ტუმბოსგან განსხვავებით, რომლის მუშა ზედაპირი (დგუშის ზედაპირის ფართობი) სამუშაო ციკლის დროს არ იცვლება, გულის მუშა ზედაპირის ფართობი (გულის პარკუტების მუშა ზედაპირი) სამუშაო ციკლის დროს საგრძნობლად იცვლება. შეკუმშვის დასაწყისში გულის მარცხენა პარკუტის მოცულობა (იგივე *დიასტოლური მოცულობა*) $V_{\text{დ}} \approx 85$ მმ³ა,

ხოლო კუმშვის დასასრულს მისი მოცულობა (იგივე სისტოლური მოცულობა)
 $V_s \approx 25 \text{ სმ}^3$ -ს შეადგენს.



სურათი 75
 სისხლის მიმოქცევის მცირე და დიდი წრე



სურათი 76
 ორსარკველიანი ტუმბოს სქემა

აღამიანის გულის პარკუჭები გარკვეული მიახლოებით შეიძლება ჩაეთვალოთ სფეროდ და ზემოთ მოყვანილი მონაცემების ($V_d \approx 85 \text{ სმ}^3$, $V_s \approx 25 \text{ სმ}^3$) საფუძველზე გამოვთვალოთ ამ სფეროს რადიუსი და მუშა ზედაპირის ფართობი სისტოლის დასაწყისში და დასასრულს. ამისათვის უნდა გამოვიყენოთ სფეროს მოცულობის და ზედაპირის გამოსათვლელი ფორმულები ($V = \frac{4}{3} \pi R^3$, $S = 4 \pi R^2$),

სადაც R - სვერის რადიუსია. ამ ფორმულების გამოყენებით გამოთვლილი, მაგალითად, მარცხენა პარაკუტის შიგნით ზედაპირის ფართობი სისტოლის დასაწყისში $S_{\rho} = 93,7\text{სმ}^2$ -ის, ხოლო დასასრულს - $S_{\kappa} = 41,2\text{სმ}^2$ -ის ტოლია.

როგორც გაზომვები უჩვენებს, სისტოლის დასაწყისში გულის მარცხენა პარაკუტში განვითარებული წნევა $P_{\rho} \approx 9,3\text{კპა} \approx 70\text{მმ Hg}$, ხოლო დასასრულს $P_{\kappa} \approx 16\text{კპა} \approx 120\text{მმ Hg}$ შეადგენს. ეს მონაცემები საკმარისია იმისათვის, რომ დავადგინოთ, თუ რა სიდიდის ძალებს ავითარებს ადამიანის გული სისხლის მიმოქცევის პროცესში (როდესაც იგი ასრულებს მუშაობას). ეს ძალა (იგივე წნევის ძალა), განისაზღვრება ფორმულით:

$$F = PS \quad (\text{III.1.3.1.1})$$

ამ ფორმულის მიხედვით წნევისა და ფართობების მნიშვნელობების გათვალისწინებით სისტოლის დასაწყისში მარცხენა პარაკუტში მოქმედი წნევის ძალა $F = 896$ -ია, ხოლო დასასრულს - 676 . ამგვარად, გულის კუმშვის პროცესში პარაკუტის მიერ განვითარებული ძალა არ არის მუდმივი სიდიდე; მინიმალურ მნიშვნელობას იგი აღწევს სისტოლის დასასრულს.

სისხლძარღვთა სისტემაში სისხლის მიმოქცევის დროს გულის მიერ შესრულებული მუშაობა გულის მარცხენა და მარჯვენა პარაკუტების მიერ შესრულებული მუშაობის ჯამის ტოლია. ამ მუშაობის საკმაოდ დიდ ნაწილს (80 - 85%) მარცხენა პარაკუტის მიერ შესრულებული მუშაობა შეადგენს. ასეთ პირობებში, ცხადია, მუშაობის განხილვისას ძირითადი ყურადღება ექცევა გულის მარცხენა პარაკუტის მუშაობას და პროცესებს სისხლის დიდ წრეში მიმოქცევის დროს.

განვიხილოთ გულის მუშაობის ზოგიერთი რაოდენობრივი მაჩასიათებლები. გულის მუშაობის პროცესი დროის მიხედვით პერიოდულ პროცესს წარმოადგენს. გულის მუშაობის ერთი პერიოდი მოიცავს სისტოლას და დიასტოლას. გული ძირითად მუშაობას ასრულებს სისტოლის დროს, რომლის ხანგრძლივობა $t = 0,3$ წამია. დროის ამ ინტერვალში გულის მარცხენა პარაკუტი მაქსიმალურად იკუმშება და აორტას აწედის სისხლის გარკვეულ მოცულობას (V_0). ამ დროს გული ასრულებს მუშაობას აორტაში მოქმედი წნევის ძალების საწინააღმდეგოდ. თუ აორტაში სისხლის საშუალო წნევას აღვნიშნავთ P -თი, მაშინ სისტოლის განმავლობაში გულის მიერ შესრულებული მუშაობა A' გამოითვლება ფორმულით:

$$A' = PV_0 \quad (\text{III.1.3.1.2})$$

ეს მუშაობა აორტაში გარკვეულ ფარგლებში სისხლის წნევის მნიშვნელობების ($P_{\min}$ -სა და $P_{\max}$ -ს შორის) მუდმივობას უზრუნველყოფს და ამით ზრდის სისხლის და სისხლძარღვთა სისტემის პოტენციურ ენერგიას. გარდა ამისა, როდესაც გულის მარცხენა პარაკუტი იკუმშება და გარკვეული V_0 მოცულობის სისხლი მიეწოდება აორტას, სისხლის ეს რაოდენობა იწყებს აჩქარებულ მოძრაობას და თუ გულში მისი სიჩქარე იყო ნულის ტოლი, აორტაში იგი გარკვეული v სიჩქარით მოძრაობს, ანუ იძენს კინეტიკურ ენერგიას. ეს იმას ნიშნავს, რომ გული აგრეთვე გარკვეულ A'' მუშაობას ასრულებს სისხლ-სათვის კინეტიკური ენერგიის მინიჭებაზე:

$$A'' = \frac{mv^2}{2} = \frac{\rho V_0 v^2}{2} \quad (\text{III.1.3.1.3})$$

სადაც $m = \rho V_0$, V_0 მოცულობის სისხლის მასაა, ρ - სისხლის სიმკვრივე.

მაშასადამე, გულის მარცხენა პარკუჭის სრული მუშაობა: $A_I = A' + A''$, ან:

$$A_I = PV_0 + \frac{\rho V_0 v^2}{2} = (P + \frac{\rho v^2}{2}) V_0 \quad (\text{III.1.3.1.4})$$

როგორც ზემოთ აღვნიშნეთ, მარჯვენა პარკუჭის მუშაობა A_2 სრული მუშაობის 20%-ს შეადგენს (ანუ $A_2 = 0,2A_I$). ამიტომ გულის სრული მუშაობის გამოთვლისათვის (რომელიც ორივე პარკუჭის მუშაობას ითვალისწინებს) შეგვიძლია დავწეროთ:

$$A = A_I + A_2 = A_I + 0,2 A_I = 1,2 (P + \frac{\rho v^2}{2}) V_0 \quad (\text{III.1.3.1.5})$$

თუ ვისარგებლებთ ზოგიერთი რიცხვითი მონაცემით (სისხლის სიმკვრივე $\rho \approx 1,04 \times 10^3 \frac{\text{გ}}{\text{სმ}^3}$, სისხლის მოძრაობის სიჩქარე აორტაში $v \approx 0,5 \frac{\text{მ}}{\text{წმ}}$, $V_0 \approx 60 \text{ სმ}^3 \approx 6 \times 10^{-5} \text{ მ}^3$, P - წნევის საშუალო მნიშვნელობაა სისტოლის განმავლობაში (სისტოლის დასაწყისში წნევა დაახლოებით 10კპა-ის, ხოლო დასასრულს - 17კპა-ის ტოლია) დაახლოებით 13,5კპა-ის ტოლია. ფორმულის (III.1.3.1.5) საშუალებით ადვილად დავადგენთ გულის სრული მუშაობის მნიშვნელობას ერთი შეკუმშვის განმავლობაში: $A \approx 1 \text{ ჯ.}$ როგორც უკვე აღვნიშნეთ, გული ძირითად მუშაობას ასრულებს მხოლოდ შეკუმშვის დროს (სისტოლის ხანგრძლივობა $t \approx 0,3 \text{ წმ}$), აქედან გამომდინარე, გულის მუშაობისას სიმძლავრე ტოლია:

$$N = \frac{A}{t} = 1,2 (P + \frac{\rho v^2}{2}) \frac{V_0}{t} \approx 1 \frac{\text{ჯ}}{0,32 \text{ წმ}} = 3,3 \frac{\text{ჯ}}{\text{წმ}} = 3,3 \text{ ეტ.} \quad (\text{III.1.3.1.6})$$

ზემოთ მოყვანილი რიცხვითი მონაცემები შეესაბამება გულის მუშაობას ნორმალურ პირობებში. როდესაც იზრდება ფიზიკური დატვირთვა, შესაბამისად, იზრდება აორტაში ამოტუმბული სისხლის მოცულობა V_0 და აორტაში სისხლის დინების სიჩქარე v . ასეთ პირობებში, ცხადია, გაიზრდება გულის მუშაობის მაჩვენებელიც. უნდა აღინიშნოს, რომ გულის მუშაობის კინეტიკური ენერგიის კომპონენტი A'' იზრდება გაცილებით უფრო სწრაფად (დამოკიდებულია სიჩქარის კვადრატზე), ვიდრე სტატიკური კომპონენტი A' . დიდი დატვირთვების შემთხვევაში, როდესაც აორტაში სისხლის მიმოქცევის სიჩქარე საგრძნობლად იზრდება, კინეტიკურმა მდგენელმა A'' შეიძლება, მიაღწიოს გულის მთელი მუშაობის 30%-ს.

როგორც ცნობილია, მუშაობა ყოველთვის გარკვეული ენერგიის ხარჯზე სრულდება. ენერგია, რომლის ხარჯზეც გული ასრულებს მუშაობას - ქიმიური ენერგიაა (ატფ-ის ენერგია, რომელიც წარმოიქმნება გულის კუნთში გლიკოლიზის შედეგად). აქედან გამომდინარე, გულის, როგორც ნებისმიერი სხვა კუნთის ფუნქციონირებისას ქიმიური ენერგია გარდაიქმნება მექანიკურ ენერგიად.

ზემოთქმულიდან გამომდინარე, შეგვიძლია დავასკვნათ, რომ:

- გული – სისხლის მიმოქცევის სისტემის უმნიშვნელოვანესი კომპონენტია;
 - სისხლის მიმოქცევის პროცესი მნიშვნელოვნად დამოკიდებულია გულის კუნთის კუმშვით აქტიუობაზე, რომელიც, თავის მხრივ, მჭიდროდაა დაკავშირებული გულის მეტაბოლიზმის დონესთან.

უნდა აღინიშნოს, რომ გულის კუმშვადობის მექანიზმისათვის დამახასიათებელია:

- სინქრონიზაციისა და კოოპერაციის უნარი (სპეციფიკური გამტარი სისტემის არსებობის გამო);

- მექანიკური ტუმბოს მუდმივი ფუნქციონირება (შიგა და გარეთა ფაქტორების ზემოქმედებით);

- ენერგიის გარკვეული მარაგისა და უხვი კაპილარული სისტემის არსებობა, რომელიც აუცილებელია ინტენსიური ენერგოგენეზისათვის;

- გულის კედლებზე მუდმივი ცირკულაციური ზეწოლა (იგულისხმება ორგანიზმის ადეკვატური მოთხოვნილების დაკმაყოფილება სისხლით).

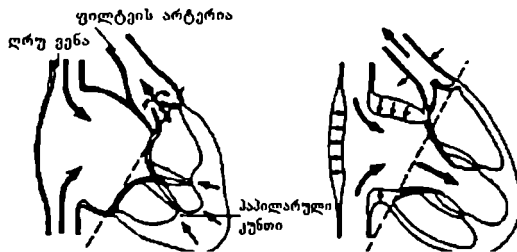
III.132 სისხლის მიმოქცევის ფიზიკური მექანიზმები. რეზისტენტობა

ვინაიდან სისხლის მიმოქცევის დიდი და მცირე წრის სიგრძე განსხვავებულია, სისხლი არათანაბრად ნაწილდება ამ წრეებს შორის: სისხლის $\approx 84\%$ სისტემურ ციკლში (დიდ წრეში) და სისხლის $\approx 10\%$ პულმონურ ციკლში (მცირე წრეში) (ცხრილი 12) ცირკულირებს.

ცხრილი 12
სისხლის განაწილება გულსისხლძარღვთა სისტემაში

რეგიონი	მოცულობა (მლ)	მოცულობა (%)
გული	360	7,2
სისტემური ციკლი	4200	84
აორტა და არტერიები	300	6,0
არტერიოლები	400	8,0
კაპილარები	300	6,0
მცირე ვენები	2300	46
დიდი ვენები	900	18
პულმონური ციკლი	440	8,8
არტერიები	130	2,6
კაპილარები	110	2,2
ვენები	200	4,0

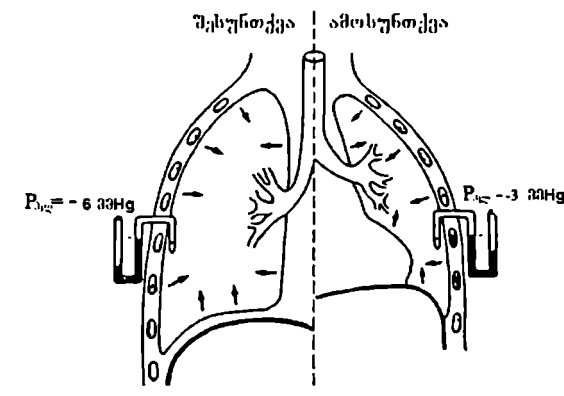
სისხლის მიმოქცევის მიმართულებას არეგულირებს პარკუჭების შესასვლელთან არსებული სარქველები (გულის კუნთის შეკუმშვისა და რელაქსაციის დროს წნევის ცვლილებებით) (სურათი 77).



სურათი 77

სისხლის დინების მიმართულების რეგულაცია პარკუჭების შესასვლელთან არსებული სარქველების საშუალებით

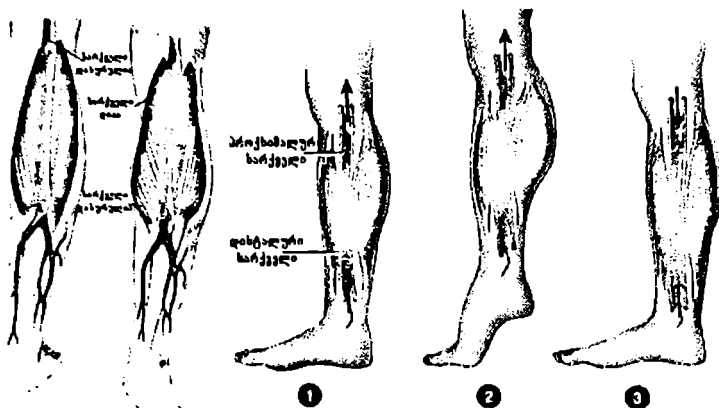
გარდა გულისა, სისხლის მიმოქცევა სისხლძარღვთა სისტემაში ხელს უწყობს პლევრის ნაპრალის უარყოფითი წნევა (იგი ატმოსფერულზე დაბალია), რაც განპირობებულია გულმკერდის ჩონჩხის კუნთების კუმშვით აქტიუობით. საკმე ისაა, რომ შესუნთქვის დროს პლევრის ნაპრალის პერმეტულობის გამო მის გაფართოებისას წნევა ფილტვებსა და გულმკერდის კედელს შორის ქვეითდება ფილტვებში არსებული აირის წნევასთან შედარებით. თუ ფილტვებში აირის წნევას ჩავევლით ნულის ტოლად, პლევრის ნაპრალის წნევა იქნება უარყოფითი (სურათი 78). ამრიგად, პლევრის ნაპრალში უარყოფითი წნევა ხელს უწყობს ენური სისხლის მოძრაობას მარჯვენა წინაგულისაკენ.



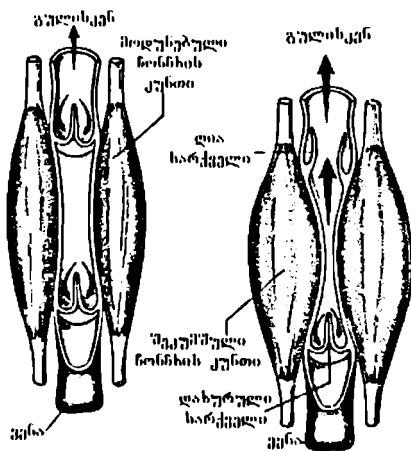
სურათი 78

პლევრის ნაპრალის უარყოფითი წნევის წარმოქმნის სქემატური სურათი. (მარცხნივ - ფილტვი შესუნთქვის მდგომარეობაში (გაფართოებულია) პლევრის ნაპრალის წნევა ატმოსფერულზე ნაკლებია (- 6მმ Hg); მარჯვნივ - ფილტვი ამოსუნთქვის მდგომარეობაში (შეკუმშულია), პლევრის ნაპრალი წნევა იზრდება (-3მმ Hg))

რაც შეეხება ჩონჩხის კუნთებს, კუმშვისას ისინი აწევიან ვენებს და ამით ხელს უწყობენ სისხლის დინებას გულისაკენ (სურათი 79ბ). გრავიტაციის გამო საჩინააღმდეგო მიმართულებით სისხლის მოძრაობას ხელს უშლიან ვენებში არსებული ცალმხრივი სარქველებიც (სურათი 79ა).



ა



ბ

სურათი 79

ა - სარქველების მუშაობის დინამიკა; ბ - ჩონჩხის კუნთების მონაწილეობა სისხლის მიმოქცევაში

მაშასადამე, ორგანიზმში სისხლის მიმოქცევას და სისხლძარღვებში მის მიმართულებას განაპირობებს 3 ფაქტორი:

- კუნთების (მიოკარდიუმის, სისხლძარღვების კედლების, კიღურების) კონსტრიქცია (შეკუმშვა);

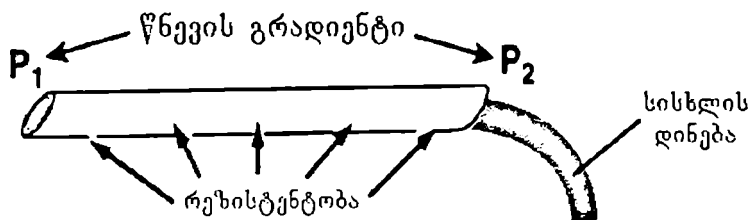
- სუნთქვა (პლევრულ ნაპრალში უარყოფითი წნევა);

- ცალმხრივი სარქველების არსებობა კიღურების ვენებში და მიოკარდიუმში.

როგორც უკვე აღვნიშნეთ, სისხლის ნაკადის არსებობა განპირობებულია პირველ რიგში გულის კუმშითი აქტივობით. გული ასრულებს რა ტუმბოს როლს, უზრუნველყოფს წნევითა სხვაობის წარმოქმნას, რაც აუცილებელია სისხლძარღვებში სისხლის მოძრაობისათვის.

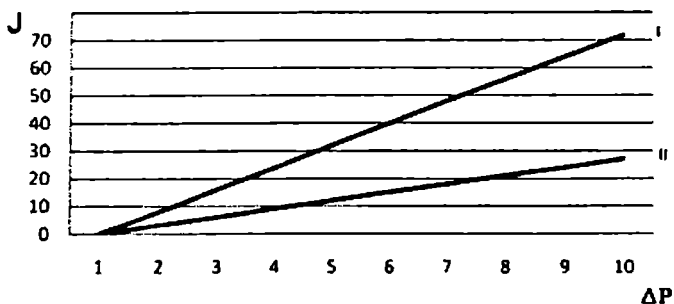
სისხლის ნაკადი (J) სისხლძარღვში განისაზღვრება წნევითა სხვაობით (ΔP) და სისხლის მიმოქცევის სისტემის რეზისტენტობით (R) (სურათი 80, 81):

$$J = \frac{\Delta P}{R} \quad (\text{III.1.3.2.1})$$



სურათი 80

სისხლის მიმოქცევის რეგულაციაში მონაწილე ფაქტორები ($P_1 > P_2$)



სურათი 81

სისხლის ნაკადის ინტენსივობის (J) დამოკიდებულება წნევის გრადიენტზე (P) სხვადასხვა რეზისტენტობის შემთხვევაში (I - R_1 ; II - R_2 ; $R_1 < R_2$)

პუაზილის ფორმულის მიხედვით ($J = \frac{\pi r^4 \Delta P}{8 \eta l} = \frac{\Delta P}{8 \eta l / \pi r^4}$) სისხლის ნაკადი-
საღში სისხლძარღვთა სისტემის რეზისტენტობა R უდრის:

$$R = \frac{8 \eta l}{\pi r^4} \quad (\text{III.1.3.2.2})$$

რეზისტენტობა – სისხლის მიმოქცევის სისტემის მნიშვნელოვანი პარამეტრია. იგი მოცემული ΔP -ს პირობებში სისხლძარღვების **გამტარებლობას** (და მაშასადამე, სისხლის ნაკადის ინტენსივობას) განსაზღვრავს. **გამტარებლობა** – რეზისტენტობის შებრუნებული სიდიდეა, იგი დამოკიდებულია არა მხოლოდ სისხლძარღვის გეომეტრიაზე, არამედ სისხლის სიბლანტეზეც.

1. სისხლის ფიზიკური მახასიათებლები:

სიბლანტე

სიბლანტე - ერთ-ერთი ფაქტორია, რომელიც განსაზღვრავს ვასკულურ რეზისტენტობას (იშკუდანს).

სისხლი – სისხლის უჯრედების (ერითროციტების, ლეიკოციტების, თრომბოციტების) სუსპენზია პლაზმაში. პლაზმა – წყალში გახსნილი მარილებისა და პიდრატირებული მოლეკულების ხსნარია. სისხლის სიბლანტე 37°C ტემპერატურაზე მერყეობს $\approx 3,5$ მპა $\times$ წმ-ის ფარგლებში, რაც განპირობებულია სისხლში ცილის მაღალი კონცენტრაციით და სუსპენზირებული სისხლის უჯრედების არსებობით (ცხრილი 13). ეს მაჩვენებელი წყლის სიბლანტეზე $3,5$ -ჯერ მაღალია. სისხლის პლაზმის სიბლანტე 37°C ტემპერატურაზე $\approx 1,5$ პა $\times$ წმ-ს შეადგენს. სისხლის სიბლანტე დამოკიდებულია მისი შემადგენელი კომპონენტების თანაფარდობაზე და მათ ფიზიკურ-ქიმიურ პარამეტრებზე. განვიხილოთ ამ დამოკიდებულების ზოგიერთი ასპექტი.

ცხრილი 13

სხვადასხვა სითხის სიბლანტის მაჩვენებელი

სითხე	η (მპა $\times$ წმ)
წყალი (0°C)	1.8
წყალი (37°C)	1.0
წყალი (100°C)	0.3
სისხლი (37°C)	≈ 4
სისხლის პლაზმა (37°C)	$\approx 3,5$
ზეთი	$\approx 1,5$
	≈ 200

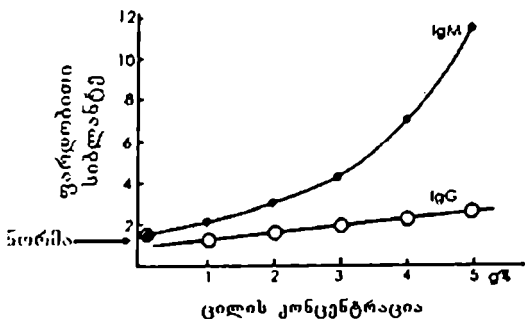
ცილების შემცველობის გავლენა სისხლის სიბლანტეზე.

სისხლის სიბლანტე დამოკიდებულია პლაზმის სიბლანტეზე. პლაზმის სიბლანტე თავის მხრივ - ცილების კონცენტრაციაზე.

ფიბრინოგენს თავისი ფიზიკურ-ქიმიური თვისებების (ანიზოტროპულია, ელექტრონიტრალურია, გააჩნია მაღალი სიმკვრივე) გამო მნიშვნელოვანი

წელიწადი შეაქვს სისხლის სიბლანტის რეგულაციაში. იგი ზრდის ერითროციტების აგრეგაციას, იწვევს სისხლის ნაკადის შენელებას (სტაზს) და ლეიკოციტების ადჰეზიას სისხლძარღვების კედლებზე. ამის შედეგად იზრდება ენდოთელიუმის ანთებითი დაზიანების საშიშროება, რაც განაპირობებს იმას, რომ სისხლის პლაზმაში ფიბრინოგენის მაღალი შემცველობა კორელირებს ათეროსკლეროზის განვითარების რისკთან.

სხვადასხვა გლობულური ცილები (იმუნოგლობულინი M და G (IgM, IgG)) განსხვავებულ ზემოქმედებას ახდენს სისხლის პლაზმის სიბლანტეზე (სურათი 82); ალბუმინის ზეგავლენა სისხლის სიბლანტეზე გაცილებით ნაკლებია.



სურათი 82

გლობულური ცილების (იმუნოგლობულინი M და იმუნოგლობულინი G -ს) ზემოქმედება სისხლის პლაზმის სიბლანტეზე
(Nico A.M. Schellart. "Compendium of Medical Physics, Medical Technology and Biophysics", Amsterdam, 2009)

სისხლის უჯრედების - ფორმის ელემენტების ზეგავლენა სისხლის სიბლანტეზე.

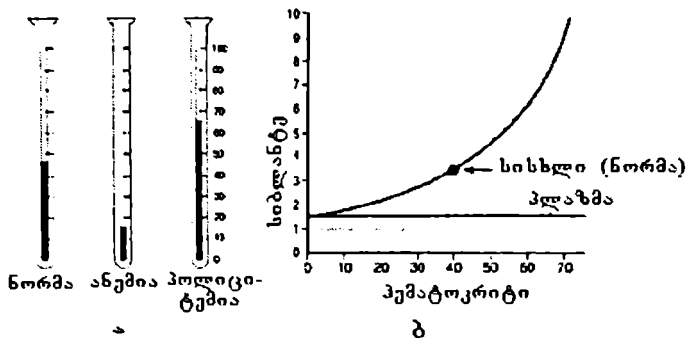
სისხლში სისხლის უჯრედების პროცენტულ შემცველობას "ჰემატოკრიტი"-ს უწოდებენ.

$$\text{ჰემატოკრიტი} = \frac{V_1}{V_2} \times 100 \%,$$

სადაც V_1 - სისხლის უჯრედების მოცულობა, V_2 - სისხლის მთლიანი მოცულობა.

ჰემატოკრიტი მამაკაცებსა და ქალებში ნორმაში უდრის 42%-ს და 38%-ს, შესაბამისად.

სისხლის სიბლანტე იცვლება ჰემატოკრიტის ცვლილებებთან ერთად (სურათი 83). როდესაც ჰემატოკრიტი მაღალია, შესაბამისად, მნიშვნელოვნად (10 ჯერ) იზრდება სისხლის სიბლანტე და სისხლის ნაკადების მიმართ წინააღმდეგობის ძალის სიდიდეც.



სურათი 83

ა - პემატოკრიტი ნორმისა და პათოლოგიის დროს; ბ - სისხლის სიბლანტის დამოკიდებულება პემატოკრიტზე

ამგვარად პემატოკრიტის მომატებისას სისხლის სიბლანტის ზრდა პერიფერიული სისხლძარღვების რეზისტენტობის მომატებას და ჰიპერტენზიის განვითარებას იწვევს, იგი აგრეთვე ვენური ნაკადის დაქვეითებას განაპირობებს.

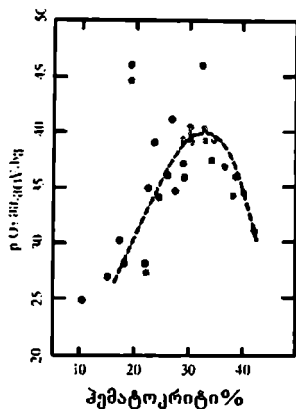
მწვავე ანემიის დროს სისხლის სიბლანტე მცირდება. აღნიშნული პერიფერიული სისხლძარღვების სისხლის ნაკადისადმი რეზისტენტობის დაქვეითებას, ვენური სტაზის (ჭარბი სისხლის დაგროვება ვენებში) განვითარებას განაპირობებს. შესაბამისად, ირღვევა სისხლის მიმოქცევის რეჟიმი, რაც გულის მუშაობის რიტმის მოშლას და მეტ ენერგიას მოითხოვს.

პოლიციტემიის (*პოლიციტემია* - მდგომარეობა, როდესაც სისხლის მოცულობის ერთეულში იზრდება ფორმირებული უჯრედების პროცენტული შემცველობა - პემატოკრიტი) დროს პემატოკრიტის ზრდა შეიძლება იყოს განპირობებული ერითროციტების მასის მომატებით, ან/და პლაზმის მოცულობის შემცირებით. პემატოკრიტის ზრდასთან ერთად მატულობს სისხლის სიბლანტე და ჟანგბადით (O_2) გაჯერება.

84 სურათიდან ჩანს, რომ ერითროციტული მასის ტრანსფუზიის დროს პემატოკრიტის ზრდას თან ახლავს სისხლის სიბლანტის მომატება და, შესაბამისად, ჟანგბადით გაჯერება. საყურადღებოა, რომ პემატოკრიტის 30%-იანი ზღურბლს ზევით სისხლის სიბლანტის გაზრდა ნაკადის ინტენსივობის დაქვეითებას და ჟანგბადის ტრანსპორტირების შემცირებას იწვევს.

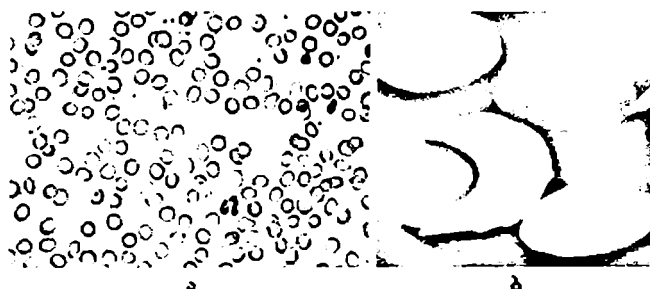
ანორმალური კემოკლობინით გამოწვეული ანემიის დროს (*თალასემია* - გლობინის ჯაჭვების ნაკლებობა) ერითროციტები მსუბუქია, მომცრო (სურათი 85ა), სისხლის სიბლანტე დაბალია.

ადამიანის ერითროციტი ორმხრივ ჩაზნექილი დისკოა, დიამეტრით 6-8 μm და სისქით 2 μm (სურათი 86). უჯრედის ზედაპირის ფართობი დაახლოებით 136 μm^2 -ია. ერითროციტების მაღალი დეფორმაბელობის გამო ვიწრო კაპილარებში (რომელთა დიამეტრი ბევრად არ განსხვავდება ერითროციტების დიამეტრისაგან) მოძრაობისას ისინი განიცდიან დეფორმაციას (სურათი 87ა, ბ).



სურათი 84

სისხლის ოქსიგენაციის მანევრების დამოკიდებულება პემატოკრიტზე

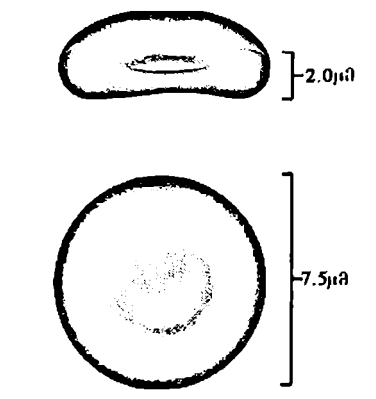


სურათი 85

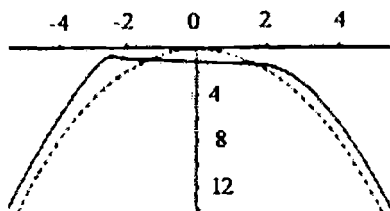
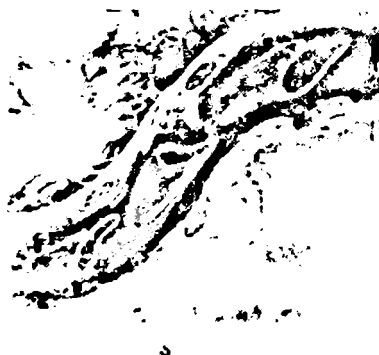
თალასემია (ა), ნამგლისებრი ანემია (ბ)

რაიმე მიზეზით ერითროციტების დეფორმაციის დაქვეითების შემთხვევაში ძნელდება მათი გადაადგილება წერილ კაპილარებში, რაც სისხლის სიბლანტის ზრდას. ერითროციტების აგრეგაციების წარმოქმნას განაპირობებს. ერითროციტის დეფორმაციულობა ქვეითდება მისი მემბრანის სტრუქტურული ცვლილებების შედეგად (მემკვიდრეობითი სფეროციტოზი - ციტონოზის ცილის სპექტრის უკმარისობა, ან სტრუქტურული დეფექტი). მემბრანის დენადობის დაქვეითებისას მისი ლიპიდური სპექტრის ცვლილებების, ჭარბი ქოლესტეროლის ჩალაგების შედეგად, ასევე კემოგლობინის დეფექტების დროს. ასე მაგალითად, ნამგლისებრი ანემიის დროს კემოგლობინის მუტაციის (ბ-ჯაჭვის პირველად სტრუქტურაში გლუტამატის ნაცლებად პოლარული ვალინით შეცვლა) შედეგად პიდროფობული ვალინი შეაღწევს დეოქსი კემოგლობინის მეორე ბ-ჯაჭვის არეში, რაც კემოგლობინის მოლეკულების აგრეგაციას და ჩხირისებრი სპირალიზებული S-ფიბრების წარმოქმნას განაპირობებს (სურათი 87ბ), რაც

ერიტროციტების ჯანგბადით გაჯერების (სატურაციის) დაქვეითებას უწყობს ხელს. კრისტალიზებული ჰემოგლობინი ამცირებს ერიტროციტების დეფორმაციის უნარიანობას და, მაშასადამე, ზრდის სისხლის სიბლანტეს.



სურათი 86
ერიტროციტის ორმხრივ ჩაზნექილი დისკოს ფორმა

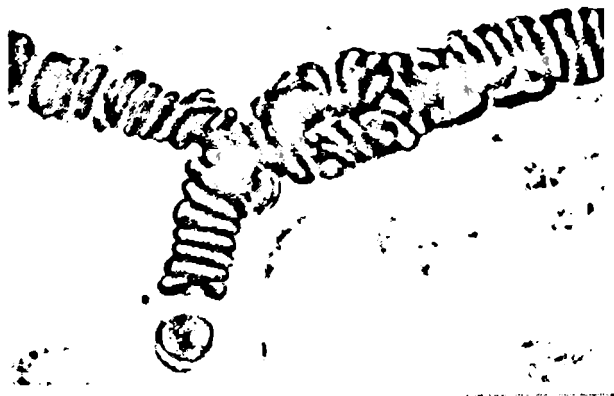


სურათი 87

ერიტროციტების დეფორმაცია ვიწრო კაპილარებში – ა; ერიტროციტის დეფორმაცია მილის კედლის სიახლოვეს – ბ (სქემატური სურათი; წყვეტილი ხაზი – სხეულის საწყისი ზედაპირი; უწყვეტი ხაზი – დეფორმირებული ზედაპირი)

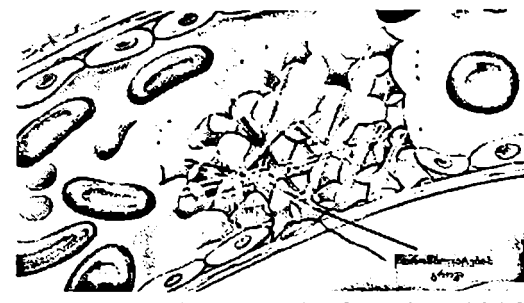
(Nico A.M. Schellart. "Compendium of Medical Physics, Medical Technology and Biophysics", Amsterdam, 2009)

ერიტროციტების დეფორმაბელობის ცვლილებების გათვალისწინება მნიშვნელოვანია სხვადასხვა პათოლოგიის (გენეტიკური, ინფექციური დაავადებები, ინტოქსიკაციები, მთელი რიგი ქრონიკული დაავადებები) მკურნალობის დროს. ერიტროციტების დეფორმაბელობის ცვლილებები გაეულენას ახდენს ერიტროციტების რეოლოგიურ თვისებებზე (ადეზიურობა, აგრეგაციულობა) (სურათი 88).



სურათი 88
ერიტროციტების აგრეგაციები

სხვადასხვა პათოლოგიური პროცესების დროს სისხლის სიბლანტის მომატებას ხელს უწყობს ლეიკოციტების ენდოთელიუმთან ადჰეზია, თრომბოციტების აგრეგაციების ფორმირება (სურათი 89).

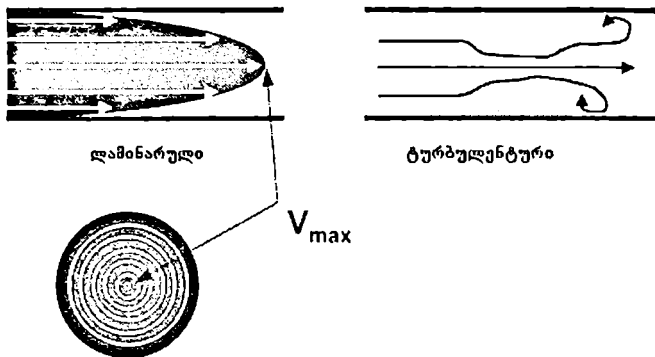


სურათი 89
სისხლის სიბლანტის ცვლილების გამომწვევი ფაქტორები: ლეიკოციტების ენდოთელიუმთან ადჰეზია, თრომბოციტების აგრეგაციების ფორმირება

სისხლის დინების ლამინარობა/ტურბულენტობა.

ლამინარული დინების დროს სისხლის ნაკადის ყველა ელემენტი მოძრაობს მილის ღერძის პარალელურად. კედლებთან განლაგებული სისხლის ფენების სინქარე მინიმალურია, ხოლო სისხლძარღვის ცენტრში კი მაქსიმალური.

ტურბულენტური დინების დროს სისხლის ყველა ელემენტი მოძრაობს უწესრიგოდ. სხვადასხვა მიმართულების სინქარით (სისხლძარღვის ღერძის პარალელურ, პერპენდიკულარულ, ან კუთხით (სურათი 90)), და სისხლის ფენები ურთიერთს შეერევა.



სურათი 90

სისხლის ლამინარული და ტურბულენტური დინების სქემატური სურათი

სწორ სისხლძარღვებში სისხლის ნაკადი, ჩვეულებრივ, ლამინარულია. მისი გარდაქმნა ტურბულენტურად მხოლოდ სისხლის სხვადასხვა რეოლოგიური პარამეტრების (რეინოლდსის რიცხვის განმსაზღვრელი) ცვლილებების, ან სისხლძარღვების ფორმის შეცვლის, ან დეფექტების დროს ხდება.

რეინოლდსის რიცხვი შეიძლება განხილულ იქნეს, როგორც ორი ტიპის ძალების თანაფარდობა:

$$Re = \frac{\text{ინერციული (მამოძრავებელი) ძალები}}{\text{წინააღმდეგობის ძალები}}$$

იმ შემთხვევაში, როდესაც რეინოლდსის რიცხვი დაბალია, სისხლის დინებისას მოსაზღვრე ფენებში, როგორც წესი, დომინირებს წინააღმდეგობის ძალები (დამოკიდებული სითხის სიბლანტეზე - η). სითხის ნაკადი ნაწილდება მოსაზღვრე ფენის მთელ ზედაპირზე და მცირე შეშფოთების მიუხედავად, ლამინარულია. თუ ინერციული ძალების (რომელიც ρv^2 პროპორციულია) სიდიდე იზრდება, სითხის სიბლანტე ვერ უზრუნველყოფს წესრიგის შენარჩუნებას, რეინოლდსის რიცხვის მნიშვნელობა იზრდება და მცირე შეშფოთება გადაიქცევა ძლიერი შეშფოთების წყაროდ, ხოლო დინება - ტურბულენტურ დინებად.

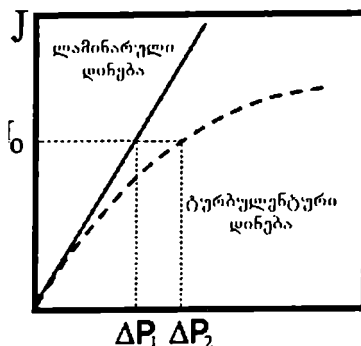
სისხლის მიმოქცევის საშუალო სიჩქარისათვის (30 სმ/წმ) რეინოლდსის რიცხვი უდრის $R = 1590$ -ს, დინება ლამინარულია. რეინოლდსის რიცხვი იღებს კრიტიკულ მნიშვნელობას აორტაში, სადაც სისხლის ნაკადის სიჩქარე (აორტის სარქველების გახსნისას) აღწევს 50 სმ/წმ (ექსტრემალურ შემთხვევებში 100 სმ/წმ). ამ შემთხვევაში აორტისათვის რეინოლდსის რიცხვის მნიშვნელობა:

$$R = \frac{2r\rho v}{\eta} = \frac{2(0,01\theta) \times (1060 \frac{\text{გ}}{\text{სმ}^3}) \times (0,5 \frac{\theta}{\text{წმ}})}{4 \times 10^{-3} (\text{პწმ})} = 2650,$$

ანუ, დინება ტურბულენტურია ($2650 > 2000$).

ფიზიკური დატვირთვის დროს გულის მიერ გადატუმბული სისხლის რაოდენობა 3-5 ჯერ იზრდება, რაც განაპირობებს სისხლის დინების საშუალო სიჩქარის მომატებას. ამ შემთხვევაში რეინოლდსის რიცხვი აღწევს კრიტიკულ მნიშვნელობას, რაც სისხლის ტურბულენტურ დინებად გადაქცევას განაპირობებს.

ლამინარული დინების შემთხვევაში სისხლის ნაკადის J_0 მნიშვნელობისთვის უფრო ნაკლები (ΔP_1) წნევის გრადიენტია საჭირო, ვიდრე ტურბულენტური დინების დროს (ΔP_2) (იხილე სურათი 91). აქედან გამომდინარე, ნათელია, რომ ტურბულენტური ნაკადი გულისთვის ენერგეტიკულად წამგებია, რადგან მოითხოვს უფრო მეტი მუშაობის შესრულებას.



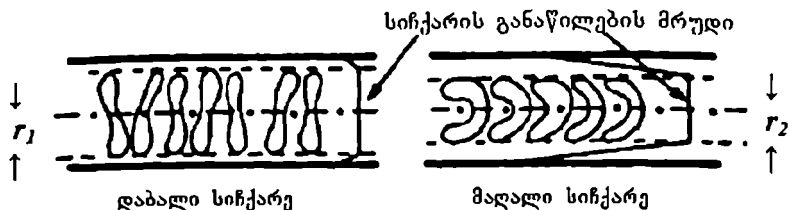
სურათი 91

დამოკიდებულება სისხლის ნაკადისა (J) და წნევის გრადიენტს შორის
(Nico A.M. Schellart. "Compendium of Medical Physics, Medical Technology and Biophysics",
Amsterdam, 2009)

II. მექანიკური ძალები.

სისხლის ნაკადში ერითროციტის დეფორმაციის ხარისხი იზრდება დინების სიჩქარის მომატებასთან ერთად (სურათი 92), განსაკუთრებით მცირე დიამეტრის მქონე სისხლძარღვებში. ეს მოვლენა შეიძლება აიხსნას პლაზმის დინების

სიჩქარის სხვადასხვა მნიშვნელობით სისხლძარღვის ცენტრსა და კედელს შორის.



სურათი 92

ერიტროციტების დეფორმაციის სიდიდის დამოკიდებულება მოძრაობის სიჩქარეზე

(Nico A.M. Schellart. "Compendium of Medical Physics, Medical Technology and Biophysics", Amsterdam, 2009)

სისხლი - არანიუტონისებური სითხეა. სისხლის დინების სიჩქარე ვიწრო კაპილარებში დამოკიდებულია ერიტროციტების დეფორმაბელობის უნარზე. ფიზიოლოგიურ პირობებში ერიტროციტები ვიწრო კაპილარებში ლაგდება თითო-თითოდ, ერთი მეორის მიყოლებით (ან წარმოქმნიან ე.წ. "მონეტების" სვეტს), ერთეებიან სისხლის საერთო ნაკადში და მოძრაობენ წნევის გრადიენტის მიმართულებით.

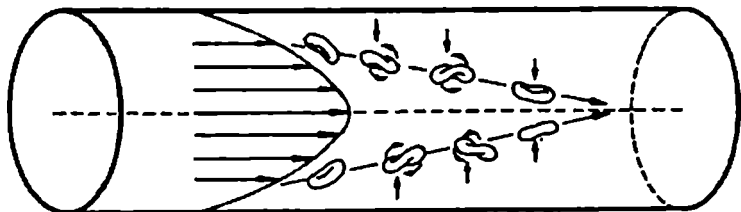
მაშასადამე, **ერიტროციტთა დეფორმაბელობა - მიკროცირკულაციური რეოლოგიის ერთ-ერთი ძირითადი საკითხია.**

მსხვილ სისხლძარღვებში ელინდება ეგრეთ წოდებული **ფარაჟუს-ლინდჰეისის ეფექტი**: მსხვილ სისხლძარღვებში ერიტროციტები სისხლძარღვის ცენტრალურ ნაწილში (მინიმალური წინააღმდეგობის ძალის არეში) კონცენტრირდება. ამ დროს მცირე ზომის სისხლის უჯრედები (თრომბოციტები) მოძრაობს, ძირითადად, სისხლძარღვების კედლებთან, რის შედეგადაც სისხლის სიბლანტე, რომელიც დამოკიდებულია პემატოკრიტზე, იზრდება სისხლძარღვების ცენტრში და მცირდება სისხლძარღვების კედლებთან. ეს კი იწვევს მთლიანი სისხლის ნაკადისადმი რეზისტენტობის შემცირებას. მილის (სისხლძარღვის) დიამეტრის შემცირებასთან ერთად მცირდება მასში გამდინარე სისხლის სიბლანტეც.

ფარაჟუს-ლინდჰეისის ეფექტის ფიზიკური საფუძვლის ახსნა მარტივია: რადგან სისხლის დინების სიჩქარე მილის (სისხლძარღვის) ცენტრალურ ნაწილში მაქსიმალურია, ბერნულის წესის თანახმად, წნევა ამ უბანში მინიმალურია. შესაბამისად, ერიტროციტზე (ან სხვა ფორმიან ელემენტზე) რადიალურად მოქმედი წნევის ძალები სხვადასხვაა: ცენტრისკენული წნევის ძალა სკარბობს ცენტრიდანულს, რის გამოც ფორმიანი ელემენტები განლაგდება სისხლძარღვის ცენტრალური ღერძის გასწვრივ (სურათი 93).

ფარაჟუს-ლინდჰეისის ეფექტს საფუძვლად უდევს **ენტროპიის** მინიმუმაციის პრინციპი (პრიგოინის პრინციპი). **ენტროპია** - სისტემის სპონტანური ცვლილე-

ბების მიმართ მიდრეკილების უნარის ზომა). ენტროპიის ზრდა სისტემაში შეუქცევადი ცვლილებების განვითარების შედეგს წარმოადგენს.



სურათი 93

ფარაეუს-ლინდჰეისის ეფექტი. ცენტრისკენული ძალა მგზავს ცენტრიდანულზე. ერითროციტებთან ისრები უჩვენებს ამ ძალების ტოლქმედს.

(Nico A.M. Schellart. "Compendium of Medical Physics, Medical Technology and Biophysics", Amsterdam, 2009)

სისხლის ნაკადის შემთხვევაში ენტროპიის მინიმიზაცია ნიშნავს უჯრედების მინიმალური წინააღმდეგობის ძალის არეში გადანაწილებას. ფარაეუს-ლინდჰეისის ეფექტი სისხლძარღვებში სისხლის სხვადასხვა ტიპის უჯრედის ზომების მიხედვით გადანაწილებას განაპირობებს (სურათი 93). ვინაიდან ლამინარული დინების პირობებში მინიმალური წინააღმდეგობა სისხლძარღვის ცენტრშია, სიჩქარე ცენტრში მაქსიმალურია!

III. სისხლძარღვის სიგრძის, ფორმისა და დიამეტრის გავლენა სისხლის დინებაზე

წნევის გრადიენტის მუდმივობის პირობებში ($\Delta P = const$) სისხლის მიმოქცევისადმი სისხლძარღვთა რეზისტენტობა (იმპედანსი) დამოკიდებულია სისხლძარღვების სიგრძესა და დიამეტრზე.

მე-14 ცხრილში ნაჩვენებია სხვადასხვა სისხლძარღვების კვეთის ფართობის ჯამური მაჩვენებლები. ცხრილში მოყვანილი მონაცემებიდან გამომდინარეობს, რომ კაპილარების საერთო კვეთის ფართობი აორტის კვეთის ფართობზე 1000-ჯერ მეტია. შესაბამისად, ფიზიოლოგიურ პირობებში სისხლის ნაკადის სიჩქარე აორტაში – 33 სმ/წმ-ა, არტერიებში – 20-30 სმ/წმ; კაპილარებში ეს მაჩვენებელი ათასჯერ მცირდება და დაახლოებით 0,3 მმ/წმ = 0,03 სმ/წმ-ს უდრის.

94-ე სურათზე მოყვანილია მონაცემები სხვადასხვა კვეთის ფართობის მქონე სისხლძარღვებში სისხლის მიმოქცევის საშუალო სიჩქარის შესახებ, დინების ნაკადის მუდმივობის პირობებში.

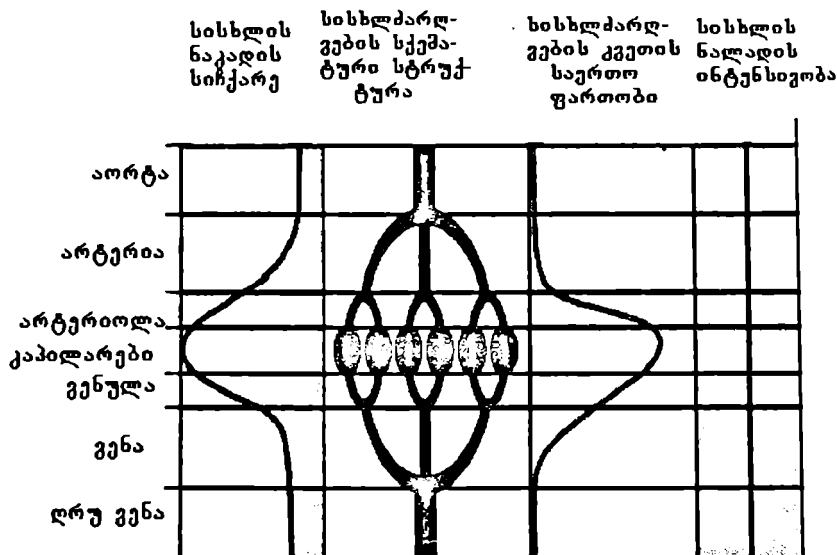
როგორც უკვე იყო აღნიშნული, სისხლძარღვებში სისხლის მიმოქცევის არსებობას წნევის გრადიენტი განსაზღვრავს. ანუ წნევის გრადიენტი – სისხლის მიმოქცევის სისტემის პოტენციური ენერგიის ზომაა. სისხლძარღვებში მოძრაობის დროს სისხლი იძენს კინეტიკურ ენერგიას, რომელიც სიჩქარის კვადრატის პირდაპირპროპორციულია. თუ არ მივიღებთ მხედველობაში სითხის ნაკადის ტურბულენტობას და წინააღმდეგობის ძალებს, თერმოდინამიკის კანონების თანახმად, სისხლის სრული ენერგია (პოტენციური + კინეტიკური) მუდმივია და, მაშასადამე, სისხლძარღვების კვეთის ფართობის ცვლილებებთან

ერთად ერთი სახის ენერგია მეორეში (პოტენციური კინეტიკურში და პირიქით) გარდაიქმნება.

ცხრილი 14

აღაშიანის სისხლძარღვების კვეთის წამური ფართობის მაჩვენებლები

სისხლძარღვი	კვეთის ფართობი (სმ²)
აორტა	2.5
მცირე არტერიები	20
არტერიოლები	40
კაპილარები	2500
ვენულები	250
მცირე ვენები	80
ლრუ ვენა	8



სურათი 94

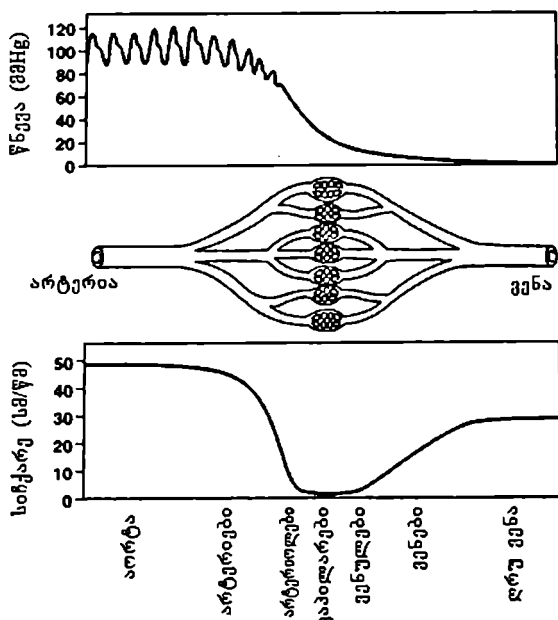
შედარებითი მონაცემები სხვადასხვა კვეთის ფართობის მქონე სისხლძარღვებში სისხლის მიმოქცევის საშუალო სიჩქარის შესახებ, სისხლის ნაკადის მუდმივობის პირობებში.

(Nico A.M. Schellart. "Compendium of Medical Physics, Medical Technology and Biophysics", Amsterdam, 2009)

მე-15 ცხრილში მოყვანილია სხვადასხვა სისხლძარღვის დიამეტრის, განივი კვეთის საერთო ფართობის, სისხლის მიმოქცევის სიჩქარისა და სისხლის წნევის მაჩვენებლები. ცხრილიდან ჩანს, რომ სისხლის წნევა წერილ კაპილარებში მნიშვნელოვნად დაბალია არტერიებთან და აორტასთან შედარებით (სურათი 95).

ცხრილი 15
სისხლძარღვების ზოგიერთი ფიზიკური მაჩვენებელი

სისხლძარღვი	D (სმ)	S (სმ ²)	P (მმ ვ. სე.)	V (სმ/წმ)
აორტა	2,5	2,5	100	33
მცირე არტერიები	0,5	20	100	30
არტერიოლები	3×10^{-3}	40	85	15
კაპილარები	6×10^{-4}	2500	30	0,03
ვენულები	2×10^{-3}	250	10	0,5
მცირე ვენები	0,5	80	5	2
ღრუ ვენა	3,0	8	2	20



სურათი 95

სისხლის ღინების სიჩქარისა და წნევის ცვლილებები სხვადასხვა ზომის სისხლძარღვებში

(Nico A.M. Schellart. "Compendium of Medical Physics, Medical Technology and Biophysics", Amsterdam, 2009)

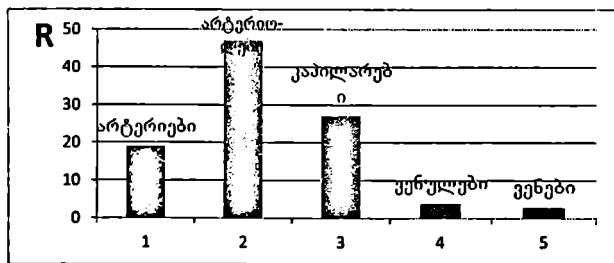
ცხრილში 16 მოყვანილია მონაცემები სხეულის სხვადასხვა ორგანოს სისხლის ნაკადისადმი რეზისტენტობის შესახებ.

ცხრილი 16
სისხლის ნაკადისადმი რეზისტენტობა სხეულის სხვადასხვა ორგანოში

ორგანო	ნაკადი J (მლ/წმ)	ლეზიტენტობა R (პა წმ/მლ)
თაყის ტყინი	13	1025
კორონალური სისხლძარღვები	14	3330
კუნთები	20	670
კანი	8	1670
შინაგანი ორგანოები	95	1330
სისტემური წრე	95	140
პულმონური წრე	96	11

ჩეულებრივ, დიდი არტერიების რეზისტენტობა გაცილებით დაბალია მიკროსისხლძარღვების რეზისტენტობასთან შედარებით (მიკროციკულაციაზე მოდის სისხლძარღვების საერთო რეზისტენტობის $\approx 70\%$). შესაბამისად, სისხლის ნაკადი სისხლძარღვებში ძირითადად განისაზღვრება ორგანოს კაპილარული ქსელის და არა მაგისტრალური (გამანაწილებელი) არტერიის რეზისტენტობით.

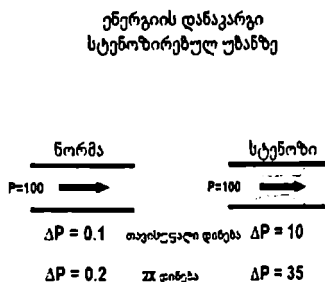
ხედასხვა ორგანოში კაპილარული სისტემის რეზისტენტობისა და სისხლძარღვთა სისტემის საერთო რეზისტენტობის შედარებისას ნათლად ელინდება ცალკეულ სისხლძარღვებს შორის სისხლის გადნაწილების არათანაბარი ხასიათი. ამის გამო ორგანოთა უმრავლესობა მარაგდება სისხლით სისხლძარღვთა პარალელური სისტემის საშუალებით (ვინაიდან საერთო რეზისტენტობა გაცილებით დაბალია, ვიდრე ცალკეულ ორგანოთა რეზისტენტობა) (სურათი 96).



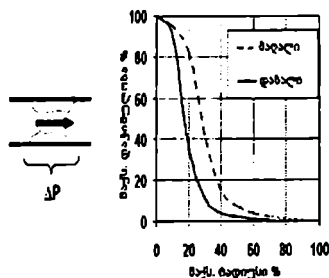
სურათი 96
სისხლძარღვთა სისტემის რეზისტენტობა

სისხლძარღვის სინათურის რადიუსის შემცირება (თრომბოზების, სტენოზების შედეგად) ცვლის სისხლის მიმოქცევის ხასიათს. სტენოზის არეში სისხლის მაქსიმალური ნაკადი შესულდელია სისხლძარღვის რეზისტენტობის მომატების (და დისტალურ უბანში წნევის შემცირების) გამო. სტენოზის გარშემო კინეტიკური და პოტენციური ენერგიის გადანაწილება იქვეა ნაკადის დისპროპორციულ ცვლილებებს (მნიშვნელოვნად ამცირებს წნევას დისტალურ უბანში) (სურათი 97 ა, ბ, გ). სტენოზის არეში ლამინარული სისხლის ნაკადი შეიძლება გარდაიქმნას ტურბულენტურ ნაკადად (რეინოლდსის რიცხვის ცვლილებები, განპირობებულია

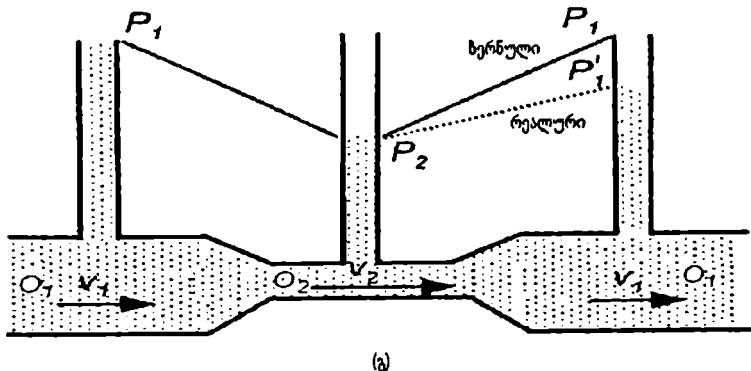
სისხლძარღვის დიამეტრის (ცელილებით). პემოდინამიკაში სტენოზის არეში გამდინარე სისხლის მოცულობის შენარჩუნების მიზნით უნდა გაიზარდოს სისხლის მამოძრავებელი ძალის სიდიდე, რაც ენერგიის გადახარჯვას და გულში მეტაბოლური პროცესების დარღვევას განაპირობებს.



(ა)



(ბ)



(გ)

სურათი 97

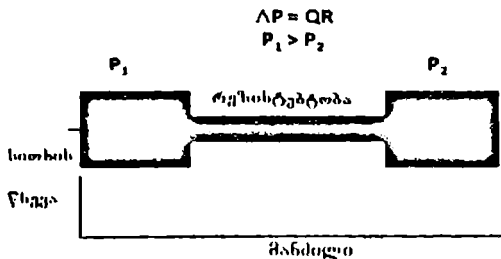
სისხლის პიდროსტატიკური წნევის შემცირება სტენოზის არეში (სქემატური სურათი)

სისხლძარღვის შევიწროების ადგილას იზრდება სისხლის დინების სიჩქარე ($v_2 > v_1$).

მაშასადამე, დინამიკური წნევა $\frac{\rho v^2}{2}$ იზრდება (ბერნულის განტოლება). სტენოზის შემდეგ მონაკვეთში სისხლძარღვის დიამეტრის აღდგენის შემთხვევაში სიჩქარე მცირდება, მაგრამ პიდროსტატიკური წნევის მნიშვნელობა არ უბრუნდება საწყის დონეს, რაც განპირობებულია სტენოზის უბანში ენერგიის დახარჯვით წინააღმდეგობის ძალის დაძლევაზე. შედეგად სტენოზის შემდგომ მდებარე ორგანოებში სისხლის მიმოქცევის ინტენსივობა დაქვეითებულია (სურათი 98).

რეზისტენტობა ცირკულაციური სისტემის მნიშვნელოვანი პარამეტრია. როდესაც ნაკადი გადის მილში, რეზისტენტობა შთანთქმავს ენერგიას, ეი.

სრულდება მუშაობა წინააღმდეგობის ძალების საწინააღმდეგოდ, რაც ვლინდება წნევის შემცირებით. სისხლძარღვების სიგრძის ზრდასთან (გულიდან დაშორებულიდან) ერთად სისხლის წნევა მცირდება (ვენებში, ვენებში) (სურათი 96).

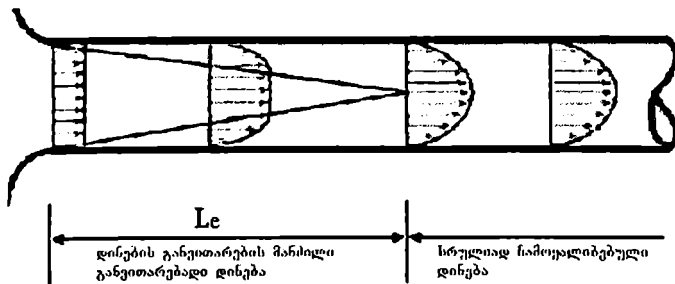


სურათი 98
რეზისტენტობის დამოკიდებულება სისხლძარღვთა სიგრძეზე

სისხლძარღვის სიგრძის გაგლეჩა ნაკადის თავისებურებებზე განსაკუთრებით კარგად ვლინდება სისხლის გულის მარცხენა პარკუტიდან აორტაში ჩადინების დროს.

განვიხილოთ სითხის ნაკადი, რომელიც ჩადინდება ფართო რეზერვუარიდან (გულის მარცხენა პარკუტიდან) შედარებით ვიწრო მილში (აორტაში). ჩათვალოთ, რომ სითხე უკუმშვადია. როგორც კი სითხე შეაღწევს აორტაში, მისი ღინება განიცდის ცვლილებებს, რომელიც განპირობებულია აორტის კედლების მხრიდან მოქმედი წინააღმდეგობის ძალებითა და სისხლის სიბლანტით. შესაბამისად, სისხლძარღვების კედლების მხრიდან მოქმედი წინააღმდეგობის ძალების ზემოქმედების შედეგად სისხლძარღვების კედლების პარალელურად მიმართული სისხლის ნაკადის სიჩქარის მდგენელი ნულის ტოლი გახდება; სისხლძარღვების კედლების მოსაზღვრე ნაკადის ფენების სიახლოვეს დომინირებს სიბლანტის ეფექტი. შესაბამისად, ეს ფენები ამუხრუჭებს შემდეგ ფენებს სითხის უკუმშვადობის გამო. სიბლანტის ეფექტის ზემოქმედება მინიმალურია.

სისხლის აორტაში შეღწევის პროცესის განხილვისას იყენებენ ე.წ. "ჩამოყალიბებული" ღინების ცნებას ("ჩამოყალიბებული" ღინება - დინამიკური ცნებაა. ასეთი ღინების დამყარება ხდება შეეწრობული მილის დასაწყისიდან რაიმე L_e მანძილზე (სურათი 99), ცნობილი "ღინების ჩამოყალიბების", ან "ღინების განვითარების" მანძილის სახელწოდებით.



სურათი 99
"ღინების ჩამოყალიბების" მანძილი აორტაში
(Nico A.M. Schellart. "Compendium of Medical Physics, Medical Technology and Biophysics", Amsterdam, 2009)

შეიძლება ითქვას, რომ აორტის სიგრძე არასაკმარისია მასში ლამინარული დინების ჩამოყალიბებისთვის (შესაბამისად, აორტაში სისხლის დინება ტურბულენტურია). სისხლის მიერ აორტაში რაღაც მანძილის გაღლის შემდეგ შეარდება წონასწორობა წნევის გრადიენტსა და წინააღმდეგობის ძალებს შორის, რაც აისახება რეინოლდსის რიცხვის მნიშვნელობაზე და განსაზღვრავს ლამინარული დინების ჩამოყალიბების Le მანძილს. Le მანძილი დამოკიდებულია ნაკადისათვის დამახასიათებელი რეინოლდსის რიცხვის მნიშვნელობაზე R და მილის დიამეტრზე D :

$$Le_{\text{ლამინარული}} = C D R^{1/8}, \quad (\text{III.1.3.2.5})$$

სადაც, C - შედგენილი, დამოკიდებული დიამეტრის ცვლილებებზე და დინების განვითარების მანძილის გეომეტრიულ მაჩვენებლებზე.

დადგენილია, რომ ტურბულენტური ნაკადისათვის $C = 4.4$, აქედან გამომდინარე:

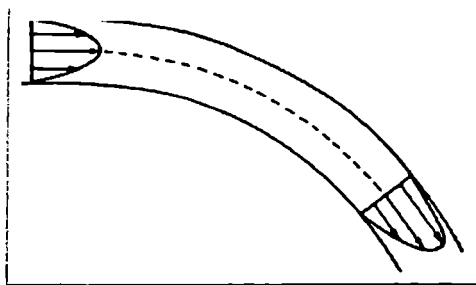
$$Le_{\text{ტურბულენტური}} = 4.4 D R^{1/8}.$$

ლამინარული ნაკადისათვის რეინოლდსის რიცხვი $R = 1000$ და Le/D შეფარდება 18,6-ის ტოლია; ტურბულენტური ნაკადისათვის $R = 2300$ -ზე მაღალია, ხოლო Le/D შეფარდება იზრდება 138-მდე.

განვიხილოთ სისხლის ნაკადის თავისებურებანი აორტაში. ფიზიოლოგიურ პირობებში ზრდასრული ადამიანის აორტის დიამეტრი 3 სმ-ია, აორტისათვის Le/D მნიშვნელობა უდრის 83.3-ს ($Le/D = 83.3$). აქედან გამომდინარე, დინების ჩამოყალიბების მანძილის სიგრძე აორტისთვის $Le_{\text{ლამინარული}} = 250$ სმ-ია. ეს მანძილი აღემატება აორტის სიგრძეს, რაც იმას ნიშნავს, რომ აორტაში დინება ჩამოყალიბებულია. ტურბულენტურია და რეინოლდსის რიცხვის მნიშვნელობა $R = 4000$. სწორედ ნაკადის ტურბულენტობა განაპირობებს აორტაში სისხლის ნაკადის პულსურ ხასიათს.

სისხლძარღვების ფორმის გავლენა დინების ხასიათზე

როდესაც სტაბილური ლამინარული ნაკადი გრძელ სწორ მილში იცვლის მოძრაობის მიმართულებას (მილის გამრუდების, მოხრის გამო), იცვლება აგრეთვე სითხის ყველა ელემენტის სიჩქარის მიმართულება. ეს ფაქტი განპირობებულია მოძრაობის პერპენდიკულარული მიმართულებით დამატებითი აჩქარების გაჩენით, ცენტრისკენ მიმართული ძალის ზემოქმედებით. ეს ძალა კი მილის მოღუნვის მიდამოში, კედლის მხრიდან სითხეზე მოქმედი ძალაა, უფრო ზუსტად, ძალის ცენტრისკენული მდგენელი. შედეგად იცვლება მილში სითხის მოძრაობის სიჩქარეთა განაწილების მრუდის ფორმა (სურათი 100), შესაბამისად, ლამინარული დინება გარდაიქმნება ტურბულენტურ დინებად.



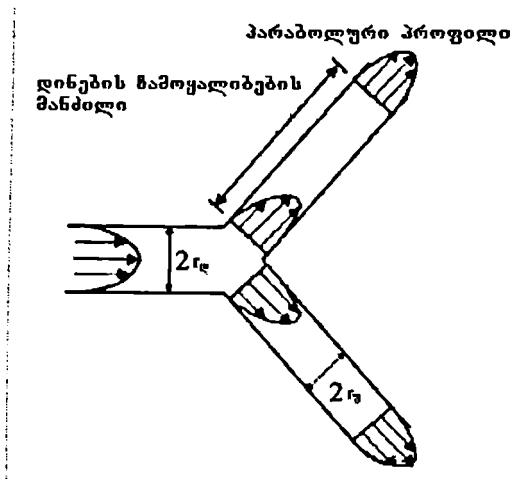
სურათი 100

სისხლის ნაკადი მოხრილ სისხლძარღვებში

(Nico A.M. Schellart. "Compendium of Medical Physics, Medical Technology and Biophysics", Amsterdam, 2009)

როგორც ვიცით, აორტა მომრგვალებული ფორმისაა, რაც მასში სისხლის ნაკადის ტურბულენტური ხასიათის ერთ-ერთ მიზეზს წარმოადგენს.

სისხლძარღვების განშტოების შემთხვევაში მისი რეზისტენტობა იზრდება, რაც განაპირობებს ნაკადის სიჩქარეთა სიმეტრიული პარაბოლური განაწილების პროფილის ასიმეტრიულ პროფილად გარდაქმნას და, შესაბამისად, სისხლის ნაკადის დინების ხასიათის ცვლილებას (ლამინარულიდან ტურბულენტურად) (სურათი 101).



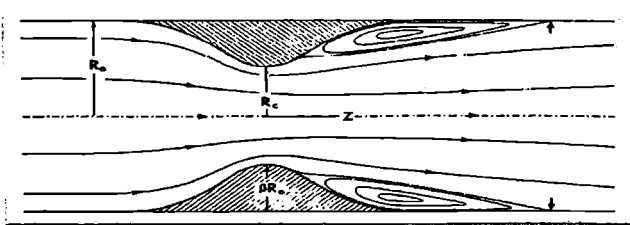
სურათი 101

სისხლის ლამინარული ნაკადის ტურბულენტურად გადაქცევა განშტოებულ სისხლძარღვებში

(Nico A.M. Schellart. "Compendium of Medical Physics, Medical Technology and Biophysics", Amsterdam, 2009)

სისხლძარღვის სანათურის შევიწროება (მაგალითად, სტენოზი) აგრეთვე ცვლის სისხლის დინების ხასიათს (სურათი 102).

მაშასადამე, როგორც ეხედავთ, სისხლძარღვების განშტოება, მოხრა, ან შევიწროება (სურათი 100, 101, 102) ცვლის სისხლის მიმოქცევის ხასიათს.

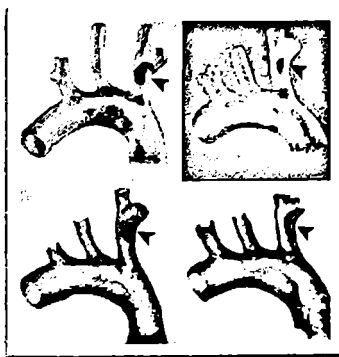


სურათი 102

სისხლის ნაკადი შევიწროებულ სისხლძარღვებში

(N. A.M. Schellart. "Compendium of Medical Physics, Medical Technology and Biophysics", Amsterdam, 2009)

განშტოების, მოხრილ, ან შევიწროების ადგილას იცვლება სისხლის ნაკადის სიჩქარის განაწილების მრუდი. შესაბამისად, ბერნულის წესის თანახმად, სისხლის ნაკადის მინიმალური სიჩქარის უბანში იზრდება სისხლის ზეწოლა (სტატიკური წნევა) სისხლძარღვის კედელზე, რაც სისხლის ფორმიანი უჯრედების კედელთან ადჰეზიას, ურთიერთქმედებას და საბოლოოდ კედლის დაზიანებას უწყობს ხელს. ზუსტად ამიტომ არტერიებისა და არტერიოლების მომრგვალებულ, განშტოებულ უბნებში მაღალია სისხლძარღვების კედლების დაზიანების, ათეროსკლეროზული ფოლაკების ფორმირების რისკი (სურათი 103).



სურათი 103

ათეროსკლეროზული ფოლაკები განშტოებულ და მოხრილ არტერიებში (ნაჩვენებია ისრებით)

აღსანიშნავია, რომ აორტასა და არტერიების კედლებზე ათეროსკლეროზული ფოლაკების გაჩენის ალბათობა გაცილებით მაღალია (სისხლის შედარებით მაღალი წნევის გამო), ვიდრე ვენებსა და ენულებში (სურათი 103, ცხრილი 17). ცხრილში მოყვანილი მონაცემები მოწმობს, რომ იმ სისხლძარღვებში, სადაც სისხლის წნევა გაცილებით მაღალია ($P_{\text{სტენოზური სისხლძარღვები}} > P_{\text{დიდი არტერიები}} > P_{\text{არტერიოლები}} > P_{\text{ვენები}}$) და სისხლის ფორმიანი უჯრედების კედელთან შეჯახების ალბათობა უფრო დიდია.

ცხრილი 17

სისხლძარღვების კედლების რეზისტენტობის ტიპური მანქანებლები

სისხლძარღვი	შეჯახებების სიხშირე (1/წმ)	სისხლძარღვი	შეჯახებების სიხშირე (1/წმ)
ვენები	20 – 200	არტერიოლები	500 – 1 600
დიდი არტერიები	300 – 800	სტენოზური სისხლძარღვი	800 – 10 000

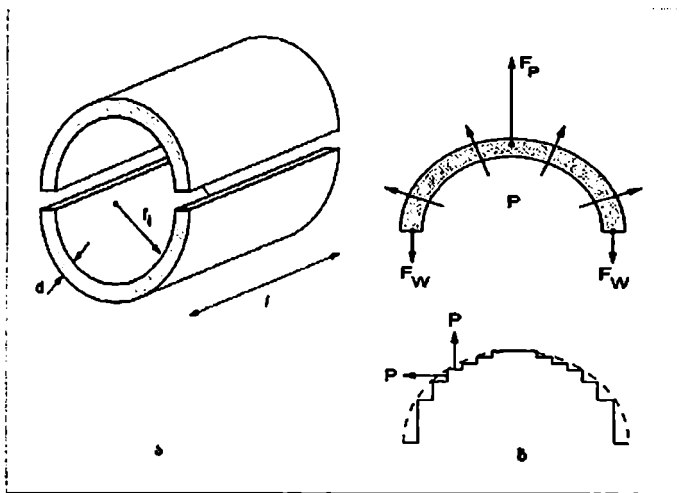
IV სისხლძარღვთა კედლების ელასტიკურობა და მექანიკური ძაბვა.

სისხლძარღვის კედლებში აღძრულია დრეკადობის ძალა, რომელიც გაწონასწორებულია სისხლის წნევით.თუ განვიხილავთ I სიგრძის და კედლის d სისქის ცილინდრული ფორმის სისხლძარღვის მონაკვეთს შიგა რადიუსით r_1 (სურათი 104), ნათელია, რომ სისხლძარღვის რადიუსის მუდმივობის პირობებში

სისხლძარღვის კედელზე მოქმედი სისხლის წნევის ძალა მისი რადიუსის პირდაპირპროპორციულია:

$$F_P = 2P r_l l \quad (F_P = P S; \quad S = 2 r_l \times l),$$

აქ S სისხლძარღვის (ცილინდრის) კედლის ზედაპირის ფართობის პროექციაა დიამეტრის სიბრტყეში, F_P - ამ სიბრტყის მართობია).



სურათი 104

სისხლძარღვი და მის კედლებზე (ა) და კედლებში (ბ) მოქმედი ძალები (r_l - სისხლძარღვის რადიუსი, d - სისხლძარღვის კედლის სისქე; F_P - სისხლის წნევის ძალა სისხლძარღვის კედელზე (ანუ რადიალურად მოქმედი წნევის ძალათა ჯამი), F_W - სისხლძარღვის კედლის დაჭიმულობის ძალა)

(Nico A.M. Schellart. "Compendium of Medical Physics, Medical Technology and Biophysics", Amsterdam, y 2009)

ფიზიოლოგიურ პირობებში სისხლძარღვის კედელზე შიგნიდან მოქმედი წნევის ძალა გაწონასწორებულია საპირისპიროდ მიმართული სისხლძარღვის კედლის დაჭიმულობის ძალით ($F_W = 2 \sigma l d$), რადგან l სიგრის ცილინდრის გრძივი კვეთის ფართობია $2ld$ (სურათი 104ბ), ანუ:

$$F_W = F_P$$

$$2 \sigma l d = 2 P r_l l, \quad (\text{III.1.3.2.6}) \text{ ან:}$$

$$\sigma = \frac{Pr_1}{d} \quad (\text{III.1.3.2.7})$$

სადაც σ - სისხლძარღვის კედლის მექანიკური ძაბვაა. ფორმულიდან ნათელია, რომ როცა $r_1 \rightarrow 0$ (კაპილარებში), σ მცირდება. ცხადია, ამიტომ კაპილარებს არ სჭირდებათ სქელი კედლები. მართლაც, დიდი რადიუსის მქონე არტერიების კედლები (სადაც წნევა უფრო მაღალია!) უფრო სქელია. ანუ, ფიზიოლოგიურად სისხლძარღვების კედლების სისქე მცირდება რადიუსის შემცირებასთან ერთად, შენარჩუნებულია ოპტიმალური თანაფარდობა რადიუსსა და კედლის სისქეს შორის.

სურათზე 105 და ცხრილში 18 მოყვანილია სხვადასხვა სისხლძარღვის გეომეტრიული, ფიზიკური და მორფოლოგიური მახასიათებლები.

	დიამეტრი	კედლის სისქე	ენდოთელიუმი ელასტ. ბოჭკო ზღუცი კუნთი ფიბრ. ქსოვილი	
არტერია	4.0 მმ	1.0 მმ		
არტერიოლა	30.0 მკმ	6.0 მკმ		
კაპილარი	8.0 მკმ	0.5 მკმ		
ვენოლა	20.0 მკმ	1.0 მკმ		
ვენა	5.0 მმ	0.5 მმ		

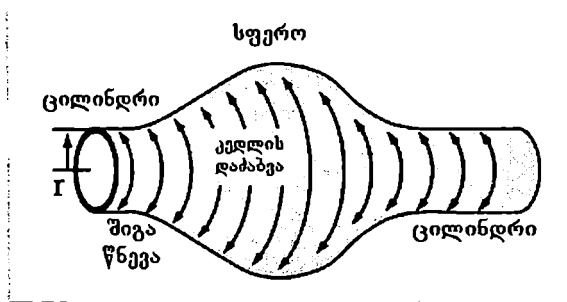
სურათი 105
სისხლძარღვების გეომეტრიული, ფიზიკური და მორფოლოგიური
მახასიათებლები

ცხრილი 18

სისხლძარღვების გეომეტრიული და ფიზიკური მახასიათებლები
(r - რადიუსი, l - სიგრძე, P_t - წნევა, T_h - დრეკადი ძალით გამოწვეული წნევა)

სისხლძარღვი	r (მმ)	r/l	P_t (კპა)	T_h (კპა)
აორტა	12	8	13,3	106
არტერია	0.5 - 3	3 - 7	11	33 - 77
არტერიოლები	0.01 - 0,1	1 - 5	7	7 - 35
კაპილარები	0,003	5 - 8	3,3	17 - 26
მცირე ვენები	0.01 - 0.25	7 - 10	1,6	11 - 16
ვენები	0.75 - 7.5	7 - 10	1,3	9 - 13
ღრუ ვენა	17	10 - 15	1	10 - 15

ანევრიზმის (სისხლძარღვის კედლის პათოლოგიური გაფართოების) დროს სისხლძარღვის რადიუსი იზრდება, კედლის სისქე (d) კი მცირდება. შესაბამისად, იზრდება სისხლძარღვის კედელზე მოქმედი წნევის ძალა $F_p = 2r/lP$ და შეიძლება გადაატაროს ამ დროს კედელში აღძრულ საპირისპიროდ მიმართულ დაჭიმულობის ძალას $F_w = 2\sigma l d$ ($F_p > F_w$), რამაც შესაძლოა კედლის სტრუქტურის რღვევა გამოიწვიოს (სურათი 106).



სურათი 106

ანევრიზმის (სისხლძარღვის მონაკვეთის პათოლოგიური გაფართოების) უბანი

განვიხილოთ სისხლძარღვების ელასტიკურობა აორტის მაგალითზე.

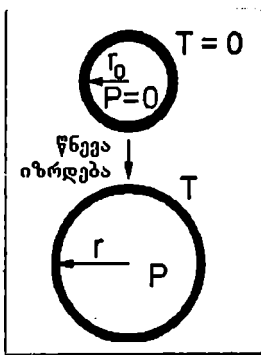
გულის კუნთების შეკუმშვისას სისხლი მარცხენა პარკუჭიდან ჩაიტუმბება აორტაში, რის შედეგადაც მის შიგნით წნევა P_a და სისხლის მოცულობა V იზრდება. დამოკიდებულება P_a და V პარამეტრებს შორის განისაზღვრება პულის და ლაპლასის კანონებით სისხლძარღვის კედლის და, კერძოდ, აორტის დრეკად-ელასტიკური თვისებების გამო.

სისხლის ჩატუმბვის შემდეგ სისხლის სტატიკური წნევა იზრდება P -მდე, რის გამოც აორტის შიგა რადიუსი r_0 გაიზრდება r -მდე. განვიხილოთ აორტის კედელი ცილინდრის სახით,

რომლის კედლის განივკვეთის ფართობი ტოლი იქნება: სისხლის ჩატუმბვამდე $S_0 = 2\pi r_0 d_0$, ხოლო ჩატუმბვის შემდეგ $S = 2\pi r d$ (სადაც d_0 და d აორტის კედლის სისქეა, სისხლის ჩატუმბვამდე და ჩატუმბვის შემდეგ (სურათი 107)). თუ ჩათვლით, რომ აორტის რადიუსის გაზრდისას მისი კედლის სისქე d უმნიშვნელოდ იცვლება ($d_0 = d$), მისი კედლის განივკვეთის ფართობი სისხლის ჩატუმბვამდე $S_0 = 2\pi r_0 d$, ხოლო სისხლის ჩატუმბვის შემდეგ $S = 2\pi r d$ -ს ტოლია. რადგან აორტის სიგრძე სხვადასხვა ინდივიდებში განსხვავებულია, სიმარტივისათვის განვიხილოთ აორტის რაიმე l სიგრძის მონაკვეთზე მოქმედი ძალათა ბალანსი (იხილე სურათი 59, გვერდი 100).

სისხლის ნაკადის ზეწოლის შედეგად აორტის კედლის ფარდობითი დეფორმაცია $\varepsilon = \frac{s-s_0}{s_0} = \frac{r-r_0}{r_0}$ პუკის კანონის თანახმად, გამოითვლება ფორმულით $\varepsilon = \frac{1}{E} \frac{F}{S} = \frac{\sigma}{E}$, სადაც $\sigma = \frac{F}{S} = \frac{F}{ld}$ - მექანიკური ძაბვა (დეფორმირებული აორტის კედლის კვეთის ფართობის ერთეულზე მოქმედი მექანიკური ძალა), ხოლო E - იუნგის მოდულია. მაშინ მივიღებთ:

$$\sigma = E\varepsilon = E \frac{r-r_0}{r_0} = \frac{F}{ld} \quad (\text{III.1.3.2.8})$$



სურათი 107

სისხლძარღვის კედელში აღძრული დრეკადობის ძალის (T)

ცვლილება სისხლის წნევის გაზრდის პირობებში

(N. A.M. Schellart. "Compendium of Medical Physics, Medical Technology and Biophysics", Amsterdam, 2009)

აორტის კედლის დეფორმაციის შედეგად მასში აღიძრება საპირისპიროდ მიმართული რეაქციის (ზედაპირის დაჭიმულობის) ძალა T , რომელიც აორტის კედელზე მოქმედი წნევის პირდაპირპროპორციულია $T = P \Delta S$ და ცილინდრული ფორმის მილისთვის ლაპლასის ფორმულის $P_r = \frac{\sigma'}{r}$ გათვალისწინებით ტოლია (სურათი 59, გვერდი 97):

$$T = \frac{\sigma'}{r} S,$$

სადაც σ' - აორტის კედლის კვეთის სიგრძის ერთეულზე მოქმედი ძალაა, ანალოგიური სიდიდე ზედაპირული დაჭიმულობის კოეფიციენტის - $\sigma' = \frac{F}{l}$, რაც აორტის კედელზე მოქმედი ზეწოლის და რეაქციის ძალების ტოლობიდან $F = T$ გამომდინარეობს:

$$\sigma' = \sigma d.$$

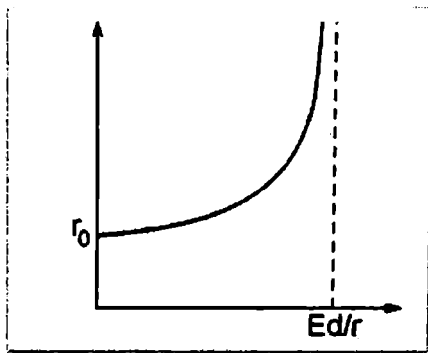
(III.1.3.2.8) გამოსახულების გათვალისწინებით შეგვიძლია დავწეროთ:

$$P_a r = Ed \frac{r-r_0}{r_0}$$

r -ის r_0 -ზე დამოკიდებულების გამოთვლის მიზნით ამ გამოსახულების გარდაქმნა გვაძლევს:

$$r = r_0 \left(1 - \frac{P_a r_0}{Ed} \right)^{-1} \quad (\text{III.1.3.2.9})$$

ეს დამოკიდებულება ილუსტრირებულია 108-ე სურათზე.



სურათი 108

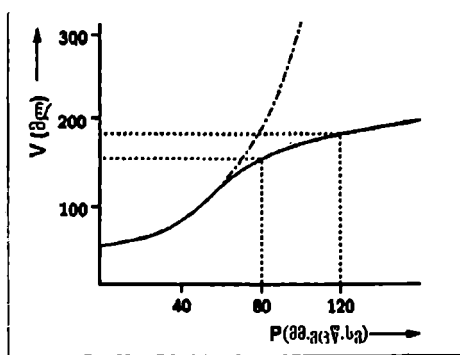
დამოკიდებულება აორტის რადიუსის ცვლილებებსა და სისხლის წნევას შორის
(Nico A.M. Schellart. "Compendium of Medical Physics, Medical Technology and Biophysics", Amsterdam, 2009)

რიგი მათემატიკური გამოთვლების შედეგად მივიღეთ, რომ აორტაში სისხლის ჩატუმბვის დროს კედლებზე წნევის ზემოქმედებით იზრდება მისი მოცულობაც V . თუ გაეითვალისწინებთ, რომ ცილინდრის მოცულობა $V = \pi r^2 l$ (სადაც r - ცილინდრის რადიუსია, l - მისი სიგრძე), ნათელია, რომ აორტის მოცულობა დამოკიდებულია სისხლის წნევის მნიშვნელობაზე (P_a) და კედლების ელასტიკურობაზე (E), ანუ, სისხლის ჩატუმბვის შემდეგ აორტის მოცულობა უდრის:

$$V = V_0 \left(1 - \frac{P_a r_0}{Ed} \right)^{-2} \quad (\text{III.1.3.2.10})$$

108-ე სურათზე მოცემული გრაფიკი ასახავს დამოკიდებულებას აორტის მოცულობასა (V) და სისხლის წნევას (P) შორის (განტოლება III.1.3.2.11).

სურათიდან 109 ჩანს, რომ წრფივი დამოკიდებულება P და V -ს შორის ელინდება მხოლოდ აორტაში სისხლის წნევის P_a შედარებით დაბალი მაჩვენებლებისთვის. წნევის მაღალი მაჩვენებლებისთვის (70 მმ ვწ. სე-ზე მაღლა) P და V -ს შორის დამოკიდებულება იცვლება, აორტის მოცულობა V იზრდება უფრო ნელა. ეს ნიშნავს, რომ წნევის P_a მაღალ მაჩვენებლებზე აორტის ელასტიკურობა მცირდება.



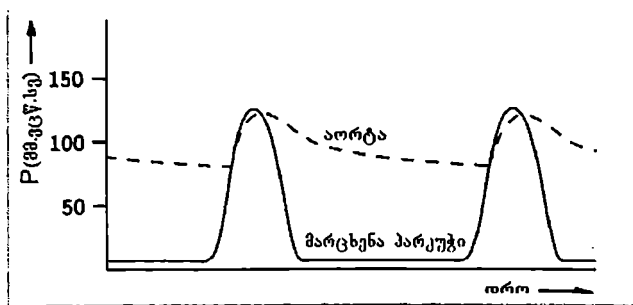
სურათი 109

აორტის მოცულობის დამოკიდებულება სისხლის წნევაზე
(Nico A.M. Schellart. "Compendium of Medical Physics, Medical Technology and Biophysics", Amsterdam, 2009)

აორტის ელასტიკურობის დახასიათებისთვის იყენებენ მისი დინამიკური ($C_{დინ}$) და სტატიკური ($C_{სტატ}$) ჰიმეადობის მახასიათებლებს (C - მოცულობის ცვლილება წნევის ერთი ერთეულით ცვლილებისას). სურათზე 110 $C_{დინ}$ აიხსება უწყვეტი, ხოლო $C_{სტატ}$ - წყვეტილი ხაზით. როდესაც V/P_a დამოკიდებულება წარმოდგენილია წრფის სახით, ამ წრფის დახრილობა აორტის სტატიკურ ჰიმეადობას განსაზღვრავს (სურათი 109). სტატიკური ჰიმეადობა აორტის სისხლით შევსების პულსური ხასიათის მიუხედავად (განპირობებული გულის კუმშვითი აქტივობით) აორტაში რეგულარული სისხლის ნაკადის შენარჩუნებას უზრუნველყოფს. დინამიკური ჰიმეადობა სისხლის წნევის პერიოდული ცვალებადობითაა განპირობებული; აორტის სარქველების დახურვის შემდეგ დინამიკური ჰიმეადობა სისხლის წნევის P_a შემცირებას განაპირობებს. ამ პარამეტრების პერიოდული ცვალებადობის ხასიათი დამოკიდებულია აორტის ელასტიკურობაზე.

110-ე სურათზე ნაჩვენებია აორტის ჰიმეადობის ფიზიოლოგიური როლი. უწყვეტი ხაზით წარმოდგენილია სისხლის წნევის ცვლილებები მარცხენა პარკუჭში, წყვეტილი ხაზით - სისხლის წნევის ცვლილებები აორტაში.

აორტაში წნევის P_a პულსაციის ამპლიტუდა უფრო მცირეა, ვიდრე მარცხენა პარკუჭში (აორტის შედარებით მაღალი ჰიმეადობის გამო). აორტის მაღალი სიხისტის (მაღალი ჰიმეადობის) შემთხვევაში სისხლის ნაკადის წნევის პულსაციის ამპლიტუდა გაიზრდება, რაც გამოიწვევს მექანიკური დატვირთვის ზრდას მთელ სისხლძარღვთა სისტემაში. ასაკის მატებასთან ერთად იზრდება აორტის სიხისტე, მცირდება მისი ჰიმეადობა და თავისუფალი მოცულობა V_0 , რაც საგრძნობლად ზღუდავს დინამიკური ელასტიკურობის სიდიდეს $C_{დინ}$, თუმცა არ იწვევს სტატიკური ელასტიკურობის მაჩვენებლის $C_{სტატ}$ მნიშვნელოვან ცვლილებას. მაგალითად, თუ 50 წლის ასაკში აორტის $C_{დინ} = 0,6 \frac{მლ}{მმ.ვ.სკ}$, 80 წლის ასაკში ეს მაჩვენებელი 3 ჯერ მცირდება - $C_{დინ} = 0,2 \frac{მლ}{მმ.ვ.სკ}$.



სურათი 110

აორტის ელასტიკურობის ზემოქმედება სისხლის წნევაზე
(უწყვეტი ხაზი – წნევა მარცხენა პარკუჭში; წყვეტილი ხაზი – წნევა
აორტაში)

(N. A.M. Schellart. "Compendium of Medical Physics, Medical Technology and Biophysics", Amsterdam, 2009)

III.133 სისხლის წნევა

სისხლის წნევა – ეს არის წნევა, რომლითაც სისხლი ზემოქმედებას ახდენს სისხლძარღვების კედლებზე (პერპენდიკულარული მიმართულებით).

ტერმინის "სისხლის წნევის" ქვეშ იგულისხმება სისტემური არტერიული წნევა დიდ არტერიებში, რომლებიც ამარაგებენ სისხლით სხვადასხვა ორგანოსა და ქსოვილებს (ფილტვების გარდა). წნევა სხვა სისხლძარღვებში არტერიულ წნევაზე უფრო დაბალია. სისხლის წნევა იზომება ძირითადად, მმ Hg და პასკალებში (SI-ერთეული). როგორც ცნობილია, სითხის წნევა

$$P = \rho gh$$

წნევა ვერცხლისწყლის სვეტის ერთეულებში (მმ Hg) გამოვსახოთ პასკალებში:

$$1 \text{ mm Hg} = 13600 \frac{\text{კგ}}{\text{მ}^3} \times 9,8 \frac{\text{მ}}{\text{წმ}^2} \times 1 \times 10^{-3} \text{ მ} = 133,3 \frac{\text{კგ}}{\text{წმ}^2} = 133,3 \frac{\text{ნ}}{\text{მ}^2} = 133,3 \text{ პა}$$

სისხლის წნევაზე მოქმედი ფაქტორები.

სისხლის მიმოქცევის სისტემა მრავალ ფიზიკური და ფიზიოლოგიური ფაქტორების ზემოქმედებას განიცდის, რაც სხვადასხვა ფიზიკური პარამეტრების ცვლილებებით აისახება. გულის ფუნქციური მდგომარეობის ამსახველ ძირითად პემოდინამიკურ პარამეტრებს მიეკუთვნება:

გულის კუმშვითი სიმძლავრე – რაც უფრო მაღალია გულის კუმშვითი სიმძლავრე, მით უფრო მაღალია სისხლის წნევა.

სისხლის მოცულობა (ე.წ. **წუმოცულობა** - ერთ წუთში გულის მიერ გადმოტუმბული სისხლის მოცულობა) - მის ზრდასთან ერთად იზრდება გულის განდევნის ფრაქცია და სისხლის წნევა.

რეზისტენტობა. რაც უფრო მაღალია სისხლძარღვთა სისტემის რეზისტენტობა, მით უფრო მაღალია სისხლის წნევა ($P = JR$) ნაკადის მუდმივობის პირობებში. რეზისტენტობა დაკავშირებულია სისხლძარღვების ზომასთან (რაც უფრო მსხვილია სისხლძარღვი, მით უფრო დაბალია რეზისტენტობა). სოლო ფოლაქების გაჩენის ადგილას სისხლძარღვი ვიწროვდება, რაც ნაკადს ტურბულენტურ ხასიათს ანიჭებს და იწვევს რეზისტენტობის გაზრდას. დინება ხდება ტურბულენტური სხვადასხვა ეაზოაქტიური ნაერთის ზემოქმედების შედეგად, რაც, აგრეთვე, რეზისტენტობის ცვლილებას იწვევს.

სისხლის სიბლანტე - სიბლანტის ზრდა იწვევს რეზისტენტობის და, მაშასადამე, სისხლის წნევის მომატებას.

სისხლძარღვთა ქსელში სისხლის წნევისათვის დამახასიათებელია შემდეგი თაეისებურებანი:

- ეინაიდან გული მუდმივად ტუმბავს სისხლს აორტაში, სისხლის წნევის მნიშვნელობა მაღალია, საშუალოდ 100 მმ Hg-ის ტოლია;

- ეინაიდან გული ასრულებს პულსურ მუშაობას, არტერიული წნევა იცვლება სისტოლურ (120 მმ Hg) და დიასტოლურ (80 მმ Hg) წნეგებს შორის;

- სისტემური ცირკულაციური ნაკადის სისხლის წნევა მუდმივად, პროგრესიულად მცირდება და გულის მარჯვენა წინაგულში შეღწევისას ნულის ტოლია.

სისხლის წნევა მერყეობს:

- გულის ერთი შეკუმშიდან მეორემდე,
- დღის განმავლობაში (ცირკადული რიტმი),
- სტრესული მდგომარეობისას, კვებითი ფაქტორების, წამლების ზემოქმედების საპასუხოდ და სხვადასხვა დაავადების დროს.

წვეულებრივ, **სისტოლური** და **დიასტოლური** წნევა ბრაქიულ არტერიაში უდრის 120 მმ Hg (16 კპა) და 80 მმ Hg (10 კპა), შესაბამისად. ამის გარდა, დიდი მნიშვნელობა ენიჭება **საშუალო არტერიულ წნევას (MAP)** და **პულსურ წნევას**.

საშუალო არტერიული წნევა (MAP).

საშუალო არტერიული წნევა (MAP) განისაზღვრება როგორც არტერიული წნევის საშუალო მნიშვნელობა ერთი კარდიული ციკლის განმავლობაში. **MAP** წნევის ის მნიშვნელობაა, რომელმაც უნდა უზრუნველყოს ორგანოთა ადეკვატური პერფუზია სისხლით. იგი გამოითვლება ფორმულით:

$$MAP = P_{\text{დიატ}} + (P_{\text{სის}} - P_{\text{დიატ}}) : 3 \quad (\text{III.1.3.1})$$

ცენტრალური ვენური წნევა (CVP).

ცენტრალური ვენური წნევა - სისხლის წნევაა წინაგულთან მიმდებარე ვენაში ცენტრალური ვენური წნევის გაზომვა მხოლოდ ინვაზიური მეთოდითაა შესაძლებელი ცენტრალური ვენის კათეტერიზაციის საშუალებით.

პულსური წნევა.

პულსური წნევა განისაზღვრება სისტოლური და დიასტოლური წნეგების სხვაობით:

$$\text{პულსური წნევა} = P_{\text{სის}} - P_{\text{დიატ}} \quad (\text{III.1.3.2})$$

პულსური წნევის გათვალისწინებით **MAP** შეიძლება გამოითვალოს ასე:

$$MAP = P_{\text{დასტ}} + \frac{1}{3} \text{ პულსური წნევა } \quad (\text{III.1.3.3})$$

ჯანმრთელი ადამიანის პულსური წნევა დამჯდარ, მოსვენებულ მდგომარეობაში ≈ 40 მმ Hg. პულსური წნევა იზრდება 100 მმ Hg მნიშვნელობამდე ფიზიკური ვარჯიშის დროს, კუმშვითი მოცულობის მომატების შედეგად (დიასტოლური წნევის მუდმივობის პირობებში) ფიზიკურად განვითარებულ (ნაეარჯიშებ) პირებში). არტერიული წნევის დაქვეითების მოგვიანებითი ეფექტი ვლინდება კუმშვითი მოცულობისა და კარდიული განდენის ზრდით. ვარჯიშის შემდგომ პერიოდში არტერიოლების კუნთოვანი შრის საერთო პერიფერიული რეზისტენტობა მცირდება, რაც იწვევს დიასტოლური წნევის დაქვეითებას. თუ მოსვენების მდგომარეობაში პულსური წნევა მნიშვნელოვნად აღემატება 40 მმ Hg (60-80 მმ Hg), ეს განპირობებული უნდა იყოს ძირითადი არტერიების სისხლტით, სისხლის ნაკადის წუთმოცულობის გაზრდით, პიკეთორიოდიზმით და სხვა მიზეზებით.

მოსვენების მდგომარეობაში პულსური წნევის დაბალი მნიშვნელობა (< 25 მმ Hg, მაგალითად, შოკის დროს) განპირობებულია გულის განდენის დაბალი მოცულობით.

წნევის გაზომვა

წნევის გაზომვის ინვაზიური და არაინვაზიური მეთოდები

ინვაზიური მეთოდი.

წნევის გაზომვის პირდაპირი მეთოდი - ინვაზიური მეთოდია. წნევის პირდაპირი გაზომვის დროს კათეტერი შეჰყავთ არტერიაში ან ვენაში: პირდაპირი მეთოდით გაზომილი წნევა სისხლის სტატიკურ, სისხლძარღვთა

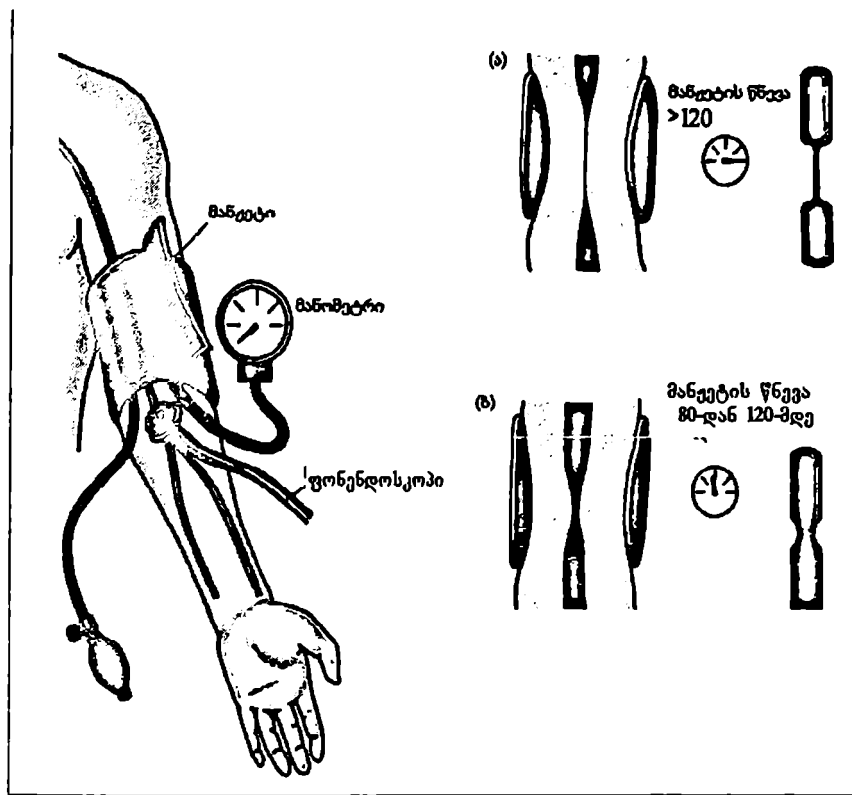
კედლებზე მოქმედ P წნევაზე მაღალია დინამიკური წნევის ($\frac{\rho v^2}{2}$) მნიშვნელობით (ბერნულის განტოლება). წნევის გაზომვის პირდაპირი მეთოდი გამოიყენება ექსპერიმენტულ ცხოველებში ცდების დროს და ადამიანებში მხოლოდ ქირურგიული ჩარევის დროს.

არაინვაზიური მეთოდი.

წნევის გაზომვის არაინვაზიური მეთოდი მარტივია, სწრაფია, არ ხასიათდება გართულებებით, ტკივილით და არასასიამოვნო შეგრძნებებით, ხოლო გაზომვის შედეგი მნიშვნელოვნად არ განსხვავდება რეალური მაჩვენებლისაგან. არაინვაზიური მეთოდით იზომება სისტოლური და დიასტოლური წნევა.

კლასიკური აუსკულტაციური მეთოდის შემთხვევაში იყენებენ ფონენდოსკოპს (ეგრეთწოდებული კოროტკოვის ბეგრების მოსასმენად), და სფიგმომანომეტრს (სურათი III ა).

როგორც სურათიდან ჩანს, მანქეტში, რომელიც მხარზე (მხრის არტერიაზე) გულის დონეზეა მოთავსებული, მაღალი წნევით პაერის ჩატუმბვისას (> 120 მმ Hg) არტერიული სისხლის ნაკადი წყდება და დისტალურ განშტოებულ არტერიაზე მოთავსებული ფონენდოსკოპით სისხლის ნაკადის პულსირების ბეგრები არ ისინჯება (სურათი III ა); როდესაც მანქეტში წნევა ქვეითდება (სისტემიდან პაერის გამოშვებით), ფონენდოსკოპით ისმინება სისხლის ტურბულენტური პულსირებული ნაკადის მიერ წარმოქმნილი კოროტკოვის ბეგრები (სურათი III ბ).



სურათი 111

წნევის გაზომვის არაინვაზიური მეთოდი. მხრის არტერიის სანათურის ცვლილება მანკეტში წნევის სხვადასხვა მნიშვნელობისას
(Nico A.M. Schellart. "Compendium of Medical Physics, Medical Technology and Biophysics", Amsterdam, 2009)

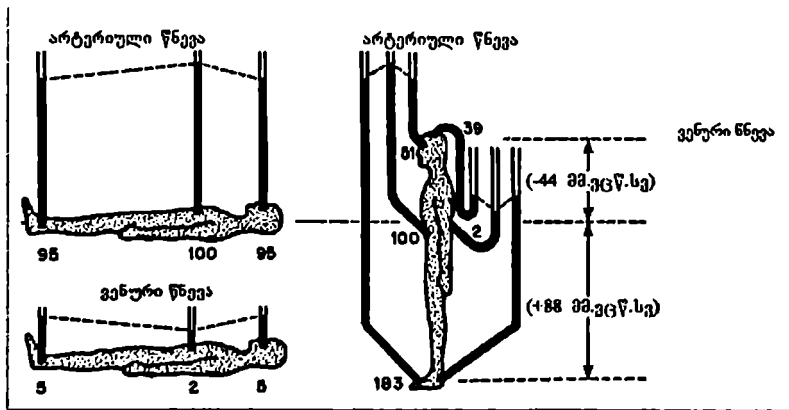
წნევის ის მნიშვნელობა, რომელიც კოროტკოვის ბგერების დაწყების მომენტს შეესაბამება, სისტოლური წნევის ტოლია. მანკეტში წნევის შემდგომი დაქვეითებისას სისხლის ნაკადი ლამინარული ხდება (სურათი 111 გ), კოროტკოვის ბგერები შეწყდება. ამ მომენტის შესაბამისი წნევა დიასტოლურია. იგივე მეთოდი გამოყენებული თანამედროვე ელექტრომანო-მეტრებში მხოლოდ იმ განსხვავებით, რომ იქ მექანიკური სიდიდეების (წნევა, ბგერა) გარდაქმნა ხდება ელექტრულ სიდიდეებად.

თანამედროვე წნევის საზომ აპარატებში ფონენდოსკოპი შეცვლილია პიეზოელექტრული გადამწოდით (მიკროფონით) და ავტომატურად ხდება სისტოლური, დიასტოლური წნევისა და პულსის (გულის ცემის სიხშირის) ფიქსაცია ხელსაწყოთა ეკრანზე.

მსხვილი არტერიები ხასიათდება დაბალი რეზისტენტობით (დიდი რადიუსის გამო) და სისხლის ნაკადის მაღალი ინტენსივობით. შესაბამისად, მსხვილ არტერიებში სისხლის მიმოქცევის დროს წნევის ვარდნა უმნიშვნელოა. სისხლძარღვებში სისხლის წნევის ცვალებადობა ექვემდებარება მაკრ კანონზომიერებას. გულის კუნთის შეკუმშვის დროს სისხლის წნევა აღწევს მაქსიმალურ მნიშვნელობას მარცხენა პარკუჭში. წნევის მნიშვნელობა მცირდება გულიდან დაშორებასთან ერთად. პულსური წნევა ერცელდება მხოლოდ აორტაში და არტერიულ სისტემაში. სისხლის მიმოქცევის მცირე წრე (ფილტვების წრე) გამოყოფილია სისტემური სისხლის მიმოქცევიდან. ვინაიდან არტერიების რეზისტენტობა მინიმალურია, შესაძლებელია მისი უგულვებელყოფა, ამ შემთხვევაში პიდროსტატიკური წნევის მაჩვენებლის ცვალებადობა განპირობებულია მხოლოდ მანძილის ფაქტორით. არტერიოლების სიმოქლის გამო შესაძლებელია მათში ამ ფაქტორზე დამოკიდებული პიდროსტატიკური წნევის ცვალებადობის იგნორირება; არტერიოლებში სისხლის ნაკადის წნევის ცვალებადობის მექანიზმი ექვემდებარება პუაზეილის კანონს. მარჯვენა წინაგულში სისტოლის დროს სისხლის წნევა დაახლოებით 10 კპა-ის, ხოლო მარცხენა პარკუჭში - 16 კპა-ის ტოლია. სისხლძარღვების სხვა უბნებში სისხლის წნევის გამოთვლა გარკვეული სიზუსტით შესაძლებელია ბერნულის და პუაზეილის კანონების გამოყენებით.

გრაფიტაციული ეფექტი.

გრაფიტაციული ეფექტი ვლინდება სისხლძარღვთა სისტემაშიც სისხლზე გრაფიტაციული ძალის მოქმედების გამო. მარჯვენა წინაგულიდან ყოველი თითო სანტიმეტრით დაბლა პერიფერიული არტერიული წნევა იზრდება 0,74 მმ Hg-ით. ამიტომ პრაქტიკაში წნევა, როგორც წესი, იზომება მელაზე (მხარზე) გულის დონეზე. როდესაც ეს შეუძლებელია, გრაფიტაციული ეფექტის პრევენციის მიზნით პაციენტს უზომავენ წნევას სუპინურ (გულაღმა მწოლიარე) მდგომარეობაში ასეთ პოზაში სისხლის წნევის მაჩვენებელი გულის დონეზე და ფეხის წვივის დონეზე განსხვავდება მხოლოდ 5 მმ Hg (სურათი 112). ეს განსხვავება, ცხადია, არაა გამოწვეული გრაფიტაციული ეფექტით. იგი სისხლძარღვთა რეზისტენტობის შედეგია.

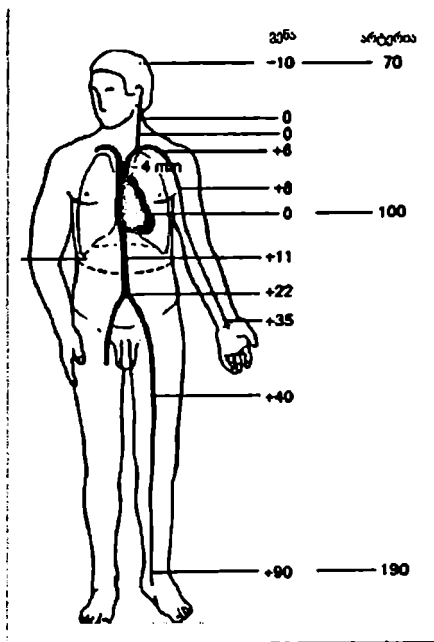


სურათი 112

პოზაზე დამოკიდებული პიდროსტატიკური წნევის ცვლილებები
(Nico A.M. Schellart. "Compendium of Medical Physics, Medical Technology and Biophysics, Amsterdam, 2009)

ფეხზე მდგომი ადამიანის ქვედა კიდურების ვენებში პიდროსტატიკური წნევა უფრო მაღალია გრავიტაციული ეფექტის გამო, რაც განაპირობებს ქვედა კიდურების კაპილარებში სისხლის წნევის მომატებას, სითხის კაპილარებიდან ინტერსტიციულ სივრცეში ფილტრაციის ინტენსიფიკაციას, ქვედა კიდურებში შეშუპების განვითარებას და ცირკულაციაში მყოფი სისხლის მოცულობის შემცირებას.

სურათზე 113 მოყვანილია ვერტიკალურ პოზაში მდგომი ადამიანის სხედასხვა სისხლძარღვში წნევის ცვალებადობა.



სურათი 113

ვერტიკალურ პოზაში მდგომი ადამიანის სისხლის წნევის ცვალებადობა განაპირობებულია გრავიტაციული ეფექტით

(Nico A.M. Schellart. "Compendium of Medical Physics, Medical Technology and Biophysics", Amsterdam, 2009)

პაციენტის პორიზონტალურად მწოლიარე მდგომარეობაში გრავიტაციული ეფექტი განაპირობებს სისხლის თანაბარ გადანაწილებას სისხლის მიმოქცევის ყველა კომპარტამენტში.

პაციენტის მჯდომარე, ან მწოლიარე მდგომარეობიდან ფეხზე წამოდგომისას გრავიტაცია ზღუდავს სისხლის ნაკადის ვენებიდან გულში დაბრუნებას, რაც, თავის მხრივ, განაპირობებს გულის კუმშვითი მოცულობის და კარდიული განდევნის შემცირებას, რაც წნევის ხანმოკლე დროით შემცირებას იწვევს. თავის ტვინში სისხლის ნაკადის აღდგენისათვის საჭიროა რამდენიმე წამი. ეს კი კლინდება თავებრუნებაში. ეს ფენომენი ცნობილია ორთოსტატიკური კიპოტენზიის სახელწოდებით.

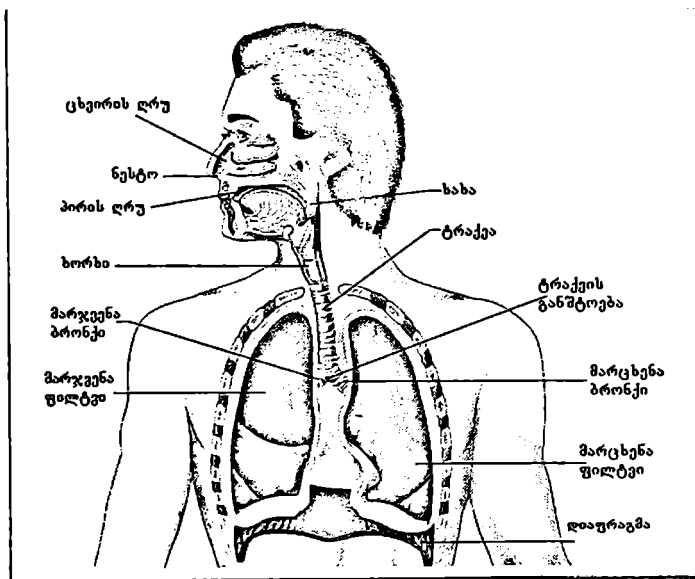
გრავიტაციული ეფექტი გამოიყენება პრაქტიკაში ორთოსტატიკური რეფლექსის აღდგენის და კიდურების შეშუპების მკურნალობის დროს.

III.2 აეროდინამიკის ძირითადი პრინციპები რესპირაციულ სისტემაში

აირის ტრანსპორტი რესპირაციულ სისტემაში

დედამიწის ზედაპირზე ატმოსფერული წნევა ($P_{ატმ} \approx 760$ მმ Hg) ნორმალური პირობაა ცოცხალი ორგანიზმის არსებობისათვის. ფიზიოლოგიურ პირობებში ადამიანის ორგანიზმში უმეტესი ორგანოებისა და ქსოვილების ფუნქციონირება, ქსოვილოვანი სითხეებისა და აირების ცვლა, ჩვეულებრივ, ხორციელდება ატმოსფერული წნევის ქვეშ. გამონაკლისს შეადგენს პლევრის ღრუ, გულ-სისხლძარღვთა სისტემა, ზურგის ტვინის სითხე და სახსრების მიმდებარე სიღრუე. რომლებიც უშუალოდ არ უკავშირდება ატმოსფეროს, თუმცა მთელი ორგანიზმი განიცდის ამ წნევის ზემოქმედებას. ამ კომპარტამენტებთან დაკავშირებული სისტემების ფუნქციონირება ექვემდებარება ფიზიკის ფუნდამენტურ კანონებს და პრინციპებს. მაგალითისთვის განვიხილოთ რესპირაციული (სასუნთქი) სისტემის ფუნქციონირება.

რესპირაციული სისტემის ძირითადი დანიშნულებაა გარემომცველი არიდან ჟანგბადის მიწოდება სისხლის მიმოქცევის სისტემაში და ჟანგვითი მეტაბოლიზმის ნარჩენი პროდუქტის - ნახშირორჟანგის სისხლიდან გამოყოფა. ეს პროცესები ხორციელდება რთული სატრანსპორტო სისტემების საშუალებით (სურათი 114), რომელთა ფუნქციონირებას საფუძვლად უდევს რესპირაციულ სისტემაში წნევათა სხვაობის არსებობა.



სურათი 114
რესპირაციული სისტემის ანატომიური სქემა

ნახშირორჟანგის ტრანსპორტის კინეტიკა ჟანგბადის ტრანსპორტის კინეტიკის მსგავსია, ოღონდ საწინააღმდეგო მიმართულებით. ორივე პროცესი ხორციელდება სინქრონულად და წნეის გრადიენტი უზრუნველყოფს აირთა ტრანსპორტის ოპტიმიზაციას.

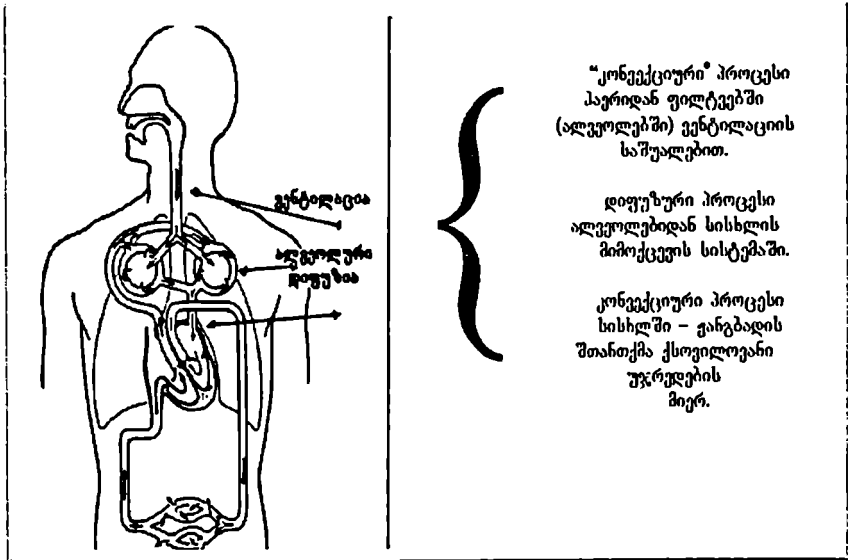
სუნთქვის პროცესი შედგება 4 ძირითადი ეტაპისაგან (სურათი 115):

- ვენტილაცია – აირის მექანიკური მოძრაობა ფილტვებში და ფილტვებიდან გარეთ;

- აირთა ცვლა ფილტვებსა და სისხლს შორის;

- ჟანგბადისა და ნახშირორჟანგის ტრანსპორტი სისხლით;

- ქსოვილოვანი სუნთქვა – აირთა ცვლა ქსოვილებსა და სისხლს შორის (სურათი 116).

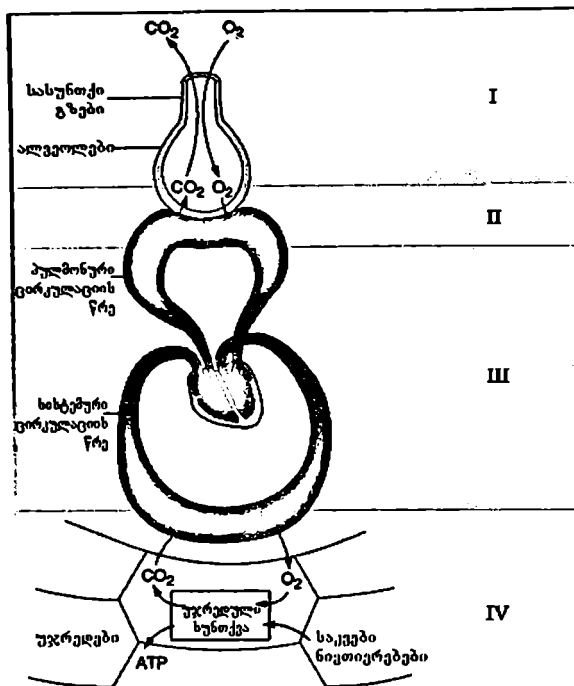


სურათი 115

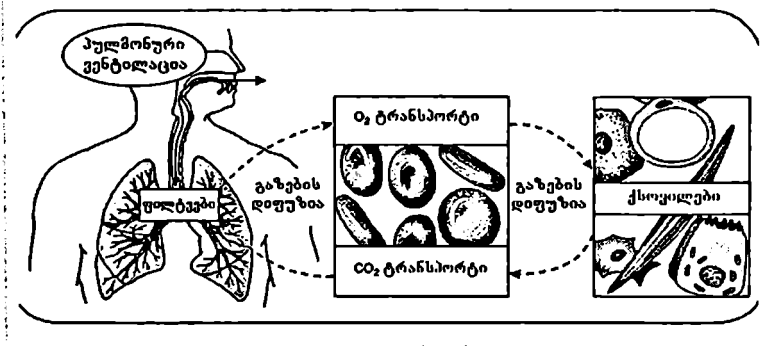
აირის ტრანსპორტი რესპირაციულ სისტემაში

ცნობილია, რომ ნორმალურ პირობებში პაერი შეიცავს აზოტს (N_2) $\approx 78\%$ -ს, ჟანგბადს (O_2) $\approx 21\%$ -ს, ნახშირორჟანგს (CO_2) $\approx 0.03\%$ -ს. დანარჩენი ნაწილი წყლის ოროტლზე, ინერტულ აირებსა და სხვა მინარეეებზე მოდის. ჩასუნთქული პაერის ეს პროცენტული თანაფარდობა ირლვევა და იგი ამოსუნთქულ პაერში ძირითადად ჟანგბადისა და ნახშირორჟანგის პროცენტულ შემადგენლობაზე აისახება – ჟანგბადის შემცველობა მცირდება და ნახშირორჟანგის შემცველობა იზრდება 4% -მდე. ეს იმას ნიშნავს, რომ სუნთქვის პროცესში ჟანგბადის 4% ნახშირორჟანგზე იცვლება.

* კონვექცია – მოლეკულების გადაადგილება სითხეებსა და გაზებში



ა

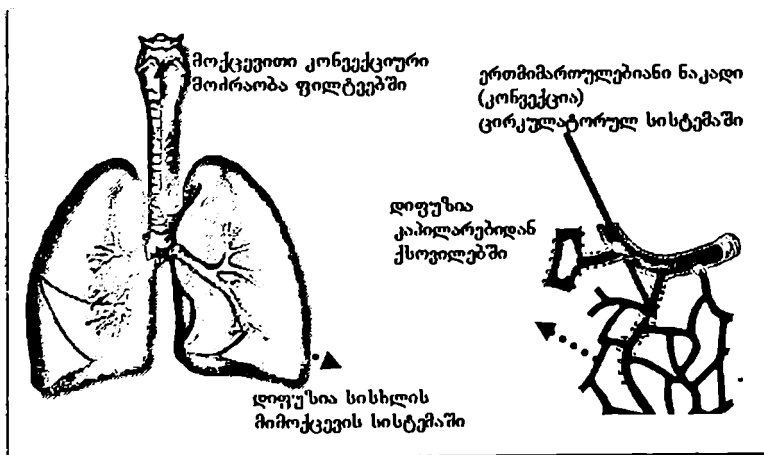


სურათი 116

რესპირაციული პროცესის ძირითადი ეტაპები

I - აირთა ცვლა ატმოსფეროსა და ფილტვებს შორის; II აირთა ცვლა ფილტვებსა და სისხლს შორის; III - გაზების ტრანსპორტი სისხლით; IV - აირთა ცვლა სისხლსა და ქსოვილებს შორის

რესპირაციული ციკლის მიმდინარეობისას მიმოქცევითი კონვექციური მოძრაობა თანდათან აირთა დიფუზიით იცვლება (სურათი 117). ნუ, შეიძლება ითქვას, რომ აირის მოძრაობა რესპირაციულ სისტემაში განპირობებულია მექანიკური წნევისა და აირთა კონცენტრაციული გრადიენტით, აირთა ცელა ხორციელდება დიფუზიის მექანიზმების საშუალებით.



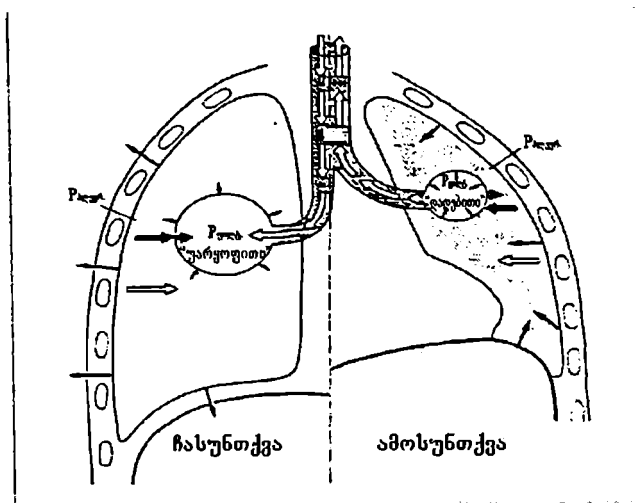
სურათი 117

აირთა ტრანსპორტი ორგანიზმში – კონვექციისა და დიფუზიის კომბინაცია

სასუნთქი გზები ასრულებს აგრეთვე პაერის ფილტრაციის, გაწმენდისა და განაწილების ფუნქციებს.

ფილტვების მოცულობა და წნევა

ვენტილაციის – ჩასუნთქვის და ამოსუნთქვის პროცესები რეგულირდება ფილტვების წნევა/მოცულობის ცვლილებებით. გულმკერდი (ნეკები და დიაფრაგმა) ასრულებს ტუმბოს როლს: ჩასუნთქვის დროს მუსკულატურა უზრუნველყოფს გულმკერდის აქტიურ გაფართოებას, წნევის შემცირებას (ატმოსფერულთან შედარებით) გულმკერდის (პლევრის) ღრუში და ალვეოლებში ($P_{აქ} > P_{აღ}$) და შესაბამისად, იწვევს ფილტვის შიდა მოცულობის (შესაბამისად, ალვეოლების მოცულობის) პასიურ ზრდას (ჩასუნთქვა). ეს პროცესი მიმდინარეობს *ბოილ-მარიოტის კანონის* თანახმად ($P_1V_1 = P_2V_2 = const$). რაც იმას ნიშნავს, რომ გულმკერდის ღრუში მოცულობის გაზრდა იწვევს მასში წნევის შემცირებას და, რადგან მას ატმოსფეროსთან პირდაპირი კავშირი არა აქვს, სასუნთქი გზების გავლით ფილტვებში შედის პაერი მანამ, სანამ წნევათა ბალანსი არ დამყარდება (სურათი 118).

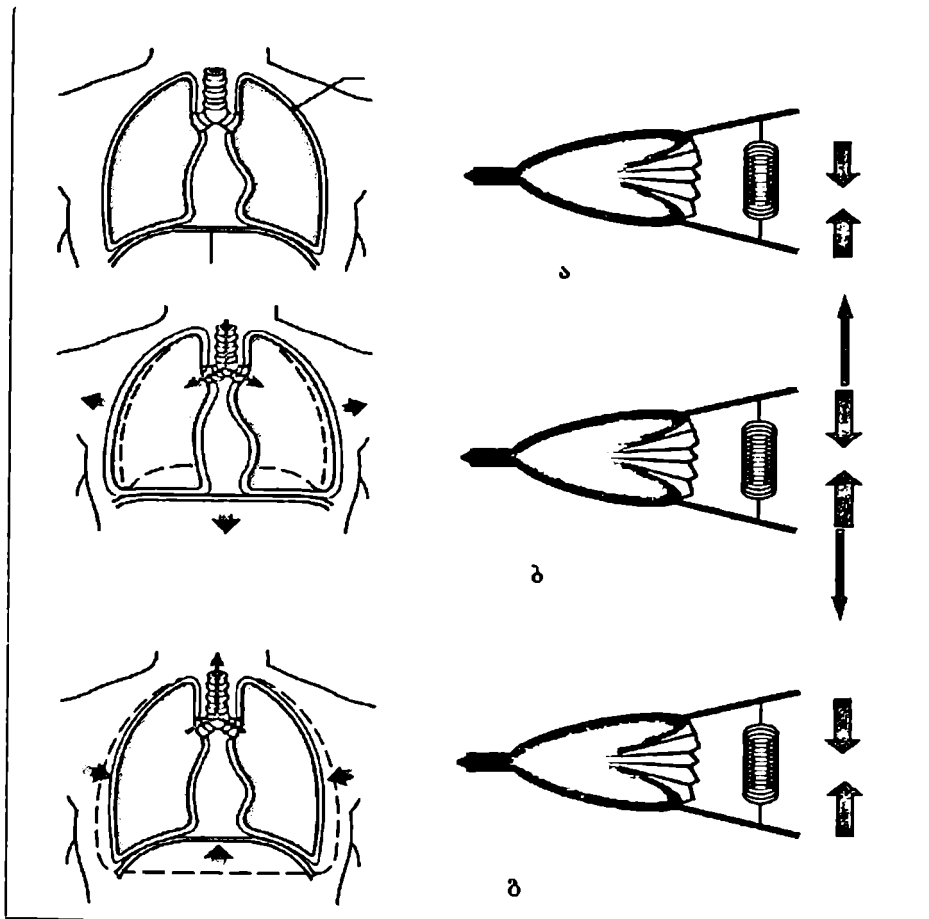


სურათი 118

დამოკიდებულება ფილტვების მოცულობასა და მასში ჰაერის წნევას შორის. სურათის მარცხენა ნაწილში (შესუნთქვა) ჩანს, რომ გულმკერდის ღრუს გაფართოება იწვევს მასში წნევის შემცირებას, რის გამოც ფილტვებში წნევა ეცემა, მაგრამ აღემატება წნევის მნიშვნელობას პლევრის ნაპრალში ($P_{ფ} > P_{პლ}$), ფილტი იბერება. მარჯვენა ნაწილში (ამოსუნთქვა) მესკულატურა მოდუნებულია, გულმკერდის ღრუში წნევა იზრდება და უბრუნდება პირვანდელ მისეხელობას, რაც იწვევს ჰაერის მოძრაობას ფილტვებიდან გარეთ (N. A.M. Schellart. "Compendium of Medical Physics, Medical Technology and Biophysics", Amsterdam, 2009)

სურათებზე 119 ნაჩვენებია ტრანსმურალური წნევის (ტრანსმურალური წნევა - წნევა, მოქმედი ორგანოს კედელზე მისი შიგა მხრიდან) ცვლილებები ფილტვების ვენტილაციის დროს, რომელიც დამოკიდებულია აგრეთვე სასუნთქი გზების რეზისტენტობასა და ფილტვების ჰიმეადობაზე.

მოსვენების მდგომარეობაში ფილტვებში წნევა ატმოსფერული წნევის ტოლია. ამ დროს ელასტიკურობის გამო ფილტი მუდამ ისწრაფვის შეამციროს თავისი მოცულობა და უმნიშვნელოდ იკუმშება (ელასტიკური შეკუმშვა), რაც პლევრის ნაპრალის წნევას ატმოსფერულზე 3 მმ Hg-ით დასწევს (ვინაიდან პლევრის ნაპრალი არ უკავშირდება ატმოსფეროს და არ ხდება მისი ჰაერით შევსება) (სურათი 119ა). ანუ, ფილტვის მოსვენების მდგომარეობაში პლევრულ ნაპრალში წნევა უარყოფითია (-3 მმ Hg) და დაბალანსებულია ფილტვის ელასტიკურობით. თუ ჰაერი მოხვდება პლევრულ ნაპრალში (გულმკერდის დაზიანების შედეგად) მისი წნევა გაუტოლდება ატმოსფერულს და ფილტი განიცდის კოლაფსს.



სურათი 119

სუნთქვის პროცესი და მექანიზმები (სქემა)

ა - ფილტვი მოსვენებულ მდგომარეობაშია, ოდნავ დაჭიმული; დიაფრაგმა და სასუნთქი მუსკულატურა მოდუნებულია, მოქმედებს დაჭიმული ფილტვის დრეკადობის ძალა (სქელი ისრები). ბ - შესუნთქვა; დიაფრაგმა და სასუნთქი მუსკულატურა იკუმშება, აღიძვრება ძალები (წერილი ისრები), შედეგად გულმკერდის მოცულობა იზრდება, რაც საწინააღმდეგოდ მიმართული დრეკადობის ძალების გაზრდას იწვევს. გ - ამოსუნთქვა; დიაფრაგმა და მუსკულატურა მოდუნებულია, მოქმედებს მხოლოდ დრეკადობის ძალები და გულმკერდის მოცულობა უბრუნდება საწყის მდგომარეობას

შესუნთქვის დროს გულმკერდის ღრუს მოცულობა იზრდება (სურათი 118ბ), შედეგად ფილტვები იშლება, მათი მოცულობა იზრდება, ხოლო წნევა ფილტვებს შიგნით მცირდება. წნევა პლევრის ნაპრალში მცირდება (ხდება უფრო უარყოფითი): მშვიდი შესუნთქვის ბოლოს იგი მცირდება -6 მმ Hg-მდე. პაერი მოძრაობს წნევის გრადიენტის მიმართულებით - ატმოსფეროდან ფილტვებში, სანამ ატმოსფერული და ფილტვების შიგნით წნევა არ გათანაბრდება. ამოსუნთქვის დროს პროცესი იცვლის მიმართულებას (სურათი 119გ): გულმკერდის მოცულობა მცირდება, წნევა ფილტვებს შიგნით იზრდება (უფრო მაღალია, ვიდრე ატმოსფერული წნევა) და აირი მოძრაობს წნევის გრადიენტის მიმართულებით. ფილტვებიდან გარეთ. ამოსუნთქვის ბოლოს, როდესაც თითქმის ყველა სასუნთქი კუნთი მოდუნებულია, წნევა პლევრის ნაპრალში ატმოსფერულზე დაახლოებით 3 მმ Hg-ით დაბალია.

სასუნთქი გზების რეზისტენტობა

ჩასუნთქვა და ამოსუნთქვის პროცესში პაერის ნაკადს გარკვეული წინააღმდეგობა ხედება სასუნთქი გზების მხრიდან. სასუნთქი გზების რეზისტენტობა განპირობებულია:

- პაერის მოლეკულებს შორის ხახუნის ძალებით;
- ხახუნის ძალებით, ამ მოლეკულებსა და სასუნთქი გზების კედლებს შორის.

სასუნთქ გზებში აირის ნაკადი შეიძლება იყოს როგორც ლამინარული, ასევე ტურბულენტური და გარდამავალი (სურათი 120), რაც აგრეთვე გავლენას ახდენს რეზისტენტობაზე.



სურათი 120
აირის ლამინარული და ტურბულენტური ნაკადი

აირის ლამინარული ნაკადისათვის დამოკიდებულება ნაკადის ინტენსივობასა და აირის წნევათა სხვაობას შორის განისაზღვრება პუაზეილის ფორმულით:

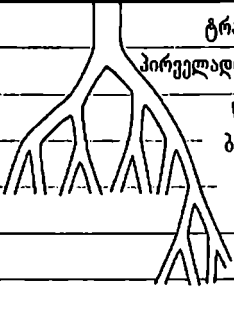
$$J = \frac{\pi \Delta P r^4}{8 \eta l} = \frac{\Delta P}{R}$$

საიდანაც სასუნთქი გზების რეზისტენტობა ტოლია:

$$R = \frac{8\eta l}{\pi r^4} \quad (\text{III.2.1})$$

სუნთქვის პროცესში სასუნთქი გზების საერთო რეზისტენტობა R ძალიან მცირეა. სასუნთქი გზების რეზისტენტობა განპირობებულია რესპირაციული სისტემის ინერციულობით (შეიძლება მისი უგულებელყოფა) და წინააღმდეგობის ძალებით (საერთო რეზისტენტობის 80%), რომლებიც ელინდება ფილტვის და გულმკერდის ქსოვილების ერთმანეთის მიმართ სრიალის და სასუნთქ გზებში აირის მოძრაობისას ფილტვების ქსოვილის გაფართოების დროს.

სურათზე 121 ნაჩვენებია სასუნთქი გზების სხვადასხვა უბნის გეომეტრიული მაჩვენებლები. მოყვანილი მონაცემებიდან ნათელია, რომ აირის გაერცელებასთან ერთად სასუნთქი გზების განივი კვეთის ფართობი სწრაფად იზრდება. ანუ, ფიზიოლოგიურად სასუნთქი გზების რეზისტენტობა მაქსიმალურია მსხვილ სასუნთქ გზებში (ცხვირი, პირის ღრუ, ტრაქეა და ბრონქები). ბრონქიოლების მცირე რადიუსის მიუხედავად, მათი პარალელური განტოტების გამო ჯამური განივკვეთის ფართობი ძალიან დიდია, რაც რეზისტენტობის შემცირებას განაპირობებს. შესაბამისად, ფიზიოლოგიურად მსხვილ სასუნთქ გზებში აირის ნაკადი ტერბულენტურია, მცირე სასუნქ გზებში - ლამინარული.

	დასახელება	განყოფილება	დიამეტრი (მმ)	რაოდენობა	განივკვეთის ფართობი სმ²
საკონტაქტო ზედაპირი	ტრაქეა	0	15-22	1	2.5
	პირველადი ბრონქი	1	10-15	2	
	წვრილი ბრონქები	2	1-10	4	
		3			
		4			
		5			
		6-11			
	ბრონქიოლები	12-23	0.5-1	2×10^4	100
გაცვლითი ზედაპირი	ალვეოლები	24	0.3	8×10^7	5×10^3
				$3-6 \times 10^8$	$>1 \times 10^6$

სურათი 121

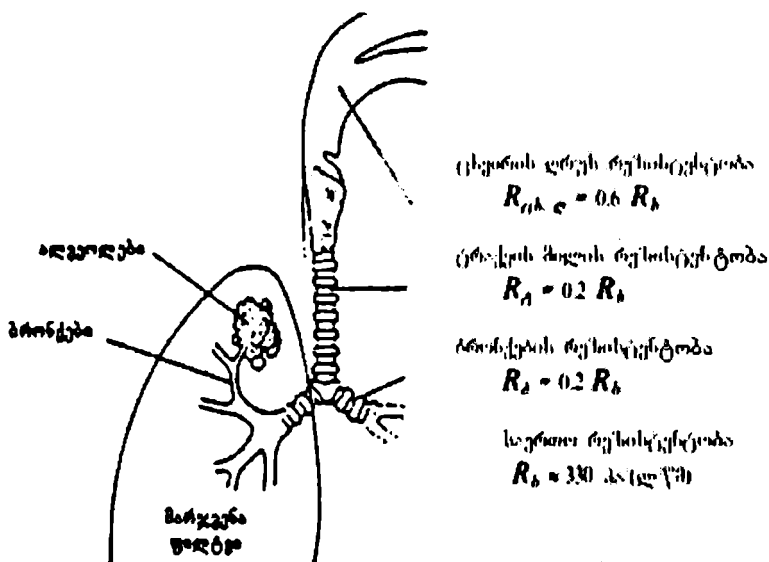
სასუნთქი გზების სხვადასხვა უბნის გეომეტრიული მაჩვენებლები

სასუნთქი გზების დიამეტრის შემცირების გამოწვევი ფაქტორები განაპირობებს სასუნთქი გზების რეზისტენტობის გაზრდას და აირის ტურბულენტური ნაკადის წარმოქმნას. ამ ფაქტორებს მიეკუთვნება:

- ხშირი სუნთქვა (იზრდება აირის მოძრაობის სინქარე და, მაშასადამე, რეინოლდსის რიცხვის მნიშვნელობა);
- სასუნთქი გზების შევიწროება ასთმის, პარასიმპათიკური სტიმულაციის, სიგარეტის წევის დროს;
- ფილტვის ფიბროზი, რომელიც იწვევს მცირე სასუნთქი გზების დიამეტრის შემცირებას.

პაერის გაერცელების დროს სასუნთქი გზების საერთო რეზისტენტობა უდრის ცალკეული სეგმენტების რეზისტენტობების ჯამს (სურათი 122):

$$R_b = R_{Gb} + R_{\phi} + R_d$$



სურათი 122

სასუნთქი გზების საერთო რეზისტენტობა

სასუნთქი გზების რეზისტენტობა იზრდება ამოსუნთქული აირის სიმკვრივისა და სიბლანტის მომატების დროს (ასთმა, ქრონიკული ბრონქიტი, ცისტური ფიბროზი), რაც, თავის მხრივ, ხელს უწყობს აირის ნაკადის ტურბულენტურ ნაკადად გარდაქმნას. სუნთქვის ბგერები (ხიხინი), რომლებიც ისინჯება ფონენდოსკოპით, განპირობებულია აირის ტურბულენტური ნაკადით.

სასუნთქი სისტემის ელასტიკურობა

სასუნთქი სისტემის ელასტიკურობის ზომა - *ჭიმადობა* განისაზღვრება, როგორც სასუნთქი (ფილტვები-გულმკერდი) სისტემის უნარიანობა შეცვალოს მოცულობა წნევის ზემოქმედებით. იგი ტოლია:

$$C = \frac{\Delta V}{\Delta P} \quad (\text{III.2.2})$$

სასუნთქი სისტემის ჯამური ჭიმადობა განისაზღვრება ფილტვების, გულმკერდის კედლისა და ალვეოლების ჭიმადობით.

ფილტვების ჭიმადობა დამოკიდებულია მათი შემადგენელი შემავრთებელი ქსოვილის მორფო-ფიზიოლოგიურ მახასიათებლებზე. ფილტვების ჭიმადობა ქვეითდება ასაკთან ერთად, ფილტვების ფიბროზის (ელასტინის დაქვეითების, კოლაგენის ბოჭკოების შემცველობის ზრდის შედეგად), ან იზრდება ემფიზემის (ფილტვების ქრონიკული არასპეციფიკური დაავადება, რომელიც ვითარდება გენეტიკური დარღვევების, სიგარეტის წევის, ან სხვა მიზეზების შედეგად) დროს და ელინდება დისტალური ბრონქების პათოლოგიური გაფართოებით და ალვეოლების კედლების დესტრუქციულ-მორფოლოგიური ცვლილებებით.

ფილტვებში აირის ნაკადი დროის ერთეულში ფილტვებში არსებული აირის მოცულობის ცვლილების ტოლია:

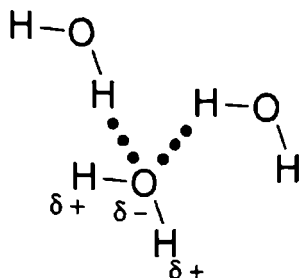
$$J = \frac{\Delta V}{\Delta t} \quad (\text{III.2.3})$$

ეს იმას ნიშნავს, რომ სხვადასხვა პათოლოგიური პროცესების დროს ფილტვების ელასტიკურობის ცვლილებებთან ერთად მათში იცვლება პაერის ნაკადის ინტენსივობაც.

ზედაპირული დაჭიმულობის როლი სუნთქვის ბიომექანიკაში

სითხის ზედაპირული დაჭიმულობის ძალა განსაკუთრებულ როლს ასრულებს სუნთქვის პროცესში. კერძოდ, ალვეოლების "შეკუმშვა"- "გაფართოებაში". ცნობილია, რომ ადამიანის ფილტი 300 მილიონამდე ალვეოლას შეიცავს. ისინი წარმოადგენენ 0,1 მმ დიამეტრისა და 0,4 მკმ სისქის კედლის მქონე ბუშტებს. გარედან ალვეოლები დაფარულია წერილ სისხლძარღვთა ქსელით; ჩასუნთქვისას ალვეოლების ზედაპირის საერთო ფართობი 100 მ²-ს აღწევს. ასეთი ანატომიური აგებულება უზრუნველყოფს გაზთა ადეკვატურ ცვლას სისხლსა და ალვეოლურ პაერს შორის.

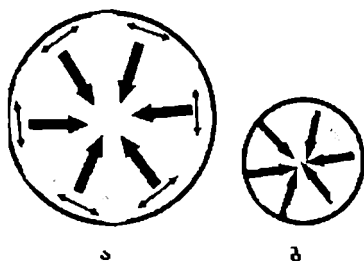
პაერი, რომელიც სასუნთქი გზების საშუალებით შედის ფილტვებში, გაჯერებულია წყლის ორთქლით. წყლის მოლეკულები ფარავს ალვეოლების შიგა ზედაპირს. ისინი შეგვიძლია შევადაროთ სითხეში მოთავსებულ აირით სავსე ბუშტებს. როგორც ცნობილია, წყლის მოლეკულები პოლარული მოლეკულებია, რომლებიც წყალბადური ბმების ფართო ქსელს წარმოქმნიან (სურათი 123) და წყლის მაღალ ზედაპირულ დაჭიმულობას განაპირობებენ.



სურათი 123

წყალბადური ბმები წყლის მოლეკულებს შორის

ამოსუნთქვისას ალვეოლების შიგა ზედაპირის თხევადი (წყლის) აპკის ზედაპირული დაჭიმულობის ძალა უზრუნველყოფს ალვეოლური ბუშტუკის ზედაპირის ფართობის (ე.ი. ბუშტუკების რადიუსის) შემცირებას (სურათი 124), რაც მისი მოცულობის შემცირებას ნიშნავს.



სურათი 124

ალვეოლის შეკუმშვა წყლის მაღალი ზედაპირული დაჭიმულობის შედეგად: ა - შესუნთქვის ბოლოს; ბ - ამოსუნთქვის ბოლოს.

□ - წყლის მოლეკულა ალვეოლის შიგა ზედაპირზე

მოცულობის შემცირება კი გამოიწვევს ალვეოლის შიგნით წნევის გაზრდას, წნევის ნამატი გამოითვლება ლაპლასის ფორმულით. სფერული ზედაპირისთვის წნევის ნამატი, რომელიც ზედაპირული დაჭიმულობით და ზედაპირის სიმრედითაა გამოწვეული, ტოლია:

$$\Delta P = \frac{4\sigma}{R} \quad (\text{III.2.4})$$

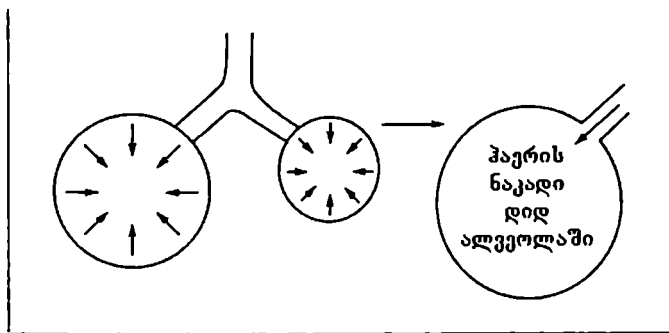
სადაც σ - ზედაპირული დაჭიმულობის კოეფიციენტი, R - ალვეოლების შიგა რადიუსი.

როგორც ჩანს, ალვეოლური ბუშტუკის ცენტრისაკენ მიმართული დრეკადობის ძალა ალვეოლების რადიუსის უკუპროპორციულია. მაგალითისთვის განვიხილოთ ერთმანეთთან დაკავშირებული სხვადასხვა ზომის ორი

ალვეოლა რადიუსებით R_1 და R_2 . მათში დამატებითი წნევა იქნება $\Delta P_1 = \frac{4\sigma}{R_1}$ და

$\Delta P_2 = \frac{4\sigma}{R_2}$. თუ $R_2 > R_1$, მაშინ $\Delta P_1 > \Delta P_2$ და ამიტომ პატარა ალვეოლიდან

მთელი პაერი უნდა გადავიდეს დიდში, რადგან პატარა ალვეოლაში წნევა ყოველთვის მეტი იქნება, ვიდრე დიდში. თუ ეს მოხდება, პატარა ალვეოლა დაიშუტება (განიცდის კოლაფსს), ხოლო დიდი გაიბერება და შეიძლება გასკდეს (სურათი 125).



სურათი 125

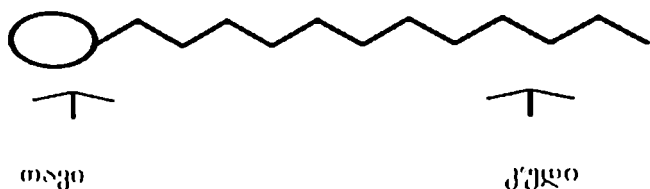
ზედაპირული დაჭიმულობის ზემოქმედება ალვეოლის ზომაზე

თუ აღწერილი მოვლენა რეალურად არ ხდება, ეს ლაპლასის კანონის უზუსტობით არაა გამოწვეული.

რეალურად ალვეოლების სისტემა სტაბილურია. ენახოთ, თუ რა განაპირობებს ამ სტაბილურობას.

ცნობილია, რომ ალვეოლებს გააჩნიათ თხელი 100 ნმ სისქის თხევადი ფენა კედელსა და აირის სივრცეს შორის - ე.წ. **სურფაქტანტი**. (სურფაქტანტი - **Surface active agent**). მის შემადგენლობაში შემავალ მოლეკულებს გააჩნია ჰიდროფობული კუდები და ჰიდროფილური თავები (სურათი 126).

სურფაქტანტის შემადგენლობაში შედის ფოსფოლიპიდები (85%), გლიკოლიპიდები, ნეიტრალური ლიპიდები და ქოლესტეროლი (5%), გლიკოპროტეინები (1%) და ჰიდროფობული ასოცირებული ცილები (2%). სურფაქტანტი სეკრეტირდება "ტიპი 2" ალვეოლური უჯრედების მიერ და წარმოქმნის მონომოლეკულურ შრეს ალვეოლების ზედაპირზე. სურფაქტანტი ხასიათდება ამფიფილური თვისებებით.

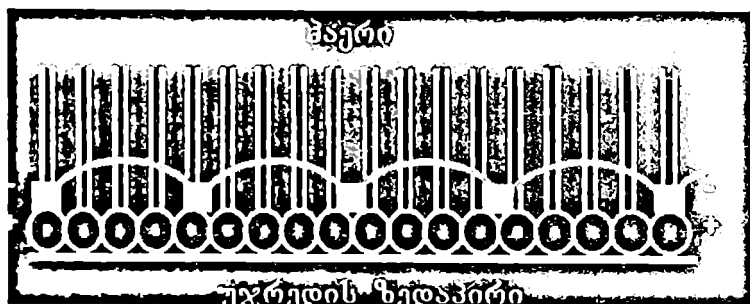


სურათი 126

სურფაქტანტის ამფიფილური მოლეკულა

ალევილების შეკუმშვა/გაფართოების დროს სურფაქტანტის ზემოქმედების ეფექტი განსხვავებულია და დამოკიდებულია სურფაქტანტის ზედაპირულ კონცენტრაციაზე.

სურფაქტანტი - ზედაპირულად აქტიური ნივთიერებაა. მისი ამფიფილური მოლეკულები ადსორბირდება წყალი/აირი გაყოფის საზღვარზე ისე, რომ ჰიდროფილური თავის ჯგუფები მიმართულია წყლისკენ, ხოლო ჰიდროფობური კუდები აირისკენ (სურათი 127). ჩაშენდება რა სურფაქტანტის მოლეკულები წყლის მოლეკულებს შორის, იგი იწვევს წყლის მოლეკულებს შორის წყალბადური ბმების შესუსტებას და ალევილებში ზედაპირული დაჭიმულობის შემცირებას (≈ 10 ჯერ).

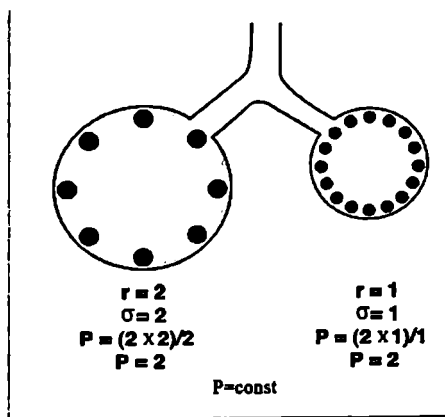


სურათი 127

სურფაქტანტი ალევოლის ზედაპირზე

სურფაქტანტი მთლიანად ფარავს ალევოლას შიგა ზედაპირს ალევოლური ბუშტუკის უმცირესი რადიუსის შემთხვევაში, ე.ი. ამოსუნთქვის ბოლოს ან შესუნთქვის დასაწყისში. ამ დროს სურფაქტანტის ზედაპირული დაჭიმულობის კოეფიციენტი $\sigma = 0,005$ ნ/მ, (წყლის ზედაპირული დაჭიმულობის კოეფიციენტი $\sigma = 0,07$ ნ/მ). ჩასუნთქვის ბოლოს ალევოლის რადიუსი იზრდება და სურფაქტანტი

მთელ ზედაპირს ვერ ფარავს (ნაწილი წყალს აქვს დაკავებული). ამ შემთხვევაში ზედაპირული დაჭიმულობის კოეფიციენტი იზრდება და მისი საშუალო მნიშვნელობა $\sigma = 0,05$ ნ/მ. შესაბამისად, შესუნთქვის დროს (ალვეოლის რადიუსის ზრდისას) ალვეოლის ზედაპირის დამფარავი სითხის ზედაპირული დაჭიმულობის კოეფიციენტი σ -ც იზრდება. მაშასადამე, ლაპლასის წნევა ($P = \frac{4\sigma}{R}$) თითქმის მუდმივი რჩება. შედეგად, პაერი პატარა ზომის ალვეოლებიდან ვერ გადავა დიდში და შენარჩუნდება ალვეოლური სისტემის სტაბილობა (სურათი 128).



სურათი 128

სურფქტანტის აქტივობის ცვლილებები ალვეოლის რადიუსის (R) (ზედაპირის ფართობის) მიხედვით (რადიუსის გაზრდით გამოწვეული ლაპლასის წნევის

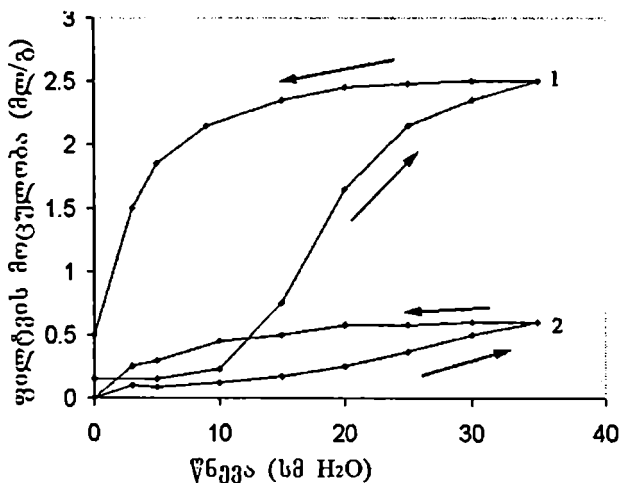
შემცირება კომპენსირდება ზედაპირული დაჭიმულობის კოეფიციენტის σ გაზრდით)

ამრიგად, წყლის მოლეკულებისგან განსხვავებით, რომლებიც ზრდიან ზედაპირულ დაჭიმულობას და შესაბამისად, იწვევენ აირით სავსე ალვეოლური ბუშტუკის დესტაბილიზაციას, სურფაქტანტის მოლეკულები ამცირებენ ცენტრისკენ მიმართული ზედაპირული დაჭიმულობის ძალების სიდიდეს და ამ გზით უზრუნველყოფენ ალვეოლური ბუშტუკების სტაბილიზაციას.

დამოკიდებულება ზედაპირულ დაჭიმულობასა და ზედაპირის ფართობს შორის გამოიხატება *პისტერეზისის* სახით (სურათი 129). პისტერეზისის ეფექტი უზრუნველყოფს ფიზიოლოგიურ პირობებში ფილტვებში ყველა ალვეოლის ერთნაირი ზომის შენარჩუნებას. იმ ალვეოლებში, რომლებიც ფართოვდება უფრო სწრაფად, იზრდება ზედაპირული დაჭიმულობის ძალის სიდიდე, რომელიც შემდგომში დაამუხრუჭებს ამ ზრდას და პირიქით, იმ ალვეოლებში, რომლებიც სწრაფად იხუტებიან, ზედაპირული დაჭიმულობა მცირდება და

უზრუნველყოფს მათი ზომის სტაბილიზაციას. სურფაქტანტის არსებობა განაპირობებს ფილტვების პისტერეზისის ფენომენს (ფილტვების ჭიმვადობის ცვლილებით განპირობებული ფენომენია – ფიზიოლოგიურ პირობებში სუნთქვის დროს ფილტვების მოცულობა შესუნთქვის და ამოსუნთქვის პროცესში იცვლება სხვადასხვა სიჩქარით (შესუნთქვის დროს სწრაფად იზრდება, ხოლო ამოსუნთქვის დროს დიდხანს ინარჩუნებს მაღალ მნიშვნელობას). შესაბამისად, დიდია აირის მოცულობა ფილტვებში, რაც სისხლის ჟანგბადით სრულყოფილ გაჯერებას უწყობს ხელს.

ალვეოლები შემოსაზღვრულია გარშემო სისხლძარღვების კაპილარული ქსელით. სურფაქტანტი უშლის სითხეს კაპილარებში ინფილტრაციას და აკუმულაციას (მისი უარყოფითი, სითხესთან შედარებით ნაკლები ზედაპირული დაჭიმულობა განდევნის სითხეს ალვეოლურ კედლებს გარეთ) და ამ გზით უზრუნველყოფს ალვეოლებში სიმშრალის შენარჩუნებას და ფილტვის შეშუპების განვითარების პრევენციას.



სურათი 129

პისტერეზისი ნორმალურ (1) და სურფაქტანტს მოკლებულ (2) ალვეოლებში
 ისრებით ნაჩვენებია ჩასუნთქვა – ამოსუნთქვის პროცესი
 (Nico A.M. Schellart. "Compendium of Medical Physics, Medical Technology and Biophysics", Amsterdam, 2009)

სურფაქტანტი (დაბალი ზედაპირული დაჭიმულობის გამო) განაპირობებს ფილტვების გაფართოებისათვის აუცილებელ პიდროსტატიკურ წნევათა სხვაობის შემცირებას და, მაშასადამე, ამცირებს სუნთქვის პროცესისთვის აუცილებელ მუშაობას.

ამრიგად, შეგვიძლია დავასკვნათ, რომ პულმონური სურფაქტანტი:

- ამცირებს ალვეოლებში ზედაპირული დაჭიმულობის სიდიდეს და, მაშასადამე, ზრდის მათ ჰიმეადობას;

- ამცირებს ფილტვების ალვეოლების გახსნისთვის აუცილებელი წნევის მინიმალურ ზღვარს;

- უზრუნველყოფს ალვეოლების სტაბილიზაციას;

- ახდენს ალვეოლების კოლაფსის პრევენციას აირის დაბალი წნევის პირობებში (ამოსუნთქვის ბოლოს);

- უზრუნველყოფს ალვეოლებში სიმშრალის შენარჩუნებას (შეშუპების განვითარების პრევენცია);

- ამცირებს ჩასუნთქვის დროს ფილტვების გაფართოებისთვის საჭირო ენერგიას (აადვილებს სუნთქვას).

დღენაკლულ ახალშობილებში (გესტაციის 28 – 32 კვირა) სურფაქტანტის დეფიციტი რესპირაციული დისტრეს სინდრომის განვითარების მიზეზს წარმოადგენს. სურფაქტანტის უქმარისობის პირობებში სითხის მაღალი ზედაპირული დაჭიმულობა ხელს უწყობს ინფილტრაციას კაპილარებიდან ალვეოლებში და შეშუპების განვითარებას.

აირთა ცვლა ალვეოლებში

ალვეოლებისა და კაპილარების კედელი იმდენად თხელია, რომ ჟანგბადის მოლეკულები თავისუფლად გადაინაცვლებს ალვეოლებიდან სისხლძარღვების კაპილარულ სისტემაში **დიფუზიის** გზით და შემდეგ სისხლში, წარმოქმნიან ქიმიურ კავშირს ერითროციტების პემოგლობინთან (ან ნახშირორჟანგი დიფუნდირებს სისხლიდან ალვეოლებში) (სურათი 129).

O₂-ს და CO₂-ს დიფუზია ფილტვის ალვეოლებში რთული პროცესია, ვინაიდან მოლეკულები მოძრაობს აირი - წყალი საზღვრის ზედაპირზე. ამ პროცესის აღწერისათვის უნდა გავისხენოთ აირისათვის დამახასიათებელი ზოგიერთი ფიზიკური თვისება.

აირის წნევა განპირობებულია აირის მოლეკულების ჭურჭლის კედლებთან შეჯახებით და განისაზღვრება შეჯახებების სიხშირითა და სიმძლავრით. იმის მიუხედავად, რომ აირის თითოეული მოლეკულა იმყოფება აირის სხვა მოლეკულების გარემოში, ჭურჭლის კედლებთან შეჯახებისას ის მოქმედებს დამოუკიდებლად. აირის ტემპერატურის მომატებისას იზრდება მოლეკულების მოძრაობის სიჩქარე, ე.ი. კინეტიკური ენერგია, და, მაშასადამე, მათი ჭურჭლის კედლებთან შეჯახების სიხშირეც, ე.ი., მატულობს აირის წნევა. აირით დაკავებული მოცულობის შემცირებაც, აგრეთვე, წნევის ზრდას განაპირობებს (ბოილ-მარიოტის კანონი), ენაიდან აირის მოლეკულების უფრო მცირე სივრცეში განაწილებისას იზრდება მათი ჭურჭლის კედლებთან შეჯახების სიხშირე.

სხვადასხვა კომპონენტის შემცველ აირში თითოეული კომპონენტი (კონკრეტული აირი) მოქმედებს სხვა კომპონენტებისგან დამოუკიდებლად, და თითოეულ მოლეკულას შეაქვს თანაბარი წვლილი საერთო წნევის ფორმირებაში. **დალტონის კანონის** თანახმად, ატმოსფერული წნევა მისი შემადგენელი ჟანგბადის, აზოტის, ნახშირორჟანგის, წყლის ორთქლის და ინერტული აირების პარციალურ* წნევათა ჯამის ტოლია :

$$P = P_{O_2} + P_{N_2} + P_{CO_2} + P_{H_2O} + P_i$$

აქ P_i - სხვადასხვა ინერტული აირის პარციალური წნევების ჯამია. თითოეული კომპონენტის პარციალური წნევა (P_i) პაერის საერთო წნევისა და მისი კონცენტრაციის ნამრავლს უდრის :

* პარციალური წნევა ის წნევაა, რომელსაც შექმნიდა ეს აირი იმავე მოცულობაში უცვლელი ტემპერატურის დროს, სხვა აირები რომ არ ყოფილიყო.

$$P_i = PC$$

ასე მაგალითად, მშრალ პაერში ჟანგბადის კონცენტრაცია 21%-ია, ე.ი. ჟანგბადის პარციალური წნევა ტოლია :

$$P_{O_2} = \frac{P_{atm}}{100} \times 21\% \text{ მმ Hg}$$

ტრაქეის ნოტიო აირში 37° C ტემპერატურაზე წყლის ორთქლის პარციალური წნევა $P_{H_2O} = 47$ მმ Hg; ტრაქეალურ აირში ჟანგბადის პარციალური წნევა იქნება :

$$P_{O_2} = \frac{P_{atm} - P_{H_2O}}{100} \times 21\% \text{ მმ Hg}$$

აირის პარციალური წნევის ცოდნა საჭიროა, ვინაიდან მუდმივი ტემპერატურის პირობებში (რაც უოველთვის სრულდება ალვეოლებში) პარციალური წნევა გაზის კონცენტრაციის ზომას სითხეში ან ქსოვილში. რაც მეტია პარციალური წნევა, მით მეტია იმ გაზის სითხეში ხსნადობა.

დაეუშუთ, ჩვენ უნდა შევერიოთ პაერი დეგაზირებულ სითხეს (მაგალითად, წყალს), რაც უფრო მაღალია ჟანგბადის პარციალური წნევა პაერში, მით უფრო დიდია ჟანგბადის (O_2) მოლეკულების წყლის ზედაპირთან შეჯახების სიხშირე, შესაბამისად, უფრო დიდია ალბათობა იმისა, რომ ჟანგბადის მოლეკულები შეაღწეს და გაიხსნება სითხეში. მაგრამ ამავე დროს სითხეში გახსნილი ჟანგბადის მოლეკულების ნაწილი ეჯახება წყლის ზედაპირს ქვევიდან და ებრუნდება აირად ფაზას. რაც უფრო დიდია წყალში გახსნილი ჟანგბადის კონცენტრაცია, მით უფრო დიდი იქნება მათი აირში დაბრუნების სიხშირე.

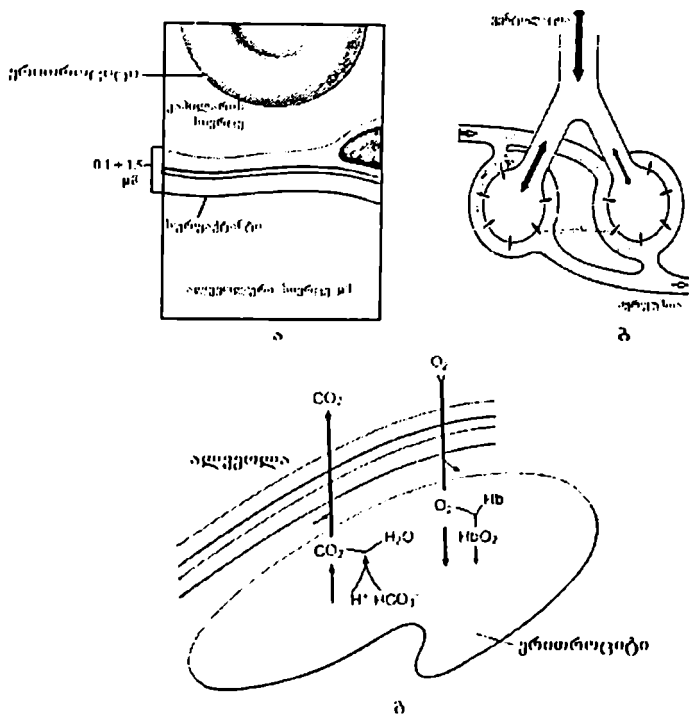
წონასწორობა დაჰყარდება მაშინ, როდესაც ორივე მიმართულებით მოძრავი ჟანგბადის მოლეკულების რაოდენობა ერთმანეთის ტოლი გახდება. ვინაიდან აირის კონცენტრაცია მისი პარციალური წნევის პირდაპირპროპორციულია. წონასწორობა მდგომარეობაში ჟანგბადის კონცენტრაცია აირსა და წყალში ერთმანეთის ტოლი გახდება. ამ პირობებში ამბობენ: „ჟანგბადის ძაბვა“, ან სხვა „აირის ძაბვა“; „აირის ძაბვას“ გამოსახავენ იმ წნევით, რაც მათ გააჩნია აირად მდგომარეობაში.

აღნიშნული ეხება პაერის ყველა კომპონენტს. თუ აირის პარციალური წნევა ნებისმიერ ორ წერტილში განსხვავებულია, ეს წერტილები არ იმყოფება წონასწორობულ მდგომარეობაში. უკანასკნელი შესაძლებელს ხდის ამ წერტილებს შორის აირის დიფუზიას. თუ გაზის პარციალური წნევა აირად ფაზაში (ალვეოლაში) აღემატება მის პარციალურ წნევას, უფრო ზუსტად, ძაბვას, სითხეში (სისხლში), გაზი დიფუნდირებს სისხლში. თუ ნაკლებია, გაზი იმოძრავებს სისხლიდან ალვეოლებში. გაზის მოლეკულები მოძრაობს პარციალური წნევის (ძაბვის) გრადიენტის მიმართულებით (სურათი 130).

შესწავთქვის დროს პაერის ნაკადი მიმართულია ალვეოლებში; ალვეოლებიდან ჟანგბადის მოლეკულები (O_2) დიფუნდირებს პარციალური წნევის გრადიენტის მიმართულებით სისხლში, მაშინ, როდესაც ნახშირორჟანგი (CO_2) გადაადგილდება საპირისპირო მიმართულებით. პაერი ალვეოლებში კარგავს ჟანგბადს და იძენს ნახშირორჟანგს წყლის ორთქლთან ერთად, რომელიც ორთქლდება რესპირაციული ტრაქტის ნოტიო კედლებიდან. შედეგად, წყლის ორთქლის პარციალური წნევა ალვეოლებში განსხვავდება ამ პარამეტრის მაქსიმალური ატმოსფეროში. სისხლის მიმოქცევის სისტემაში სისხლში გახსნილი ჟანგბადი გრანსპორტირდება სისტემურ კაპილარებში, სადაც ის ისევ ექვემდებარება დიფუზიას ქსოვილებში პარციალური წნევის გრადიენტის მიმართულებით; ნახშირორჟანგი დიფუნდირებს საქინაალმდეგო მიმართულებით სისხლში, და შემდეგ ვენური ცირკულაციაში ნაქისა და პულმონური არტერიის საშუალებით გროვდება ფილტვებში.

აღამიანის სხეულში გაზების დიფუზიის სიქარვე სამი ძირითადი პარამეტრით განისაზღვრება. ესენია:

- 1 - პარციალური წნევის გრადიენტი;
- 2 - დიფუზიის ზედაპირის ფართობი;
- 3 - დიფუზიის ხანგრძლივობა, ანუ დრო, რომლის განმავლობაში შესაძლებელია დიფუზია.



სურათი 130

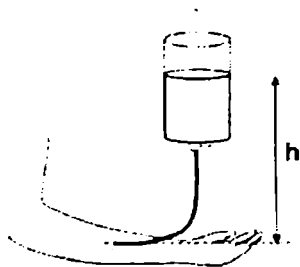
აირთა ცელა ალეუოლებში (ა - აირთა ცელაში მონაწილე კომპონენტების ზომები ; ბ - აირთა დიფუზიის მიმართულება)

(Nico A.M. Schellart. "Compendium of Medical Physics, Medical Technology and Biophysics", Amsterdam, 2009)

ჯანგბადი ყოველთვის მოძრაობს პარციალური წნევის მიმართულებით. დიდ მანძილზე (ატმოსფეროსა და ფილტვებსა შორის და ალეუოლებსა და ქსოვილების უჯრედებს შორის) ჯანგბადის მოძრაობას უზუნველყოფს რესპირაციული და კარდიული სისტემის კუნთების აქტივობა. ამ შემთხვევაში ტრანსპორტი ხორციელდება მოცულობითი ნაკადის სახით. მოკლე მანძილზე (ალეუოლებსა და სისხლს შორის და სისხლსა და ქსოვილებს შორის) ტრანსპორტი ხორციელდება დიფუზიის გზით. მსგავსი პროცესებით ხდება ნახშირორჟანგის ტრანსპორტირება. გაზების ტრანსპორტის რეჟიმი ირრევეა დიფუზიის მონაკვეთის დაგრძელების (მემბრანის სისქის მომატება კულმონური შეშუპების დროს), ან დიფუზური ფართობის შემცირების (ემფიზემა) შემთხვევაში. ნაკადის ინტენსიუობა ორივე მიმართულებით ტოლია. ალეუოლებსა და სისხლს შორის აირთა ცელის ნორმალური მიმდინარეობისთვის აირში ჯანგბადისა და ნახშირორჟანგის პარციალურ წნევას მნიშვნელოვანი როლი ენიჭება.

საკონტროლო კითხვები და ამოცანები:

1. როდესაც მოცურავე ჩაყენითავენ 20მ სიგრძის და 4 მ სიგანის აუზში, წყლის დონე იზრდება 0.75 მმ-ით. რას უდრის მოცურავის მასა?
2. ნორმალური ამოსუნთქვის შემდეგ 50 წლის ქალის სხეულის სიმკვრივე 1,03 გ/სმ³-ია. ჩაიძირება თუ არა ის წყალში? რა მოხდება, თუ ქალი, დაეუშვათ, ჩაისუნთქავს 2 ლ ჰაერს?
3. რატომ არის მეკდარ ზღვაში (ოკეანესთან შედარებით) ცურვა ადვილი?
4. ერთი მმ რადიუსის მქონე ცილინდრის შიგნით ჭარბი წნევა 200 მმHg-ია. რას უდრის ცილინდრის კედლის ძაბვა (ზედაპირული დაჭიმულობა)?
5. როგორ შეიცვლება ნაკადის სიჩქარე ცილინდრულ მილში, თუ მილის დიამეტრი შემცირდება 4 ჯერ, ხოლო სითხის სიბლანტე უცვლელი დარჩება?
6. როგორ იცვლება სხეულის მასა ღრმა შესუნთქვის (დაახლოებით 1 ლ აირის) დროს? შეიცვლება თუ არა ამ დროს სიმკვრივე და თუ კი, როგორ?
7. გამოთვალეთ წნევა ზღვის 150 მ-ის სიღრმეში. ზღვის წყლის სიმკვრივეა 1.026 გ/სმ³
8. სისხლის წნევა არტერიაში გულის დონეზე 100 მმ Hg-ის ტოლია. რას უდრის სისხლის წნევა თავის ტვინის არტერიაში, (მანძილი თავის ტვინსა და გულს შორის 55 სმ-ია), თუ პაციენტი დგას ფეხზე? წევს პორიზონტალურად? როგორი უნდა იყოს ჟირაფის წნევა?
9. ყირაზე დგომისას რატომ წითლდება სახე და ფეხები კი ამ დროს ფერმკრთალია?
10. ინტრავენური ინფუზიის დროს ვენის დონიდან რა h სიმაღლეზე უნდა მოათავსოთ გადასასხმელი სითხის ბალონი, რომ სითხის წნევა ვენაში ტოლი იყოს 18 მმ Hg-ს (სითხის სიმკვრივე $\rho = 1,0$ გ/სმ³)? როგორ უნდა შეეცვალოს ბალონის სიმაღლე, თუ ნემსის რადიუსი ძალიან მცირეა? რატომ? რატომ კეთდება ინფუზია ინტრავენურად და არა ინტრაარტერიულად?



11. როგორ შეიცვლება ნაკადისადმი რეზისტენტობა თუ სისხლძარღვის სიგრძე და დიამეტრიც 2-ჯერ გაიზარდა? თუ ნაკადი არ შეიცვალა, როგორ შეიცვლება წნევა? როგორ შეიცვლება ნაკადის ინტენსივობა, წნევის მუდმივობის პირობებში?
12. როგორ შეიცვლება სისხლის წნევა, თუ სხეულის ტემპერატურა გაიზარდა

370-დან 400-მდე (ჩათვალეთ, რომ სისხლის ნაკადი რჩება მუდმივი და იცვლება მხოლოდ სისხლის სიბლანტე)?

13. ათეროსკლეროზული ფოლაქი ამცირებს არტერიის განივკვეთის შიგა ფართობს დაახლოებით 30%-ით. რას უდრის წნევა ამ უბანზე, თუ წინამდებარე უბანში წნევა 200 მმ Hg-ია და ნაკადის სიჩქარე 0,12 მ/წმ?

14. ჩასუნთქვის და ამოსუნთქვის დროს 0,5 მმ H₂O წნევათა სხვაობა იწვევს ცხვირის ღრუში ნაკადის წარმოქმნას ინტენსივობით 0,15 ლ/წმ, განსაზღვრეთ ნაკადისადმი სასუნთქი გზების რეზისტენტობა.

15. გამოთვალეთ წნევის ცვლილება აორტას სიგრძის ერთეულზე (სანტიმეტრზე), თუ აორტის რადიუსი დაახლოებით 1 სმ-ია და სიბლანტის კოეფიციენტი - 4×10^{-2} ჰუზი.

16. გამოთვალეთ წნევის ცვლილება 30 სმ სიგრძის არტერიაში რადიუსით 0,5 სმ. ჩათვალეთ, რომ არტერია ატარებს სისხლს 8 ლ/წთ სიჩქარით (გრავიტაციულ ეფექტს მხედველობაში ნუ მიიღებთ).

17. გამოთვალეთ ფეხზე მდგარი ადამიანის სისხლის არტერიული წნევა ა) თავის მიდამოში (ჩათვალეთ, რომ თავი მდებარეობს 50 სმ-ით მაღლა გულზე; სისხლის სიმკვრივე $\rho = 1,05$ გ/სმ³). ბ) ფეხების მიდამოში (ჩათვალეთ, რომ ფეხები მდებარეობს 130 სმ-ით დაბლა გულზე). (არტერიული წნევა გულის დონეზე 120 მმ Hg).

18. გამოთვალეთ დამატებითი წნევა, რაც აუცილებელია, რომ 0,05სმ დიამეტრის ალვეოლა გაფართოდეს მის სრულ მოცულობამდე.

IV ელექტრომაგნიტური ურთიერთქმედებები ცოცხალ სისტემებში

IV.1 ელექტრომაგნიტიზმი (ისტორიული ცნობები)

(ცნება **ელექტრომაგნიტიზმი** ასახავს იმ მოვლენებს და ნივთიერებების თვისებებს, რომლებიც განპირობებულია ფიზიკური სხეულების სტრუქტურაში მიკროსკოპული დამუხტული ნაწილაკების (ელექტრონების, იონების, ატომების, მოლეკულების და მათი კომბინაციების და ა. შ.) არსებობით. მოძრაობით და ურთიერთქმედებით.

ელექტრული მოვლენების შესწავლისადმი დიდი ინტერესი გამოწვეულია იმით, რომ თითქმის ყველა მოვლენა, რომლებსაც ჩვენ ვხვდებით ბუნებაში, შეიძლება აიხსნას ელექტრული ბუნების (მოძრაობის თუ უძრავის) ურთიერთქმედებით. მართლაც, ნივთიერების შემადგენელი ატომები და მოლეკულები შეიცავენ ელექტრულ მუხტებს და მათ შორის მოქმედი ელექტრული ძალების შესწავლა საშუალებას იძლევა, ავხსნათ სხეულების მთელი რიგი ფიზიკური და ქიმიური თვისებები. ცნობილია აგრეთვე, თუ რა დიდ როლს თამაშობს ელექტრობა ტექნიკასა და ყოველდღიურ ცხოვრებაში. დღევანდელი ყოფა წარმოუდგენელია ინტერნეტის, კოსმოსური ხომალდების, კომპიუტერული ტომოგრაფიისა და სხვა. შეიძლება ითქვას, საოცრებების გარეშე, რომელთა საფუძველი სწორედ რომ ელექტრული მოვლენების შესწავლისას მიღებული შედეგებია.

ჯერ კიდევ ქრისტეს შობამდე 2750 წელს ანტიკური ეგვიპტელები წერდნენ ეგრეთ წოდებული ელექტრული თევზების თვისებების შესახებ, რომლებთანაც შეხება ადამიანში შოკს იწვევდა.

ძველი ბერძნებისთვის ცნობილი იყო რამდენიმე ფაქტი ელექტრული მოვლენების შესახებ. მაგალითად, მათთვის ცნობილი იყო, რომ ზოგიერთი ნივთიერება ხახუნით ისეთ თვისებას იძენს, რომ შეუძლია ქაღალდის მცირე ნაჭრების მიზიდვა. ქარვის ასეთი თვისება ცნობილი იყო ჯერ კიდევ თალესისათვის VI საუკუნეში ჩვენს წელთაღრიცხვამდე. ბერძნები ქარვას „ელექტრონს“ უწოდებდნენ – აქედან წარმოიშვა სიტყვა ელექტრობა.

ძველი ბერძნები იცნობდნენ ბუნების ისეთ მოვლენას, როგორიცაა ელვა, მაგრამ მათთვის უცნობი იყო ელვისა და ქარვის თვისებებს შორის მჭიდრო კავშირის არსებობა.

ჩვენი წელთაღრიცხვის XVII საუკუნემდე ელექტრული მოვლენების შესახებ არავითარი ახალი ფაქტი არ ყოფილა აღმოჩენილი. ელექტრული მოვლენების მეცნიერული შესწავლა დაკავშირებულია ინგლისელი ექიმის **თიუდორ უილიამ ჰილდბერტის** სახელთან. 1600 წელს ჰილდბერტმა დაადგინა, რომ ხახუნით არა მარტო ქარვა, არამედ სხვა სხეულებიც (მაგალითად, მინა, გოგირდი, ფისი და სხვ.) განიცდის ელექტრიზაციას და იზიდავს ქაღალდის მსუბუქ ნაჭრებს. მანვე დაადგინა, რომ ლითონების და სველი სხეულების ელექტრიზაცია არ ხდება.

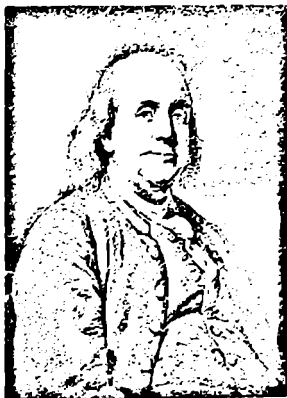
1729 წელს ინგლისელმა მეცნიერმა **სტივენ გრეიმ** ფიზიკური სხეულები გაყო ორ კლასად: ელექტროგამტარებად და ისოლერებად. გრეიმ აიყენა, რომ ლითონების ხახუნით ელექტრიზაცია შეუძლებელია იმის გამო, რომ ისინი კარგად ატარებენ „ელექტრობას“ და, თუ ლითონი ისოლირებული არ არის, მასზე არსებული მუხტი მიწაში გადადის.

მოგვიანებით **რობერტ სიმმერმა** დაასკვნა, რომ ელექტრული მოვლენები განპირობებულია ორი ურთიერთშემავსებელი სუბსტანციის არსებობით, რომელთა თვისებების ასახვის მიზნით შემოიღო „მუხტის“ ცნება: განასხვავებდნენ დადებით და უარყოფით მუხტს. ხახუნის დროს ხდება ამ სუბსტანციების განცალკევება, რაც იწვევს სხეულების ელექტრიზაციას (ანუ ელექტრიზაცია – სხეულზე ერთი ტიპის მუხტის კარბი დაგროვება). ერთი და იმავე მუხტის მქონე სხეულები განიზიდება, ხოლო განსხვავებული მუხტის მქონე – მიიზიდება. ამ დასკვნამდე დამოუკიდებლად მოვიდა **შარლ დიუფუ** 1729 წელს. დიუფემ დაამტკიცა, რომ არსებობს ორი ნიშნის ელექტრობა. ერთი ნიშნის ელექტრობა ჩნდება მინაზე, თუ მას კატის ბუწვით გავხეხავთ, ხოლო მეორე ნიშნის ელექტრობა – ფისზე, თუ მას იმავე ბუწვით გავხეხავთ. მინაზე გაიწეილ ელექტრობას დადებითი უწოდეს, ხოლო ფისზე – უარყოფითი.

1753 წელს დადგენილ იქნა ელექტროსტატიკური ინდუქციის მოვლენა ე.ი. ელექტრიზაცია გავლენით. ამავე დროს აიგო პირველი ხახუნის ელექტრული მანქანა **ოტო ფონ ჰერიკეს** მიერ.

ანეე დამოუკიდებლად აღმოაჩინა ერთი და იმავე ნიშნის მუხტის მქონე სხეულების ურთიერთგანზიდვის უნარი.

ელექტრული მოვლენების ძირითადი ფაქტების აღმოჩენასა და დადგენასთან ერთად იქმნებოდა და ვითარდებოდა წარმოდგენები და შეხედულებანი ელექტრობის ბუნების შესახებ. პირველი მეცნიერული წარმოდგენა ელექტრობის რაობის შესახებ გამოთქვა მე-18 საუკუნეში ამერიკელმა ფიზიკოსმა **ბენჯამინ ფრანკლინმა**. ამ შეხედულებების თანახმად, ელექტრობა უწონად სითხეს წარმოადგენს (რადგანაც ელექტრიზაციით სხეულის წონა არ იცვლება).



ბენჯამინ ფრანკლინი

ფრანკლინის თანახმად, ამ სითხის შემადგენელი ნაწილაკები განიზიდება ერთმეორისაგან, ხოლო ნივთიერი სხეულები კი იზიდავს მათ. ორი სხეულის შეხებისას ელექტრული სითხე გადაედინება ერთი სხეულიდან მეორეში, რის შედეგადაც ერთი სხეული ჭარბ ელექტრულ სითხეს იღებს (იმუხტება დადებითად), ხოლო მეორე ნაკლებს (იმუხტება უარყოფითად). ეს ჰიპოთეზა ფაქტებისა და მოვლენების ახსნაში მთელ რიგ წინააღმდეგობას წააწყდა. ამის გამო **სიმერმა** გამოთქვა სხვა აზრი ელექტრობის ბუნების შესახებ. მისი აზრით, არსებობს ორგვარი ელექტრული სითხე - დადებითი და უარყოფითი. დადებითი სითხის სიჭარბე სხეულს დადებით მუხტს ანიჭებს, უარყოფითი სითხის სიჭარბე - უარყოფით მუხტს. ერთი და იმავე რაოდენობის დადებითი და უარყოფითი ელექტრული სითხეები აბათილებს ერთმანეთს. ეს შეხედულებებიც წინააღმდეგობას წააწყდა მთელ რიგ საკითხებში. ყველა ამ შეხედულებას ელექტრობის ბუნების შესახებ მხოლოდ ისტორიული მნიშვნელობა აქვს და სრულიად არ შეესაბამება თანამედროვე თეორიას.

1745 წელს შეიქმნა პირველი ელექტრული კონდენსატორი. 1791 წელს **ლუიჯი გალვანი** გამოაქვეყნა თავისი აღმოჩენა ბიოელექტრული მოვლენების შესახებ (ელექტრული სიგნალები ნერვულ და კუნთოვან ქსოვილს შორის). 1785 წელს **შარლ კულონმა** ექსპერიმენტულად დაადგინა ელექტრული მუხტების ურთიერთქმედების კანონი. თუთიის და სპილენძის ფირფიტებისაგან შექმნილმა **ალესანდრო ვოლტის** ელემენტმა (1800 წ) მისცა მეცნიერებს ელექტრული ენერგიის რეალური წყარო.

მე-19 საუკუნის დასაწყისისთვის დამახასიათებელია ელექტრული მოვლენების შემსწავლელი მეცნიერების სწრაფი პროგრესი. ელექტრული და მაგნიტური მოვლენების საერთო ბუნება და ელექტრომაგნეტიზმის ცნება შემოიტანა **იქნა პანს ჰისტიან ერსტედის** და **ანდრე-მარია ამპერის** მიერ (1819-1820 წწ). ერსტედმა ემპირიულად აღმოაჩინა ელექტრომაგნიტური ურთიერთქმედება: გამოავლინა დენიანი გამტარის ახლოს მდებარე კომპასის ისრის რხევა. პირველად, იმ დროისათვის ორი სრულიად განსხვავებული მოვლენა დაკავშირებულ იქნა ერთმანეთთან. ამპერმა დაადგინა, რომ კავშირი ელექტრობასა და მაგნეტიზმს შორის ელინდება მხოლოდ ელექტრული დენის შემთხვევაში (მოძრავი ელექტრული მუხტი) და არა სტატიკური

ელექტრობის შემთხვევაში. ერსტედის და ამპერის გამოკვლევების საფუძველზე *მიხაელ ფარადეიმ* აღმოაჩინა ელექტრომაგნიტური ინდუქცია (1831 წ) ელექტროლიზის კანონები (1834 წ). შემოიტანა ელექტრული და მაგნიტური ველების ცნებები, ელექტრომაგნიტური ინდუქციის მოვლენის საფუძველზე შექმნა მსოფლიოში პირველი ელექტრული ენერგიის გენერატორი. ამ გამოკვლევების საფუძველზე ელექტრობა და მაგნიტიზმი გაერთიანდა მეცნიერების ახალ დარგად - ელექტრომაგნიტიზმად.



მიხაელ ფარადეი

ჯოულის, *ლენცის* და *ომის* ელექტრული დენისადმი მიძღვნილი შრომები, ელექტროსტატიკური ეელის ძირითადი თეორია, შემოთავაზებული *გაუსის* მიერ (1830), *ფარადეის* მიერ შემოთავაზებული ელექტრული და მაგნიტური ველების ცნება, მის მიერ აღმოჩენილი ელექტრომაგნიტური ინდუქცია (1831) და ელექტროლიზის კანონები (1834), იყო ის ფუნდამენტური აღმოჩენები, რომლებმაც უმნიშვნელოვანესი როლი შეასრულეს ელექტრობის თეორიის და, ზოგადად, მეცნიერების განვითარებაში.



ჯეიმს კლერკ მაქსველ
1831-1879

ელექტრომაგნიტიზმისადმი მიძღვნილი კვლევები დააგვირგვინა *მაქსველის* თეორიამ ელექტრომაგნიტური ურთიერთქმედებების შესახებ. მან გამოიყვანა განტოლებები, რომლებითაც დააკაშირა ელექტრული და მაგნიტური ველების მახასიათებლები (1873 წ.). ამ განტოლებებს ენიჭება უდიდესი მნიშვნელობა მეცნიერებისა და პრაქტიკისთვის, როგორც ელექტრონაგნიტური მოვლენების მათემატიკურ საფუძვლებს.

შემდგომში, მე-19 საუკუნის დასასრულს, *ნიალა ტესლას* (ცელადი დენის წყარო). *თომას ედისონის* (ელექტროკომუნიკაციები). *გერნერ ფონ სიმენის* (ელექტრული და ტელეკომუნიკაციური მოწყობილობების კომპანიის დამფუძნებელი), *ალექსანდრე გრამამ ბელისა და ლორდ კელვინის* (პირველი პრაქტიკული ტელეფონი) აღმოჩენებითა და გამოგონებებით საფუძველი ჩაეყარა მეორე ინდუსტრიულ რევოლუციას.

ელექტრულ მოვლენებს ბაღზე მნიშვნელოვანი როლი ენიჭება ცოცხალი ორგანიზმების ცხოველქმედებაში, ორგანიზაციის ყველა დონეზე (ერთჯერდებიანიდან რთულ, მრავალჯერდიან ორგანიზმებამდე).

რაში მდგომარეობს ცოცხალი ორგანიზმის ელექტრული თვისებები?

როგორ კითხარდება ელექტრული მოვლენები ცოცხალ ორგანიზმში?

როგორი კავშირია ცოცხალი და არაცოცხალ ობიექტებში მიღწიარე ელექტრულ პროცესებს შორის? რა აქვთ მათ საერთო, განმასხვავებელი?

იმისათვის, რომ ეუპასუხოთ ამ და სხვა მრავალ კითხვას უპირველესად განვიხილოთ ელექტრობის ზოგიერთი ფუნდამენტური ცნება, მახასიათებელი პარამეტრი და მათი მნიშვნელობა.

IV.2 ელექტრობის ძირითადი ცნებები და კანონები

ჩვენ შევისწავლით ელექტრულ მოვლენებს თანამედროვე შეხედულებათა საფუძვლებზე, მოვლენებისა და ფაქტების აღწერა მთლიანად დაეყრდნობა ელექტრობის ბუნების შესახებ არსებულ თანამედროვე შეხედულებებს, რომლებიც ფიზიკის ისტორიული განვითარების შედეგად დაგროვდა.

თანამედროვე შეხედულება ელექტრობის ბუნების შესახებ ეყრდნობა იმ ფაქტს, რომ ბუნებაში არსებული ყველა სხეულის შემადგენელი ატომები და მოლეკულები შეიცავენ დადებით და უარყოფით ელექტრულ მუხტს (პროტონებს და ელექტრონებს) და აგრეთვე უმუხტო ნაწილაკებს, ნეიტრონებს. ხახუნით სხვადასხვა ნივთიერების დამუხტვისას (მათი ზედაპირული ატომების ან მოლეკულების დაახლოებისას 10^{-8} სმ-ის მანძილზე) ერთი სხეული იმუხტება დადებითად, ხოლო მეორე – უარყოფითად. დადებითად იმუხტება ის სხეული, რომლის ატომის გარე შრეზე მოძარევი ელექტრონი გადადის მეორე სხეულზე. მეორე სხეულში იქმნება ელექტრონების სიჭარბე. იგი იმუხტება უარყოფითად, რადგან ელექტრონის მუხტი უარყოფითია ($e = -1.6 \cdot 10^{-19}$ კ). მუხტი არის ელექტრონის ერთ-ერთი ძირითადი თვისება. ბუნებაში არ არსებობს ელექტრონის მუხტზე უფრო მცირე მუხტი.

სეულებრივ, ატომი ელექტრულად ნეიტრალურია. ე.ი. პროტონების მუხტების ჯამი ელექტრონების მუხტების ჯამის ტოლია. რადგან პროტონის მუხტი სიდიდით ელექტრონის მუხტის ტოლია, ეს ნიშნავს, რომ ნეიტრალური ატომი შეიცავს პროტონებისა და ელექტრონების ტოლ რიცხვს. ცხადია, სხეული, რომელიც ასეთი ატომებისაგან შედგება, ელექტრონეიტრალური (დაუმუხტავი) იქნება.

პროტონის მუხტი $+$ -ს, ხოლო ელექტრონის მუხტი $-$ -ს ტოლია (უნდა აღინიშნოს, რომ პროტონის მასა გაცილებით დიდია ელექტრონის მასასთან შედარებით და ელექტრონების მუხტი $-e$ პირობით ერთეულადაა მიჩნეული).

*დღეისათვის აღმოჩენილი ზოგიერთი არასტაბილური ელემენტარული ნაწილაკის მუხტი ელექტრონის მუხტის წილად ნაწილია, მაგრამ მათი სიცოცხლის ხანგრძლივობა წამის მხოლოდ მეშვიშორედ ნაწილს შეადგენს. მხოლოდ პროტონებსა და ელექტრონებს შეუძლია არსებობა ხანგრძლივი დროის განმავლობაში.

მოსაზრება მუხტების დისკრეტულობის შესახებ პირველად შემოგვთავაზა ფარადეიმ (ფარადეის თეორია ელექტროლოზის შესახებ). მან დაადგინა, რომ ერთეულენტიანი იონების 1 მოლის (1 M) მუხტი 9 6485 კულონის ტოლია: ეს რიცხვი ცნობილია ფარადეის რიცხვის სახელწოდებით ($F = 9\,6485$ კ).

თუ ფარადეის რიცხვს გავყოფთ 1 მოლში არსებული იონების რაოდენობაზე (ავოგადროს რიცხვი N) მივიღებთ ერთეულენტიანი იონის მუხტის აბსოლუტურ მნიშვნელობას (ე.ი. სიდიდით ელექტრონის მუხტს) :

$$E = F/N = 1.6021 \cdot 10^{-19} \text{ კ}$$

აუცილებელია აღინიშნოს, რომ არ არსებობს მუხტი ნაწილაკის გარეშე. მაგრამ არსებობს ნაწილაკი მუხტის გარეშე (ნეიტრონი). ჩაკეტილ (იზოლირებულ) სისტემაში ყველა ნაწილაკის მუხტების ალგებრული ჯამი მუდმივია ან უდრის ნულს, თუ სისტემა წონასწორობაშია. ე.ი.:

$$q_1 + q_1 + q_2 + q_3 + q_4 + \dots + q_n = \text{const}$$

SI სისტემაში ელექტრული მუხტის ერთეულად მიღებულია **კულონი** (განმარტება იხილეთ ქვემოთ).

ელექტროსტატიკური ინდუქციის მოვლენა (გავლენით ელექტრიზაცია) აიხსნება მარტივად: როდესაც რაიმე ელექტრულად ნეიტრალურ სხეულს მიეუახლოვებთ დამუხტულ სხეულს, მის უახლოეს ნაწილში "ჩნდება" დამუხტული სხეულის მუხტის საპირისპირო ნიშნის მუხტი. რადგან პროტონები ატომის ბირთვშია, თავისუფლად მხოლოდ ელექტრონებს შეუძლია გადაადგილება, ამიტომ სხეულის ამ ნაწილში გვეჩვენება ან ელექტრონების სიჭარბე (თუ მას უუახლოვებთ დადებით მუხტს), ან ელექტრონების ნაკლებობა (თუ მას უარყოფით მუხტს ეუახლოვებთ). პირველ შემთხვევაში სხეულის ეს უბანი უარყოფითად იმუხტება, მეორე შემთხვევაში დადებითად, თუმცა ამ სხეულის მუხტების საერთო ჯამი არ იცვლება, მხოლოდ მუხტები გადაწარმოვდება სხეულში.

მუხტებს შორის ურთიერთქმედებას ჩვენ შესაძლევია შევხებით. რაოდენობრივი შეფასება ამ ურთიერთქმედებისა მხოლოდ მე-18 საუკუნეში გახდა შესაძლებელი.

IV.2.1 ელექტროსტატიკა

კულონის კანონი.

ელექტროსტატიკა სწავლობს უძრავ მუხტებს, მათ ურთიერთქმედებას და ელექტრობის წარმოშობის პირობებს. 1785 წელს ფრანგმა მეცნიერმა **კულონმა** დაადგინა ელექტროსტატიკის ძირითადი კანონი, რომლის მიხედვით ვაკუუმში ორი წერტილოვანი მუხტი ერთმანეთს იზიდავს (ან განიზიდავს) ძალით, რომელიც პირდაპირპროპორციულია ამ მუხტების სიდიდის ნამრავლისა და უკუპროპორციულია მათ შორის მანძილის კვადრატისა, მიმართულია მათი ცენტრების შემაერთებელი წრფის გასწვრივ (სურათი 131).

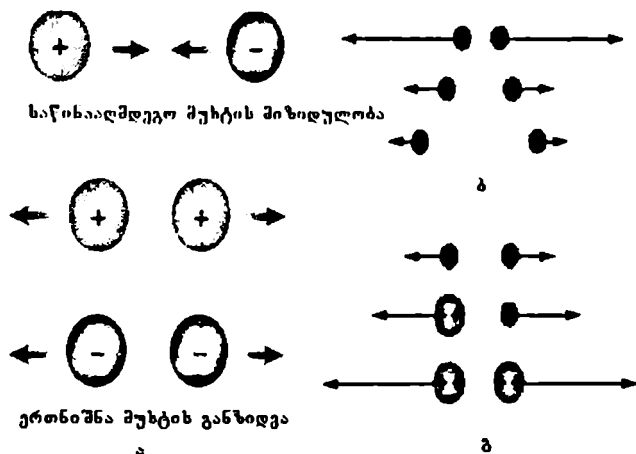
$$F_0 = k \frac{q_1 q_2}{R^2} \quad (\text{IV.2.1.1})$$

$$k - \text{პროპორციულობის კოეფიციენტი}; \quad k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9 \times 10^9 \frac{\text{ფძ}^2}{\text{კ}^2} \quad (\text{SI სისტემაში});$$

$$\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \frac{\text{კ}^2}{\text{ფძ}^2} - \text{ელექტრული მუდმივაა.}$$



ოგიუსტენ კულონი



სურათი 131

ა - ერთნაირი ნიშნით დამუხტული სხეულები განიზიდება, საპირისპიროდ დამუხტული სხეულები მიიზიდება. კულონის კანონის თანახმად, მუხტებს შორის ურთიერთქმედების ძალა ამ მუხტებს შორის მანძილის კვადრატის უკუპროპორციული (ბ) და მუხტების სიდიდის პირდაპირპროპორციულია (გ)

თუ მუხტებს შორის ურთიერთქმედება განიხილება რაიმე გარემოში, მაშინ ურთიერთქმედების ძალა მცირდება და კულონის კანონი ჩაიწერება შემდეგნაირად:

$$F_0 = k \frac{q_1 q_2}{\varepsilon R^2},$$

სადაც ε – გარემოს ფარდობითი დიელექტრული შეღწევადობაა და გეიგერებს, თუ რამდენჯერ მცირდება ურთიერთქმედების ძალა (F) მოცემულ გარემოში ვაკუუმიდან შედარებით: $\varepsilon = \frac{F_0}{F}$. ფარდობითი დიელექტრული შეღწევადობა

სუფთა წყლისათვის $\varepsilon \approx 81.1$, მინისათვის $\varepsilon \approx 5 - 7$, ლითონისთვის $\varepsilon \approx 3.5$.

უნდა აღინიშნოს, რომ კულონის კანონი ფუნდამენტური კანონია და ის არ გამოდინარეობს ფიზიკის არც ერთი კანონიდან. კულონის კანონი საშუალებას იძლევა დავადგინოთ მუხტის ერთეული. დაეუშვათ, რომ $q_1 = q_2 = q$, მაშინ:

$$F_0 = k \frac{q^2}{R^2}$$

$$q^2 = R \sqrt{\frac{F_0}{k}}, \quad (\text{IV.2.1.2})$$

საიდანაც გამოდინარეობს, რომ ელექტრული მუხტის აბსოლუტური ერთეული არის ისეთი მუხტი, რომელიც ვაკუუმში 1 სმ-ით დაშორებულ თავის ტოლ მუხტზე მოქმედებს 1 დნ* (დინი = 10^{-5} ნ) ძალით (ვაკუუმში $k = 1$)

. ამ ერთეულს მუხტის აბსოლუტურ ელექტროსტატიკურ ერთეულს უწოდებენ (1 CGSEq)**. პრაქტიკაში გაცილებით დიდ მუხტებთან გვაქვს საქმე. ამიტომ მუხტის უფრო დიდი ერთეულია შემოღებული. SI სისტემაში მას კულონს უწოდებენ და იგი წარმოებული ერთეულია (ძირითადი ერთეულია ამპერი)***:

$$1 \text{ კ} = 1 \text{ ა} \times 1 \text{ წმ}$$

$$1 \text{ კ} = 3 \cdot 10^9 \text{ CGSEq.}$$

როგორც ვიცით, SI სისტემაში ელექტრომაგნიტური სიდიდეებისათვის ძირითად ერთეულებს ემატება ამპერი ($1 \text{ ა} = \frac{1 \text{ კ}}{1 \text{ წმ}}$). ფორმულიდან $I = \frac{q}{t}$, $q = It$,

აქ q წარმოებული ერთეულია. იგი არ გამოდინარეობს კულონის კანონიდან. ამრიგად: 1 კულონი = 1 ამპერი $\times$ 1 წამი. ე. ი. 1 კულონი მუხტის ის რაოდენობაა, რომელიც გადის გამტარის განიკვეთში 1 წამის განმავლობაში 1 ამპერი დენის დროს.

*დნ – დინი, ძალის ერთეული CGSE სისტემაში. 1 დნ ის ძალაა, რომელიც 1 გ მასის სხეულს ანიჭებს 1 სმ/წმ² აჩქარებას. ე.ი. $1 \text{ კ} = 3 \cdot 10^9 \text{ CGSEq}$ მუხტის აბსოლუტურ ერთეულს.

**CGSE – ერთეულთა სისტემა, სადაც ძირითად ერთეულად მიღებულია სიგრძე – სმ (C), მასა – გრაში (G), დრო – წამი (S), E – ელექტროსტატიკურს აღნიშნავს. E_S – მუხტის ელექტროსტატიკური ერთეული; E_N – ძაბვის ელექტროსტატიკური ერთეული და ა.შ.

***ამპერის განმარტება იქნება მოცემული ელექტრომაგნიტური ინდუქციის მოვლენის შესწავლისას.

ცდით დადგენილია, რომ ერთი კულონი მუხტი ვაკუუმში 1 მეტრით დაშორებულ თავის ტოლ მუხტზე მოქმედებს ძალით $F = 9 \times 10^9$ ნ. ადვილად დაუკაემშირებთ მუხტის SI და CGSEq ერთეულებს. მართლაც:

$$q = \sqrt{FR^2} = \sqrt{9 \cdot 10^9 \cdot 1 \text{ მ}^2} = \sqrt{9 \cdot 10^9 \cdot 10^5 \text{ დნ}^2 \cdot \text{სმ}^2} = \sqrt{9 \cdot 10^{14} \text{ დნ}^2 \cdot \text{სმ}^2} = 3 \cdot 10^7 \text{ CGSEq}$$

ე. ი. $1 \text{ კ} = 3 \cdot 10^7 \text{ CGSEq}$ მუხტის აბსოლუტურ ელექტროსტატიკურ ერთეულს.

ელექტრული მუხტების ურთიერთქმედების კულონის კანონი გრავეიტაციული მიზიდულობის კანონს წააგავს ($F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$), სადაც გრავეიტაციული მუდმივა $G = 6,67 \times 10^{-11} \frac{\text{მ}^3}{\text{კგ} \cdot \text{ს}^2}$), ვინაიდან $G \ll k$, ელექტრული ურთიერთქმედება გრავეიტაციულზე გაცილებით ძლიერია (ცხრილი 19).

ცხრილი 19

შედარება გრავეიტაციულ და ელექტრულ ძალებს შორის

	ელექტროსტატიკური ურთიერთქმედება	გრავეიტაციული ურთიერთქმედება
მსგავსება	მოქმედებს ვაკუუმშიც	მოქმედებს ვაკუუმშიც
	ცენტრისკენაა მიმართული, მუდმივი	ცენტრისკენაა მიმართული, მუდმივი
	მანძილის კვადრატის უკუპროპორციულია	მანძილის კვადრატის უკუპროპორციულია
	ერცედდება სინათლის სიჩქარით (c)	ერცედდება სინათლის სიჩქარით (c)
	ძლიერია	შესტია
განსხვავება	ერთნიშნა მუხტებს	ნებისმიერი მასები
	განიზიდავს	მიზიდება
	არსებობს როგორც დადებითი, ასევე უარყოფითი მუხტი	უარყოფითი მასა არ არსებობს
	როგორც მიზიდულობის, ასევე განზიდვის ძალაა	ყოველთვის მიზიდვის ძალაა
	მუხტი მუდმივია	ფარდობითი მასა მუდმივი არ არის

ელექტრული განზიდვის ძალა ორ ელექტრონს შორის 1042-ჯერ აღემატება მათ შორის გრავეიტაციული მიზიდულობის ძალას. ცხრილში 19 მოცემულია შედარება გრავეიტაციულ და ელექტრულ ძალებს შორის. გრავეიტაციული ძალები მოქმედებს კოსმოსურ მანძილებზე, მაშინ, როდესაც ელექტრული ძალები მოქმედებს ჩვენს გარშემო არსებულ სხეულებზე და

ვლინდება მოკლე მანძილზე ატომურ, ასევე თუნდაც ელექტრულად ნეიტრალურ სხეულებში. აქედან გამომდინარე, შეგვიძლია დავასკვნათ, რომ დიდი მასის მქონე სხეულებს (პლანეტები) შორის მოქმედი ელექტრული ურთიერთქმედების ძალა ნულის ტოლია, ხოლო გრავიტაციული ძალა თავისი შედარებითი სისუსტის მიუხედავად დომინირებს და პლანეტებს გააჩნია მკაცრად განსაზღვრული ორბიტა.

ელექტრული ველი, ელექტრული ველის დაძაბულობა.

მოსაზრება ელექტრული ველის შესახებ შემოთავაზებულია ფარადეის მიერ. ელექტრული ველი წარმოიქმნება დამუხტული სხეულის მიერ გარემოში და ვლინდება ძალით, რომელიც მოქმედებს ამ ველში შეტანილ სხვა მუხტზე.

ფარადეიმ გამოთქვა აზრი იმის შესახებ, რომ ელექტრული მუხტები უშუალოდ *ერთმანეთზე არ მოქმედებს*, ყოველი მათგანი თავის გარშემო სივრცეში ქმნის ელექტრულ ველს და ერთმანეთზე მოქმედებს ამ მუხტების ველები. ამის შემდეგ მაქსველმა თეორიულად დაამტკიცა, რომ ასეთი ურთიერთქმედება სივრცეში ვრცელდება განსაზღვრული სიჩქარით. ველის შესწავლისას ვხვდებით მატერიის განსაკუთრებულ ფორმას, რომლის მოძრაობა არ ემორჩილება ნიუტონის კანონებს. ელექტრული ველის აღმოჩენის შემდეგ გაჩნდა მოსაზრება, რომ არსებობს მატერიის სხვადასხვა ფორმა და თითოეული მათგანი ემორჩილება თავის კანონებს.

უძრავი ელექტრული მუხტებით შექმნილ ელექტრულ ველს, რომელიც დროის მიხედვით უცვლელი რჩება, *ელექტროსტატიკური* ველი ეწოდება.

ელექტრულ ველს ახასიათებენ ორი სიდიდით: ძალური მახასიათებლით (*დაძაბულობა E*) და ენერგეტიკული მახასიათებლით (*ველის პოტენციალი - φ*).

ცხადია, ეს მახასიათებლები უნდა ასახავდეს მხოლოდ ელექტრულ ველს და არ უნდა იყოს დამოკიდებული სხვა ფაქტორებზე.

ველის მახასიათებლის დადგენა შეიძლებოდა იმ ძალის მიხედვით, რა ძალითაც იგი იმოქმედებდა მასში შეტანილ რაიმე *q* მუხტზე. მაგრამ კულონის კანონიდან გამომდინარე, ეს ძალა არა მხოლოდ მუხტებს შორის მანძილზეა დამოკიდებული, არამედ თვითონ შეტანილი მუხტის სიდიდესზეც. ამიტომ ამ ძალის შეფარდება შეტანილი მუხტის სიდიდესთან, ველის ამ წერტილში მუდმივი იქნება და იგი ახასიათებს ველს:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q} \quad (\text{IV.2.1.3})$$

E - ს ელექტრული ველის დაძაბულობას უწოდებენ.

თუ $q = +1$, $E = F$. ე. ი. *დაძაბულობა იმ ძალის ტოლია, რომლითაც ველი იმოქმედებს ამ წერტილში შეტანილ ერთეულოვან დადებით მუხტზე*. SI სისტემაში მისი ერთეულია $[E] = \frac{16}{13}$. ნებისმიერი წერტილოვანი მუხტის

ელექტრული ველის დაძაბულობა ვაკუუმში მისგან რაიმე *R* მანძილზე გამოითვლება ფორმულით:

$$E = \frac{F}{q} = \frac{\frac{kqq_0}{R^2}}{q} = \frac{q_0}{4\pi\epsilon_0 R^2} \quad (k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0})$$

სადაც q_0 მუხტია, რომელიც ქმნის ელექტრულ ველს, q - შეტანილი მუხტი.

თუ ელექტრული ველი შექმნილია რამდენიმე მუხტით, მაშინ ველის დაძაბულობა რაიმე წერტილში ტოლია ამ წერტილში თითოეული მუხტის მიერ შექმნილი ველის დაძაბულობათა ვექტორული ჯამისა:

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \dots + \vec{E}_n$$

(ველის სუპერპოზიციის პრინციპი)

ველის ვიზუალიზაციისათვის შემოტანილია *ძალწირების* (ძალხაზების) ცნება. წირს, რომლის ყოველ წერტილში დაძაბულობას მისდამი მხეების მიმართულება აქვს, *ძალწირი* ეწოდება. ძალწირები გამოდის დადებითი მუხტიდან და შედის უარყოფით მუხტში.

132-ე სურათზე ნაჩვენებია ცალკე დადებითი და ცალკე უარყოფითი მუხტებით შექმნილი ელექტრული ველის ძალწირები. 133-ე სურათზე კი ერთმანეთთან ახლოს მდებარე დადებითი და უარყოფითი მუხტების (133ა) და ორი დადებითი მუხტის მიერ შექმნილი ელექტრული ველი (133ბ).

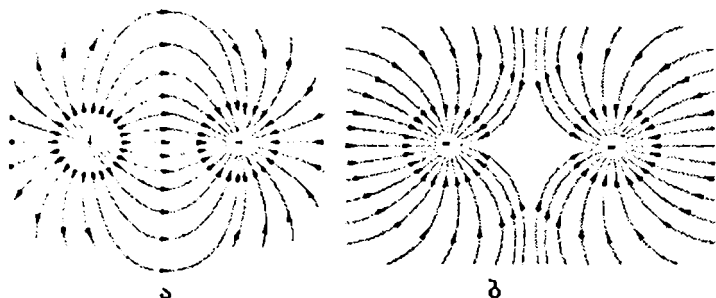


სურათი 132

ელექტრული ველის ძალხაზები ყოველთვის გამოდის დადებითი მუხტიდან და შედის და თავდება უარყოფით მუხტში

აღსანიშნავია, რომ ძალწირები ერთმანეთს არასოდეს გადაკვეთს, რადგან გადაკვეთა ნიშნავს, რომ თითოეულ ძალწირზე შეიძლება თავისი მხეების გავლება (ე.ი. ველის ერთი და იმავე წერტილს ორი სხვადასხვა დაძაბულობა შეესაბამება), რაც დაუშვებელია! როგორც სურათებიდან ჩანს, წერტილოვანი მუხტების ძალწირების ყოველ წერტილში შეიძლება გავავლოთ მხეები და,

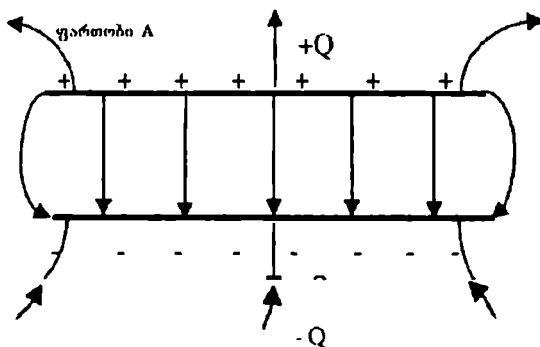
მაშასადამე, ველის სხვადასხვა წერტილში დაძაბულობაც იქნება სხვადასხვა. ასეთ ველს *არაერთგვაროვან ველს* უწოდებენ.



სურათი 133

ელექტრული ველის ძალხაზები
სხვადასხვა ნიშნის (ა) და ერთნაირი ნიშნის (ბ) წერტილოვანი მუხტების
ელექტრული ველი გამოსახული ძალწირებით

ველს, რომლის ყოველ წერტილში დაძაბულობას ერთი და იგივე სიდიდე და მიმართულება გააჩნია, *ერთგვაროვანი ველი* ეწოდება ($E = const$). ასეთი ველია დამუხტული კონდენსატორის შიგნით (სურათი 134).



სურათი 134

ელექტრული ველი, სხვადასხვა ნიშნით (+Q და -Q) დამუხტულ ორ გამტარ ფირფიტას (კონდენსატორი) შორის ფირფიტებს შიგნით ველი ერთგვაროვანია (ძალწირები პარალელურია), კიდურა უბანში – არაერთგვაროვანი (მრუდი წირები)

შეგნიშნოთ, რომ ერთგვაროვანი ველი პარალელური ძაღწირებით გამოისახება და აგრეთვე, შეთანხმებისამებრ, იქ, სადაც რაიმე ერთეულოვანი ფართობის გამჭოლი ძაღწირების რიცხვი მეტია, ველი უფრო ძლიერია. მართლაც, წერტილოვანი მუხტის ახლოს (სურათი 132, 133) ძაღწირების რიცხვი უფრო მეტია, ეიდრე მისგან მოშორებით, შესაბამისად, ველიც უფრო ძლიერია.

ელექტრული ველის პოტენციალი; პოტენციალთა სხვაობა.

როგორც ზემოთ აღვნიშნეთ, ელექტრული ველის ენერგეტიკული მახასიათებელი *პოტენციალია*. ელექტრული ველის მიერ მუხტის გადატანაზე სრულდება მუშაობა. ეს მუშაობა (ისევე, როგორც გრავიტაციულ ველში) არ არის დამოკიდებული ტრანექტორიის ფორმაზე (იგი მხოლოდ ტრანექტორიის საწყის და საბოლოო წერტილის მდებარეობაზეა დამოკიდებული).

ველის ორ წერტილს შორის ელექტრული ძაღების მიერ ერთეულოვანი დადებითი მუხტის გადატანაზე შესრულებული მუშაობის რიცხვით მნიშვნელობას ამ ორ წერტილს შორის *პოტენციალთა სხვაობას* ან ძაღვას უწოდებენ. თუ მეორე წერტილად უსასრულობას ავირჩევთ (ე. ი. $E \rightarrow 0$), მაშინ შეგვიძლია დავწეროთ :

$$\phi_1 = \frac{A_{1\infty}}{q},$$

სადაც ϕ_1 - "1" წერტილის პოტენციალია, $A_{1\infty}$ - მუშაობა, რომელიც "1" წერტილიდან უსასრულობაში q მუხტის გადატანაზე სრულდება. ცხადია, $A_{1\infty}$ დამოკიდებულია გადასატანი მუხტის სიდიდეზე, მაგრამ შეფარდება $\frac{A_{1\infty}}{q}$ უკვე

არაა დამოკიდებული q -ზე და ახასიათებს ველის მოცემულ წერტილს. ამრიგად, მოცემულ წერტილში ველის პოტენციალი ტოლია ამ წერტილიდან უსასრულობაში ერთეულოვანი მუხტის გადატანაზე შესრულებული მუშაობისა. როგორც ამ მსჯელობიდან ჩანს, პოტენციალი ფარდობითი სიდიდეა, იგი დამოკიდებულია ენერგიის ნულოვანი დონის არჩევაზე. ველის ორ წერტილს შორის პოტენციალთა სხვაობა კი უკვე არაა დამოკიდებული ათვლის წერტილის არჩევაზე და მას ფიზიკური აზრი და პრაქტიკული მნიშვნელობა გააჩნია. ელექტრულ ველში ორ წერტილს შორის q მუხტის გადატანაზე სრულდება მუშაობა :

$$A = q U,$$

სადაც U - ამ წერტილებს შორის პოტენციალთა სხვაობაა.

$$U = \phi_1 - \phi_2 = \frac{A}{q} \quad (\text{IV } 2.1.4)$$

SI სისტემაში პოტენციალთა სხვაობის (ასევე პოტენციალის) ერთეულად მიღებულია ვოლტი. ერთი ვოლტი პოტენციალთა ის სხვაობაა, როცა სრულდება 1 ჯოული მუშაობა ერთი კულონი მუხტის გადატანაზე ($1 \text{ ვ} = \frac{1 \text{ ჯ}}{1 \text{ კ}}$).

როგორც ფორმულებიდან ჩანს, პოტენციალი (პოტენციალთა სხვაობა) სკალარული სიდიდეა. წერტილოვანი q მუხტის პოტენციალი მისგან R მანძილზე SI სისტემაში გამოიხატება ასე :

$$\phi = \frac{q}{4\pi\epsilon_0\epsilon R} , \quad (\text{IV } 2.1.5)$$

სადაც ϵ - გარემოს დიელექტრული შეღწევადობაა (ვაკუუმისთვის $\epsilon = 1$).

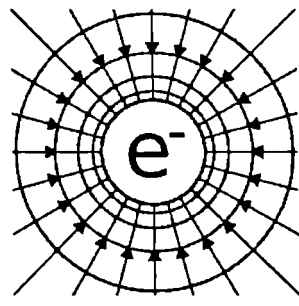
ელექტრული ველის ორ მაჩასიათებელ სიდიდეს შორის კავშირი ასე გამოიხატება :

$$\vec{E} = - \frac{d\phi}{dr}$$

$\frac{d\phi}{dr}$ სიდიდეს *პოტენციალის გრადიენტი* (*grad*) ეწოდება (ანუ, პოტენციალის ცვლილება მანძილის ერთეულზე). ნიშანი „-“ მიუთითებს იმაზე, რომ დაძაბულობის (E) ვექტორი მიმართულია პოტენციალის შემცირებისკენ. მაშასადამე, $E = \text{grad } U$.

თუ ველი ერთგვაროვანია ($E = \text{const}$, როგორც ვიცით, ასეთ ველს ქმნის დამუხტული ბრტყელი კონდენსატორი, სადაც U კონდენსატორის ფირფიტებს შორის პოტენციალთა სხვაობაა), მაშინ $E = \frac{U}{r}$ (r - ფირფიტებს შორის მანძილი). ეს ფორმულა გეიხევენებს კავშირს პოტენციალსა და დაძაბულობას შორის ერთგვაროვან ველში.

ზედაპირს, რომლის ყველა წერტილს ერთნაირი პოტენციალი გააჩნია, *ეკვიპოტენციური ზედაპირი* ეწოდება (სურათი 135).



სურათი 135

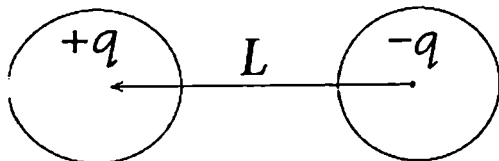
წერტილოვანი მუხტის (e^-) ელექტრული ველის პოტენციალი მისგან სხვადასხვა მანძილზე (ნახაზზე მოცემულია რამდენიმე სფერული ზედაპირის ჭრილი (კონცენტრიული წრეწირები), სადაც პოტენციალები ერთნაირია (ეკვიპოტენციური ზედაპირები))

ელექტრული დიპოლი.

ერთმანეთისაგან l მანძილით დაშორებულ ორ ტოლ და საპირისპირო ნიშნის მუხტებისაგან შედგენილ სისტემას ელექტრულ დიპოლს უწოდებენ (სურათი 136). l -ს დიპოლის მხარს უწოდებენ, იგი ვექტორია, მიმართულია უარყოფითი მუხტიდან დადებითისაკენ. ელექტრული დიპოლის ძირითად მახასიათებელ სიდიდეს ელექტრულ მომენტს (ან დიპოლურ მომენტს) უწოდებენ:

$$\vec{P} = |q| l \quad (\text{IV 2.1.6})$$

P - ვექტორია, იგი l -ის გასწვრივაა მიმართული.



$$\vec{P} = \vec{l} |q|$$

სურათი 136

ელექტრული დიპოლი.

q - დიპოლის მუხტი; P - დიპოლის მომენტი; l - დიპოლის მხარი

დიპოლი ძალიან გავრცელებულია ბუნებაში; დიპოლი გვხვდება ატომებსა და მოლეკულებში, სადაც მუხტის გაყოფის ეფექტი გაზომვადია, მაგრამ მანძილი მუხტებს შორის ძალზე მცირეა. დიპოლის სტრუქტურა გააჩნია ამფოლიტიკურ მოლეკულებს, რომლებიც მათი სტრუქტურის სხვადასხვა უბანში ერთდროულად დადებითი და უარყოფითი მუხტების მატარებლები არიან; დიპოლი წარმოიქმნება აგრეთვე კოვალენტური ბმების პოლარიზაციის შედეგად. ცხრილში 20 მოყვანილია სხვადასხვა მოლეკულის დიპოლური მომენტების და დიპოლური მხრების მნიშვნელობები.

დიპოლი ელექტრულ ველში.

ვინაიდან დიპოლი ასე გავრცელებულია ბუნებაში (როგორც ცოცხალ, ისე არაცოცხალ სისტემებში), ბუნებრივია, ჩნდება ინტერესი, თუ როგორ მოქმედებს მასზე სხვადასხვა ფიზიკური ფაქტორი, რა შედეგი მოაყვება ამ ზემოქმედებას.

დავიწყოთ მარტივი კითხვით: როგორია ერთგვაროვანი ველის მოქმედება ელექტრულ დიპოლზე?

ვთქვათ, დიპოლი მუხტით q მოვათავსეთ ერთგვაროვან ელექტრულ ველში, რომლის დაძაბულობაა E ისე, რომ მისი მხარი (l) E ვექტორთან ადგენს რაღაც θ კუთხეს (სურათი 137). $-q$ მუხტზე ველის მხრიდან მოქმედებს ძალა $F_1 = -qE$,

ხოლო $+q$ -ზე კი $F_2 = +qE$. როგორც ნახაზიდან ჩანს, ეს ძალები სიდიდით ერთმანეთის ტოლია ($|F_1| = |F_2|$) და მიმართულია ურთიერთსაწინააღმდეგოდ. ე.ი. დიპოლზე მოქმედებს მაბრუნებელი მომენტი, რაც იწვევს მის შემობრუნებას საათის ისრის მოძრაობის მიმართულებით.

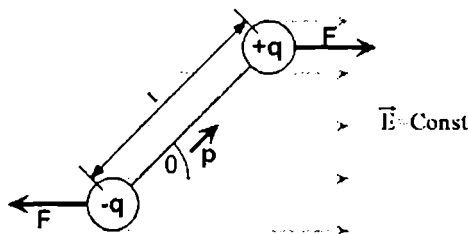
ცხრილი 20

სხვადასხვა მოლეკულის დიპოლური მომენტების და დიპოლური მხრების მნიშვნელობები

	l (მ)	$P \cdot 10^{-30}$ (კმ)
ქლოროფორმი	1.05	3.47
მეთანოლი	1.68	5.54
ჰეპანი	1.85	6.11
შარდოვანა	8.6	28.4
ოსფორიდილქოლინი	20	66
α -სპირალი ($L=1.3$ ნმ)	63.1	208
ჩილეები	100-1000	330-3300
დნმ ხბოს თიმუქსიდან	32 000	105 - 600

მაბრუნებელი მომენტი:

$$M = l |q| E \sin \theta = P E \sin \theta.$$



სურათი 137

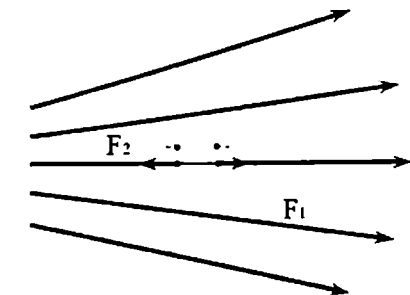
დიპოლი ერთგვაროვან ელექტრულ ველში (l - ით აღნიშნულია დიპოლის მხრის სიგრძე)

ამრიგად, ერთგვაროვან ელექტრულ ველში მოთავსებულ დიპოლზე მოქმედებს მაბრუნებელი მომენტი, რომელიც დამოკიდებულია დიპოლის ელექტრულ მომენტზე ($P = |q| l$) მის ორიენტაციაზე ველში და ველის

დაძაბულობაზე. როცა დიპოლი შემობრუნდება და განთავსდება ველის გასწვრივ ($\theta = 0$), მობრუნებელი მომენტი $M = 0$ და დიპოლზე იმოქმედებენ მხოლოდ ერთმანეთის ტოლი F_1 და F_2 ძალები, რომლებიც ცდილობს დიპოლის გაჭიმვას. აუცილებელია შევნიშნოთ, რომ განხილულ მაგალითში ჩვენ სიმარტივისათვის მხედველობაში არ მიგვიღია თვითონ დიპოლის მიერ შექმნილი ელექტრული ველი, რადგან გარე ველთან შედარებით მისი დაძაბულობა უმნიშვნელოა.

ახლა განვიხილოთ ელექტრული დიპოლი არაერთგვაროვან ელექტრულ ველში (სურათი 138). ამ შემთხვევაშიც დიპოლის მიერ შექმნილი ველი მხედველობაში არ მივიღოთ. სიმარტივისთვის განვათავსოთ დიპოლი ველში ისე, რომ მისი მხარი ძალწირის მიმართულებას ემთხვეოდეს. ასეთ პირობებში დიპოლზე მობრუნებელი მომენტი არ მოქმედებს ($M = 0$). დიპოლის თითოეულ მუხტზე იმოქმედებს ძალები $F_1 = qE_1$, და $F_2 = -qE_2$. რადგან ველი არაერთგვაროვანია - q , და $+q$ -ს მდებარეობის წერტილებში ველის დაძაბულობა იქნება განსხვავებული $E_1 \neq E_2$. თუ გაიხსენებთ ველის ძალწირებით გამოსახვის პრინციპს (სადაც ძალწირების სიმჭიდროვე მეტია, იქ დაძაბულობაც მეტია) სურათის მიხედვით დაასკენით, რომ - q მუხტის მოთავსების წერტილში დაძაბულობა მეტია, ე.ი. $E_2 > E_1$. მაშასადამე, $|F_2| > |F_1|$ და მათი ტოლქმედი მიმართული იქნება F_2 -ის გასწვრივ (სურათზე მარჯვნიდან მარცხნივ).

$$F = F_1 + F_2 = qE_1 + (-qE_2) = -q(E_2 - E_1) \quad (IV.2.17)$$



სურათი 138
დიპოლი არაერთგვაროვან ელექტრულ ველში

ნიშანი (-) მიუთითებს, რომ ძალა დაძაბულობის საპირისპიროდაა მიმართული. დიპოლი დაიწყებს გადატანით მოძრაობას ამ ტოლქმედი ძალის მიმართულებით, სურათზე მარჯვნიდან მარცხნივ.

რადგან ელექტრული ველის დაძაბულობის სიდიდე წერტილიდან წერტილამდე იცვლება, შემოვიტანოთ შეფარდება, $\frac{E_2 - E_1}{l}$, რაც გვიჩვენებს დაძაბულობის ცვლილებას დიპოლის მხრის სიგრძის ერთ ერთეულზე (l - დიპოლის მხარია). ვინაიდან დიპოლის მხარი ნეულებრივ მცირე სიდიდეა, ეს შეიძლება ჩავწეროთ დიფერენციალური ფორმით:

$$\frac{E_2 - E_1}{l} = \frac{dE}{dx}$$

$\frac{dE}{dx}$ - ველის არაერთგვაროვნობის ზომაა (გრადიენტი) x ღერძის გასწვრივ (ანუ, l - ის გასწვრივ). ამრიგად:

$$E_2 - E_1 = l \frac{dE}{dx}$$

თუ ამ გამოსახულებას გაეითვალისწინებთ ტოლქმედი ძალის ფორმულაში (IV.21.7), მივიღებთ:

$$F = q(E_2 - E_1) = q l \frac{dE}{dx} = P \frac{dE}{dx}$$

ამრიგად, დიპოლზე მოქმედებს მაღალი დაძაბულობის წერტილისაკენ მიმართული ძალა, რომელიც მის ელექტრულ მომენტზე (P) და ველის არაერთგვაროვნობის ($\frac{dE}{dx}$) ხარისხზეა დამოკიდებული.

თუ დიპოლი არაერთგვაროვან ელექტრულ ველში იქნებოდა მოთავსებული რაიმე ორიენტაციით ($\theta \neq 0$), მაშინ მასზე იმოქმედებდა ერთდროულად როგორც ზემოთ განხილული ძალა, ასევე მაბრუნებელი მომენტიც, რომელიც მას შემოაბრუნებდა ძალწირის გასწვრივ. ასეთი შემთხვევის დეტალურ განხილვას ართულებს ის გარემოება, რომ ველის არაერთგვაროვნობის გამო მის სხედასხვა წერტილში დაძაბულობები (და შესაბამისად მაბრუნებელი მომენტიც) ცვალებადი იქნება შემობრუნების მთელი დროის განმავლობაში, ამიტომ ამ პროცესის აღწერა უმაღლესი მათემატიკის ელემენტების გარეშე შეუძლებელია.

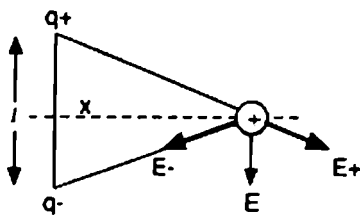
დიპოლის ელექტრული ველი.

ზემოთ ჩვენ განვიხილეთ ელექტრული დიპოლი, რომელიც მოთავსებული იყო ჯერ ერთგვაროვან, და შემდეგ არაერთგვაროვან ელექტრულ ველში. ენახეთ, რომ ველის მხრიდან დიპოლზე მოქმედებს მაბრუნებელი მომენტი და ძალა, რომელიც ცდილობს დიპოლის გადაადგილებას (არაერთგვაროვანი ველის შემთხვევაში).

ხისტი დიპოლები სივრცეში ვერ გადაადგილდება. მათ მხოლოდ ორიენტაციის შეცვლა (მობრუნებით) შეუძლია. ჩვენ მაშინ მივუთითეთ, რომ ეიხილაეთ მხოლოდ გარეშე ველის მოქმედებას დიპოლზე. რადგან დიპოლი დამუხტული ნაწილაკებისაგან შემდგარი სისტემაა, ცხადია, მასაც უნდა გააჩნდეს საკუთარი ელექტრული ველი (სურათი 139). მართლაც, დიპოლისაგან რაიმე მანძილით დაშორებული წერტილის ველის დაძაბულობა ან პოტენციალი რომ ეიპოვოთ, საკმარისია გამოვითვალოთ ამ წერტილში ჯერ ერთი მუხტის

(ეთქვათ $+q$), ხოლო შემდეგ მეორე მუხტის მიერ შექმნილი ველის დაძაბულობა და შეეკრიბოთ ისინი გეომეტრიულად (ვექტორულად):

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$$



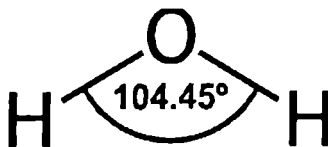
სურათი 139

დიპოლის ელექტრული ველის დაძაბულობა დიპოლის მხარის შუა წერტილიდან რაიმე X მანძილზე (l - მხრის სიგრძე)

ანალოგიურად მოვიცქევით პოტენციალის გამოთვლის შემთხვევაშიც, რადგან ეს საკითხი ჩვენთვის მეტად მნიშვნელოვანია (იგი წარმოადგენს ელექტროკარდიოგრაფიის საფუძველს), უფრო დეტალურად განვიხილავთ მოგვიანებით.

ნივთიერების პოლარიზაცია; წყლის პოლარული მოლეკულა.

პოლარობა - წყლის მოლეკულის მნიშვნელოვანი თვისებაა. წყალი (H_2O) - მარტივი ნაერთია; მისი წონითი შემადგენლობა 11,11% წყალბადს და 88,89% ჟანგბადს შეიცავს. წყლის მოლეკულაში მისი შემადგენელი ატომები წარმოქმნის სამკუთხედს წყალბადის ატომებით ფუძეებში და ჟანგბადის ატომით წვეროში (სურათი 140).

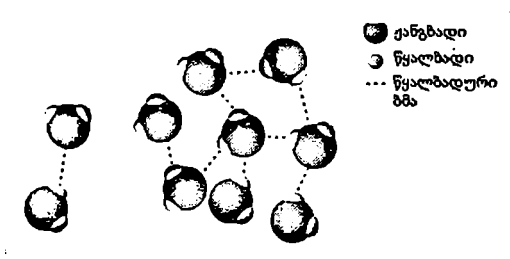


სურათი 140

წყლის დიპოლი

წყლის მოლეკულაში ჟანგბადი წარმოქმნის კოვალენტურ ბმას წყალბადის ატომებთან (ართმევს მათ ელექტრონებს). წყლის მოლეკულაში უარყოფითი

მუხტის (O^{2-}) ცენტრი არ ემთხვევა დადებითი მუხტის (H^{+}) გეომეტრიულ ცენტრს, ამიტომ წყლის მოლეკულა წარმოადგენს დიპოლს. დიპოლში მუხტების გადანაწილება იწვევს წყლის მოლეკულების მიზიდვას, დადებითად დამუხტული ბოლო მიიზიდება უარყოფითად დამუხტულ ბოლოსთან და სხვა პოლარულ მოლეკულებთან; მიზიდულობის ძალების მოქმედება იწვევს მოლეკულებს შორის წყალბადური ბმების წარმოქმნას (სურათი 141) და წყლის მრავალი თვისების (მაგალითად, მისი როგორც კარგი გამხსნელის) მიზეზს წარმოადგენს. წყლის მოლეკულას შეუძლია მაქსიმუმ ოთხი წყალბადური ბმის წარმოქმნა (იხილე სურათი 141), რაც განპირობებულია ამ მოლეკულების ლოკალური ტეტრაჰიდრატული წყობით (იძლევა სტრუქტურის 3-განზომილებიანი კავშირების ქსელის წარმოქმნის საშუალებას). წყლის მოლეკულების ასოციაციები შეიძლება ასე გამოვსახოთ - $(H_2O)_n$ (n შეიძლება იყოს 1, 2, 3, და ა.შ.); თხევად წყალში $n = 40$, ყინულში $n = 24$. წყლის მოლეკულების $(H_2O)_n$ კლასტერების წარმოქმნის უნარი განპირობებს რთულ დამოკიდებულებას წყლის სიმკვრივესა და ტემპერატურას შორის, კერძოდ, წყლის სიმკვრივის ანომალური შემცირებით დაბალ ტემპერატურაზე. წყლის ტემპერატურის $+4^{\circ}C$ -მდე შემცირებისას მისი სიმკვრივე იზრდება, ხოლო ტემპერატურის შემდგომი დაკლება იწვევს სიმკვრივის შემცირებას, რაც განპირობებულია იმით, რომ $+4^{\circ}C$ -ზე წყალი უმთავრესად $(H_2O)_2$ კომპლექსებისაგან შედგება და $0^{\circ}C$ -ზე (ყინული) იგი $(H_2O)_3$ კომპლექსებში გადადის, რაც წარმოქმნილი ყინულის სიმკვრივის შემცირებას იწვევს წყალთან შედარებით. ამის გამო ზამთარში ღრმა წყალსაცავებში წყლის მხოლოდ ზედა ნაწილი იყინება, ქვემოთ წყალი თხევად მდგომარეობას ინარჩუნებს.



სურათი 141
წყალბადური ბმების მოდელი წყლის მოლეკულებში

წყალბადური ბმები შედარებით სუსტი ბმებია (წყლის მოლეკულაში არსებულ კოვალენტურ ბმებთან შედარებით). მაგრამ წყალბადური ბმების სიმრავლე წყლის მოლეკულებს შორის აძნელებს მათი კომპლექსების დაშლას, რაც თავის მხრივ, ზრდის წყლის დუღილის ტემპერატურას (წყლის მოლეკულებს შორის წყალბადური ბმების დაშლისათვის საჭიროა ენერგიის დიდი რაოდენობა). ტემპერატურის მომატება იწვევს $(H_2O)_2$ კომპლექსების

დაშლას მარტივ H_2O მოლეკულებად; ამასთან აღსანიშნავია, რომ ორთქლიც ჯერ კიდევ შეიცავს $(H_2O)_2$ -ს კომპლექსებს.

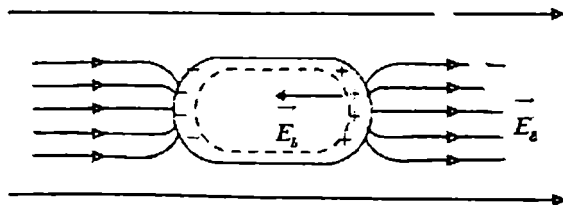
წყლის მოლეკულებს შორის ექსტრაკეჟირების არსებობა ანიტებს წყალს განსაკუთრებით მაღალ სითბოტევადობას (წყლის გაცხელებისას ნაწილი ენერგიის იხარჯება $(H_2O)_n$ კომპლექსების დაშლაზე), რაც წყლის გამაგრებელ ეფექტურობას განსაზღვრავს (სითბოს დაგროვების ხარჯზე). ეს გამორჩეული ფიზიკური თვისება განაპირობებს წყლის უდიდეს როლს დედამიწაზე კლიმატის მოდულაციაში ტემპერატურის ცვალებადობის დროს. ცნობილია, რომ ოკეანე შთანთქავს რამდენიმე ჯერ მეტ სითბოს (80-90%-ს), ვიდრე ატმოსფერო (პაერი). ეს განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია გლობალური დათბობის თვალსაზრისით.

სხვა პოლარული მოლეკულები (ფლუორინი, ამონიუმი, მეთანოლი) აგრეთვე წარმოქმნიან ერთმანეთთან წყალბადურ ბმებს, მაგრამ არ აელენენ წყლისათვის დამახასიათებელ ანომალურ თერმოდინამიკურ თვისებებს (რაც განპირობებულია ამ მოლეკულების სტრუქტურიდან გამომდინარე ოთხი წყალბადური ბმის (წყალბადის მიღების/გაცემის) უუნარობით). ასე მაგალითად, წყალბადის სელფიდი (H_2S), რომლის მოლეკულებს შორის სუსტი წყალბადური ბმები მოქმედებს, თავისი დიდი მოლეკულური მასის (წყლის მოლეკულის მოლეკულურ მასაზე ორჯერ უფრო დიდი) მიუხედავად ოთახის ტემპერატურაზე აირად მდგომარეობაში გადადის.

გამტარები და დიელექტრიკები ელექტრულ ველში.

გამტარებს უწოდებენ ნივთიერებებს, რომლებშიც შესაძლებელია ელექტრული მუხტის მოწესრიგებული გადაადგილება. გამტარებს ეკუთვნის მეტალები, მარილების და მჟავათა წყალხსნარები, იონიზებული გაზები. მეტალებში, ანუ პირველი გვარის გამტარებში, არსებული ე.წ საზიარო ელექტრონები სუსტად არის დაკავშირებული ატომების ბირთვთან და ამიტომ მათ თავისუფლად შეუძლიათ გადაადგილება მეტალის მთელ სივრცეში. სწორედ ეს თავისუფალი ელექტრონების მიმართული, მოწესრიგებული მოძრაობაა **ელექტრული დენი მეტალებში**.

თუ მეტალურ დრუ გამტარს მოვათავსებთ ელექტრულ ველში (E), მაშინ თავისუფალი ელექტრონების ქაოსური სითბური მოძრაობა მოწესრიგდება და ისინი გადაადგილდებიან ელექტრული ველის დაძაბულობის საპირისპირო მიმართულებით (სურათი 142) რის შედეგადაც გამტარის ერთ მხარეს მოგროვდება ელექტრონების ჭარბი რაოდენობა, ხოლო მოპირდაპირე მხარეს კი – დადებითი მუხტი.



სურათი 142
გამტარი ელექტრულ ველში

ამ ზედაპირზე დაგროვებული მუხტები შექმნის საკუთარ ელექტრულ ველს (E_s). რომლის მიმართულება გარეშე ველის საპირისპიროა. ჯამური ველის დაძაბულობა (E) იქნება:

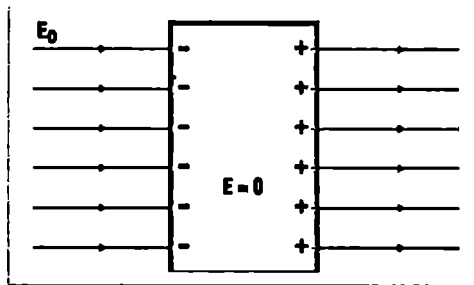
$$\vec{E} = \vec{E}_0 + \vec{E}_s,$$

ან სკალარულად

$$|E| = |E_0| - |E_s|$$

როცა მუხტების გადანაწილება იქნება ისეთი, რომ $E = 0$ (ე. ი. შიგნით აღძრული ველი E_0 გაუტოლდება გარეთა ველს E). ელექტრონების მოწესრიგებული მოძრაობა (ე.ი. დენი) შეწყდება.

გარეშე ელექტროსტატიკური ველის მოქმედებით მეტალურ გამტარში თავისუფალი ელექტრონები ისე გადანაწილდება მის შიგნით, რომ ჯამური ველის დაძაბულობა ყველგან იქნება ნულის ტოლი, გარდა გარე ზედაპირისა (სურათი 143). ეს იმას ნიშნავს, რომ თუ გვაქვს ღრუ გამტარი, მის შიგნით ველის დაძაბულობა (როგორც არ უნდა იყოს გარეშე ველი) ნულის ტოლია. სწორედ ამ მოვლენას ეუწმნება ე.წ. ელექტროსტატიკური დაცვა: თუ ხელსაწყო გარედან შემოსაზღვრულია რაიმე მეტალით, მაგალითად, მავთულბადით, რომელსაც ჩვეულებრივ ამიწებენ, მასზე არავითარი გარეშე ველი არ იმოქმედებს. სწორედ ეს შედეგია გათვალისწინებული მცირე სიდიდის ბიოპოტენციალების რეგისტრაციის დროს. კერძოდ, ელექტროენცეფალოგრამის რეგისტრაცია (ჩაწერა) ხორციელდება ეკრანიერებულ ოთახში ან მეტალის დამიწებულ კაბინაში*.



სურათი 143

გარეშე ელექტროსტატიკური ველის მოქმედებით მეტალურ გამტარში თავისუფალი ელექტრონები ისე გადანაწილდება, რომ მის შიგნით ჯამური ველის დაძაბულობა იქნება ნულის ტოლი.

დიელექტრიკებს ("dia-electric"- ორგვარი ელექტრობა) უწოდებენ ნივთიერებებს, რომლებშიც პრაქტიკულად არ არის თავისუფალი ელექტრონები და

შესაბამისად, ჩვეულებრივ პირობებში არ ატარებენ ელექტრულ დენს. დიელექტრიკები გამტარები ხდება, თუ მათზე მოდებულია ძალიან მაღალი ძაბვა. ამ მოვლენას *დიელექტრიკის გარღვევა*ს უწოდებენ.

დიელექტრიკებს მიეკუთვნება: მინა, ფაიფური, ებონიტი, ქიმიურად სუფთა წყალი, CH_3Cl , H_2 , NH_3 და სხვა. დიელექტრიკებს უწოდებენ ერთგვაროვანს და იზოტროპულს, თუ მათი თვისებები მოცულობის ყველა წერტილში და ყველა მიმართულებით ერთნაირია. დიელექტრიკების ატომებში სავალენტო ელექტრონები ძლიერადაა დაკავშირებული თავიანთ ბირთვებთან და ჩვეულებრივ პირობებში ვერ მოსწყდება მათ.

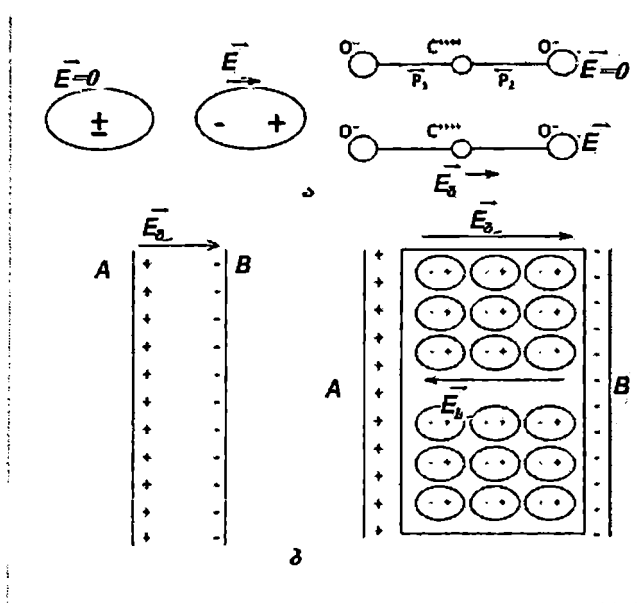
ჩვეულებრივ, დიელექტრიკების მოლეკულები ელექტრულად ნეიტრალურებია, მაგრამ ეს არ ნიშნავს იმას, რომ მათ არ გააჩნიათ ელექტრული თვისებები. დიელექტრიკების მოლეკულები ქმნის ელექტრულ ველს, რომელიც ეკვივალენტურია ელექტრული დიპოლის ველისა, მაგრამ ჯამური ველის დაძაბულობა მათი ქაოსურად განლაგების გამო ნულის ტოლია.

მოლეკულების აღნაგობის მიხედვით არჩევენ პოლარულ და არაპოლარულ დიელექტრიკებს. გარეშე ველის არარსებობის პირობებში, თუ მოლეკულაში დადებითი და უარყოფითი მუხტების სივრცული განლაგების ცენტრი ემთხვევა ერთმანეთს (მაგალითად, H_2), *დიელექტრიკი არაპოლარულია*.

პოლარულ დიელექტრიკებში დადებითი და უარყოფითი მუხტების ცენტრი არ ემთხვევა ერთმანეთს და ისინი გარეშე ველის არარსებობის პირობებშიც კი ქმნიან ხისტ დიპოლეს (მაგალითად, H_2O). მიუხედავად იმისა, რომ ცალკეული დიპოლი (მოლეკულა) ქმნის ელექტრულ ველს, მოლეკულების სითბური მოძრაობის გამო მათი ველების ჯამური მნიშვნელობა ნულის ტოლია. დიელექტრიკის გარეშე ელექტრულ ველში შეტანა იწვევს მის პოლარიზაციას, ე.ი. ისეთ მდგომარეობაში გადასვლას, როცა მოლეკულების დიპოლური მომენტების გეომეტრიული (ვექტორული) ჯამი განსხვავებულია ნულისაგან. თუ ერთგვაროვან არაპოლარულ დიელექტრიკს შევიტანთ E_0 დაძაბულობის ერთგვაროვან ელექტრულ ველში, მაშინ მის მოლეკულებში მოხდება დადებითი და უარყოფითი მუხტების ცენტრების წანაცვლება და სხეულის A და B ზედაპირზე გაჩნდება ე.წ. ზედაპირული *ბმული მუხტი*. მუხტებს უწოდებენ ბმულს, რადგან ისინი გამოწვეულია ფიქსირებული მოლეკულის დეფორმაციით გარეშე ველის მიერ და არა მოლეკულის ფიქსირებული მდებარეობიდან მოწყვეტით (სურათი 144ბ).

არაპოლარული მოლეკულების შემცველი დიელექტრიკის პოლარიზაციას, მოლეკულის ინდუქცირებული დიპოლური მომენტის წარმოქმნის შედეგად, *ელექტრონულ პოლარიზაციას* უწოდებენ. პოლარიზაციის ეს სახე არაა დამოკიდებული დიელექტრიკის ტემპერატურაზე. დიელექტრიკის შიგნით ბმული მუხტების ჯამური მუხტი ნულის ტოლია; დიელექტრიკის E_0 დაძაბულობის მუდმივ ველში მოთავსებისას სხეულის A და B ზედაპირზე ბმული მუხტები არ არის კომპენსირებული და ქმნის საკუთარ ელექტრულ ველს E_1 , რომელიც გარეშე ველის საპირისპიროდაა მიმართული.

* "დამიწებული" ნიშნავს დედამიწის პოტენციალის მქონეს, რაც პირობითად ნულის ტოლადა მიჩნეული. ტექნიკურად იგი ხორციელდება დაბალი ომური წინაღობის სადენით, ხელსაწყოს. ან კაბინის დამიწების კონტურთან შეერთებით.



სურათი 144

ერთგვაროვანი არაპოლარული დიელექტრიკი მუდმივ ელექტრულ ველში: ა - H_2 (მარცხნივ) და CO_2 (მარჯვნივ) მოლეკულების პოლარიზაცია; ბ - სხეულის A და B ზედაპირზე ბმული მუხტების გაჩენა

ამიტომ ჯამური ელექტრული ველი ერთგვაროვან იზოტროპულ დიელექტრიკში მცირდება:

$$\vec{E} = \vec{E}_0 - \vec{E}_b$$

ერთგვაროვანი პოლარული დიელექტრიკის შეტანით არაერთგვაროვან ელექტრულ ველში მის ყოველ მოლეკულაზე (როგორც ხისტ დიპოლზე) იმოქმედებს ძალთა წყვილი (იხ სურათი 144ბ), რომელიც ცდილობს მოლეკულის მობრუნებას ძალწირის გასწვრივ, რასაც ხელს უშლის (ეწინააღმდეგება) მოლეკულის სითბური მოძრაობა. უფრო ძლიერი გარეშე ველის მოქმედების შემთხვევაში ორიენტაციის ხარისხი გაიზრდება.

პოლარიზებული დიელექტრიკის A და B ზედაპირზე გაჩნდება არაკომპენსირებული ბმული მუხტები საპირისპირო ნიშნით (სურათი 143ა). გაჩენილი ბმული მუხტების რაოდენობა დამოკიდებულია გარეშე ველის (E) სიძლიერეზე. ბმული მუხტები ამ პოლარულ დიელექტრიკში ისევე, როგორც არაპოლარულში, წარმოქმნის საკუთარ ელექტრულ ველს, მიმართულს გარეშე

ველის საწინააღმდეგოდ ეი ასუსტებს მას. პოლარიზაციის ამ სახეს *ორიენტაციულ ან მოლეკულურ პოლარიზაციას* უწოდებენ.

მყარ კრისტალურ დიელექტრიკებში (მაგალითად, NaCl) პოლარიზაციას, *იონურ პოლარიზაციას* უწოდებენ.

კრისტალური დიელექტრიკების განსაკუთრებულ ჯგუფს მიეკუთვნება ეწ. სეგნეტოელექტრიკები (მათი ეს განსაკუთრებული თვისება პირველად აღმოენილ იქნა სეგნეტის ($\text{NaKC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \times 4\text{H}_2\text{O}$) მარილში), რომლებსაც უზარმაზარი *ფარდობითი დიელექტრიკული შეღწეადობა* ϵ გააჩნია. საზოგადოდ, დიელექტრიკებს ახასიათებს ფარდობითი დიელექტრიკული შეღწეადობით $\epsilon = \frac{E_0}{E}$, სადაც E_0 – ელექტრული ველის დაძაბულობა ვაკუუმში, E – დაძაბულობა მოცემულ დიელექტრიკში, იგი გვიჩვენებს თუ რამდენჯერ ამცირებს დიელექტრიკი ველის დაძაბულობას.

მნიშვნელოვანია გვახსოვდეს, რომ სხეულის პოლარიზაციის დროს მისი ჯამური მუხტი არ იცვლება (რჩება ისევე ნეიტრალური); გარეშე ველის საწინააღმდეგოდ მუშაობას ასრულებს პოლარიზაციის შედეგად წარმოქმნილი ელექტრული ველი (და არა ელექტრონები).

IV.2.2 ელექტროდინამიკა

ელექტრული დენი.

ჩვენ განვიხილეთ მეტალური გამტარი ერთგვაროვან ელექტრულ ველში და ეჩვენეთ, რომ მასში თავისუფალი ელექტრონები იწყებენ მიმართულ მოძრაობას დაძაბულობის საწინააღმდეგო მიმართულებით და მოძრაობენ მანამ, სანამ საკუთარი (მათ მიერ აღძრული) ველი არ გაუტოლდება გარეშე ველს ($E_{\text{გ}} = E_{\text{დ}}$). თუკი გვინდა, შევინარჩუნოთ ელექტრონების (ან სითხეებში – იონების) მუდმივი ნაკადი, ეს შესაძლებელია მხოლოდ იმ შემთხვევაში, როცა გამტარის ბოლოებზე მოდებულია მუდმივი ძაბვა (პოტენციალთა სხვაობა). გამტარის ბოლოებზე პოტენციალთა სხვაობის შენარჩუნება ხდება მისი “დენის წყაროსთან” მიერთებით. თუკი გამტარის განივი კვეთში q მუხტის გაველას სჭირდება Δt დრო, მაშინ დროის ერთეულში გამტარში გასული მუხტი იქნება:

$$I = \frac{q}{\Delta t} \quad (\text{IV.2.2.1})$$

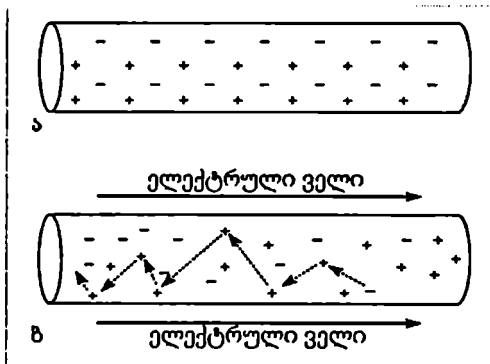
მას დენის ძალას უწოდებენ. დენის ძალის ერთეული SI სისტემაში ამჟერია: $1 \text{ ა} = 1 \frac{13}{139}$. *ამჟერი* დენის ძალის ძირითადი ერთეულია SI სისტემაში. იგი არ გამოიმდინარეობს კულონის კანონიდან (განისაზღვრება ელექტრომაგნიტური ურთიერთქმედების ძალით).

მაშასადამე, *ელექტრული დენი* – ეს არის ობიექტში წარმოქმნილი ელექტრული მუხტების ნაკადი, რომელიც არ არის დაკავშირებული მუხტის

დაკარგვასთან ან შექენასთან. ბიოლოგიურ ობიექტებში – დენს წარმოქმნიან როგორც ელექტრონები, ასევე მობილური იონები.

ელექტრული დენის წარმოქმნისათვის აუცილებელია გამტარის ბოლოებზე პოტენციალთა სხვაობის არსებობა.

შეენიშნოთ, რომ ელექტრული დენი ვრცელდება ელექტრომაგნიტური ტალღის გავრცელების სიჩქარით ($300000 \frac{\text{კმ}}{\text{წმ}}$), ხოლო ელექტრონები (ან სხვა დამუხტული ნაწილაკები) ასრულებენ რხევით ქაოსურ მოძრაობას პოტენციალის გრადიენტის მიმართულებით (პოტენციალის მაღალი მნიშვნელობის წერტილიდან პოტენციალის დაბალი მნიშვნელობის წერტილისკენ) (სურათი 145). ამ ნაწილაკების გადაადგილების სიჩქარე გამტარის გასწვრივ ელექტრომაგნიტური ტალღის გავრცელების სიჩქარეზე გაცილებით ნაკლებია.



სურათი 145

ა - მეტალური გამტარი ელექტრული ველის ზემოქმედების გარეშე – უძრავი დადებითი იონები შემოსაზღვრულია ქაოსურად მოძრავი ელექტრონებით;

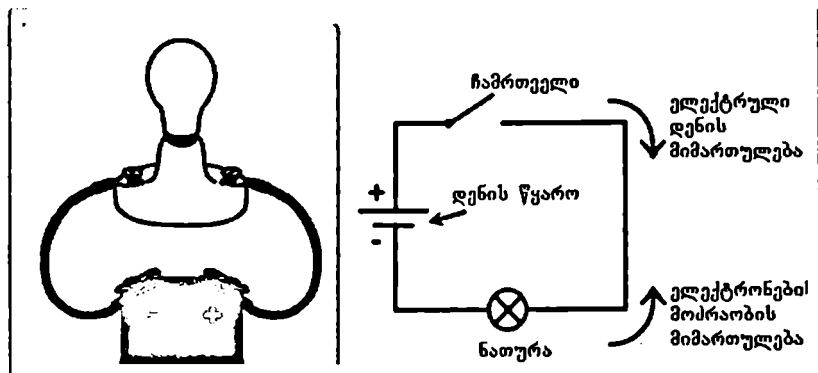
ბ - ელექტრული ველის ზემოქმედებით ელექტრონები ასრულებს რხევით ქაოსურ მოძრაობას პოტენციალის გრადიენტის მიმართულებით ელექტრონების ზიგზაგისებური ტრაექტორია განპირობებულია დადებით იონებთან და სხვა ელექტრონებთან შეჯახებით (ბ - სურათზე სქემატურად ნაჩვენებია მხოლოდ ერთი ელექტრონის ტრაექტორია))

დენს, რომლის სიდიდე და მიმართულება გამტარში დროის მიხედვით არ იცვლება, *მუდმივი დენი* ეწოდება. მუდმივ დენს გვაძლევს მუდმივი დენის წყაროები (ელემენტები, აკუმულატორები, მუდმივი დენის გენერატორები).

მართალია, დენის ძალა სკალარული სიდიდეა, მაგრამ მას გააჩნია მიმართულება. დენის მიმართულებად მიჩნეულია დადებითი მუხტის მოძრაობის მიმართულება (დენის მიმართულება დაადგინეს მაშინ, როცა ჯერ კიდევ არ იყო ცნობილი ატომის აღნაგობა და ცხადია, არც ელექტრონი). ელექტრონის მოძრაობის მიმართულება გამტარში დენის მიმართულების საპირისპიროა.

ამრიგად, თუ გვაქვს დენის წყარო, მის პოლუსებთან მიმდევრობით მიერთებული რაიმე მომხმარებელი (მაგალითად, ნათურა), წრედი შეკრულია და მასში გაივლის დენი (სურათი 146). მომხმარებელთან მიერთებულ წრედის ნაწილს გარე წრედს უწოდებენ. დადგენილია, რომ წრედის უბანში გამავალი დენის ძალა პირდაპირპროპორციულია ძაბვისა და უკუპროპორციულია ელექტრული წინააღობისა (ომის კანონი წრედის უბნისათვის):

$$I = \frac{U}{R} \quad (\text{IV } 2.22)$$



სურათი 146

ელექტრული წრედი (ისრებით ნაჩვენებია დენის მიმართულება და ელექტრონების მოძრაობის მიმართულება (დენის საპირისპირო) წრედში, როცა ჩამრთეული შეკერავენ წრედს)

აქედან შეიძლება დავადგინოთ წინააღობის ერთეული SI სისტემაში:

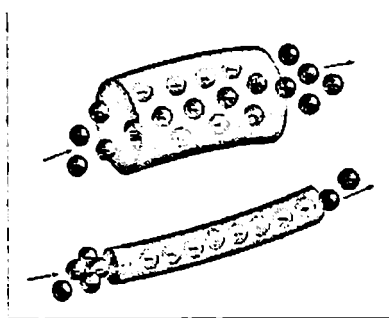
$$R = \frac{U}{I} \quad (\text{IV } 2.23)$$

მას ომი ეწოდება: 1 ომი = 1 $\frac{\text{ვ}}{\text{ა}}$.

ამრიგად, შეიძლება განვმარტოთ წინააღობის ერთეული ომი: 1 ომი ისეთი გამტარის წინააღობაა, რომელშიც 1 ვოლტი პოტენციალთა სხვაობის დროს გადის 1 ამპერი დენი. გამტარის წინააღობა დამოკიდებულია როგორც ნივთიერების გეგარობაზე, ასევე მის გეომეტრიაზე (სურათი 147) და ტოლია:

$$R = \rho \frac{l}{S},$$

სადაც ρ - კუთრი წინააღობა, l - გამტარის სიგრძე, S - განივი კვეთის ფართობი.



სურათი 147

წინალობის დამოკიდებულება განივკვეთის ფართობზე

გარდა ამისა, R დამოკიდებულია ტემპერატურაზე (რადგან ρ დამოკიდებულია ტემპერატურაზე). ლითონის ცილინდრული ფორმის გამტარისათვის:

$$\rho = \rho_0 (1 + \alpha t),$$

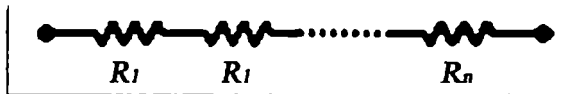
სადაც ρ_0 - კუთრი წინალობაა (ერთეულოვანი სიგრძისა და განივკვეთის ფართობის გამტარის წინალობა 0°C -ზე). ამის გათვალისწინებით

$$R = R_0 (1 + \alpha t),$$

სადაც, R_0 - რაიმე გამტარის წინალობაა 0°C -ზე, α - წინალობის თერმული კოეფიციენტი.

თუ გამტარებს მიმდევრობით შევაერთებთ, წინალობები იკრიბება (სურათი 148):

$$R = R_1 + R_2 + \dots + R_n$$



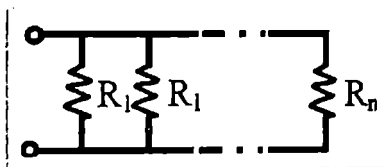
სურათი 148

წინალობების მიმდევრობით შეერთება

პარალელურად შეერთებისას (სურათი 149):

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots + \frac{1}{R_n},$$

ე.ი. იკრიბება წინააღობების შებრუნებული სიდიდეები (მათ გამტარობას უწოდებენ); (R - პარალელურად შეერთებული გამტარების საერთო წინააღობა).



სურათი 149
წინააღობების პარალელური შეერთება

პარალელურად შეერთებული ორი გამტარისთვის მივიღებთ:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2};$$

$$\frac{1}{R} = \frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2};$$

$$R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}.$$

ჩაკეტილი წრედისათვის (სრული წრედისათვის) ომის კანონი ასე ჩამოყალიბდება: *დენის ძალა წრედში პირდაპირპროპორციულია დენის წყაროს ელექტრომომძრავებელი ძაღისა (ე.მ.ძ.) და უკუპროპორციულია მთელი წრედის წინააღობისა:*

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + r},$$

სადაც $\mathcal{E}$ - ე.მ. ძალაა, R - გარე უბნის წინააღობა, r - დენის წყაროს შიგა წინააღობა. აქედან $IR + Ir = \mathcal{E}$, ან $U_1 + U_2 = \mathcal{E}$. U -ს ძაბვის ვარდნას უწოდებენ. ამრიგად, დენის წყაროს ელექტრომომძრავებელი ძალა წრედის გარე და შიდა უბანზე ძაბვის ვარდნათა ჯამის ტოლია.

I დენის გატარების დროს გამტარში გამოიყოფა სითბო (ჯოულ-ლენცის კანონი):

$$Q = k I^2 R t = k \frac{U^2}{R} t$$

დროის ერთეულში გამოყოფილ ენერგიას (სითბოს) სიმძლავრე ეწოდება. სიმძლავრე:

$$N = \frac{Q}{t} = k \frac{U^2}{R},$$

სადაც k - პროპორციულობის კოეფიციენტი, SI სისტემაში $k = 1$.

თუ გავიხსენებთ ომის კანონს წრედის უბნისათვის $R = \frac{U}{I}$ და შევიტანთ სიმძლავრის ფორმულაში:

$$N = \frac{U^2}{R} = UI$$

SI სისტემაში სიმძლავრის ერთეულია ვატი: $1 \text{ ვტ} = \frac{1 \text{ ჯ}}{1 \text{ წმ}} = 1 \text{ ვ} \cdot 1 \text{ ა}$.

ამრიგად, გამტარში გამოიყოფა 1 ვტ სიმძლავრე, თუ მასში 1 ვოლტის ძაბვის დროს გადის 1 ამპერი დენი . ცხადია, ამ სიმძლავრეს გამოყოფს დენის წყარო გამტარში. სიმძლავრის გამოსათვლელად ზოგადი ფორმულიდან $N = \frac{A}{t}$, $A = NI$, სადაც A - შესრულებული მუშაობაა, t - დრო. ამიტომ SI სისტემაში დენის მუშაობის ერთეული იქნება $1 \text{ ჯ} = 1 \text{ ვტ} \cdot 1 \text{ წმ}$, ხოლო სისტემგარეშე ერთეული - *კილოვატსაათი* (კვტ · სთ); $1 \text{ კვტ} \cdot \text{სთ} = 10^3 \text{ ვტ} \cdot 3600 \text{ წმ} = 36 \cdot 10^5 \text{ ჯ}$.

ელექტროლიტებში, ანუ “მეორე გეარის” გამტარებში, მუხტის გადამტანია დადებითი და უარყოფითი იონები. აქაც სამართლიანია ომის კანონი. უნდა შევნიშნოთ, რომ ელექტრულ დენს განაპირობებს როგორც დადებითი, ასევე უარყოფითი იონები. დენი ელექტროლიტებში იწვევს ქიმიურ გარდაქმნებს. თუ ელექტროლიტში მოვათავსებთ მუდმივი დენის წყაროსთან მიერთებულ ფირფიტებს, მათზე გამოიყოფა ელექტროლიტის შემადგენელი ნაწილაკები: დადებით ელექტროდზე - უარყოფითი იონები, უარყოფით ელექტროდზე - დადებითი. ამ მოვლენას *ელექტროლიზი* ეწოდება.

ელექტროლიზი.

ფარადეიმ დაადგინა, რომ:

I - ელექტროლიზის დროს გამოყოფილი ნაწილაკების მასა პირდაპირპროპორციულია გავლილი მუხტის რაოდენობისა:

$$m = k q ,$$

$$\text{ან } m = k I t ,$$

სადაც k ნივთიერების *ელექტროქიმიური ეკვივალენტი*.

თუ $q = 1$, $m = k$, ეი ნივთიერების *ელექტროქიმიური ეკვივალენტი* რიცხობრივად ტოლია ნივთიერების მასისა, რომელიც გამოიყოფა ელექტროდზე წრედში ერთი კულონი მუხტის გავლისას, ან სხვანაირად - ერთ წამში ერთი ამპერი დენის დროს.

შეფარდებას $x = \frac{A}{n}$ *ქიმიური ეკვივალენტი* ეწოდება, სადაც A - ატომური წონაა, n - ვალენტობა.

II - ნივთიერებათა ელექტროქიმიური ეკვივალენტები პირდაპირპროპორციულია მათი ქიმიური ეკვივალენტებისა:

$$k = cx$$

ანუ, $\frac{k_1}{x_1} = \frac{k_2}{x_2} = \dots = \frac{k_n}{x_n} = C.$

ამრიგად, ნივთიერებათა ელექტროქიმიური ეკვივალენტების შეფარდება მათ ქიმიურ ეკვივალენტებთან ყველა ნივთიერებისათვის ერთი და იგივეა. $C = 0,00001036 \frac{\text{გ}}{\text{კ}} (უნივერსალური მუდმივა)$, ზოგადად, $k = Cx$ თუ k -ს ამ მნიშვნელობას შევიტანთ ფარადეის I კანონში, მივიღებთ:

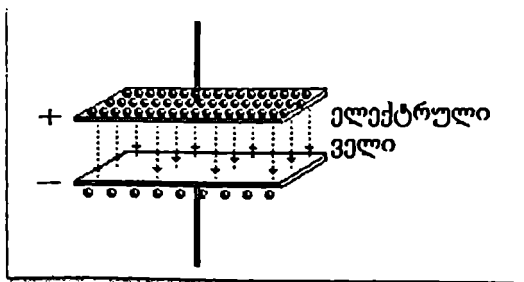
$$m = C x q$$

განესაზღვროთ ელექტრობის (მუხტის) ის რაოდენობა, რომელიც ელექტროლიზის დროს გამოყოფს ნივთიერების ქიმიური ეკვივალენტის რაოდენობის (ერთი გრამ-ეკვივალენტი) მასას, ე. ი. $m = x$ გ. მაშასადამე, $1 = C q$; $q = \frac{1}{C} \approx 96500$ კ.

ამგვარად, ყოველი ნივთიერების 1 გრამ-ეკვივალენტის გამოსაყოფად საჭიროა წრედში გაიაროს $F = 96500$ კულონმა მუხტმა (ფარადეის რიცხვი).

კონდენსატორი.

სისტემას, რომელიც შედგება გარკვეული ფორმის მქონე სხვადასხვა ნიშნით დამუხტული გამტარებისა და მათ შორის მოთავსებული დიელექტრიკებისაგან, კონდენსატორი ეწოდება (სურათი 150).



სურათი 150

დამუხტული კონდენსატორი და მისი ელექტრული ველი (სურათზე ნაჩვენებია მხოლოდ ერთგვაროვანი ველის უბანი)

კონდენსატორი ხელსაწყოა, რომელიც აგროვებს მუხტებს. კონდენსატორებს ახასიათებენ *ტევადობით* “C”. ზოგადად, კონდენსატორის ტევადობა $C = \frac{q}{U}$, სადაც q მუხტია, U – “შემონაფენებს” (ფირ-ფიტებს) შორის პოტენციალთა სხვაობა. ტევადობა მოცემული კონდენსატორი-სთვის მუდმივი სიდიდეა (იგი არაა დამოკიდებული q -ზე, რადგან $U \sim q$) და განისაზღვრება მისი გეომეტრიული ზომებით და დიელექტრიკით. ტევადობის ფორმულიდან თუ $U = 1$, $C = q$. ე.ი. ტევადობა რიცხობრივად მუხტის იმ რაოდენობის ტოლია, რომელსაც დააგროვებს იგი ძაბვის ერთი ვოლტით ცვლილებისას. SI სისტემაში ტევადობის ერთეულია ფარადა (ფ): $1 \text{ ფარადა} = 1 \frac{\text{კ}}{\text{ვ}}$. ეს ძალიან დიდი ერთეულია. პრაქტიკაში იყენებენ მიკროფარადას (10^{-6} ფ) და პიკოფარადას (10^{-12} ფ).

გამტართა გეომეტრიისა და მათში მოთავსებული დიელექტრიკის მიხედვით არჩევენ ბრტყელ, ცილინდრულ, სფერულ, ელექტროლიტურ და სხვა ტიპის კონდენსატორებს. ყველაზე ფართოდ გავრცელებული ბრტყელი კონდენსატორის ტევადობა დამოკიდებულია კონდენსატორის შემონაფენების ფართობზე, მათ შორის მანძილზე, და დიელექტრიკული მასალის სახეობაზე (ϵ):

$$C = \frac{\epsilon \epsilon_0 S}{d},$$

სადაც ϵ_0 – ელექტრული მუდმივაა (ეკუუუმში აბსოლუტური დიელექტრიკული შეღწევადობა $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ ფ/მ), ϵ – დიელექტრიკის ფარდობითი შეღწევადობა, S – ფირფიტების გადაფარვის ფართობი (ან უმცირესი ფირფიტის ფართობი), d – მანძილი ფირფიტებს შორის.

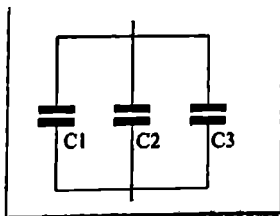
თუ კონდენსატორი n ფირფიტისაგან შედგება, მაშინ:

$$C = \frac{(n-1)\epsilon \epsilon_0 S}{d}.$$

ელექტრულ წრედში შესაძლებელია კონდენსატორების პარალელური და მიმდევრობითი შეერთება.

კონდენსატორების პარალელური შეერთების დროს (სურათი 151) ტევადობები იკრიბება:

$$C = C_1 + C_2 + \dots + C_n.$$



სურათი 151

კონდენსატორების პარალელური შეერთება

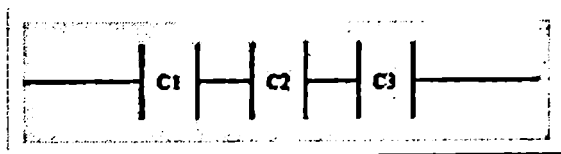
დასკენის სისწორეში დარწმუნდებით, თუ დაუკვირდებით ბრტყელი კონდენსატორის ტევადობის გამოსათვლელ ფორმულას.

კონდენსატორების მიმდევრობითი შეერთების დროს (სურათი 152) ტევადობა განისაზღვრება ფორმულით:

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n} = \frac{C_1 + C_2}{C_1 C_2}$$

ორი კონდენსატორის შემთხვევაში:

$$C = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}$$



სურათი 152

კონდენსატორების მიმდევრობითი შეერთების

კონდენსატორის დანიშნულება - ენერგიის აკუმულაცია ფირფიტებზე საპირისპირო ნიშნის მუხტების დაგროვების გზით. ეს ენერგია უბრუნდება წრედს კონდენსატორის განმუხტვის დროს. დამუხტულ კონდენსატორში დაგროვებული ენერგია უდრის:

$$E = \frac{CU^2}{2}$$

ელექტრულ წრედში ჩართული კონდენსატორი ხელს უშლის დენის გაეღას. კონდენსატორის წინაღობა გამოითვლება ფორმულით:

$$R_C = \frac{1}{\omega C},$$

სადაც ω - ციკლური სიხშირეა ($\omega = 2\pi\nu$), C - კონდენსატორის ტევადობა.

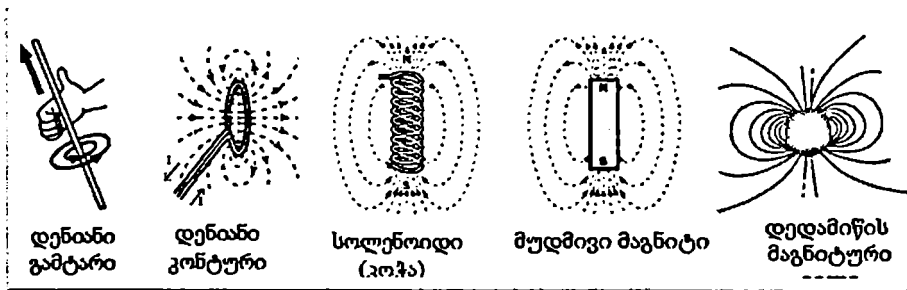
ამ ფორმულიდან აღვიღო გასარკვევია კონდენსატორის წინაღობა. მუდმივი დენისათვის $R_C = \infty$ (რადგან $\omega = 0$, $\frac{1}{0} = \infty$), ხოლო ცვლადი დენის შემთხვევაში იგი მცირდება სიხშირის გაზრდასთან ერთად.

თუ წრედი შეერთებულია ცვლადი დენის წყაროსთან, დენი პერიოდულად იცვლის თავის მიმართულებას, შესაბამისად, კონდენსატორის ფირფიტები შენაცვლებით იმუხტება საპირისპირო მუხტებით. თუ არ ჩავთვლით დროის მომენტს, როდესაც დენი იცვლის მიმართულებას, კონდენსატორის შემცველ წრედში დენის ძალა განსხვავდება ნულისაგან მთელი ციკლის განმავლობაში.

ამის გამო ამბობენ, რომ კონდენსატორი ატარებს ცვლად ელექტრულ დენს. მაგრამ ეს არ ნიშნავს, რომ მუხტები გადალახავს სივრცეს კონდენსატორის ფირფიტებს შორის (ეს არ ხდება გარდა კონდენსატორის ფიზიკური დაზიანების შემთხვევისა, როდესაც დიელექტრიკი “გაირღვევა”). ზემოთქმულიდან ნათელია, რომ მუდმივი დენის წრედში კონდენსატორის შემცველი წრედი შეიკერება, (გადის დენი) მხოლოდ წყაროს ჩართვის და გამორთვის მომენტში (ამ დროის ინტერვალებში დენი მატულობს ან კლებულობს (ცვლადია)).

IV.3 მაგნიტიზმის ძირითადი ცნებები და კანონები

მაგნიტურ მოვლენებს ადამიანი უძველესი დროიდან იცნობდა. ძველი ბერძენი მეცნიერებისათვის ცნობილი იყო დედამიწის, ზოგიერთი ბუნებრივი მასალის მაგნიტური თვისებები (სურათი 153). XIX საუკუნემდე მეცნიერები იცნობდნენ მხოლოდ ბუნებრივ მუდმივ მაგნიტებს (სხეულებს, რომლებიც წარმოქმნიან მაგნიტურ ველს). ასეთი ველი ერთი შეხედვით, არ აელენს რაიმე კავშირს ელექტრულ ველთან. ამიტომ ბუნებრივია, ელექტრული და მაგნიტური მოვლენები ადრე განიხილებოდა, როგორც ერთიმეორისაგან სრულიად დამოუკიდებელი. ამ მოვლენებს შორის კავშირი პირველად შეამჩნია დანიელმა ფიზიკოსმა ერსტედმა 1820 წელს. მან ნახა, რომ თუ გამტარში გაატარებთ ელექტრულ დენს, მის სიახლოვეს მყოფი მაგნიტური ისარი იცვლის სივრცულ ორიენტაციას. მაგრამ ერსტედისათვის ცნობილი იყო ისიც, რომ ისარი ასევე იცვლიდა ორიენტაციას მაგნიტური ველის ზემოქმედებით. ამგვარად, ერსტედისათვის ნათელი გახდა, რომ მაგნიტურ ისარზე დენიანი გამტარისა და მაგნიტური ველის ზემოქმედების ეფექტებს მსგავსი მიზეზები განაპირობებს. იმავე წელს ამპერმა აღმოაჩინა მუდმივი მაგნიტის მოქმედება დენიან გამტარზე და დენიანი გამტარების ურთიერთქმედება.



სურათი 153

მაგნიტური ველის ბუნებრივი და ხელოვნური წყაროები

ზემოთ აღწერილი მოვლენების ასახსნელად აუცილებელია ჩავთვალოთ, რომ მაგნიტური ველი გარს აკრავს ყოველ დენიან გამტარს და სწორედ ამ

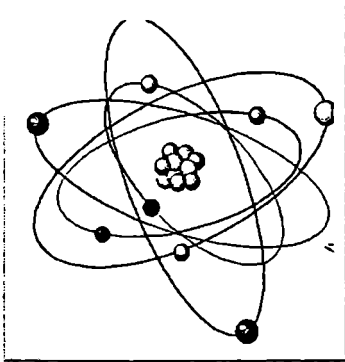
მაგნიტური ველის საშუალებით ხორციელდება მაგნიტისა და დენიანი გამტარის, ან დენიანი გამტარების (ისევე, როგორც მუდმივ მაგნიტებს შორის) ურთიერთქმედება.

ის გარემოება, რომ ელექტრულ დენთან (ე.ი. მოწესრიგებულად მოძრავ მუხტებთან) ყოველთვის დაკავშირებულია მაგნიტური ველი, საშუალებას გვაძლევს, გავაკეთოთ მეტად მნიშვნელოვანი დასკვნა: *უძრავი ელექტრული მუხტი მის ირგვლივ სივრცეში ქმნის მხოლოდ ელექტრულ ველს, მოძრავი მუხტი კი (ე.ი. ელექტრული დენი) – როგორც ელექტრულს, ისე მაგნიტურ ველს.*

როგორც ვიცით, დენიანი გამტარის გარდა მაგნიტურ ველს ქმნის ასევე ბუნებრივი მაგნიტიც. იბადება კითხვა: არის თუ არა რაიმე საერთო ამ ორი სხვადასხვა წარმოშობის მაგნიტური ველის აღძვრის მექანიზმებში? ამასთან დაკავშირებით 1821 წელს ამპერმა წამოაყენა ჰიპოთეზა, რომლის მიხედვით *ყოველ მოლეკულაში არსებობს წრიული დენები (ე.წ. მიკროდენები), რომლებიც ქმნიან წრის სიბრტყის მართობულ ელემენტარულ მაგნიტურ ველებს.*

მაშასადამე, ამპერის ჰიპოთეზის თანახმად, ნივთიერების ყოველ მოლეკულას შეესაბამება ელემენტარული მაგნიტური ველი (მიკროველი), ხოლო ნივთიერების საერთო მაგნიტური ველი კი (მაკროველი) განისაზღვრება მისი მოლეკულების მიკროველების გეომეტრიული ჯამით (მიკროველების სივრცული განაწილებით). თუ მიკროველების სივრცული განაწილება ქაოსურია, მაშინ მათი გეომეტრიული ჯამი (ნივთიერების მაგნიტური ველი) ნულის ტოლია და სხეული არ ავლენს მაგნიტურ თვისებებს.

ამპერიანული მიკროდენების არსებობა გაუგებარი იყო XX საუკუნის დასაწყისამდე, რადგან არ არსებობდა ატომისა და მოლეკულის სტრუქტურის შესახებ მეცნიერულად დასაბუთებული შეხედულებანი. XX საუკუნის დასაწყისში ჩამოყალიბდა ატომის აღნაგობის თანამედროვე მოდელი, რომლის მიხედვით ატომის ბირთვის ირგვლივ მოძრაობს ელექტრონები და წარმოქმნის წრიულ „მოლეკულურ“ დენებს (ამპერიანულ დენებს) (სურათი 154).



სურათი 154

წრიული მოლეკულური დენები ატომში ელექტრონების შესაბამის ორბიტებზე მოძრაობისას ბირთვის გარშემო

მაშასადამე. **მაგნეტიზმი** – მოძრავი ელექტრული მუხტების ურთიერთქმედების ფორმაა. მაგნიტური ველის (მაგნეტიზმის) წყაროა - მოძრავი ელექტრული მუხტი.

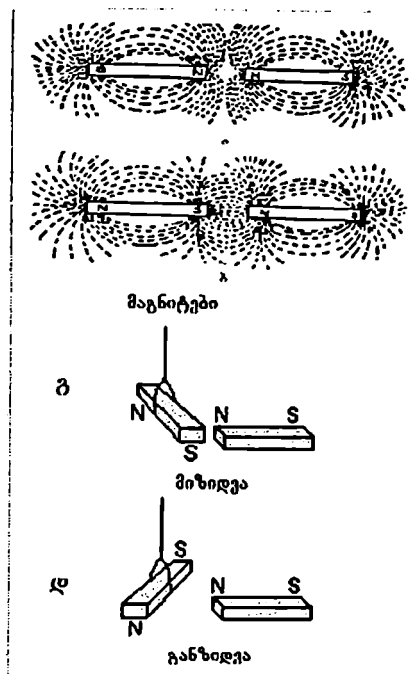
ბუნებაში მაგნეტიზმი გამოვლინდება ელექტრული ნაკადის (დენის) წარმოქმნის შედეგად, ან ფიზიკური სხეულების სტრუქტურაში მიკროსკოპული დამუხტული მუდმივად მოძრავი და ურთიერთქმედებაში მყოფი ნაწილაკების (ელექტრონების, პროტონების, იონების, ატომების, მოლეკულებისა და მათი კომპლექსების და ა. შ.) მიერ. ჩვეულებრივ, ელექტრონები, პროტონები, იონები და სხვა დამუხტული კომპლექსები ფიზიკური სხეულების შიგნით ორიენტირებულია ქაოსურად, ასე რომ, მათი მაგნიტური ველები აბათილებს ერთმანეთს. მაგრამ იმ შემთხვევაში, თუ სხეულს (შემთხვევით, ან გამიზნულად) მოუთავსებთ მაგნიტურ ველში ყველა დამუხტული ნაწილაკის მაგნიტური ველი იგარბობს ამ გარეშე მაგნიტური ველის ზემოქმედებას და უპასუხებს საკუთარი (სხვადასხვა სიძლიერის) მაგნიტური ჯამური ველით. სხვადასხვა ნივთიერებების ქცევა მაგნიტურ ველში განპირობებულია მათი ატომური სტრუქტურით და ტემპერატურით. ზოგიერთი ნივთიერებისაგან დამზადებული სხეულები ინარჩუნებს მაგნიტურ ველს გარეთა მაგნიტური ველის მოშორების შემდეგ (იხილე ქვემოთ). ისინი გვხვდება ბუნებაში და მუდმივ მაგნიტებად იწოდება.

ცდისეული გამოკვლევები მიუთითებს, რომ ცვლადი ელექტრული და მაგნიტური ველები ერთმანეთთან მჭიდრო კავშირშია. ამას ადასტურებს ინგლისელი მეცნიერის ფარადეის აღმოჩენა (1831 წ.), რომელმაც ექსპერიმენტულად დაადგინა, რომ ცვლადი მაგნიტური ველი მის ირგვლივ სივრცეში ყოველთვის წარმოქმნის ცვლად ელექტრულ ველს და ამ აღმოჩენით, რომელსაც **ელექტრომაგნიტური ინდუქციის მოვლენა** ეწოდება, საფუძველი ჩაეყარა ელექტროდინამიკას. ასეთივეა ინგლისელი მეცნიერის მაქსველის თეორიის ერთ-ერთი უმნიშვნელოვანესი შედეგი: ცვლადი ელექტრული ველი მის ირგვლივ სივრცეში წარმოქმნის ცვლად მაგნიტურ ველს, და პირიქით, ცვლადი მაგნიტური ველი ყოველთვის იძლევა ცვლად ელექტრულ ველს, რომლის შესანიშნავი მათემატიკური დასაბუთებაც მისი განტოლებების სისტემაა.

ამგვარად, ცვლადი ელექტრული და მაგნიტური ველები ერთმანეთისაგან დამოუკიდებლად არ არსებობს, ისინი ყოველთვის დაკავშირებული არიან ერთმანეთთან და ქმნიან ე.წ. ელექტრომაგნიტურ ველს. შეიძლება ითქვას, რომ მოძრავი მუხტი წარმოქმნის თავის გარშემო მაგნიტურ ველს და მაგნიტური ველი თავის მხრივ მოქმედებს გარკვეული ძალით მასში მოძრავ ელექტრულ მუხტზე.

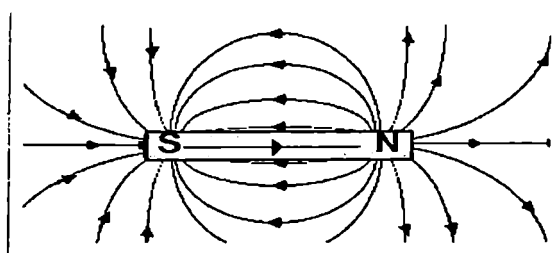
მაგნიტების ერთსახელა პოლუსები განიზიდება და განსხვავებული პოლუსები ურთიერთმიიზიდება (სურათი 155 ა, ბ, გ).

გრაფიკულად მაგნიტურ ველს, ისევე, როგორც ელექტრულ ველს, გამოსახავენ მაგნიტური ძალწირებით, ე.ი. წარმოსახვითი წირებით, რომლებიც გამოდინან მაგნიტის ჩრდილოეთი პოლუსიდან და შედიან სამხრეთ პოლუსში. რადგან ერთპოლუსიანი მაგნიტი არ არსებობს, ეს ძალწირები შეკრული წირებია (სურათი 156). ისეთ ველს, რომლის ძალწირები შეკრული წირებია, **გრივალური** ველი ეწოდება. ძალწირებს ისე გააველებენ, რომ მის ნებისმიერ წერტილში ველის მახასიათებელ სიდიდეს კქონდეს მხეების მიმართულება.



სურათი 155

ერთსახელა პოლუსები განიზიდება (ა, დ), სხვადასხვა - მიიზიდება (ბ, გ)

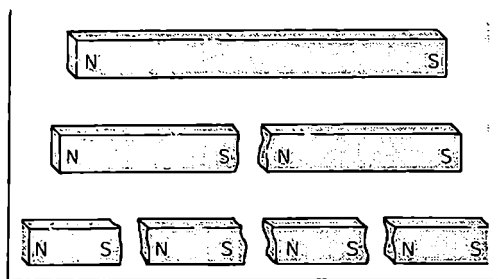


სურათი 156

მაგნიტის მაგნიტური ძაღწირები

თუ თქვენ გატეხთ მაგნიტს ორ ან მეტ ნაწილად, თითოეულ ნატეხს (როგორი მცირეც არ უნდა იყოს) გააჩნია N და S პოლუსები (სურათი 157).

ერთპოლუსიანი მაგნიტი არ არსებობს (შეუძლებელია არსებობდეს! რაშიც დარწმუნდებით ატომის სტრუქტურის შესწავლისას).



სურათი 157

მაგნიტის ორ ან მეტ ნაწილად გატეხვისას, თითოეულ ნატეხს გააჩნია N და S პოლუსები

IV.3.1 მაგნიტური ველის ინდუქცია და დაძაბულობა

მაგნიტური ველის რაოდენობრივი შეფასების მიზნით აუცილებელია შემოვიტანოთ მისი მახასიათებელი ფიზიკური სიდიდეები. ასეთ სიდიდეებს მიეკუთვნება: მაგნიტური ინდუქციის ვექტორი B და მაგნიტური ველის დაძაბულობა H . მაგნიტური ინდუქციის (B) ვექტორის მიმართულება განისაზღვრება ველში მოთავსებული მაგნიტური ისრის ან დენიანი ჩარჩოს ორიენტაციით.

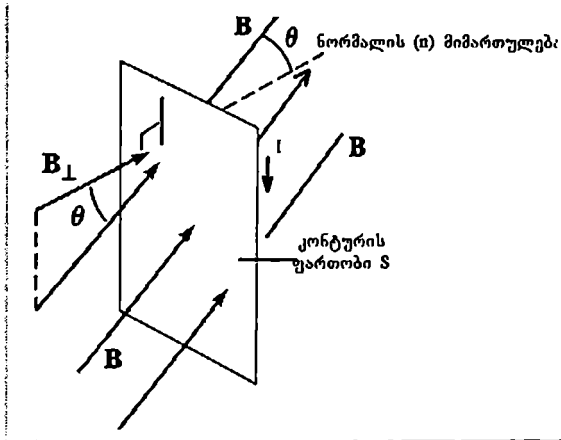
დავადგინოთ მაგნიტური ველის ინდუქციის ვექტორის B მიმართულება და სიდიდე. ამ მიზნით ველში შევიტანოთ მცირე ზომის ბრტყელი დენიანი ჩარჩო (ჩარჩოს მიერ დაკავებულ სივრცეში მაგნიტური ველი ჩათვალოთ ერთგვაროვნად). მაგნიტურ ველში შეტანილი ასეთი დენიანი ჩარჩო იცვლის რა ორიენტაციას, შემობრუნდება ბრუნვის ღერძის ირგვლივ მანამდე, სანამ არ დაიკავენ მდგრად წონასწორულ ორიენტაციას: ჩარჩოს სიბრტყის მართობი n (მას ნორმალს უწოდებენ) არ დაემთხვევა მაგნიტური ველის ვექტორის B მიმართულებას. ეს იმაზე მიუთითებს, რომ დენიან ჩარჩოზე მაგნიტურ ველში მოქმედებს მაბრუნებელი მომენტი* M , რომელიც დამოკიდებულია როგორც მაგნიტური ველის სიძლიერეზე, ისე დენიანი ჩარჩოს მახასიათებელ პარამეტრებზე (ჩარჩოს ფართობზე S , მასში გამავალ დენის ძალაზე I და ჩარჩოს დადებით ნორმალსა და მაგნიტური ველის მიმართულებას შორის კუთხეზე (იხილეთ სურათი 158)):

*მაბრუნებელი მომენტი $M = FI$, სადაც F ძალაა, I - ბრუნვის ღერძიდან ძალის ან ძალის მიმართულებაზე დაშვებული პერპენდიკულარის სიგრძე. M დადებითია, თუ ის იწვევს საათის ისრის მოძრაობის მიმართულებით შემობრუნებას, თუ კი პირიქით - უარყოფითი.

$$M \sim IS \sin \theta \quad (\text{IV.3.1.1})$$

$$\text{ან } M = B I S \sin \theta$$

(θ - კუთხე ნორმალსა და მაგნიტური ველის მიმართულებას შორის).



სურათი 158

დენიანი ჩარჩო მაგნიტურ ველში. ნაჩვენებია მხოლოდ დენიანი გამტარის (კონტურის) მიერ შემოსაზღვრული ფართობი.

ფორმულიდან გამომდინარეობს, რომ: M აღწევს უდიდეს მნიშვნელობას, როდესაც $\theta = \frac{\pi}{2}$, ე.ი. $n \perp B$, ანუ, როცა დენიანი ჩარჩო ველის გასწვრივია მოთავსებული. წონასწორობისას $M=0$ და დენიანი ჩარჩო ველის პერპენდიკულარულად ($\theta = 0$) გაჩერდება. ფარდობა $\frac{M}{IS \sin \alpha}$ არ არის დამოკიდებული დენიანი ჩარჩოს თვისებებზე და მის სივრცულ ორიენტაციაზე. ეს ფარდობა განსაზღვრავს მაგნიტური ველის ვექტორის მახასიათებლის - მაგნიტური ინდუქციის B სიდიდეს:

$$B = \frac{M}{IS \sin \alpha} \quad (\text{IV.3.1.2})$$

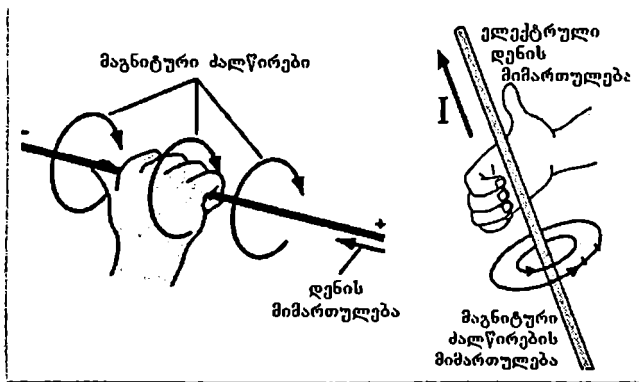
SI სისტემაში მაგნიტური ველის ინდუქციის (B) ერთეულია ტესლა (ტლ). ამ ერთეულის დასადგენად გამოვიყენოთ ბოლო ფორმულა და როცა $I = 1\text{ა}$, $S = 1\text{მ}^2$, $M = 16 \cdot 3$, მაშინ $B = 1\text{ტლ}$. ე.ი. ერთი ტესლა ისეთი მაგნიტური ველის ინდუქ-

ციაა, რომელიც ველის გასწვრივ მოთავსებულ 1 მ^2 ფართობის ჩარჩოზე, როცა კონტურში სა დენი გადის, მოქმედებს 1 ნმ მაბრუნებელი მომენტი. ამ ერთეულის გარდა პრაქტიკაში იყენებენ გაუსს: $1 \text{ გაუსი} = 10^{-4} \text{ ტლ (CGS-მ ერთეული)}$.

როგორც მაგნეტიზმის შესავალში იყო აღნიშნული, დენიანი გამტარი თავის ირგვლივ ქმნის მაგნიტურ ველს. თუ ასეთი გამტარი იქნება მოთავსებული ერთგვაროვან მაგნიტურ ველში, ცხადია, მაგნიტური ველი მოქმედებს დენიან გამტარზე. სწორედ ეს რაოდენობრივი დამოკიდებულება დაადგინა ამპერმა და მას ამპერის კანონს უწოდებენ. ძალა, რომლითაც გარეშე ველი მოქმედებს წრფივ დენიან გამტარზე (ამპერის ძალა) ტოლია :

$$F = k B I l \sin \alpha, \quad (\text{IV.3.1.3})$$

სადაც k - პროპორციულობის კოეფიციენტია (SI სისტემაში $k = 1$), I - დენის ძალა, l - მაგნიტურ ველში მოთავსებული გამტარის სიგრძე, B - მაგნიტური ველის (რომელშიც გამტარია მოთავსებული) ინდუქცია, α - კუთხე B -სა და l -ს შორის. ზემოთ განხილულ შემთხვევაში დენიანი გამტარის მაგნიტური ველისა და გარეშე მაგნიტური ველის ურთიერთქმედება იყო აღწერილი. წრფივი დენიანი გამტარის მაგნიტური ველის ინდუქციის ვექტორის B -ს მიმართულების დასადგენად იყენებენ „მარჯვენა ხელის“ წესს (სურათი 159) ან მარჯვენა ბურღის* წესს - თუ ბურღის წეროს გადაადგილება ემთხვევა დენის მიმართულებას გამტარში, მაშინ ბურღის ტარის მოძრაობის მიმართულება ემთხვევა მაგნიტური ძალწირების მიმართულებას. ინდუქციის ვექტორი B ამ ძალწირების მსხების მიმართულებისაა.



სურათი 159

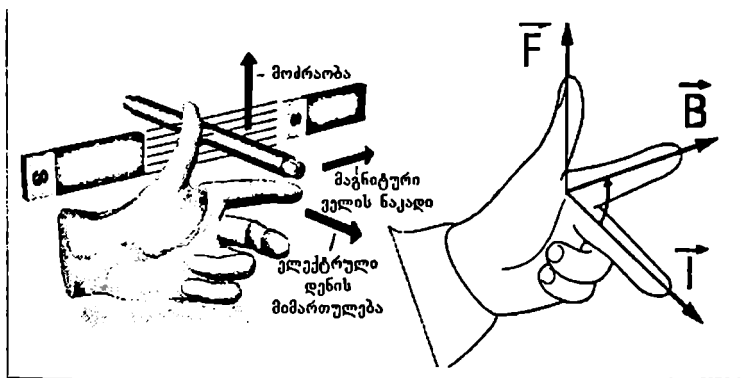
„მარჯვენა ხელის“ წესი წრფივი დენიანი გამტარისათვის

*არსებობს მარჯვენა და მარცხენა ხრახნი, ან ბურღი. თუ ბურღის (ან ხრახნის) საათის ისრის მოძრაობის მიმართულებით მობრუნებისას წვერო გშორდებათ, ბურღი (ან ხრახნი) მარჯვენაა, წინააღმდეგ შემთხვევაში - მარცხენა.

IV.3.1.3 ფორმულიდან შეიძლება მაგნიტური ინდუქციის ერთეულის დადგენა: *1 ტესლა ისეთი მაგნიტური ველის ინდუქციაა, რომელიც მისდამი მართობ 1 მეტრი სიგრძის გამტარზე 1 ამპერი დენის დროს მოქმედებს 1 ნიუტონი ძალით.*

ნახაზზე 158 უბრალო დაკვირვებითაც ჩანს, რომ წრფივი დენიანი გამტარის მაგნიტურ ძალხაზებზე მრავალი მხების გავლება შეიძლება. ე.ი. სხვადასხვა წერტილს სხვადასხვა B შეესაბამება. ეს კი იმას ნიშნავს, რომ ასეთი გამტარის მაგნიტური ველი არაერთგვაროვანია.

დენიან გამტარზე მოქმედი ძალის მიმართულების დასადგენად მოსახერხებელია *მარცხენა ხელის წესი* (იხილე სურათი 160). მარცხენა ხელის შუათითი, საჩვენებელი თითი და ცერა თითი გაკმალოთ ურთიერთმართობულად. თუ შუათითის მიმართულებას ემთხვევა გამტარში დენის მიმართულება და საჩვენებელი თითი მიმართულია გარე მაგნიტური ველის გასწვრივ, მაშინ ცერა თითი გვიჩვენებს გამტარზე მაგნიტური ველის მხრიდან მოქმედი ძალის მიმართულებას.



სურათი 160

მარცხენა ხელის წესი : შუათითი - ელექტრული დენის მიმართულება; საჩვენებელი თითი - მაგნიტური ველის მიმართულება; ცერა თითი - ძალის მიმართულება

დენიან გამტარზე მაგნიტური ველის მოქმედება ლორენცის ძალითაა (მოძრავ მუხტზე მოქმედი ძალით), განპირობებული. ერთგვაროვან მაგნიტურ ველში რაიმე q მუხტზე მოქმედი ლორენცის ძალა ტოლია:

$$F = q v B \sin \alpha, \quad (\text{IV.3.1.4})$$

სადაც q - მუხტია, v - მისი მოძრაობის სიჩქარე. B - მაგნიტური ველის ინდუქცია, α - კუთხე B -სა და v -ს შორის. ეს ძალა B და v -ზე გამავალი სიბრტყის პერპენდიკულარულია.

შეიძლება ითქვას, რომ ამპერის ძალა ლორენცის ძალების ჯამური გამოვლი-
ნებაა.

ამრიგად, მაგნიტური ველის ინდუქცია ვექტორული სიდიდეა. მისი
მიმართულება შეიძლება განისაზღვროს როგორც მარჯვენა ბურღის, ასევე
მარჯვენა ხელის წესით.

თუ ავიღებთ საკმაოდ გრძელ სოლენოიდს (კოჭს) და მასში გავატარებთ დენს
(წრიული დენი), იგი შექმნის მაგნიტურ ველს როგორც გარეთა, ასევე მის შიდა
სივრცეში. მაგნიტური ძაღწირების მიმართულების დასადგენად ბურღის წესი
აქაც გამოდგება, თუმცა უფრო მარტივი ფორმულირებით წრიული დენისათვის:
*თუ ბურღის ტარის (სახელურის) მოძრაობის მიმართულება ემთხვევა დენის
მიმართულებას კოჭაში (წრიული დენის მიმართულებას), მაშინ წვეროს
გადაადგილების მიმართულება მაგნიტური ძაღწირების მიმართულებას
დაემთხვევა*. თუკი გავისხენებთ, რომ ძაღწირები ჩრდილოეთი პოლუსიდან
გამოდის და შედის სამხრეთ პოლუსში, უკვე გვეცოდინება ამ დენიანი კოჭის
(ელექტრომაგნიტის) პოლუსებიც. ვინაიდან განხილული კოჭი საკმაოდ გრძელია,
მის შიგნით ძაღწირები პარალელურია, რაც იმას ნიშნავს, რომ მის შიგნით
ველი ერთგვაროვანია : $B = const$.

მაგნიტური ველის შემთხვევაშიც სამართლიანია ველის სუპერპოზიციის
პრინციპი :

$$\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2 + \vec{B}_3 + \dots + \vec{B}_n$$

მაგნიტური ველი ერცელდება როგორც ვაკუუმში, ასევე ნივთიერებაში.
ველეს შორის ურთიერთქმედება სხვადასხვა გარემოში სხვადასხვაა. ე. ი.
მაგნიტური ველის ინდუქცია დამოკიდებულია გარემოს მაგნიტურ თვისებებზე.

მაგნიტური ველი ხასიათდება კიდევ ერთი ვექტორული სიდიდით –
მაგნიტური ველის დაძაბულობით H . ვაკუუმში მაგნიტური ველის ინდუქცია
ველის დაძაბულობასთან დაკავშირებულია თანაფარდობით :

$$\vec{B}_0 = \mu_0 \vec{H}_0 \quad (IV.3.1.5)$$

μ_0 - ს უწოდებენ მაგნიტურ მუდმივას, CGS_m სისტემაში მას განზომილება არა
აქვს და $\mu_0 = 1$, ხოლო SI სისტემაში $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ ნ/მ}^2$.

დავუშვათ, კონტურში გამავალი დენი თავის გარშემო სივრცეში ქმნის
მაგნიტურ ველს. სივრცე შევსებულია ნივთიერებით, რომლის ფარდობითი
მაგნიტური შეღწეადობაა μ . იგი გეიჩვენებს სივრცის ერთსა და იმავე
წერტილში, თუ რამდენჯერ მეტია მაგნიტური ინდუქცია ამ ნივთიერებაში,

ვაკუუმთან შედარებით - $\mu = \frac{B}{B_0}$ (IV.3.1.6) (B_0 - მაგნიტური ველის ინდუქციაა

ვაკუუმში; B - მაგნიტური ველის ინდუქციაა ნივთიერებაში).

მაგნიტური ინდუქციის გაზომვა შეიძლება სასინჯი დენიანი ჩარჩოთი. თუ
დენიან ჩარჩოს μ_1 ფარდობითი მაგნიტური შეღწეადობის სივრცეში

მოვათავსებთ, მოცემულ წერტილში მაგნიტური ინდუქცია B_1 -ის ტოლი იქნება. თუ ცდას სხვადასხვა გარემოში ჩავატარებთ, დაერწმუნდებით, რომ:

$$\frac{B_1}{\mu_1} = \frac{B_2}{\mu_2} = \dots = \frac{B_n}{\mu_n} = \text{const}$$

ამრიგად, მაგნიტური ინდუქციის შეფარდება ფარდობით მაგნიტურ შეღწევადობასთან ყველა გარემოსთვის ერთნაირიასევე მუდმივია შეფარდებაც :

$$\frac{B_1}{\mu_0 \mu_1} = \frac{B_2}{\mu_0 \mu_2} = \dots = \frac{B_n}{\mu_0 \mu_n} = \text{const} = H,$$

H – მაგნიტური ველის დაძაბულობას უწოდებენ, ის მიმართულია B ვექტორის გასწვრივ. $\mu' = \mu_0 \mu$ – აბსოლუტურ მაგნიტურ შეღწევადობა. აქედან, $H = \frac{B}{\mu'} = \frac{B}{\mu_0 \mu}$.

ამრიგად, (IV.3.1.6)-დან $B = \mu B_0$, $H = \frac{\mu B_0}{\mu_0 \mu} = \frac{B_0}{\mu_0} = H_0$ (დაძაბულობა ვაკუუმში) (IV.3.1.7). ე.ი. მაგნიტური ველის დაძაბულობა არაა დამოკიდებული გარემოსთვისებებზე და განისაზღვრება კონტურის ფორმით, მასში გამავალი დენის ძალითა და იმ წერტილამდე მანძილით, რომელშიც უნდა გამოითვალოს მაგნიტური ველის დაძაბულობა.

მუდმივი დენის მაგნიტური ველის დაძაბულობა შეიძლება გამოვთვალოთ ბიო-სავარ-ლაპლასის კანონით. სივრცის ნებისმიერი წერტილისათვის :

$$dH = k \frac{Idl \sin \alpha}{r^2} \quad (\text{SI სისტემაში } k = \frac{1}{4\pi}), \quad (\text{IV.3.1.8})$$

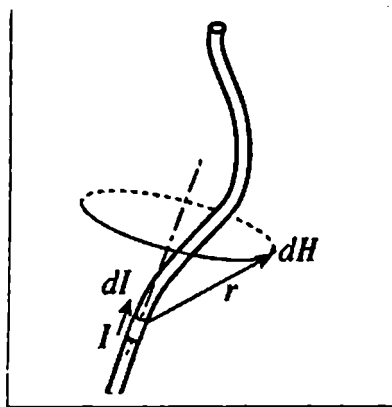
სადაც I – გამტარში გამავალი დენის ძალაა, ხოლო dH^* – გამტარის dl ელემენტით შექმნილი მაგნიტური ველის დაძაბულობა ამ ელემენტიდან r მანძილზე დაშორებულ წერტილში (სურათი 161), α - კუთხე r -სა და dl შორის.

ბიო-სავარ-ლაპლასის კანონს გააჩნია ისეთივე მნიშვნელობა მაგნიტოსტატიკაში, როგორიც კულონის კანონს ელექტროსტატიკაში. ბიო-სავარ-ლაპლასის კანონის გამოყენებით შეგვიძლია, წრიული დენისათვის გამოვთვალოთ მაგნიტური ველის დაძაბულობა წრის ცენტრში (კონტურის ცენტრში).

გავითვალისწინოთ, რომ SI სისტემაში $k = \frac{1}{4\pi}$, მაშინ ბიო-სავარ-ლაპლასის კანონი ასე ჩაიწერება :

$$dH = \frac{1}{4\pi} \frac{Idl \sin \alpha}{r^2}$$

* dH - H -ის „დიფერენციალი“, d -თი აღინიშნება რაიმე ფიზიკური სიდიდის უსასრულოდ მცირე მნიშვნელობა და არა რაღაც d გამრავლებული H -ზე.



სურათი 161

ბიო-სავარ-ლაპლასის კანონი იძლევა სივრცის ნებისმიერ წერტილში მაგნიტური ველის დაძაბულობის განსაზღვრის საშუალებას

იმისათვის, რომ ვიპოვოთ მაგნიტური ველის დაძაბულობა წრის ცენტრში საკმარისია ტოლობის ორივე მხარის ინტეგრირება* :

$$\int dH = \frac{1}{4\pi} \int \frac{I dl \sin \alpha}{r^2}$$

$$H = \frac{I}{4\pi} \int \frac{\sin \alpha dl}{r^2}$$

იმის გათვალისწინებით, რომ $\sin \alpha = 1$, $r = \text{const}$, $I = \text{const}$, მუდმივებს ინტეგრალის ნიშნიდან თუ გამოვიტანთ, მივიღებთ :

$$H = \frac{I}{4\pi r^2} \int_0^{2\pi r} dl = \frac{I}{2r}$$

$$H = \frac{I}{2r} = \frac{I}{D}$$

სადაც D - წრის დიამეტრია.

წრიული დენისათვის მიღებული ეს მარტივი ფორმულა შეიძლება გამოვიყენოთ მაგნიტური ველის დაძაბულობის ერთეულის დასადგენად. მაგნიტური ველის დაძაბულობის ერთეულად SI სისტემაში მიღებულია $1 \frac{A}{m}$. ეს ისეთი ველის დაძაბულობაა, რომელსაც ქმნის 1 მ დიამეტრის წრიული გამტარი წრის ცენტრში, 1 ა დენის დროს.

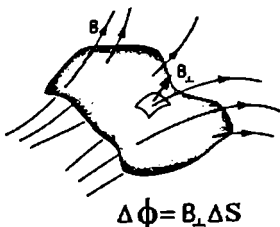
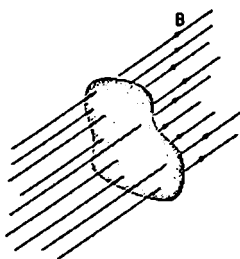
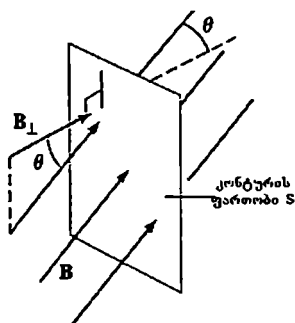
* ინტეგრირება ლიფერენციალების შებრუნებული მოქმედებაა.

სისტემაგარეშე ერთეულია 1 ერსტედი (ე); $1 \frac{\text{ბ}}{\text{გ}} = 4\pi \cdot 10^{-3} \text{ ე.}$

IV.32 ელექტრომაგნიტური ინდუქცია

მე-19 საუკუნის შუა ხანებში უკვე ცნობილი იყო, რომ დენიანი გამტარი მის ირგვლივ აღძრავს მაგნიტურ ველს. გაჩნდა ლოგიკური კითხვა: ხომ არ შეუძლია მაგნიტურ ველს აღძრას ელექტრული დენი? ამ კითხვით დაინტერესდა ფარადეი და მან ცნობილი ცდების (კოჭისა და მუდმივი მაგნიტის ურთიერთქმედება) საფუძველზე აღმოაჩინა, რომ გარეშე მაგნიტური ველის ცვლილებებით კოჭაში ინდუქციის ე.მ.ა. აღიძვრება და, თუ კოჭის წრედი შეკრულია, გაივლის დენი. ამ მოვლენას ელექტრომაგნიტური ინდუქციის მოვლენა ეწოდება, აღძრულ დენს – ინდუქციური დენი.

საინტერესოა აღინიშნოს, რომ ჩაკეტილ კონტურში (სურათი 162) ინდუქციური დენი აღიძვრება ყოველთვის, თუ კონტურის განმჭოლავი მაგნიტური ნაკადი იცვლება, მიუხედავად იმისა, თუ რა გზითაა მიღწეული ნაკადის ეს ცვლილება (კონტურის ფართობის შემცირებით, კონტურის ბრუნვით, მაგნიტური ველის ცვლილებით, თუ სხვ.).



სურათი 162

მაგნიტური ინდუქციის ნაკადი სხვადასხვა გეომეტრიის ზედაპირის შემთხვევაში

ფარადეის ელექტრომაგნიტური ინდუქციის კანონი მათემატიკურად ასე ჩაიწერება:

$$\mathcal{E}_i = -k \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}, \quad (\text{IV.32.1})$$

სადაც $\mathcal{E}_i$ – ინდუქციით აღძრული ე.მ.ა.აა, $\Delta \Phi$ – კონტურით შემოსაზღვრულ ფართობში მაგნიტური ნაკადის ცვლილება Δt დროში. ე.ი. ინდუქციის ელექტრომამოძრავებელი ძალა (ე.მ.ა.)

პროპორციული მაგნიტური ნაკადის ცვლილების სიჩქარისა შეგრუნებული ნიშნით. ინდუქციური დენი უდრის:

$$I = \frac{\epsilon_0}{R}, \quad (IV.32.2)$$

სადაც R – კონტურის წინაღობაა.

მაგნიტური ინდუქციის ნაკადი.

ერთგვაროვანი მაგნიტური ველის მაგნიტური ნაკადი, Φ - რაიმე კონტურში (სურათი 161) განისაზღვრება ფორმულით:

$$\Phi = B \Delta S = B S \cos \theta, \quad (IV.32.3)$$

სადაც B – მაგნიტური ველის ინდუქცია, $B \Delta$ – B -ს სიბრტყის მართობი მდგენელია, S – კონტურით შემოსაზღვრული ზედაპირის ფართობი, θ - კუთხე B ვექტორის მიმართულებასა და სიბრტყის მართობს (ნორმალს) შორის. მაგნიტური ნაკადის ერთეულია ვებერი.

→

თუ ველი (B) მოცემული სიბრტყის პერპენდიკულარულია, $\theta = 0^\circ$ და

$$\Phi = BS$$

ანუ მაგნიტური ნაკადი მისი გავრცელების მიმართულების პერპენდიკულარული ზედაპირის კვეთის ფართობისა და მაგნიტური ველის ინდუქციის ნამრავლის ტოლია. თუ ველი მოცემული სიბრტყის პარალელურია, $\theta = 90^\circ$ და $\Phi = 0$.

ლენცის წესი.

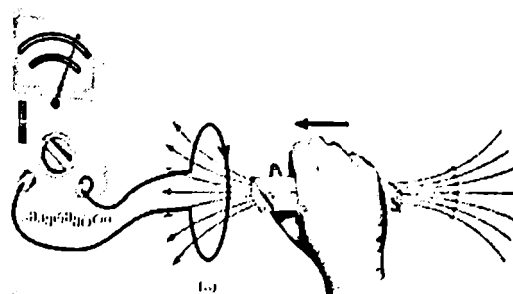
1834 წელს ჰენრიმ ლენცმა ექსპერიმენტებით დაადგინა ცვლადი მაგნიტური ველით ინდუცირებული დენის მიმართულება და ჩამოაყალიბა დებულება, რომელიც ცნობილია ლენცის წესის სახელწოდებით.

ლენცის წესი: ჩაკეტილ გამტარ კონტურში ცვლადი მაგნიტური ნაკადის მიერ ინდუცირებული ელექტრული დენი მიმართულია ისე, რომ მის მიერ აღძრული მაგნიტური ველი ეწინააღმდეგება ძირითადი (ამ დენის წარმოშობი) მაგნიტური ნაკადის ცვლილებებს (მიმართულია ნაკადის საწინააღმდეგოდ, როცა ნაკადი იზრდება და თანხვედრილია, როცა ნაკადი მცირდება) (სურათი 163).

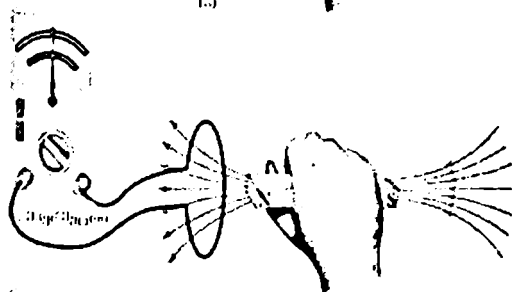
ლენცის წესი წარმოადგენს ნიუტონის მესამე კანონის (ყოველი ქმედების საპასუხოდ აღმოცენდება ტოლი უკუქმედება) გამოვლინებას ელექტრომაგნიტურ ურთიერთქმედებაში. ელექტრომაგნიტური ენერგიის გარდაქმნა ხორციელდება ლენცის წესის მიხედვით. განვიხილოთ მარტივი ელექტრული წრედი (სურათი 163). როდესაც წრედს ჩავრთავთ დენის წყაროსთან, ელექტრული დენი წრედში მყისიერად იზრდება ნულიდან ომის კანონის მიხედვით განსაზღვრულ

მნიშვნელობამდე ($I = \frac{U}{R}$). ამ დროს დენიანი გამტარის ირგვლივ წარმოიქმნება

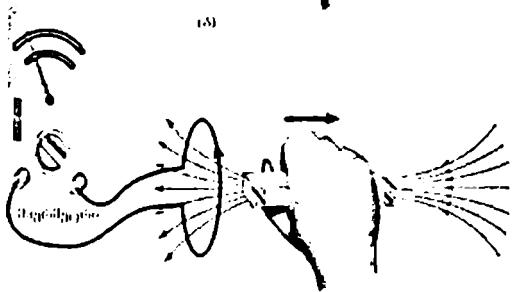
მაგნიტური ველი, რომელიც დროის მიხედვით არ იცვლება (რადგან $I = const$) და განისაზღვრება ბიო-სავარ-ლაპლასის და ამპერის კანონების მიხედვით; ველში დაგროვებულია დენის წყაროს მიერ წარმოქმნილი ენერგია. თუ ეს მაგნიტური ველი რაიმე ზემოქმედების შედეგად იცვლება, წრედში გენერირდება ელექტრული დენი, რომელიც წინააღმდეგობას უწევს ამ ცვლილებას (სურათი 163).



(ა)



(ბ)



(გ)

სურათი 163

ელექტრომაგნიტური ინდუქციის მოვლენა (დენის წესი). ა - კონტურს უახლოვდება მაგნიტი N პოლუსით. ინდუქციით აღიძრა ისეთი მიმართულების დენი (ისარი კონტურზე), რომ წარმოქმნილი მაგნიტური ველი (N პოლუსი) ეწინააღმდეგება მაგნიტის მიახლოებას; ბ - მაგნიტი უძრავია, $I = 0$; გ - მაგნიტი შორდება, აღძრული ინდუქციური დენი იცვლის მიმართულებას და წარმოშობს სამხრეთ (S) პოლუსს - ხელს უშლის მაგნიტის დაშორებას (Nico A.M. Schellart. "Compendium of Medical Physics, Medical Technology and Biophysics", Amsterdam, 2009)



ჰეინრიხ ფრიდრიხ ემილ ლენცი
(1804-1865)

როგორც მოყვანილი მაგალითიდან ჩანს, *ელექტრულ დენს აღძრავს არა მაგნიტური ნაკადი, არამედ მისი ცვლილება!*

ზემოთ განხილული ცდების საფუძველზე ლენცმა აღმოაჩინა კანონი, რომელიც *ენერგიის მუდმივობის კანონის* შედეგია. მართლაც, მაგნიტის მიახლოების დროს კონტურში აღძრული ინდუქციური დენის მაგნიტური ველი ეწინააღმდეგება მაგნიტის მიახლოებას, ამ დროს მაგნიტის მიახლოებაზე შესრულებული მუშაობა ინდუქციური დენის ელექტრულ ენერგიად გარდაიქმნება. ლენცის კანონის მიხედვით *ჩაკეტილ კონტურში აღძრულ ინდუქციურ დენს ისეთი მიმართულება აქვს, რომ მისი მაგნიტური ველი ეწინააღმდეგება ამ დენის გამომწვევ მაგნიტური ნაკადის ცვლილებას.*

მაგნიტური ნაკადის ცვლილება წარმოშობს ელექტრულ ველს, რომელიც გამტარზე მოქმედებს, როგორც გარეშე ელექტრომაგნიტური ველი ძალა (ე.მ.ძ.) და აღძრავს ინდუქციურ დენს.

ე.მ.ძ. შეიძლება გამოითვალოს ფორმულით :

$$\mathcal{E} = -k \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

როგორც ფორმულიდან ჩანს, ინდუქციის ემძ რაიმე კონტურით შემოსაზღვრულ ფართობზე მაგნიტური ნაკადის ცვლილების სიჩქარის ტოლია *შებრუნებული ნიშნით* (ლენცის წესის შესაბამისად). როცა $k=1$

$$|\Delta\Phi| = \mathcal{E}\Delta t$$

$$\Delta\Phi = (\Phi - 0) = \Phi$$

$$\Phi = \varepsilon \Delta t$$

ამრიგად, თუ $\varepsilon = 1$, $\Delta t = 1$ წმ, მაშინ $\Phi = 1$ ვებერს.

ჩაკეტილი კონტურით შემოსაზღვრულ ფართობში გამავალი ნაკადი ერთი ვებერსის ტოლია. თუ კონტურში ამ ნაკადის წყლამდე თანაბრად შემცირების დროს ერთ წამში, აღიძვრება ერთი ვოლტის ტოლი ინდუქციის ელექტრომაგნიტური ძალა.

თუ გავიხსენებთ, რომ $\Phi = B S$ (როცა $B \perp S$)

$$B = \frac{\Phi}{S}$$

ამ ფორმულით შესაძლებელია ინდუქციის ერთეულის ასეთი განმარტება: 1 ტლ = 1 ვბ. ვი. ტესლა არის ისეთი მაგნიტური ველის ინდუქცია, რომლის მაგნიტური ნაკადი ველის პერპენდიკულარულად მოთავსებულ 1 მ² ფართობში ტოლია 1 ვებერსის.

თვითინდუქციის მოვლენა. ინდუქციური კოჭი (სოლენოიდი)

თვითინდუქციის მოვლენა არის ელექტრომაგნიტური ინდუქციის კერძო შემთხვევა. ელექტრომაგნიტური ინდუქციის მოვლენა მუდამაა, როდესაც იცვლება გამტარით შემოსაზღვრულ ფართობში გამავალი მაგნიტური ნაკადი. ამავე დროს მნიშვნელობა არა აქვს იმას, თუ რითაა შექმნილი ეს ნაკადი და რა იწვევს მის ცვლილებას. ეს ნაკადი შეიძლება შექმნილი იყოს თვით იმ დენით, რომელიც გადის კონტურში და ნაკადის ცვლილებაც შეიძლება გამოიწვევოს იყოს თვით ამავე დენის ცვლილებით. ცხადია, ამ დროს კონტურში უნდა აღიძვრას ინდუქციის ემპ. სწორედ საკუთარი მაგნიტური ველის ცვლილებით იმავე კონტურში ინდუქციის ემპ-ს აღძვრას თვითინდუქციის მოვლენა ეწოდება.

თვითინდუქციის ემპ, ტოლია :

$$\varepsilon = -L \frac{\Delta I}{\Delta t} \quad (\text{IV } 3.2.4)$$

სადაც L - თვითინდუქციის კოეფიციენტი, $\frac{\Delta I}{\Delta t}$ - დენის ცვლილების სიჩქარე L -ს ინდუქციურობასაც უწოდებენ; ნიშანი '-' მიუთითებს იმაზე, რომ აღძრული თვითინდუქციის ემპ. ეწინააღმდეგება მისი წარმოშობით დენის ყოველგვარ ცვლილებას (როგორც გაზრდას, ასევე შემცირებას). იგი დამოკიდებულია გამტარის კონტურის ფართობზე, ზომასა და გარემოს თვისებებზე. მისი ერთეულია ჰენრი. ერთი ჰენრი ისეთი კოჭის ინდუქციურობაა, რომელშიც აღიძვრება თვითინდუქციის ემპ $\varepsilon = 1$ ვ. როცა დენი იცვლება 1 ამპერით 1 წამში. წრფივი გამტარის L უმნიშვნელოა. მაგრამ, თუ მას კოჭად დაეახვევთ (სოლენოიდ*), L მკვეთრად გაიზრდება. თვითინდუქციის მოვლენა და ლენცის წესი ადვილად შესაძინებელია ცდით.

მსგავსი მოვლენები მუდმივი დენის პირობებში გამოვლინდება მხოლოდ წრედის ჩართვის ან გამორთვისას.

ინდუქციური წინაღობა X_L გამოისახება ფორმულით:

$$X_L = \omega L \quad (\text{IV } 3.2.5)$$

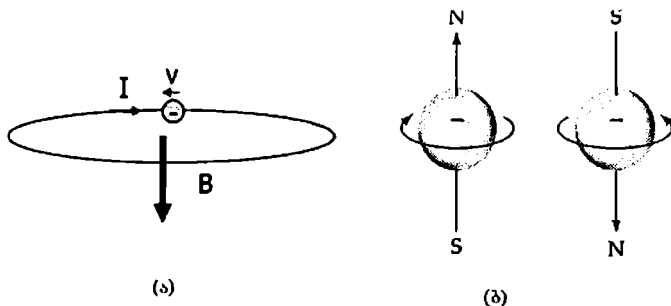
როგორც ფორმულიდან ჩანს, მოცემული წინაღობა სისხირის პროპორციულია L -სათვის (კოჭისთვის).

*სოლენოიდი - სპირალური გამტარია, მასში დენის გავლის დროს ვითრდება თვითინდუქცია.

IV.3.3 ნივთიერებათა მაგნიტური თვისებები

მაგნიტურ ველში მოთავსებული ნივთიერება გარკვეულ ზემოქმედებას განიცდის ველის მხრიდან. განსხვავებული ნივთიერებები ასეთ ზემოქმედებაზე სხვადასხვანაირად რეაგირებს, მაგრამ ნებისმიერ შემთხვევაში მაგნიტურ ველში მოთავსებული ნივთიერება თვითონ ხდება მაგნიტური ველის წყარო.

მაგნიტური თვისებების მიხედვით განასხვავებენ **დიამაგნიტურ**, **პარამაგნიტურ** და **ფერომაგნიტურ** ნივთიერებებს. ნივთიერების მაგნიტური თვისებები ძირითადად განისაზღვრება მის შემადგენელ ატომებში ელექტრონების ორბიტალური მოძრაობით და მათი ბრუნვით საკუთარი წარმოსახვითი ღერძის გარშემო (სპინით) (სურათი 164).



სურათი 164

ელექტრონის ორბიტალური (ა) და სპინური (ბ) მაგნიტური მომენტი I – დენის

მიმართულება; v – ელექტრონის მოძრაობის მიმართულება

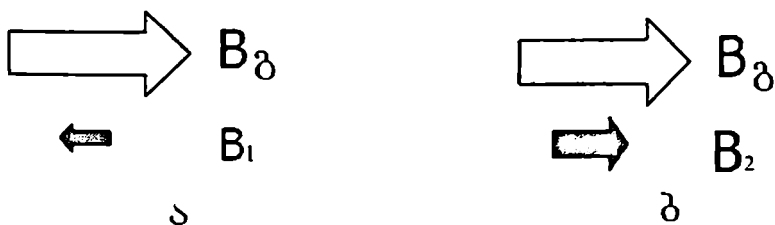
(Nico A.M. Schellart. "Compendium of Medical Physics, Medical Technology and Biophysics", Amsterdam, 2009)

პირობითად შეიძლება ჩავთვალოთ, რომ ატომში ელექტრონი ბრუნავს ბირთვის გარშემო r რადიუსიან წრიულ ორბიტალზე. ვინაიდან ელექტრონს გააჩნია მუხტი (უარყოფითი), მისი ორბიტალური მოძრაობა შეიძლება შევედაროთ ელემენტარულ დენიან კონტურს, რომელსაც ამპერის კანონის თანახმად, გააჩნია ამ კონტურის სიბრტყის პერპენდიკულარულად მიმართული მომენტი (ორბიტალური მაგნიტური მომენტი $P_{ორბ}$). ელექტრონი ატომში ორბიტალური მოძრაობის გარდა საკუთარი ღერძის გარშემო ბრუნვით (სპინურ) მოძრაობას ასრულებს, რის გამოც (თუ ამ მოძრაობას ელემენტარულ დენიან კონტურს შევედარებთ) მას გააჩნია დამატებითი სპინური მაგნიტური მომენტი ($P_{სპ}$). ასე რომ, ელექტრონის სრული მაგნიტური მომენტი ($P_{სრ}$) ორბიტალური და სპინური მაგნიტური მომენტების ჯამის ტოლია:

$$P_{სრ} = P_{ორბ} + P_{სპ}$$

ჩვეულებრივ, ატომის ყველა ელექტრონულ ორბიტალზე დაწვეილებული, საწინააღმდეგო სპინის მქონე ელექტრონია (ამ საკითხს ჩვენ უფრო დაწვრილებით განვიხილავთ ქვემოთ ატომის სტრუქტურის შესწავლის დროს). შედეგად ატომის ჯამური სპინური მაგნიტური მომენტი ნულის ტოლია. ატომის ელექტრონების ორბიტალური მაგნიტური მომენტები ორიენტირებულია ქაოსურად ისე, რომ მათი ელემენტარული მაგნიტური მომენტები ერთმანეთს აბათილებს და ატომის (მოლეკულის) ჯამური მაგნიტური მომენტი უდრის ნულს.

თუ ნივთიერებას მოვათავსებთ B_0 ინდუქციის მაგნიტურ ველში, ლენცის წესის თანახმად, ორბიტალური ელექტრონების მაგნიტური მომენტების ორიენტაცია იცვლება ისე, რომ ნივთიერების მიერ წარმოქმნილი საკუთარი მაგნიტური ველის ინდუქციის ვექტორი B_1 მიმართულია გარეთა მაგნიტური ველის ინდუქციის ვექტორის საწინააღმდეგოდ. შედეგად ნივთიერებაში ჯამური მაგნიტური ველი შემცირდება (სურათი 165ა). ეს მოვლენა ცნობილია **დიამაგნეტიზმის** სახელწოდებით.



სურათი 165

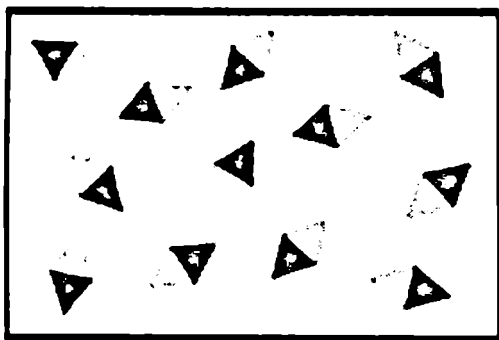
ჯამური მაგნიტური ველი გარეთა მაგნიტურ ველში მოთავსებულ დიამაგნიტურ (ა) და პარამაგნიტურ (ბ) ნივთიერებაში, დიამაგნიტური ნივთიერება ეელს ასუსტებს, პარამაგნიტური კი აძლიერებს

(Nico A.M. Schellart. "Compendium of Medical Physics, Medical Technology and Biophysics", Amsterdam, 2009)

დიამაგნიტური ნივთიერებების მაგნიტური შეღწევადობა $\mu < 1$. ვინაიდან ყველა ატომის ელექტრონებს გააჩნია ორბიტალური მაგნიტური მომენტი, დიამაგნეტიზმი ყველა ნივთიერების საყოველთაო თვისებაა. დიამაგნეტიზმის ფეიქტი საკმაოდ სუსტია.

ცვალებადი ვალენტობის მქონე მეტალების და გარეთა ელექტრონულ ორბიტალზე დაუწყვილებელი ელექტრონების მქონე მოლეკულების (თავისუფალი რადიკალები), ჯამური სპინური მაგნიტური მომენტი ნულისაგან განსხვავდება, დაუწყვილებელი ელექტრონების სპინური მაგნიტური მომენტის გაბათილება არ ხდება). ეს ატომები ნივთიერების შემადგენლობაში წარმოადგენს ქაოსურად განლაგებულ ელემენტარულ მუდმივ მაგნიტებს (სურათი 166), მაგრამ გარეთა

მაგნიტურ ველში მოთავსებისას ეს ელემენტარული მაგნიტები განლაგდება მაგნიტური ველის გასწვრივ (საკუთარი მაგნიტური ველის ინდუქციის ვექტორი **B**) და აძლიერებს მას (სურათი 165ბ) (გაძლიერების ხარისხი დამოკიდებულია დაუწყვილებელი ელექტრონების კონცენტრაციაზე). ეს ეფექტი ცნობილია *პარამაგნეტიზმის* სახელწოდებით.



სურათი 166

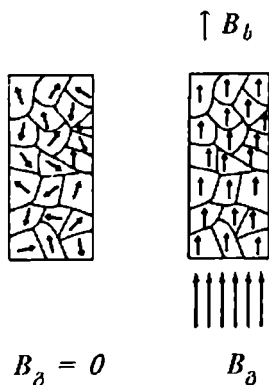
დაუწყვილებელი ელექტრონების მქონე ატომები წარმოქმნის ქაოსურად განლაგებულ ელემენტარულ მუდმივ მაგნიტებს

მაშასადამე, პარამაგნიტური ნივთიერების მაგნიტურ ველში მოთავსებისას მას ორი სახის მაგნიტური ველის წარმოქმნის უნარი გააჩნია: I – ელექტრონების ორბიტალური მაგნიტური მომენტი განპირობებული საპირისპიროდ მიმართული სუსტი მაგნიტური ველი (საყოველთაო დიამაგნეტიზმი) და II – დაუწყვილებელი ელექტრონების სპინური მაგნიტური მომენტი განპირობებული ძირითადი ველის პარალელურად მიმართული მაგნიტური ველი (პარამაგნეტიზმი), რომლის დაძაბულობა დამოკიდებულია დაუწყვილებელი ელექტრონების კონცენტრაციაზე. აქედან გამომდინარე, პარამაგნეტიზმი ნივთიერება აძლიერებს გარეთა მაგნიტურ ველს, მისი მაგნიტური განვლადობა $\mu > \mu_0$. ე.ი. $\mu > 1$.

პარამაგნეტიზმის ეფექტი საკმაოდ სუსტია. პარამაგნეტიკებს მიეკუთვნება მეტალები: ალუმინი, მანგანუმი, ნატრიუმი, პალადიუმი, რკინა, ნიკელი, კობალტი და ა.შ.; ამ მეტალების შემცველი ცილები (მიოგლობინი, ჰემოგლობინი; მცირე მოლეკულების რადიკალური ფორმები (უანგბადი).

საინტერესოა, რომ ელემენტ წყალბადს, იმის მიუხედავად, რომ შეიცავს ერთადერთ დაუწყვილებელ ელექტრონს, არასოდეს უწოდებენ პარამაგნიტურს. ეს გარემოება განპირობებულია იმით, რომ მონოატომური აირი სტაბილურია მხოლოდ ექსტრემალურად მაღალი ტემპერატურის პირობებში. ჩვეულებრივ ტემპერატურაზე H ატომები წყვილდება მოლეკულური წყალბადის H₂-ის წარმოქმნით; ამ დროს სპინების დაწყვილების შედეგად მაგნიტური მომენტი ბათილდება.

ფერომაგნეტიკებს, რომლებიც ავლენენ მუდმივი მაგნიტის თვისებებს, მიეკუთვნება ყველა პარამაგნიტური ნივთიერება *კრისტალურ მდგომარეობაში*. როგორც პარამაგნეტიზმის, ასევე ფერომაგნეტიზმის ძირითადი წყაროა – დაუწყვილებელი ელექტრონის სპინი (ამ შემთხვევაშიც აგრეთვე ვლინდება ატომბირთვის გარშემო მოძრავი ელექტრონის დიამაგნიტური ეფექტი). პარამაგნიტური კრისტალი შეიძლება განვიხილოთ როგორც საკუთარი მაგნიტური მომენტის მქონე დამაგნიტებული დომენების სიმრავლე (დაბალი ენერგიის მქონე კონფიგურაცია); დომენის სპინები განლაგებულია ქაოსურად და მაგნიტური მომენტები აბათილებს ერთმანეთს. როდესაც პარამაგნიტურ კრისტალზე მოქმედებს ძლიერი მაგნიტური ველი, დომენების მაგნიტური მომენტები იცვლის ორიენტაციას, განლაგდება მაგნიტური ველის მიმართულებით, გარეგანი მაგნიტური ველის გამორთვის შემდეგაც ინარჩუნებს დამაგნიტებას, წარმოქმნის მუდმივ მაგნიტს და რამდენიმე ათეულ- და ასეულჯერ ზრდის ჯამურ ველს ($\mu \gg 1$) (სურათი 167).



სურათი 167

ფერომაგნიტური კრისტალი მაგნიტურ ველში

დამაგნიტების ეფექტის მოხსნა შესაძლებელია ან საპირისპიროდ მიმართული ძლიერი მაგნიტური ველის ზემოქმედების შედეგად, ან მაღალ ტემპერატურამდე გაცხელებით (კიურის ტემპერატურა). მაღალ ტემპერატურაზე თერმული ქაოსური მოძრაობა იწვევს ერთი და იმავე მიმართულებით ორიენტირებული დომენების მაგნიტური მომენტების ქაოსურ განლაგებას. ცხრილში 21 მოყვანილია კიურის ტემპერატურის მნიშვნელობა სხვადასხვა კრისტალური ფერომაგნეტიკისთვის.

ზემოთქმულიდან გამომდინარე, გასაგებია, რომ შესაძლებელია ნებისმიერი პარამაგნიტური კრისტალის დამაგნიტება, თუმცა მას შეუძლია მაგნიტური თვისებების დაკარგვაც, ანუ *ფერომაგნეტიზმი* განპირობებულია მასალის არა ქიმიური აგებულებით, არამედ კრისტალური სტრუქტურით და მიკროსკოპული

ორგანიზაციით. ფერომაგნიტური თვისება ახასიათებს არა ცალკეულ ატომს ან მოლეკულას. არამედ მთლიან ნივთიერებას კრისტალურ მდგომარეობაში (დომენებს).

ცხრილი 21

კიურის ტემპერატურა სხვადასხვა კრისტალური ფერომაგნიტიკისთვის
(Nico A.M. Schellart. "Compendium of Medical Physics, Medical Technology and Biophysics", Amsterdam, 2009)

ნივთიერება	კიურის ტემპერატურა (K)
Co	1388
Fe	1043
MnBi	630
Ni	627
MnSb	587
CrO ₂	386
MnAs	318
Gd	292
Dy	88
EuO	69

ფერომაგნიტების მაგნიტურ ველს დიდი მექანიკური ძალის აღძვრა შეუძლია, რაც გამოიყენება მედიცინაში (დეფორმირებული მკერდის ძელის გასწორება ბავშვებში, მეტალის ნაწილაკების თვალისა და აბრეშის ამოღება და სხვა).

V4 ცვლადი დენი

ზემოთ ჩვენ განვიხილეთ ელექტრომაგნიტური ინდუქციის მოვლენა და გავვეცანით ფარადეის ელექტრომაგნიტური ინდუქციის კანონს. ფარადეის მიხედვით, ინდუქციით აღძრული ელექტრომაგნიტური ძალა გამოითვლება ფორმულით :

$$\varepsilon = - k \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$$

სადაც $\frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$ მაგნიტური ნაკადის ცვლილების სიჩქარეა. ნიშანი მინუსი ასახავს ლენცის წესს.

თუ გამტარ ჩარჩოს მოვითავსებთ ერთგვაროვან მაგნიტურ ველში ისე, რომ მისი ბრუნვის ღერძი იყოს მაგნიტური ინდუქციის (B) მართობული და ვაბრუნებთ მას თანაბრად ω კუთხური სიჩქარით, მაშინ დროის რაიმე t მომენტში შემობრუნების კუთხე $\alpha = \omega t$. ჩარჩოს განმგებლად მაგნიტური ნაკადი ტოლია:

$$\Phi = BS \cos \alpha = BS \cos (\omega t),$$

სადაც S - ჩარჩოთი შემოსაზღვრული ფართობია.

Φ - პარმონიული ფუნქციაა ($\sin$ და $\cos$ პარმონიული ფუნქციებია). პარმონიული იქნება ნაკადის ცვლილებების სინქარც :

$$\varepsilon = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = - BS \omega \cos(\omega t + \frac{\pi}{2}) = \varepsilon_0 \sin \omega t^*$$

ამრიგად, ერთგვაროვან მაგნიტურ ველში გამტარი ჩარჩოს თანაბრად ბრუნვისას, ჩარჩოში ინდუქციით აღიქმება ემპ (ε), რომელიც პერიოდულად იცვლება, ასრულებს პარმონიულ რხევას ε_0 ამპლიტუდით. ეს რხევა იძულებითი რხევაა (სრულდება გარეშე ძალის მოქმედებით).

თუ წრედი შეკრულია, მაშინ გაივლის ცვლადი დენი. დენი, რომლის სიდიდე და მიმართულება პერიოდულად (ან როგორც იტყვიან, პარმონიული კანონით) იცვლება, ცვლადი დენი ეწოდება :

$$I = I_0 \sin(\omega t + \varphi).$$

I_0 - დენის მაქსიმალური (ამპლიტუდური) მნიშვნელობა, φ - ფაზათა სხვაობა (ფაზის წანაცვლება) დენის ძალასა და ემპ-ს შორის.

როგორც გაირკვა, ცვლადი დენი - იძულებითი ელექტრომაგნიტური რხევაა ელექტრულ წრედში, რომლის სიხშირე ω ემთხვევა ემპ-ის (ε -ის) სიხშირეს, და მაშასადამე, მაიძულებელი ფაქტორის (ამ შემთხვევაში ჩარჩოს ბრუნვის) სიხშირეს. თუ ცვლადი დენის წრედში ჩართულია რაიმე მომხმარებელი (მაგალითად, ნათურა, უთო), რომლებშიც გამოიყოფა სითბო, ამ შემთხვევაში :

$$\varepsilon = U = IR = \varepsilon_0 \sin \omega t^{**}$$

$$I = \frac{\varepsilon_0}{R} \sin \omega t, \text{ (ომის კანონი)}$$

სადაც R - დატვირთვის (მომხმარებლის) წინაღობაა, I - გამავალი დენი, U - ძაბვა (ძაბვის ვარდნა) R -ზე (სურათი 168 ა). როგორც ε და I -ის გამოსახულებიდან ჩანს, ორივე ეს სიდიდე ერთნაირ ფაზაში ირხევა (*სინუსის არგუმენტს ფაზა ეწოდება*) (სურათი 168ბ).

წინააღობებს, რომლებშიც დენის გავლის დროს გამოიყოფა სითბო, აქტიურ წინააღობებს უწოდებენ. თუ წრედში ჩართულია ინდუქციური კოჭი, იგი ხელს შეუშლის მასში გამავალ ცვლად დენს, რადგან ცვლადი დენი კოჭაში აღძრავს თვითინდუქციის ემპ-ს, რომლის მიერ აღძრული თვითინდუქციის დენი ეწინააღმდეგება კოჭაში გამავალი დენის ცვლილებას (ლენცის წესი). ამრიგად, ინდუქციის კოჭას გააჩნია წინააღობა $X_L = \omega L$ (ინდუქციური წინააღობა) (სურათი 169ა)..

$$\text{როგორც ვიცით, } \varepsilon = \varepsilon_0 \sin \omega t; \quad I = I_0 \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}) \quad (\text{IV.4.1}).$$

$$\text{ომის კანონიდან } I_0 = \frac{\varepsilon_0}{X_L} = \frac{\varepsilon_0}{\omega L} \quad (\text{IV.4.2})$$

სადაც L - კოჭის ინდუქციურობაა.

როგორც (IV.4.1) (ε -ს და I -ის ფორმულიდან ჩანს, დენის ძალა $\frac{\pi}{2}$ -ით ჩამორჩება (I -ის მაქსიმალური მნიშვნელობა უფრო გვიანაა, ვიდრე U -ს) (სურათი 169ბ).

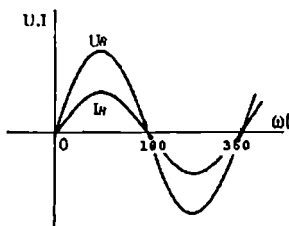
* $\frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$ - საშუალო სინქარცა. მეისი სინქარც კი ტოლია $\frac{d\Phi}{dt}$ - ნაკადის წარმოებულის დროითი.

სადაც $\varepsilon_0 = BS\omega$ - ინდუქციის ემპ-ის (ε) მაქსიმალური (ამპლიტუდური) მნიშვნელობა.

** ზოგადად, როცა წრედში ჩართულია აქტიური (ომური) და რეაქტიული (ტექადური და ინდუქციური) წინააღობა, მაშინ $\varepsilon = U_R + U_C + U_L$



(ა)

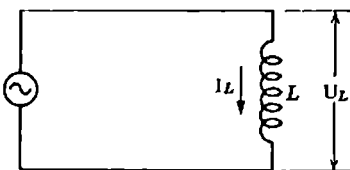


(ბ)

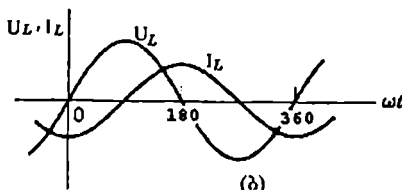
სურათი 168

ა - მუდმივი აქტიური წინაღობის შემცველი ცვლადი დენის წრედი;

ბ - ძაბვის და დენის ძალის პერიოდული ცვლილებების გრაფიკი



(ა)



(ბ)

სურათი 169

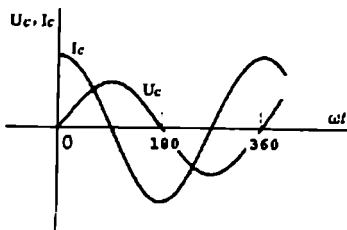
ა - ინდუქციური კოჭის შემცველი ცვლადი დენის წრედი;

ბ - ძაბვის და დენის ძალის პერიოდული ცვლილებების გრაფიკი

ცვლადი დენის წრედში თუ ჩართულია კონდენსატორი (სურათი 170ა), იგი უკვე არაა უსასრულოდ დიდი წინაღობა, როგორც ეს იყო მუდმივი დენის შემთხვევაში. კონდენსატორის წინაღობა $X_C = \frac{1}{\omega C}$. აქაც $\varepsilon = \varepsilon_0 \sin \omega t$, მაგრამ დენის ძალა უკვე წინ უსწრებს ემპ-ს ფაზით $\frac{\pi}{2}$ (სურათი 170ბ) : $I = I_0 \sin (\omega t + \frac{\pi}{2})$



(ა)



(ბ)

სურათი 170

ა - კონდენსატორის შეტყეული წრედი;

ბ - ძაბვის და დენის ძალის პერიოდული ცვლილებების გრაფიკი

ინდუქციურობის და ტევადობის ჩართვით წრედში ენერგია სითბოს სახით არ გამოიყოფა. ასეთ წინააღმდეგობებს რეაქტიულ წინააღობებს უწოდებენ. წრედის სრული წინააღობა (იმპედანსი) მათი მიმდევრობით შეერთების დროს ტოლია :

$$Z = \sqrt{R + (L\omega - \frac{1}{C\omega})^2}$$

როგორც უკვე ვნახეთ, ცვლადი დენის მაქსიმალური სიდიდეები: ემპ, დენის ძალა, ძაბვა დროის მიხედვით პერიოდულად იცვლება. ცხადია, მათი შეფასება საშუალო მნიშვნელობით მიზანშეწონილი არ არის (საშუალო მნიშვნელობა ნულია). ამიტომ შემოღებულია ამ სიდიდეების *მოქმედი*, ანუ *ეფექტური* მნიშვნელობის ცნება :

$$\varepsilon_{\text{ეფ}} = \frac{\varepsilon_0}{\sqrt{2}}, \quad I_{\text{ეფ}} = \frac{I_0}{\sqrt{2}}, \quad U_{\text{ეფ}} = \frac{U_0}{\sqrt{2}}$$

სიდიდეები ინდექსით „0“, მათი მაქსიმალური მნიშვნელობებია. ცვლადი დენის მაქსიმალურ სიდიდეებს (ε , I , U) ეფექტური მნიშვნელობა ეწოდება მუდმივი დენის (შესაბამისი სიდიდეების) იმ მნიშვნელობებს, რომლებიც აქტიურ წინააღობაში გამოყოფს ისეთივე სიმძლავრეს, როგორსაც ცვლადი დენი. როცა ამბობენ, რომ სამომხმარებლო ქსელში ძაბვა 220 ვოლტია, იგულისხმება ძაბვის სწორედ ეფექტური მნიშვნელობა, 220 ე მუდმივი დენიც* ისეთივე სიმძლავრეს გამოყოფს.

* უფრო ზუსტია ძაბვა, მაგრამ პრაქტიკაში არის დამკვიდრებული ეს ტერმინი.

IV.4.1 ცვლადი დენის გენერატორი

ცვლადი დენის მისაღებად იყენებენ ცვლადი დენის ინდექციურ გენერატორს. ეს მოწყობილობა მექანიკურ ენერგიას გარდაქმნის ელექტრულ ენერგიად. ცვლადი დენის გენერატორის მუშაობის პრინციპი უკვე განვიხილეთ ერთგვაროვან მაგნიტურ ველში მოთავსებული ჩარჩოს თანაბარი ბრუნვის შესწავლისას. ენახეთ, რომ ჩარჩოში აღძრული ემპ:

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_0 \sin \omega t,$$

სადაც $\mathcal{E}_0 = \Phi_0 \omega$. მაგრამ თუ ამ ველში ბრუნავს არა ერთი, არამედ ერთმანეთთან მიმდევრობით მიერთებული n ხოისაგან შემდგარი ჩარჩო, მაშინ ცხადია, რომ აღძრული ემპ n -ჯერ მეტი იქნება, ე.ი. $\mathcal{E}_0 = n\Phi_0 \omega$. სწორედ ამ პრინციპზე მუშაობს ყველა ის ელექტროსადგური (ჰიდრო-, თბო-, ატომური, ქარის, მზის)*, სადაც ვარდნილი წყლის, ორთქლის ჭაღლის მექანიკური ენერგია აბრუნებს ცვლადი დენის გენერატორს და მიიღება ელექტროენერგია.

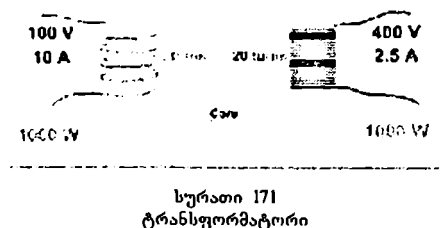
უნდა აღინიშნოს. რომ ცვლადი დენი მეტად ხელსაყრელია მოხმარების თვალსაზრისით. ჩვეულებრივ მომხმარებელს რამდენიმე ასეული და ათასეული კილომეტრი აშორებს ელექტროსადგურს. საჭიროა ელექტროენერგიის სადენით (მათულისით) გადაცემა ამ მანძილზე. უშუალოდ გენერატორიდან მიღებული ემპ-ს გადაცემისას მათულებზე გამოიყოფა სითბო Q ($Q = kIRn$), რომელიც გადაეცემა გარემოს (ატმოსფეროს), ე.ი. ენერგიის ეს რაოდენობა

იკარგება. სიმძლავრე. ანუ დროის ერთეულში გამოყოფილი ენერგია $N = \frac{Q}{t} = kIR$. თუ

გავითვალისწინებთ ომის კანონს წრედის უბნისათვის, მივიღებთ $N = IU$ ($k = 1$).

ვინაიდან სადენებში გამოყოფილი სითბო დენის ძალის კვადრატის პროპორციულია, ენერგიის დანაკარგის შესამცირებლად საჭიროა შემცირდეს დენის ძალა ისე, რომ სიმძლავრე დარჩეს მუდმივი. ეს შესაძლებელია მაშინ, თუ ძაბვა გაიზარდება იმდენჯერ, რამდენჯერაც შემცირდება დენის ძალა. მისი მიღწევა შესაძლებელია ტრანსფორმატორის გამოყენებით.

ტრანსფორმატორი არის ტექნიკური მოწყობილობა, რომლის საშუალებით შესაძლებელია ცვლადი ძაბვის ამაღლება ან დადაბლება (სურათი 171). მის მუშაობას საფუძვლად უდევს მაგნიტური ინდექციის მოვლენა. იგი შედგება ერთმანეთთან ინდექციურად დაკავშირებული ორი კოკისაგან რკინის გულარი (რკინის გულარი ზრდის მაგნიტური ველის ინდექციას. თანაც გულარი დამზადებულია ერთმანეთისაგან იზოლირებული ფირფიტებისაგან გრიგალური დენების შესამცირებლად. რათა გულარში ენერგიის დანაკარგი იყოს მინიმალური). გულარზე წამოცმულია კოჭები. იმ კოჭას, რომელიც გარდასაქმნელ ძაბვას უერთდება, პირველადი გრადილი ეწოდება, ხოლო მეორეს, რომლის ბოლოებზე გარდაქმნილი ძაბვა მიიღება, მეორეული გრადილი ეწოდება.



სურათი 171
ტრანსფორმატორი

პირველად გრადილში გამავალი ცვლადი დენი გულარში აღძრავს ცვლად მაგნიტურ ველს, რომელიც კლსადგური ფოტოეფექტზე მუშაობს

მელიც განტოლავს როგორც პირველად, ასევე მეორეულ გრაგნილს და კოტების თითოეულ ხეიაში ინდუქციით აღძრავს ერთნაირ ემძ-ს $\mathcal{E}$. თუ ხეიათა რიცხვი პირველად გრაგნილში უდრის n_1 , ხოლო მეორეულში n_2 -ს, მაშინ სრელი ემძ პირველადში იქნება $\mathcal{E}_1 = en_1$, მეორეულში კი - $\mathcal{E}_2 = en_2$. აქედან :

$$\frac{\mathcal{E}_1}{\mathcal{E}_2} = \frac{en_1}{en_2}.$$

ტრანსფორმატორის ფუტი სეღის დროს (ეი. როდესაც მეორეულ გრაგნილზე არაა ჩართული რაიმე დატეირთეა (მომხმარებელი))

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{\mathcal{E}_1}{\mathcal{E}_2} = \frac{n_1}{n_2},$$

სადაც U_1 და U_2 პირველად და მეორეულ გრაგნილზეზე ძაბეაა. თუ $U_1 > U_2$

ტრანსფორმატორის დამაღაბლებელია, ხოლო როცა $U_2 > U_1$ - ამაღლებელი.

ტრანსფორმატორის მუშაობის დროს ენერგია გადაიცემა პირველადი წრედიდან მეორეულ წრედში. რადგან ტრანსფორმატორში ძალიან მცირეა ენერგიის დანაკარგი, ამიტომ ენერგიის მუდმივობის კანონიდან გამომდინარე, პირველადს და მეორად წრედში დატეირთეის დენების სიმძლავრე შეიძლება ტოლად ჩაეთვალეთ :

$$I_1U_1 = I_2U_2 \text{ ან}$$

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{U_2}{U_1}$$

ამრიგად, როგორც ამ ფორმულიდან ჩანს, ტრანსფორმატორით შეიძლება ავამაღლოთ ძაბეა, მაგრამ დენი შემცირდება, ასე რომ, ენერგიის თვალსაზრისით რაიმე მოგებაზე საუბარი ზედმეტია. ისევე, როგორც სხვა მარტივი მექანიზმების შემთხვევაში.

ელექტროსადგურებში ხდება ძაბვის ამაღლება დენის ტრანსფორმატორით, მაღალი ძაბვის გადაცემა და მომხმარებელთან ძაბვის ისე დადაბლება საჭირო სიდიდემდე. ასეთ პირობებში გადამცემ სადენებში გადის მცირე დენი, რაც სითბური დანაკარგის შემცირებას იწვევს.

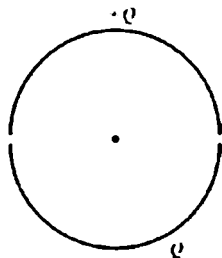
საკონტროლო კითხვები და ამოცანები:

1. სურათზე ნაჩვენებია ელექტრული დიპოლი და ერთეულოვანი დადებითი მუხტი (q), რომელიც თანაბრად არის დაშორებული დიპოლის პოლუსებიდან. იპოვეთ ამ მუხტზე მოქმედი ძალის მიმართულება.

• + 4



2. წრიული გამტარი. რადიუსით R , გაყოფილია ორ ნახევარწრედ. ზედა ნაწილი დამუხტულია დადებითად, ქვედა უარყოფითად. რას უდრის ელექტრული ველის (E) დაძაბულობის სიდიდე წრიული გამტარის ცენტრში?

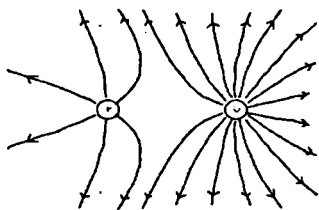


3. დადებითად დამუხტული მეტალის ღერო დევს ნეიტრალური მეტალის სფეროს მახლობლად. თუ ღეროს მიეუახლოვებით, სფერო დაიმუხტება უარყოფითად. რითია გამოწვეული დამუხტვის პროცესი? რა მოხდება, თუ ავიღებთ ხის სფეროს?

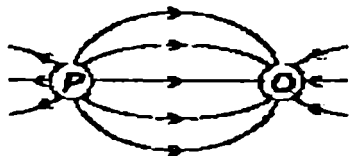
4. როგორ არ უნდა მოვიქცეთ ელვის დროს?

ა) დავრჩეთ შენობაში, სადაც არის სახურაზე დამონტაჟებული ელვის მუხამრიდი (დამიწება); ბ) დავდგეთ ფანჯარასთან, რომელსაც აქვს მეტალის ჩარჩო; გ) დავსხდეთ მიწაზე ღია მინდორში.

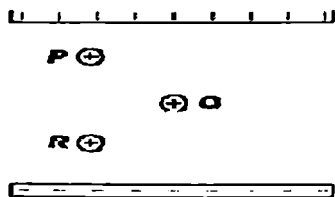
5. დიაგრამაზე ნაჩვენებია ელექტრული ველის ძაღწირები, რომლებიც გამოდის ორი ელექტრულად დამუხტული P და Q ნაწილაკებიდან. რომელი ნაწილაკის მუხტია ნაკლები?



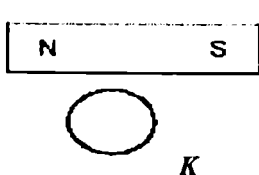
6. სურათზე ნაჩვენებია ელექტრული ძაღწირები. რა ინფორმაციას იძლევა ნახაზი P და Q მუხტების შესახებ?



7. სურათზე ნაჩვენებია სამი ტოლი დადებითი მუხტი, რომლებიც მოთავსებულია ორ მეტალის ფირფიტას შორის. შეადარეთ ფირფიტებს შორის არსებული ელექტრული ველის მხრიდან მუხტებზე მოქმედი ძალები. რა შეგიძლიათ თქვათ მათი სიდიდეების შესახებ?

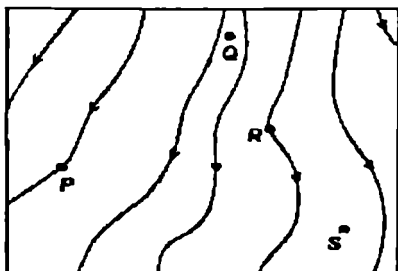


8. მოვითავსოთ კომპასი K მაგნიტის სიახლოვეს. როგორი იქნება კომპასის ისრის მიმართულება?

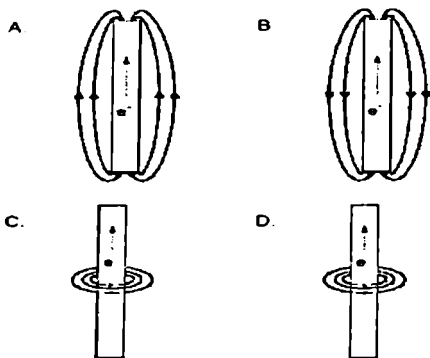


- A. 
 B. 
 C. 
 D. 

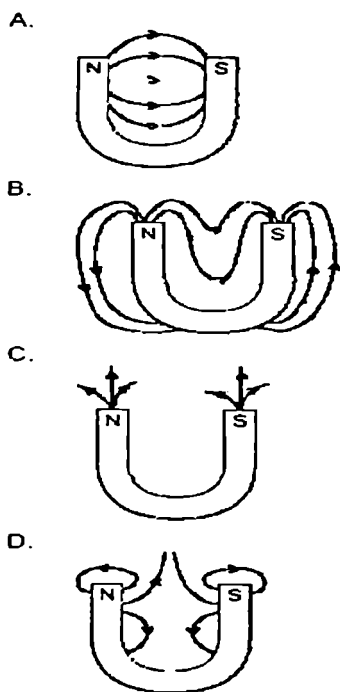
9. რომელ წერტილშია მაგნიტური ველი ყველაზე ძლიერი?



10. რომელ სურათზეა სწორად გამოსახული სადენიანი გამტარის ირგვლივ მაგნიტური ველის ძაღწირების მიმართულება?



11. რომელ სურათზეა მაგნიტური ძაღწირები სწორად გამოსახული?



V ბიოელექტრობა და ბიომაგნეტიზმი

V.1 ბიოელექტრობა

V.1.1 ცოცხალი უჯრედის ელექტრული თვისებები

ცოცხალი ორგანიზმის უჯრედები შედგება მოლეკულებისა და ატომებისაგან, რომლებიც შეიცავენ უარყოფითად დამუხტულ ელექტრონებს, დადებითად დამუხტულ პროტონებს და უმუხტო ნეიტრონებს. ცოცხალ უჯრედებსა და ქსოვილებში ცხოველქმედების მნიშვნელოვანი პროცესები (ბიოქიმიური და ფიზიოლოგიური რეაქციები) ხორციელდება დამუხტული ნაწილაკების (იონებისა და უფრო იშვიათად, ელექტრონების) მონაწილეობით, რაც ცოცხალ ორგანიზმში ლოკალური ელექტრული დენების წარმოქმნას და, მაშასადამე, მუხტების გადანაწილებას განაპირობებს.

ცნობილია, რომ უჯრედს 4 დამუხტული უბანი გააჩნია:

1. ცენტრალური ზონა, რომელიც უარყოფითად დამუხტულ ორგანულ მოლეკულებს შეიცავს.

2. შიგა დადებითად დამუხტული უბანი, განლაგებული უჯრედულ მემბრანასა და ცენტრალურ უარყოფით ზონას შორის. შიგა დადებითი ზონა შედგება მობილური მინერალური კათიონების (ძირითადად კალიუმის და მცირე რაოდენობით კალციუმის იონების) თხელი შრისაგან, რომელთა ნაწილი კლასტერების სახით მოძრაობს მემბრანის შიგა ზედაპირის გასწვრივ, ნაწილი კი (თავისუფალი კათიონები) - ტრანსპორტირდება მემბრანაში ორივე მიმართულებით (უჯრედში და უჯრედიდან გარეთ).

3. დადებითად დამუხტული უბანი უჯრედული მემბრანის გარეთა ზედაპირზე, რომელიც წარმოქმნის მობილური კათიონების (ძირითადად ნატრიუმის, კალციუმის და მცირე რაოდენობით კალიუმის) მცირე ზოლს. ვინაიდან დადებითად დამუხტული იონების რაოდენობა უჯრედული მემბრანის გარეთა ზედაპირზე აღემატება დადებითი იონების რაოდენობას მის შიგა ზედაპირზე, წარმოიქმნება პოტენციალთა სხვაობა.

4. გარეთა სტაბილური უარყოფითი ზონა სისქით $\approx 20\mu$, განპირობებული ძირითადად სიალის მჟავას მოლეკულების უარყოფითი მუხტებით, რომლებიც გლიკოპროტეინებთან და გლიკოლიპიდებთან ერთად წარმოქმნიან კაქტესის მსგავს სტრუქტურას (გლიკოკალიქსს) უჯრედული მემბრანის გარეთა ზედაპირზე. ისინი უზრუნველყოფენ უჯრედის ზედაპირზე არსებული ფერმენტების სტაბილიზაციას. ეს უბანი განაპირობებს თითოეული უჯრედის გარშემო უარყოფითი მუხტის სუსტი ელექტრული ველის გავრცელებას, რომელიც ანიჭებს უჯრედებს გარეთა ზეტა პოტენციალს * და წარმოადგენს მოსაზღვრე უჯრედების ურთიერთქმედების ერთ-ერთ სახეს.

*ზეტა პოტენციალი - პოტენციალი, რომელიც წარმოიქმნება ორი არის გამყოფი ზედაპირზე ადსორბირებული ნაწილაკების მიერ. ზეტა პოტენციალი დამოკიდებულია ამ ნაწილაკის მუხტის სიდიდესა და გარემომცველ არეზე.

სუბტი უარყოფითი ელექტრული ველი უზრუნველყოფს მოსაზღვრე უჯრედების განზიდვას 40 μ მანძილზე. შესაბამისად, სხვადასხვა ფაქტორი, რომლებიც იწვევს სიალის მჟავების რაოდენობის ცვლილებას, ზემოქმედებას ახდენს უჯრედის უარყოფით მუხტზე. ასე მაგალითად, სიმსივნური უჯრედების ზედაპირზე სიალის მჟავების ნაშთების რაოდენობა ძალიან მაღალია, რაც ამ უჯრედების ძლიერად გამოხატულ ელექტროუარყოფითობას განაპირობებს და ამ მუხტის გამანეიტრალებელი ფერმენტული თერაპიის წარმატებულობის ერთ-ერთ მიზეზს წარმოადგენს.

უჯრედების ზედაპირზე უარყოფითი მუხტის არსებობა ძალზე მნიშვნელოვანია ცოცხალი ორგანიზმის ნორმალური ცხოველქმედებისათვის. ასე მაგალითად, სისხლძარღვების ენდოთელიუმის უარყოფითი მუხტი უარყოფითად დამუხტული ერითროციტების, თრომბოციტების და სისხლის პლაზმის ცილების განზიდვას განაპირობებს. ენდოთელიუმის დაზიანების შემთხვევაში მისი უარყოფითი მუხტი იცვლება, რაც თრომბოციტების ენდოთელიუმზე ადჰეზიას და თრომბების ფორმირებას უწყობს ხელს. მემბრანის შიგა ზედაპირის უარყოფითი მუხტი უზრუნველყოფს ფერმენტების (პროტეინკინაზა C) სტაბილიზაციას. სანამ მოხდება მათი აქტივაცია Ca^{2+} -ის იონების მიერ. უჯრედის ელექტრული სისტემა ადაპტირებულია უჯრედის დაზიანებაზე ან მეტაბოლიზმის ცვლილებებზე რეაგირებისათვის.

ცოცხალ ორგანიზმში ელექტრულ დენს ძირითადად განაპირობებს დადებითად დამუხტული პროტონები, ნატრიუმის, კალიუმის, კალციუმის, მაგნიუმის იონები, უარყოფითად დამუხტული იონების (ფოსფატი) უმნიშვნელო რაოდენობა და ელექტრონები. ვინაიდან იონების მასა ათასობით აღემატება ელექტრონის მასას (ასე მაგალითად, Na^{+} -ის იონის ატომური მასა - 23, კალიუმის - 39. შესაბამისად, მათი ბირთვების მასა 46000 და 78000-ჯერ აღემატება ელექტრონის მასას. თუ გავითვალისწინებთ, რომ იონები ცოცხალ ქსოვილებში პიდრატირებულ მდგომარეობაშია, გასაგებია, რომ ცოცხალი ორგანიზმის ელექტრული დენის ძირითადი წარმომქმნელი იონები, გაცილებით უფრო ინერტულია ხელოვნური წრედების ელექტრული დენის შემქმნელ ელექტრონებთან შედარებით. ბიოლოგიურ სისტემებში ამ მძიმე მუხტების მოძრაობისათვის საჭიროა გაცილებით დიდი ენერგია და ისინი მოძრაობს გაცილებით უფრო დაბალი სიჩქარით, ვიდრე ელექტრონები. აქედან გამომდინარე, გასაგებია, რომ ბიოლოგიურ სისტემებში პროცესები ვითარდება გაცილებით ნელა (10^{-3} წმ), ვიდრე ხელოვნურ ელექტრულ სისტემებში (10^{-9} - 10^{-18} წმ).

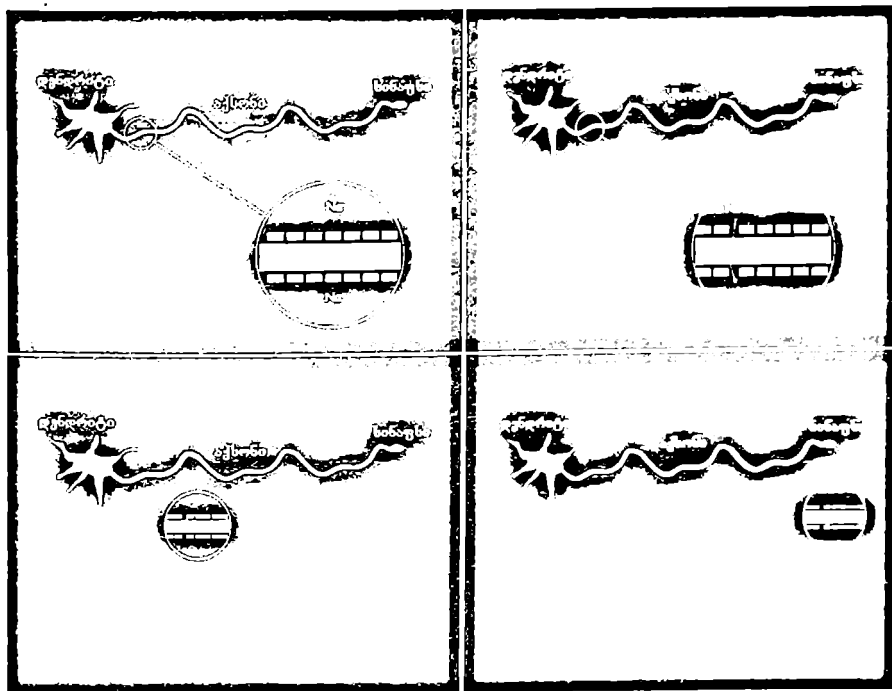
უჯრედის ელექტრული კომპონენტები.

უჯრედული მემბრანა განიხილება როგორც ომური, ასევე ტევადური და ინდუქციური წინაღობის შემცველი ელექტრული წრედი (ომური წინაღობა - ინტეგრალური ცილები-არხები, რომლებიც გამტარია ელექტრულად დამუხტული იონების ნაკადებისათვის (Na^{+} , K^{+} , Ca^{2+} და ა. შ.); ტევადური - ფოსფოლიპიდების ბიშრე, რომელთა მაღალი დიელექტრიკული თვისებების პიდროფილური კულები მემბრანის ზედაპირზე ელექტრული მუხტების გაყოფას და ტრანსმემბრანულ პოტენციალთა სხვაობის წარმოქმნას უზრუნველყოფს (კონდენსატორი); ინდუქციური - მემბრანული სპირალური ცილების (α , β -

სპირალი) და დნმ-ს ელექტრული თვისებები ელექტრული ინდექციური კოჭების თვისებების მსგავსია).

უჯრედული მემბრანის ელექტრული თვისებებით შეიძლება აიხსნას სხვადასხვა ცოცხალ ორგანიზმში ზოგიერთი ელექტრული ფენომენის გამოვლინება: ასე მაგალითად, “ელექტრული თევზი” გველთევზა წარმოქმნის რამდენიმე ასეული ვოლტის ძაბვას; ამ ძაბვას თევზი იყენებს პოტენციური თავდამსხმელის საწინააღმდეგოდ.

დადგენილია ელექტრული პროცესების მონაწილეობა სხვადასხვა სისტემაში (მაგალითად, ნერვულ სისტემაში) ინფორმაციის გაცვლის და გაერცვლების დროს (სურათი 172).



სურათი 172
ნერვულ ბოჭკოში ელექტრული დენის გაერცვლება

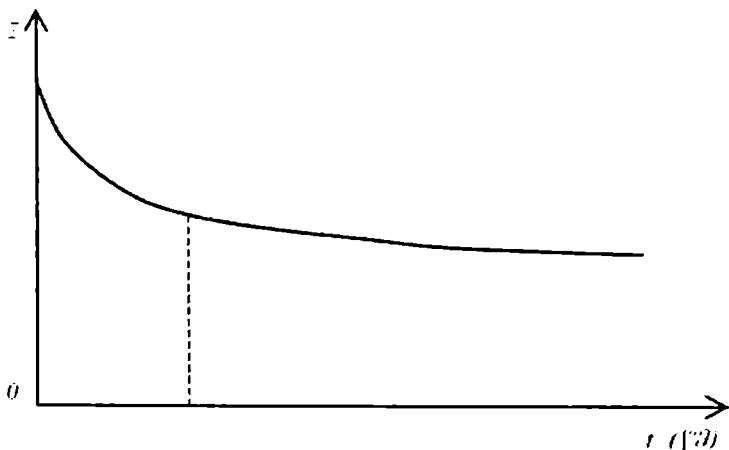
ცოცხალ ქსოვილთა ელექტროგამტარობა

ცოცხალ ქსოვილში მუდმივი დენის გატარების შემთხვევაში იონები გროვდება რა მემბრანის ახლოს, წარმოიშობა ველი, რომელიც მიმართულია გარე ველის საწინააღმდეგოდ. ამ მოვლენას ზოგადად პოლარიზაციას უწოდებენ. ჩვენ მიერ ზემოთ (თავი IV.4) განხილული იყო პოლარიზაციის

სახეები. ცოცხალ ქსოვილში პოლარიზაციის ყველა სახეა. ამიტომ ასეთ შემთხვევაშიც ომის კანონი შემდეგნაირად ჩაიწერება:

$$I = \frac{\varepsilon - \varepsilon_p}{Z} \quad (V.1.1.1)$$

აქ I - დენის ძალაა, ε - დენის წყაროს ემპ, ε_p - პოლარიზაციის ელექტრო-მამოძრავებელი ძალა, Z - იმპედანსი (სრული წინაღობა). განხილულ შემთხვევაში დენის ძალის დროზე დამოკიდებულების გრაფიკი მოცემულია სურათზე 173. დენის წყაროს ჩართვის მომენტიდან პოლარიზაციის მოვლენის გამო დენი თანდათან მცირდება. როცა ε_p მიაღწევს მაქსიმალურ მნიშვნელობას, დენი მუდმივი რჩება. პოლარიზაცია იწყება დენის წყაროს ჩართვის მომენტიდან და მთავრდება დროის გარკვეული შუალედის (τ) შემდეგ (რელაქსაციის დრო).



სურათი 173

დენის ძალის დროზე დამოკიდებულების გრაფიკი ცოცხალი ქსოვილისათვის

ორგანიზმზე მუდმივი დენის მოქმედება დამოკიდებულია დენის ძალის მნიშვნელობაზე. დენის ძალის მნიშვნელობა კი ქსოვილის წინააღობაზე (ომის კანონი), ამიტომ დაბალი ძაბვის შემთხვევაშიც კი შეიძლება დენის ძალამ გადააჭარბოს ცოცხალი ორგანიზმისათვის დაშვებულ ზღვარს ($0,1 \text{ მა/სმ}^2$). 50-60 ვოლტი ძაბვის მუდმივ დენს მედიცინაში სამკურნალოდ იყენებენ (*ელექტროსტიმულაცია*). ამ მეთოდს *გალვანიზაციას* უწოდებენ. მუდმივი დენი გამოიყენება აგრეთვე სამკურნალო პრეპარატების კანის გავლით სხეულში შესაყვანად. ამ

მეთოდს ელექტროფორეზს უწოდებენ. ეს მეთოდები დეტალურად განხილულია ლაბორატორიულ-პრაქტიკულ სამუშაოებში.

აუცილებელია შევნიშნოთ, რომ შეხედულება მემბრანაზე (მემბრანის ლიპიდურ ბიშრეზე), როგორც უსასრულოდ დიდ (ტევადურ) წინააღმდეგება არ ეწინააღმდეგება მოცემულ პარაგრაფში განხილულ ინფორმაციას, ეინაიდან ცოცხალ ქსოვილში მემბრანით შემოსაზღვრულ უჯრედებს გარდა, უჯრედშორისი სითხეა, რომელშიც გახსნილია ელექტროლიტები. ანუ, ცოცხალი ქსოვილი მუდმივი დენისათვის გამტარია!

ბიოლოგიური ობიექტებისათვის, როგორც ვიცით, დამახასიათებელია გამტარული და დიელექტრიკული თვისებები. ამიტომ ცოცხალი ქსოვილის ელექტრული მოდელი შეიძლება წარმოვიდგინოთ, როგორც ომური, ტევადური და ინდუქციური წინააღმდეგობის შემცველი წრედის სახით. ამიტომ ცვლადი დენის შემთხვევაში ომის კანონი ჩაიწერება შემდეგნაირად:

$$I = \frac{\varepsilon}{Z}, \quad (V.1.12)$$

სადაც I - დენის ძალა, ε - ცვლადი დენის წყაროს ემპ, Z - იმპედანსი.

წინააღმდეგობით შეერთების დროს:

$$Z = \sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2} \quad (V.1.13)$$

უჯრედული იმპედანსი მნიშვნელოვნად არის დამოკიდებული მემბრანის ფუნქციურ მდგომარეობაზე. მემბრანის წინააღმდეგობა 1000 ომ/სმ², ხოლო ტევადობა 1 მკფ/სმ² რიგისაა, ინდუქციური წინააღმდეგობა (სიმცირის გამო) შეიძლება მხედველობაში არ მივიღოთ. ამ წინააღმდეგობებს პასიურ ელექტრულ პარამეტრებს უწოდებენ. მემბრანის ფიზიკური მახასიათებლების ნებისმიერი ცვლილება იწვევს პასიური ელექტრული პარამეტრების, ე.ი. იმპედანსის ცვლილებებს. ამრიგად, ცვლადი დენის შემთხვევაში ორგანოს ან ქსოვილის იმპედანსის გაზომვით შეიძლება შეფასდეს ორგანოს ან ქსოვილის ფუნქციური მდგომარეობა!!!

ელექტრული სისტემა, რომელშიც შემართებული ქსოვილი (სხვადასხვა ქსოვილი, მათ შორის სისხლძარღვები) ასრულებს იზოლატორის, იონებით გაჯერებული ქსოვილოვანი სითხეები კი გამტარების როლს, მონაწილეობს დამუხტული ნაერთების (საკვების და ტოქსინების) ტრანსპორტში და ოსმოსური წნევის რეგულაციაში. მოსვენების მდგომარეობაში ქსოვილებს გააჩნია დამოკიდებუთა ან უარყოფითი პოტენციალები, რაც მათი მეტაბოლიზმის დონეზეა დამოკიდებული. გაძლიერებული მეტაბოლური აქტივობის რეგიონები იმუხტება უარყოფითად, მაშინ, როდესაც დაბალი მეტაბოლური აქტივობის მქონე უჯრედები იმუხტება დადებითად. სისხლძარღვთა სისტემის ელექტრული პოტენციალი მიჩნეულია ნულის ტოლად (დამიწების პოტენციალის მსგავსად). კაპილარული სისტემა შეიძლება განხილულ იქნეს, როგორც ცვლადი წინააღმდეგობის წრედი, რომელშიც ქსოვილებსა და სისხლის პლაზმას შორის მიედინება იონური ნაკადები. ქსოვილების ტრანსპორტის და/ან რეგენერაციის

დროს დაზიანებულ უბნებში წარმოიქმნება დამატებითი მუხტების ნაკადები (ე.წ. "დაზიანების ნაკადები"), რომლებიც უზრუნველყოფენ შესორცების სტიმულაციას. კანის დაზიანების აღდგენა მიმდინარეობს გაცილებით სწრაფად, თუ ზედაპირი ნოტიოა. ელექტრული მუხტები მონაწილეობს ემბრიონის განვითარების პროცესში (ელექტრული ნაკადი ასრულებს ემბრიონის ზრდის სტიმულატორის როლს). მაშასადამე, მიკროამპერული დენები მონაწილეობს ცოცხალი ორგანიზმის პომეოსტაზის რეგულაციაში და უზრუნველყოფს მეტაბოლიზმის მართვას ცოცხალი სისტემიდან მოწოდებული ინფორმაციის შესაბამისად.

ქსოვილის იმპედანსი პირველად გაიზომა პლექტიზომოგრაფიის მეთოდით. ამ მეთოდს იყენებენ ფილტვების მოცულობის შესწავლის, პლევრის ნაპრალში სითხის რაოდენობის განსაზღვრის დროს, კიდურების ვენებში თრომბოზების, დღენაკლული ახალშობილების გასტრული აქტიუობის დიაგნოსტიკაში, კარდიოდიანგნოსტიკაში გულის (ან სხვადასხვა ქსოვილების და ორგანოების) ელექტრული მახასიათებლების შესწავლის დროს (მაგალითად, იშემიის დროს), ორგანოთა ტრანსპლანტაციის დროს.

ელექტრული იმპედანსის კლინიკაში გამოყენების ახალი მიმართულება – იმპედანსტომოგრაფიაა (კრიოქირურგიული პროცედურების დროს).

ცოცხალი ქსოვილის ელექტრულ თვისებებს შეისწავლიან ცვლადი დენის საშუალებით, რადგან იგი იძლევა სრულ და საიმედო ინფორმაციას უჯრედებისა და ქსოვილების სტრუქტურისა და მათში მიმდინარე ფიზიკურ-ქიმიური პროცესების შესახებ. როგორც იმპედანსის გამოსათვლელი ფორმულიდან ჩანს, სისხირის გაზრდა იმპედანსის შემცირებას იწვევს. მეორე მხრივ, პოლარიზაციული ეფექტის სიდიდე დამოკიდებულია ცვლადი დენის სიხშირეზე. თუ ცვლადი დენის ნახევარპერიოდი რომელიმე სახის პოლარიზაციის რელაქსაციის დროზე* მეტია (ანუ სიხშირე დაბალია), მაშინ პოლარიზაცია აღწევს მაქსიმალურ მნიშვნელობას. მაშასადამე, ცვლადი დენის სიხშირის გაზრდისას (ნახევარპერიოდის შემცირებისას) პოლარიზაციის ეფექტი მცირდება, რადგან პოლარიზაციის ის სახეები, რომელთა რელაქსაციის დრო აღემატება ცვლადი დენის ნახევარპერიოდს, ვერ ასწრებს განვითარებას, შედეგად ქსოვილის გამტარობა მატულობს. ამ დროს პოლარიზაციული ეფექტებში მხოლოდ პოლარიზაციის ის სახეები მიიღებს მონაწილეობას, რომელთა რელაქსაციის დრო მცირეა.

ვინაიდან იმპედანსი მცირდება ცვლადი დენის სიხშირის გაზრდასთან ერთად, სხვადასხვა სიხშირის ელექტრული დენი შეიძლება გამოვიყენოთ უჯრედების სხვადასხვა კომპარტამენტების დიაგნოსტიკაში. დაბალი სიხშირის ელექტრული დენი გადის მხოლოდ უჯრედის გარეთა ზედაპირზე და იძლევა ინფორმაციას მისი ფორმისა და ზომების შესახებ; მაღალი სიხშირის ელექტრული დენი შეაღწევს უჯრედის შიგნით და ინფორმაციულია შიგაუჯრედული კომპარტამენტების შესწავლისას (მაგალითად, უჯრედის ბირთვის ზომა, რაც განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია კანცერის ადრეული დიაგნოსტიკისათვის).

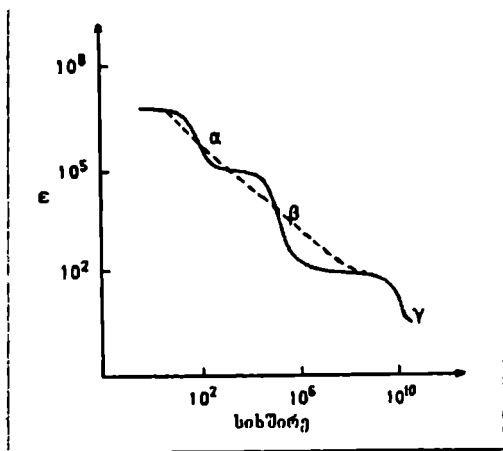
იმპედანსის ცვლადი დენის სიხშირეზე დამოკიდებულება (სურათი 174) ცნობილია *იმპედანსის დისპერსიის* სახელწოდებით.

* რელაქსაციის დრო – დროის შუალედი, რომლის განმავლობაშიც ესა თუ ის სახე პოლარიზაციისა აღწევს მაქსიმალურ მნიშვნელობას.

იმპედანსის დამოკიდებულება სიხშირეზე, ისევე, როგორც მისი აბსოლუტური მნიშვნელობა, განისაზღვრება ქსოვილის სტრუქტურით და ფუნქციონირების დონით. მაღალ სიხშირეებზე ($> 10^3$ კც) მისი მნიშვნელობა ძირითადად განისაზღვრება მოლეკულური სტრუქტურით, მაშინ, როდესაც დაბალ სიხშირეებზე (< 100 კც) - მემბრანის ზედაპირული მუხტების გადანაწილებით.

რამდენიმე კვ-დან 1 მკ-მდე სიხშირეების ინტერვალში განსაკუთრებით კარგად ელინდება იმპედანსის დისპერსიის დამოკიდებულება უჯრედის სტრუქტურაზე.

იმპედანსის დენის სიხშირეზე დამოკიდებულების $Z(\omega)$ მრუდზე გამოყოფენ სამ უბანს: α , β , γ (სურათი 174).



სურათი 174

იმპედანსის დისპერსია კუნთის ქსოვილისათვის

ვარაუდობენ, რომ მრუდის α უბანი გამოწვეულია ზედაპირული პოლარიზაციით, β - მაკროსტრუქტურული პოლარიზაციული ეფექტის შემცირებით, γ კი, ძირითადად, წყლის მოლეკულების პოლარიზაციული ეფექტების შემცირებით.

ცნობილია, რომ $\nu \geq 10^{10}$ კც სიხშირეზე წყლის მოლეკულებით გამოწვეული პოლარიზაციული ეფექტი საერთოდ ქრება. ცდებით დადგენილია, რომ იმპედანსის დისპერსია ქსოვილთა კედლოში პროცესში თანდათან მცირდება. ამრიგად, იმპედანსით შესაძლებელია ცოცხალ ქსოვილთა ფუნქციური მდგომარეობის შეფასება. ყველა ცოცხალ უჯრედს გააჩნია მოსვენების პოტენციალი, რომელიც მის მეტაბოლურ მდგომარეობას შეესაბამება.

ზემოთქმულიდან გამომდინარე შეგვიძლია დავასკვნათ, რომ ცოცხალი ორგანიზმის ცხოველქმედებაში ელექტრულ პროცესებს მნიშვნელოვანი როლი ენიჭება.

ადამიანის სხეული რთული ელექტროგამტარი სისტემაა. იგი შეიძლება წარმოვიდგინოთ, როგორც მიმდევრობით და პარალელურად შეერთებული ომური, ტევადური და ინდუქციური წინაღობების რთული კომბინაცია.

განვიხილოთ ადამიანის სხეულის ელექტრული მახასიათებლები.

სხეულის წინააღობა.

მშრალი კერატინიზებული კანის წინააღობა $20000-30000 \text{ ომ/სმ}^2$ -ის ტოლია; გაუხეშებული კანის (ხელისგულის, ან ფეხის ტერფის) წინააღობა $2-3$ მილიონ $\frac{\text{ომ}}{\text{სმ}^2}$ -ს აღწევს. ნოტიო. თხელი კანის წინააღობა დაახლოებით $500 \frac{\text{ომ}}{\text{სმ}^2}$ -ის ტოლია. თუ კანი დაჩხვლეტილია ნემსით, ან საქმე გვაქვს ნოტიო ლორწოვან აპკთან, მისი წინააღობა $200-300 \frac{\text{ომ}}{\text{სმ}^2}$ -ის ტოლია;

ჰიდრატირებული უცხიმო ქსოვილი და ექსტრაუჯრედული სითხე ხელს უწყობს ელექტრული დენის გავლას (ელექტროლიტების მაღალი შემცველობის გამო), მაშინ. როდესაც ცხიმოვან ქსოვილს ლიპიდების მაღალი დიელექტრიკული თვისებების გამო დიდი წინააღობა ახასიათებს.

ზემოთ მოყვანილი მონაცემებიდან გამომდინარეობს, რომ კანის წინააღობა მნიშვნელოვნად დამოკიდებულია მის კერატინიზაციის ხარისხზე, სინოტივეზე და სხვა პარამეტრებზე.

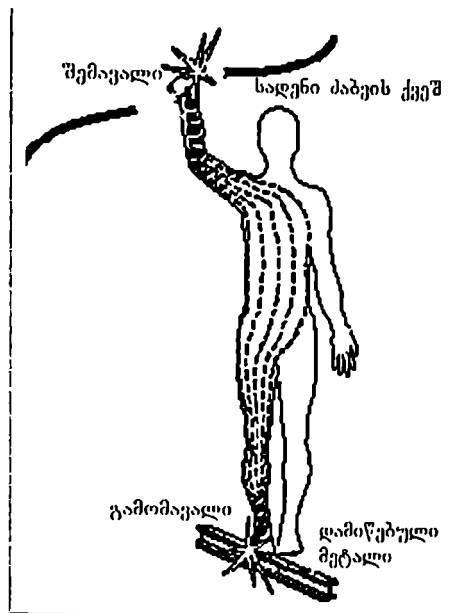
V.12 ელექტრობის ეფექტი ადამიანის სხეულზე

თუ ადამიანის სხეული ეხება ძაბვის (პოტენციალთა სხვაობის) წყაროს, სხეული წარმოადგენს ელექტრული წრედის ნაწილს და ელექტრული მუხტების ნაკადი (ელექტრული დენი) შეადგენს სხეულში ერთ და დატოვებს სხეულს მეორე წერტილში. ელექტრულ ეფექტს იწვევს ორგანიზმში (სურათი 174). გამავალი დენის სიდიდე. დენის სიდიდე კი წინააღობის (იმპედანსის) უკუპროპორციულია:

$$I = \frac{U}{R}$$

ამიტომ ადამიანის სხეულზე ფიზიოლოგიური ეფექტის გამოწვევა შეუძლია ელექტრულ დენს და არა ძაბვას, მაგრამ ძაბვის არსებობა ამისათვის აუცილებელია. ყოველივე ეს ნიშნავს იმას, რომ ძაბვის რაღაც მნიშვნელობა, ერთ შემთხვევაში სასიკვდილო, ხოლო მეორე შემთხვევაში შეიძლება სრულიად უვნებელი იყოს.

120 ვოლტი მუდმივი ძაბვის პირობებში ადამიანის მშრალ კანში გადის უმნიშვნელო სიდიდის ელექტრული დენი: $I = \frac{U}{R} = 0.0012 \text{ ა} = 0,12 \text{ მა}$.



სურათი 175

ელექტრული დენი ადამიანის სხეულში (რელსთან ცალი ფეხია კონტაქტში)

ნოტიო კანში კი წინაღობა მცირეა და დენის ძალა იზრდება: $I = 120$ მაგდე. როგორც ჩანს, ადამიანის სხეულში მაღალი ძაბვით ინდუცირებული დენი და მისი ფიზიოლოგიური (ან პათოლოგიური) ეფექტი დამოკიდებულია სხეულის იმპედანსზე:

- მაღალი ძაბვა (10^3 ვ), მოდებული დიდი იმპედანსის მქონე სხეულზე (უხეშ კანზე) არ იწვევს მნიშვნელოვან დაზიანებას;
- დაბალმა ძაბვამ ძალიან დაბალი იმპედანსის მქონე ქსოვილზე (გულის ქსოვილი) შეიძლება გამოიწვიოს სასიკვდილო შედეგები (პარკუჭის ფიბრილაცია).

განასხვავებენ ელექტრული დენის ცოცხალ ქსოვილზე ზემოქმედების სამ ძირითად ეფექტს:

- აგზნებადი ქსოვილის (კუნთი, ნერვი) ელექტრული სტიმულაცია;
- სხეულის რეზისტენტული გახურება;
- ელექტრული დამწვრობა. ქსოვილის დაზიანება მუდმივი ან ცვლადი დენის და მაღალი ძაბვის დროს.

ცხრილში 22 მოცემულია სხედასხვა ძალის მუდმივი და ცვლადი დენის ფიზიოლოგიური და პათოლოგიური ეფექტები ხანმოკლე (1-3 წამი) მოქმედების შემთხვევაში.

დენის ძალა (ა)	ადამიანის რეაქცია
0.001	ალქმის ზღვარი, ყურებში სუსტი ხმაურის შეგრძნება
0.005	სუსტი დარტყმის შეგრძნება; არამტკივნეული, მაგრამ შემაწუხებელი. ჩვეულებრივ, იწვევს კუნთების უნებლიე შეკუმშვა/მოღუნებას
0.006 - 0.025 (ქალები)	მტკივნეული შოკი, კუნთების კონტრაქციის დაკარგვა
0.009 - 0.030 (მამაკაცები)	ე.წ. "გამყინავი ნაკადი", გაშუშება
0.050 - 0.150	ძლიერი ტკივილი, სუნთქვის შეკავება, კუნთების მწვავე შეკუმშვა
1 - 4.3	პარაკუტოვანი ფიბრილაცია
10	გულის გაჩერება, ძლიერი დამწვრობა და საფარადო სიკვდილი

ალქმის ზღვრები - დენის მინიმალური მნიშვნელობა, რომელიც შეიგრძნობა ინდივიდუალის მიერ (მუდმივი დენისათვის $\approx 2 - 10$ მა; ცვლადი (50 - 60 კე) დენისათვის - ≈ 0.5 მა (სველი ხელების შემთხვევაში).

ე.წ. **"Let-go ნაკადი"** - დენის ძალა, რომლის მოქმედების ეფექტიდან სუბიექტს შეუძლია თვითონ, დამოუკიდებლად გამოვიდეს, ტოლია 6-100 მა*.

"Let-go ნაკადს" შეუძლია კუნთების უნებლიე შეკუმშვის, რფულექსური მოძუნების გამოწვევა; ამ შემთხვევაში შესაძლებელია მყორეული ფიზიკური ეფექტების განვითარება (კუნთების, სრტილების, მუცლების დაზიანება, დაფარდნა, თავის დარტყმა, ძელების მოტეხილობა და ა. შ.), რაც შეიძლება სიკვდილის მიზეზიც გახდეს.

სუნთქვის შეზღუდვა/ტკივილი/დაღლილობა - დენის ძალას 20 მა-ს შეუძლია რესპირაციული ტრაქტის კუნთების უნებლიე შეკუმშვა, რამაც შეიძლება გამოიწვიოს ასფიქსია - სუნთქვის შეკავება, სხვა კუნთების ძლიერი, უნებლიე შეკუმშვა, იწვევს ტკივილს, დაღლილობის შეგრძნებას.

პარაკუტის ფიბრილაცია - 75 - 400 მა იწვევს გულის კუნთის ბოკოების არაკონტროლირებად შეკუმშვებს, რაც ხელს უშლის გულის ელექტრული აქტივობის ნორმალურ გაერეცელებას. შესაძლებელია, გულის ცემის სიხშირე ძლიერ გაიზარდოს - 300 დარტყმა/წუთამდე მოუწესრიგებელი და ზედმეტად სწრაფი გულის ცემა ცნობილია პარაკუტოვანი ფიბრილაციის სახელწოდებით. ნორმალური რიტმის აღდგენა შესაძლებელია მხოლოდ დეფიბრილატორის საშუალებით.

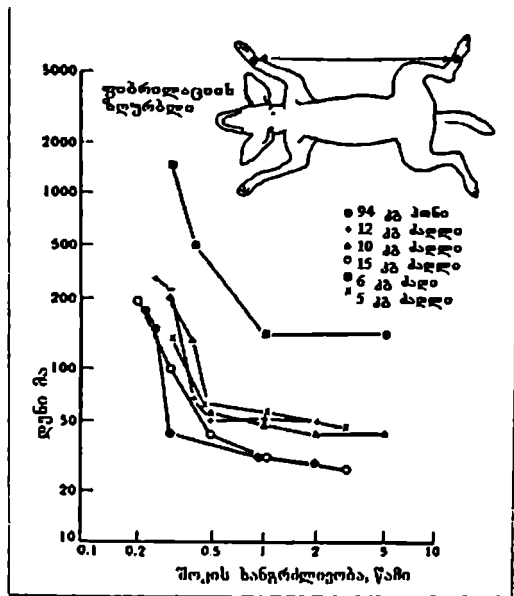
გულის გაჩერება, დამწვრობა და ფიზიკური დაზიანება - 1 - 6 ამპერი დენის ძალის დროს გულის კუნთები იკუმშება და გული ჩერდება. ეს დაზიანება შექცევადია და ნორმალური რიტმი აღდგება დენის გამოორთვის შემდეგ. მაგრამ, თუ დენის ძალა 10 ა და მეტია, დამწვრობა მყისიერად ვითარდება.

უნდა აღინიშნოს, რომ უნებლიე კონსტრიქციარელაქსაციის გამომწვევი დენის ძალის ზღვრული მნიშვნელობები განსხვავებულია ქალებისა და მამაკაცებისათვის (მამაკაცისათვის საჭიროა უფრო მაღალი დენის ძალა).

დენის ხანგრძლივი ზემოქმედებისას გულის პარაკუტოვანი ფიბრილაციის გამომწვევა შეუძლია დენის ძალის დაბალ მნიშვნელობას.

ფიბრილაციის გამომწვევი დენის ზღვრული მნიშვნელობა იზრდება სხეულის მასის ზრდასთან ერთად (50 მა-დან (ძალდი, მასით 6 კგ) 130 მა-მდე (ძალდი, მასით 24 კგ) (სურათი 176).

*თუ ეს დენი ხასიციოცხლო ორგანიზში (გული, თავის ტვინი) არ გადის



სურათი 176

დამოკიდებულება ფიბრილაციის ზღვარსა და დენის ზემოქმედების ხანგრძლივობას შორის სხვადასხვა მასის ცხოველებში ცვალებადი დენის შემთხვევაში

ელექტრული შოკი

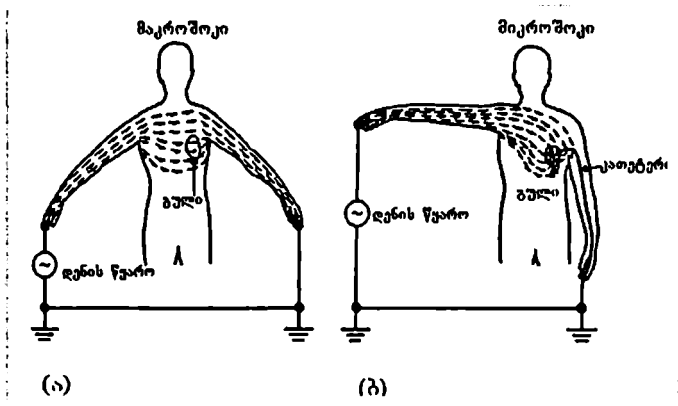
ელექტრული შოკი (ზურგის ტეინის ცენტრების რეფლექსების დათრგუნვა სრულ გაქრობამდე) ეითარდება, როდესაც სხეული წარმოადგენს ელექტრული წრედის ნაწილს. ელექტრული დენი შეადგენს სხეულის ერთ წერტილში და გადის მეორეში.

აღსანიშნავია, რომ დამიწებული წრედების შემთხვევაში ელექტრული დენი ძირითადად გადადის მიწაში (დენის გაშვება). რაც სუბიექტის სხეულში გამავალი დენის ძალას ძლიერ ამცირებს (აღამიანისა და დამიწების სადენის წინააღობების უკუპროპორციულად). ამიტომ აკეთებენ დამიწების სადენს დიდი განივკვეთისას, რათა წინააღობა არ აღემატებოდეს 3-4 ომს. დამიწება უზრუნველყოფს ელექტროშოკისგან დაცვას.

თუ დენი ვრცელდება სუბიექტის მთელ სხეულში, ეთარდება მაკროშოკი, ამ დროს გულის ფიბრილაციას იწვევს დენის უფრო მაღალი მნიშვნელობები, ვიდრე იმ შემთხვევაში, როდესაც დენი მიერთებულია უშუალოდ გულზე (სურათი 177).

ჩვენი სხეული იყენებს მის მიერ გენერირებულ მცირე ელექტრულ დენს ნერვულ სისტემაში სიგნალების გავრცელების და კუნთების შეკუმშვის მიზნით. მაგრამ სხეულში უფრო ძლიერი ელექტრული ნაკადების გავრცელებამ შეიძლება გამოიწვიოს სერიოზული დაზიანებები - ფარული სისხლდენა, ქსოვილის დესტრუქცია, ნერვის, ან კუნთის დაზიანება. აღსანიშნავია, რომ სხეულის შიგა დაზიანებები ხშირად მაშინვე არ ვლინდება.

100 მა დენის ძალის მოქმედება 3 წუთის განმავლობაში იწვევს ისეთივე მავნე ეფექტს, როგორიცაა 900 მა 0,3 წამის განმავლობაში.

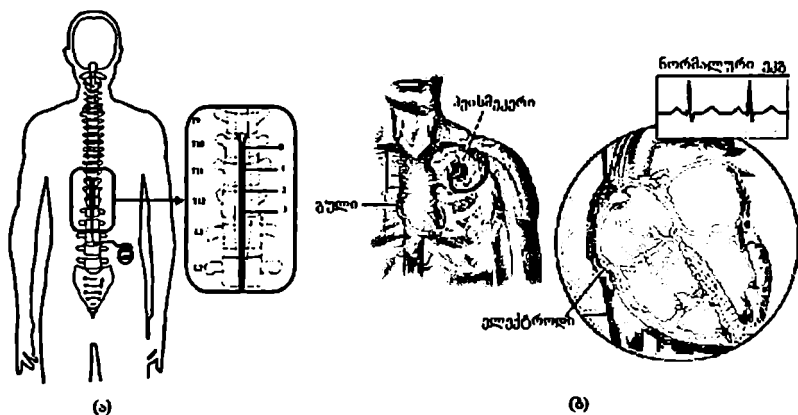


სურათი 177

სხეულში დენის შეღწევის წერტილის მნიშვნელობა მუხტის ნაკადის განაწილებისთვის: ა - მაკროშოკი - ნაკადი ვრცელდება მთელ სხეულში; ბ - მიკროშოკი - ნაკადი ინტრაკარდიული კათეტერის გავლით ვრცელდება გულში

აღსანიშნავია, რომ დაბალი ძაბვის ხანგრძლივი ზემოქმედება საკმაოდ დამაზიანებელია. ამიტომ ქსოვილების ფუნქციური ელექტროსტიმულაცია შესაძლებელია მხოლოდ ექიმის მეთვალყურეობის ქვეშ.

ფუნქციური ელექტროსტიმულაცია გამოიყენება ზურგის ტვინის ნერვული სტრუქტურების სტიმულაციის, კუნთების უკმარისობის, გულის კუნთის სტიმულაციის და სხვა შემთხვევაში (სურათი 178).

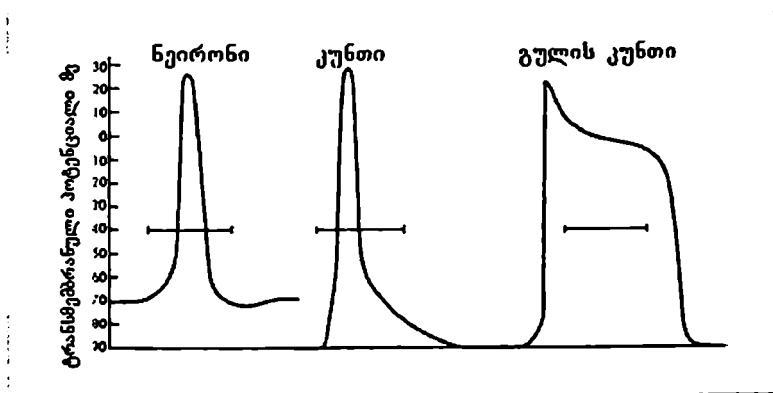


სურათი 178

ზურგის ტვინის (ა) გულის კუნთის (ბ) ფუნქციური ელექტროსტიმულაცია

V.2 ქსოვილთა და ორგანოთა ელექტროპოტენციალები (ბიოპოტენციალები), მათი რეგისტრაცია

ცოცხალი ორგანიზმის ქსოვილები პოტენციალების (ბიოპოტენციალების) წყაროა. მემბრანული პოტენციალი წარმოიქმნება უჯრედის მემბრანის ორივე მხარეს (შიგნით და გარეთ) დადებითი და უარყოფითი იონების არათანაბარი განაწილების შედეგად (როგორც ევით, მემბრანული პოტენციალის არსებობა აუცილებელია უჯრედში სასიცოცხლო პროცესების მიმდინარეობისათვის და ხორციელდება აქტიური და პასიური ტრანსპორტის მექანიზმებით). შედეგად მემბრანა პოლარიზაციას განიცდის. სწორედ მემბრანული პოლარიზაცია ანიჭებს უჯრედებს ელექტრული დიპოლის თვისებებს და წარმოშობს ბიოპოტენციალებს (მოსვენების და მოქმედების პოტენციალები). ქსოვილის აგზნების დროს მასში აღმოცენდება მოქმედების პოტენციალები. სურათზე 179 ნაჩვენებია სხვადასხვა ქსოვილის მოქმედების პოტენციალები.



სურათი 179

სხვადასხვა ქსოვილის ტრანსმემბრანული პოტენციალები

ცალკეული უჯრედების პოტენციალები იკრიბება და ჯამში წარმოქმნის ქსოვილის ან ორგანოს პოტენციალთა სხვაობას (ისევე, როგორც ცალკეული უჯრედების დიპოლური მომენტები იკრიბება და წარმოქმნის ქსოვილის ან ორგანოს ელექტრულ მომენტს), რომელიც შეიძლება გაიზომოს ორგანოს ან ქსოვილის ცალკეულ წერტილებს შორის. ბიოპოტენციალები ზუსტად ასახავს ქსოვილებისა და ორგანოების ნორმალურ და პათოლოგიურ მდგომარეობებს. სწორედ ამის გამო დაავადებათა დიაგნოსტიკის დროს ხშირად მიმართავენ ბიოპოტენციალების გაზომვას და მის ანალიზს. ყოველივე ეს არის საფუძველი ბიოპოტენციალთა რეგისტრაციის ზემოთ ჩამოთვლილი მეთოდებისა.

ორგანოთა და ქსოვილების ბიოპოტენციალების რეგისტრაციის მეთოდი ელექტროგრაფიის სახელწოდებითაა ცნობილი, თუმცა უფრო ხშირად იყენებენ

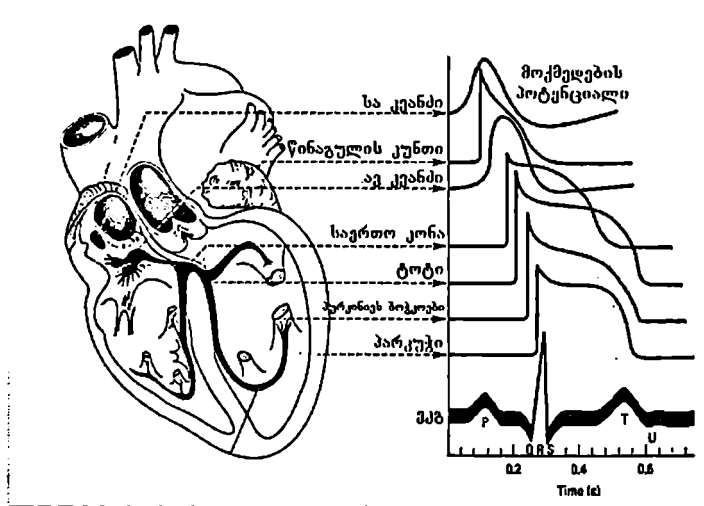
კონკრეტულ ორგანოთა სადიაგნოსტიკო მეთოდს – ელექტროკარდიოგრაფია – გულის ბიოპოტენციალების რეგისტრაცია, ელექტროენცეფალოგრაფია – თავის ტვინის ელექტრული აქტივობის რეგისტრაცია, კუნთის – მიოგრაფია და სხვ.

ხშირ შემთხვევაში ბიოპოტენციალის გამოყვანა ელექტროდებით ხდება არა უშუალოდ ორგანოდან, არამედ მისი “მეზოზელი” წერტილიდან. ეს ის წერტილებია, რომლებსაც იგივე პოტენციალი გააჩნია, როგორიც თვითონ ორგანოს, ე. ი. იზოპოტენციური წერტილებიდან.

გულის ელექტრული აქტივობა

იმისათვის, რომ გულმა შეასრულოს თავისი ძირითადი ფუნქცია – სისხლი მოგროვდეს მასში და გადაიტუმბოს სისხლძარღვებში, იგი იმართება და ეს მართვა რეგულირდება სუსტი ელექტრული იმპულსების (ცვლადი პოტენციალების) მეშვეობით.

ჯანმრთელი ადამიანის გულში ამ იმპულსების წარმოქმნას უზრუნველყოფს სინუსური კვანძი; ვინაიდან ის უზრუნველყოფს იმპულსის რიტმულობას, მას აგრეთვე უწოდებენ რიტმის ბუნიბრივ წარმმართველს. მაშასადამე, სინუსური კვანძი კოორდინაციას უწევს გულის კამერების აგზნებას და ამით უზრუნველყოფს შეკუმშვის რიტმულობას (სურათი 180).

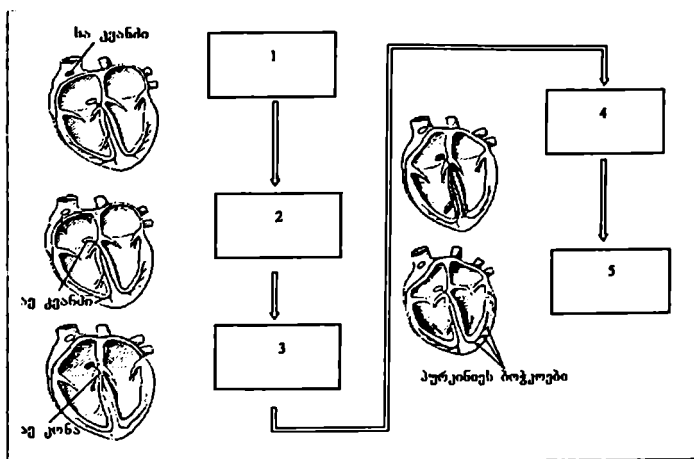


სურათი 180

გულის სხვადასხვა უბნის მოქმედების პოტენციალები

იმპულსი, რომელიც მარჯვენა წინაგულში (სინუსის კვანძი) აღმოცენდება, გადის ზედა კამერებიდან (წინაგულიდან) ქვედა კამერებში (პარკუტებში) და

იწვევს მათ თანმიმდევრულ პერიოდულ შეკუმშვას 60 – 80 ჯერ წუთში (სურათი 181).



სურათი 181

გულის ელექტრული იმპულსის გატარების გზა

1 – სინუსური კვანძის აქტივაცია და წინაგულების აქტივაცია; 2 – წინაგულებზე იმპულსის გაერცელება (50 მწმ); 3 – 100 მწმ დაყოვნება AV კვანძზე, წინაგულის შეკუმშვის დაწყება (150 მწმ); 4 – იმპულსის გაერცელება ინტრაპარკუტოვან ძგიდებზე; 5 – წინაგულის შეკუმშვის დასრულება და პარკუტების აგზნება-შეკუმშვის დაწყება

ზოგიერთი ელექტროფიზიოლოგიური პარამეტრების რეგისტრაციის მეთოდი აღამიანის სხეულის ელექტრული პარამეტრების გამოკვლევას დიდი მნიშვნელობა ენიჭება მისი პომეოსტაზის შესწავლისთვის როგორც ფიზიოლოგიური, ასევე პათოლოგიური მდგომარეობის დროს.

ამ პარამეტრების რეგისტრაცია ხორციელდება სხვადასხვა მეთოდებით. ამ მეთოდებს მიეკუთვნება:

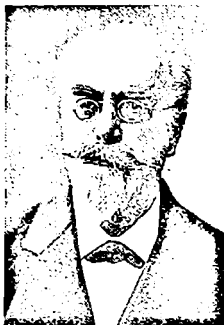
ელექტროკარდიოგრაფია – გულის კუნთის აგზნების დროს აღძრული ბიო-ელექტრული პოტენციალის რეგისტრაციის მეთოდი, რომელიც იძლევა საშუალებას, დავადგინოთ გულის კუნთის ელექტროგამტარებლობა კარდიული ციკლის რიტმულობა, ელექტროლიტების გადანაწილების დარღვევა და სხვ.

ელექტროენცეფალოგრაფია – თავის ტვინის ბიოპოტენციალების რეგისტრაცია, იძლევა საშუალებას, დავადგინოთ თავის ტვინის ცალკეული უბნების ელექტრული აქტივობა და სხვ.

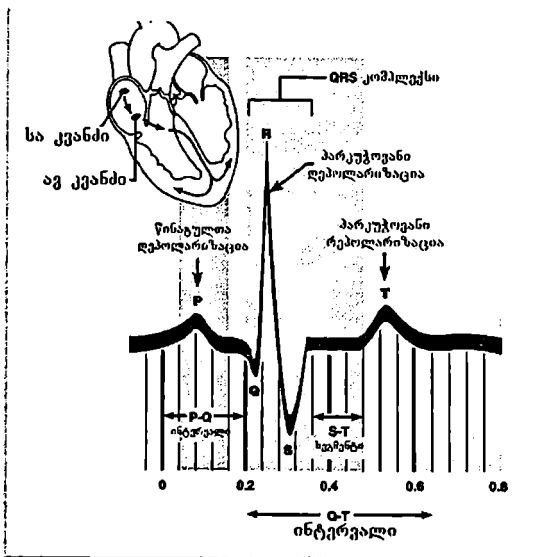
პოლიგრაფია – მრავალი პარამეტრის ერთდროული გამოკვლევა, სუსტი ფიზიოლოგიური ცვლილებების გამოვლენის საშუალებას იძლევა ემოციური დატვირთვის დროს.

ელექტროკარდიოგრაფია - გულის ბიოპოტენციალების რეგისტრაციის მეთოდი; გრაფიკულ ჩანაწერს (პოტენციალთა სხვაობის დროზე დამოკიდებულების გრაფიკს) ელექტროკარდიოგრამა ეწოდება (სურათი 182).

XIX საუკუნეში ცნობილი გახდა, რომ გული მუშაობის პროცესში გამოიმუშავებს ელექტრობის გარკვეულ რაოდენობას. ეს ელექტრული იმპულსი პირველად დააფიქსირა ფრანგმა ფიზიკოსმა, ნობელის პრემიის ლაურეატმა გაბრიელ იონას ლიშმანმა ვერცხლისწყლის ელექტრომეტრის საშუალებით.



გაბრიელ იონას ლიშმანი ვილი ეინტჰოვენი
ნობელის პრემია 1924 წელი



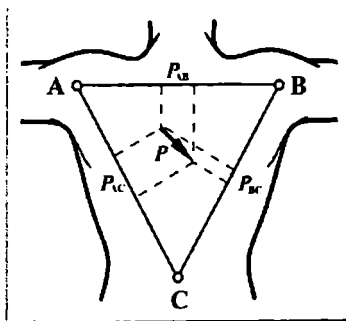
სურათი 182

ტიპური კარდიოგრამა, “კბილების” და დროის ინტერვალების ჩვენებით

კარდიოგრაფიას საფუძვლად უდევს ეინტროვენის იდეა, რომლის მიხედვით გული წარმოდგენილია, როგორც ელექტრული დიპოლი (უფრო ზუსტად, იგი დენური დიპოლია^{*}), გარკვეული დიპოლური მომენტიტ (P) , რომელიც განისაზღვრება გულის მუშაობის დროს წარმოქმნილი ელექტრული ველის პოტენციალებით. P ვექტორს მედიცინაში ინტეგრალურ ელექტრულ ვექტორს უწოდებენ. იგი დაფიქსირებულია გულის შიგნით და გულის მუშაობის გამო ერთი ციკლის განმავლობაში იცვლის როგორც სიდიდეს, ისე მიმართულებას (სურათი 182), მაგრამ ყოველი ციკლის შემდეგ პერიოდულად იმეორებს თავის მნიშვნელობებს. ცხადია, ციკლის განმავლობაში ასევე იცვლება გულის ირგვლივ არსებული ელექტრული ველის განაწილებაც. ეს იმას ნიშნავს, რომ სხეულის ნებისმიერ წერტილში ელექტრული ველის პოტენციალის რიცხვითი მნიშვნელობა, შესაბამისად, მის ორ წერტილს შორის პოტენციალთა სხვაობა, იცვლება გულის მუშაობის ციკლის განმავლობაში.

წარმოვიდგინოთ სხეულში ისეთი ტოლგვერდა სამკუთხედი ABC (სურათი 183), რომლის ცენტრში მოთავსებულია გული, ხოლო გვერდების სიგრძე გაცილებით დიდია გულის ზომებთან შედარებით. დიპოლის განხილვისას ჩვენ გამოვითვალეთ მისგან რაიმე r მანძილზე ელექტრული ველის დაძაბულობა. ასევე შეიძლება გამოითვალოს ველის პოტენციალი:

$$\varphi = \frac{ql \cos \alpha}{4\pi \epsilon_0 r^2} = \frac{P \cos \alpha}{4\pi \epsilon_0 r^2} = k \frac{P}{r^2} \cos \alpha.$$



სურათი 183

P გულის ელექტრული ვექტორი (გვე) ნაჩვენებია ისრით

თუ BC სამკუთხედის წვეროებში გამოთვლით პოტენციალს და მერე ვიპო-

* დენური დიპოლი, განსხვავებით ელექტრული დიპოლისაგან. გამტარ გარემოში არ განეიტრალებოდა. მოცემულ წერტილში ინარჩუნებს დადებით და უარყოფით მუხტებს (მაგალითად, ელემენტის, აკუმულატორის პოლუსები) გულიც ხომ დენის ბიოლოგიური წყაროა, გენერატორი.

ვით სხვაობას $\varphi_A - \varphi_B = U_{AB}$; $\varphi_B - \varphi_C = U_{BC}$ და $\varphi_A - \varphi_C = U_{AC}$, აღმოჩნდება, რომ პოტენციალთა ეს სხვაობები პროპორციულია $P \cos \alpha$, სადაც $P \cos \alpha$, P ვექტორის გეგმილია ამ წერტილების შემაერთებელ წრფეზე, ე.ი. სამკუთხედის გვერდებზე:

$$P_{AB} = P \cos \alpha_{AB}; P_{AC} = P \cos \alpha_{AC}; P_{BC} = P \cos \alpha_{BC}.$$

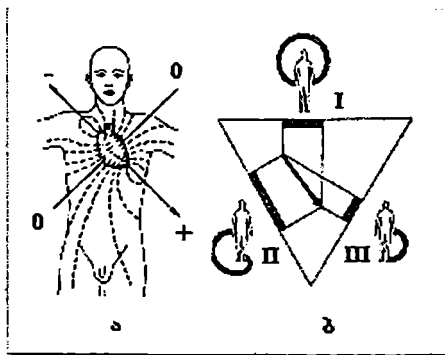
მრიგად. მივიღებთ, რომ:

$$\varphi_A - \varphi_B \sim P_{AB}; \varphi_B - \varphi_C \sim P_{BC}; \varphi_A - \varphi_C \sim P_{AC}.$$

რადგან პროპორციულობის კოეფიციენტი სამივე გვერდისათვის (სამკუთხედი ტოლფერდაა) ერთი და იგივეა, შეიძლება დაწეროთ:

$$U_{AB} : U_{BC} : U_{AC} = P_{AB} : P_{BC} : P_{AC}$$

ეს შედეგი მეტად მნიშვნელოვანია, რადგან იგი გვაძლევს საშუალებას ტოლგვერდა სამკუთხედის წვეროებს შორის პოტენციალთა სხვაობის გაზომვით განესაზღვროთ ამ სამკუთხედის ცენტრში მოთავსებული დიპოლის მომენტის გეგმილები სამკუთხედის გვერდებზე (იხილე სურათი 184). გეგმილების ცოდნა საკმარისია დიპოლის მომენტის (P) სიდიდესა და სიერცეში ორიენტაციის დასადგენად, თუმცა ბევრად იოლია ამ მიზნით ე. წ. ვექტორ-კარდიოგრაფიის გამოყენება.



სურათი 184

დერძული ხაზი (ა) და გულის ელექტრული ვექტორის (P) სიდიდე, მიმართულება და გეგმილები (ბ) (სამკუთხედის გვერდებზე სქელი ხაზები)

თუ სამკუთხედის წვეროებს შორის პოტენციალთა სხვაობას გავზომავთ დინამიკაში, ჩვენ შევძლებთ დროის ნებისმიერ მომენტში განესაზღვროთ

დიპოლის (გულის) მომენტის სიდიდე და მიმართულება. სამკუთხედის წვეროებს შორის პოტენციალთა სხვაობას *განხრებს* უწოდებენ. არჩევენ სამ ძირითად (სტანდარტულ) განხრას: I - U_{AB} ; II - U_{AC} ; III - U_{BC} და სამ გაძლიერებულ განხრას: aVR , aVL , aVF (ამ საკითხებს საფუძვლიანად გაეცნობით პრაქტიკულ მეცადინეობებზე).

გულის ბიოპოტენციალების რეგისტრაცია დინამიკაში ხორციელდება ელექტრული ხელსაწყოთი – ელექტროკარდიოგრაფით. კარდიოგრაფი შეიძლება იყოს ერთარხიანი (პორტატული) და მრავლარხიანი, არსების რაოდენობა განსაზღვრავს ერთდროულად, თუ რამდენი განხრის (პოტენციალთა სხვაობის) ჩაწერა შესაძლებელი. პოტენციალთა სხვაობის ცვლილების ($U = f(t)$) ჩაწერა ავტომატურად ხდება სპეციალურ დიაგრამაზე. მიღებულ ჩანაწერს კარდიოგრამას უწოდებენ (სურათი 182, 184).

ნებისმიერი ტიპის კარდიოგრაფი შედგება სამი ძირითადი ბლოკისაგან: 1 - კვების წყარო, 2 - გამაძლიერებელი, 3 - თვითჩაწერი მოწყობილობა.

ვინაიდან ადამიანის ბიოპოტენციალების სიდიდე მცირეა (გულის – 1,5-2,3 მვ, თავის ტვინის – 1-1,5 მვ, პერიფერიული ნერვული ბოჭკოები და კუნთები – 0,2-0,3 მვ-ს აღწევს), ამიტომ ამ მიზნისთვის განკუთვნილ ყველა გამზომ სარეგისტრაციო ხელსაწყოს გააჩნია გამაძლიერებელი ბლოკი.

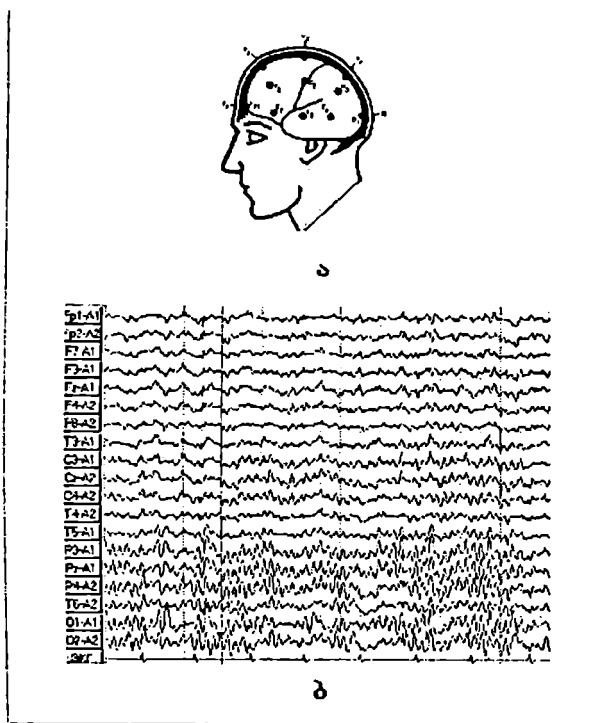
ელექტროენცეფალოგრაფია – თავის ტვინის ბიოელექტრული აქტივობის რეგისტრაციის მეთოდი. ტვინის ელექტრული პროცესების შესწავლას საფუძველი ჩაუყარა 1849 წელს დ. რეიმონდმა, რომელმაც აჩვენა, რომ ტვინს, ისევე როგორც ნერვულ ბოჭკოსა და კუნთს, გააჩნია ელექტროგენური თვისებები. პირველად, 1928 წელს ავსტრიელმა ფსიქიატრმა ჰანს ბერგერმა ჩაწერა ადამიანებში ტვინის ბიოპოტენციალების ცვლილებები, მანვე შემოიღო ტერმინი “ელექტროენცეფალოგრამა”.



ჰანს ბერგერი

ტვინის ელექტრული აქტივობა, რომლის პოტენციალების გამოყვანა ხორციელდება ელექტროდებით, უშუალოდ ტვინის ზედაპირიდან (ტრეპანაციის დროს) ან თავის ქალას სხვადასხვა უბნიდან (სურათი 185ა, ბ) რეგისტრირდება

ელექტროენცეფალოგრაფის საშუალებით ქალაქის დიაგრამაზე. ენცეფალოგრაფის ძირითადი ბლოკები იგივეა, რაც ელექტროკარდიოგრაფის, განსხვავება ისაა, რომ ელექტრული სიგნალი ამ შემთხვევაში უფრო სუსტია და მოითხოვს უფრო გაძლიერებას და სიხშირეებიც გაცილებით მაღალია (სურათი 184).



სურათი 185

ა - ტვინის ელექტრული აქტივობის რეგისტრაცია ხორციელდება თავის ქალას სხედასხვა უბნიდან; ბ - ელექტროენცეფალოგრამა ტვინის სხედასხვა უბნიდან

ენცეფალოგრამა არის ობიექტური მახასიათებელი თავის ტვინის ფუნქციური მდგომარეობის შეფასებისათვის და ხელმისაწვდომია ყოველთვის სიფხიზლის, ძილისა, თუ პათოლოგიური მდგომარეობის დროს. ელექტროენცეფალოგრაფია გამოიყენება ნევროლოგიაში ეპილეფსიის, სიმსივნური წარმონაქმნების და ა.შ. გამოსაყენად. იგი გამოიყენება ქირურგიაშიც ანესთეზიის დროს, ძილ-ღვიძილის საზღვრების საკონტროლოდ ნარკოზული ძილის დროს.

ელექტროენცეფალოგრაფია - პოტენციალების ცვლილებების დროზე დამოკიდებულების გრაფიკი, წარმოადგენს რთული ფორმის პერიოდულ რხევებს 0-დან 70-100 μ ვ-ის სიხშირით, რომლებიც წარმოიშობა ტვინის სხვადასხვა უბნის აქტიუობის ალგებრული შეკრებით (რხევების შეკრება, რთულ რხევებში).

დღეისათვის ენცეფალოგრაფიის სიხშირის მთელ სპექტრს (0 - 100 μ ვ) ყოფენ დაიპაზონებად, რომლებსაც რიტმებს უწოდებენ.

1. დელტა-რიტმი - 0,5-3,5 μ ვ (ძირითადად ძილის რიტმებია).

2. თეტა-რიტმი - 3,5-8 μ ვ (ნორმალურია ბავშვებში, პათოლოგიურია ზრდასრულებში - მენტალური სტრესი).

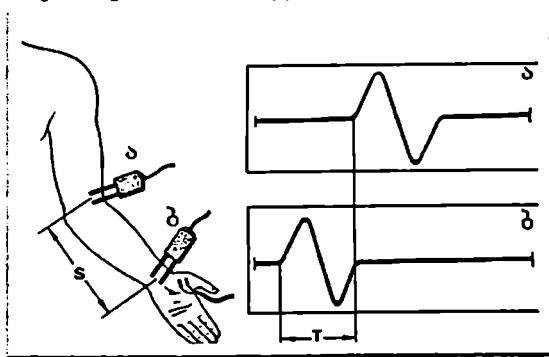
3. ალფა-რიტმი - 8 -13 μ ვ (ფიზიოლოგიური და მენტალური რელაქსაცია).

4. ბეტა-1-რიტმი - 13-21 μ ვ (ყურადღების აქტიური კონცენტრაცია).

5. ბეტა-2-რიტმი - 21-35 μ ვ (აღქმისა და გონების უმაღლესი ფსიქიკური აქტიუობა).

დადგენილია, რომ თავის ტვინის ფუნქციური მდგომარეობის ცვლილება ცალსახად აისახება ელექტროენცეფალოგრაფიის (ეეგ) სიხშირულ სპექტრში. ტალღების ინტენსიუობა და ფორმა განისაზღვრება თავის ტვინის აგზნების დონით (ძილის და ღვიძილის დროს). ენცეფალოგრაფიის მიხედვით შესაძლებელია ენცეფალიტის, თავის ტვინის სიმსივნის, ეპილეფსიის სპაზმების დიაგნოსტიკა და ა. შ..

მედიცინაში სადიაგნოსტიკო მიზნით გამოიყენება აგრეთვე სხვადასხვა ორგანოთა თუ ქსოვილთა ბიოპოტენციალების რეგისტრაციის მეთოდები და სახელებიც ამ ორგანოთა მიხედვითაა შერჩეული. მაგალითად, **რეტინოგრაფია** - თვალის ბიოპოტენციალების ცვლილებების გრაფიკი, **მიოგრაფია** - კუნთის (სურათი 186) და სხვა ორგანოთა ბიოპოტენციალები.



სურათი 186

წინა მხარის (ა) და მტევნის (ბ) კუნთის ელექტრომიოგრაფია

V3 ქსოვილთა და ორგანოთა ელექტროსტიმულაცია

ცვლადი დენის ორგანიზმზე მოქმედება არსებითად დამოკიდებულია მის სიხშირეზე. ისევე როგორც მუდმივი დენი, ცვლადი დენიც დაბალ სიხშირეზე

იწვევს ბიოლოგიური ქსოვილის გაღიზიანებას. ეს გამოწვეულია ელექტროლიტში იონების გადასაცვლებით და მათი კონცენტრაციების ცვლილებით უჯრედის სხედასხვა უბანში. ქსოვილთა გაღიზიანება დამოკიდებულია აგრეთვე იმპულსური დენის ფორმაზე, იმპულსის ხანგრძლივობასა და მის ამპლიტუდაზე.

მედიცინაში ქსოვილთა და ორგანოთა ფუნქციური მდგომარეობის დაქვეითების ან მოშლის შემოხვევაში ფართოდ იყენებენ ელექტროსტიმულაციის მეთოდს. **ელექტროსტიმულაცია** – ორგანიზმზე ზემოქმედება ელექტრული იმპულსებით. გარკვეული ორგანოების ან სისტემების დაქვეითებული ფუნქციების გაძლიერების ან აღდგენის მიზნით. მასალის სიუხვე და სახელმძღვანელოს მოცულობა არ იძლევა საშუალებას დაწერილებით შეეხოს თითოეულ მათგანს. სწორედ ამიტომ განვიხილავთ მხოლოდ ყველაზე მნიშვნელოვან ორგანოს, გულის ელექტროსტიმულაციას.

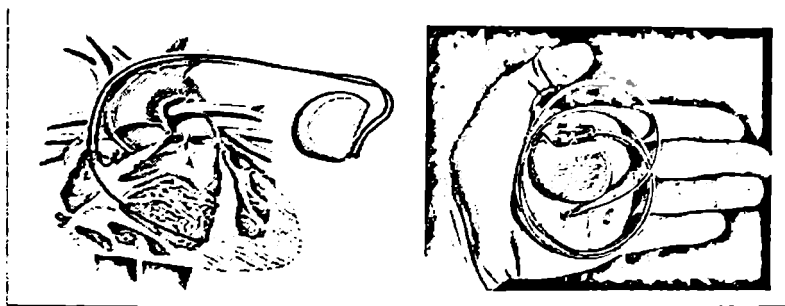
სხედასხვა პათოლოგიის დროს (ძალიან სუსტი ელექტრული იმპულსი, იმპულსის გატარების დაბალი ხარისხი) გული ვერ უზრუნველყოფს ორგანოების სისხლით ადეკვატურ მომარაგებას. ბუნებრივია, ასეთი პათოლოგიის დროს ადამიანის მდგომარეობა ძალზე შეზღუდულია, მოშლილია სისხლის მიმოქცევის რეგულაციის ძირითადი მექანიზმი.

ზემოთ აღნიშნული მდგომარეობიდან გამოსავალი ერთადერთია – განსაზღვრული რიტმის იმპულსის ხელოვნური მიმწოდებელი – ელექტროკარდიოსტიმულატორი. მეცნიერების მრავალი წლის მუშაობის შედეგად XX საუკუნის 50-იან წლებში შეიქმნა მსოფლიოში პირველი კარდიოსტიმულატორი (სურათი 187). კარდიოსტიმულატორის შექმნის პროცესში გადასაწყვეტი იყო მრავალი პრობლემა, მათ შორის უმთავრესია: გაბარიტები, ხანგრძლივი მოქმედების დენის წყარო და საიმედოობა. ელემენტარული კომფორტის გამო, საჭიროა კარდიოსტიმულატორი არ ზღუდავდეს ადამიანის მობილობას. ამ მიზნით, როგორც წესი, მცირე გაბარიტის კარდიოსტიმულატორებს ორგანიზმში კანქვეშ ამაგრებენ. პირველი თაობის სტიმულატორებს წინასწარ განსაზღვრულ სიხშირეზე (დაახლოებით 70 იმპულსი წუთში) ამუშავებდნენ, ამიტომ პაციენტის გულის ცემის სიხშირე მუდმივად ერთი და იგივე იყო (70 დარტყმა/წთ). ცხადია, ეს არაა სრულფასოვანი სტიმულაცია, რადგან ვერ პასუხობს ორგანიზმის მოთხოვნებს სხედასხვა დატვირთვის დროს.

მხოლოდ XX საუკუნის 70-იან წლებში შეიქმნა სრულყოფილი ბიომართვადი ელექტროკარდიოსტიმულატორი, რომლის დახვეწა და გაუმჯობესება დღემდე გრძელდება. თანამედროვე ბიომართვად სტიმულატორებში ხდება იმპულსების სიხშირის შეცვლა ავტომატურად, ორგანიზმის მოთხოვნის შესაბამისად. მაგალითად, ფიზიკური დატვირთვის დროს სიხშირე (მაშასადამე, გულის შეკუმშვის რიტმი) იზრდება, მოსვენების დროს სიხშირე მცირდება, უბრუნდება ნორმას – ძირითად სიხშირეს. ყოველივე ეს ხორციელდება უკუკავშირის საშუალებით (გაიხსენეთ ავტორხვევები).

სიხშირეული ადაპტაცია ხორციელდება სენსორებით, რომლებიც შეიძლება დაკავშირებული იყოს პაციენტის ფიზიკურ აქტიუობასთან (აჩქარება), სუნთქვის სიხშირესთან, ელექტროენცეფალოგრამის რომელიმე პარამეტრთან, ნიუთიერებათა ცვლასთან, (მაგალითად, ადრენალინის კონცენტრაციასთან) და სხვა

სიდიდებთან, რომლებიც ფიზიკური თუ სხვა სახის დატვირთვის დროს იცვლება.



სურათი 187
გულის ელექტროსტიმულატორი

თანამედროვე კარდიოსტიმულატორების მუშაობის ხანგრძლივობაა 5 - 10 წელი. მათში გათვალისწინებულია უსაფრთხოების შემდეგი მოთხოვნები: არ რეაგირებს ელექტრომაგნიტური ველის ცვლილებაზე, ტაქისისტოლის დროს გადიართება უსაფრთხო სიხშირეზე, კეების ელემენტის (დენის წყარო) დაცვის ("განმუხტვის") პროცესში ავტომატურად გამოირთება სტიმულატორის ფუნქციების ნაწილი, რათა ელემენტის შეცვლამდე უზრუნველყოს გულმა ძირითადი ფუნქციის შესრულება.

V.4 ბიომაგნეტიზმი

როგორც უკვე აღენიშნეთ, მაგნიტური თვისებების მიხედვით ნივთიერებები იყოფა:

დიამაგნეტიკებად - $\mu < 1$;

პარამაგნეტიკებად - $\mu > 1$;

ფერომაგნეტიკებად - $\mu \gg 1$.

ცოცხალი უჯრედების და ქსოვილების უმრავლესობა ავლენს როგორც პარამაგნიტურ, ასევე დიამაგნიტურ თვისებებს. მაგალითად, ერითროციტები დეზოქსი-ერითროციტები პარამაგნიტურია კემოგლობინის მოლეკულაში ცენტრალური Fe-ატომის თვისებების გამო. ის იერთებს ჟანგბადს და იცვლის მდგომარეობას პარამაგნიტურიდან დიამაგნიტურამდე. მაღალორგანიზებული სტრუქტურები (მაგალითად, უჯრედული მემბრანები) ავლენს მაგნიტურ ანიზოტროპიას: მათი მაგნიტური თვისებები სხვადასხვა მიმართულებით განსხვავებულია, დამოკიდებულია გაზომვის მიმართულებაზე.

მაგნიტოსტატიკურ ბაქტერიებში (დიდი რაოდენობით) და ადამიანის ქსოვილებში (მცირე რაოდენობით) აღმოჩენილია ფერომაგნეტიკები (Fe₃O₄-ის კუბოიდური კრისტალები (FeO და Fe₂O₃).

ის ნარვეგი) ზომით 50 - 200მ მმ, სიმკვრივე = 5,1 გ/სმ³), რომლებიც თავიანთი მცირე ზომების გამო განიხილება, როგორც ცოცხალი ორგანიზმის ელემენტარული მაგნიტები. ეს მაგნიტური კრისტალები სინთეზირდება უჯრედებში რკინის ხელატური კომპლექსებისგან*. დიდი ზომის ფერომაგნიტური კრისტალები შემოფარგლულია მემბრანით და წარმოქმნის მაგნიტოსომებს.

ბაყაყის საჯდომ ნერვში მოქმედების პოტენციალის გაერცელებისას წარმოქმნილი მაგნიტური ველის ინდუქცია დაახლოებით 0.12 ნტლ-ის ტოლია; ადამიანის ხელის გაშლის, ან მხრის მოხრის დროს, მის ზედაპირზე წარმოქმნილი მაგნიტური ველის ინდუქცია კი 1×10^{-3} ტლ-ს უდრის. სხვა ორგანოებს შორის გულის მაგნიტური ველის დაძაბულობა ცვლადი სიდიდეა. მისი სიხშირე იცვლება 8-12 კც-ის ფარგლებში. მაგნიტური ველი გულის ელექტრული ველის სინქრონულია.

მაგნიტოსტატიკურ ბაქტერიებში მაგნიტური ნაწილაკები წარმოქმნის ჯაჭვებს, სიგრძით 3მმ, ფიქსირებულ მოძრაი ბაქტერიის აქსისის გასწვრივ. ამ ჯაჭვის მაგნიტური მომენტი საკმარისია ბაქტერიის გეომაგნიტურ ველში ორიენტაციისათვის. მაგნეტოსტატიკური ბაქტერიები ჩვეულებრივად ანაერობული ბაქტერიებია. უპირატესი პოლარიზაციის მქონე უჯრედები დედამიწის ეკვატორისაგან მოშორებულ უბნებში დაცურავს ანაერობულ სიღრმეში გეომაგნიტური ვექტორის გასწვრივ. ეს ორიენტირებული მოძრაობა ცნობილია მაგნეტოტაქსისის სახელწოდებით. დარღვეული მაგნიტური პოლარიზაციის მქონე ბაქტერიები დაცურავენ არასწორი მიმართულებით და იღუპებიან ეანგზადის შემცველ წყლის ზედაპირზე. უჯრედის მიტოზური** გაყოფის დროს მაგნიტური ჯაჭვი აგრეთვე იყოფა ორად და შეიღებული უჯრედები შეიცავს სწორედ პოლარიზებულ ჯაჭვს.

სურათზე 188 მოყვანილია სუნთქვის სტიმულაციისთვის მაგნიტური ველის გამოყენების მაგალითი. ინდუქციური კოჭი თავსდება გულმკერდის ზედაპირზე; კოჭში ცვლადი დენის გატარება იწვევს კუნთებში მოქმედების პოტენციალის აღძვრას და სუნთქვის განახლებას.



სურათი 188

ცვლადი მაგნიტური ველის გამოყენება სუნთქვის სტიმულაციისათვის

* რკინის ხელატური კომპლექსი - რკინის, ნატრიუმის და ხელატორული აგენტის, ეთილენდიამინეთურაცეტატის (EDTA), ხსნადი კომპლექსი; გამოიყენება წყალხსნადი რკინის მილეუმისთვის.

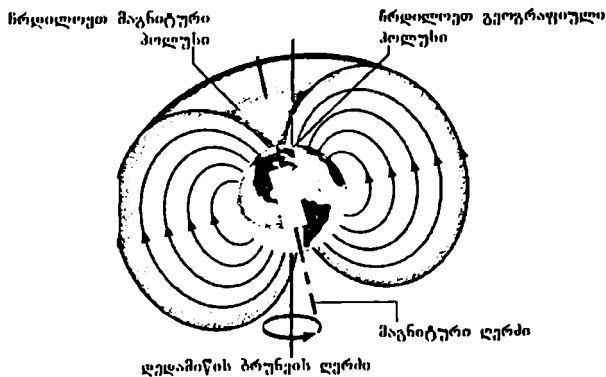
** მიტოზი - ეუკარიოტული სომატური უჯრედების ბირთვის გაყოფა, რომელიც მიმდინარეობს ქრომოსომების რიცხვის შენარჩუნებით).

V.5 დედამიწის მაგნიტური ველი

დედამიწას გააჩნია საკუთარი მაგნიტური ველი. დედამიწის იმ წერტილებს, რომლებშიც მაგნიტური ველის დაძაბულობის ექვტორი ვერტიკალურად ზევით (ან ქვევით) არის მიმართული, მაგნიტურ პოლუსებს უწოდებენ (ჩრდილოეთი და სამხრეთი). წრფეს, რომელიც პოლუსებზე გადის, დედამიწის ღერძს უწოდებენ. მაგნიტური ღერძის პერპენდიკულარულ სიბრტყეში დიდი წრის შემოსაზღვრულ წრეწირს მაგნიტურ ეკვატორს უწოდებენ. დედამიწის მაგნიტური ეკვატორი 110° არის გადახრილი გეოგრაფიული ეკვატორის მიმართ.

მაგნიტურ ეკვატორზე ველის დაძაბულობა $0,34$ ერსტედია, ხოლო მაგნიტურ პოლუსზე $0,66$ ერსტედი. მაშასადამე, ეკვატორიდან პოლუსამდე მაგნიტური ველის დაძაბულობა იცვლება.

დედამიწის მაგნიტური ველი წარმოდგენილია სურათზე 189.



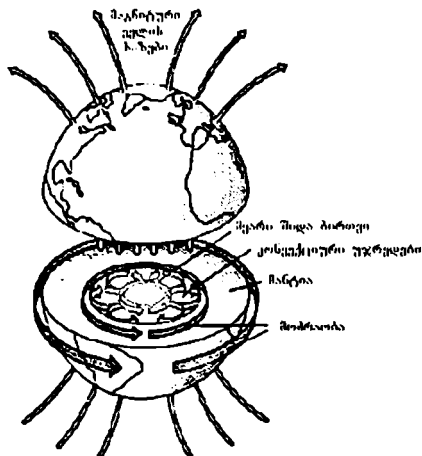
სურათი 189

დედამიწის მაგნიტური ველი

(Nico A.M. Schellart. "Compendium of Medical Physics, Medical Technology and Biophysics", Amsterdam, 2009)

დედამიწის მაგნიტური ველი გენერირდება დედამიწის ბირთვის თხევად ფენაში (სურათი 190). დედამიწის ბირთვის თხევადი ფენის მაღალი ტემპერატურის გამო (1043°K) მასში არსებული პარამაგნიტური მეტალების (რკინა, ნიკელი, სპილენძი და სხვა) მაგნიტური მომენტები (სპინები) იქნებოდა განლაგებული ქაოსურად (და დედამიწის მაგნიტური ველი ნულის ტოლი იქნებოდა), რომ დედამიწა არ ბრუნავდეს საკუთარი ღერძის გარშემო. გამდნარი პარამაგნიტული ნაწილაკების კონვექცია დედამიწის თხევად ბირთვში და დედამიწის ბრუნვითი მოძრაობით განპირობებული *კორიოლისის ეფექტი* *.

* კორიოლისის ეფექტი – ათეულის მოძრავე სისტემაში ობიექტების ტრაექტორიის გადახრა. დედამიწის ბრუნვის შედეგად, მაგალითად, მდინარე, რომელიც ჩრდილოეთიდან სამხრეთისკენ მიედინება, ყოველთვის ჩამორეცხავს მარჯვენა ნაპირს, სამხრეთიდან ჩრდილოეთისკენ – მარცხენას. ეს არის კარიოლისის ძალის მოქმედების შედეგი.



სურათი 190

დედამიწის მაგნიტური ველი გენერირდება თხევად ფენაში დედამიწის ბირთვის ბრუნვის შედეგად

კოროლინის ეფექტი იწვევს დაუწყველად ელექტრონების შემცველი პარამაგნიტური ატომებისაგან დედამიწის ზედაპირისაკენ მიმართული ელექტრული დენის წარმოქმნას. ამ ელექტრული დენით წარმოქმნილი მაგნიტური ველების ძალები მიმართულია დედამიწის სამხრეთ-ჩრდილოეთის ღერძის გასწვრივ.

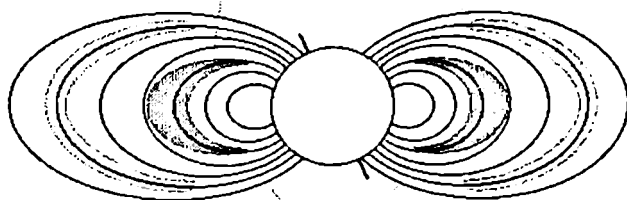
დედამიწის მაგნიტური ველის ძალები წარმოქმნის მაგნიტოსფეროს დედამიწის გარშემო (ვან ალენის სარტყელები, სურათი 191), რომელიც უზრუნველყოფს დედამიწის ცოცხალი მატერიის დაცვას დამუხტული კოსმოსური ნაწილაკებისაგან (კოსმოსური სხივები). დამუხტული კოსმოსური ნაწილაკები, რომლებიც შეაღწევენ მაგნიტოსფეროს, დედამიწის მაგნიტური ველის ზემოქმედებით (ლორენცის ძალა) იცვლიან თავის ტრაექტორიას და ასრულებენ მოძრაობას სპირალისებურ ტრაექტორიაზე დედამიწის მაგნიტური ველის ძალების მიმართულებით (სურათი 192).

დედამიწის ზედაპირთან ახლოს (პოლუსების მიდამოებში) კოსმოსური ნაწილაკები ურთიერთქმედებს ატმოსფეროს მოლეკულებთან და იწვევს მათ იონიზაციას, პაერის მოლეკულების აგზნებას და ნათებას (ლუმინესცენციას, იხ. ქვემოთ), რაც ვლინდება პოლარული ნათების სახით. დამუხტული კოსმოსური ნაწილაკები, რომლებიც შეაღწევენ მაგნიტოსფეროს, დედამიწის მაგნიტური ველის ზემოქმედებით იცვლიან თავის ტრაექტორიას და ასრულებენ მოძრაობას ტრაექტორიაზე ძალების მიმართულებით.



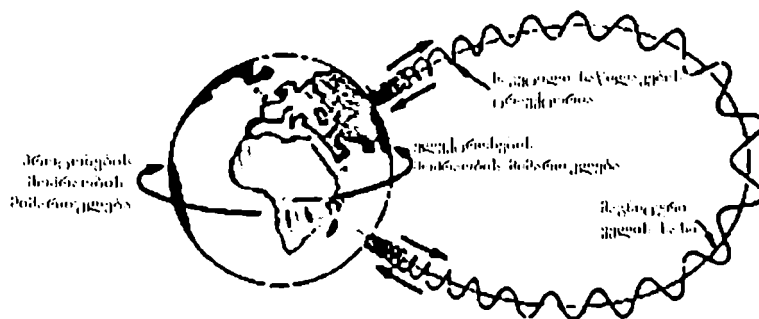
მთავარი ალუმინის სარტყელი

მთავარი ალუმინის სარტყელი



მაგნიტური ველის ხაზები

სურათი 191
დედამიწის მაგნიტური ველის ძალწირები – მაგნიტოსფეროს (ვან ალენის)
სარტყელები (ტრილი)



სურათი 192
დამუხტული კოსმოსური ნაწილაკების ტრაექტორია დედამიწის მაგნიტურ
ველში

საკონტროლო კითხვები და ამოცანები:

1. რა განსაზღვრავს ცოცხალ ორგანიზმზე მუდმივი დენის მოქმედების ეფექტს?
2. როგორ იცვლება მუხტი ცოცხალი ორგანიზმის გაძლიერებული მეტაბოლური აქტივობის უბნებში? დაბალი მეტაბოლური აქტივობის უბნებში?
3. როგორია დამოკიდებულება ცოცხალი ქსოვილის იმპედანსსა და ცვლადი დენის სიხშირეს შორის? ახსენით ამ დამოკიდებულების არსი. რა ინფორმაციას იძლევა იმპედანსის დისპერსია?
4. აღწერეთ ელექტრული დენის მოქმედების ეფექტები ადამიანის სხეულზე.
5. ახსენით კარდიოგრაფიის ფიზიკური საფუძვლები.
6. როგორი მაგნიტური თვისებები ახასიათებს ცოცხალ ქსოვილებს?
7. რა განაპირობებს დედამიწის მაგნიტური ველის არსებობას და მის დაძაბულობას?
8. აღწერეთ დედამიწის მაგნიტური ველის მნიშვნელობა სიცოცხლისათვის.
9. მოიყვანეთ მედიცინაში მაგნიტური ველის სამკურნალოდ ან სადიაგნოსტიკოდ გამოყენების მაგალითები.

VI ელექტრომაგნიტური ველი და ელექტრომაგნიტური ტალღები

ენერგია სხეულის მუშაობის შესრულების უნარს განსაზღვრავს. მუშაობის პროცესში ენერგია გადაეცემა ერთი სხეულიდან მეორეზე სამი ძირითადი გზით:

- შეხებით, ზემოქმედებისას (სხეულების ფიზიკური კონტაქტის დროს).
- კონვექციით (სითხის ან აირის მიმართული ნაკადი თბილიდან ნაკლებად თბილ უბანში მოლეკულების სითბური მოძრაობისას).
- გამოსხივებით (რადიაცია); ეს არის ენერგიის გადატანის ერთ-ერთი სახე ეაკუუმში (მაგალითად, დედამიწასა და მზეს შორის).

სხეულები ან მისი უბნები წარმოქმნის თავის გარშემო სხვადასხვა სახის ველს და ურთიერთქმედებს ამ ველის საშუალებით (გრავეიტაციული ურთიერთქმედება, ელექტრომაგნიტური და ბირთვული ურთიერთქმედება).

ჩვენ გავეცანით ელექტრომაგნიტური ინდუქციის მოვლენას (ლენცის წესი), რომლის არსი მდგომარეობს იმაში, რომ მაგნიტური ველის ცვლილებები ნებისმიერ პირობებში ყოველთვის წარმოშობს ელექტრულ ველს (შედეგი – ინდუქციური დენი). 1865 წელს მაქსველმა შეადგინა განტოლებები, რომლებიც აღწერს ელექტრომაგნიტურ ინდუქციას. ამ განტოლებებით მან დაადგინა, რომ უნდა არსებობდეს შებრუნებული მოვლენაც, ე.ი. ელექტრული ველის ცვლილებამ უნდა წარმოშვას მაგნიტური ველი. ყოველივე ეს შეიძლება ასე ჩამოყალიბდეს:

1. მაგნიტური ველის ინდუქციის (დაძაბულობის) ცვლილება სივრცის რომელიმე წერტილში იწვევს მიმდებარე წერტილებში ასევე ცვლადი ელექტრული ველის აღძვრას, რომლის ძალწირები შემოხვეულია მაგნიტურ ძალწირებს პერპენდიკულარულად.

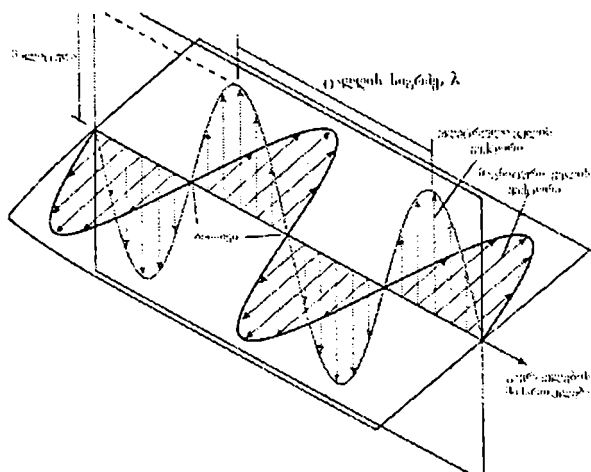
2. ელექტრული ველის დაძაბულობის ცვლილება სივრცის რომელიმე წერტილში იწვევს მიმდებარე წერტილებში ასევე ცვლადი დაძაბულობის მაგნიტური ველის აღძვრას, რომლის ძალწირები შემოხვეულია ელექტრული ველის ძალწირებს ასევე პერპენდიკულარულად.

3. ინდუქციით მიღებული ველების (როგორც მაგნიტური, ასევე ელექტრული) დაძაბულობები მით მეტია, რაც მეტია ინდუქციის გამომწვევი ველის ცვლილების სიჩქარე.

უნდა აღინიშნოს, რომ ინდუქციით მიღებული ელექტრული ველის ძალწირები განსხვავებით ელექტრომაგნიტური ველისაგან, არსად არ იწყება და არც თავდება. ისინი შეკრული წირებია, როგორც მაგნიტური ველის წირები. ასეთ ველს კი *გრივალური* ველს უწოდებენ. შეიძლება მოკლედ დავასკენათ, რომ ცვლადი ელექტრული ველი აღძრავს ცვლად მაგნიტურ ველს, ცვლადი მაგნიტური ველი კი ცვლად ელექტრულს და ა. შ.. ამგვარად, სივრცეში გაერთეულებმა ელექტრომაგნიტური ტალღა (სურათი 193).

ელექტრულად დამუხტული სხეულები და ნაწილაკები ურთიერთქმედებენ ერთმანეთთან ელექტრომაგნიტური ველის საშუალებით. თუმცა უძრავი მუხტების შემთხვევაში ვლინდება ამ ველის მხოლოდ ელექტრული კომპონენტი. უძრავი (სტატიკური) და მოძრავი მუხტების (ელექტრული დენის) ურთიერთქმედება ელექტრომაგნიტური ველის საშუალებით აღწერილია

მაქსველის განტოლებებში და ლორენცის შრომებში. *ელექტრომაგნიტური ველი* – ელექტრული და მაგნიტური ველების ერთობლიობაა, მათი პერიოდული ცვლილებების გავრცელება გარემოში ელექტრომაგნიტური ტალღის სახით. ჩველადი ელექტრული ველი ყოველთვის აღძრავს ცვლად მაგნიტურ ველს, ეს უკანასკნელი კი ცვლად ელექტრულს და ა.შ. უნდა აღინიშნოს, რომ ამ ველების ძალწირები შეკრული წირებია (გრიგალური ველი) და მათი ვექტორები (E და B) ყოველთვის ურთიერთმართობ სიბრტყეში ირხევიან (სურათი 193)



სურათი 193

ელექტრომაგნიტური ველის გავრცელება

ზოგადად ელექტრომაგნიტური ველის *ელექტრული* კომპონენტი (ელექტრული ველი) მუდამ არსებობს დამუხტული სხეულის გარშემო.

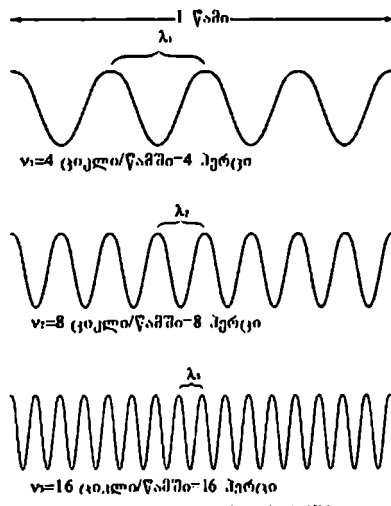
ელექტრომაგნიტური ველის *მაგნიტური* კომპონენტი (მაგნიტური ველი) ელინდება მხოლოდ იმ შემთხვევაში, თუ დამუხტული სხეული (მუხტი ან მუხტები) მოძრაობს (ელექტრული დენი).

მაქსველის თეორიის თანახმად, ელექტრომაგნიტური ველი ვრცელდება სამგანზომილებიან სივრცეში ელექტრომაგნიტური ტალღების სახით. ელექტრომაგნიტური ტალღები განივი ტალღებია, რომლებიც მოიცავენ ცვლად ურთიერთპერპენდიკულარულ ელექტრულ და მაგნიტურ კომპონენტებს (სურათი 191) და ვრცელდება მაღალი სიჩქარით (ვაკუუმში $c = 2,99792 \times 10^8 \text{ მ/წმ}$; ჰაერში $c = 2,99709 \times 10^8 \text{ მ/წმ} \approx 3 \times 10^8 \text{ მ/წმ}$)*.

* c - სინათლის სიჩქარის საყოველთაოდ მიღებული აღნიშვნაა. სინათლე ელექტრომაგნიტური ტალღაა. ელექტრომაგნიტური ტალღათა სივრცეში გავრცელება საუბარი

VI.1 ელექტრომაგნიტური ტალღების ძირითადი მახასიათებლები

განვიხილოთ ელექტრომაგნიტური ტალღების ძირითად მახასიათებლები (სურათი 194).



სურათი 194

ერთნაირი ამპლიტუდის და სხვადასხვა სიხშირის ტალღები

ელექტრომაგნიტური ტალღების ძირითადი მახასიათებლები :

- **ტალღის სიგრძე λ** - მანძილი, რომელზედაც ტალღა ვრცელდება ერთი პერიოდის განმავლობაში; განზომილება - მეტრი (მ), სანტიმეტრი (სმ), მიკრომეტრი (μმ), ნანომეტრი (ნმ).

- **სიხშირე ν** - ტალღის ციკლების რაოდენობა, რხევათა რიცხვი დროის ერთეულში. სიხშირე იზომება პერცებში (პც); 1 პც - 1 რხევა/1 წმ; ტალღის სიგრძე და მისი გაერცელების სიჩქარე იცვლება სხვადასხვა გარემოში, სიხშირე - ტალღის წყაროს პარამეტრია, იგი რჩება მუდმივი. ტალღის ერთი გარემოდან მეორეში გადასვლის შემთხვევაში :

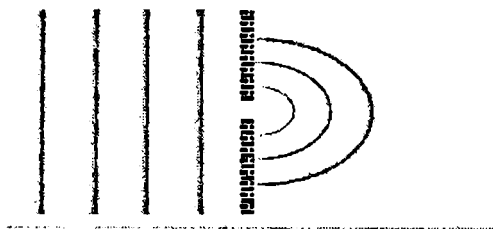
$$\frac{\lambda}{T} = V, \quad \frac{1}{T} = \nu$$

ე. ი. $\lambda \nu = V$, ვაკუუმისათვის $V = c$. მაშინ :

$$\nu = \frac{c}{\lambda}$$

ამპლიტუდა - ელექტრომაგნიტური ტალღების ამპლიტუდა ტალღის მაქსიმალური სიმაღლეა წონასწორული დონიდან. ელექტრომაგნიტური გამოსხივების ტალღური ბუნების პოზიციიდან გასაგებია ელექტრომაგნიტური ტალღების სიერცეში გაერცელების ზოგიერთი ცნობილი კანონზომიერება (დიფრაქცია, ინტერფერენცია, არეკლა, გარდატეხა)

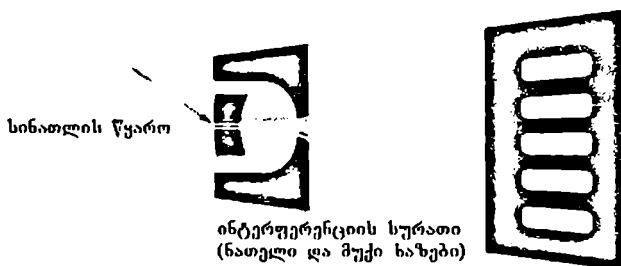
დიფრაქცია - ტალღების, მათ შორის სინათლის ტალღის, დაბრკოლების შემოვლის უნარი. რომლის დროსაც ის გაერცელების წრფივი მიმართულებიდან გადაიხრება. თუმცა დაბრკოლების გადალახვის შემდეგ გაერცელების მიმართულება გარემოში რჩება იგივე, ანუ თავდაპირველი მიმართულება (სურათი 195), იცვლება სინათლის ტალღის ინტენსივობა.



სურათი 195

ტალღის დიფრაქცია.

შავი და თეთრი ზოლები შეესაბამება ინტენსივობის მაქსიმუმსა და მინიმუმს



სურათი 196

სინათლის ტალღის ინტერფერენცია დიფრაქციული მესრის* გავლის შემდეგ შავი და თეთრი ზოლები შეესაბამება ინტენსივობის მაქსიმუმს და მინიმუმს.

*დიფრაქციული მესერი - ოპტიკური მოწყობილობაა, რომელიც დიდი რაოდენობის გამჭვირვალე და გაუმჭვირვალე პარალელურ ზოლებს შეიცავს, თანმიმდევრული განლაგებით (ანალოგიურად, როგორც სავარცხლის კბილები)

ინტერფერენცია - ორი ტალღის ზედდების შედეგი (ჯამური ტალღა). რომლის ინტენსიუობა ზედდებისას დამოკიდებულია ტალღების ფაზაზე (ერთნაირი ფაზის შემთხვევაში ტალღები ერთმანეთს აძლიერებს, ხოლო საპირისპირო ფაზის შემთხვევაში - ასუსტებს (სურათი 196).

არეკელა - ტალღის არეკელა ორი გარემოს გამყოფი ზედაპირიდან. მაგალითად, სინათლის ტალღის არეკელა სარკის ზედაპირიდან, როცა ტალღა ბრუნდება უკან იმავე გარემოში (სურათი 197, 198).

გარდატეხა - ტალღის გავრცელების მიმართულების ცვლილება ორი განსხვავებული ოპტიკური სიმკრივის გარემოში გავლისას. გარდატეხის ფარდობითი მაჩვენებელი განისაზღვრება ფორმულით :

$$n_{21} = \frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{V_1}{V_2},$$

სადაც θ_1 - დაცემის კუთხეა, θ_2 - გარდატეხის კუთხე, V_1 და V_2 სინათლის გავრცელების სიჩქარეებია ამ გარემოში (სურათი 196).

ვაკუუმის მიმართ გარდატეხის ფარდობით მაჩვენებელს **აბსოლუტური გარდატეხის მაჩვენებელი** ეწოდება $n = \frac{c}{v}$, სადაც V - სინათლის სიჩქარეა გარემოში, C - სინათლის სიჩქარე ვაკუუმში, ე.ი. **აბსოლუტური გარდატეხის მაჩვენებელი გვიჩვენებს, თუ რამდენჯერ ნაკლებია სინათლის გავრცელების სიჩქარე მოცემულ გარემოში ვაკუუმთან შედარებით.**

საწყისი ტალღა

არეკლილი ტალღა

"

"

"

გარდატეხილი ტალღა

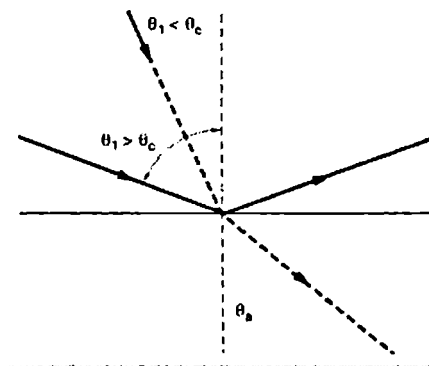
სურათი 197

სინათლის ტალღის გარდატეხა და არეკელა. ტალღა ვრცელდება ნაკლებად მკეროვიდან მეტად მკეროვ გარემოში (ტალღის გავრცელების მიმართულებას სხივს უწოდებენ).

თუ დაცემის კუთხე გარდატეხის კუთხეზე მეტია ($\theta_1 > \theta_2$) (სურათი 195), ეს ნიშნავს, რომ $n_2 > n_1$ და სინათლის ტალღა ვრცელდება ოპტიკურად ნაკლებად მკეროვი გარემოდან მეტად მკეროვში. იმ შემთხვევაში, როდესაც სინათლის ტალღა ვრცელდება შედარებით მაღალი გარდატეხის მაჩვენებლის მქონე არიდან, დაცემის კუთხე გარდატეხის კუთხეზე ნაკლებია ($\theta_1 < \theta_2$). დაცემის კუთხის ზღვრული მნიშვნელობისათვის ($\theta_1 = \theta_c$) სინათლის გარდატეხა ხდება საზღვრის ზედაპირის მხების პარალელურად $\theta_2 = 90^\circ$, ამ შემთხვევაში :

$$\sin \theta_2 = 1 \quad \text{და} \quad \sin \theta_1 = \sin \theta_c = \frac{n_2}{n_1},$$

სადაც n_1 - პირველი გარემოს, ხოლო n_2 - მეორე გარემოს აბსოლუტური გარდატეხის მაჩვენებელია. თუ $\theta_1 > \theta_c$, სინათლის ტალღა არ გაერცელება მაღალი გარდატეხის მაჩვენებლის არიდან დაბალი მაჩვენებლის არეში და სრულად აირეკლება მისი საზღვრის ზედაპირიდან. ეს მოვლენა ცნობილია *სრული შინაგანი არეკვლის* სახელწოდებით (სურათი 197). მაგალითად, მინისათვის $n_2 = 1.5$, $\sin \theta_c = \frac{1}{1.5}$ და $\theta_c = 42^\circ$.



სურათი 198

სრული შინაგანი არეკვლა.

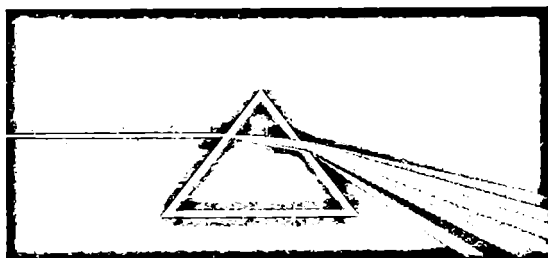
დაცემის კუთხე θ_1 მეტია ზღვრულ კუთხეზე, სხივი ბრუნდება უკან იმავე გარემოში

გარდატეხა განპირობებულია სინათლის ტალღის გაერცელების სიჩქარის ცვლილებით გარემოში (კერძოდ, ოპტიკურად უფრო მკეროვ არეში გადასვლისას, შემცირებით).

დისპერსია – ეს არის მოვლენა განპირობებული ნივთიერების გარდატეხის მაჩვენებლისა და სინათლის სიხშირეს (ან ტალღის სიგრძე) შორის დამოკიდებულებით. დისპერსიის მაგალითს წარმოადგენს თეთრი ფერის სინათლის დაშლა პროზმაში გავლის დროს (ნიუტონის ცდა) (სურათი 199). სხვადასხვა სიხშირის ელექტრომაგნიტური ტალღების გავრცელების სიჩქარე ვაკუუმში ერთი და იგივეა, მაგრამ იცვლება სხვადასხვა გარემოში. ერთი და იგივე გარემოშიც სიჩქარე იცვლება სიხშირის მიხედვით: მაღალ სიხშირეს (დაბალ ტალღის სიგრძეს) ნაკლები სიჩქარე შეესაბამება და პირიქით. სიჩქარე მცირდება ტალღის სიხშირის ზრდასთან ერთად, ე.ი. იზრდება მის მიმართ გარდატეხის მაჩვენებელი, რადგან დაბალ სიხშირეს (მაღალ ტალღის სიგრძეს)

მეტი სიჩქარე შეესაბამება, მისი გარდატეხის მაჩვენებელი ($n = \frac{c}{v}$) ნაკლებია,

ვიდრე მაღალი სიხშირის ტალღის გარდატეხის მაჩვენებელი $n_2 < n_1$ (გარდატეხის კუთხეები კი პირიქით). ამიტომ მაღალი სიხშირის, იისფერი სინათლის გარდატეხის მაჩვენებელი კუთხე უფრო მეტია, ვიდრე დაბალი სიხშირის - წითლის. ეს განპირობებს თეთრი სინათლის **დისპერსიას** – მარტივ ფერებად დაშლას.

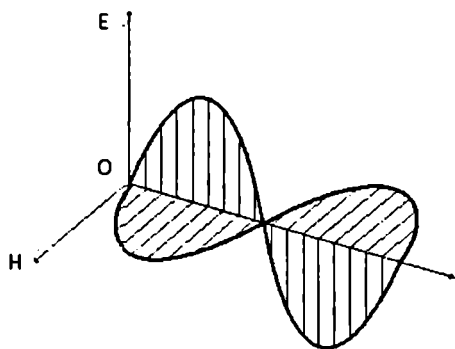


სურათი 199
თეთრი სინათლის დისპერსია პრიზმაში

ამრიგად, სინათლის სიჩქარე მოცემულ გარემოში დამოკიდებულია ტალღის სიგრძეზე. ამ მოვლენას სინათლის სიჩქარის დისპერსიას უწოდებენ. ცხადია, გარდატეხის მაჩვენებელი n (ვინაიდან იგი სინათლის სიჩქარეზეა დამოკიდებული) ერთსა და იმავე გარემოში სხვადასხვა ტალღის სიგრძისათვის იქნება სხვადასხვა. სწორედ ეს არის მიზეზი იმისა, რომ მინის სამწახნაა პრიზმა თეთრ (რთულ) სინათლეს შლის ფერებად (სურათი 198). გრძელი ტალღა პრიზმის ფუძის მიმართ უფრო ნაკლები კუთხით გარდატეხდება, ვიდრე მოკლე ტალღა.

ბუნებაში დისპერსიის მოვლენა ხშირია. მაგალითად, ცისარტყელა – წყლის წვეთის პრიზმაში მზის თეთრი (მრავალკომპონენტური) სხივის გარდატეხა და ფერებად დაშლა.

სინათლის პოლარიზაცია. სინათლე – ელექტრომაგნიტური ტალღაა. იგი ელექტრული ველის დაძაბულობის E და მაგნიტური ველის ინდუქციის B (ან H) ვექტორების პერიოდული ცვლილებების გაერცელება გარემოში (სურათი 200).



სურათი 200

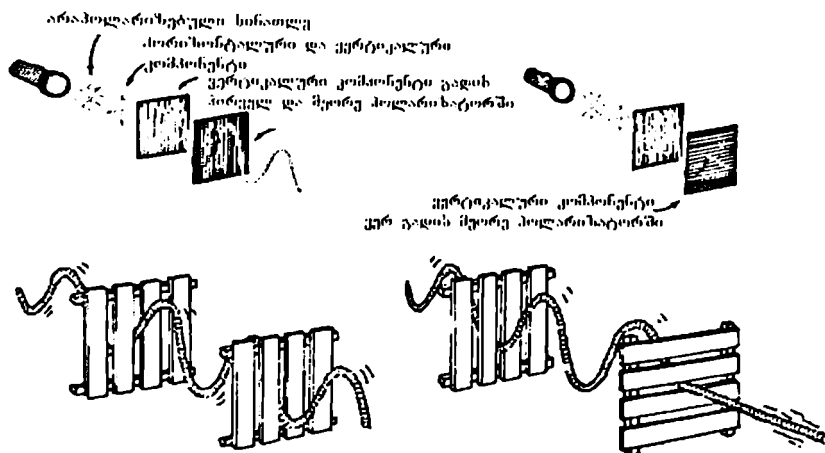
ელექტრომაგნიტური ტალღა. მისი გაერცელების მიმართულება მართობია HOE სიბრტყის ($\nu \perp$ რხევების მიმართულების) ე.ი. განივი ტალღაა

ვინაიდან სინათლის ქიმიური თუ ბიოლოგიური მოქმედება ძირითადად ელექტრული ველის დაძაბულობითაა გამოწვეული, E ვექტორს **სინათლის ვექტორსაც** უწოდებენ.

სინათლის ტალღები გამოსხივდება მრავალრიცხოვანი ატომებისა და მოლეკულების მიერ. ამ ტალღების სინათლის ვექტორი ირხევა სხვადასხვა სიბრტყეში და ეს რხევები მიმდინარეობს სხვადასხვა ფაზაში, ამიტომ ჯამური ტალღის სინათლის ვექტორის რხევის სიბრტყე მუდმივად იცვლება სივრცეში. ასეთ სინათლეს ბუნებრივს (არაპოლარიზებულს) უწოდებენ. თუ ბუნებრივ სინათლეს გავატარებთ კვარცის კრისტალში, იგი გაატარებს მხოლოდ ერთ სიბრტყეში (ე. წ. პოლარიზაციის სიბრტყე) ვექტორ E -ს რხევებს, ანუ კრისტალიდან გამოსვლის შემდეგ სინათლის ვექტორი E ირხევა მხოლოდ ერთ სიბრტყეში. მიიღება ე. წ. ბრტყლად პოლარიზებული სინათლე. თვით კრისტალს პოლარიზატორი ეწოდება (სურათი 201).

თუკი პოლარიზატორიდან გამოსულ სინათლეს (უკვე პოლარიზებულს), გაერცელების მიმართულებით დავუხვედრებთ ისეთივე კრისტალის პრიზმას, მაშინ იგი გაატარებს სინათლეს, როცა მისი პოლარიზაციის სიბრტყე პარალელურია პოლარიზატორის პოლარიზაციის სიბრტყისა. ამ კრისტალს **ანალიზატორი** ეწოდება. თუ პოლარიზატორისა და ანალიზატორის სიბრტყეები ერთმანეთთან ქმნის რაიმე მცირე კუთხეს (მახვილს), სინათლე გავა ანალიზატორში, მაგრამ შემცირებული ინტენსივობით, თუ კუთხე 90° -ია, სინათლე ვერ გავა ანალიზატორში, სინათლის ინტენსივობა ხდება ნულის ტოლი (სურათი 202).

პრიზმებისათვის “პოლარიზატორის” და ანალიზატორის” სახელი პირობითია, თუ მათ ადგილებს შევუცვლით, ეფექტი იგივე იქნება, მხოლოდ უკვე პოლარიზატორი ხდება ანალიზატორი და პირიქით.



სურათი 201

ილუსტრაციები სინათლის პოლარიზაციის საკითხისათვის

მტკიცდება, რომ პოლარიზატორიდან გამოსული სინათლის ინტენსივობა (I) ტოლია:

$$I = I_0 \cos^2 \phi \quad (\text{მალისის კანონი}),$$

სადაც I_0 - სინათლის მაქსიმალური ინტენსივობაა (პოლარიზატორამდე), ϕ - კუთხე E ვექტორის რხევის სიბრტყესა და პოლარიზაციის სიბრტყეს შორის.

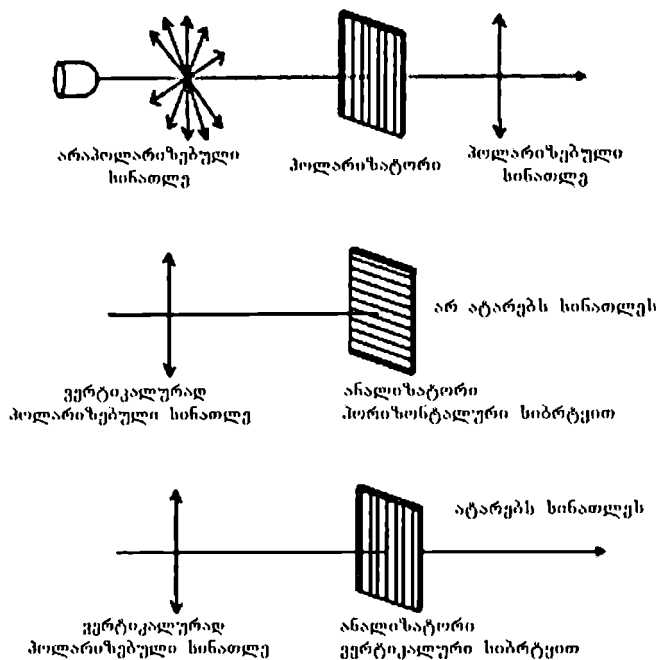
სინათლის ტალღის პოლარიზაციის ხარისხი შეიძლება გამოიხატოს ფორმულით :

$$P = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}$$

ბუნებრივი სინათლისათვის (არაპოლარიზებული სინათლის) $I_{\max} = I_{\min}$ და ამიტომ $P = 0$. წრფივად პოლარიზებული სინათლისათვის $I_{\min} = 0$, ამიტომ $P = 1$. ამ მსჯელობიდან შეიძლება მივიღოთ დასკვნამდე: ნაწილობრივ პოლარიზებული სინათლის პოლარიზაციის ხარისხი იცვლება $0 < P < 1$ ფარგლებში (სურათი 203).

პოლარიზაციის სიბრტყის მობრუნება შეუძლია სხვადასხვა ნივთიერებას. ნაერთებს, რომლებიც იწვევენ ბრტყლად პოლარიზებული სინათლის პოლარიზაციის სიბრტყის ბრუნვას, ოპტიკურად აქტიური ნივთიერებები ეწოდება.

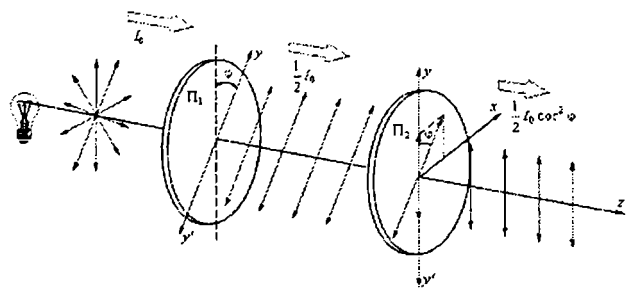
მაგალითად, ბუნებრივი შაქარი ოპტიკურად აქტიური ნივთიერებაა. პოლარი-



სურათი 202

პოლარიზატორი და ანალიზატორი.

სურათზე წარწერა „ვერტიკალური“ გულისხმობს, რომ პოლარიზაციის სიბრტყე (E -ს რხევის სიბრტყე) ვერტიკალურია



სურათი 203

პოლარიზაციის სიბრტყის მობრუნება

ზაციის სიბრტყის მობრუნების კუთხე φ დამოკიდებულია სინათლის ტალღის მიერ *ოპტიკურად აქტიურ* ნივთიერებაში გავლილ მანძილზე და ამ ნივთიერების კონცენტრაციაზე :

$$\varphi = \varphi_0 l$$

სადაც l – სინათლის მიერ გავლილი მანძილია ნივთიერებაში, φ_0 – ერთეულოვან მანძილზე პოლარიზაციის სიბრტყის მობრუნების კუთხე, ის ნივთიერების კონცენტრაციის პროპორციულია: $\varphi_0 = a_0 c$, სადაც c – კონცენტრაცია.

საბოლოოდ ვღებულობთ :

$$\varphi = a_0 c l$$

პოლარიზებული ტალღის საშუალებით მოცემული ნივთიერების ცნობილი კონცენტრაციისათვის ზომავენ a_0 სიდიდეს. გვეცოდინება რა a_0 მნიშვნელობა შეგვიძლია, განესაზღვროთ ამავე ნივთიერების უცნობი კონცენტრაცია (l -ისა და φ -ის გაზომვით) ხელსაწყობს, რომელთა საშუალებით იზომება პოლარიზაციის სიბრტყის შემობრუნების კუთხე *პოლარიმეტრი* ეწოდება. მარტივ პოლარიმეტრს, რომელსაც მედიცინაში შაქრის კონცენტრაციის განსაზღვრისთვის იყენებენ, შაქარმზომს უწოდებენ. პოლარიმეტრები, რომლებიც ბიოფიზიკაში გამოიყენება (მაცრომალექულების კვლევის დროს) რთული ელექტრონული ხელსაწყოა, მიუხედავად იმისა, რომ მისი მუშაობის ფიზიკური საფუძველი მარტივია. პოლარიზებული სინათლე გამოიყენებულია ე.წ. პოლარიზაციურ მიკროსკოპებში.

საკონტროლო კითხვები და ამოცანები:

1. რა მოვლენაა სინათლის დიფრაქცია?
2. რას ეწოდება ინტერფერენცია? ინტერფერენციის დროს როდის მიიღება მაქსიმალური და მინიმალური ინტენსიობა?
3. რაზეა დამოკიდებული გარდატეხის აბსოლუტური მაჩვენებლის მნიშვნელობა?
4. რას ეწოდება სრული შინაგანი არეკლა? რა შემთხვევაში აქვს მას ადგილი?
5. რას ეწოდება სინათლის დისპერსია? თუ $\lambda_1 > \lambda_2$, რომელი სინათლის ტალღა გარდატეხდება მეტი კუთხით?
6. რაში მდგომარეობს სინათლის პოლარიზაციის არსი? როგორ სინათლეს უწოდებენ ბრტყლად პოლარიზებულს?

VII ფოტოელექტრული ეფექტი; ელექტრომაგნიტური გამოსხივების დუალური თვისებები

მე-XX საუკუნის დასაწყისში ექსპერიმენტით მიღებული ზოგიერთი მოვლენის (ფოტოელექტრული ეფექტი, კომპტონის ეფექტი) ახსნა შეუძლებელი გახდა ელექტრომაგნიტური ველის ტალღური თეორიის საშუალებით. იდეა ელექტრომაგნიტური ველის დისკრეტული ბუნების შესახებ პირველად გამოთქვა მაქს პლანკმა (1889წ) და შემდეგ დამტკიცებულ იქნა ალბერტ აინშტაინის ექსპერიმენტებით (1905 წ.).



მაქს პლანკი
ნობელის პრემიის ლაურეატი
(1918)



ალბერტ აინშტაინი
ნობელის პრემიის ლაურეატი
(1921)

პლანკმა შემოგვთავაზა ფორმულა გამოსხივებული ელექტრომაგნიტური ველის ენერგიის დისკრეტულობის შესახებ (პლანკის მიხედვით გამოსხივებული ელექტრომაგნიტური ტალღის ენერგიის პორცია - "კვანტი" ("ფოტონი") მისი სიხშირის პირდაპირ პროპორციულია:

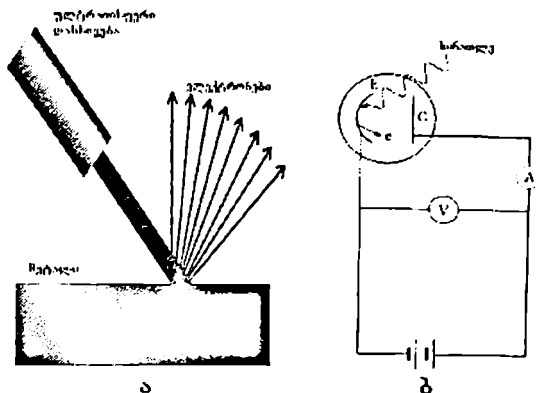
$$E = h\nu^* \quad (V.2.1)$$

სადაც h – პლანკის მუდმივაა ($h = 6.626 \cdot 10^{-34}$ ჯ წმ), ν – გამოსხივების სიხშირე (ჰც).

*ზირ შემთხვევაში ლიტერატურაში გვხვდება ეს ფორმულა ასეთი სახით: $h\omega = E$, სადაც h (h ხაზიანი) $h = \frac{h}{2\pi}$, $\omega = 2\pi\nu$.

ფოტოელექტრული ეფექტი

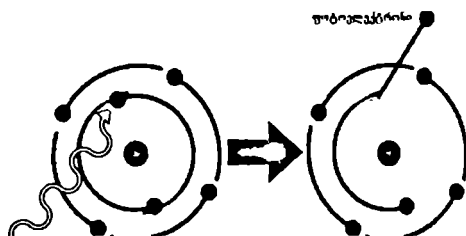
ექსპერიმენტულად დადგინდა, რომ მეტალის ფირფიტის სინათლით დასხივების დროს შესაძლებელია მასში სუსტი ელექტრული დენის აღმოცენება. ეს ფენომენი აიხსნება სინათლის ტალღის ენერგიის ნაწილის ელექტრონებისათვის გადაცემით (სურათი 204).



სურათი 204

ილუსტრაციები ფოტოელექტრული ეფექტისათვის

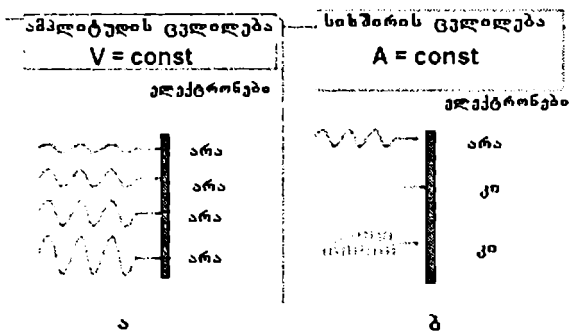
მიიღებს რა ელექტრონი საკმარის ენერგიას, იგი დატოვებს მეტალის ატომს და იმოძრაებს C ანოდისაკენ, ე.ი. წარმოქმნის ელექტრულ დენს (თავისუფალი ელექტრონების ნაკადს), რომელიც ფიქსირდება გალვანომეტრზე (სურათი 204ბ). ჩვეულებრივ, მეტალების ატომებში ელექტრული კავშირი ელექტრონებსა და ატომბირთვს შორის სუსტია და ე.წ. სავალენტო ელექტრონები, თუ მიიღებენ საკმარის ენერგიას, ადვილად თავისუფლდებიან ატომისაგან (სურათი 205).



სურათი 205

მეტალის ატომიდან სინათლის ზემოქმედების დროს ელექტრონის ემისია

ელექტრომაგნიტური გამოსხივების ბუნებაზე კლასიკური შეხედულებების თანახმად, ელექტრომაგნიტური ტალღის ენერგია მისი ამპლიტუდის და სიხშირის კვადრატის პირდაპირპროპორციულია. აქედან გამომდინარე, რაც უფრო დიდია ამპლიტუდა, ე.ი. რაც მეტია სინათლის ტალღის ენერგია გამოწვეული ამპლიტუდით გაზრდით (რაც უფრო კაშკაშაა სინათლე), მით უფრო ინტენსიური დენი უნდა დაფიქსირებულიყო წრედში. სინამდვილეში ეს ასე არ ხდება (სურათი 206).



სურათი 206

ფოტოელექტრული ეფექტი

ელექტრომაგნიტური ტალღის ამპლიტუდისა და სიხშირის მნიშვნელობა

ფოტოელექტრული ეფექტის დროს

ა - უცვლელი სიხშირის დროს ამპლიტუდის გაზრდა არ იწვევს ელექტრონების ემისიას; ბ - მუდმივი ამპლიტუდის შემთხვევაში სიხშირის გაზრდა იწვევს ელექტრონების ემისიას

ამრიგად, სინათლის ტალღური ბუნება ვერ ხსნის ფოტოელექტრულ ეფექტს. ფოტოელექტრული ეფექტის ახსნისათვის აინშტაინმა გამოიყენა მოდიფიცირებული პლანკის პიოტეზა. აინშტაინის აზრით, ელექტრომაგნიტური ენერგია არა მხოლოდ პორციებით (კვანტებით) გამოსხივდება, არამედ ინარჩუნებს ამ ფორმას გავრცელების დროსაც. აინშტაინი იყო პირველი, რომელმაც გამოიყენა პლანკის პიოტეზა ადრინდელი ექსპერიმენტების (ფოტოელექტრული ეფექტის) შედეგების ასახსნელად. მან აჩვენა, რომ ელექტრომაგნიტური ტალღის არა ამპლიტუდა, არამედ მისი სიხშირის ცვლილებას შეუძლია მოახდინოს ზეგავლენა დასხივების შედეგზე (ელექტრონების გამოსხივებაზე) (სურათი 205ბ). მან აჩვენა, რომ დაბალი სიხშირის სინათლის ფოტონს არ გააჩნია საკმარისი ენერგია ($h\nu$) ელექტრონის მეტალის ატომბირთვთან კავშირის გაწყვეტისათვის; მხოლოდ სინათლის ტალღის სიხშირის (და მაშასადამე, ფოტონის ენერგიის) მომატებამ შეიძლება გამოიწვიოს ელექტრონების ემისია!!!

რაც შეეხება სინათლის წყაროს გამოსხივების ამპლიტუდის (სიკაშკაშის) მომატებას, ამპლიტუდის ზრდა იწვევს მხოლოდ ფოტონების რაოდენობის (და არა მათი ენერგიის) ზრდას და თუ მათი ენერგია (სიხშირე) დაბალია, არც ერთს ცალ-ცალკე და ერთად არ შეუძლია ფოტოელექტრული ეფექტის მოხდენა.

იმ დროს, როდესაც თუნდაც მცირე რაოდენობის (დაბალი ამპლიტუდის), მაგრამ მაღალი სიხშირის ფოტონებს ამის გამოწვევა შეუძლია. ფიქსირებული სიხშირის გამოსხივების ამპლიტუდის ზრდა განაპირობებს შესაბამისი ენერგიის მატარებელი ფოტონების რიცხვის ზრდას, მაგრამ არ განსაზღვრავს მათ უნარიანობას, გამოიწვიოს ელექტრონების ემისია. თუ ფოტონებს გააჩნია საკმარისი ენერგია ელექტრონების ემისიის გამოწვევისათვის, გამოსხივების ამპლიტუდის ზრდასთან ერთად იზრდება ფოტონების რაოდენობა და, მაშასადამე, ელექტრონების ნაკადის ინტენსივობა, ე.ი. ფოტოდენის სიდიდე.

1905 წელს ალბერტ აინშტაინმა ფოტოელექტრული ეფექტის კვლევის დროს დამტკიცა, რომ მეტალის ატომებისაგან ელექტრონების ემისია (გამოსხივება) გამოწვეული უნდა იყოს ნაწილაკის კვანტის, "ფოტონის" ზემოქმედებით; ამ ფოტონების ენერგია გამოსხივების სიხშირის პირდაპირპროპორციულია. გამოსხივების ამპლიტუდა მოცემული სიხშირის ფოტონების მხოლოდ რაოდენობას (ინტენსივობას) განსაზღვრავს და არ ცვლის თითოეული ფოტონის ენერგიას.

თუ ფოტონის ენერგია საკმარისია ატომიდან ელექტრონის ამოგდებისათვის, მოხდება ელექტრონის ემისია (თუ $E_{ფ} = h\nu = E_{გ}$). ხოლო თუ $E_{ფ} = h\nu > E_{გ}$, მაშინ ამოგდებული ელექტრონი იმოძრაავს სიჩქარით, რომელიც მისი კინეტიკური ენერგიით განისაზღვრება ($E_{კ} = \frac{mv^2}{2}$). ამრიგად, ფოტონის ენერგია

$h\nu = A + \frac{mv^2}{2}$. A - ამოსვლის ენერგიას ეწოდებენ და უდრის $E_{გ}$ - ელექტრონის ატომბირთვთან შეკავშირების ენერგიას. მისი მნიშვნელობები დადგენილია თითქმის ყველა ლითონისთვის და მოცემულია ცხრილებში.

აინშტაინი თავისი ექსპერიმენტების საფუძველზე, პლანკისაგან დამოუკიდებლად მივიდა დასკვნამდე ელექტრომაგნიტური გამოსხივების დუალური (ტალღური და კორპუსკულური (corpuscle - ნაწილაკი)) ბუნების შესახებ.

ამგვარად, ფოტოეფექტისათვის საკმარისია მინიმალური ენერგია $E_{ფ} = E_{გ}$

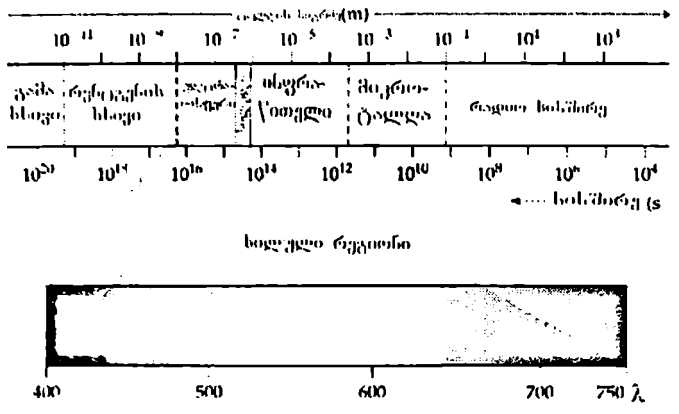
როგორც ვიცით, $E_{ფ} = h\nu = h \frac{c}{\lambda}$; $\lambda = \frac{hc}{E}$ (სადაც $E = E_{ფ}$). ე. ი. λ არის ის მაქსიმალური მნიშვნელობა, რომელსაც ჯერ კიდევ შეუძლია გამოიწვიოს ფოტო-ეფექტი. მას ფოტოეფექტის *წითელ საზღვარს* ეწოდებენ.

ფოტონის ენერგია მისი სიხშირის პროპორციულია და არ იცვლება მთელი მისი არსებობის განმავლობაში, გამოსხივებიდან შთანთქმამდე. 1921 წელს ფოტოელექტრული ეფექტის თეორიული საფუძვლის ახსნისათვის ალბერტ აინშტაინი დაჯილდოვდა ნობელის პრემიით.

სურათზე 207 მოცემულია ელექტრომაგნიტური გამოსხივების სკალა. დაბალი სიხშირის ელექტრომაგნიტური გამოსხივება (რადიოტალღები, ინფრაწითელი გამოსხივება, ხილული სინათლის სპექტრი*) ხასიათდება შედარებით დაბალი ენერგიით (დიდი ტალღის სიგრძით).

ფრო მაღალი სიხშირის ელექტრომაგნიტური გამოსხივების - ულტრა-იისფერი, რენტგენის სხივების და γ -სხივების ენერგია გაცილებით მაღალია

*ხილული სინათლე - ელექტრომაგნიტური გამოსხივების უბანი (ტალღის სიგრძე: 390-750 ნმ; რომლის აღქმა შესაძლებელია ადამიანის თვალით).



სურათი 207
ელექტრომაგნიტური გამოსხივების სკალა

(მოკლე ტალღები).

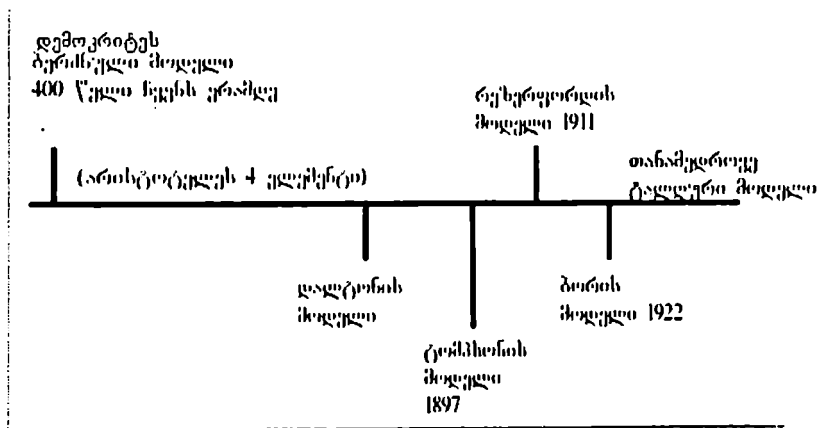
ელექტრომაგნიტური გამოსხივების კორპუსკულური ბუნების პოზიციიდან გასაგებია სხვადასხვა სიხშირის ელექტრომაგნიტური ტალღების ნივთიერებაში გავლისას განსხვავებული ეფექტი.

დაბალი სიხშირის ტალღები (რადიოტალღები, ინფრაწითელი, ხილული სინათლის ტალღები) დაბალი ენერგიის მატარებელი ფოტონებითაა წარმოდგენილი, მათ არ შეუძლია ატომის (ან მოლეკულის) სტრუქტურის დარღვევების (იონიზაციის) გამოწვევა. ამ სიხშირის გამოსხივებას *არამაიონიზირებელი გამოსხივება* ეწოდება.

VIII ატომის და ატომბირთვის სტრუქტურა

VIII.1 ატომის სტრუქტურა

ატომი — მატერიის საბაზისო ერთეულია. კონცეფცია ატომის, როგორც მატერიის განუყოფელი კომპონენტის შესახებ პირველად შემოთავაზებულ იქნა ინდოელი და ბერძენი ფილოსოფოსების მიერ. ტერმინი "ატომი" ბერძნული სიტყვაა, განუყოფელს ნიშნავს. დემოკრიტემ გამოთქვა მოსაზრება, რომ ყველა ნივთიერება შედგება მცირე ზომის, ერთნაირი, მუდმივ მოძრაობაში მყოფი ნაწილაკებისაგან, ატომებისაგან. მაგრამ ეს თეორია იყო იგნორირებული და დავიწყებული დაახლოებით 2000 წლის განმავლობაში. არისტოტელეს მიხედვით მატერია შექმნილია ოთხი ძირითადი ელემენტისაგან (მიწა, წყალი, ჰაერი, ცეცხლი). კონცეფცია მატერიის, როგორც განუყოფელი დისკრეტული ერთობლიობის შესახებ, წარმოიქმნა აბსტრაქტული ფილოსოფიური მსჯელობისა და არა ექსპერიმენტული (ემპირიული) დაკვირვებების საფუძველზე (სურათი 208).

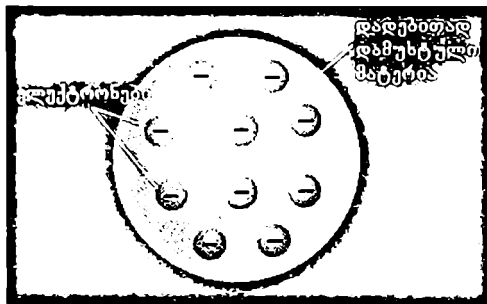


სურათი 208

ატომის სტრუქტურასთან დაკავშირებული შეხედულებების ქრონოლოგიური თანმიმდევრობა

მე-XVII-XVIII საუკუნეებში ქიმიკოსებმა წარმოადგინეს ატომის განუყოფლობის იდეის ფიზიკური დადასტურება (ანეწეს, რომ მოცემული სუბსტანციების გაყოფა შეუძლებელია ქიმიური მეთოდების საშუალებით). 1803 წელს ინგლისელმა მეცნიერმა ჯონ დალტონმა გამოთქვა მოსაზრება, რომ ყოველი ელემენტი შედგება ცალკეული ერთეული უნიკალური ატომებისაგან და ეს ატომები ერთდება სხვადასხვა ქიმიური ნაერთის წარმოქმნით. 1897 წელს ჯ.

ტომასონმა აღმოაჩინა ყველა ნივთიერების ატომის უნივერსალური კომპონენტი, ელექტრონი. ამ აღმოჩენამ დაანგრია იმდროინდელი შეხედულებები ატომზე, როგორც მატერიის განუყოფელ ნაწილაკზე. ტომასონის მოდელის თანახმად, ატომში მცირე ზომის უარყოფითად დამუხტული ელექტრონები განაწილებულია დადებითად დამუხტულ არეში. ეს მოდელი ცნობილია „ქიშმიშიანი ფუნთუშის“ სახელწოდებით (სურათი 209).



სურათი 209

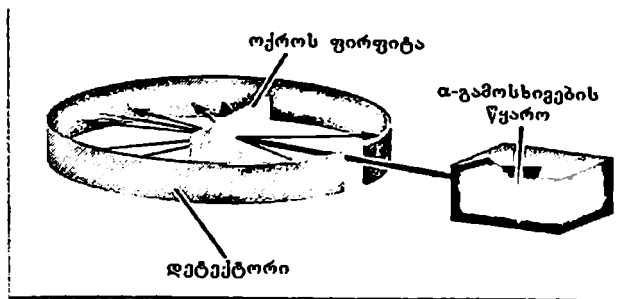
ტომასონის ატომური მოდელი („ქიშმიშიანი ფუნთუშის“ მოდელი)

მე-XIX საუკუნის ბოლოს და მე-XX საუკუნის დასაწყისში ფიზიკოსებმა დაადგინეს ატომის სტრუქტურა, აღმოაჩინეს სუბატომური კომპონენტები. 1909 წელს ერნესტ რეზერფორდმა თხელი ოქროს ფოლგის (2000 ატომის სისქით) ალფა ნაწილაკებით ბომბარდირების საშუალებით აჩვენა, რომ ამ ნაწილაკების უმრავლესობა დაუბრკოლებლად გადის ფოლგაში და მხოლოდ მცირე წილი (ერთი რვა ათასიდან) გადაიხრება წრფივი ტრაექტორიიდან უფრო დიდი კუთხით, ვიდრე ეს წინასწარ იყო განსაზღვრული ტომასონის მოდელის საფუძველზე (სურათი 209).

ექსპერიმენტის შედეგებმა დაამხსვრია ტომასონის ატომის მოდელის პოზიციები. რეზერფორდისეული ინტერპრეტაციის თანახმად, ოქროს მძიმე ატომის დადებითი მუხტი და მისი ძირითადი მასა არ არის განაწილებული ატომის მთელ მოცულობაში, არამედ კონცენტრირებულია ატომის ცენტრში (ბირთვში), ხოლო ელექტრონები განაწილებულია ბირთვის გარშემო (ატომის რეზერფორდის მოდელი).

ამიტომ ოქროს ფოლგის ალფა ნაწილაკებით ბომბარდირებისას ამ დადებითად დამუხტული ნაწილაკების მხოლოდ მცირე ნაწილი (რომლებიც უშუალოდ ურთიერთქმედებდნენ ატომის დადებითად დამუხტულ ბირთვთან) ბრუნდება უკან, დანარჩენი კი დაუბრკოლებლად გადის ოქროს ფოლგაში, ან გადაიხრება წრფივი ტრაექტორიიდან მცირე კუთხით (ელექტრონებთან ურთიერთქმედების შედეგად) (სურათი 210).

* შემაღალი კინეტიკური ენერგიის მქონე დადებითად დამუხტული α -კვლეუმის ატომბირთვი, გამოსხივებული რადიუმის რადიოაქტიური იზოტოპის მიერ (აღმოაჩინა მარია კიურიმ 1898 წ.).



სურათი 210
რეზერფორდის ექსპერიმენტის სქემა

რეზერფორდის ატომის მოდელის ძირითადი პოსტულატებია:

- ატომის მასა და დადებითი მუხტი კონცენტრირებულია მცირე მოცულობაში (ბირთვში).

- ატომი ელექტრულად ნეიტრალურია; ატომბირთვის დადებითი მუხტი დაბალანსებულია გარემომცველი ელექტრონების უარყოფითი მუხტით; ბირთვის ელექტრული მუხტი დისკრეტულია (ელექტრონის მუხტის ($e = 1,6 \times 10^{-19}$ კულონი) მთელი ჯერადია).

- ატომბირთვის გარშემო მოძრაობს ელექტრონები, ელექტრონების რაოდენობა ატომბირთვში პროტონების რაოდენობის ტოლია; ელექტრონების მასა ატომბირთვის მასაზე ბევრად მცირეა.

ატომის რეზერფორდის მოდელი შეიძლება შევადაროთ მზის პლანეტარულ სისტემას (ბირთვი როგორც მზე, ხოლო ელექტრონები – პლანეტები). მაგრამ მზის სისტემასთან განსხვავებით ატომის ელექტრონებს გააჩნია მათ მასასთან

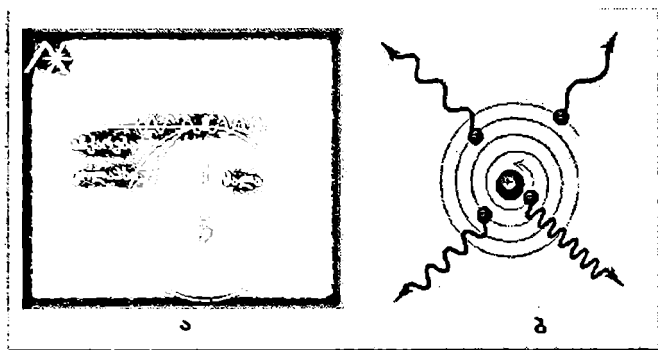
შედარებით საკმაოდ დიდი ფარდობითი მუხტი ($\frac{e}{m} = 1,759 \times 10^{17} \frac{კ}{კგ}$). კლასიკური

ფიზიკის შეხედულებების თანახმად, ელექტრონი, რომელიც ბრუნავს წრიულ ორბიტაზე ბირთვის გარშემო და, მაშასადამე, რომლის მოძრაობაც აჩქარებულია, თავისი მუხტის გამო უნდა გამოასხივებდეს ელექტრომაგნიტურ ენერგიას. ე.ი. რეზერფორდის კლასიკური მოდელის მიხედვით, ელექტრონი მუდმივად კარგავს ენერგიას, რის შედეგადაც მისი ორბიტის რადიუსი თანდათან შემცირდება და ელექტრონი დაეცემა (კოლაფსი) ძალიან მცირე ზომის ბირთვზე (ატომის ზომები შემცირდება) (სურათი 211). ე.ი. ატომი შეწყვეტს არსებობას. ატომი მდგრადი სისტემაა, ხოლო მისი რადიუსი მუდმივია (10^{-8} ჯერ აღემატება ბირთვის რადიუსს), ეს კლასიკური სურათი ატომის კოლაფსის შესახებ სწორი არ არის!

ამრიგად, ცდის საფუძველზე მიღებულ ატომის რეზერფორდის მოდელთან წინააღმდეგობაში აღმოჩნდა კლასიკური ფიზიკის შეხედულებები.

ამ დროისთვის უკვე ცნობილი იყო თეორია ელექტრომაგნიტური გამოსხივების დუალური ბუნების (ტალღური და კორპუსკულური) შესახებ. მაქს

პლანკის და ალბერტ აინშტაინის შრომები, რომელთა მიხედვითაც ელექტრომაგნიტური ენერგიის ნებისმიერი წყარო გამოასხივებს ენერგიის დისკრეტულ პორციებს, ფოტონებს, $E = h\nu$ ენერგიით, სადაც ν – გამოსხივების სიხშირეა, h – პლანკის მუდმივა. გავრცელების დროს იგი ავლენს ტალღის თვისებებს (იხილე ქვემოთ, ფოტოელექტრული ეფექტი).



სურათი 211

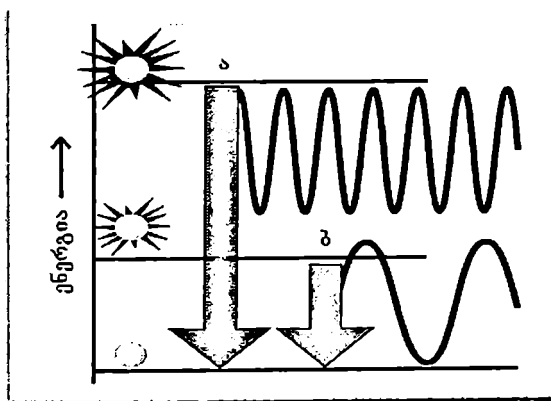
რეზერფორდის ატომის პლანეტური მოდელი და წინააღმდეგობები კლასიკური ფიზიკის შეხედულებით: ა – ელექტრონზე მოქმედებს პროტონი ცენტრისკენული ძალით და ანიჭებს ცენტრისკენულ აჩქარებას. აჩქარებულად მოძრაობა მუხტმა (ელექტრონმა) უნდა გამოასხივოს ელექტრომაგნიტური ტალღა, შესაბამისად დაკარგოს ენერგია, რაც საბოლოოდ მისი ბირთვზე დაცემით (კოლაფსი) უნდა დამთავრდეს. ბ – ელექტრონი ენერგიის დაკარგვის კვალობაზე თანდათანობით უახლოვდება ბირთვს, იზრდება (უწყვეტად!) ტალღის სიხშირე. (რეალურად არც ა-ზე და არც ბ-ზე ასახული მოვლენები არ ხდება).

ატომის მოდელის განვითარების შემდეგი ეტაპი დაკავშირებულია ნილს ბორის სახელთან.



ნილს ბორი

1913 წელს ნილს ბორმა გამოთქვა მოსაზრება, რომ ელექტრონები განლაგებულია ატომბირთვის გარშემო განსაზღვრულ დისკრეტულ ორბიტებზე, მათ შეუძლია გადასვლა ერთი ორბიტიდან მეორეზე მხოლოდ ენერგიის პორციის (კვანტის) გამოსხივების (უფრო დაბალ ორბიტაზე გადასვლისას (სურათი 212)) ან შთანთქმის (უფრო მაღალ ორბიტაზე გადასვლისას) შედეგად. ნილს ბორი 1922 წელს დაჯილდოვდა ნობელის პრემიით ატომის სტრუქტურისა და მისი გამოსხივების კანონზომიერების აღმოჩენისათვის.



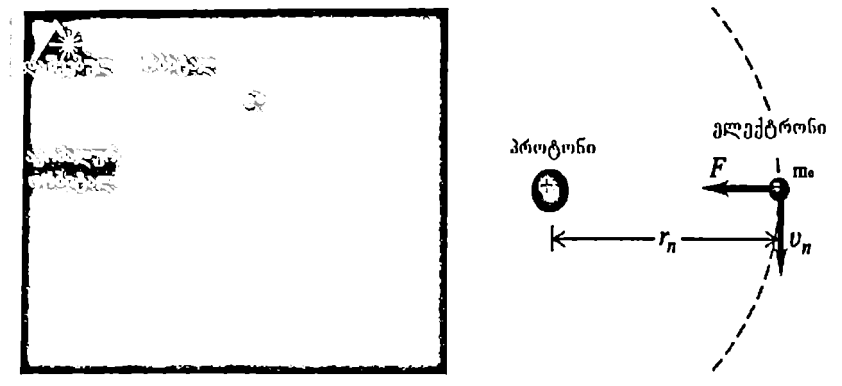
სურათი 212

ბორის ელექტრონული ორბიტალებიდან დაბალ ორბიტაზე გადასვლის დროს გამოსხივების სიხშირეები განსხვავებულია, მაგრამ მკაცრად განსაზღვრული.

ნილს ბორმა წარმოადგინა ატომის პირველი კვანტური მოდელი. ამ მოდელში შენარჩუნებულია რეზერფორდის ატომის მოდელის სტრუქტურა კლასიკური ფიზიკის ელემენტები (ელექტროსტატიკური ძალები ბირთვსა და ელექტრონს შორის, წრიულ ორბიტაზე მოძრაე ელექტრონზე მოქმედი ცენტრისკენული ძალა და ელექტრონების ფიქსირებული მდებარეობა ატომში), მაგრამ შემოტანილია კვანტური თეორიის ელემენტი ელექტრონის იმპულსის ორბიტალური მომენტის დისკრეტული (h -ის ჯერადი) მნიშვნელობების შესახებ. ბორის თეორიის მიხედვით ატომის პლანეტურ სისტემაში ელექტრონები მასით m_e და მუხტით $-e$ მოძრაობს წრიულ სტაციონარულ (მუდმივ) დისკრეტულ ორბიტაზე V სიჩქარით მცირე ზომის, მძიმე, დადებითად დამუხტული $(+Ze)$ ატომბირთვის გარშემო (სურათი 213). ყოველივე ეს ჩამოყალიბებულია პოსტულატების სახით.

ბორის პოსტულატები:

1. ატომი შეიძლება იმყოფებოდეს მხოლოდ განსაზღვრულ სტაციონარულ მდგომარეობებში; თითოეულ სტაციონარულ მდგომარეობას შეესაბამება განსაზღვრული ენერგია; სტაციონარულ მდგომარეობაში ატომი არ გამოასხივებს ენერგიას.



სურათი 213

ატომის მოდელი ბორის მიხედვით. მარჯვნივ – წყალბადის ატომი; m_e – ელექტრონის მასა

II. ატომი შთანთქავს და გამოასხივებს ენერგიას მხოლოდ ერთი სტაციონარული მდგომარეობიდან მეორეში გადასვლისას. ამ დროს უნდა შესრულდეს შემდეგი პირობა: გამოსხივებული ენერგია ორი სტაციონარული მდგომარეობის ენერგიის სხვაობის ტოლია:

$$\Delta E = E_{n_2} - E_{n_1}$$

სადაც n_1 და n_2 კვანტური რიცხვებია (იხილეთ ქვემოთ).

$$\Delta E = h\nu = h\omega, \text{ (} h \text{ ხაზიანი " } h = \frac{h}{2\pi} \text{)}$$

სადაც ν - გამოსხივების სიხშირეა, h - პლანკის მუდმივა ($h = 6,625 \times 10^{-34}$ ჯ · წმ).

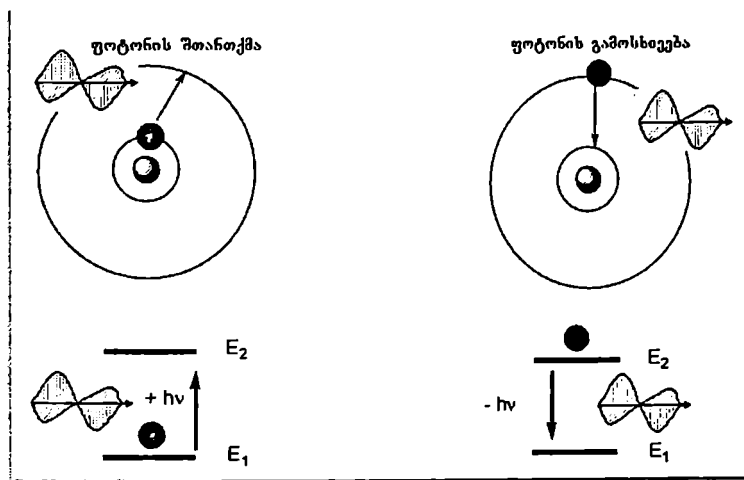
III. სტაციონარულ ორბიტაზე მოძრავე ელექტრონის ორბიტალური მომენტი უნდა იყოს პლანკის მუდმივას ჯერადი :

$$m_e v r = n h \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

სადაც m_e – ელექტრონის მასაა, v – ორბიტაზე მოძრაობის სიჩქარე, r – ორბიტის რადიუსი.

ბორის ატომის მოდელის უდიდესი მნიშვნელობა მდგომარეობს ელექტრონების ენერგიების დისკრეტულობის ცნების შემოტანაში. ბორის

მოდელის თანახმად, ელექტრონი ერთი სტაბილური ენერგეტიკული დონიდან მეორეზე გადასვლისას გამოასხივებს ან შთანთქმავს ფოტონს (სურათი 213, 214); ფოტონების ენერგია დისკრეტულია. ეს იმას ნიშნავს, რომ როდესაც აგზნებული ატომი უბრუნდება სტაციონარულ მდგომარეობას, გამოსხივდება ენერგიის კვანტი, ფოტონი, მკაცრად განსაზღვრული სიხშირის.



სურათი 214
ატომის მიერ ენერგიის შთანთქმა და გამოსხივება

ბორის თეორიის მიხედვით ატომის ელექტრონის სრული ენერგია ორბიტალზე დადებითი კინეტიკური ენერგიისა და უარყოფითი პოტენციური ენერგიის (რომელიც ელექტრონსა და ატომბირთვს შორის მანძილის უკუპროპორციულია) ჯამის ტოლია. ეს მინიმალური ენერგია, რომელიც აუცილებელია ელექტრონის ატომიდან ამოგდებისათვის. ამრიგად, n -ურ ორბიტალზე ელექტრონის სრული ენერგია ტოლია:

$$E_n = E_j + E_p$$

$$E_n = \frac{mV^2}{2} + \frac{-Ze^2}{r_0}$$

ან გარდაქმნების შედეგად მივიღებთ:

$$E_n = \frac{-mZ^2e^4}{2n^2h^2} \quad (\text{VII.1.1})$$

სადაც e - ელექტრონის მუხტია, Z - ატომის რიგითი ნომერი, r_0 - ორბიტალის რადიუსი.

ამ გამოსახულებიდან გამომდინარეობს, რომ ელექტრონის ჯამური ენერგია უარყოფითია. ელექტრონის ატომის ორბიტალიდან განთავისუფლებისათვის მას უნდა გადაეცეს დამატებითი ენერგია. მაგალითად, წყალბადის ატომის იონიზაციისათვის საჭირო ენერგია $+13.6$ ევ (ელექტრონვოლტი). როდესაც ელექტრონის ენერგია უახლოვდება ნულს ($n \rightarrow \infty$), ენერგეტიკულ დონეებს შორის გადასვლის ენერგია (ΔE) ძალიან მცირდება.

ბორის თეორიის თანახმად, ატომის რიგითი ნომრის (Z) ზრდასთან ერთად (Li, C, O, He და სხვ.) ელექტრონების ენერგია ხდება უფრო უარყოფითი (განტოლება VII.1.1); მაშასადამე, ელექტრონების კავშირი მძიმე ატომბირთვთან უფრო ძლიერდება.

ელექტრონის ორ სტაციონარულ დონეს შორის გადასვლისას გამოსხივებული (ან შთანთქმული) ფოტონის ენერგია ამ ენერგეტიკული დონეების პოტენციური ენერგიის სხვაობით განისაზღვრება. გამოსხივებული ფოტონის ენერგია მისი სიხშირის პირდაპირპროპორციულია.

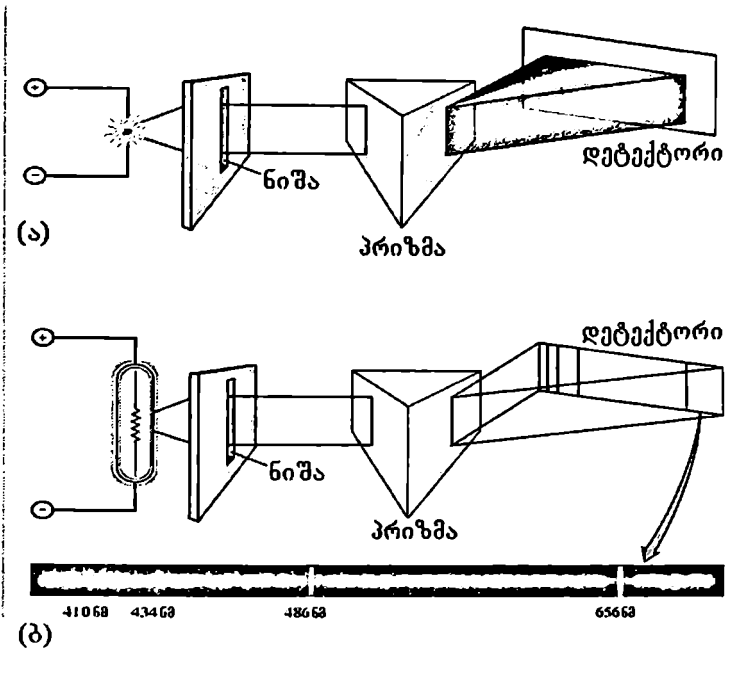
ბორის ატომის მოდელი წარმოადგენს პირველ მცდელობას სხვადასხვა ატომის გამოსხივების სპექტრების სიხშირეების გამოანგარიშებისათვის.

როდესაც უწყვეტი ელექტრომაგნიტური ენერგიის სპექტრი (თეთრი სინათლე) გადის აირში (წყალბადის აირში) ან პლაზმაში, ხდება ფოტონების შთანთქმა ელექტრონების მიერ, რაც აიძულებს ელექტრონს, შეცვალოს თავისი ენერგეტიკული დონე. აგზნებული ელექტრონი სპონტანურად გამოასხივებს ენერგიას (განსაზღვრული სიხშირის ფოტონს) და უბრუნდება დაბალ ენერგეტიკულ დონეს. მაშასადამე, ატომი ასრულებს ფილტრის როლს და წარმოქმნის მუქი აბსორბციული ხაზების (და/ან სხვადასხვა ფერის - სიხშირის გამოსხივების ხაზების) სერიას (სურათი 215ა, ბ).

თითოეული ელემენტი საკუთარი *გამოსხივების ელექტრომაგნიტური სპექტრით ხასიათდება*; გამოსხივების სპექტრი დამოკიდებულია მისი ბირთვის მუხტზე, ელექტრონების ენერგეტიკული დონეების სტრუქტურაზე და სხვა ფაქტორებზე, რაც გამოსხივების სპექტრში განსაზღვრული სპექტრული ხაზების ერთობლიობას წარმოქმნის.

მოცემული ატომის გამოსხივების ელექტრომაგნიტური სპექტრი შედგება განსაზღვრული დისკრეტული სიხშირეების ხაზებისაგან, იგი ასახავს ატომის ელექტრონულ სტრუქტურას და მკაცრად განსხვავებულია თითოეული ელემენტისათვის. ბორის ატომის მოდელის საფუძველზე პირველად გამოითვალეს წყალბადის ატომის მიერ გამოსხივებული ენერგიის კვანტის სიხშირე.

ბორის ატომის მოდელს, მისი პროგრესული მნიშვნელობის მიუხედავად, გარკვეული ნაკლოვანებები გააჩნია. ამ მოდელში ელექტრონების ორბიტალების რადიუსის და ენერგიების გამოთვლის დროს ბორმა გამოიყენა კლასიკური მექანიკის კანონები და არ გაითვალისწინა ურთიერთქმედება თვით ორბიტალურ ელექტრონებს შორის, რომელსაც მნიშვნელოვანი წვლილი შეაქვს (განსაკუთრებით) მრავალელექტრონიანი ატომების სტრუქტურაში. ამიტომ ბორის ატომის თეორია გამართლდა წყალბადის, მაგრამ არ გამოდგა სხვა მრავალელექტრონიანი ატომებისთვის.



სურთი 215

წყალბადის ატომის გამოსხივების სპექტრი

ა - თეთრი სინათლის დისპერსია (სხედასხვა ტალღის სიგრძის მქონე ფერად კომპონენტებად დაშლა) პრიზმაში; ფირზე ასახულია ხილული სინათლის უწყვეტი სპექტრი. ბ - თეთრი სინათლის დისპერსია წყალბადის აირში გასვლის შემდეგ (ფირზე ჩანს წყალბადის გამოსხივების (თეთრი ხაზები) და შთანთქმის (მუქი ხაზები) სპექტრი

VII.2 ატომის თანამედროვე კვანტურ-მექანიკური მოდელი

შემდგომში მნიშვნელოვანი სიტყვა თეორიაში ატომის სტრუქტურის შესახებ ეკუთვნის *კვანტურ მექანიკას*. კვანტური მექანიკა ეფუძნება თეორიას ატომის დისკრეტული ბუნებისა და სინათლის ფოტონებისა და ელექტრონების დუალური ტალღურ-კორპუსკულური ბუნების შესახებ.

ელექტრონები ატომებში მიიზიდება ბირთვების მიერ ელექტრომაგნიტური ძალებით. ეს ძალები უზრუნველყოფს ელექტრონების სტაბილიზაციას ელექტროსტატიკური პოტენციალის საზღვრებში მცირე ზომის ბირთვების შემთხვევაში, რაც იმას ნიშნავს, რომ ატომიდან ელექტრონის

განთავისუფლებისათვის საჭიროა დამატებითი ენერგია. რაც უფრო ახლოა ელექტრონი ბირთვთან, მით უფრო ძლიერია მიზიდულობის ძალა.

1924 წელს ლუი დე ბროილმა აინშტაინისა და პლანკის განტოლებების გამოყენებით აჩვენა, რომ მცირე ზომის (ელემენტარულ) ნაწილაკებს გააჩნია როგორც კორპუსკულური, ასევე ტალღური თვისებები; მათი შესაბამისი ტალღის სიგრძე:

$$\lambda = \frac{h}{mv}, \quad (\text{VII.2.1})$$

სადაც mv – ნაწილაკის იმპულსის მომენტი, λ – ტალღის სიგრძე.



ერნესტ შრედინგერი
1887 - 1961



ვერნერ ჰეიზენბერგი
1901 - 1976

1926 წელს ერვინ შრედინგერმა გამოიყენა ლუი დე ბროილის იდეა ატომური ნაწილაკების ტალღური თვისებების შესახებ და გამოთქვა მოსაზრება ელექტრონის, სხვა ელემენტარული ნაწილაკების მსგავსად, დუალური – ტალღური და კორპუსკულური თვისებების შესახებ. მან აღწერა ელექტრონი სამგანზომილებიანი ტალღის (ელექტრონული ღრუბლის), და არა წერტილოვანი ნაწილაკის სახით. ელექტრონული ღრუბელი იმ პოტენციური ველის მონაკვეთია, სადაც თითოეული ელექტრონი სამგანზომილებიან მდგარ ტალღას* წარმოქმნის.

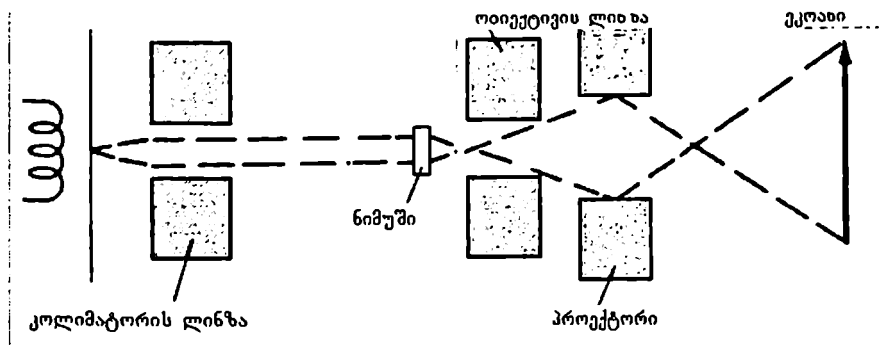
ეს მდგომარეობა განისაზღვრება ატომური ორბიტალით (მათემატიკური ფუნქცია, რომელიც განსაზღვრავს მოცემულ წერტილში ელექტრონის მდებარეობის ალბათობას). ორბიტალების დისკრეტული ქსელი, რომელიც არსებობს ატომბირთვის გარშემო, - წარმოქმნის მეტად სტაბილურ სტრუქტურას. ორბიტალები განსხვავდება ერთი მეორისაგან ზომის, ფორმის და ორიენტაციის მიხედვით.

დე ბროილის და შრედინგერის პიპოთეზა ელექტრონის დუალური თვისებების შესახებ დამტკიცდა ექსპერიმენტებში, რომლებმაც ელექტრონი კრისტალებში

*მდგარი ტალღა - ტალღის ნაირსახეობა, რომელიც არ მოძრაობს ბირთვის მიმართ)

გატარების დროს ავლენდა ტალღების დიფრაქციის მსგავს თვისებებს. ელექტრონის ტალღური თვისებები გამოიყენება ელექტრონულ მიკროსკოპიაში.

ელექტრონული მიკროსკოპის მუშაობის სქემა. გახურებული წყაროს მიერ გამოსხივებული ელექტრონი განიცდის აჩქარებას ვაკუუმურ კამერაში, მისი მოძრაობის მიმართულება კი რეგულირდება ელექტრული და მაგნიტური ველების საშუალებით, რომლებიც ასრულებენ ელექტრონისათვის გზამკვლევი ლინზების როლს. დიდი სიჩქარით მოძრავე ელექტრონი გამოსახივებს მაღალი სიხშირის ელექტრომაგნიტურ ენერგიას ტალღის სიგრძით $< 10^{-10}$ მ (1 ანგსტრემი - 1Å). ფოკუსირებული ელექტრონების მოკლეტალღოვანი ენერგიის გამოსხივების უნარი წარმოადგენს ელექტრონული მიკროსკოპების საფუძველს. ელექტრონული ნაკადი ფოკუსირდება გამოსაკვლევი ობიექტის თხელ ანათაღში, სადაც ელექტრონები განიცდის დიფრაქციას. ელექტრონული მოკლეტალღოვანი გამოსხივება მგრძნობიარეა გაცილებით უფრო მცირე ზომის სტრუქტურების მიმართ, ვიდრე ხილული დიაპაზონის გამოსხივება; აღნიშნული განაპირობებს ელექტრონული მიკროსკოპის მაღალი რეზოლუციის უნარიანობას. შემდეგ გამავალი ელექტრონები ფოკუსირდება იბიექტივის ლინზების საშუალებით და წარმოქმნის გამოსახულებას ფლუოროესცენტულ ეკრანზე (სურათი 216).



სურათი 216
ელექტრონული მიკროსკოპის სქემა

ელექტრონული მიკროსკოპის საშუალებით შესაძლებელი ხდება შევისწავლოთ 1000-ჯერ უფრომცირე ზომის ობიექტები. ვიდრე ეს სინათლის მიკროსკოპითაა შესაძლებელი (იხილეთ ქვემოთ)

ამ პრინციპის თანახმად, ერთდროულად შეუძლებელია განესაზღვროთ ელექტრონის მდებარეობა (კოორდინატი x) და მისი იმპულსი mv ; ჩვენ ვიცით ელექტრონის იმპულსი (და შესაბამისად, ენერგია), მაგრამ არ ვიცით მისი ზუსტი მდებარეობა (ელექტრონულ ღრუბელს არ გააჩნია ზუსტი საზღვრები):

$$\Delta x \Delta(mv) \geq \frac{h}{2\pi}$$

სადაც x - ელექტრონის კოორდინატი, mv - იმპულსი, $h = \frac{h}{2\pi}$, h - პლანკის მუდმივა.

რეალურ მაკროსამყაროში ჩვენ შეგვიძლია განვსაზღვროთ სხეულის მდებარეობის ზუსტი კოორდინატები (ცდომილება დამოკიდებულია გაზომვი ხელსაწყოების სიზუსტეზე: რაც უფრო მცირეა ცდომილება, მით ნაკლებია განუსაზღვრელობა). რეალურ მაკროსამყაროს სივრცეში სხეულის მდებარეობისა და სიჩქარის გაზომვისას ჩვენ პრაქტიკულად არ ემოქმედებთ მასზე და იდეალურ შემთხვევაში შეგვიძლია ერთდროულად, აბსოლუტურად ზუსტად (ნულოვანი განუსაზღვრელობით) განვსაზღვროთ ობიექტის სიჩქარე და კოორდინატები. მიკროსამყაროში, სადაც მოქმედებს კვანტური კანონები, ნებისმიერი გაზომვა ზემოქმედებას ახდენს სისტემაზე, თვით გაზომვის (მაგალითად, სხეულის მდებარეობის გაზომვის) ჩატარების ფაქტი იწვევს მისი სიჩქარის არაპროგნოზირებად შეცვლას (და პირიქით).

სინამდვილეში განუსაზღვრელობის პრინციპი აკავშირებს არა მხოლოდ სივრცულ კოორდინატებს და სიჩქარეს; განუსაზღვრელობა ერთნაირად აკავშირებს მიკრონაწილაკების სხვა მახასიათებლების ურთიერთდაკავშირებულ წყვილებსაც. მსგავსი მსჯელობის საფუძველზე მიიღება დასკვნა, რომ შეუძლებელია ზუსტად გავზომოთ კვანტური სისტემის ენერგია და განვსაზღვროთ დროის მომენტი, რომ მას ეს ენერგია გააჩნდა. ანუ, თუ ჩვენ გავზომავთ კვანტურ სისტემას, რათა დაეადგინოთ მისი ენერგია, ამ გაზომვას სჭირდება დროის გარკვეული მონაკვეთი (Δt). ამ პერიოდის განმავლობაში სისტემის ენერგია შემთხვევითი წესით მერყეობს - განიცდის ფლუქტუაციას - და მისი იდენტიფიცირება ჩვენ არ შეგვიძლია. თუ ენერგიის ფლუქტუაციის ცდომილებას აღვნიშნავთ ΔE , კვანტური ნაწილაკისათვის მივიღებთ დამოკიდებულებას E -სა და დროის განუსაზღვრელობას შორის:

$$t \Delta E \geq h, \quad (\text{VII.2.2})$$

პაისენბერგის განუსაზღვრელობის პრინციპის საფუძველზე შესაძლებელი გახდა დიდი ზომის ატომში მიმდინარე პროცესების ასხნა.

კვანტური თეორიის თანახმად, ელექტრონის ენერგია და მდებარეობა (ანუ ორბიტალი) განიხილება ტალღური ფუნქციის ψ სახით; ტალღური ფუნქცია ψ^2 ასახავს ელექტრონის მდებარეობის ალბათობას.

ელექტრონული ორბიტალი ხასიათდება კვანტური რიცხვების საშუალებით. თითოეული ორბიტალი ხასიათდება 3 კვანტური რიცხვით - მთავარი კვანტური რიცხვი (n), ორბიტალური კვანტური რიცხვი (l) და მაგნიტური კვანტური რიცხვი (m) (ცხრილი 23, 24). ძირითადი კვანტური რიცხვების გარდა შემოიღებულია სპინური კვანტური რიცხვი (s), რომელიც განსაზღვრავს ელექტრონის ბრუნვას საკუთარი ღერძის გარშემო (სათვის ისრის ან საწინააღმდეგო მიმართულებით).

n - მთავარი კვანტური რიცხვი, განსაზღვრავს ენერგეტიკული დონის ზომას და ენერგიას; $n = 1, 2, 3, 4, \dots, 7$, ვინაიდან მენდელეევის პერიოდულ სისტემაში 7 პერიოდია. შესაბამისი ენერგეტიკული დონეებია K, L, M, N, O, P, Q (სურათი 217).

ცხრილი 23
კვანტური რიცხვები

კვანტური რიცხვი	სიმბოლო	მნიშვნელობა	განსაზღვრავს
მთავარი	N	1,2,3,4,...	დონის ზომა და ენერგია
ორბიტალური	L	0,1,2,...(n-1)	ორბიტალის ფორმა
მაგნიტური	M	-1,...,0,...,+1	ერთი და იმავე L -ის მქონე ორბიტალების ურთიერთ-ორიენტაცია
სპინური	S	+1/2 ან -1/2	სპინის მიმართულება

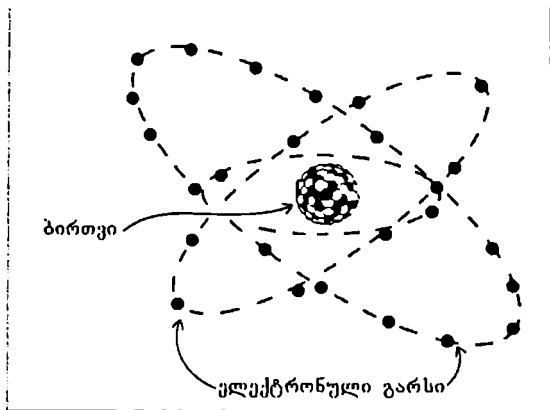
ცხრილი 24
ორბიტალები და კვანტური რიცხვები

n	L შესაძლო მნიშვნელობები	ორბიტა- ლების აღნიშვნა	m -ის შესაძლო მნიშვნელობები	სუბორბიტა- ლების რიცხვი ორბიტალზე	დონეზე სუბორბიტა- ლების საერთო რიცხვი
1	0	1S	0	1	1
2	0	2S	0	2	4
	1	2p	-1, 0, +1	3	
3	0	3S	0	1	
	1	3p	-1, 0, +1	3	
	2	3d	-2, -1, 0, +1, +2	5	9
4	0	4S	0	1	
	1	4p	-1, 0, +1	3	
	2	4d	-2, -1, 0, +1, +2	5	
	3	4f	-3, -2, -1, 0, +1, +2, 3	7	16

l - ორბიტალური კვანტური რიცხვი განსაზღვრავს ორბიტალების ფორმას (სივრცეში მუხტის გადანაწილების სიმკვრივეს); მისი მნიშვნელობა დამოკიდებულია n -ზე ($l = 0, 1, 2, 3, \dots (n-1)$), არჩევენ s, p, d, f და ა.შ. ორბიტალებს (სურათი 218).

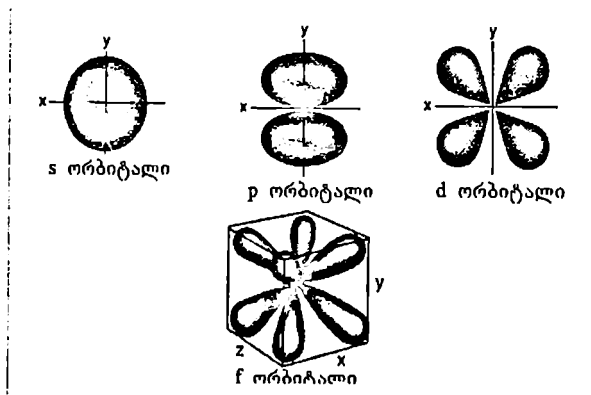
ეს იმას ნიშნავს, რომ თუ $n = 1, l = 0$, ამ ორბიტალს უწოდებენ s -ორბიტალს. s -ელექტრონების ორბიტალი - სფერული ორბიტალი. როდესაც $n = 2, l = 0$, ამ

ორბიტალს უწოდებენ p -ორბიტალს; p ორბიტალები - არასფერულია, მას გააჩნია ორი კვანძი გაყოფილი ბირთვით; p -ორბიტალები განლაგებულია $x y z$ კოორდინატთა სისტემის ღერძების მიმართულებით. როდესაც $n = 3, l = 0, 1, 2$, ამ ორბიტალს უწოდებენ d -ორბიტალს. d -ორბიტალს გააჩნია 2 განსხვავებული ძირითადი ფორმა. როდესაც $n = 3, l = 0, 1, 2, 3$, ამ ორბიტალს უწოდებენ f -ორბიტალს და ა. შ..



სურათი 217

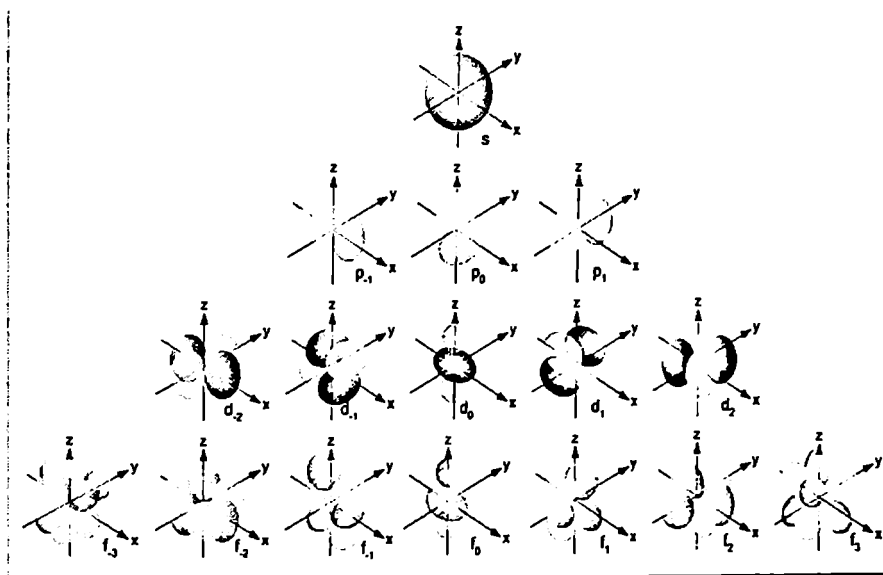
ატომის ელექტრონული ენერგეტიკული დონეები $K, L, M, \dots$



სურათი 218

l - ორბიტალური კვანტური რიცხვი (კუთხური მომენტი), განსაზღვრავს ორბიტალების ფორმას (სივრცეში მუხტის გადანაწილების სიმკვრივეს)

მაგნიტური კვანტური რიცხვი - m განსაზღვრავს ორბიტალის სივრცულ (3D) ორიენტაციას (სურათი 219) ($m = -l, \dots, 0, \dots, +l$; $-l < m_l < +l$). მაგალითად, თუ $n = 2$ და $l = 0, 1$, $m = -2, -1, 0, +1, +2$.



სურათი 219

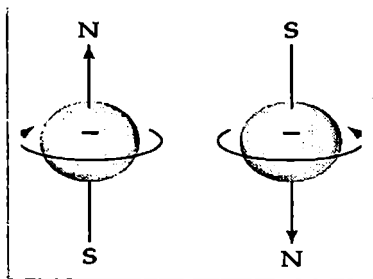
m -მაგნიტური კვანტური რიცხვი განსაზღვრავს ორბიტალის ორიენტაციას

ელექტრონის სპინური* კვანტური რიცხვი - s განსაზღვრავს ელექტრონის ბრუნვის მიმართულებას საკუთარი ღერძის გარშემო (საათის ისრის მიმართულებით ან საწინააღმდეგოდ): $s = +\frac{1}{2}$; $s = -\frac{1}{2}$ (სურათი 220). ელექტრონის ენერგია არ არის დამოკიდებული სპინური კვანტური რიცხვის მნიშვნელობაზე. თუ სისტემაზე არ მოქმედებს გარეთა მაგნიტური ველი. ორბიტალის ენერგია განისაზღვრება მთავარი კვანტური რიცხვის n -ის მნიშვნელობით. ტალღურ ფუნქციას, რომელიც აღწერს ელექტრონის სტაციონარულ მდგომარეობას, უწოდებენ ორბიტალურს. თუ ორბიტალების n მნიშვნელობები ტოლია, მათ გააჩნია ერთი და იგივე ენერგია.

ყალბადის ატომის სფერული ორბიტალისათვის $l = 0$; $m = 0$. ასეთი ელექტრონული ღრუბელი ცნობილია s -ორბიტალის სახელწოდებით. არსანიშნა-

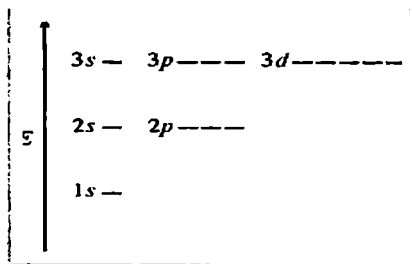
*ღერძის გარშემო ბრუნვის შედეგად ელექტრონს გააჩნია საკუთარი მექანიკური მომენტი, რომელსაც სპინს უწოდებენ. სპინის არსებობით აიხსნება თანამედროვე ფიზიკის ბევრი მოვლენა, მათ შორის ნიუთონებთანა მაგნიტური თვისებები (პარა- და ფერომაგნეტიზმი).

ვია. სპინური კვანტური რიცხვი არ მოქმედებს ორბიტალის ფორმასა და ზომაზე. წყალბადის ატომის ერთადერთი ელექტრონი განლაგებულია ყველაზე დაბალ (ძირითად) ენერგეტიკულ დონეზე. თუ სისტემას მივაწოდებთ ენერგიას, ელექტრონი გადავა უფრო მაღალ, აღზნებულ ენერგეტიკულ ორბიტალზე (სურათი 221).



სურათი 220

სპინური კვანტური რიცხვი განსაზღვრავს ელექტრონის ბრუნვის მიმართულებას საკუთარი ღერძის გარშემო



სურათი 221

ორბიტალური ენერგეტიკული დონეები წყალბადის ატომისათვის

განვიხილოთ კიდევ ორი წესი, რომელიც განსაზღვრავს ატომში ელექტრონების განლაგების კანონზომიერებას: პაულის პრინციპი და ჰუნდის წესი.

პაულის გამორიცხვის პრინციპი.

ატომში არ შეიძლება იმყოფებოდეს ორი ელექტრონი ერთსა და იმავე კვანტურ მდგომარეობაში. ან ორ ელექტრონს ატომში არ შეიძლება ჰქონდეს ერთნაირი კვანტური რიცხვები (n, l, m, s).

ეს ნიშნავს, რომ თუ ორი ელექტრონი ერთსა და იმავე მომენტში მდებარეობს ერთსა და იმავე ადგილას (ერთსა და იმავე ენერგეტიკულ დონეზე, სუბდონესა

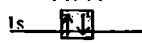
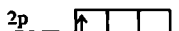
და ორბიტალზე), ისინი განიზიდება (სპინური კვანტური რიცხვი განსხვავებულია). ანუ, თითო ორბიტალზე შეიძლება იყოს მხოლოდ ორი ელექტრონი ანტიპარალელური (დაწყვილებული) სპინებით (სურათი 222).



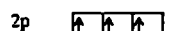
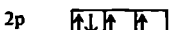
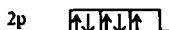
ვოლფგანგ პაული
(1900 – 1958)



ფრედრიკ ქუნდი
(1896-1997)

1 H 1s¹ $\text{He } 1s^2$  $\text{Li } 1s^2 2s^1, [\text{He}] 2s^1$ 
$$\text{Be } 1s^2 2s^2, [\text{He}]2s^2$$


B $1s^2 2s^2 2p^1$, [He] $2s^2 2p^1$


$$\text{C } 1s^2 2s^2 2p^2, [\text{He}] 2s^2 2p^2$$

$$\text{N } 1s^2 2s^2 2p^3, [\text{He}] 2s^2 2p^3$$

$$\text{O } 1s^2 2s^2 2p^4, [\text{He}] 2s^2 2p^4$$


F $1s^2 2s^2 2p^5$, [He] $2s^2 2p^5$



Ne $1s^2 2s^2 2p^6$, [He] $2s^2 2p^6$

სურათი 222

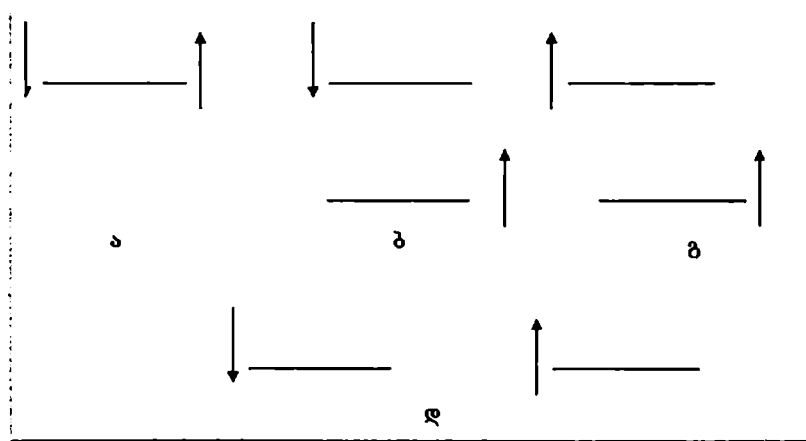
პაულისა და პუნდის წესით დაშვებული სხვადასხვა ატომის სტაციონარული ელექტრონული კონფიგურაციები

სურათზე მოცემულია სხვადასხვა ატომის პაულისა და პუნდის წესით დაშვებული სტაციონარული ელექტრონული კონფიგურაციები (სურათი 219).

პუნდის წესი შეიძლება აეხსნათ შემდეგნაირად: ატომი ძირითად მდგომარეობაში შეიცავს დაუწყვეილებელი ელექტრონების მაქსიმალურ რიცხვს. ანტიპარალელური სპინების მქონე ელექტრონების (დაწყვილებული ელექტრონები) განლაგებას ძირითად (სტაციონარულ) ან აგზნებულ ენერგეტიკულ დონეზე ძირითად ან აგზნებულ სინგლეტურ მდგომარეობას უწოდებენ.

თუ ელექტრონებს პარალელური სპინები გააჩნია, მათ, პაულის პრინციპის თანახმად, არ შეუძლია ერთსა და იმავე ენერგეტიკულ დონეზე განლაგება. მაშინ ერთი განლაგდება, მაგალითად, ძირითად, და მეორე - აგზნებულ ენერგეტიკულ დონეზე, ასეთ მდგომარეობას უწოდებენ ტრიპლეტურ მდგომარეობას.

თუ ატომში მხოლოდ ერთი დაუწყვეილებელი ელექტრონია, ასეთ მდგომარეობას უწოდებენ დუბლეტურს (სურათი 223).



სურათი 223

სპინების სინგლეტური და ტრიპლეტური მდგომარეობა

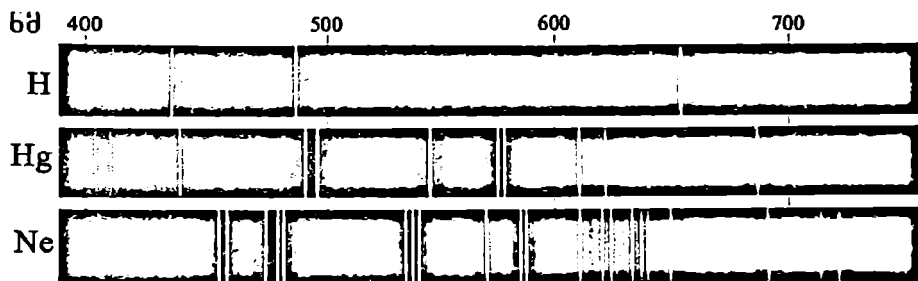
ა - ძირითადი სინგლეტური მდგომარეობა; ბ - აგზნებული სინგლეტური მდგომარეობა; გ - აგზნებული ტრიპლეტური მდგომარეობა; დ - დუბლეტური მდგომარეობა

ყველა სტაბილურ ატომში ელექტრონები სტაბილურ (ძირითად) სინგლეტურ მდგომარეობაშია. აგზნებისას მათ შეუძლია გადასვლა აგზნებულ სინგლეტურ ან ტრიპლეტურ მდგომარეობაში. გასაგებია, რომ ელექტრონის ტრიპლეტური მდგომარეობა უფრო სტაბილურია, ვიდრე იმავე რიგის სინგლეტური მდგომარეობა (განზიდვის ძალა ანტიპარალელურ სპინებს შორის უზრუნველყოფს ამ მდგომარეობის სტაბილიზაციას).

ელემენტების ქიმიური თვისებები განპირობებულია მათი გარეგანი ელექტრონული შრის აგებულებით. გარეგან ელექტრონულ შრეში ელექტრონების რაოდენობა განსაზღვრავს ელემენტის ჯგუფს პერიოდულ სისტემაში.

კვანტური ატომური მოდელი შესაძლებელს ხდის ატომისა და მოლეკულის გამოსხივების (ან შთანთქმის) სპექტრის მიხედვით მივიღოთ ინფორმაცია ატომის სტრუქტურის შესახებ. სურათზე 224 მოცემულია სხვადასხვა ელემენტის შთანთქმის სპექტრები.

მოლეკულების გამოსხივებისა და შთანთქმის სპექტრი გაცილებით უფრო რთულია, ვიდრე ატომური. ელექტრონული ენერგიის გარდა მოლეკულებს გააჩნია რხევითი და ბრუნვითი ენერგია (რომელიც წარმოადგენს სითბურ ენერგიას). მოლეკულების რხევითი ენერგია განპირობებულია ცალკეული ატომების ან ატომების ჯგუფების მოლეკულის შიგნით. მოლეკულების ბრუნვითი ენერგია განპირობებულია მათი ბრუნვით რაიმე ღერძის გარშემო.



სურათი 224
სხვადასხვა ელემენტის შთანთქმის სპექტრები

რხევითი და ბრუნვითი ენერგია, ელექტრონული ენერგიის მსგავსად, დისკრეტულია. ენერგიების სხვაობა რხევით ენერგეტიკულ დონეებს შორის გაცილებით მცირეა, ვიდრე ენერგიების სხვაობა ელექტრონების დონეებს შორის (რხევით ენერგეტიკულ დონეებს შორის ენერგიის სხვაობა $\Delta E \approx 0,8$ ევ-ს, ბრუნვით ენერგეტიკულ დონეებს შორის ენერგიის სხვაობა $\Delta E \approx 0,02$ ევ-ს), ამიტომ შეიძლება ითქვას, რომ მოლეკულის ყოველი ელექტრონული დონე იხლიჩება რხევით და ბრუნვით დონეებად (ქვედონეებად). მოლეკულის ყოველი რხევით დონეს შეესაბამება ბრუნვითი დონეების რიგი, რომელთა ენერგიებს შორის ენერგიის სხვაობა კიდევ უფრო მცირეა.

წყალბადის ატომისათვის სუფთა ელექტრონული გადასვლის ენერგია ≈ 4 ევ. ატომების რხევით ენერგეტიკულ დონეებს შორის სხვაობა ≈ 1 ევ-ია, ხოლო ბრუნვითი - $\approx 0,028$ ევ-ია.

რთული მოლეკულების რხევითი დონეები დამოკიდებულია მოლეკულების კონფორმაციაზე (სივრცულ სტრუქტურაზე). მოლეკულის კონფორმაციის შეცვლისას რხევითი დონეები იცვლიან თავიანთ მდებარეობას.

სინათლის (ელექტრომაგნიტური ტალღების) გამოსხივებისას ან შთანთქმისას მოლეკულა ერთი ენერგეტიკული დონიდან გადადის მეორეზე.

VII.3 ატომბირთვის სტრუქტურა

თანამედროვე მოდელის მიხედვით ატომი შეიცავს ბირთვს, მკაცრად შემოსაზღვრულ სპეციფიკურ ორბიტებზე მოძრავი ელექტრონებით. ატომბირთვი განიხილება, როგორც ნაწილაკების ერთობლიობა ატომის ცენტრში. ბირთვის ზომები ძალიან მცირეა ატომის ზომებთან შედრებით.

ბირთვი შედგება ორი ტიპის ნაწილაკისაგან (*ნუკლონებისაგან*) - *ნეიტრონებისა* და *პროტონებისაგან*. ნეიტრონები და პროტონები ერთი ზომისაა, მაგრამ განსხვავდებიან მუხტით: ნეიტრონებს ელექტრული მუხტი არ გააჩნია და მას ბირთვის სტრუქტურაში შეაქვს მხოლოდ მასა; თითოეულ პროტონს გააჩნია დადებითი მუხტი, აბსოლუტური მნიშვნელობით ელექტრონის მუხტის ტოლი (და რა თქმა უნდა - მასა).

ნიუთონების (ატომის, ელემენტის) ფიზიკურ-ქიმიური მახასიათებლები დამოკიდებულია ბირთვში ნეიტრონ/პროტონების შემადგენლობაზე. პროტონების რიცხვი (*Z*) - ბირთვის ატომური ნომერია (ქიმიური ელემენტის რიგითი ნომერი) და ატომების ქიმიურ თვისებებს განსაზღვრავს. დღესდღეობით ცნობილია 118 ქიმიური ელემენტი, რაც ნიშნავს, რომ მათი ბირთვები 1-დან 118-მდე პროტონს შეიცავს.

ატომბირთვისა და სუბბირთვული ნაწილაკების მასა გამოიხატება სპეციფიკურ ერთეულებში - მასის ატომურ ერთეულებში (მ.ა.ე.), იგი ნახშირბადის ატომის მასის $\frac{1}{12}$ ნაწილს შეადგენს; ამ ერთეულის მიხედვით ნახშირბადის ატომის მასა უდრის 12 მ.ა.ე.-ს.

$$1 \text{ მ.ა.ე.} = 1.66 \times 10^{-27} \text{ კგ.}$$

სხვაობა ნეიტრონისა და პროტონის მასას შორის ძალიან მცირეა (დაახლოებით (0,1%). ელექტრონის მასა პროტონის (ან ნეიტრონის) მასაზე ~ 1800-ჯერ ნაკლებია. (პროტონის მასა - 1.0073 მ.ა.ე., ნეიტრონის მასა - 1.0087 მ.ა.ე., ელექტრონის მასა - 0.000549 მ.ა.ე.).

ნეიტრონებისა და პროტონების რაოდენობის საერთო ჯამი - *მასური რიცხვია* (*A*). ატომბირთვის საერთო მასა (ან წონა) არ არის ზუსტად მასური რიცხვის (ტოლი მისი შემადგენელი პროტონებისა და ნეიტრონების მასათა ჯამის) პროპორციული*, ვინაიდან ნეიტრონისა და პროტონის მასები განსხვავდება და მათი *მასის ნაწილი გარდაიქმნება ენერგიად* ბირთვის წარმოქმნის პროცესში. დამოკიდებულება მასასა და ენერგიას შორის განხილული იქნება ქვემოთ.

ყველა ატომბირთვი შეიცავს პროტონებს და ნეიტრონებს; მსუბუქ ელემენტებში (დაბალი ატომური რიცხვი (*Z*)) მათი რაოდენობა ერთმანეთის ტოლია, ატომბირთვის ზომების მატებასთან ერთად იზრდება ნეიტრონების

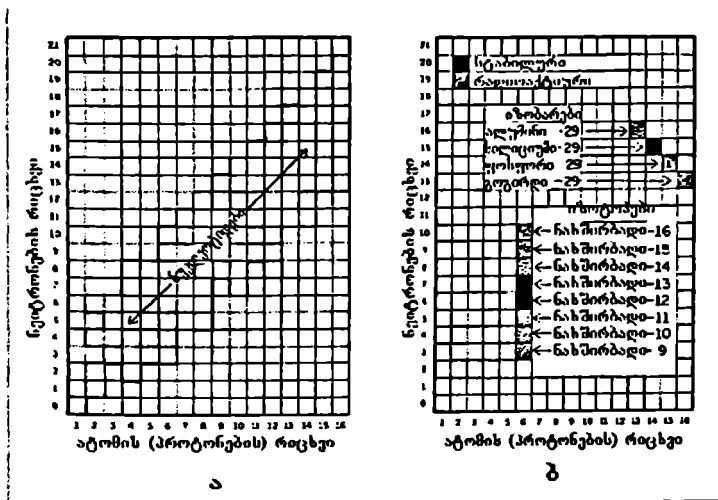
რიცხვი და ნეიტრონ/პროტონების შეფარდების მაქსიმალური მნიშვნელობა ტოლია 1,3.

დღეისათვის ცნობილია ნეიტრონ-პროტონების 1300 განსხვავებული კომბინაცია.

ქიმიური ელემენტები - განსხვავებული ატომური რიცხვის (ნომრის) მქონე ატომები.

ნუკლიდები - განსხვავებული ატომური რიცხვისა და ნეიტრონების რიცხვის მქონე ატომები

ქვემოთ მოცემულია სხვადასხვა ნუკლიდის დიაგრამა (სურათი 225ა). თითოეული კვადრანტი აღნიშნავს სპეციფიკურ ნუკლიდს. ბევრი ნეიტრონ-პროტონის კომბინაცია არასტაბილურია და არ არსებობს ბირთვების სახით. ბუნებაში არსებული ნუკლიდები განლაგებულია დიაგრამის დიაგონალზე შედარებით ვიწრო ზოლში.



სურათი 225

ა - განლაგება ნუკლიდების ნეიტრონ-პროტონების შემადგენლობის მიხედვით (დიაგრამაში ნაჩვენებია მენდელეევის ტაბულის პირველი 16 ელემენტისათვის).

ბ - განსხვავება იზოტოპებსა და იზობარებს შორის

როგორც აღნიშნეთ, ქიმიური ელემენტის ატომბირთვი შეიძლება შეიცავდეს ნეიტრონების განსხვავებულ რაოდენობას. ნუკლიდები, რომლებიც მიეკუთვნება ერთსა და იმავე ქიმიურ ელემენტებს (გააჩნია ერთი და იგივე ატო-

*ბირთვის მასა ნაელბია შემადგენელი პროტონებისა და ნეიტრონების მასათა ჯამის, ამ ფაქტს ბირთვული „მასის დეფექტს“ უწოდებენ : $\Delta m = Zm_p + (A - Z)m_n - m_a$

მური რიცხვი Z), მაგრამ განსხვავდებიან ნეიტრონების რაოდენობით ცნობილია *იზოტოპების* სახელწოდებით. ელემენტის სხვადასხვა იზოტოპი აღინიშნება სიმბოლოთი ${}^A E$. სადაც E – ელემენტი, A – მასური რიცხვი. დიაგრამაზე ერთი და იმავე ელემენტის იზოტოპები განლაგებულია ერთსა და იმავე ვერტიკალურ სვეტში (მათი პროტონების რიცხვი ტოლია).

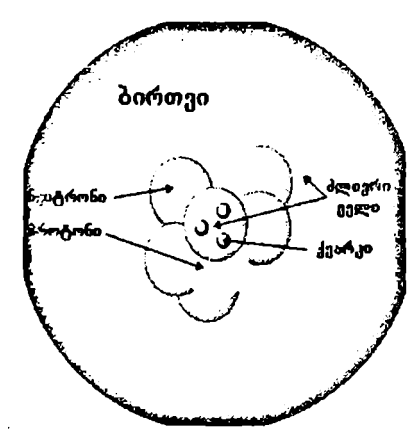
მრავალ ელემენტს გააჩნია რამდენიმე იზოტოპი; უმრავლეს შემთხვევაში ისინი სტაბილურია (არარადიოაქტიურია), ზოგიერთი – რადიოაქტიურია. ასე, მაგალითად, ცნობილია იოდის (I) ოცდაჩვიდმეტი იზოტოპი მასური რიცხვის მნიშვნელობით 117 - 139 ფარგლებში; ორი მათგანი იოდინი 129 (${}^{129}I$) და იოდინი-131 (${}^{131}I$) გამოიყენება მედიცინაში.

ნუკლიდები, რომლებსაც გააჩნია ერთი და იგივე მასური რიცხვი (A) (პროტონებისა და ნეიტრონების ჯამი), მაგრამ განსხვავდება ატომური რიცხვის (Z) მიხედვით ცნობილია *იზობარების* სახელწოდებით (იხილე სურათი 224ბ).

ბირთვების სტაბილურობა განისაზღვრება ბირთვული ძალების ბალანსით. ვინაიდან პროტონები დადებითი მუხტების მატარებლებია, ისინი განიზიდავენ ერთმანეთს. ბირთვში ნაწილაკებს შორის მოქმედებს აგრეთვე ახლომოქმედების ძალზე ძლიერი *ბირთვული ძალები* (მიზიდულობის ძალები), რომლებიც აწონასწორებენ ელექტროსტატიკური განზიდვის ძალებს.

პროტონები, ნეიტრონები, მეზონები – ელემენტარული ნაწილაკებია; ისინი შედგება *ქვარკებისაგან* (სურათი 226).

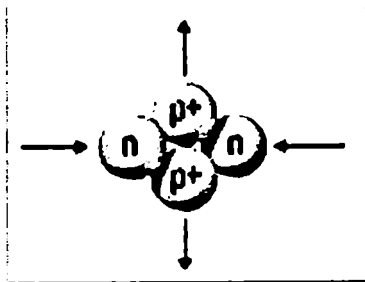
მატერიის ფუნდამენტური შემადგენელი ნაწილაკები – ქვარკები, ლეპტონები, ურთიერთქმედებენ გლუონების გაცვლის საშუალებით. ცალკეული ქვარკები არ იმყოფებიან იზოლაციაში, ისინი მუდამ კავშირში არიან და წარმოქმნიან ნუკლონებსა და მეზონებს.



სურათი 226
ატომბირთვის სტრუქტურა

უმნიშვნელოვანესი ფაქტორი, რომელიც განსაზღვრავს ბალანსს ინტრაბირთვულ ძალებს შორის და, მაშასადამე, ბირთვის სტაბილობას – პროტონებისა და ნეიტრონების რიცხვია. სტაბილობის მაჩვენებელი (შეფარდება ნეიტრონები/პროტონები) იზრდება ატომური რიცხვის ზრდასთან ერთად (1-დან 1,3-მდე).

თუ ნეიტრონ-პროტონების შეფარდება განსხვავდება (მაღალია ან დაბალია) სტაბილობის ზღვრისაგან ($\frac{N}{P} \approx 1$), ბირთვები, როგორც წესი, რადიოაქტიურია. ბირთვის არასტაბილურ კომპოზიციაში განზიდვის ძალები პრევალირებენ ბირთვული მიზიდვის ძალებზე, რაც ბირთვის არასტაბილობას განსაზღვრავს (სურათი 227).



სურათი 227

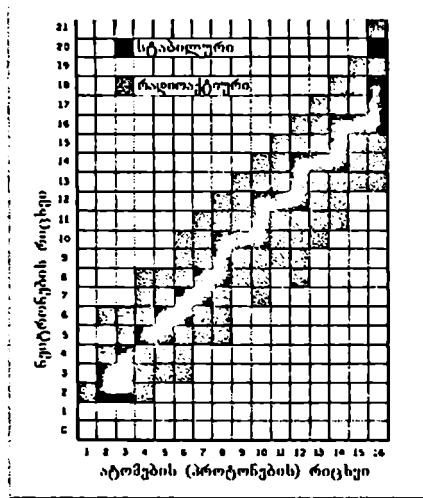
ბალანსი ბირთვულ ძალებს შორის

ბირთვის სტაბილობასა და ნეიტრონ-პროტონების შეფარდებას შორის დამოკიდებულება ილუსტრირებულია ქვემოთ. სტაბილური ბირთვისათვის შეფარდება ნეიტრონები/პროტონები დაახლოებით ერთის ტოლია ($\frac{N}{P} \approx 1$) და ისინი განლაგებულია დიაგრამის შუა მუკ ზოლში (სურათი 228). რადიოაქტიური ბირთვები განლაგებულია ამ ზოლის ორივე მხარეს (ნაცრისფერი ზოლები). დიაგრამის დანარჩენი ფართობით გამოსახული ნეიტრონების/პროტონების შეფარდებისათვის არარეალურია ბირთვის არსებობა.

როდესაც ბირთვი გადადის უფრო სტაბილურ მდგომარეობაში, ის გამოასხივებს ენერგიას. ეს პროცესი აისახება ბირთვული რეაქციების დროს ბირთვულ რეაქტორებზე (გამოთავისუფლებული ენერგია, ჩვეულებრივ, უმთავრესად გამოიყენება ელექტრული გარდაქმნისათვის). ორი მცირე ზომის ბირთვის ერთ დიდ ბირთვად შეერთების დროს აგრეთვე თავისუფლდება ენერგია, რომელიც საწყისი და წარმოქმნილი ბირთვების მასათა სხვაობითაა (მასის დეფექტი) განსაზღვრული. ბირთვული გარდაქმნების დროს გამოიყოფა ენერგია, რომლის ზომასაც ბირთვის შემადგენელი ნუკლონების მასის დეფექტი

$\Delta m = \frac{E_k}{c^2}$ წარმოადგენს, სადაც E_k – ბირთვის კავშირის ენერგია, c – სინათლის სიჩქარე ვაკუუმში. ესაა აინშტაინის ზოგადი ფორმულის $E = \Delta mc^2$

კერძო შემთხვევა. ამ გამოსახულების უდიდესი მნიშვნელობა მდგომარეობს იმაში, რომ ენერგიის უზარმაზარი რაოდენობა შეიძლება წარმოიქმნას შედარებით მცირე მასისაგან. მასა რაოდენობით 1g ბირთვული გარდაქმნის დროს წარმოქმნის ენერგიას 25.000.000 კილოვატ საათში (კვტ*სთ)*. ბირთვულ მედიცინაში გამოიყენება ენერგიის შედარებით მცირე რაოდენობები (100 კევ** და 500 კევ). ეს ნიშნავს, რომ მასა იცვლება 0.0001 - 0.0005 მ.ა.ე.-ის ფარგლებში.

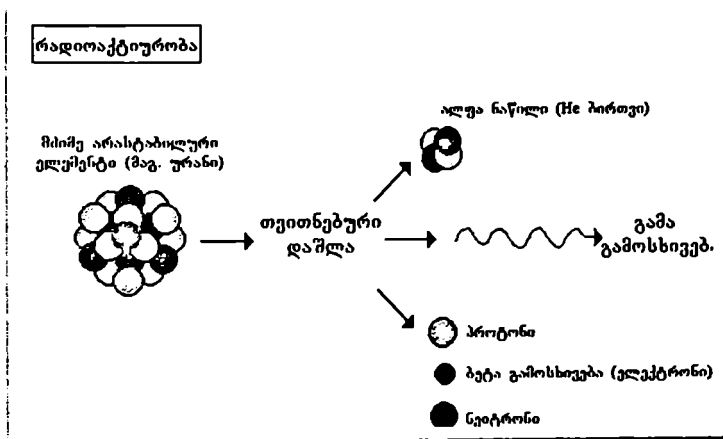


სურათი 228
სტაბილური და არასტაბილური ბირთვების სტრუქტურის ამსახველი დიაგრამა

ენერგია, რომელიც შეესაბამება ერთი ელექტრონის მასას 511 კევ-ია. ამ სიდიდეს ხშირად იყენებენ ელექტრონის ენერგიის ამსახველად. ბირთვულ მედიცინაში ზოგიერთი პროცედურის დროს (პოზიტრონემისიური ტომოგრაფია PET) ინდივიდუალური ელექტრონების მასები მთლიანად გარდაიქმნება ენერგიად, შედეგად წარმოიქმნება მასასიათბეული ფოტონი, ენერგიით 511 კევ. ბირთვული რეაქციების დროს ენერგია გამოიყოფა *ფოტონების ან ნაწილაკების* სახით. ფოტონს (კვანტს) არ გააჩნია მასა, გააჩნია მხოლოდ ენერგია. ასეთი ტიპის გამოსხივებას *ელექტრომაგნიტურ გამოსხივებას* უწოდებენ. ელექტრომაგნიტური გამოსხივება განსხვავდება ენერგიის (სიხშირის) მიხედვით (იხილე ქვემოთ თავი „ელექტრომაგნიტური გამოსხივების სკალა“). გამოსხივების (რადიაციის) მეორე ტიპი მოიცავს მცირე მასის ნაწილაკებს, რომლებიც მოძრაობს სივრცეში ძალიან დიდი სიჩქარით (სურათი 229). ნაწილაკების გამოსხივების (რადიაციის) წყარო – რადიოაქტიური ნივთიერებაა, კოსმოსი, ან

სპეციალური მოწყობილობები - ხაზოვანი ამარქარებლები (ციკლოტრონები და ბეტატრონები).

ნაწილაკების რადიაცია განსხვავდება ელექტრომაგნიტური გამოსხივებისაგან იმით, რომ ნაწილაკებს გააჩნია მასა, მოძრაობის პროცესში ამ ნაწილაკებს გადააქვს ენერგია.



სურათი 229

რადიაციის ორი ძირითადი ტიპი (ნაწილაკები და ფოტონები)

კლინიკურ მედიცინაში ხშირად გამოიყენება დიდი სინქარის ელექტრონების (β -ნაწილაკები) გამოსხივება. დიდი ზომის ნაწილაკები არ გამოიყენება მედიცინაში მათი დაბალი შეღწევადობის უნარის გამო. ნაწილაკების რადიაციის სხვადასხვა ტიპი წარმოიქმნება როგორც ფოტონების რადიაციის მეორეული პროდუქტი სამედიცინო ვიზუალიზაციის დროს (როდესაც X-გამოსხივება ურთიერთქმედებს ადამიანის ქსოვილებთან, წარმოიქმნება თავისუფალი ელექტრონები).

α -ნაწილაკები გამოსხივდება რადიოაქტიური ნივთიერების მიერ ბირთვული რეაქციების დროს. α -ნაწილაკი შეიცავს ორ პროტონს და ორ ნეიტრონს, თავისი

* სიკოვაც საათი (კეტ-სი) - ენერგიის ერთეული. $1 \text{ კეტ} = 1000 \frac{\text{ჯ}}{\text{კგ}} \times 3600 \text{ წმ} = 3.6 \times 10^6 \text{ ჯ}$

** ერთი ელექტრონოვოლტი (1 ევ) ის ენერგიაა, რომელსაც შეიძენს ელექტრონი 1 ვ პოტენციალთა სხვაობის ველში $eU = \frac{m_e v^2}{2}$. $E = eU = 1.602 \times 10^{-19} \text{ ჯ} \times 1 \text{ ვ} = 1.602 \times 10^{-19} \text{ ჯ}$ (e - ელექტრონის მუხტია, m_e - მასა), ან ის ენერგია, როდელიც დაიხარჯება ელექტრონის გადასატანად ევლის საწინამდებარედ ორ წერტილს შორის პოტენციალთა სხვაობით 1 ვ. ანუ ის მაქსიმალური ენერგიაა, რომელსაც შეიძენს ელექტრონი 1 ვ პოტენციალთა სხვაობის ველში

$eU = \frac{m_e v^2}{2}$.

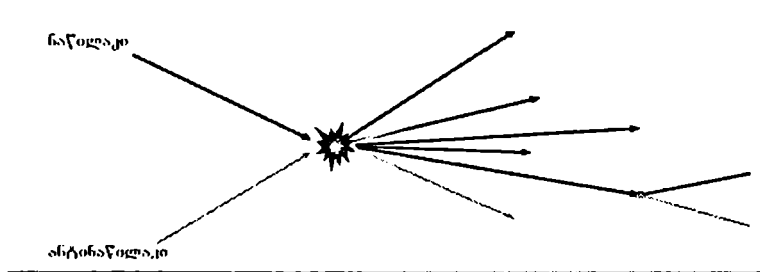
მუხტის და შედარებით დიდი ზომის გამო α -ნაწილაკები ხასიათდება დაბალი შელწევადობის უნარიანობით. α -ნაწილაკების ენერგია გაცილებით მაღალია რადიაციის სხვა ფორმებთან შედარებით, რაც განაპირობებს მათი რადიაციული ეფექტების სიძლიერეს. α -ნაწილაკების რადიაცია, ჩვეულებრივად, არ გამოიყენება მედიცინაში. გამონაკლისს შეადგენს რადიუმი, რომელიც ხშირად გამოიყენება რადიოთერაპიის დროს. ამ შემთხვევაში რადიუმი თავსდება კაფსულებში ადამიანის სხეულში, სადაც ის შთანთქავს α -გამოსხივებას და შემდეგ გამოასხივებს γ -სხივებს.

ბირთვული ნაწილაკების განხილვისას უნდა აღინიშნოს, რომ დღეს ცნობილია 100-მდე ატომური ნაწილაკი. მათი კლასიფიკაცია ხდება ურთიერთქმედების ძალების, სტრუქტურის, სპინის და ა. შ. მიხედვით. ნაწილაკები, რომლებსაც არ გააჩნია შინაგანი სტრუქტურა და განსაზღვრული საზღვრები - *ელემენტარული ნაწილაკები*^{*} ეწოდება. ელემენტარულ ნაწილაკთა რიცხვს მიეკუთვნება ელექტრონი. ნაწილაკების საკუთარი ღერძის გარშემო ბრუნვის უნარი აისახება სპინის საშუალებით. სპინი შეიძლება გამოყენებულ იქნეს ნაწილაკების კლასიფიკაციისათვის. ყველა ნაწილაკი იყოფა:

- ნახევარი სპინის ჯერადი ($\frac{1}{2}$; $\frac{3}{2}$; $\frac{5}{2}$; ...) ნაწილაკები (ფერმიონები) - ელექტრონები, ნეიტრონები, პროტონები.

- მთელი სპინის ჯერადი (0, 1, 2, 3, ...) ნაწილაკები (ბოსონები) - ფოტონი, გლიონი.

- ითვლება, რომ ელემენტარულ ნაწილაკებს გააჩნიათ თავიანთი ანტინაწილაკი, მაგალითად, ელექტრონი - პოზიტრონი. ამ ნაწილაკების ურთიერთქმედებისას (ნაწილაკის ანტინაწილაკთან) ხდება მათი ნიჰილირება და გამოიყოფა ენერგია (სურათი 230). მაგალითად, ელექტრონის პოზიტრონთან ურთიერთქმედებისას გამოიყოფა ფოტონი ენერგიით 511 კეე. ელექტრონ-პოზიტრონული წყვილის ნიჰილირების შედეგად გამოყოფილი ენერგიის კვანტის დეტექტირება გამოიყენება სამედიცინო ვიზუალიზაციაში (PET).

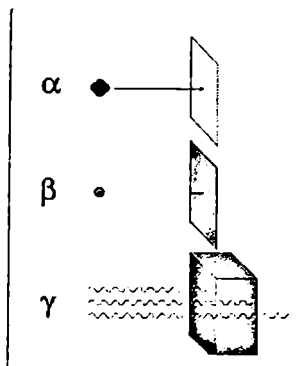


სურათი 230

ფოტონის გამოყოფა ნაწილაკისა და ანტინაწილაკის ურთიერთქმედების დროს.

სურათზე 231 ნაჩვენებია სხვადასხვა ტიპის გამოსხივების შედარებითი შელწევადობის უნარიანობა.

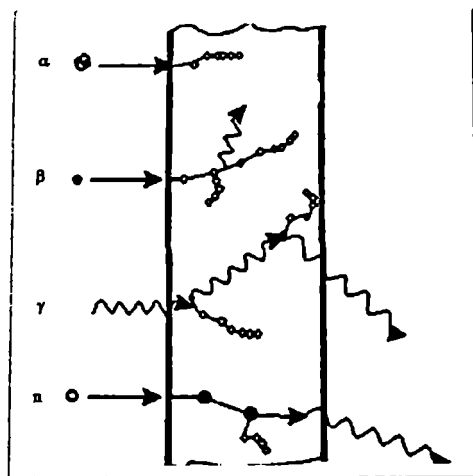
*სივრცეში ცნება "ელემენტარული ნაწილაკი" - პირიბითია, რადგან ნაწილაკები, რომლებიც ადრე ითვლებოდა ელემენტარულ ნაწილაკებად, (მაგალითად, α - ნაწილაკი $2P + 2N$) დღეს უკვე არაა ელემენტარული. ამიტომ ელემენტარული შეიძლება ვუწოდოთ ისეთ ნაწილაკებს, რომლებიც მუცნიერების დღევანდელი შეხედულებებით არ წარმოადგენს სხვა ნაწილაკებისაგან შემდგარს.



სურათი 231

სხვადასხვა ტიპის გამოსხივების შეღარებითი შეღწევადობის უნარიანობა

სურათზე 232 ნაჩვენებია სხვადასხვა ტიპის გამოსხივების ნივთიერებასთან ურთიერთქმედების მექანიზმები.



სურათი 232

სხვადასხვა ტიპის გამოსხივების ნივთიერებასთან ურთიერთქმედების მექანიზმები γ -კვანტების გავრცელების მიმართულება გამოსახულია ზიგზაგებისებრი ისრების სახით, ნეიტრონების და ელექტრონების – წრფივი ისრების სახით; იონიზაციის პროცესი – მცირე წრეების სახით.

VIII.4 ურთიერთქმედების სახეები ბუნებაში

ბუნებაში არსებობს ოთხი ტიპის ურთიერთქმედება (ცხრილი 25):

- გრავიტაციული $\sim 10^{-45}$ (ურთიერთქმედება მასის მქონე ნაწილაკებს შორის);
 - სუსტი ბირთვული $\sim 10^{-6}$ (პასუხისმგებელი ბირთვულ დაშლასა და რეაქციებზე);
 - ელექტრომაგნიტური $\sim 10^{-2}$ (მოქმედებს ელექტრულად დამუხტულ ნაწილაკებს შორის;
- უზრუნველყოფს ელექტრონებისა და ატომბირთვის სტაბილუბას);
- ძლიერი ბირთვული ~ 1 (უზრუნველყოფს ბირთვის სტაბილუბას).

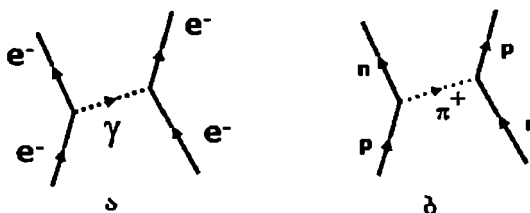
კლასიკური ფიზიკის მიხედვით, სხეულებს შორის მანძილზე ურთიერთქმედების შესაძლებლობა აიხსნება ველის არსებობით. კლასიკური თეორიის მიხედვით, ამა თუ იმ თვისებების (მასის, გუხტის და ა.შ.) მქონე ნაწილაკი უზრუნველყოფს თავის გარშემო სივრცის მოდიფიკაციას, წარმოქმნის ველს. ეს ველი მოქმედებს მეორე, ამ ველში მისგან რაღაც მანძილით დაშორებულ ნაწილაკზე.

მე-20 საუკუნეში კვანტური ფიზიკის განვითარებასთან ერთად შემოვიდა კონცეფცია მანძილზე ურთიერთქმედების პროცესში ძალის გაცვლის შესახებ: ორი ნაწილაკი ურთიერთქმედებს ერთმანეთთან რაღაც "ვირტუალური" ნაწილაკის გაცვლის საშუალებით. ეს ვირტუალური ნაწილაკი ("ველის კვანტი", სპეციფიკურია ამ ტიპის ურთიერთქმედებისთვის) წარმოიქმნება (და გამოსხივდება) ერთი ურთიერთქმედი ნაწილაკის მიერ და აბსორბირდება მეორეზე: შედეგად, სრულდება ურთიერთქმედება (სურათი 233).

ცხრილი 25

ძალათა დიაპაზონი ასოცირებული ვირტუალური ნაწილაკების გაცვლასთან

ძალა	სიმძლავრე (ფარდობითი ერთეული)	კვანტი	მასა გეჟ/წმ	მოქმედების მანძილი მ
გრავიტაციული	10^{-45}	გრავიტაციული??	0	უსასრულოა $\propto \frac{1}{r^2}$
სუსტი ბირთვული	10^{-6}	$W^{\pm}, Z^0$	80, 91	$< 2 \times 10^{-18}$
ელექტრომაგნიტური	10^{-2}	ოტონი	0	უსასრულოა $\propto \frac{1}{r^2}$
ძლიერი ბირთვული	1	π მეზონი, გლუონი	0,14 0	10^{-15} 0



სურათი 233

ფეიმანის დიაგრამა.

- ა - ელექტრომაგნიტური ურთიერთქმედება ელექტრონებს შორის (γ-ფოტონების გაცვლა); ბ - ბირთვული ურთიერთქმედება ნუკლონებს შორის (π^+ -მეზონების გაცვლა)

ჩნდება კითხვა, როგორ სრულდება ამ პროცესში ენერგიის შენახვის კანონი? კეიზენბერგის განუსაზღვრელობის პრინციპის თანახმად (იხილე ზემოთ),

$$ME \geq h,$$

სადაც E - ენერგია, t - დრო, h - პლანკის მუდმივა.

მაშასადამე, გამოსხივებასა და შთანთქმას შორის At დროის ინტერვალის განმავლობაში ენერგია ME ემორჩილება კეიზენბერგის განუსაზღვრელობის პრინციპს, ანუ განუსაზღვრელია, და ამიტომ ენერგიის შენახვის კანონი არ ირდება.

ურთიერთქმედების პროცესში მონაწილე ნაწილაკი ცნობილია "ვირტუალური ნაწილაკის", ან "ველის კვანტის" სახელწოდებით (ჩვენ მას ეერასოდეს ვხედავთ).

"ველის კვანტის" გაცელების პროცესში (ძალა) აეცოლებულია ურთიერთმოქმედ ნაწილაკებს შორის ენერგიისა და იმპულსის გაცვლა.

ვირტუალური ძალების მატარებელი ნაწილაკების არსებობა იწინასწარმეტყველეს ძლიერი ბირთვული ძალებისთვის 1935 წ.

ველის კვანტს შეიძლება აქონდეს ნულის ტოლი და ნულისაგან განსხვავებული მასა; რაც უფრო დიდია ველის კვანტის მასა, მით უფრო დიდი ენერგიაა საჭირო მისი წარმოქმნისთვის და მით უფრო ხანმოკლეა მისი არსებობის დრო (ენერგიის შენახვის გარეშე და კეიზენბერგის განუსაზღვრელობის პრინციპის მიხედვით).

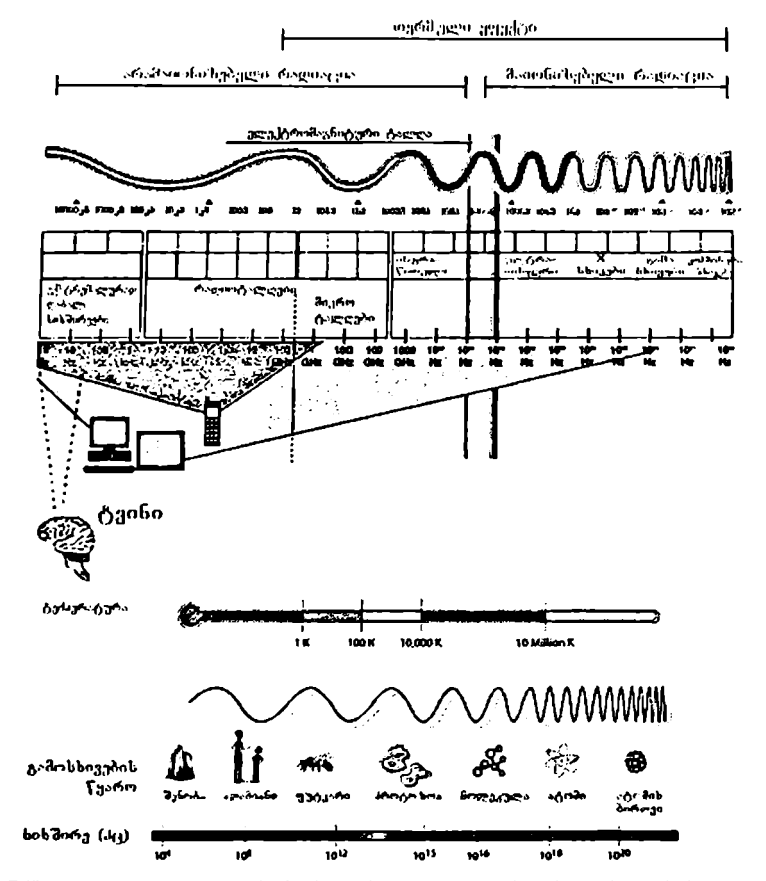
საკონტროლო კითხვები და ამოცანები:

1. აღწერეთ რეზერფორდის ექსპერიმენტი, რომელიც საფუძვლად დაედო ატომის სტრუქტურის ახალ მოდელს.
2. რა შემთხვევებში მიიღება ზოლოვანი/მთლიანი გამოსხივების სპექტრები?
3. რაში მდგომარეობს დე ბროილის ჰიპოთეზა?
4. რა განსხვავებაა ნაწილაკების ცნებას შორის კლასიკურ და კვანტურ მექანიკაში?
5. რაში მდგომარეობს ჰაიზენბერგის განუსაზღვრელობის პრინციპი?
6. დაასახელეთ ატომში ელექტრონის მდგომარეობის განმსაზღვრელი კვანტური რიცხვები.
7. რაში მდგომარეობს პაულის პრინციპი? ჰუნდის წესი?
8. მოიყვანეთ ფუნდამენტური ურთიერთქმედებების მაგალითები.
9. რა განსხვავებაა პროტონსა და ნეიტრონს შორის?
10. რა არის იზოტოპი? რა განსაზღვრავს იზოტოპის სტაბილობას?
11. რა განსხვავებაა იზოტოპსა და იზობარს შორის?
12. რა სახის ენერგიათა ბალანსი განსაზღვრავს ატომბირთვის სტაბილობას?
13. რაში მდგომარეობს ატომბირთვის მასის დეფექტი?

IX ელექტრომაგნიტური გამოსხიება

ელექტრომაგნიტური გამოსხიების ეფექტი დამოკიდებულია მის ენერგიაზე და, მაშასადამე, ამ ენერგიის მატარებელი ფოტონების რაოდენობაზე. რაც შეეხება ფოტონის სიხშირე (მოკლეა ტალღა), მით უფრო დიდი ენერგიის მატარებელია იგი, და, მაშასადამე, უფრო ძლიერი ეფექტების გამოწვევა შეუძლია.

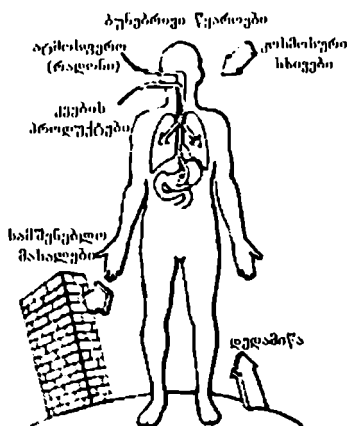
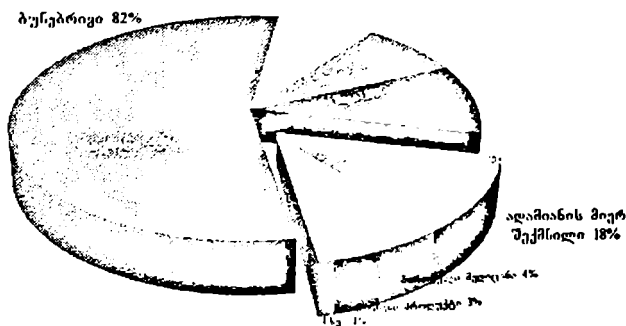
ელექტრომაგნიტური გამოსხიების სკალა ფოტონების სიხშირეების მიხედვით იყოფა 7 უბნად: რადიოტალღები, ინფრაწითელი, ხილული სინათლე, ულტრა-იისფერი, რენტგენის სხივები (X-სხივები) და γ -სხივები (სურათი 234).



სურათი 234

ელექტრომაგნიტური გამოსხიების სკალა სხვადასხვა სიხშირისათვის დამახასიათებელი ეფექტების მითითებით

თავისი ეფექტების მიხედვით ელექტრომაგნიტური გამოსხივება იყოფა ორ ნაწილად: **მაიონიზებული** (რომელსაც შეუძლია ატომის იონიზაცია) და **არამაიონიზებული** (რომელსაც არ შეუძლია ატომის იონიზაცია). სამყარო, რომელშიც ჩვენ ვცხოვრობთ, განუყოფელია, ელექტრომაგნიტური გამოსხივებისაგან სხეულიდან და სხვა (სურათი: ელექტრომაგნიტური ტალღები აღწევს დედამიწაზე კოსმოსიდან (მზე, ვარსკლავები), დედამიწიდან – რადიოგადამცემი სადგურები, სინათლის ხელოვნური წყაროები, რადიოაქტიური ელემენტები. ნებისმიერი გამათბობლისა და ადამიანის 235ა, ბ).



ბ

სურათი 235

რადიაციის ბუნებრივი და ხელოვნური (ადამიანის მიერ შექმნილი) წყაროები

დღეს, ტექნიკური პროგრესის პირობებში, იზრდება ადამიანის მიერ შექმნილი ელექტრომაგნიტური აპარატურის წვლილი დედამიწაზე საერთო რადიაციული ფონის შექმნაში (სიტყვა „რადიაცია“ არ გულისხმობს მხოლოდ მაიონიზებელ გამოსხივებას, როგორც ეს ჩვენთან არის მიღებული. სიტყვა radiation ზოგადად გამოსხივებას ნიშნავს, ტალღების ყველა სიხშირის დიაპაზონში (სურათი 234)). სხვადასხვა სიხშირის ელექტრომაგნიტური გამოსხივება ფართოდ გამოიყენება მედიცინაში, საყოფაცხოვრებო ტექნიკაში, სამხედრო ტექნიკაში და ზოგადად მას იყენებს ნებისმიერი ცოცხალი არსება.

განვიხილოთ სხვადასხვა სიხშირის ელექტრომაგნიტური გამოსხივების თვისებები. ბიოლოგიური ეფექტები და მისი როლი ადამიანის ცხოველქმედებაში.

IX.1 სხვადასხვა სიხშირის ელექტრომაგნიტური ტალღების მოკლე დახასიათება

რადიოტალღები

რადიოტალღები – ყველაზე დაბალი სიხშირის და ყველაზე გრძელი ელექტრომაგნიტური ტალღებია. ბუნებრივი რადიოტალღები წარმოიქმნება ელვის ან ასტრონომიული ობიექტების მიერ. ხელოვნურად გენერირებული რადიოტალღები გამოიყენება რადიოკომუნიკაციის (რადიო, ტელევიზია, მობილური კავშირი), სანავიგაციო (რადარები) სისტემებში, კომპიუტერულ ქსელში და სხვ. რადიოტალღები ხასიათდება სხვადასხვა მახასიათებლით. გრძელი რადიოტალღები ინტენსიურად ფარავს დედამიწას, შედარებით მოკლე ტალღები აირეკლება იონოსფეროს მიერ და ვრცელდება დედამიწის გარშემო, ზემოკლე რადიოტალღები თითქმის არ აირეკლება, არ იცვლის მიმართულებას და ვრცელდება წრფივად.

მრავალი ეპიდემიოლოგიური კვლევა მოწმობს დაბალი სიხშირის ელექტრომაგნიტური გამოსხივების მანე ეფექტებს. ამასთან აღსანიშნავია, რომ გაცილებით ადვილია მისი ელექტრული (E) კონპონენტისაგან დაცვა, ვიდრე მაგნიტურისაგან (B). მაგნიტური კომპონენტის გავრცელების სფეროს შესწავლა თითქმის შეუძლებელია.

დაბალი სიხშირის ელექტრომაგნიტური გამოსხივების მანე ეფექტების სიძლიერე ობიექტის მიერ ენერგიის შთანთქმის ინტენსივობის პროპორციულია.

ეს ეფექტები უკავშირდება კანცეროგენეზს, ლეიკემიას, თავის ტვინილს, საერთო სისუსტეს, თავბრუსხვევას, ნევროლოგიური დაავადებების (ალცჰეიმერის, პარკინსონის), დეპრესიის, კატარაქტის განვითარებას და სხვ.

უკვე ერთი საუკუნეა მედიცინაში გამოიყენება დაბალი სიხშირის ელექტრომაგნიტური გამოსხივება (რადიო ტალღები): მინიმალურად ინვაზიური ქირურგია, კოაგულაცია, უძილობის და ჰიპერტენზიის მკურნალობა და ა.შ..

სამედიცინო დიაგნოსტიკაში მაგნიტური რეზონანსის მოვლენას ეფუძნება მძლავრი სადიაგნოსტიკო მეთოდი – მაგნიტური რეზონანსული ტომოგრაფია. მაგნიტური რეზონანსი – ეფუძნება ატომის მაგნიტურ თვისებებს – ატომის მიერ

რადიოსიხშირების ელექტრომაგნიტური ენერგიის შთანთქმას სხვადასხვა ცოცხალი ქსოვილის მიერ.

პროტონების კენტი რიცხვის შემცველი ატომბირთვებს (მაგალითად, წყალბადის ატომბირთვი) დაუწყვილებელი სპინი გააჩნია (პროტონის სპინი უდრის $\frac{1}{2}$ (იხილე გვ. 304)). ეს იმას ნიშნავს, რომ ასეთი ატომი შეიძლება განვიხილოთ ელემენტარული მაგნიტის სახით (პარამაგნიტური, დაუწყვილებელი ელექტრონის მქონე ნივთიერებების მსგავსად). სითბური, ქაოსური მოძრაობის გამო ეს ელემენტარული მაგნიტები ქაოსურადაა განლაგებული და ნივთიერების საკუთარი მაგნიტური ველი ნულის ტოლია. ძლიერ მაგნიტურ ველში მოთავსებისას დაუწყვილებელი სპინების მქონე პროტონები შთანთქმეს ენერგიას და გადადის აგზნებულ ენერგეტიკულ დონეზე სინგლეტურ ან ტრიპლეტურზე. შესაბამისად, მოხდება მათი ენერგეტიკული დონეების გახლეჩა. მაგნიტური ველის ცვლადი იმპულსის (რადიოსიხშირის, რადგანაც სხვაობა პროტონის ენერგეტიკულ დონეებს შორის ძალიან მცირეა) მიწოდებისას განსხვავებული ანტიპარალელური სპინის მქონე პროტონები შთანთქმეს ენერგიას და ეს რეგისტრირდება სიგნალის სახით. ეს მოვლენა უდევს საფუძვლად ბირთვული მაგნიტური რეზონანსის (სამედიცინო დიაგნოსტიკაში ცნობილი, როგორც მაგნიტური რეზონანსი) მეთოდს. ვინაიდან წყალბადის ატომბირთვი მხოლოდ ერთ პროტონს შეიცავს (გააჩნია დაუწყვილებელი სპინი) და 2 წყალბადის ატომის შემცველი წყალი (H_2O) ცოცხალი ორგანიზმის შემადგენლობის 70%-ს შეადგენს, წყლის პროტონების ენერგეტიკული დონეების ენერგიის ცვლილებას დიდი დიაგნოსტიკური მნიშვნელობა გააჩნია. აღსანიშნავია, რომ ცოცხალ ორგანიზმში წყლის მოლეკულების პროტონების დონეების ენერგია იცვლება წყალში გახსნილი ცილების (ან სხვა გარშემოცემელი დიდი მოლეკულების) კონფორმაციის, ორიენტაციის, კონცენტრაციის ცვლილებების (და შესაბამისად, ენერგიის) შედეგად. შესაბამისად, მაგნიტური რეზონანსი იძლევა ინფორმაციას ქსოვილების (განსაკუთრებით რბილი, წყლის შემცველი ქსოვილების) სტრუქტურისა და ფუნქციის შესახებ.

ინფრაწითელი გამოსხივება.

ინფრაწითელი გამოსხივების ტალღის სიგრძე 0,7-1000 μ მ-ის ფარგლებშია, ხოლო სიხშირე - 1-430ტკც. ინფრაწითელი სხივები ასოცირდება სითბოსთან და სინათლესთან: მზის სხივები, ღუმელი, ნათურები, გამათბობელი აპარატურა. განასხვავებენ ინფრაწითელი გამოსხივების 3 არეს: 760-1400 ნმ; 1,4-3,0 μ მ; 0.003-1 მმ.

ადამიანები, სხეულის ნორმალური ტემპერატურით, გამოასხივებენ ინფრაწითელ ტალღებს, სიგრძით 20 μ მ. ინფრაწითელი ტალღები გამოსხივდება აბსორბირდება მოლეკულების მიერ ელექტრონების ბრუნვით-რხევით დონეებზე გადასვლის დროს.

ინფრაწითელი სპექტროსკოპია იძლევა მოლეკულების იდენტიფიკაციის საშუალებას მათ ატომებს შორის ბმების ანალიზის საფუძველზე. მოლეკულის შემადგენელი ატომების ვიბრაციის შედეგად, როგორც წესი, გამოსხივდება ინფრაწითელი სიხშირის ელექტრომაგნიტური ენერგიის კვანტები.

საინტერესოა, რომ შხამიან გველებს გააჩნიათ სენსორული სისტემა, რომელიც მგრძნობიარეა ინფრაწითელი ტალღების მიმართ; ამ სენსორული

სისტემის არსებობა საშუალებას აძლევს მათ, სიბნელეშიც მოძებნონ თბილისისხლიანი ცოცხალი არსება. ბიოლოგიური ეფექტები: ინფრაწითელი გამოსხივების მოკლელტალღოვანი არე იწვევს რეტინის დაზიანებას, კანის გაწითლებას. გრძელტალღოვანი ინფრაწითელი გამოსხივება იწვევს: $\lambda > 1,4 \mu\text{m}$ - კანის თერმულ დაზიანებას, $\lambda > 3 \mu\text{m}$ - რქოვანას დაზიანებას, სითბურ შოკს.

ინფრაწითელი თერაპია - ფოტოთერაპიის ერთ-ერთი სახეა. ინფრაწითელი სხივები შეადგენს კანის გავლით ქსოვილებში და ხელს უწყობს ეაზოაქტიური ნაერთების გამოყოფას. სისხლძარღვების რელაქსაციას და ამ გზით უზრუნველყოფს სისხლის მიმოქცევის გაუმჯობესებას, თრომბების წარმოქმნის პრევენციას, აგრეთვე ხელს უწყობს დაზიანებული ქსოვილების ჯანგადასით მომარაგების გაუმჯობესებას, დიაბეტური ჭრილობების შეხორცებას. იმავე მექანიზმის საშუალებით (ეაზოაქტიური ნაერთების გამოყოფის სტიმულაცია) ინფრაწითელი გამოსხივება უზრუნველყოფს არტერიული წნევის რეგულაციას.

ინფრაწითელი თერაპია გამოიყენება აკნეს (კანის დაავადება) დროს - უზრუნველყოფს მეტაბოლური პროცესების აქტივაციას (ანტიბაქტერიული, ანტიანთებითი მოქმედება); ქრონიკული ტკივილის დროს (ართრიტები, კისრის ტკივილი. ან კუნთების რიგიდულობა) - ხელს უწყობს კუნთების მოდუნებას; სპორტული ტრავმების დროს - ინფრაწითელი სხივები უზრუნველყოფს ენდორფინების (ჰორმონები, რომლებიც აყუჩებენ ტკივილს) გამოყოფას.

ინფრაწითელი გამოსხივება გამოიყენება დიაგნოსტიკაში, კერძოდ, *თერმოგრაფიაში*. იგი თერმული ეიზუალიზაციის მეთოდია ($\lambda = 0,9-14 \mu\text{m}$). რადგან ინფრაწითელი გამოსხივების ინტენსივობა იზრდება ობიექტის ტემპერატურის ზრდასთან ერთად, თერმოგრაფია გამოიყენება კანის ტემპერატურის განაწილების მონიტორინგის, კანცეროგენული სიმსივნეების ლოკალიზაციის, კუნთების დაზიანების და ანთებითი კერების გამოვლინების მიზნით. ინფრაწითელი ფოტობიომოდულაცია გამოიყენება ქიმიოთერაპია-ინდუცირებული ორალური წყლულების, პერპეჩის, ნერვული დაავადებების მეურნეობის მიზნით. ცენტრალურ ნერვულ სისტემაში ინფრაწითელი გამოსხივების წარმატებული გამოყენება ეფუძნება ენერგოგენეზის ინტენსიფიკაციას ციტოქრომ C ოქსიდაზას აქტივაციის საშუალებით. ინფრაწითელი გამოსხივებისადმი მგრძნობიარე სენსორებით ხორციელდება სიბნელეში ხედვა.

ხილული სინათლე.

ჩვენი მხედველობის აპარატის სტრუქტურა იძლევა მზის გამოსხივების სპექტრის შეგრძნების საშუალებას ფოტონების ენერგიების მხოლოდ ვიწრო ინტერვალში. ამ ინტერვალის საზღვრებს გარეთ ელექტრომაგნიტური კვანტების უშუალო შეგრძნების უნარი ადამიანს არ გააჩნია. ინფორმაციის ამ ფოტონების შესახებ ჩვენ ვიღებთ მხოლოდ სხვადასხვა ხელსაწყოთა საშუალებით.

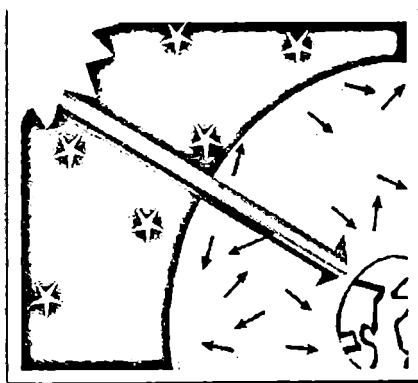
ხილული სინათლე ელექტრომაგნიტური გამოსხივების უბანია, რომლის აღქმა შესაძლებელია თვალის საშუალებით. ადამიანის თვალი მგრძნობიარეა $\lambda = 380-750 \text{ ნმ}$ ($\nu = 790-400 \text{ ტპკ}$) ტალღების მიმართ. სინათლეადაპტირებული თვალი მაქსიმალურად მგრძნობიარეა $\lambda = 555 \text{ ნმ}$ ტალღის სიგრძის მიმართ ოპტიკური სპექტრის ყუითელ-მწვანე უბნის საზღვარზე*.

*სწორედ ამიტომაც, რომ განსაკუთრებით სახიფათო უბნებზე ადამიანები სარგებლობენ ყუითელ-მწვანე ფერის კომპინეზონებით ან სპეცტანსაცმლით.

ხილული სინათლის სპექტრი 7 მარტივ ფერს – წითელს, ნარინჯისფერს, ყვითელს, მწვანეს, ცისფერს, ლურჯს და იისფერს შეიცავს. დანარჩენი ფერები, რომლებსაც ჩვენ ვარჩევთ (აღისფერი, სალათისფერი და ა. შ.), წარმოიქმნება სხვადასხვა ტალღის სუპერპოზიციის შედეგად.

დედამიწის ატმოსფერო გამჭვირვალეა ხილული სინათლის ტალღებისათვის, სინათლის მხოლოდ მცირე ნაწილი განიცდის გაბნევას და შთანთქმას. პაერის მოლეკულები იწვევს სინათლის ტალღების გაბნევას (რელიეს გაბნევა) (სურათი 236). ეს გაბნევა გაცილებით უფრო ინტენსიურია მოკლეტალღოვან უბანში (ხილული სინათლის სპექტრის ლურჯი ტალღის უბანი), რის გამოც დედამიწიდან სუფთა ცა ცისფერი ჩანს.

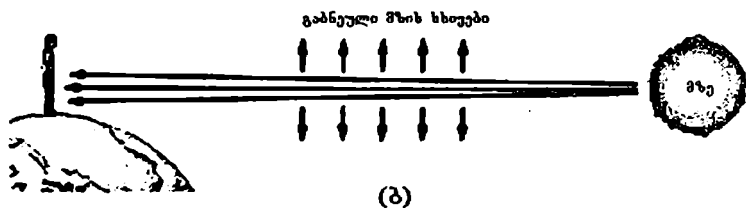
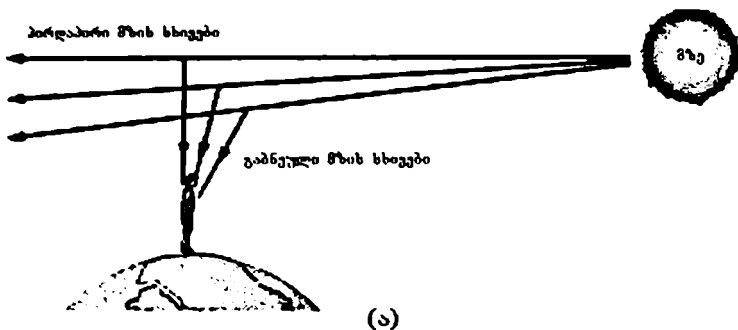
დღისით პორიზონტის სახლოვებს ცა უფრო ბაცია (თითქმის ტეთრია), რაც განპირობებულია იმ გარემოებით, რომ პორიზონტის სიშორის გამო ცისფერი ტალღის უფრო დიდი ნაწილი აირეკლება უკუმიმართულებით და ჩვენს თვალს აღწევს ცისფერი ტალღის ენერგიის მხოლოდ მცირე ნაწილი.



სურათი 235
სინათლის გაბნევა პაერში
(იცვლება ტალღების გავრცელების მიმართულება)

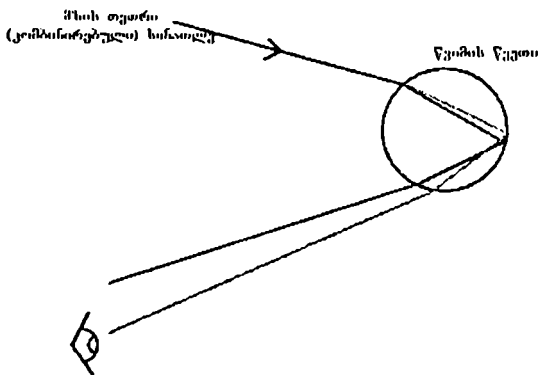
სინათლის გაბნევა ატმოსფეროს მოლეკულებზე განაპირობებს დედამიწაზე ცის სიკაშკაშეს.

მზის ჩასვლის დროს (პორიზონტზე), როგორც უკვე აღვნიშნეთ, სინათლის ტალღა ერცვლდება ატმოსფეროში უფრო დიდ მანძილზე, შესაბამისად, თეთრი სინათლის უფრო დიდი ნაწილი (განსაკუთრებით მისი მოკლეტალღოვანი წილი – ცისფერი, ლურჯი) აირეკლება და იფანტება; თვალს აღწევს უპირატესად გრძელტალღოვანი ნაწილი (ნარინჯისფერი, წითელი) (სურათი 237). ამის გარდა, პაერში მტერის ნაწილაკები იწვევს წითელი სინათლის ტალღის გაფანტვას ყველა მიმართულებით, რაც ქმნის წითელ ფონზე მზის ჩასვლის ღამაჲ პეიზაჲს. დაბინძურებულ ატმოსფეროში მზის ჩასვლა განსაკუთრებით ღამაზია.



სურათი 237

სხედასსხეა სიგრძის ტალღების გაფანტვა პაერში შუადღეს (ა) და საღამოს (ბ) (იხილე ტექსტი).



სურათი 238

ცისარტყელას წარმოქმნის სქემა.

მთვარესა და სხვა პლანეტებზე (მერკური), სადაც არ არის ატმოსფერო, სინათლის გაბნევა არ ხდება, ცა ბნელია (ვარსკლავები ჩანს მთელი დღის განმავლობაში). მარსზე, სადაც ატმოსფერული წნევა ძალიან დაბალია (ატმოსფეროს მოლეკულები ძალიან გაიშვიათებულია), არ ხდება სინათლის ეფექტური გაბნევა და ცას დაქარავს წითელი ფერი მტერის მაღალი კონცენტრაციის გამო.

ცისარტყელას წარმოქმნა ხილული სინათლის ტალღების გარდატეხის, დისპერსიის და არეკვლის შედეგია. ცისარტყელა ჩანს მხოლოდ წვიმის შემდეგ, მზიან ცაზე: მზის თეთრი სინათლე გადის წყლის წვეთებში, სადაც განიცდის არეკვლას და დისპერსიას (სურათი 238). ყველა წრფივი გაერცელების გამო წერტილიდან სინათლის ცისარტყელა არ ჩანს.

მხედველობის მექანიზმი.

მხედველობის ორგანოს, თვალის, მნიშვნელოვანი კომპონენტებია – რეცეპტორული აპარატი (რეტინა) და ოპტიკური სისტემა. ოპტიკური სისტემა შედგება რკოვანას, ბროლისა და მინისებრი სხეულისაგან (რომელსაც ახასიათებს გარდატეხის სხვადასხვა კოეფიციენტი) (სურათი 239). თვალის ოპტიკური სისტემა უზრუნველყოფს სხვადასხვა ობიექტიდან გამოსხივებული სინათლის ფოკუსირებას და რეტინაზე შემცირებული, შებრუნებული მკაფიო გამოსახულების მიღებას (სურათი 240).

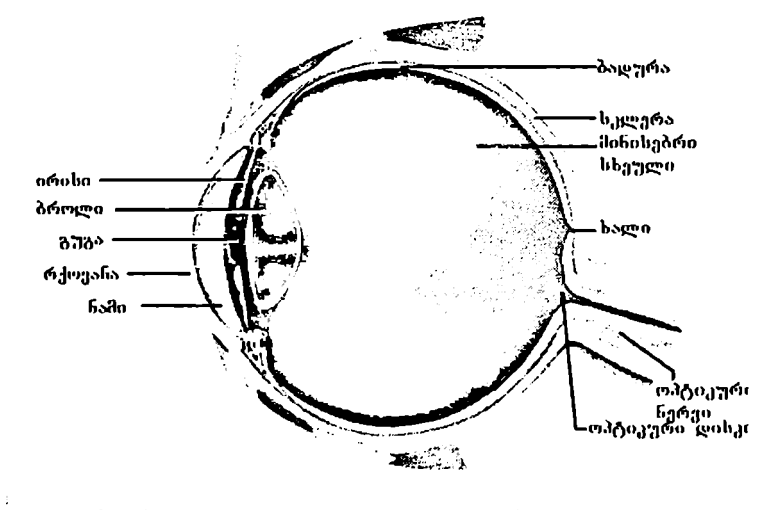
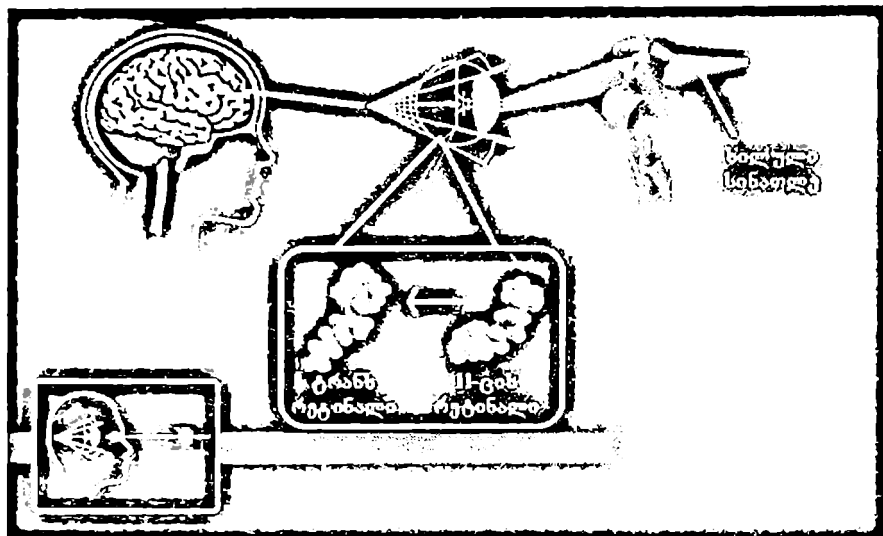
თვლიდან სხვადასხვა მანძილზე განლაგებული საგნების მკაფიო გამოსახულების მიღება რეტინაზე შესაძლებელია აკომოდაციის შედეგად ბროლის ზედაპირების სიმრუდის რადიუსის და, მაშასადამე, მისი გარდატეხის ცვლილების უნარით.

მხედველობის მაღალმგრძნობიარე რეცეპტორები – ჩხირები (შავ-თეთრი მხედველობა) და კოლებები (ფერადი მხედველობა) (სურათი 241ა) – განლაგებულია თვალის შიგა აპკზე, რეტინაზე. რეტინის გარეთა შრე – პიგმენტური ეპითელიუმი, შემდეგი შრე – ფოტორეცეპტორების შრეა (სურათი 241ბ).

თითოეული ჩხირი და კოლბა შედგება გარეგანი (ჩხირისებური ან კოლბისებური) და შიგა სეგმენტისაგან, რომელიც შეიცავს ბირთვს და მიტოქონდრიებს (უზრუნველყოფს ფოტორეცეპტორულ პროცესებს ენერგიით). ფოტორეცეპტორული შრის შემდეგ (შიგნით) განლაგებული ბიპოლარული ნეირონები ფოტორეცეპტორებთან კონტაქტის საშუალებით მონაწილეობს სინათლის სხივით ინდუცირებული გაღიზიანების სტიმულის მხედველობის ნერვზე გადაცემის პროცესში.

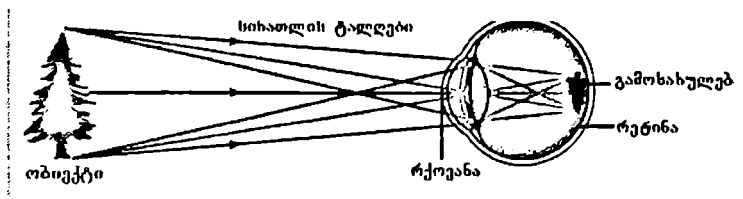
დღესდღეობით დადგენილია, რომ სინათლის აღქმა იწყება სინათლის შთანთქმით სინათლის მიმართ მგრძნობიარე პიგმენტების – ჩხირებისა და კოლებების გარეგან სეგმენტებზე განლაგებული ცილების მიერ. სინათლის მიმართ მგრძნობიარე ყველა ცილა (ქრომოპროტეინი) შედგება ქრომოფორის რეტინალის (ვიტამინი A-ს ალდეჰიდი) და ცილის მოლეკულის, ოპსინისაგან (განსხვავებულია სხვადასხვა მხედველობით პიგმენტში).

ძუძუმწოვრების ჩხირებში მხედველობის პიგმენტი – როდოპსინია, კოლებებში – სხვადასხვა სახეობის პიგმენტი.



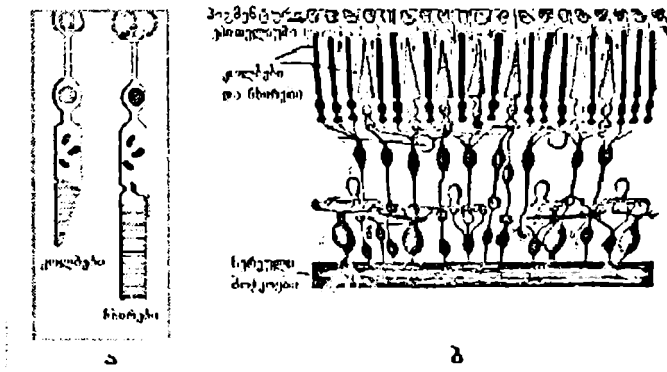
სურათი 239

სინათლის კვანტი იწვევს რეტინალის კონფორმაციულ ცვლილებებს და რეტინას მეშვეობით პროტონული გრადიენტის წარმოქმნას, რაც მოქმედების პოტენციალის სახით განაპირობებს თავის ტვინის მხედველობის ცენტრის გაღიზიანებას (მხედველობის აქტი) (ზევით). თვალის სტრუქტურა (ქვემოთ)



სურათი 240

თვალის ოპტიკური სისტემა უზრუნველყოფს სხეადასხვა ობიექტიდან გამოსხივებული სინათლის სხივების ფოკუსირებას და რეტინაზე შემცირებული და შებრუნებული მკაფიო გამოსახულების მიღებას



სურათი 241

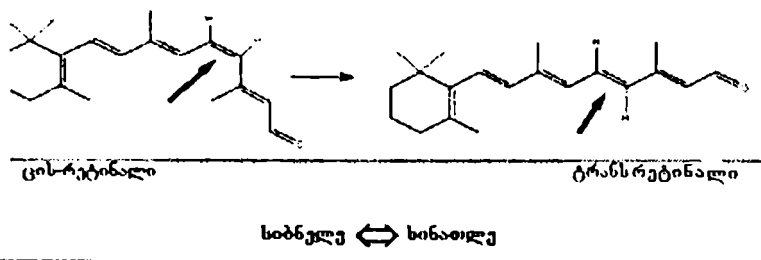
რეტინას აგებულება.

- ა - მხედველობის მაღალმგრძნობიარე რეცეპტორები - ჩხირები და კოლებები.
 ბ - რეტინის გარეთა შრე - პიგმენტური ეპითელიუმი, შემდეგი შრე - ფოტორეცეპტორების შრე; ფოტორეცეპტორული შრის შემდეგ განლაგებულია ბიპოლარული ნეირონები

როდოპსინის რეტინალთან შეერთება ხორციელდება მხოლოდ იმ შემთხვევაში, თუ უკანასკნელი მიიღებს მომრგვალებულ 11-ცის ფორმას (სურათი 242).

ფოტოქიმიური პროცესები რეცეპტორულ უჯრედებში პირველად შეისწავლა უოლდმა. უოლდმა აჩვენა, რომ მხედველობის ელემენტარული აქტი იწყება პიგმენტის მოლეკულის მიერ ელექტრომაგნიტური გამოსხივების შთანთქმით. ამ დროს რეტინალის მოლეკულაში ელექტრონები გადადის ძირითადი სინგლეტური დონიდან აგზნებულ დონეზე. ენერგიის კვანტის შთანთქმის შედეგად

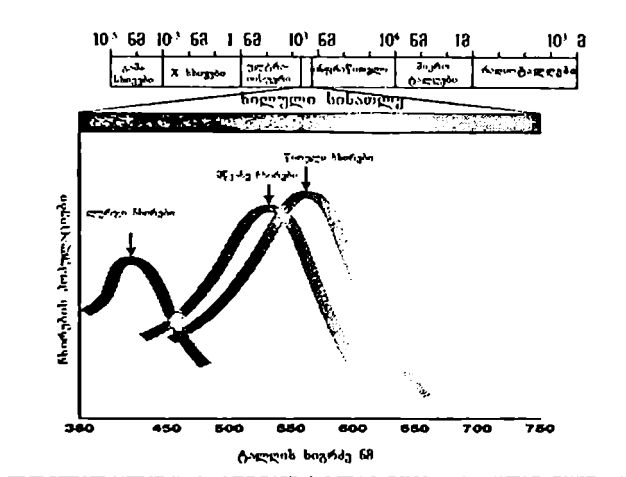
მომრგვალებული 11-ცის-რეტინალი გარდაიქმნება მთლიანად გასწორებულ ტრანსრეტინალად, რის შემდეგ როდოპსინი იშლება რეტინალად და ოპსინად (ამ პროცესს თან ახლავს რეტინალის ფერის შეცვლა (ვარდისფერიდან ყვითელზე და შემდეგ საერთოდ კარგავს ფერს). როდოპსინის რეტინალად და ოპსინად დაშლა იწვევს რეცეპტორული უჯრედის აგზნებას.



სურათი 242

რეტინალის სტრუქტურული იზოფორმების ურთიერთგარდაქმნა

კოლებში გამოვლენილია პიგმენტის სამი ტიპი, სხვადასხვა ტალღის სიგრძის სინათლის მიმართ განსხვავებული მგრძნობელობის მიხედვით (მოკლე S (ცისფერი 420-440 ნმ), შუა M (მწვანე 534-545 ნმ) და გრძელი L (წითელი 564-589 ნმ)) (სურათი 243).



სურათი 243

კოლებების პიგმენტის მგრძნობელობა სხვადასხვა ტალღის სიგრძის სინათლის მიმართ

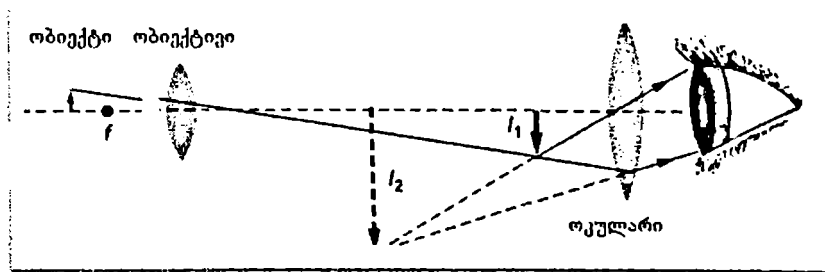
სხვადასხვა ფერის ვიზუალიზაცია შესაძლებელია ამ სამი ფერის ზედდების შედეგად. სინათლის შემოქმედებით კოლების პიგმენტი ექვემდებარება როდოპსინის მსგავს გარდაქმნებს.

ფერადი მხედველობის უმარისობა, როგორც წესი, დაკავშირებულია პიგმენტების გენეტიკურ დარღვევებთან, მაგრამ შეიძლება, აგრეთვე, განპირობებული იყოს მხედველობის ნერვის დაზიანებით. ამ საკითხთან დაკავშირებით პირველი სამეცნიერო ნაშრომი გამოაქვეყნა ჯონ დალტონმა (1798 წ.) საკუთარი დეფექტის აღმოჩენის შემდეგ. ფერადი მხედველობის უმარისობა შეიძლება იყოს სრული და ნაწილობრივი (წითელი/მწვანე – დალტონიზმი, ცისფერი/ყვითელი). ამის მიზეზი გენეტიკური მუტაციებია X ქრომოსომაზე, ან შეძენილი დეფექტები (ნხირების უმარისობა, დისტროფია და ა.შ.).

მიკროსკოპია.

ბოლო 300 წლის განმავლობაში მხედველობის არის გაფართოების მიზნით სამეცნიერო პრაქტიკაში ფართოდ გამოიყენება *ტელესკოპი* და *მიკროსკოპი*. ტელესკოპის დანიშნულებაა მოშორებულ ობიექტებზე დაკვირვება, ხოლო მიკროსკოპი გამოიყენება იმ მცირე ზომის ობიექტების შესწავლის დროს, რომლებიც უხილავია შეუიარაღებელი თვალისათვის. მიკროსკოპები განსაკუთრებით ფართოდ გამოიყენება მედიცინასა და ბიოლოგიაში.

უმარტივესი მიკროსკოპი შეიცავს ღინვებს (ობიექტივს და ოკულარს), რომლებიც აღიღებს ობიექტს (სურათი 244). მიკროსკოპის ობიექტივი ხასიათდება მოკლე ფოკუსური მანძილით (f). ობიექტივი ქმნის ობიექტის რეალურ ნამდვილ და შებრუნებულ გამოსახულებას I_1 , თვალი კი აღიქვამს ოკულარის მიერ გადიდებულ I_2 გამოსახულებას.



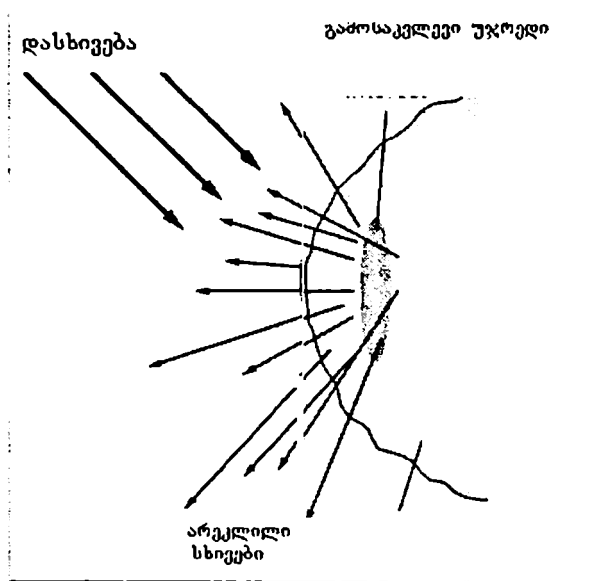
სურათი 244

მიკროსკოპის სქემატური სურათი. ობიექტივი ქმნის ობიექტის გამოსახულებას - I_1 , თვალი აღიქვამს ოკულარის მიერ გადიდებული I_1 -ის ნამდვილ, გადიდებულ და შებრუნებულ გამოსახულებას როგორც I_2 (კიდევ უფრო გადიდებულს, ვიდრე I_1 -ია)

(Paul Davidovich "Physics in Biology and Medicine", third edition, 2007)

ტრადიციული მიკროსკოპების საშუალებით შეუძლებელია ნახევრად გამჭვირვალე ობიექტების (მაგალითად, უჯრედების ქსოვილოვანი ანათლების)

დაწერილებითი შესწავლა. სინათლე ვრცელდება რბილ ბიოლოგიურ ქსოვილებში (ამის საილუსტრაციოდ გამოდგება მუჭში მოქცეული ანთებული პატარა ნათურა ღამით). შესაბამისად, შესაძლებელია ქსოვილის შიგნით უჯრედების გადიდებული გამოსახულების მიღება, მაგრამ ამ შემთხვევაში სინათლის არეკვლა და გაბნევა ხორციელდება არა მხოლოდ გამოსაკვლევი უჯრედების მიერ, არამედ ქსოვილის მთელი ზედაპირიდან და მეზობელი უჯრედებიდან, რაც განაპირობებს გამოსახულების შენიღბვას (სურათი 245).



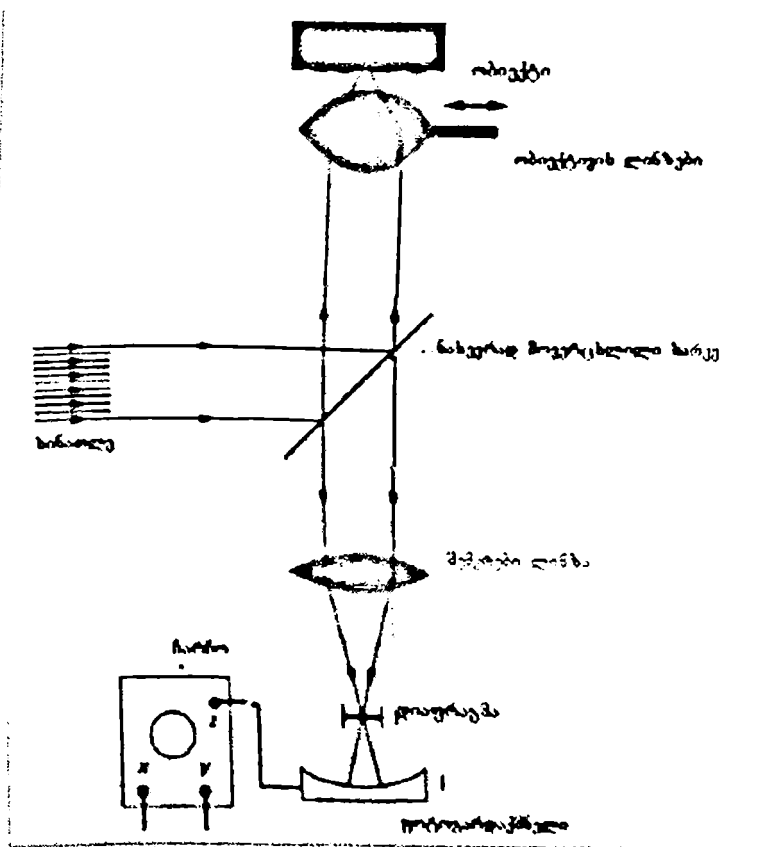
სურათი 245

სინათლის არეკვლა და გაბნევა ქსოვილში
(Paul Davidovich "Physics in Biology and Medicine", third edition, 2007)

კონფოკალური მიკროსკოპი

ეს პრობლემა წარმატებითაა გადაწყვეტილი კონფოკალურ მიკროსკოპში (მარვინ მინსკი, 1957), რომელიც იძლევა საშუალებას მივიღოთ გამოსახულება მხოლოდ სინათლით არეკლილი/გაბნეული მონიშნული თხელი ანათლისაგან ქსოვილის შიგნით. კონფოკალურ მიკროსკოპში ობიექტის განათებისათვის გამოიყენება სინათლის პარალელური სხივების კონა (დაბალი სიმძლავრის ღაზური). ღაზერული სხივები აირეკლება ობიექტივში ჩამონტაჟებული ნახევრად გამჭვირვალე ვერცხლის სარკიდან, რომელიც უზრუნველყოფს პარალელური სხივების ფოკუსირებას განსაზღვრულ წერტილში, ქსოვილის შიგნით. მიკროსკოპის ღინზებს შორის მანძილის ცვლილებით შესაძლებელია ღინზების მთავარი ფოკუსის გადაადგილება და გამოსაკვლევი სეგმენტის სიღრმეზე

დაყენება, რაც არეკლილი სინათლის კოორდინაციას უზრუნველყოფს. შედეგად სინათლე, არეკლილი ობიექტის ყველა წერტილიდან, გამოდის ობიექტივიდან პარალელური კონის სახით, ხოლო დანარჩენი ყველა სხივი იფანტება ობიექტივის ღერძის გარშემო (სურათი 246). პირველად კონფოკალური მიკროსკოპი გამოყენებული იყო ცოცხალი ბაყაყის რქოვანას ენდოთელური უჯრედების შესწავლისას.



სურათი 246

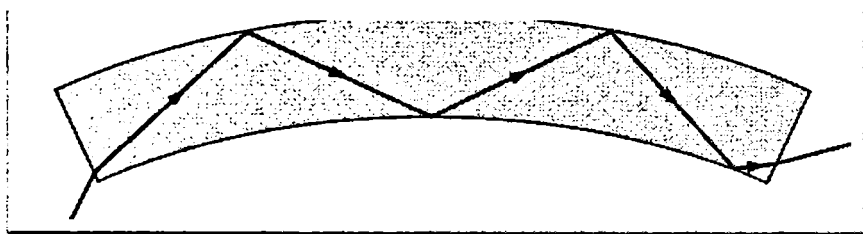
კონფოკალური მიკროსკოპის სქემა

(Paul Davidovich "Physics in Biology and Medicine", third edition, 2007)

ბოტკოვანი ოპტიკა და მისი გამოყენება მედიცინაში.

ბოტკოვანი ოპტიკას უწოდებენ ოპტიკის იმ დანაყოფს, რომელშიც სინათლის და გამოსახულების გადაცემა ხორციელდება ე.წ. შუქგამტარებით. ცნობილია,

როდესაც რაიმე გარემოში გავრცელებული სინათლის ტალღა მიადწევს მეორე, უფრო ნაკლები სიმკვრივის გარემოს ზედაპირს, მაშინ, თუ სხივის დაცემის კუთხე აღემატება გარკვეულ (ზღვრულ) მნიშვნელობას (იხ. გვერდი 252), მოხდება სრული შინაგანი არეკვლა, სინათლე არ გადადის ამ გარემოში და ბრუნდება ისევე იმავე გარემოში. ბოჭკოვანი ოპტიკა ეფუძნება სინათლის სრულ შინაგან არეკვლას. თუ რაიმე გამჭვირვალე ბოჭკოს (წვრილ ცილინდრს), რომელიც მოთავსებულია ნაკლებად მკვრივ გარემოში, ეცემა სინათლე მის კიდეს, მიუხედავად ბოჭკოს გეომეტრიული ფორმისა (მოღეწულია თუ სპირალურად დახეული) სინათლე (შესაბამისად გამოსახულებაც) გამოდის ბოჭკოდან მრავალჯერადი არეკვლის შემდეგ (სურათი 247). სრული შინაგანი არეკვლის დროს არეკვლის კოეფიციენტი მაღალია (0,9999), თუმცა ენერგიის საკმაოდ დიდი ნაწილი შთაინთქმება ბოჭკოს მასალის მიერ. სინათლის დიდი ნაკადის გადაცემისა და შუქგამტარი სისტემის მოქნილობის მიზნით ცალკეული ბოჭკოები შეკრულია ერთ კონად, ზონდში.



სურათი 247

სინათლე გამოდის ცილინდრული ფორმის ბოჭკოდან მრავალჯერადი არეკვლის შედეგად

(Paul Davidovich "Physics in Biology and Medicine", third edition, 2007)

მედიცინაში ბოჭკოვანი შუქგამტარები ძირითადად ორი მიმართულებით გამოიყენება: 1) შინაგანი ორგანოების ცივი სინათლით განათება და 2) გამო-სახულების მიღება (მაგალითად, კუჭის ლორწოვანი გარსის და ა. შ.) გამოსა-ხულების მისაღებად განკუთვნილ ბოჭკოების კონაში (ზონდში) აუცილებელია ცალკეული ბოჭკოები განლაგებული იყოს პარალელურად. ბოჭკოების კონასთან ერთად ერთ ზონდში სიდრუის განათებისათვის დამონტაჟებულია ნათურა. განათებული ზედაპირიდან არეკლილი სინათლის ტალღები ბოჭკოების მეშვეობით გამოდის გარეთ. დაკვირვება შესაძლებელია როგორც ვიზუალურად, ასევე ფოტოგრაფიულად. ბოჭკოვანი ოპტიკა გამოიყენება დისტანციურად მართვად ენდოსკოპებში ქირურგიული ოპერაციების დროს, ორგანიზმის შიგნით საჭირო ინტენსივობის ლაზერული გამოსხივების შესაყვანად, ქირურგიული, სამკურნალო ან კოაგულაციის მიზნით.

დღეისათვის ბოჭკოვანი ოპტიკა ფართო გამოყენებას პოულობს ტექნიკაში (ინფორმაციის გადაცემის სფეროში). ბოჭკოვანი კაბელების გამოყენება ამ

მიზნით გაცილებით მომგებია როგორც ეკონომიკურად, ასევე გადაცემული ინფორმაციის ხარისხის თვალსაზრისით.

მენდელეევის პერიოდული სისტემის 108 სტაბილური ელემენტიდან ბიოლოგიური ქსოვილები შეიცავს 25-ს (სურათი 248). ცხადია, ცოცხალ ბუნებაში მეტად გავრცელებული ატომებია ჟანგბადი და წყალბადი (ვინაიდან ცოცხალი ქსოვილის 70% - წყალია!); აგრეთვე საკმაოდ ხშირია ნახშირბადი, აზოტი, ფოსფორი, გოგირდი (შედიან დიდი მოლეკულების - ლიპიდების, ნახშირწყლების, ცილების, ნუკლეინური მჟავების შემადგენლობაში), მაღალ რეაქტიული ტუტე ატომები - კალიუმი, ნატრიუმი, აგრეთვე ჰალოგენები - ქლორი, იოდი. კალციუმი, რომელიც ძელის ქსოვილის აუცილებელი კომპონენტია, რკინა - სასიცოცხლო მნიშვნელოვანი ატომი ჟანგბადმატარებელ მოლეკულაში, კემგლობინში.

სურათზე 248 მოცემული ცხრილიდან ჩანს, რომ ყველაზე დაბალი იონიზაციის ენერგია - კალიუმის ატომის იონიზაციის ენერგიაა (4,3 ევ); კალიუმი გაცილებით იშვიათად ხვდება ცოცხალ ქსოვილებში ჟანგბადთან და წყალბადთან შედარებით, რომელთა იონიზაციის ენერგია 4-ჯერ მაღალია. ხილული სინათლის ფოტონების ენერგია (1,7 ევ-დან (წითელი) - 3 ევ-მდე (იასამნის ფერი)) არ არის საკმარისი ცოცხალ ორგანიზმში გავრცელებული ატომების იონიზაციისათვის, რაც ამ ატომების სტაბილურობას განაპირობებს.

H¹ 13.6eV								He² 25
Li³	Be		B	C⁶ 11.3	N⁷ 14.5	O⁸ 13.6	F⁹ 17.4	Ne¹⁰
Na¹¹ 5.1	Mg¹² 7.6		Al¹³	Si¹⁴	P¹⁵ 10.5	S¹⁶	Cl¹⁷ 13	Ar¹⁸
K¹⁹ 4.3	Ca²⁰ 6.1	Fe²⁶ 7.9						Kr³⁶
							I⁵³ 10.5	Xe⁸⁶

სურათი 248

ბიოლოგიურად მნიშვნელოვან ელემენტთა პერიოდული სისტემა.
თითოეულ უჯრაში მითითებულია ელემენტის ატომური რიცხვი და
იონიზაციის ენერგია (სიმბოლოს ქვემოთ)

(C. Guy "An Intrauduction to The Principles of Medical Imaging" Imperial College Press, 2005)

ულტრაიისფერი გამოსხივება.

ულტრაიისფერი გამოსხივება - ელექტრომაგნიტური ტალღები სიგრძით $\lambda = 10 - 400$ ნმ (ფოტონის ენერგიით 3-124 ევ).

განასხვავებენ ულტრაიისფერი გამოსხივების სამ უბანს: ახლო ულტრაიისფერი A უბანი - $\lambda = 400-315$ ნმ, ფოტონის ენერგია 3,1 - 3,94 ევ; შორი ულტრაიისფერი B უბანი - $\lambda = 280-315$ ნმ, ენერგია 3,94 - 4,43 ევ და ულტრაიისფერი C უბანი - $\lambda = 280-100$ ნმ, 4,43 - 12,4 ევ.

დედამიწის ატმოსფეროს ოზონის შრე შთანთქავს მზის ულტრაიისფერი გამოსხივების მოკლელტალოვანი უბნის დიდ ნაწილს, ასე რომ, დედამიწის ზედაპირს აღწევს ულტრაიისფერი სხივები, რომელთა 98,7%-ს შეადგენს A და B უბნის სხივები. მართალია, ოზონური შრე თანდათან თხელდება და ქვეყნებში, სადაც მწვავედ დგას "ოზონური ხერხელის" პრობლემა (ავსტრალია), განსაკუთრებით მაღალია ულტრაიისფერით ინდუცირებული კანცეროგენეზის გაურცელების რისკი. გაერთიანებული ერების გარემოს დაცვის პროგრამის მონაცემების თანახმად, ოზონური შრის 1%-ით გამოლევის შედეგად მოსალოდნელია არამელანომაური წარმოშობის კანის კიბოს შემთხვევათა 2-3%-ით ზრდა.

კანის გარუჯვა (გამუქება) განპირობებულია კანის უჯრედებში პიგმენტის, მელანინის დაჟანგვით ულტრაიისფერი სხივების მიერ. გარუჯვას იწვევს ულტრაიისფერი სხივების A და B უბანი. A-გამოსხივება ხასიათდება გაცილებით დაბალი ენერგიით. შესაბამისად, სხივები არ იწვევს დამწვრობას, მაგრამ აღწევს რა კანის ღრმა ფენებში იწვევს კანის ელასტიკურობის დაკარგვას; მელანოციტებში არსებული მელანინის სწრაფ დაჟანგვას და კანის გამუქებას. სხივებს შეუძლია კანის ძალზე საშიში სიმსივნის მელანომის გამოწვევა. A სხივებს შეუძლია დნმ-ს დაზიანება არაპირდაპირი გზით, მაღალრეაქტიული და მაღალტოქსიკური ჟანგბადის თავისუფალი რადიკალების წარმოქმნის მეშვეობით.

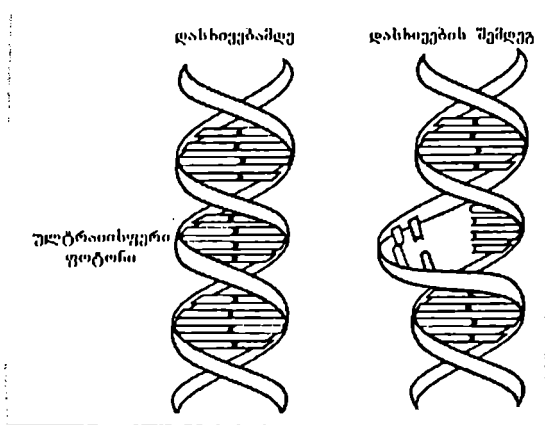
B სხივები ხელს უწყობს მელანოციტებში მელანინის გაძლიერებულ წარმოქმნას (მელანოგენეზი). მელანოგენეზი იწვევს გარუჯვის პროცესის გახანგრძლივებას და ვლინდება B-უბნის სხივების ზემოქმედებიდან 72 საათის შემდეგ. მელანოგენეზის შედეგად სირუჯე ხდება უფრო სტაბილური, რჩება უფრო ხანგრძლივი დროის განმავლობაში, კიდრე უკვე არსებული მელანინის დაჟანგვის შემთხვევაში. B-გამოსხივებას, როგორც შედარებით მაღალენერგეტიკულს, შეუძლია დნმ-ს დაზიანება, ნუკლეინურ მჟავებს შორის კოვალენტური ბმების დარღვევა ციტოზინური ფუძეების დიმერების წარმოქმნით.

B-უბნის სხივები იწვევს ორგანიზმის იმუნური სისტემის სუპრესიას, ელენთის ფუნქციის დათრგუნვას. ინტენსიური ულტრაიისფერი გამოსხივება დამაზიანებელია თვალებისათვის B-უბნის სხივები აბსორბირდება თვალის ქსოვილებში არსებულ სპეციფიკურ მოლეკულებზე, ქრომოფორებზე. ქრომოფორებზე აბსორბირებული სინათლის ენერგიის ხარჯზე შესაძლებელია რქოვანას, ბროლის ლინზის, რეტინის დაზიანება (რაც ხელს უწყობს კატარაქტას და სხვა დაავადებების განვითარებას). ტალღის სიგრძე 260-280 ნმ (B-სა და C-ს საზღვარი) მეტად საშიშია თვალებისათვის.

ულტრაიისფერი (A. B. C) სხივები იწვევს კანში კოლაგენის ბოჭკოების დარღვევას და, შესაბამისად, კანის ნაადრევ დაბერებას. A და B სხივებს შეუძლია კანში ვიტამინი A-ს დაშლა, რაც შემდგომში მძიმე დაავადებების განვითარებას განაპირობებს.

ულტრაიისფერი C-სხივები, როგორც მაღალენერგეტიკული სხივები, მეტად დამაზიანებელი მუტაგენური ეფექტებით ხასიათდება, იწვევს დნმ-ს პირდაპირ დაზიანებას (იონიზაციას), ნუკლეინურ მუყაებს (თიმიდინი) შორის ბმების დარღვევას და მუტაციების განვითარებას (სურათი 249).

ულტრაიისფერი B-სხივებისაგან დაცვა შესაძლებელია სპეციალური დამცავი ეკრანების საშუალებით; A-სხივებისაგან დაცვისათვის საკმარისია ტანსაცმელიც.



სურათი 249

ულტრაიისფერი სხივების მაიონიზებელი ეფექტი

ცნობილია აგრეთვე, რომ ულტრაიისფერი გამოსხივება დაბალი დოზებით ხელს უწყობს ადამიანის ორგანიზმში ეგრეთ წოდებული “ბედნიერების პორმონების” – ენდორფინების გამოყოფას, ადამიანის ორგანიზმში იმუნური სისტემის გაძლიერებას, აუზოქოზებს ფოსფატისა და კალციუმის ცელას, კუნთების გამაგრებას, ძელოვანი ქსოვილის გამძლეობის ზრდას და ა.შ., ააქტივებს D ვიტამინის სინთეზს.

ნუნ ედგავართ პარადიგმის წინაშე: რა მოაქვს ულტრაიისფერ სხივებს – სიკეთე და ჯანმრთელობა, თუ ავადმყოფობა და სიბერე?

როგორც ვიცით, ვიტამინი D-ს უკმარისობა ხელს უწყობს კანცეროგენეზის განვითარებას. ვიტამინი D-ს უკმარისობა იწვევს, აგრეთვე, კალციუმის აბსორბციის გაუარესებას და ძვლების დაავადების, ოსტეომალაციის განვითარებას (ძვლების ტკივილით, მოტეხილობებით); ვიტამინ D-ს უკმარისობა დამახასიათებელია გაფანტული სკლეროზის განვითარებისათვის. მაგრამ ეს ყველაფერი სულაც არ ნიშნავს, რომ მზეზე გარუჯვა კატეგორიულად სასარგებლოა. თურმე, ვიტამინი D-ს დღიური დოზის წარმოქმნისათვის საკმარისია მზეზე სულ რამდენიმე წუთით გაჩერება. ჭარბი მზის სხივების მიღება კი საშიშია ჯანმრთელობისათვის.

მრავალ ცოცხალ ორგანიზმს გააჩნია ელექტრომაგნიტური გამოსხივების სხვადასხვა უბნის აღქმის უნარი. მაგალითად, ფუტკრები და სხვა მწერები “ხედავენ” ულტრაიისფერი გამოსხივების უბანში, რაც ეხმარება მათ ყვავილებისგან ნექტარის მოგროვებაში.

სამედიცინო გამოყენება.

ულტრაიისფერი გამოსხივება გამოიყენება მედიცინაში კანის მკურნალობის (ფსორიაზი) მიზნით (B-სხივები - $\lambda = 311$ ნმ). მაღალენერგეტიკული C-სხივები (ულტრაიისფერი ნათურები) გამოიყენება სტერილიზაციისათვის (ქირურგიული ბლოკის, სამუშაო ადგილის, კვების პროდუქტების, წყლის).

რენტგენის (X) სხივები.

X სხივები აღმოჩენილ იქნა 1895 წელს ვილჰელმ კონრად რენტგენის მიერ ვაკუუმის მილში კათოდური სხივების კვლევისას. ერთი კვირის შემდეგ მან გადაიღო თავისი მეუღლის ხელის სურათი, რომელზედაც მკვეთრად ჩანს საქორწინო ბეჭედი.



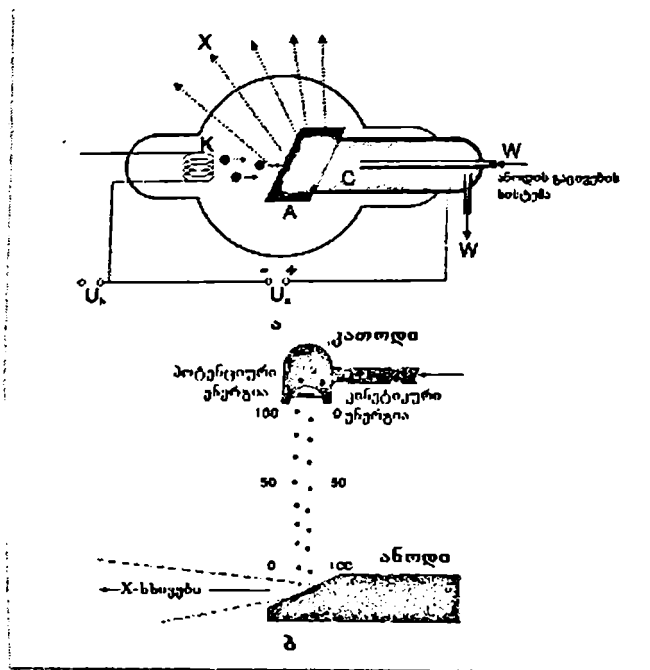
ვილჰელმ კონრად რენტგენი
1845 - 1923



ამ ფოტოსურათმა გამოიწვია დიდი ინტერესი სამეცნიერო წრეებში. რენტგენმა მის მიერ აღმოჩენილ სხივებს X-სხივები უწოდა. ამ აღმოჩენისათვის რენტგენს მიენიჭა ნობელის პრემია (1901 წ.). იგი იყო ამ პრემიის პირველი ფიზიკოსი ლაურეატი. ამავე წელს ინგლისში ბირმინგემის ექიმმა მკერაეს X-სხივებით გადაულო ხელის სურათი და აღმოაჩინა ნემსის ნატეხი. მაგრამ ამ სხივების ფართო გამოყენება (იგულისხმება კომპიუტერული ტექნოლოგიები) სამედიცინო ვიზუალიზაციაში დაიწყო აღმოჩენიდან დიდი ხნის შემდეგ, დაახლოებით 1960 წლიდან.

რენტგენის (X) სხივები - ელექტრომაგნიტური გამოსხივებაა ტალღის სიგრძით 0,01 - 10 ნმ (სიხშირეები 3×10^{16} - 3×10^{19} კც, ფოტონის ენერგია 129 ევ - 20 კეე).

რენტგენის სხივების მიღება შესაძლებელია ვაკუუმის მილში, რომელშიც მოთავსებულია კათოდი და ანოდი (სურათი 250).



სურათი 250

ა - რენტგენის მილის სქემატური გამოსახულება; ბ - თერმოელექტრული ემისიით წარმოქმნილი ელექტრონების ნაკადი და მათი ენერგიების გარდაქმნა

(Perry Sprawls "Physical principles of Medical Imaging" <http://www.sprawls.org/resources/>)

კათოდის ძირითადი ფუნქციაა ელექტრონების გამოსხივება (სურათი 249). ტიპობრივი კათოდი წარმოადგენს მცირე სპირალს, რომელიც დენის წყაროთი ხურდება (U_k). გახურებული კათოდი გამოასხივებს ელექტრონებს (თერმოელექტრული ემისია) კათოდსა და ანოდს შორის არსებული მაღალი ძაბვა (30 - 150 კილოვოლტი) უზრუნველყოფს ელექტრონების აჩქარებას და სპეციალური მოწყობილობის საშუალებით აძლევს მათ მიმართულებას ვიწრო კონის სახით ანოდისკენ.

ელექტრული ველის გავლენით იზრდება ელექტრონების მოძრაობის სიჩქარე და, შესაბამისად, კინეტიკური ენერგია (ელექტრონების პოტენციური ენერგია,

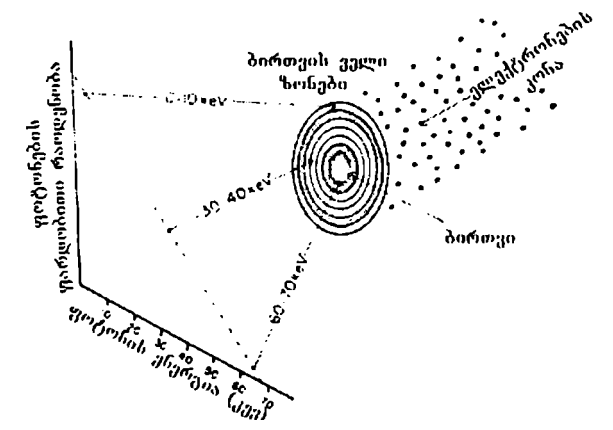
რომელიც დამოკიდებულია ანოდსა და კათოდს შორის ძაბვაზე, გარდაიქმნება კინეტიკურ ენერგიად).

მაქსიმალური კინეტიკური ენერგია, რომელსაც ელექტრონი შეიძენს ტოლია:

$$\frac{m_e v^2}{2} = eU,$$

სადაც m_e - ელექტრონის მასაა, v - მისი სიჩქარე ანოდთან, U - ძაბვა კათოდსა და ანოდს შორის.

როდესაც ელექტრონი აღწევს ანოდის ზედაპირს, მისი სიჩქარე სინათლის სიჩქარის ნახევარზე მეტია. ელექტრონები ანოდის ზედაპირზე განლაგებულ ატომებში (სახელდობრ, მისი ელექტრონებისა და ბირთვების ველში) განიცდის სწრაფ დამუხრუჭებას და კარგავენ კინეტიკურ ენერგიას; შემდეგ კინეტიკური ენერგია გარდაიქმნება X-სხივების ენერგიად (X-ფოტონებად) და სითბოდ. დამუხრუჭების აჩქარება (უარყოფითი) განსაკუთრებით ღიძია მაშინ, როდესაც ანოდის ნივთიერების (ქიმიური ელემენტის) ატომური რიცხვი მაღალია. ამ დროს ძლიერია ბირთვის და ელექტრონების ველის დამამუხრუჭებელი მოქმედება (იხილე სურათი 251, 252).

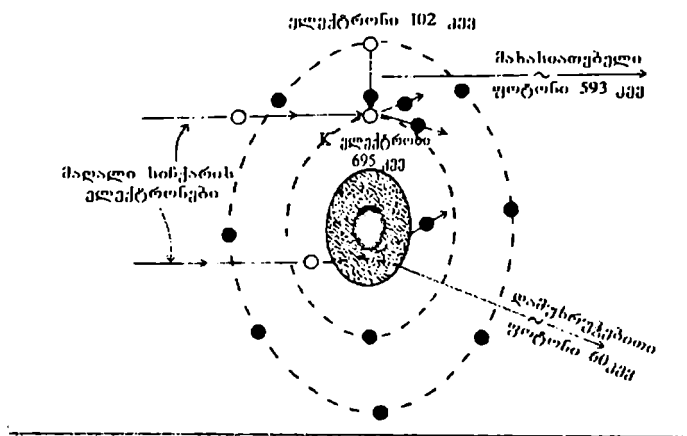


სურათი 252

სხვადასხვა ენერგიის ფოტონების წარმოქმნა ელექტრონების დამუხრუჭებით (Perry Sprawls "Physical principles of Medical Imaging" <http://www.sprawls.org/resources/>)

ელექტროდინამიკიდან ცნობილია, რომ აჩქარებულად მოძრავე დამუხრუჭული ნაწილაკი, ამ შემთხვევაში კი ელექტრონი, გამოასხივებს ელექტრომაგნიტურ ტალღებს. ელექტრომაგნიტური ველის მაქსიმალური თეორიის მიხედვით მარტივად შეიძლება აიხსნას ამის მექანიზმი. მართლაც, ანოდისკენ მოძრავე

ელექტრონების კონა წარმოადგენს ელექტრულ დენს, რომელსაც გარს აკრავს მაგნიტური ველი (დენიანი გამტარის მაგნიტური ველი). ანოდის ზედაპირზე ელექტრონების დამუხრუჭებისას როგორც დენი, ასევე მისი მაგნიტური ველის ინდუქცია (B) ნულამდე მცირდება. მაქსიმალური თეორიის მიხედვით კი ასეთი ველი (ე.ი. ცვლადი) მის ირგვლივ სივრცეში აღძრავს ცვლად ელექტრულ ველს, ეს უკანასკნელი ცვლად მაგნიტურ ველს და ა.შ. ამრიგად, სივრცეში გავრცელდება ელექტრომაგნიტური ტალღა. ჩვენ მიერ განხილულ შემთხვევაში კი დამუხრუჭებითი რენტგენული გამოსხივება.

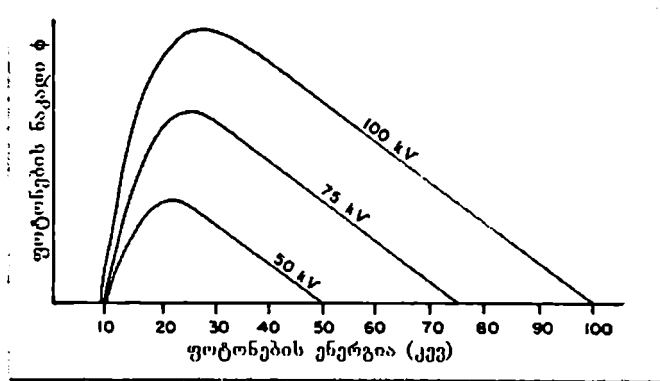


სურათი 252

მახასიათებელი და დამუხრუჭებითი გამოსხივების წარმოქმნა
(Perry Sprawls "Physical rinciples of Medical Imaging" <http://www.sprawls.org/resources/>)

ვინაიდან ელექტრონების კონაში სხვადასხვა ელექტრონი ატომბირთვიდან სხვადასხვა მანძილითაა დაშორებული, მათზე მოქმედი ძალები და, მაშასადამე, აჩქარებები, იქნება განსხვავებული. ამიტომ წარმოქმნილი ფოტონების ენერგია განსხვავებულია (შესაძლებელია მათი ენერგიის სპექტრის გამოთვლა). დამუხრუჭებითი რენტგენული გამოსხივების დროს წარმოქმნილი ფოტონების სიხშირეები იღებს ყველა შესაძლო მნიშვნელობებს, დამუხრუჭებითი რენტგენული გამოსხივების სპექტრი უწყვეტია (სურათი 253). მათ შორის მხოლოდ მცირე რაოდენობას გააჩნია მაღალი X-გამოსხივების შესაბამისი ენერგია (70 კეე-მდე). ეს გამოსხივება იწოდება, როგორც დამუხრუჭებითი რენტგენის გამოსხივება. ასეთი გამოსხივების მისაღებად ელექტრონებს უნდა გააჩნდეთ 40-60კეე-ის ტოლი ენერგია, რასაც უზრუნველყოფს კათოდსა და ანოდს შორის მოდებული 40-60 კე ძაბვა.

რენტგენული გამოსხივების ნაკადი გამოითვლება ფორმულით $\Phi = kIU^2Z$, სადაც U და I ძაბვა და დენის ძალაა რენტგენულ მილში, Z - ანოდის ნივთიერების ატომის რიგითი ნომერია, $k = 10^{-9}$ ვოლტი⁻¹ - პროპორციულობის კოეფიციენტი.



სურათი 253

რენტგენულ მილში ელექტრონების დამუხრუჭებით წარმოქმნილი ფოტონების ენერგიების სპექტრი

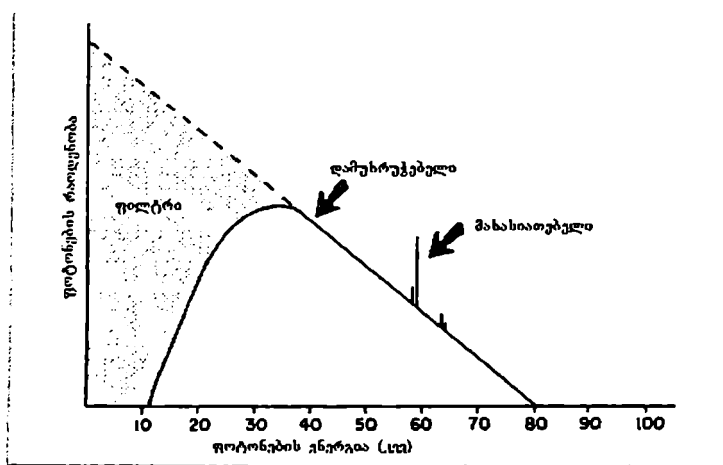
(Perry Sprawls "Physical principles of Medical Imaging" <http://www.sprawls.org/resources/>)

რენტგენულ მილში კათოდსა და ანოდს შორის ძაბვის გაზრდა იწვევს გამოსხივების სპექტრული შემადგენლობის ცვლილებას, კერძოდ, ტალღის სიგრძის წანაცვლებას მოკლე ტალღისკენ, რომელსაც უფრო მეტი განტოლის უნარი გააჩნია, ე.ი. უფრო ხისტია გრძელტალღოვან "რბილ" გამოსხივებასთან შედარებით.

ელექტრონების კინეტიკური ენერგიის მხოლოდ მცირე ნაწილი ($\approx 3\%$) გამოსხივდება X-სხივების სახით, დანარჩენი (97%) გადაეცემა ანოდს და გამოიყოფა სითბური ენერგიის სახით. იმისათვის, რომ ანოდი არ გადახურდეს და მწყობრიდან არ გამოვიდეს, საჭიროა სამიზნე (რომელსაც უშუალოდ ეცემა ელექტრონების კონა) ხასიათდებოდეს დნობის მაღალი ტემპერატურით, უნდა ბრუნავდეს (სითბოს გადანაწილების მიზნით) და იყოს დაკავშირებული მაღალი სითბოგამტარობის მეტალთან (მაგალითად, ვოლფრამი სპილენძთან), რომლის მოცულობაში მუდმივად ცირკულირებს სითხე (სითბოს გაცემა). რენტგენის მილში, უმეტეს შემთხვევაში გამოიყენება ვოლფრამის სამიზნე (დნობის ტემპერატურა -3400°C , ატომური რიცხვი $Z = 74$), ან ვოლფრამისა და რენიუმის შენადნობი. ასეთი კონსტრუქციის რენტგენული მილი იძლევა დამუხრუჭებით რენტგენულ გამოსხივებას, რომელსაც იყენებენ მედიცინაში.

თუ კათოდსა და ანოდს შორის ძაბვას გავზრდით, ვიდრე ეს იყო დამუხრუჭებითი გამოსხივების დროს, მაშინ ამ გამოსხივების უწყვეტ სპექტრში

ჯერ განდება 0 სერიის სპექტრული ხაზები, რომელთა მდებარეობა და ურთიერთ-განლაგება არ იცვლება. ძაბვის კიდევ უფრო მომატებისას განდება N სერიის, შემდეგ M, L და ბოლოს K, სულ ხუთი სპექტრული სერია, რომლებიც შეადგენენ ე.წ. **მახასიათებელ რენტგენულ გამოსხივებას** (სურათი 253, 254).



სურათი 254

ფოტონების რაოდენობრივი განაწილება ღამუხრუჭებითი და მახასიათებელი რენტგენული გამოსხივების დროს
(Perry Sprawls "Physical principles of Medical Imaging" <http://www.sprawls.org/resources/>)

როგორც უკვე ვიცით, ყველა ატომში ელექტრონი ხასიათდება სპეციფიკური ბმის ენერგიით, რომელიც დამოკიდებულია ატომის ზომაზე (ატომურ რიცხვზე Z). და ელექტრონის მდებარეობაზე (ენერგეტიკულ დონეზე). ატომბირთვთან შეკავშირების (ბმის) ენერგია იმ ენერგიის ტოლია, რომელიც აუცილებელია ელექტრონის ატომიდან მოცილებისათვის (იონიზაციის ენერგია). ელექტრონის ატომთან კავშირის ენერგია ასრულებს ძირითად როლს მახასიათებელი გამოსხივების ფორმირებაში. მახასიათებელი გამოსხივების მიზეზი – მაღალი სიჩქარით მოძრავი ელექტრონების ატომის ორბიტალურ ელექტრონებთან შეჯახებაა. თუ აჩქარებული ელექტრონის კინეტიკური ენერგია უფრო მაღალია, ვიდრე ატომის ელექტრონის ბმის ენერგია, ელექტრონი ტოვებს ატომს. შესაბამისად, ატომის ელექტრონულ ორბიტალებზე ჩნდება ვაკანსია, რომელიც შემდგომში ($10^{-8} - 10^{-9}$ წმ) ივსება სხვა უფრო მაღალენერგეტიკული ელექტრონების მიერ, ხოლო ამ ელექტრონული გადასვლის შედეგად გამოყოფილი ენერგიის სხვაობა $\Delta E = h\nu$ გამოსხივდება ფოტონის სახით. სახელწოდება, **მახასიათებელი**, განპირობებულია იმ გარემოებით, რომ გამოსხივებული ფოტონის ენერგია დამოკიდებულია ანოდის ქიმიურ შემადგენლობაზე (ელემენტებზე), მის აღნაგობაზე.

ელემენტების რიგითი ნომრის (Z -ის) ზრდასთან ერთად იზრდება ბირთვის მხრიდან მოქმედი ძალა. გამოსხივებული სპექტრული ხაზის სიხშირე (ν) Z -ის პროპორციულია (მოზლის კანონი):

$$Z \cdot \sqrt{\frac{\nu}{R}} = A(Z - B)$$

სადაც A და B მუდმივებია; $R = \frac{m_e e^4}{8\epsilon_0^2 h^3} = 3,288 \times 10^{15} \text{ წმ}^{-1}$ - რიდბერგის მუდმივა.

ოპტიკური სპექტრისგან განსხვავებით რენტგენული გამოსხივების სპექტრი მოცემული ელემენტისთვის ყოველთვის ერთნაირია, მიუხედავად იმისა, რომელ ქიმიურ ნაერთშია იგი. მაგალითად, O , O_2 , H_2O და ა.შ. აქ ჟანგბადის რენტგენული სპექტრი ყველგან ერთი და იგივეა. სწორედ ამიტომ უწოდეს ამ გამოსხივებას *მახასიათებელი*. რენტგენის მიღებაში ახდენენ დაბალი ენერგიის X -ფოტონების ფილტრაციას. ენერგეტიკული სპექტრი დამოკიდებულია ანოდის სამიზნის ფენის სისქესა და მასალაზე. X -ფოტონების მაღალენერგეტიკული სპექტრი განისაზღვრება აგრეთვე კათოდსა და ანოდს შორის ძაბვით, ვინაიდან ელექტრონების ენერგია ანოდთან შეჯახების დროს დამოკიდებულია ამ პარამეტრზე ე.ი. ძაბვაზე. ფოტონების გადანაწილება მათი ენერგიის მიხედვით ნაჩვენებია სქემაზე (სურათი 254).

რენტგენული სხივები ენერგიით 0,12 - 12 კეე (ტალღის სიგრძე 10 - 0,1 ნმ) ცნობილია რბილი X -სხივების სახელწოდებით; 12 - 120 კეე (0,1 - 0,01 ნმ) - ხისტი X სხივები. სხვადასხვა ნივთიერებაში გავლისას X -სხივების კვანტები ურთიერთქმედებს ატომებთან (ელექტრონებთან და ბირთვებთან) და შეუძლია იონიზაციისა. და სხვა ეფექტების გამოწვევა თავისუფალი ელექტრონებისა და შედარებით დაბალი ენერგიის ფოტონების წარმოქმნით; ნაწილი X -სხივებისა ატომებთან ურთიერთქმედების შედეგად განიცდის გაბნევას და იცვლის გავრცელების მიმართულებას. შედეგად პირველადი X -სხივის ინტენსივობა მცირდება, ამ მოვლენას *სხივების "შესუსტება"* ეწოდება.

ცხრილში ნაჩვენებია X -სხივების შესუსტება სხვადასხვა ბიოლოგიურ ქსოვილში (ცხრილი 26).

ცხრილი 26

X სხივების შესუსტება სხვადასხვა ბიოლოგიურ ქსოვილში

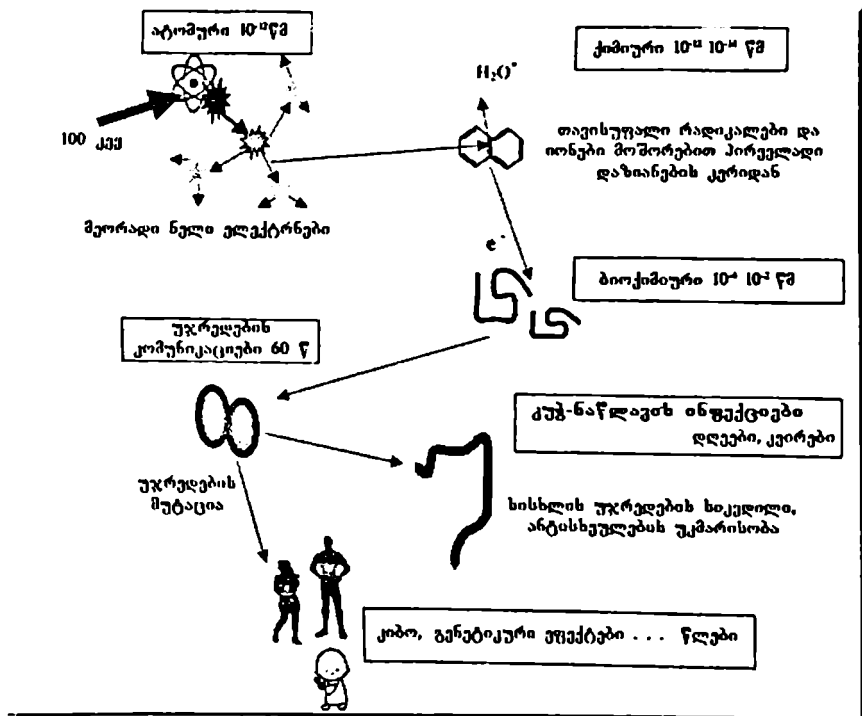
ნივთიერება, ქსოვილი	'შესუსტება μ (სმ ⁻¹)	სიმკრივე (გ.სმ ³)
ირი	0,0001	0,00012
წყალი	0,1687	1
კუნთი	0,18	1,032
სისხლი	0,178	1,036
ძვალი	0,48	1,84
ტვინის თეთრი ნივთიერება	0,1720	1,0274
ტვინის რუხი ნივთიერება	0,1727	1,0355

γ-სხივები

γ-სხივები ყველაზე მაღალი სიხშირის (შესაბამისად, მაღალი ენერგიის და მოკლე ტალღის სიგრძის) ელექტრომაგნიტური გამოსხივებაა. γ-სხივების წყაროა – ბირთვული რეაქციები, სუბატომური ნაწილაკების ურთიერთქმედება, და სხვა.

γ-სხივები ისევე, როგორც X- და ულტრაიისფერი სხივები მიეკუთვნება მაიონიზებელ რადიაციას. γ-სხივების მაღალი ენერგიის გამო მათი მაიონიზებული ეფექტი ყველაზე ძლიერია.

სურათზე 255 ნაჩვენებია სხვადასხვა ტიპის მაიონიზებული რადიაციის ბიოლოგიური ეფექტების გამოვლინებისათვის საჭირო დრო.



სურათი 255

მაიონიზებული რადიაციის ბიოლოგიური ეფექტები

(C. Guy "An Intrauduction to The Principles of Medical Imaging" Imperial College Press, 2005)

როგორც ჩანს, უშუალოდ მაიონიზებული გამოსხივების შემდეგ (10^{-12} ჯ) ელინდება ქსოვილის დაზიანება ატომურ დონეზე: წარმოიქმნება მეორეული ფოტოელექტრონები, იონები და მეორეული ელექტრომაგნიტური ფოტონების (უფრო დაბალენერგეტიული) გამოსხივება. ეს უკანასკნელნი ვრცელდებიან

ბიოლოგიურ ქსოვილებში, რასაც თან ახლავს მსგავსი ეფექტების გამოწვევა და, აგრეთვე, ქიმიური რეაქციების ინიციატორი (10^{-12} – 10^{-4} წმ) წყლის რადიოლიზის და ჟანგბადის მაღალრეაქტიული ნაერთების (დაუწყველებელი ელექტრონის შემცველი ჟანგბადის ნაერთების) წარმოქმნით. ისინი (ჟანგბადის მაღალრეაქტიული ნაერთები) თავის მხრივ იწვევენ ბიოლოგიური მაკრომოლეკულების (ცილების, ლიპიდების, ნახშირწყლების, ნუკლეინური მჟავების (10^{-1} – 10^{-2} წმ), სუბჯვრედული და უჯრედული სტრუქტურების დაზიანებას (60 წმ, ქსოვილების და ორგანოების დისფუნქციას – ინტენსიტიური ინფექციების, სისხლის უჯრედების კედლამას, ანტისხეულების უკმარისობის განვითარებას (დღეები, კვირები), შემდეგ მუტაციებს, კანცეროგენებს, კატარაქტას, ხანგრძლივი გენეტიკური დეფექტების განვითარებას.

უნდა აღინიშნოს, რომ მაიონიზებელ ელექტრომაგნიტურ გამოსხივებას შეუძლია იონიზაციის გამოწვევა როგორც პირდაპირი გზით, უშუალოდ სამიზნე მოლეკულების ატომებთან ურთიერთქმედების და შიგამოლეკულური ბმების დარღვევის გზით (სურათი 256ა), ასევე არაპირდაპირი ეფექტების – წყლის მოლეკულებთან ურთიერთქმედების შედეგად წყლის მოლეკულებიდან ჟანგბადის რეაქციული ნაერთების წარმოქმნის მეშვეობით (სურათი 256ბ).

ჟანგბადის რეაქტიული ნაერთების ხანმოკლე სიცოცხლის ხანგრძლივობის გამო (10^{-10} წმ) დნმ-ს მოლეკულების გარშემო (2-36მ მანძილზე) წარმოქმნილი ეს ნაერთები აზიანებს დნმ-ს და იწვევს მაიონიზებელი რადიაციის არაპირდაპირ ეფექტებს.

აქვე უნდა აღინიშნოს, რომ წყლის რადიოლიზის პროდუქტების არაპირდაპირი დამაზიანებელი ეფექტები (სურათი 256გ) დამახასიათებელია ხანგრძლივი არამაიონიზებელი რადიაციისათვის (რადიოტალღები), რაც საფუძვლად უდევს არამაიონიზებელი გამოსხივების მიერ ინდუცირებული მავნე ეფექტების განვითარებას.

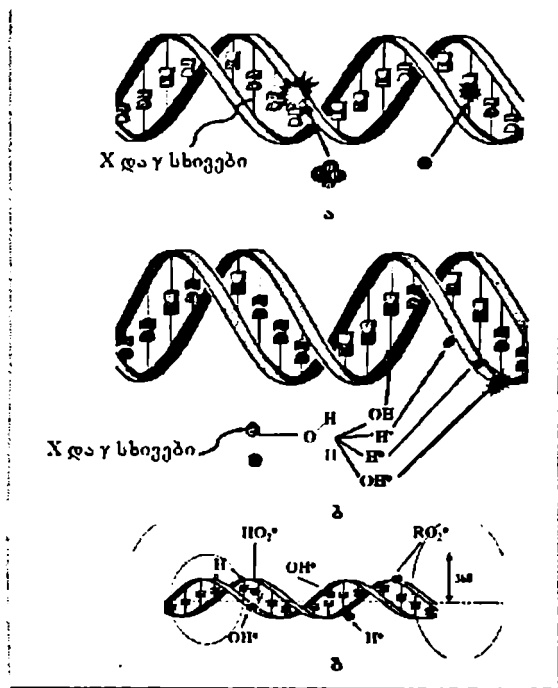
საკმაოდ ფართოა ორადიაციის გამოყენების სფერო მედიცინაში (რადიოდიანოსტიკასა და რადიოთერაპიაში).

რადიოდიანოსტიკაში რადიოაქტიური ნიშანდებელი ატომები შეჰყავთ ორგანიზმში; სისხლით ეს ნივთიერება ტრანსპორტირდება სამიზნე ორგანოში, ან დაავადების კერაში. რადიოაქტიური ნიშნაკი გამოასხივებს ორგანიზმში ფიქსირდება სხეულის გარეთ. გამოსხივების ინტენსივობის მიხედვით მიიღება ინფორმაცია რადიოაქტიურად მონიშნული ნივთიერების სხეულში განაწილების შესახებ, რაც მიუთითებს სისხლის მიმოქცევის, ამ ნაერთის ამა თუ იმ ქსოვილში აკუმულაციისა ან დაშლის ინტენსივობის და, მაშასადამე, მეტაბოლიზმის დონის შესახებ.

მაშასადამე, ორგანიზმისა – ფუნქციური დიანოსტიკის მეთოდია, რომელიც იძლევა ინფორმაციას ორგანოებსა და ქსოვილებში მეტაბოლიზმის ინტენსივობისა და მიმართულების შესახებ.

ორგანიზმში გამოიყენება თირორიდული პათოლოგიების დიანოსტიკისათვის (რადიოაქტიური იოდი 123 I), თავის ტვინში სისხლის მიმოქცევის (რადიოაქტიური ჟანგბადი 15 O), თავის ტვინის მეტაბოლიზმის ინტენსივობის შესასწავლად და ონკოლოგიურ კვლევებში (ფლიროიდინი 19 F-შემცველი ფლუოროდო-ოქსიგლუ-

კოზა - იძლევა ინფორმაციას ქსოვილში გლუკოზის მოხმარების ინტენსივობის შესახებ).

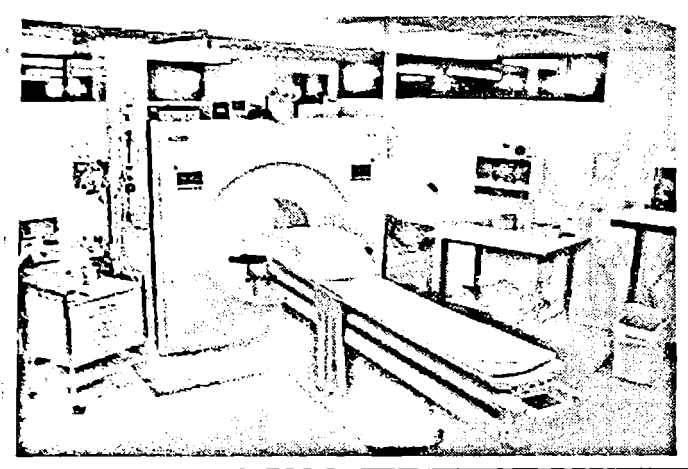


სურათი 256

ა - მაღალენერგეტიკული ფოტონი უშუალოდ იწვევს დნმ-ს მოლეკულის იონიზაციას (პირდაპირი ეფექტი); ბ, გ - მაღალენერგეტიკული ფოტონი იწვევს წყლის მოლეკულის იონიზაციას (წყლის რადიოლიზი). შემდეგ ქანგბადის თავისუფალი რადიკალები ურთიერთქმედებს დნმ-ს მოლეკულასთან (არაპირდაპირი ეფექტი)

რადიოლიაგნოსტიკისათვის რადიოიზოტოპების შერჩევისას უარყოფითი კიპერეფექტების პრევენციის მიზნით ყურადღებას აქცევენ იზოტოპის ნახევარ-დაშლის პერიოდს (უნდა იყოს საკმარისად მოკლე) და გამოსხივებული ენერგიის ინტენსივობას (უნდა იყოს საკმარისად დაბალი). თანამედროვე γ-ვიზუალიზაციის მეთოდებია - პოზიტრონემისიური ტომოგრაფია (PET) (სურათი 257 და ერთეული ფოტონის ემისიური კომპიუტერული ტომოგრაფია (SPECT).

γ-თერაპია ფართოდ გამოიყენება ონკოლოგიაში სიმსივნეების დაშლის მიზნით.



სურათი 257
პოზიტრონემისიური ტომოგრაფი (PET)

IX2 ოპტიკური კვანტური გენერატორი – ლაზერი

ცნობილია, რომ ატომების მიერ ელექტრომაგნიტური ტალღების (ქვანტების) გამოსხივება ყოველთვის დაკავშირებულია მათი ენერგეტიკული მდგომარეობის ცვლილებასთან. სახელდობრ, როდესაც ატომი გადადის E_2 მდგომარეობიდან დაბალ E_1 მდგომარეობაში, $h\nu = E_2 - E_1$ ენერგიის კვანტი გამოსხივდება, შებრუნებულ პროცესში – შთაინთქმება. როდესაც ატომი E_2 ენერგეტიკული დონიდან გადადის E_1 დონეზე ყოველგვარი ზემოქმედების გარეშე, მაშინ ასეთ გამოსხივებას ეწოდება *თავისთავადი*, ანუ *სპონტანური* გამოსხივება. ამ გამოსხივების ხანგრძლივობა შეადგენს დაახლოებით $10^{-8} - 10^{-9}$ წამს.

ზოგიერთ შემთხვევაში აგზნებული ატომები თავისთავად ვერ გადადის ძირითად ენერგეტიკულ დონეზე, ისინი რჩებიან ე.წ. *მეტასტაბილურ* (ე. ი. თითქმის სტაბილურ) ენერგეტიკულ დონეზე, რაც დამახასიათებელია ზოგიერთი ატომისათვის. ძირითად დონეზე გადმოსვლას „კრძალავს“ რომელიმე ქვანტური რიცხვის (მაგალითად, მოძრაობის რაოდენობის) შენახვის კანონი.

ძირითად დონეზე გადასვლისათვის აუცილებელია ატომზე გარეშე ზემოქმედება. ეს ზემოქმედება შეიძლება განხორციელდეს გარკვეული ენერგიის ქვანტის დახმარებით. კვანტის ენერგია უნდა იყოს მეტასტაბილურ დონესა და ძირითად დონეს შორის ენერგიების სხვაობის ($h\nu = E_n - E_m$) ტოლი. ასეთ პირობებში იძულებით გამოსხივდება სინათლის კვანტი, რომლის ენერგია

ტოლია $h\nu = E_n - E_m$ და მასთან ერთად სინათლის ის კვანტი, რომელმაც აიძულა ატომი გადმოსულიყო ძირითად დონეზე. ამრიგად, მოხდება ორი იდენტური კვანტის გამოსხივება - კვანტის გამრავლება. იძულებითი გამოსხივების ხანგრძლივობა გაცილებით მეტია სპონტანური გამოსხივების ხანგრძლივობაზე (10^{-3} წამამდე). აღსანიშნავია, რომ ეს ორი კვანტი თანხედება ერთმანეთს არა მხოლოდ ენერგიებით, არამედ მათ აქვთ ერთი და იგივე გავრცელების მიმართულება და რხევის ფაზა. ეს უკანასკნელი ნიშნავს, რომ პირველადი და მეორეული გამოსხივება კოჰერენტულია.

ჩვეულებრივ პირობებში დაბალ ენერგეტიკულ დონეზე (E_m) ატომების უფრო მეტი რაოდენობა იმყოფება. ასეთ განაწილებას ნორმალური განაწილება ეწოდება და ატომთა „დასახლება“ ბოლცმანის კანონით გამოისახება:

$$N_i = c e^{-\frac{E_i}{kT}},$$

სადაც N_i - ატომების საშუალო რიცხვია E_i ენერგეტიკულ დონეზე, c - ნორმირების კოეფიციენტი, k - ბოლცმანის მუდმივა, T - აბსოლუტური ტემპერატურა. თუ ასეთ გარემოში გადის $h\nu = E_n - E_m$ ენერგიის კვანტი, ატომი შთანთქმავს მას და E_m დონიდან E_n დონეზე გადავა. მაშასადამე, ამ შემთხვევაში გარემოში გამავალი სინათლის ინტენსივობა შემცირდება. ინტენსივობის ეს შემცირება აღიწერება ბუგერის კანონით:

$$I = I_0 e^{-\beta l},$$

სადაც I_0 - სინათლის საწყისი ინტენსივობაა, I - ნივთიერების l სისქეში გასული სინათლის ინტენსივობა, ხოლო β - შთანთქმის კოეფიციენტი.

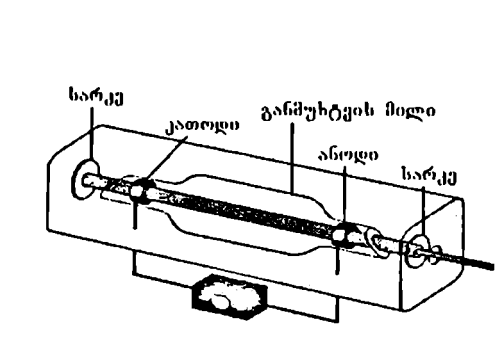
დაეუშვათ, რომ E_n მაღალენერგეტიკულ დონეზე მყოფი აგზნებული ატომების რიცხვი უფრო მეტია, სხვანაირად რომ ვთქვათ, ატომთა „დასახლება“ ნორმალურის შებრუნებულია (*ინვერსიული დასახლება*). ინვერსიული დასახლება აღიწერება ბოლცმანის განაწილების შებრუნებული კანონით. *ინვერსიული დასახლება* ნიშნავს, რომ ატომების დიდი რაოდენობა (ნახევარზე მეტი) აგზნებულ მდგომარეობაშია. ეს კი შესაძლებელია მხოლოდ მაშინ, როდესაც გარემოს ატომებისათვის დამახასიათებელია მეტასტაბილური (თითქმის სტაბილური) დონე. ცხადია, ასეთ გარემოში კვანტების მოძრაობისას უფრო ხშირად ადგილი იქნება ატომების E_n დონიდან E_m ენერგეტიკულ დონეზე გადასვლას. ე. ი. გამოსხივებული კვანტების რაოდენობა უფრო მეტი იქნება შთანთქმული ქვანტების რაოდენობაზე. ეს კი გამოიწვევს გარემოდან გასული ინტენსივობის გადიდებას ($I_n > I_0$) - სინათლის გაძლიერებას. ეს არის კვანტური გენერატორების მუშაობის ფიზიკური საფუძველი.

იძულებითი ანუ ინდუცირებული გამოსხივება მიიღება კვანტურ გენერატორებში. პირველი ზემოაღნიშნული სიხშირის კვანტური გენერატორი (მაზერი) კონსტრუირებული იყო 1955 წელს ერთმანეთისაგან დამოუკიდებლად რუსი ნ.

გ. ბასოვის, ა. მ. პროხოროვისა და ამერიკელი ჩ. ტაუნსის მიერ, რისთვისაც მათ მიენიჭათ ნობელის პრემია.

1960 წელს შეიქმნა პირველი კვანტური გენერატორი ხილული სინათლის სპექტრის დიაპაზონში – *ოპტიკური კვანტური გენერატორი – ლაზერი* (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation). დღეისათვის არსებობს მრავალი სახის ლაზერი – იმპულსური, უწყვეტი გამოსხივების და სხვა.

ლაზერის მუშაობის პრინციპი განვიხილოთ გაზური ლაზერის მაგალითზე (სურათი 258).



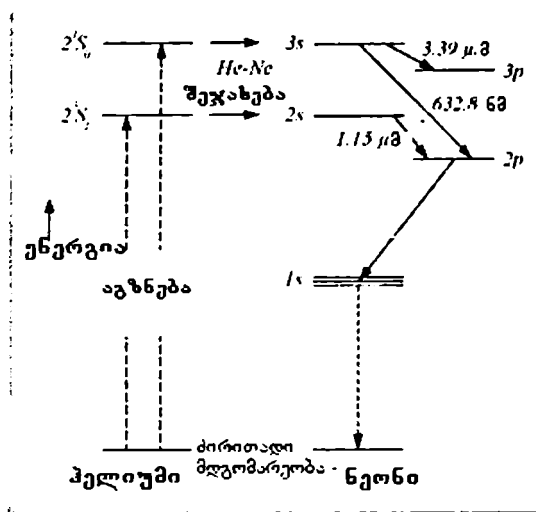
სურათი 258

ლაზერი. ლაზერის აგებულების პრინციპული სქემა

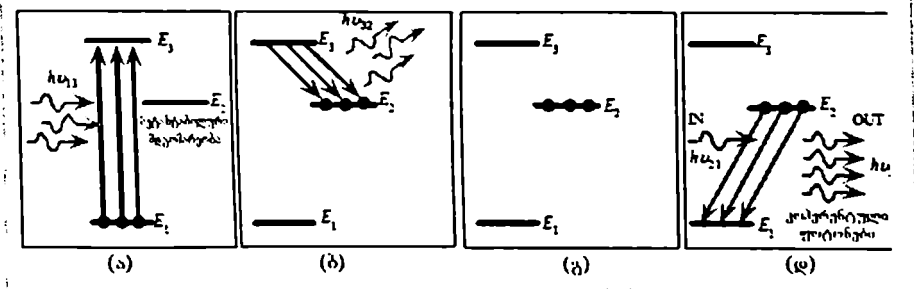
გაზური ლაზერის ძირითადი ელემენტია განმუხტვის მილი, რომელიც შეესაბამება ჰელიუმით (He) და ნეონით (Ne). ლაზერულ გამოსხივებას იძლევა ნეონი. ხოლო ჰელიუმის ატომები დამხმარე როლს თამაშობს და იწვევს ნეონის ატომების ინვერსიულ „დასახლებას“. ჰელიუმის რაოდენობა 10-ჯერ აღემატება ნეონის რაოდენობას. ჰელიუმის 2S დონე ენერგეტიკულად შეესაბამება ნეონის 3S დონეს (სურათი 259, 260).

განმუხტვის მილში ელექტრული განმუხტვის შედეგად ჰელიუმის ატომი გადავა 1S-დან მაღალ 2S ენერგეტიკულ დონეზე, რომელიც მისთვის მეტასტაბილურია და ამიტომ სპონტანურად ვერ დაუბრუნდება 1S დონეს, ე.ი. 2S დონეზე ხდება მათი დაყოვნება $t \approx 10^{-5}$ წმ-ით. ამ დროის განმავლობაში ჰელიუმის ატომები სითბური მოძრაობის გამო ეჯახება ნეონის ატომებს და გადასცემს მათ ჭარბ ენერგიას, რის შედეგად მიმდინარეობს ორი იძულებითი გადასვლა: ჰელიუმის ატომში $2S \rightarrow 1S$, ხოლო ნეონის ატომში $1S \rightarrow 3S$. ამის შემდეგ ნეონის ატომში ორი სპონტანური გადასვლა ხდება $3S \rightarrow 2P$ და $2P \rightarrow 1S$. ლაზერულ გამოსხივებას გვაძლევს $3S \rightarrow 2P$ გადასვლა (სურათი 260დ).

რადგან ლაზერულ გამოსხივებაში უნდა დომინირებდეს $3S \rightarrow 2P$ გადასვლა, ამიტომ საჭიროა ნეონის ატომების 3S დონის განუწყვეტლივ შევსება ელექტრონებით, რასაც უზრუნველყოფს ჰელიუმის ატომები. სწორედ ამაში მდგომარეობს



სურათი 259
ენერგიის გარდაქმნა პელიუმ-ნეონურ ლაზერში

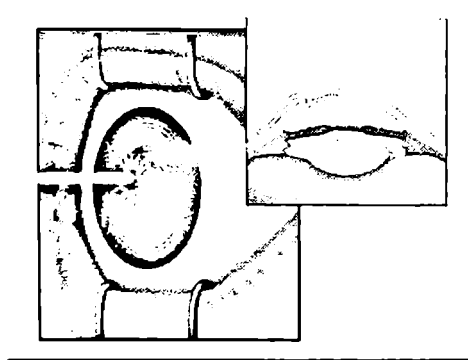


სურათი 260
ლაზერის მუშაობის პრინციპული სქემა.

ატომი E_1 ძირითადი მდგომარეობიდან $h\nu_{13}$ ენერგიის ფოტონის შთანთქმის შედეგად გადადის E_3 ენერგეტიკულ დონეზე ($h\nu_{13} = E_3 - E_1$); ბ - E_3 დონეზე მყოფი ატომი სწრაფად გამოასხივებს ფოტონს ($h\nu_{32} = E_3 - E_2$) და გადადის მეტასტაბილურ E_2 ენერგეტიკულ დონეზე; გ - ენიიდან E_2 ენერგეტიკულ დონეზე ელექტრონის სიციცხლის ხანგრძლივობა დიდია, ამ დონის „დასახლება“ სწრაფად იზრდება და ხდება ინვერსია E_2 -სა და E_1 -ს შორის; დ - ფოტონის სპონტანური გამოსხივება ($h\nu_{21} = E_2 - E_1$).

პელიუმის დამხმარე როლი, მისი მეტასტაბილური 2S დონე განაპირობებს ნეონის ატომების 3S დონის ინვერსიულ დასახლებას. აუცილებელია ნეონის 2P დონის განტვირთვა. ამ მიზნით განმუხტვის მილის ზომები ისეა შერჩეული, რომ იძულებით გამოსხივებული ფოტონები მათი მოძრაობის მიმართულების მიხედვით ზოგი გამოდის მილის გვერდებიდან, ზოგი სარკეებიდან მრავალჯერადი არეკვლის შედეგად თვითონ იწყებს იძულებით გადასვლებს. ამრიგად, ფოტონების სარკის ზედაპირის პერპენდიკულარული ნაკადი მაქსიმალურად ძლიერდება და განუწყვეტლივ გამოდის ნახევრად გამჭვირვალე სარკიდან (სურათი 258). ამრიგად, პელიუმ-ნეონური ლაზერი იძლევა დროში უწყვეტ გამოსხივებას. ლაზერული გამოსხივება მკაცრად მონოქრომატულია ($\lambda = const$, $\Delta\lambda = 0.01$ ნმ). კოპერენტულია და ბრტყლად პოლარიზებული, გაანინია საკმაოდ დიდი ლოკალიზებული ენერგია.

ლაზერული გამოსხივება გამოიყენება მედიცინაში, კერძოდ, ქირურგიაში, როგორც უსისხლო სკალპელი. ეიწრო ნაკადად კონცენტრირებული დიდი ენერგიის წყალობით ის „ჭრის“ ქსოვილს და ამავე დროს ახდენს ცილის კოაგულაციას, ჭრილობა უსისხლოა, არ საჭიროებს სტერილიზაციას. ლაზერული სხივი შეუცვლელია ოფთალმოლოგიაში. კერძოდ, გლაუკომის მკურნალობისას უწერილესი „ნახერეტის“ (50 - 100 მკმ) შესასრულებლად (სურათი 261) და სხვა.



სურათი 261

ლაზერული სხივი შეუცვლელია ოფთალმოლოგიაში. კერძოდ, გლაუკომის მკურნალობისას უწერილესი „ნახერეტის“ (50 - 100 მკმ) შესასრულებლად

IX.3 ფოტობიოლოგიური პროცესები

ბიოლოგიურ სისტემებში მიმდინარე პროცესებს, რომლებიც ხორციელდება ელექტრომაგნიტური ენერგიის შთანთქმით ფოტობიოლოგიური პროცესები ეწოდება. ფოტობიოლოგიური პროცესები იყოფა სამ ძირითად ჯგუფად:

I - ფოტოსინთეზის პროცესები - ბიოლოგიურად მნიშვნელოვანი ნივთიერებების სინთეზი მზის ელექტრომაგნიტური ენერგიის შთანთქმის შედეგად. ნახშირწყლების ფოტოსინთეზი ერთადერთი ბიოლოგიური პროცესია, რომლის დროსაც ხორციელდება მთელი ბიოლოგიური სისტემის თავისუფალი ენერგიის ზრდა.

II - ცხოველების მხედველობის, ფოტოტაქსისის, ფოტოტროპიზმის, ფოტოპერიოდიზმის პროცესები (ეს პროცესები არ არის დაკავშირებული სისტემის ენერგიის ზრდასთან და ქიმიურ სინთეზთან). ეს პროცესები ხორციელდება ელექტრომაგნიტური ენერგიის მონაწილეობით და მდგომარეობს ორგანიზმის მიერ ინფორმაციის მოპოვებაში გარემომცველი არის შესახებ. ინფორმაციის გადამტანის როლს სინათლე (ელექტრომაგნიტური გამოსხივება) ასრულებს.

III - პროცესები, რომლებიც იწვევენ ცოცხალი სტრუქტურის დაზიანებას, ბიოლოგიურად მნიშვნელოვანი ნაერთების დესტრუქციას. შედეგად შესაძლებელია ორგანიზმში სასიცოცხლო პროცესების დათრგუნვა.

ყველა ამ პროცესს აერთიანებს მათი საწყისი ფოტოფიზიკური და ფოტოქიმიური სტადიების მსგავსება.

ყველა ფოტობიოლოგიურ პროცესს საფუძვლად უდევს ფოტოქიმიური რეაქციები. ამ რეაქციათა რიცხვს მიეკუთვნება: ფოტოიონიზაცია (ელექტრონის ამოღება მოლეკულიდან (ატომიდან) გამოსხივების კვანტის მიერ; შედეგად წარმოიქმნება ელექტრონები და იონები), ფოტოაღდგენა და ფოტოდაჟანგვა, და ა. შ..

ფოტოქიმიური რეაქციები მიმდინარეობს ორ სტადიად:

I სტადია - სუფთა ფიზიკური პროცესია - ენერგიის კვანტის შთანთქმა მოლეკულის მიერ. მოლეკულა გადადის აგზნებულ მდგომარეობაში :



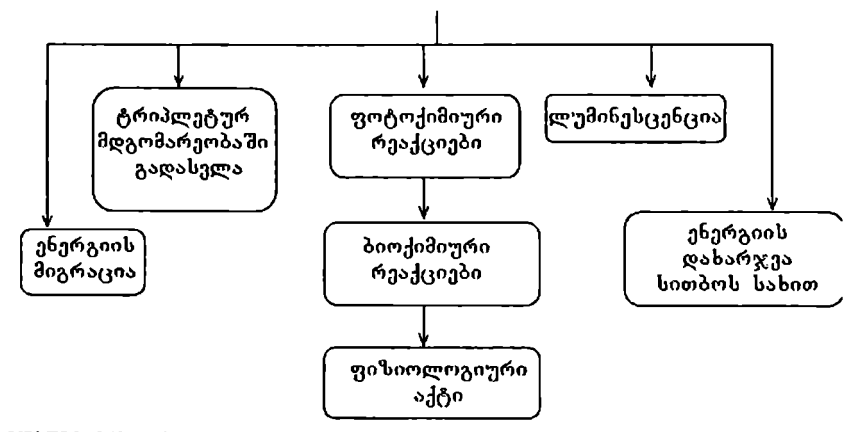
სადაც A^* - A მოლეკულაა აგზნებულ მდგომარეობაში. აგზნების პროცესი - მოლეკულის მიერ ენერგიის დაგროვების პროცესია. ამ დროს კვანტების შთანთქმაში მონაწილე ელექტრონები გადადის ძირითადი ენერგეტიკული დონიდან აგზნებულ ენერგეტიკულ დონეზე. მოლეკულის საერთო ენერგია იზრდება. ეს პროცესი შექცევადია: მოლეკულას შეუძლია ხანმოკლე დროის განმავლობაში დახარჯოს ეს ენერგია, გამოიყოს სითბოს სახით, ან გამოასხიოს ლუმინესცენციის კვანტი და გადავიდეს საწყის არააგზნებულ მდგომარეობაში. აგზნებულ მოლეკულას შეუძლია შევიდეს ფოტოქიმიურ რეაქციებში გარემომცველ არესთან, მაგალითად, გარემომცველ მოლეკულებთან (გასცეს, ან მიიღოს მათგან ელექტრონი და ამის შედეგად წარმოქმნას რადიკალი ან იონი). ამ ეტაპზე თავდება ფოტოქიმიური რეაქციის I სტადია.

II სტადია - „სინგელის“ სტადიაა. I სტადიის შედეგად წარმოქმნილი ნაერთები, რადიკალები, იონები, შეიცავს დაუწყვილებელ ელექტრონებს და ამიტომ მათ მაღალი ქიმიური აქტივობა ახასიათებს. მათ შეუძლიათ ჟანგვა-აღდგენით რეაქციებში მონაწილეობა, ბიოქიმიურ რეაქციებთან შეუღლება და მათი შეცვლა. უკანასკნელი ორგანიზმის ფიზიოლოგიური მდგომარეობის შეცვლას და/ან ფიზიოლოგიური აქტის შესრულებას განაპირობებს, მაგალითად,

ჟანგბადის გამოყოფა ფოტოსინთეზის დროს, ცხოველის რეაქცია სინათლეზე, მისი დაღუპვა მაიონიზერებელი გამოსხივების ზემოქმედების შედეგად და ა.შ..

ფოტობიოლოგიური პროცესების ზოგადი სქემა

ელექტრომაგნიტური ტალღის შთანთქმა,
მოლეკულების აგზნება



აგზნებული მოლეკულის ენერგია შეიძლება აგრეთვე გამოსხივდეს (ლუმინესცენცია), გარდაიქმნას სითბოდ, გადაეცეს მეორე მოლეკულას (ენერგიის მიგრაცია - ელექტრონული ტრანსპორტი მიტოქონდრიებში), მოლეკულა შეიძლება გადავიდეს ტრიპლეტურ მდგომარეობაში. ენერგიის მიგრაციისა ან ტრიპლეტურ მდგომარეობაში გადასვლის შედეგად შესაძლებელია ახალი ფოტოქიმიური გარდაქმნების ინიციაცია.

IX.3.1 ლუმინესცენცია

ოთახის ტემპერატურაზე მოლეკულები იმყოფება არააგზნებულ მდგომარეობაში, ელექტრონები განლაგებულია ძირითად ენერგეტიკულ ელექტრონულ დონეზე S_0 . მოლეკულის ელექტრონული შრე ამ შემთხვევაში სინგლეტურ მდგომარეობაშია (ყველა ელექტრონი დაწყვილებულია და ჯამური სპინური მომენტი ნულის ტოლია - ძირითადი სინგლეტური მდგომარეობაა S_0). თუ მოლეკულა შთანთქმავს სინათლის კვანტს, გარეთა ორბიტალის ელექტრონები გადადის უფრო მაღალ ენერგეტიკულ დონეზე S^* , ამ დროს ელექტრონული შრეები რჩება სინგლეტურ მდგომარეობაში. შთანთქმული

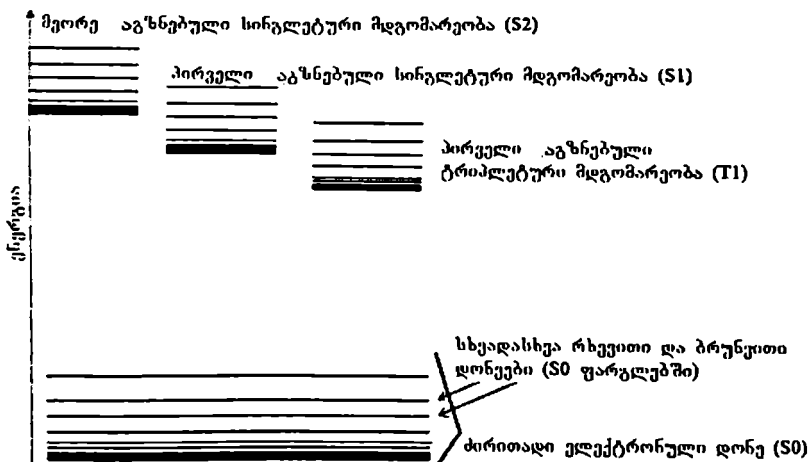
ენერგიის კვანტი ძირითად და აგზნებულ ენერგეტიკულ დონეებს შორის ენერგიების სხვაობის ტოლია:

$$h \nu = E - E_0$$

ელექტრონის გადასვლა ძირითადი ენერგეტიკული დონიდან აგზნებულ სინგლეტურ დონეზე ჩაიწერება შემდეგნაირად:



თუ მოლეკულას შეუძლია სხვა ტალღის სიგრძის სინათლის შთაქნთქმა, ელექტრონი გადადის სხვა ენერგეტიკულ დონეზე S_2^* და ა. შ.. აქ უნდა აღინიშნოს, რომ ძირითად ელექტრონულ ენერგეტიკულ დონეზე მყოფი მოლეკულების ენერგეტიკული მდგომარეობა მეტ-ნაკლებად განსხვავდება რხევითი და ბრუნვითი ენერგეტიკული დონეების მიხედვით (როგორც წესი, ყველა ელექტრონი განლაგებულია ძირითად რხევით დონეზე). მოლეკულებში ელექტრონული ენერგეტიკული დონეების რხევით და ბრუნვით ენერგეტიკულ დონეებად გახლეჩის შედეგად ენერგეტიკული გადასვლების რაოდენობა არ არის შეზღუდული და მოლეკულური შთანთქმის სპექტრები არა ხაზოვანი, არამედ მთლიანია, უწყვეტი (სურათი 262).



სურათი 262

მოლეკულის ელექტრონის ენერგეტიკული დონეების რხევით და ბრუნვით ენერგეტიკულ დონეებად გახლეჩის შედეგად ენერგეტიკული გადასვლების რაოდენობა არ არის შეზღუდული და მოლეკულური შთანთქმის სპექტრები არა ხაზოვანი, არამედ მთლიანია, უწყვეტი

აგზნებულ მდგომარეობაში მოლეკულები ვერ იმყოფება ხანგრძლივი დროის განმავლობაში. აგზნებული მოლეკულის ელექტრონული ენერგია შეიძლება დაიხარჯოს შემდეგი პროცესების მიმდინარეობის დროს: გადაეცეს სხვა მოლეკულას – *ენერგიის მიგრაცია*, ან გამოსხივდეს ენერგიის კვანტის სახით. ორივე შემთხვევაში ელექტრონები გადადის ან ძირითად S_0 , ან რაიმე შედარებით უფრო დაბალ აგზნებულ ენერგეტიკულ დონეზე; ამ პროცესს თან ახლავს ნათება.

სხვადასხვა ფიზიკური ან ქიმიური მიზეზით ინდუცირებული მოლეკულების ნათების პროცესს, რომელსაც თან ახლავს ელექტრონების აგზნებული დონიდან არააგზნებულ ენერგეტიკულ დონეზე გადასვლა, ლუმინესცენცია ეწოდება.

ლუმინესცენციის დროს სინათლის ფოტონი გამოსხივდება მხოლოდ აგზნებული ელექტრონული დონიდან უფრო დაბალ ელექტრონულ დონეზე გადასვლის შედეგად; მოლეკულის ან ატომის რხევითი და ბრუნვითი ენერგია იხარჯება სხვა მოლეკულებთან შეჯახებისას (არ გამოსხივდება სინათლის ფოტონის სახით).

ლუმინესცენცია იყოფა ფლუორესცენციად და ფოსფორესცენციად.

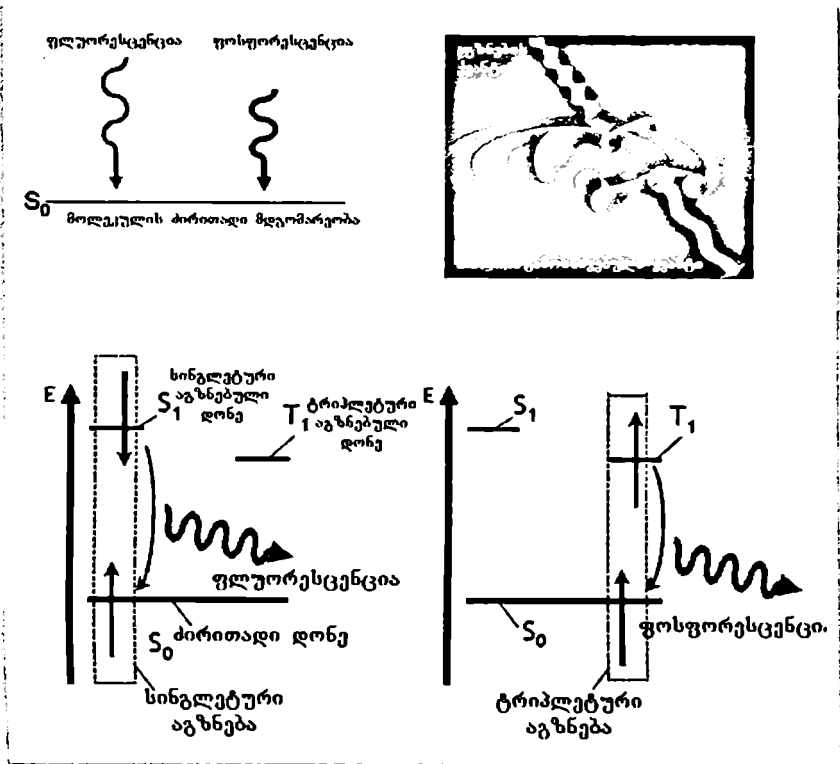
ელექტრონების გადასვლა აგზნებული დონეებიდან ძირითადად იწყება ელექტრონების გადასვლით ზედა აგზნებული დონეებიდან ყველაზე დაბალ აგზნებულ დონეზე გადასვლით. ეს გადასვლებია: $S_2 \rightarrow S_1$, $S_1 \rightarrow S_0$, $S_2 \rightarrow S_0$.

ამ დროს კვანტები არ გამოსხივდება და მოლეკულის ელექტრონული ენერგია გარდაიქმნება სითბოდ. ეს პროცესი ძალიან სწრაფია – 10^{-13} – 10^{-12} წმ.

ელექტრონების გადასვლის შემდეგი ეტაპია - დაბალი აგზნებული დონიდან (S_0) ძირითად დონეზე S_0 . ამ დროს გამოსხივდება ლუმინესცენციის კვანტი. ვინაიდან სინათლის ენერგიის შთანთქმის დროს ენერგიის ნაწილი გამოიყოფა სითბოს სახით, ლუმინესცენციის კვანტის ენერგია ყოველთვის უფრო დაბალია, შთანთქმული კვანტის ენერგიაზე (ანუ. გამოსხივებული სინათლის სიხშირე უფრო დაბალი იქნება და ტალღის სიგრძე უფრო გრძელი). ეს კანონზომიერება ასახავს თერმოდინამიკის II კანონის არსს, რომლის მიხედვით ენერგიის ერთი ფორმიდან მეორეში გადასვლას თან ახლავს ენერგიის ნაწილის გაფანტვა სითბოს სახით.

ლუმინესცენციას, რომელიც ვითარდება ელექტრონის ქვედა აგზნებული სინგლეტური მდგომარეობიდან ძირითადად გადასვლისას ($S_0 \rightarrow S_0$) ფლუორესცენციას ეწოდებენ (სურათი 263).

ვინაიდან მოლეკულების აგზნებულ მდგომარეობაში სიცოცხლის ხანგრძლივობა 10^{-9} – 10^{-8} წმ-ია, ფლუორესცენცია ვლინდება მხოლოდ ობიექტის უშუალო დასხივების პროცესში. მაგრამ დადგენილია, რომ ზოგიერთი ნივთიერება (განსაკუთრებით დაბალ ტემპერატურაზე) აგრძელებს ინტენსიურ ნათებას სინათლის გამოშვების შემდეგაც. ეს ნათება განპირობებულია ელექტრონების გადასვლით ე.წ. ტრიპლეტური დონიდან (ტრიპლეტურ ელექტრონულ შრეებზე ორი დაუწყვილებელი ელექტრონია). ტრიპლეტური ელექტრონული დონე (T) უფრო დაბალია ქვედა სინგლეტურ აგზნებულ ენერგეტიკულ დონესთან (S_0) შედარებით. ტრიპლეტური დონე – აკრძალული დონეა – აქ ელექტრონი ვერ მოხვდება ძირითადი დონიდან (გადასვლების $S_0 \rightarrow T$ აკრძალვა ძალიან დაბალია).



სურათი 263

ფლუორესცენცია და ფოსფორესცენცია ($\nu_1 > \nu_2$, $\lambda_1 < \lambda_2$)

ტრიპლეტურ დონეზე ელექტრონს შეუძლია გადასვლა მხოლოდ აგზნებული სინგლეტური დონიდან: $S_0 \rightarrow S_0^* \rightarrow T$. ელექტრონის ენერგიის ნაწილი იფანტება სითბოს სახით და გადადის ქვედა აგზნებული სინგლეტური დონიდან ტრიპლეტურზე. ამ გადასვლის დროს ელექტრონის სპინი იცვლის მიმართულებას (საწინააღმდეგოზე), შედეგად ორი ელექტრონი დაუწყვეილებელი ხდება, ხოლო მოლეკულა გარდაიქმნება ბირადიკალად. მოლეკულის სიცოცხლის ხანგრძლივობა ტრიპლეტურ მდგომარეობაში 10^{-3} წმ-დან რამდენიმე წამამდე გრძელდება.

ვინაიდან ტრიპლეტურ მდგომარეობაში მოლეკულას გააჩნია ორი დაუწყვეილებელი ელექტრონი, მას მაღალი ქიმიური ენერგია გააჩნია (შეუძლია ქიმიურ ურთიერთქმედებებში შესვლა). ამის გარდა, ელექტრონს შეუძლია ტრიპლეტური მდგომარეობიდან ძირითად ენერგეტიკულ დონეზე გადასვლა;

განთავისუფლებული ენერგია გამოიყოფა სითბოს, ან ლუმიანესცენციის კვანტის სახით. ლუმიანესცენციას, რომელსაც თან ახლავს ელექტრონების ტრიპლეტური დონიდან ძირითად ენერგეტიკულ დონეზე გადასვლა $T \rightarrow S_0$ ფოსფორესცენცია ეწოდება (სურათი 263). ვინაიდან ტრიპლეტური დონე აგზნებულ სინგლეტურზე დაბალია, სინათლის ტალღის სიგრძე, გამოსხივებული ფოსფორესცენციის დროს უფრო გრძელია, ვიდრე ფლუორესცენციის დროს.

ცხრილში 27 მოცემულია ატომის (მოლეკულის) სინგლეტური და ტრიპლეტური მდგომარეობების შედარება. როგორც ჩანს, სინგლეტური მდგომარეობის ალბათობა უფრო მაღალია, მაგრამ პროცესი უფრო ხანმოკლეა; სინგლეტური ატომი (მოლეკულა) დიამაგნიტურია (არ გააჩნია დაწყვილებული ელექტრონები და საკუთარი სპინური მაგნიტური მომენტი ნულის ტოლია). ტრიპლეტური ატომი (მოლეკულა) პარამაგნიტურია (დაუწყვილებელი ელექტრონები და საკუთარი სპინური მაგნიტური მომენტი გააჩნია).

ცხრილი 27

ატომის ტრიპლეტური და სინგლეტური მდგომარეობების შედარება

მაგნიტური ეფექტი	სინგლეტური დიამაგნიტური	ტრიპლეტური არამაგნიტური
ელექტრონის გადასვლის ალბათობა	მაღალი	ძალიან დაბალი
ლუმიანესცენცია	ფლუორესცენცია	ფოსფორესცენცია
ხანგრძლივობა	მოკლე, $< 10^{-5}-10^{-9}$ წმ	დიდი, 10^{-5} -დან რამდენიმე წმ-დე

ენერგიის აბსორბცია და ლუმიანესცენცია – უნიკალური პროცესებია, რომლებიც დამოკიდებულია ცალკეული მოლეკულის სტრუქტურაზე. ცხრილში 28 მოყვანილია ფლუორესცენციის და ფოსფორესცენციის შედარებითი მახასიათებლები.

ნივთიერებათა ლუმიანესცენციის სპექტრი, ისევე, როგორც შთანთქმის სპექტრები, მიიღება სპექტროფოტომეტრების საშუალებით. ლუმიანესცენციის სპექტრების მიხედვით შესაძლებელია მსჯელობა მოლეკულაში დაგროვებული ენერგიის კვანტების. მოლეკულის ენერგეტიკული დონეების განლაგების, მოლეკულის აგზნებულ მდგომარეობაში სიცოცხლის ხანგრძლივობის, მოლეკულაში ენერგიის მოხმარების და ნივთიერების მდგომარეობის შესახებ (აგრეგაციული მდგომარეობა, კომპლექსების წარმოქმნა, pH-ის ცვლილებები - ეს ყველაფერი ზემოქმედებას ახდენს ლუმიანესცენციაზე).

მოლეკულების აგზნებულ მდგომარეობაში გადასვლა შესაძლებელია არა მხოლოდ სინათლის კვანტების შთანთქმის შემთხვევაში, არამედ სხვა მოლეკულებთან ქიმიური ურთიერთქმედების დროს. შემდგომში, ძირითად

მდგომარეობაში გადასვლისას. შესაძლებელია ნათების წარმოქმნა ქემოლუმინესცენცია.

ცხრილი 28

ფლუორესცენციის და ფოსფორესცენციის მახასიათებლები

დროის ხანგრძლივობა	ფლუორესცენცია მოკლე < 10 ⁻⁵ წმ	ფოსფორესცენცია რამდენიმე წმ
ელექტრონული სპინი	—	+
აგზნებული მდგომარეობა	სინგლეთური	ტრიპლეთური
კვანტური გამოსავალი	მაღალი	დაბალი
ტემპერატურე	ნებისმიერი	დაბალ ტემპერატურაზე

ქემოლუმინესცენციის ნაირსახეობა – ბიოლუმინესცენცია (თვალთ ხილული ნათება, დამახასიათებელი მრავალი ცოცხალი ორგანიზმისათვის (უმარტივესი ბაქტერიები, ციკინათელა, თევზები, სოკოები)). ყველა შემთხვევაში ბიოლუმინესცენცია – სპეციფიკური ნივთიერებების, *ლუციფერინების*, დაჟანგვის შედეგია (ლუციფერინები დაჟანგვისას გადადის აგზნებულ მდგომარეობაში). ფერმენტი, რომელიც აკატალიზებს ლუციფერინების დაჟანგვას – ლუციფერაზაა.

გამოვლენილია ცოცხალი ორგანიზმის ქსოვილების სუსტი ნათება ელექტრომაგნიტური გამოსხივების სპექტრის ხილულ და ინფრაწითელ უბანში. დადგენილია, რომ გამოსხივება დამახასიათებელია სხვადასხვა ტიპის ჟანგვითი რეაქციებისათვის, რის გამოც ის გამოიყენება თავისუფალრადიკალური ჟანგვითი პროცესების რეგისტრაციისათვის. გამოვლენილია სისხლის შრატის ნათების ინტენსიფიკაცია კანცეროგენების, სხვადასხვა ბაქტერიული ინფექციის, ინტოქსიკაციების და სხვა პათოლოგიური პროცესების დროს.

ვინაიდან ლუმინესცენციის პროცესში წარმოქმნილი ნათების ფიქსირება ხშირად ძნელია თვალის საშუალებით, მედიცინაში გამოიყენება ულტრამგრძნობიარე კამერები. ასეთი ლუმინესცენტური კამერები გამოიყენება მედიცინაში ინფექციური პათოგენების, კანცერის დიაგნოსტიკაში.

საკონტროლო კითხვები და ამოცანები:

1. აღწერეთ დამუხრუჭებითი რენტგენული გამოსხივების წარმოქმნის მექანიზმი.

2. როგორაა დამოკიდებული რენტგენული გამოსხივების შთანთქმის ინტენსიუობა მშთანთქმელი ატომის რიგით ნომერზე?
3. როგორი დამოკიდებულებაა რენტგენული გამოსხივების შთანთქმასა და გამოსხივებულ ტალღის სიგრძეს შორის?
4. აღწერეთ γ -გამოსხივების დამაზიანებელი ეფექტების მექანიზმები.
5. ჩამოთვალეთ და განმარტეთ ელექტრომაგნიტური გამოსხივების პირდაპირი და არაპირდაპირი ეფექტები.
6. აღწერეთ კვანტური გენერატორების (მაგალითად, He-Ne ლაზერის) მუშაობის პრინციპი.
7. რა არის ინვერსიული დასახლება? სად და რისთვის გამოიყენება ინვერსიული დასახლება?
8. რას ეწოდება ფოტობიოლოგიური ეფექტები?
9. რა არის ლუმინესცენცია?
10. რა განსხვავებაა ფოსფორესცენციასა და ფლუორესცენციას შორის? ატომის სტრუქტურის რა პარამეტრები განსაზღვრავენ ამ სხვაობას?
11. ახსენით ბიოლუმინესცენციის ბიოფიზიკური არსი.

ზოგიერთი უნივერსალური მუდმივების ცხრილი

გრავიტაციული მუდმივა

$$G = 6.67 \times 10^{-11} \frac{\text{მ}^3}{\text{კგ წმ}^2}$$

გაზის უნივერსალური მუდმივა

$$R = 8.3144681 \frac{\text{ჯ}}{\text{K მოლ}}$$

ფარადეის რიცხვი

$$F = 96485,332 \ 89 \frac{\text{კ}}{\text{მოლ}}$$

ავოგადროს რიცხვი

$$N = 6.02497 \times 10^{23} \frac{1}{\text{მოლ}}$$

ბოლცმანის მუდმივა

$$K = 1.38041 \ 1 \times 10^{-23} \frac{\text{ჯ}}{\text{K}}$$

წყალბადის ატომის მასა

$$m_H = 1.673391 \times 10^{-24} \text{ გ}$$

პროტონის მასა

$$m_p = 1.67239 \times 10^{-24} \text{ გ}$$

ელექტრონის მასა

$$m_e = 9.1083 \times 10^{-28} \text{ გ}$$

ელექტრონის მუხტი

$$e = 1.602021 \times 10^{-19} \text{ კ}$$

სინათლის სიჩქარე ვაკუუმში

$$C = 299 \ 792 \ 458 \frac{\text{მ}}{\text{წმ}}$$

პლანკის მუდმივა

$$h = 6.625171 \times 10^{-34} \text{ ჯ} \cdot \text{წმ}$$

ერთეულთა სისტემა

ფიზიკური სიდიდე	ერთეული (SI)
სიგრძე	მ (მეტრი)
მასა	კგ (კილოგრამი)
დრო	წმ (წამი)
დენის ძალა	ა (ამპერი)
სიჩქარე	მ/წმ
აჩქარება	მ/წმ ²
ენერგია, მუშაობა	ჯ (ჯოული)
ძალა	ნ (ნიუტონი)
სიმძლავრე	ვტ (ვატი)
ელექტრული მუხტი	კ (კულონი)
ელექტრული პოტენციალი	
ემპ, ძაბვა	ვ (ვოლტი)
თევადობა	ფ (ფარადა)
ელექტრული წინაღობა	ომი
დიელექტრიკული შეღწევადობა	ფ/მ
მაგნიტური ნაკადი	ვბ (ვებერი)
მაგნიტური ველის ინდუქცია	ტლ (ტესლა)
ინდუქციურობა	ჰ (ჰენრი)
წნევა	პა (პასკალი)
სიხშირე	ჰც (ჰერცი)

**ფიზიკურ ერთეულთა სისტემაში გამოყენებული ათის ჯერადი და
წილადი ნაწილები**

პიკო (10^{-12})	P	ტერა (10^{12})	T
ნანო (10^{-9})	N	გიგა (10^9)	G
მიკრო (10^{-6})	M	მეგა (10^6)	M
მილი (10^{-3})	m	კილო (10^3)	K
სანტი (10^{-2})	S	ჰექტო (10^2)	H
დეცი (10^{-1})	D	დეკა (10)	De

საგნობრივი საძიებელი

- აბსოლუტური გარდატეხის
 მაჩვენებელი 270
 აკუსტიკური სპექტრი 45
 ალვეოლების ჰიმეადობა 162
 ამპერის კანონი 211
 ამფოლიტიკური მოლეკულები 187
 არქიმედეს კანონი 88
 აუდიომეტრია 63
 აუსკულტაცია 62
 აუტორეგულაცია 19
 ატომი 278
 ბორის მოდელი 281
 რეზერფორდის მოდელი 279
 ტომპსონის მოდელი 278
 ატომბირთვი 298
 აქტიური წინაღობა 227
 ბგერა 45
 აკუსტიკური 53, 55, 57, 61
 ობიექტური 57
 სუბიექტური 57
 ინფრაბგერა 53, 76, 79
 ულტრაბგერა 53, 64, 67, 73
 ულტრაბგერის გენერატორი 65
 ბგერითი ტალღა 45, 50
 ამპლიტუდა 50
 ბელი 59
 იმპედანსი 49, 50
 ინტენსივობა 50
 ობერტონი 47
 სიჩქარე 52
 სიხშირე 50
 სიხშირეთა სკალა 53
 სიხშირის დოპლერისეული
 წანაცვლება 67, 68, 79, 81
 ბერნულის განტოლება 104, 105, 107
 ბიოელექტრობა 236
 ბიოლოგიური სითხეები 84
 ბიოლუმინესცენცია 356
 ბიომაგნეტიზმი 260
 ბოილ-მარიოტის კანონი 156
 ბოჭკოვანი ოპტიკა 330
 გალვანიზაცია 239
 ელექტრომაგნიტური ტალღა 267
 გამტარი 192
 განუზღვრელობის პრინციპი 288
 გრავიტაციული ეფექტი 150
 გულის კუმშვითი სიმძლავრე 149
 ღალტონის კანონი 167
 დაძაბულობის ზღვარი 26, 29
 დინი 179
 დედამიწის მაგნიტური ველი 262
 დენის წირი 103
 დეფორმაცია 29
 დეფორმაბელობა 27
 ერიტროციტების დეფორმაბელობა
 128, 132
 დიამაგნეტიზმი 221, 222
 დიელექტრიკი 192, 194
 არაპოლარული 194
 პოლარული 194
 დიელექტრიკის გარღვევა 194
 დიელექტრიკული შეღწევადობა 179
 დინება 111
 ლამინარული 111, 129, 130
 ტურბულენტური 111, 129, 130, 139
 დინების ჩამოყალიბების მანძილი 139
 დისპერსია 273
 დიფრაქცია 43, 269
 დოპლერის ეფექტი 79, 81
 დრეკადობა 27
 დუბლეტური მდგომარეობა 295
 ელასტიკურობა 25, 27
 სისხლძარღვის 142
 ელემენტარული ნაწილაკები 304
 ელექტრობა 172
 ელექტროდინამიკა 196
 ელექტროენცეფალოგრაფია 256
 ელექტროკარდიოგრაფია 252
 ელექტროლიზი 202
 ელექტრომაგნიტური გამოსხივება 313
 არამაიონიზებული 314
 მაიონიზებული 314
 ელექტრომაგნიტური ველი 268
 ეკვიპოტენციური ზედაპირი 186
 ელექტრომაგნიტური სკალა 315, 361
 ეპიერი 220

- რადიოტალღები 316
 ინფრაწითელი 318
 ხილული 319
 ულტრაიისფერი 332
 რენტგენის (X) 334
 გამა სხივები 341
 ელექტროსტატიკა 181
 ელექტროსტიმულაცია 239, 259
 ელექტროსტრექცია 65
 ელექტროქიმიური ეკვივალენტი 202
 ელექტროფორეზი 239
 ელექტრული დენი 196, 197, 198
 ელექტრული ეული 181
 არაერთგვაროვანი 183
 ერთგვაროვანი 184
 დაძაბულობა 181
 პოტენციალი 184
 პოტენციალთა სხვაობა 184
 ძალოვანი ხაზები 182
 ელექტრული დიპოლი 186
 ელექტრული მუხტი 177
 ელექტრული შოკი 247
 ელექტრული ძაბვა 198
 ელექტრული წინაღობა 198
 კუთრი წინაღობა 199
 ენერგეტიკული დონე 345
 ძირითადი 345, 351
 მეტასტაბილური 345
 ენერგია 9
 ბმული 14
 ელექტრული 9
 თავისუფალი 14
 მექანიკური 9
 სითბური 9
 ქიმიური 9
 შინაგანი 10
 ენერგიის მიგრაცია 352
 ენტროპია 14, 16
 ერთეული ფოტონის ემისიური
 კომპიუტერული ტომოგრაფია
 (SPECT) 345
 ელექტრომაგნიტური ინდუქცია 216
 ერსტედი 216
 ემბერი 220
 დამასველებელი 91
 ენტილაცია ფილტვების 154, 157
 ეისკოზურ-ელასტიკური თვისებები 23,
 25, 27
 ეოლტი 184
 ზიარტურტელი 87
 ზედაპირული დაჭიმულობა 88
 ზეტა პოტენციალი 236
 თერმოდინამიკა 9
 თერმოდინამიკის I კანონი 10
 ჰესის კანონი 12
 თერმოდინამიკის II კანონი 13
 თერმოდინამიკური სისტემა 9
 იზოლირებული 9
 ჩაკეტილი 9
 ღია 9
 თერმოდინამიკური პროცესი 14
 შექცევადი 14
 შეუქცევადი 14
 თერმოდინამიკური წონასწორობა 16
 თვითინდუქცია 220
 იზობარი 300
 იზოტოპი 300
 იმპდანსი 49, 54, 69
 აკუსტიკური 49, 50
 ელექტრული 240
 იმპედანსის დისპერსია 241
 ინდუქციური დენი 216
 ინდუქციური კოჭი 220
 ინდუქციურობა 227
 ინვერსიული დასახლება 346
 ინტერფერენცია 43, 270
 იუნგის მოდული 23
 კავიტაცია 72
 სტაბილური 72
 არასტაბილური 72, 73
 კამერტონი 45
 კაპილარული ეფექტი 100
 საპნის ბუშტი 101
 სასუნთქი გზების რეზისტენტობა 158
 ელასტიკურობა 160
 ჭიმვადობა 44, 160
 სითხე 91
 არადამასველებელი 91
 არანიუტონისეული 110
 ტონუსი 28

იდეალური 103
 ნიუტონისეული 110
 რეალური 103
 სიმრუდე 95
 სიმტკიცის ზღვარი 29
 სინგულური მდგომარეობა 295, 395
 სისხლი 120
 სიბლანტე 20, 109, 124, 147
 დინების სიჩქარე 134, 136
 რეზისტენტობა 123, 124, 139, 148
 სიხშირე 36
 ციკლური 36
 რეზონანსული 39
 სმენა 54, 63
 სმენადობა 57
 სრული შინაგანი არეკვლა 271
 სპექტრი 285, 296
 სტაციონარობის გატოლება 104
 სტაციონარული მდგომარეობა 18, 105
 სურფაქტანტი 163
 ტალღა 41
 არეკვლა 43, 67, 270
 ამპლიტუდა 50, 268
 ბგერითი 45
 განივი 42
 გარდატეხა 43, 67, 68, 270
 გრძივი 42
 ელექტრომაგნიტური 256
 ინტენსივობა 50
 წრფივად ელასტიკური 23
 კომპრესიული 45
 მექანიკური 41, 46
 სიგრძე 41, 268
 სიჩქარე 52
 სიხშირე 50, 268
 სიხშირეთა სკალა 53
 ფრიონტი 44
 შთანთქმა 67, 68
 წნევა 50
 ტევეადობა 203
 ტემპრი 57
 ტესლა 211, 220

ტრანსმურალური წნევა 158
 ტრანსფორმატორი 230
 ტრიპლეტური მდგომარეობა 295, 359
 ფარადეის კანონები 202
 ფარაუუს-ლინდჰეისის ეფექტი 132
 ფერომაგნიტური 221, 224
 ფლუორესცენცია 353
 ფოსფორესცენცია 353
 ფონოკარდიოგრაფია 62
 ფოტობიოლოგიური პროცესები 349
 ფოტონი 304, 310
 ფოტოელექტრული ეფექტი 309
 ქემოლუმინესცენცია 356
 ქიმიური ელემენტი 299
 ქიმიური ეკვივალენტი 202
 კვანტი 287
 კვანტური რიცხვები 289
 მთავარი 289, 290
 მაგნიტური 289, 291
 ორბიტალური 289, 291
 სპინური რიცხვი 293
 ცელადი დენი 228
 გენერატორი 229, 230
 წნევა 84, 146
 დიასტოლური წნევა 117, 147
 ვენური წნევა 148
 საშუალო არტერიული წნევა 147
 სისტოლური წნევა 117, 147
 ცენტრალური ვენური წნევა 148
 წნევის გაზომვა 149
 პულსური წნევა 148
 ხმაამაღლობა 57
 ბელი 59
 ფონი 59
 ხმაური 45
 ძალები 34
 პემატოკრიტი 125
 პიდროდინამიკა 84
 პიდროსტატიკა 84
 პილის კანონი 30
 პისტერეზისი 165
 პომეოსტაზი 19

გამოყენებული ლიტერატურის სია

1. Губанов Н., Утепбергенов А. «Медицинская биофизика», Медицина, 1978
2. ბ. გოგალაძე, ო. ზურაბიშვილი “სამედიცინო ფიზიკა”, 1994
3. W. Kapit, R. I. Macey, E. Meisami “The Physiology Coloringng, Book” Addison Wesley Longhman I, 2000
4. მ. კობაიძე, ა. ზაქარაია, რ. ანთია, ნ. გოცირიძე, მ. მირცხულაუა, მ. კორკელია, გ. ჩირაძე “სამედიცინო ფიზიკა”, 2009
5. R. Glasser “Biophysics: An Introduction”, Springer, 2004
6. C. Guy “An Intrauduction to The Principles of Medical Imaging” Imperial College Press, 2005
7. Raymond A. “Serway Essentials of College Physics”, 2006
8. Paul Davidivich “Physics in Biology and Medicine”, therd edition, 2007
9. Nico A.M. Schellart. “Compendium of Medical Physics, Medical Technology and Biophysics” (for students, physicians and researchers By Department of Biomedical Engineering and Physics Academic Medical Center University of Amsterdam. Amsterdam, y 2009)
10. თ. სანიკიძე, რ. ანთია “სამედიცინო ფიზიკა”, 2010
11. ი. კვაჭაძე “ადამიანის ფიზიოლოგია”, 2014