სოხუმის სახელმწიფო უნივერსიტეტი

პროფესორი **ალექსანდრე მიმინოშვილი**

ასოც. პროფესორი **ვარადებული (გენო) წურწუმია**

სამედიცინო ფიზიკა

gamomcemloba `universali~

Tbilisi 2018

„სამედიცინო ფიზიკა“, როგორც სამედიცინო პროფილის უმაღლესი სასწავლებლების სასწავლო დისციპლინა, შედის სასწავლო პროგრამაში. წიგნში მოცემულია სამედიცინო ფიზიკის საკითხები და ამოცანების ამოხსნის მეთოდიკა. პრაქტიკულ მეცადინეობებზე სტუდენტები იმეორებენ თეორიულ გამოცდილებას და სწავლობენ თუ როგორ გამოიყენონ იგი ამოცანების ამოხსნასა და პრაქტიკაში მათ დასანერგად.

წინამდებარე წიგნი „სამედიცინო ფიზიკა“ არის პირველი მოკრძალებული მცდელობა ქართულ ენაზე გამოიცეს მსგავსი წიგნი, სადაც მოცემულია აგრეთვე ამოცანების ამოხსნა. ამოცანები მოცემულია А. И. Ремизов-ის, В. Уильямс, Х. Уильямс-ის, და Raymond Chang-ის წიგნებიდან.

კრებული განკუთვნილია სამედიცინო პროფილის და ბიოსამედიცინო ინჟინერიის სპეციალობის სტუდენტებისათვის.

რეცეზენტები: **ედუარდ ჩიკვაიძე**, ემერიტუსი, თსუ

ფელიქს ტყებუჩავა, ფიზიკა-მათემატიკის დოქტორი, პროფესორი, ჰარვარდის უნივერსიტეტი

თემურ გოგოლაძე, ფიზიკის დოქტორი, თსსუ

ავტორები მადლობას უხდიან განათლების, მეცნიერებისა და კულტურის კომიტეტის თავმჯდომარეს **მარიამ ჯაშს** გაწეული კონსულტაციებისათვის და რჩევებისათვის.

აგრეთვე სოხუმის უნივერსიტეტის რექტორს პროფესორ **ზურაბ ხონელიძეს** თანადგომისა და გაწეული რჩევებისათვის.

© ა. miminoSvili, v. wurwumia, 2018

gamomcemloba `universali~, 2018

Tbilisi, 0186, a. politkovskaias #4, ☎: 5(99) 33 52 02, 5(99) 17 22 30

E-mail: universal505@ymail.com; gamomcemlobauniversali@gmail.com

ISBN 978-9941-26-??????????

"Medical Physics", as the study discipline of the Higher Medical Institutions of Medical Profiles, includes the curriculum. The book provides medical physics issues and methods of solving tasks. On practical lessons students replicate theoretical experience and learn how to use it to solve tasks and practice them in practice.

This book "Medical Physics" is the first modest attempt in the Georgian language to produce a similar book, as well as solving tasks. The tasks are given in A. I. Remizov's, V. Williams, From the books of X. Williams, and Raymond Chang.

The collection is designed for students of speciclization in medical profile and biomedical engineering.

Receptors: Eduard Chikvaidze, Emeritus, TSU
Felix Tkebuchava, Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Harvard University
Temur Gogoladze, Doctor of Physics, TSMU

The authors are grateful to the chairman of the Committee on Education, Science and Culture, Mariam Jash for consultations and advice.

As well as the Rector of Sokhumi State University for support and advice of Professor Zurab Khonelidze.

სარჩევი

წინასიტყვაობა 8

თავი 1. მექანიკა 11

1.1. ადამიანის მექანიკური მუშაობა.ერგოგრაფია 12

1.2. ადამიანის ქცევების ზოგიერთი თავისებურებები გადატვირთვებისა და
უწონობის დროს 13

1.3. ვესტიბულარული აპარატი როგორც ორიეტაციის ინერციული სისტემა 15

თავი 2. მექანიკური რხევები და ტალღები 18

2.1. თავისუფალი მექანიკური რხევები (არამილევადი და მილევადი) 18

2.2. რხევითი მოზრაობის კინეტიკური და პოტენციალური ენერგია 26

2.3. იძულებითი რხევები.რეზონანსი 27

2.4. მექანიკური ტალღის განტოლება 29

2.5. დოპლერის ეფექტი 32

თავი 3.აკუსტიკა 35

3.1. ბგერის ბუნება და მისი ფიზიკური მახასიათებლები 36

3.2. ბგერის შეგრძნების დახასიათება.აუდიომეტრიის ცნება 38

3.3. კლინიკური კვლევის ბგერითი მეთოდების ფიზიკური საფუძვლები 43

3.4. სმენის ფიზიკა 45

3.5. ულტრაბგერა და მისი გამოყენება მედიცინაში 51

3.6. ინფრაბგერა 53

თავი 4.სითხეების დინება და თვისებები 55

4.1. სითხის სიბლანტე. ნიუტონის ფორმულა 55

ნიუტონისეულიდა არანიუტონისეული სითხეები 55

4.2. ბლანტი სითხის დინება მილებში პუაზეილის ფორმულა 57

4.3. სხეულის მოძრაობა ბლანტ სითხეში. სტოქსის კანონი 61

4.4. სითხის სიბლანტის განსაზღვრის მეთოდები 63

სითხის სიბლანტის განსაზღვრის კლინიკური მეთოდი 63

4.5. ტურბულენტური დინება.რეინოლდსის რიცხვი 66

თავი 5. ჰემოდინამიკის ფიზიკური საკითხები 68

5.1. სისხლის მიმოქცევის მოდელები 69

5.2. პულსური ტალღა 74

5.3. გულის მუსაობა და სიმძლავრე.სისხლის მიმოქცევის ხელოვნური აპარატი 77

5.4. სისხლის წნევის გაზომვის კლინიკური მეთოდის ფიზიკური საფუძვლები 79

თავი 6.ელექტრული ველი 82

6.1. დაძაბულობა და პოტენციალი – ელექტრული ველის მახასიათებლები 82

6.2. ელექტრული დიპოლი 89

6.3. მულტიპოლის ცნება 93

6.4. დიპოლური ელექტრული გენერატორი (დენის დიპოლი) 94

6.5. ელექტროკარდიოქრაფიის ფიზიკური საფუძვლები 97

თავი 7. მილევადი რხევები 102

7.1. ელექტრომაგნიტური ტალღების სკალა.მედიცინაში მიღებული სიხშირეთა ინტერვალის კლასიფიკაცია 103

თავი 8.დენისა და ელექტრომაგნიტური ველების ზემოქმედებით ქსოვილებში მიმდინარე ფიზიკური პროცესები 105

8.1. მუდმივი დენის პირველადი ზემოქმედებაორგანიზმის ქსოვილზე. გალვანიზაცია.სამკურნალოსაშუალებები.ელექტროფორეზი 106

თავი 9. ინტერფერომეტრები და მათი გამოყენება 108

ცნება ინტერფერომეტრული მიკროსკოპის შესახებ 109

9.1 ჰოლოგრამის მცნება 110

თავი 10. სინათლის პოლარიზაცია.მალიუსის კანონი 115

თავი 11. გეომეტრიული ოპტიკა.ასტიგმატიზმი 117

11.1. იდეალური ცენტრირებული ოპტიკური სისტემის ცნება 121

11.2. თვალის ოპტიკური სისტემა და მისი თავისებურება 126

11.3. თვალის ოპტიკური სისტემის ნაკლოვანებები 132

11.4. ოპტიკური სისტემა და მიკროსკოპის აგებულება 135

11.5. ორგანიზმი როგორც ფიზიკური ველების წყარო 136

11.6. ლაზერები და მათი გამოყენება მედიცინაში 137

თავი 12.ატომების და მოლეკულების ფიზიკა 151

12.1. კვანტური ბიოფიზიკის ელემენტები 151

12.2. ნაწილაკის ტალღური ბუნება.კვანტური მექანიკის ელემენტები 151

12.3. დე-ბროილის ჰიპოტეზა. 152

12.4. ელექტრონული მიკროსკოპი.ელექტრონული ოპტიკის შესახებ 154

12.5. ტალღური ბუნება და მისი ფიზიკური აზრი 156

12.6. განუზღვრელობის თანაფარდობა 157

12.7. შრედინგერის განტოლება.ელექტრონი პოტენციალურ ორმოში 158

12.8. შრედინგერის განტოლების გამოყენაბა წყალბადის ატომისათვის. კვანტური რიცხვები 162

12.9. ბორის თეორია 165

თავი 13.ატომისა და მოლეკულის მიერ ენერგიის გამოსხივება და შთანთქმა 167

13.1. სინათლის შთანთქმა 167

თვი 14.მაგნიტური რეზონანსი 168

14.1. მაგნიტურ ველში ატომის ენერგეტიკული დონეების გახლეჩვა 169

14.2. ელექტრონულ პარამაგნიტური რეზონანსი და მისი მედიკო-ბიოლოგიური გამოყენება 170

14.3. ბირთვულ მაგნიტური რეზონანსი. ბმრ-ინტროსკოპია (მაგნიტურ-რეზონანსული ტომოგრაფია) 174

თავი 15.რენტგენული გამოსხივება. მისი გამოყენება მედიცინაში 177

15.1. დამუხრუჭებითი გამოსხივება 180

თავი 16.მაიონებელი გამოსხივება 183

16.1. მაიონებელი გამოსხივების სახეები 183

16.2. დოზიმეტრიის საკითხები.გამოსხივების დოზა და მისი ერთეულები 186

16.3. მაიონებელი გამოსხივების ბიოქიმიური მოქმედების მექანიზმები 187

ამოცანათა კრებული სამედიცინო ფიზიკაში (ამოცანების ამოხსნის მაგალითები) 200

ლიტერატურა 342

წინასიტყვაობა

სამედიცინო ფიზიკა შეისწავლის ცოცხალ ორგანიზმში მიმდინარე ბიოლოგიური პროცესების ფიზიკური საფუძვლების რაოდენობრივ მახასიათებლებს.

ფიზიკა სწავლობს მატერიის მოძრაობის ფიზიკურ ფორმებს, რომლებიც იყოფა როგორც მექანიკური, მოლეკულურსითბური, ელექტრომაგნიტური, ატომური და ბირთვული მოძრაობები. სიცოცხლე მატერიის მოძრაობის ბიოლოგიური ფორმაა და თავისთავში მოიცავს მოძრაობის უფრო დაბალ ფორმებს – ფიზიკურს.

მედიცინაში დიაგნოსტიკისა და მკურნალობის ბევრი მეთოდი დაფუძნებულია ფიზიკის იდეებისა და პრინციპების გამოყენებაზე. სამედიცინო ხელსაწყოების უმეტესობა თავისი დანიშნულებით ფიზიკურს წარმოადგენს. მაგ. წნევის საზომი, ელექროგრაფები, სამედიცინო თერმომეტრი, რენტგენოდიაგნოსტიკა, ულტრაბგერითი გამოკვლევები და სხვა.

სამედიცინო ფიზიკის ძირითადი მიმართულებაა ორგანიზმის მდგომარეობის დიაგნოსტიკის მეთოდების ფიზიკური არსის, ინსტრუმენტული ბაზის და მიღებული დიაგნოსტიკური ინფორმაციის შეფასება. ამიტომ სადიაგნოსტიკო სამედიცინო აპარატურაში დღეს აქტიურად რეალიზდება თანამედროვე სამეცნიერო – ტექნიკური მიღწევები. ადამიანის ორგანიზმის ფუნქციური მდგომარეობის შეფასებისა და პათოლოგიის დიაგნოსტიკისათვის ფართოდ გამოიყენება კომპიუტერულ – რენტგენული ტომოგრაფია, მაგნიტურ – რეზონანსული ტომოგრაფია, პოზიტრონულ – რენტგენული ტომოგრაფია, კომპიუტერული ელექტროკარდიოგრაფია, ვიზუალიზაცია ულტრაბგერითი მეთოდით, გამა – კამერა და სხვა.

ადამიანის ორგანიზმში მიმდინარე პროცესები ახლოა ფიზიკურთან. მაგალითად, სისხლის მოძრაობას საფუძვლად უდევს ფიზიკური პროცესი (ჰიდროდინამიკა); გულის მუშაობა დაკავშირებულია – (მექანიკასთან); ბიოპოტენციალების გენერაცია (ელექტრობასთან); სუნთქვა

(აეროდინამიკასთან); სითბოგადაცემა (თერმოდინამიკასთან); აორთქლება (ფაზურ გარდაქმნასთან); მხედველობა (ოპტიკასთან) და ა. შ.

სამედიცინო ფიზიკა აღწერს ორგანიზმზე გარემო ფაქტორების – ელექტრომაგნიტური გამოსხივების, ბგერითი, ულტრაბგერითი და ინფრაბგერითი ზემოქმედება, ვიბრაცია, დარტყმითი ტალღა, ტემპერატურული ზემოქმედება და სხვა – მოქმედების ფიზიკურ/ბიოფიზიკურ საფუძვლებს.

სამედიცინო ფიზიკა ფართოდ იყენებს ანალიზის მათემატიკურ მეთოდებს, ფიზიკურ და მათემატიკურ მოდელირებას, კომპიუტერულ ტექნიკას. აღნიშნულის გამო ბიოლოგია და მედიცინა, რომლებიც არაზუსტ მეცნიერებებს წარმოადგენენ, უახლოვდებიან ზუსტი მეცნიერებების დონეს.

ბიოლოგიური პროცესების რაოდენობრივი შეფასების საჭიროება სამედიცინო ფიზიკას აკავშირებს მეტროლოგიასთან. მეტროლოგია არის მეცნიერება ფიზიკურ და ფიზიკურ – ქიმიურ სიდიდეთა ერთეულების და სისტემების წარმოქმნის, მათი გაზომვის და გაზომვის სიზუსტის შეფასების მეთოდების შესახებ. საკუთრივ გაზომვა კი ნიშნავს ტექნიური საშუალებებით ფიზიკური სიდიდის მნიშვნელობის მოძებნას. სამედიცინო და სამედიცინო – ბიოლოგიური გაზომვების ერთეულები, საშუალებები და მეთოდები საკმაოდ სპეციფიკურია, რაც სამედიცინო მეტროლოგიას ცალკე მიმართულებად გამოჰყოფს.

ე.ი. სამედიცინო ფიზიკა, მოწოდებულია მომავალი მედიკოსის პროფესიული აზროვნების ჩამოყალიბების საფუძველშივე ზუსტი მეცნიერებების კატეგორიების დანერგვისათვის, რაც მომავალ ექიმს ადამიანის ორგანიზმის ფუნქციონირების კანონზომიერების ფუნდამენტური შეფასების საშუალებას მისცემს ნორმისა და პათოლოგიის დროს.

თავი I. მექანიკა.

მექანიკა ეწოდება ფიზიკის ნაწილს, რომელიც შეისწავლის მატერიალური სხეულების მექანიკურ მოძრაობას. მექანიკურ მოძრაობაში იგულისხმება სხეულისა და მისი ნაწილების მდებარეობის ცვლილება სივრცეში და დროში. მექანიკას, რომელსაც საფუძვლად უდევს ნიუტონის კანონები, კლასიკურ მექანიკას უწოდებენ. მასში განიხილება მაკროსკოპული სხეულების მოძრაობა სიჩქარით, რომელიც ბევრად მცირეა სინათლის სიჩქარეზე ვაკუუმში. ამ თავის საკითხები, შესაძლებელია გამოვიყენოთ შემდეგი მიზნებისთვის.

ადამიანის სხეულის მოძრაობის მექანიკისა და საყრდენ-მამოძრავებელი აპარატის მექანიკის გაგება.

ბიოლოგიური სხეულებისა და სითხეების მექანიკური თვისებების ცოდნა.

ორგანიზმში მიმდინარე პერიოდული პროცესების ზოგადი კანონზომიერებების ცოდნა.

ყურისა და ვესტიბულარული აპარატის, როგორც ფიზიკური მოწყობილობის, გულის, როგორც ტუმბოს, და ა. შ. მუშაობის გაგება.

ულტრაბგერის მოქმედების ბიოფიზიკური მექანიზმის გამოკვლევა და ა.შ.

1.1. ადამიანის მექანიკური მუშაობა. ერგომეტრია

მექანიკური მუშაობა, რომელიც ადამიანს შეუძლია შეასრულოს დღის განმავ-ლობაში, მრავალ ფაქტორზეა დამოკიდებული, ამიტომ რთულია რაიმე ზღვრული სიდიდის მითითება. ეს შენიშვნა ეხება სიმძლავრესაც. ასე მაგალითად, ხანმოკლე ძალისხმევისას ადამიანს შეუძლია განავითაროს რამდენიმე კილოვატის შესაბამისი სიმძლავრე. თუ 70 კგ მასის სპორტსმენი ადგილზე ახტება ისე, რომ მისი მასების ცენტრი აიწევა

1 მ-ით ნორმალურ მდგომარეობასთან შედარებით, ხოლო უკუგდების ფაზა გაგრძელდება 2,0 წმ, მაშინ ის განავითარებს დაახლოებით 3,5 ვტ სიმძლავრეს.

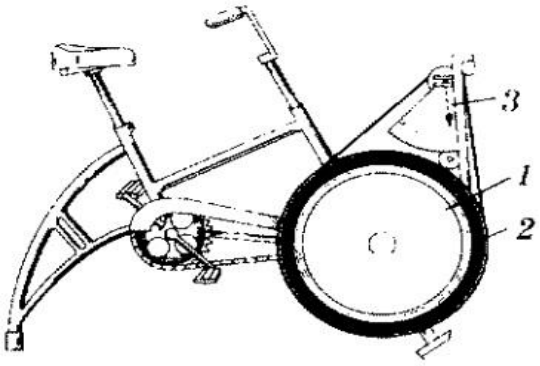
სიარულისას ადამიანი ასრულებს მუშაობას, რადგან ხარჯავს ენერგიას სხეულის პერიოდულად მცირედ აწევაზე და კიდურების, უმთავრესად ფეხების მოძრაობის აჩქარებასა და შენელებაზე.

75 კგ მასის ადამიანი 5 კმ/სთ სიჩქარით სიარულისას დაახლოებით 60 ვტ სიმძლავრეს ავითარებს. სიჩქარის ზრდასთან ერთად სიმძლავრეც სწრაფად იზრდება და 7კმ/სთ სიჩქარეზე აღწევს 200 ვატს. ველოსიპედით მოძრაობისას ადამიანის მასების ცენტრის მდებარეობა ნაკლებად იცვლება, ვიდრე სიარულის დროს და ფეხების აჩქარებაც ნაკლებია. ამიტომ ველოსიპედით მოძრაობისას დახარჯული სიმძლავრე ბევრად ნაკლებია: 30 ვტ – 9 კმ/სთ სიჩქარეზე და 120 ვტ – 18 კმ/სთ სიჩქარეზე.

მუშაობა ნულის ტოლია, თუ არ ხდება გადაადგილება. ამიტომ, როდესაც ტვირთი საყრდენზე ან საბჯენზე დევს, ან ჩამოკიდებულია ძაფზე, სიმძიმის ძალა არ ასრულებს მუშაობას. მაგრამ ყველა ჩვენგანისთვის ცნობილია ხელისა და მხრის კუნთების დაღლა, თუ გამართული ხელით უძრავად გვიჭირავს გირი ან ჰანტელი. ზუსტად ასე იღლება ზურგისა და წელის კუნთებიც, თუ მჯდომარე ადამიანს ზურგზე ტვირთს დავადებთ. ორივე შემთხვევაში ტვირთი უძრავია და მუშაობა არ სრულდება. დაღლილობა კი მოწმობს, რომ კუნთები ასრულებს მუშაობას. ასეთ მუშაობას კუნთების სტატიკურ მუშაობას უწოდებენ.

სტატიკა (უძრაობა) იმ სახით, როგორც ეს მექანიკაში ესმით, სინამდვილეში არ არსებობს. ხდება ძალიან მცირე და ხშირი, თვალისთვის შეუმჩნეველი შეკუმშვები და მოდუნებები და ამ დროს სრულდება მუშაობა სიმძიმის ძალის საწინააღმდეგოდ. ამრიგად, ადამიანის სტატიკური მუშაობა სინამდვილეში ჩვეულებრივ დინამიკურ მუშაობას წარმოადგენს.

ადამიანის მუშაობის გასაზომად გამოიყენება ხელსაწყოები, რომლებსაც ***ერგომეტრები*** ეწოდება. საზომი ტექნიკის შესაბამის განყოფილებას კი ***ერგომეტრიას*** უწოდებენ.



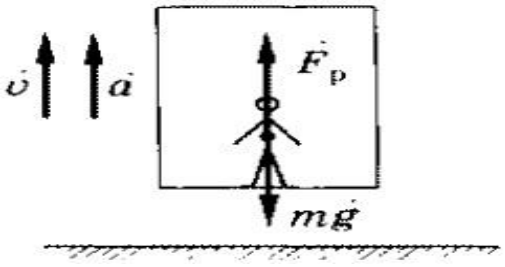
ნახ.1.1.

ერგომეტრის მაგალითია მუხრუჭიანი ველოსიპედი (ველოერგომეტრი; ნახ. 1.1.). მოძრავი ბორბლის ფერსოზე 1 გადადებულია ფოლადის ლენტი 2. ხახუნის ძალა ლენტსა და ბორბლის ფოსოს შორის იზომება დინამომეტრით 3. გამოსაცდელი ადამიანის მთელი მუშაობა იხარჯება ხახუნის ძალის გადალახვაზე (მუშაობის სხვა სახეებს უგულებელვყოფთ). ბორბლის გარშემოწერილობის სიგრძის გამრავლებით ხახუნის ძალაზე ვიპოვით მუშაობას, რომელიც სრულდება ერთ ბრუნზე, ხოლო ვიცით რა ბრუნების რაოდენობა და გამოცდის ვადა, განვსაზღვრავთ სრულ მუშაობას და საშუალო სიმძლავრეს.

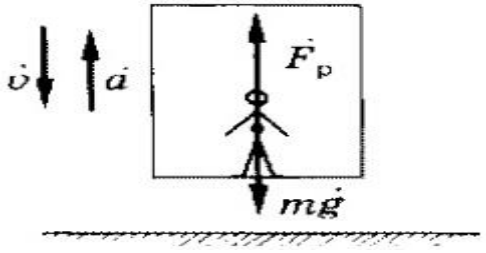
1.2. ადამიანის ქცევის ზოგიერთი თავისებურება გადატვირთვებისა და უწონობის დროს

ჩვეულებრივ პირობებში ადამიანზე მოქმედებს სიმძიმისა და საყრდენის რეაქციის ძალები. აჩქარების არარსებობის შემთხვევაში ეს ძალები ტოლია და ურთიერთსაწინააღმდეგო მიმართულება აქვთ. ასეთი მდგომარეობა ბუნებრივია ადამიანისთვის.

სისტემის აჩქარებული მოძრაობის დროს შესაძლოა წარმოიქმნას განსაკუთ-რებული მდგომარეობები, რომლებსაც ეწოდება გადატვირთვა და უწონობა.



ნახ.1.2.



ნახ.1.3.

განვიხილოთ ზოგიერთი მაგალითი.

დავუშვათ, ადამიანი იმყოფება ლიფტის კაბინაში (რაკეტაში), რომელიც ადის ზევით ა აჩქარებით (ნახ. 1.2.). ადამიანზე მოქმედებს სიმძიმის ძალა mg და საყრდენის რეაქციის ძალა $F_{რ}$. ნიუტონის მეორე კანონის მიხედვით, $F_{რ} + mg = ma$, ან სკალარულ ფორმაში ძალების მიმართულების გათვალისწინებით

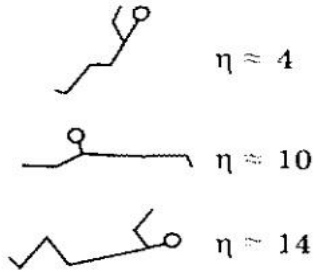
$$F_{რ} - mg = ma;\ F_{რ} = m(g + a)\ . \qquad (1.1.)$$

ამ შემთხვევაში საყრდენის რეაქციის ძალა მეტია სიმძიმის ძალაზე. ($F_{რ} > mg$), და წარმოიქმნება გადატვირთვა. ასე მაგალითად, თუ $a = g$, მაშინ $F_{\text{p}} = 2mg$ (ორმაგი გადატვირთვა), თუ $a = 2\ g$, მაშინ $F_{რ} = 3mg$ (სამმაგი

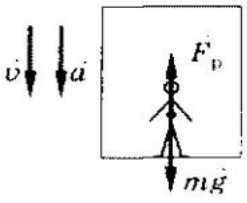
გადატვირთვა) და ა.შ. გადატვირთვა გამოისახება დამოკიდებულებით

$$\eta = \frac{F_{რ}}{mg}.$$

მეორე მაგალითი: ადამიანი იმყოფება ლიფტის კაბინაში (კოსმოსური აპარატის შიგნით, რომელიც დედამიწაზე ეშვება), რომელიც შენელებულად, ანუ დამუხრუჭებით ეშვება ქვევით (ნახ 1.3.). ძალებისა და აჩქარების მიმართულება წინა მაგალითის შესაბამისია, ამიტომაც, ამ შემთხვევაშიც ვიღებთ ფორმულას (1.1.). ადამიანი განიცდის გადატვირთვას. გადატვირთვებმა შესაძლოა, არსებითი გავლენა მოახდინოს მის ორგანიზმზე, რამდენადაც ამ მდგომარეობაში ხდება სისხლის მიქცევა, იცვლება შინაგანი ორგანოების წნევა ერთმანეთზე, ხდება მათი დეფორმაცია და ა.შ. ამიტომ, ადამიანს შეუძლია მხოლოდ განსაზღვრული გადატვირთვების გაძლება. 1.4. ნახატზე სქემატურად არის ნაჩვენები სხეულის მდგომარეობები და მოყვანილია გადატვირთვების შესაბამისი მნიშვნელობები, რომელთაც, სულ ცოტა, რამდენიმე წუთის განმავლობაში შეიძლება გაუძლოს ჯანმრთელი ადამიანის ორგანიზმმა ისე, რომ არ მიიღოს რაიმე სერიოზული დაზიანება.



ნახ.1.4.



ნახ.1.5.

თუ ლიფტი (ან კოსმოსური ხომალდი) აჩქარებით მოძრაობს ქვევით (ნახ. 1.5.), ან შენელებულად – ზევით, მაშინ

$$mg - F_{რ} = ma \qquad \text{ან} \qquad F_{რ} = m\,(g - a) \qquad (1.2.)$$

როგორც ჩანს, საყრდენის რეაქცია სიმძიმის ძალაზე ნაკლებია. $F_{რ} < mg$. თუ $a = g$, მაშინ $F_{რ} = 0$, ანუ უწონობის მდგომარეობაა. ეს ისეთი მდგომარეობაა,

რომლის დროსაც სისტემაზე მოქმედი გარეშე ძალები არ იწვევენ სისტემის ნაწილაკების ურთიერთდაწოლას ერთმანეთზე.

ბიოლოგიური ობიექტებისთვის უწონობა უჩვეულო მდგომარეობაა, თუმცა ყოველდღიურ ცხოვრებაშიც გვხვდება ნაწილობრივი უწონობის მცირევადიანი პერიოდები: ნახტომები, საქანელა, ჩქაროსნული ლიფტის ქვევით მოძრაობის დასაწყისი და ა.შ.

უწონობის დროს საყრდენის მოქმედების არარსებობა იწვევს ზოგად მოთენთვას და, აქედან გამომდინარე – შრომისუნარიანობის შემცირებას; ამ დროს მცირდება კუნთების მასა, ხდება ძვლოვანი ქსოვილების დემინერალიზაცია. ამიტომ, უწონობის მდგომარეობაში კოსმონავტებს უხდებათ სპეციალური საწვრთნელი ფიზიკური ვარჯიშების შესრულება ან განსაკუთრებული კოსტიუმების ტარება, რომლებიც აფერხებს რა მოძრაობას, ხელს უწყობს კუნთების მუშაობით დატვირთვის გაზრდას.

ჩვეულებრივ პირობებში სისხლის ჰირდოსტატიკური წნევა ρgh სხეულის ზედა ნაწილში ნაკლებია, ვიდრე ქვედაში. უწონობის მდგომარეობაში კი სისხლი თანაბრად არის განაწილებული ორგანიზმში; ეს ნიშნავს, რომ სხეულის ზედა ნაწილი ჩვეულებრივ მდგომარეობასთან შედარებით უფრო მეტად არის გადავსებული სისხლით, ამიტომ იგრძნობა სიმძიმე თავის არეში, იწყება სახის შეშუპება.

ვესტიბულარულ აპარატს ისეთი რეაქცია ექნება უწონობაზე, თითქოს გრავიტაციული ველი არ არსებობდეს, რაც შესაძლოა ვესტიბულარული აშლილობების მიზეზი გახდეს.

დაწვრილებით განვიხილოთ ადამიანის სხეულის მოძრაობის თავისებურებები უწონობის პირობებში.

ადამიანის მიერ მექანიკის კანონების პრაქტიკული ათვისება ადრეული ბავშვობიდან იწყება: ჩვენ ვსწავლობთ ჯდომას, დგომას, სიარულს, სირბილს, ვასრულებთ ფიზიკურ სავარჯიშოებს, ვმუშაობთ, ვსეირნობთ ველოსიპედით და ა.შ. ყოველივე ამას ვახერხებთ, ძირითადად, შესაბამისი კანონების თეორიული ცოდნის გარეშე. ადამიანი ეჩვევა მექანიკური მოქმედებების გაუცნობიერებლად შესრულებას. ასე მაგალითად, ბირთვის ტყორცნის დროს სპორტსმენი ინსტინქტურად ეყრდნობა ფეხს, რათა „უკუგების“ დროს არ დაეცეს; ჩაქუჩის დარტყმისას მუშა უნებლიედ ძაბავს იმ კუნთებს, რომლებიც ეწინააღმდეგება კორპუსის ბრუნვას და ა.შ.

პარადოქსალურია, მაგრამ ადამიანი იმდენად ეჩვევა მექანიკის კანონებს, რომ მათ შემჩნევას იწყებს მხოლოდ განსაკუთრებულ, იშვიათ და უჩვეულო შემთხვევებში.

1.3. ვესტიბულარული აპარატი როგორც ორიენტაციის ინერციული სისტემა

თავისუფლად ჩამოკიდებული ქანქარას მდგომარეობა ჩვეულებრივ პირობებში მიუთითებს სიმძიმის ძალის მიმართულებაზე (ნახ. 1.8.ა). თუ ქანქარა უძრავია აჩქარებულად მოძრავი ათვლის სისტემის მიმართ (ათვლის არაინერციული სისტემა), მაშინ მისი მდგომარეობა დამოკიდებულია სისტემის აჩქარებაზე (ნახ 1.8.ბ). როგორც ნახატიდან ჩანს, ნიუტონის მეორე კანონის მიხედვით,

$F_{\sigma} = mg = F_{რ} = ma$

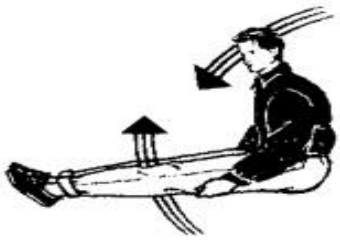
სადაც ჯამური ძალა სიდიდით ტოლია

$F_{რ} = mg \operatorname{tg} \alpha$ ან $ma = mg \operatorname{tg} \alpha$

საიდანაც

$a = g \operatorname{tg} \alpha.$ (1.3.)

აქედან გამომდინარე, მარტივი მათემატიკური ქანქარაც კი, პრინციპში,



ნახ.1.8.

ნახ.1.9.

შეიძლება გამოყენებულ იქნეს სისტემის აჩქარების მოდულისა და მიმართულების

განსასაზღვრად.

სისტემის აჩქარების შედარებით უფრო მოხერხებული ინდიკატორია ხელსაწყო, რომელიც 1.9. ნახატზეა გამოსახული – ცნობილი მასის სხეული დამაგრებულია 6 ზამბარაზე. თუ მხედველობაში მივიღებთ თავისუფალი ვარდნის აჩქარებას, ზამბარების დეფორმაციის მიხედვით შეიძლება განვსაზღვროთ სხეულზე მოქმედი ძალის მნიშვნელობა და მიმართულება და აქედან გამომდინარე, სისტემის აჩქარება. ამ სახის ინდიკატორები გამოიყენება ინერციულ ნავიგაციაში, რომელმაც ფართო გავრცელება ჰპოვა კოსმოსური ამოცანების გადაჭრასთან დაკავშირებით.

მართლაც, თუ ცნობილია სისტემის, მაგალითად, რაკეტის აჩქარება დროის ნებისმიერ მომენტში, მაშინ შეიძლება ვიპოვოთ სიჩქარის დამოკიდებულება დროზე:

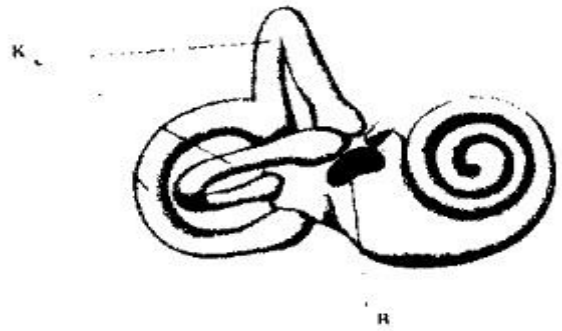
$$v = \int a dt \qquad (1.4.)$$

განვსაზღვრავთ რა $v = f(t)$, შეგვიძლია ვიპოვოთ სისტემის მდგომარეობა ნებისმიერ მომენტში.

$$x = \int v_x \, dt, \quad y = \int v_y \, dt, \quad z = \int v_z \, dt, \qquad (1.5.)$$

ამგვარად, შესაძლებელია, რაკეტის გარეთ არსებული საშუალებების დახმარების გარეშე, ავტონომიურად დავადგინოთ მისი ადგილმდებარეობა, სიჩქარე და აჩქარება დროის ნებისმიერ მომენტში.

შესაბამის მოწყობილობებს ეწოდება ორიენტაციის ინერციული სისტემები.



ნახ.1.10.

ადამიანის ორგანიზმში არის ორგანო, რომელიც არსებითად, ასევე ორიენტაციის ინერციულ სისტემას წარმოადგენს – ეს არის ვესტიბულარული აპარატი. ის განლაგებულია შიდა ყურში. შედგება ორი მორფოლოგიური სუბერთეულისგან: სამი ურთიერთპერპენდიკულარული, ნახევრად რკალოვანი არხი K და ღრუ კარიბჭე (სტატოლიტური აპარატი) B (ნახ. 1.10.). კარიბჭის კედლების შიდა ზედაპირებზე და არხების ნაწილში განლაგებულია მგრძნობიარე ნერვული უჯრედების (რეცეპტორების) ჯგუფები, რომელთაც ბუსუსისებრი ფორმის თავისუფალი ბოლოები აქვს. კარიბჭის ღრუში და არხებში არის ლაბისებრი მასა (ენდოლიმფა), რომელიც შეიცავს კალციუმის ორთოფოსფატისა და კალციუმის კარბონატის წვრილ კრისტალებს (ოტოლიტები). თავის აჩქარებული გადაადგილება იწვევს ენდოლიმფისა და ოტოლიტების გადაადგილებას, რომელიც აღიქმება ნერვული უჯრედების მიერ (ბუსუსების საშუალებით). ვესტიბულარული აპარატი, ისევე როგორც ნებისმიერი სხვა ფიზიკური სისტემა, არ განასხვავებს გრავიტაციულ ზემოქმედებას იმ ზემოქმედებისგან, რომელიც წარმოიქმნება სისტემის აჩქარებული მოძრაობის დროს.

ჩვენი ორგანიზმი შეგუებულია სიმძიმის ძალის მოქმედებასთან: ვესტიბუ-ლარული აპარატის უჯრედები შესაბამის, ჩვეულ ინფორმაციას გადასცემენ

თავის ტვინს, ამიტომ ვესტიბულარული აპარატის (და სხვა ორგანოების) საშუალებით, უწონობისა და გადატვირთვის მდგომარეობები ჩვენს მიერ აღიქმება, როგორც უჩვეულო მდგომარეობები, რომლებსაც აუცილებელია, რომ შევეგუოთ.

ადამიანის ვესტიბულარულ აპარატზე პერიოდულმა ზემოქმედებამ (გაღიზიანებამ), მაგალითად, ხომალდის რყევის დროს, შესაძლოა ორგანიზმი მიიყვანოს განსაკუთრებულ მდგომარეობაში, რომელსაც ზღვის ავადმყოფობა ეწოდება.

თავი 2.
მექანიკური რხევები და ტალღები

განმეორებად მოძრაობებს ან მდგომარეობის ცვლილებებს რხევები (ცვლადი ელექტრული დენი, ქანქარის მოძრაობა, გულის მუშაობა და ა.შ.) ეწოდება. რხევებს, მათი ბუნებისგან დამოუკიდებლად, ახასიათებს ზოგიერთი საერთო კანონზომიერება. რხევის სისტემის გარემომცველ სხეულებთან ურთიერთქმედების ხასიათიდან გამომდინარე, განასხვავებენ თავისუფალ, იძულებით და ავტორხევებს. რხევები გარემოში ტალღების სახით ვრცელდება. ამ თავში განხილულია მექანიკური რხევები და ტალღები.

2.1. თავისუფალი მექანიკური რხევები

(არამილევადი და მილევადი)

თავისუფალ (საკუთარ) რხევებს უწოდებენ ისეთ რხევებს, რომლებიც სრულდება გარე ზემოქმედების გარეშე, სხეულის მიერ მიღებული საწყისი ენერგიით. ასეთი მექანიკური რხევების დამახასიათებელი მოდელებია მატერიალური წერტილი ზამბარაზე (ზამბარიანი ქანქარა) და მატერიალური წერტილი უჭიმვად ძაფზე (მათემატიკური ქანქარა).

ამ მაგალითებში რხევები წარმოიქმნება ან საწყისი პოტენციური ენერგიის ხარჯზე (მატერიალური წერტილის გადახრა წონასწორობის მდგომარეობიდან და მისი მოძრაობა საწყისი სიჩქარის გარეშე), ან კინეტიკური ენერგიის ხარჯზე (სხეულს ეძლევა სიჩქარე წონასწორობის საწყის მდგომარეობაში), ან ორივე ენერგიის ხარჯზე (სიჩქარის მინიჭება სხეულისთვის, რომელიც გადახრილია წონასწორობის მდგომარეობიდან).

განვიხილოთ ზამბარიანი ქანქარა. წონასწორობის მდგომარეობაში (ნახ 2.1.ა) დრეკადობის ძალა F_1 აწონასწორებს სიმძიმის ძალას mg. თუ ზამბარას გავჭიმავთ x მანძილზე (ნახ 2.1.ბ), მაშინ მატერიალურ წერტილზე დრეკადობის მეტი ძალა იმოქმედებს. ჰუკის კანონიდან

გამომდინარე, დრეკადობის ძალის (F) მნიშვნელობის ცვლილება პროპორციულია ზამბარის სიგრძის ცვლილებისა ანდა x წერტილის გადანაცვლებისა:

$$F = -kx \qquad (2.1.)$$

სადაც k – არის პროპორციულობის კოეფიციენტი ძალასა და გადაადგილებას შორის, რომელიც მოცემულ შემთხვევაში წარმოადგენს ზამბარის სიხისტეს; ნიშანი მინუსი აჩვენებს, რომ ძალა ყოველთვის მიმართულია წონასწორობის მდგომარეობისკენ: $F < 0$ როცა $x > 0$, და $F > 0$ როცა $x < 0$.

მეორე მაგალითი. მათემატიკური ქანქარა (ნახ.2.2.) გადავხაროთ წონასწორობის მდგომარეობიდან ისეთი მცირე α კუთხით, რომ შესაძლებელი იყოს მატერიალური წერტილის მოძრაობის ტრაექტორია ჩაითვალოს წრფივად, ხოლო მიმართულება OX ღერძს ემთხვეოდეს. ამ დროს სრულდება მიახლოებითი ტოლობა:

$$\alpha \approx \sin\alpha \approx tg\alpha \approx \frac{x}{l}\alpha \qquad (2.2.)$$

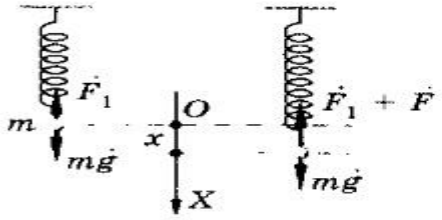
სადაც x – მატერიალური წერტილის გადაადგილებაა წონასწორობის მდგომარეობის მიმართ, ხოლო l – ქანქარას ძაფის სიგრძე.

მატერიალურ სხეულზე (ნახ. 2.2.) მოქმედებს ძაფის დაჭიმულობის ძალა და სიმძიმის ძალა, მათი თანაბრადმოქმედი ძალა ტოლია

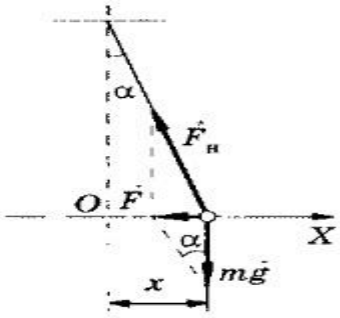
$$|F| = mg\, tg\alpha = mg\frac{x}{l} = kx, \qquad (2.3.)$$

სადაც k – წარმოადგენს პროპორციულობის კოეფიციენტს ძალასა და გადაადგილებას შორის, რომელიც მოცემულ შემთხვევაში ტოლია

$$k = \frac{mg}{l}, \qquad (2.4.)$$



ნახ.2.1.



ნახ.2.2.

(2.1.) და (2.3.) განტოლებების შედარებით ვხედავთ, რომ ამ მაგალითში ტოლქმედი ძალა მსგავსია დრეკადობის ძალისა, რამდენადაც პროპორციულია მატერიალური წერტილის გადაადგილებისა და მიმართულია წონასწორობის მდგომარეობისკენ. ასეთ ძალებს, თავისი ბუნებით არადრეკადს, მაგრამ თვისებებით – მათ ანალოგიურს, რომლებიც წარმოიქმნება დრეკადი ძალების მცირე დეფორმაციების დროს, ***კვაზიდრეკადი*** ძალები ეწოდება.

ამ მაგალითებში განხილულ მატერიალურ წერტილებზე დრეკადი და კვაზიდრეკადი ძალების გარდა მოქმედებს წინააღმდეგობის (ხახუნის) ძალაც, რომლის მოდულსაც აღვნიშნავთ $F_ჭ$ (ნახატებზე არ არის ნაჩვენები).

ნიუტონის მეორე კანონის საფუძველზე ვიღებთ დიფერენციალურ განტოლებას, რომელიც აღწერს მატერიალური წერილის მოძრაობას (სხეულის მასის ნამრავლი მის აჩქარებაზე ტოლია ყველა მოქმედი ძალის ჯამისა):

$$m\frac{d^2x}{dt^2} = -kx + F_ჭ, \qquad (2.5.)$$

ზოგიერთი კერძო შემთხვევისთვის განვიხილოთ მატერიალური წერტილის გადაადგილების გამოსახულება, რომელიც მიიღება ამ განტოლების ამოხსნით.

არამილევადი რხევები. განვიხილოთ მოდელი, რომელშიც უგულებელყოფილია წინააღმდეგობის ძალა $F_ჭ$ = 0 (2.5.) განტოლებიდან გვაქვს:

$m\frac{d^2x}{dt^2} = -kx$. თუ შევცვლით

$$\omega_0^2 = \frac{k}{m} \qquad (2.6.)$$

და ჩავატარებთ გარდაქმნებს, მივიღებთ მეორე რიგის შემდეგ დიფერენციალურ განტოლებას

$$m\frac{d^2x}{dt^2} + \omega_0^2 = 0\,. \qquad (2.7.)$$

შესაბამისი ჩასმებით შეიძლება დავრწმუნდეთ, მის ამოხსნას მივყავართ ჰარმონიულ რხევებამდე:

$$x = A\cos(\omega_0 t + \varphi_0), \qquad (2.8.)$$

სადაც $\omega_0 t + \varphi_0 = \varphi$ – რხევების ფაზაა, φ_0 – საწყისი ფაზა (როცა $t = 0$), ω_0 – რხევების წრიული (ციკლური) სიხშირე, ხოლო A – ამპლიტუდა.

ამპლიტუდა და რხევების საწყისი ფაზა განისაზღვრება მოძრაობის საწყისი პირობებით, ანუ მატერიალური წერტილის მდებარეობით და სიჩქარით $t = 0$ მომენტში.

რხევების სახეობებს შორის ჰარმონიული რხევები ყველაზე მარტივია.

ამრიგად, მატერიალური სხეული, რომელიც ჩამოკიდებულია ზამბარაზე (ზამბარიანი ქანქარა) ან ძაფზე (მათემატიკური ქანქარა), ასრულებს ჰარმონიულ რხევებს, თუ არ მივიღებთ მხედველობაში წინაღობის ძალებს.

ჰარმონიული რხევების დიფერენციალური განტოლების გარდაქმნისას ω_0 სიდიდე ფორმალურად იქნა შემოტანილი, თუმცა მას მნიშვნელობანი ფიზიკური აზრი აქვს, რადგან განსაზღვრავს სისტემის რხევების სიხშირეს $\upsilon = \frac{\omega_0}{2\pi}$ და აჩვენებს რომელ ფაქტორებზე (პარამეტრებზეა) ეს სიხშირე დამოკიდებული: პირველ მაგალითში ზამბარის სიხისტესა და მასაზე, და მეორე მაგალითში კი – ძაფის სიგრძესა და თავისუფალი ვარდნის აჩქარებაზე.

რხევების პერიოდის პოვნა შეიძლება ფორმულით

$$T = \frac{1}{\upsilon} = \frac{2\pi}{\omega_2}\,. \qquad (2.9.)$$

(2.6.) ფორმულის გამოყენებით მივიღებთ ზამბარიანი ქანქარის რხევის პერიოდს

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}, \qquad (2.10.)$$

თუ k-ს შევცვლით მისი მნიშვნელობით (2.4.) ფორმულიდან, ვიპოვით მათემატიკური ქანქარის რხევების პერიოდს

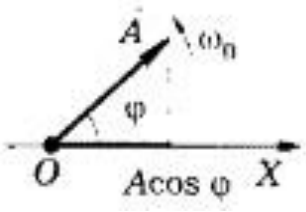
$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}} \qquad (2.11.)$$

ძალიან მოხერხებულია ჰარმონიული რხევების გამოსახვა ვექტორული დიაგრა-მების საშუალებით. ამისთვის აბცისთა ღერძის დასაწყისიდან გავატაროთ A ვექტორი (ნახ 2.3.), რომლის პროექცია OX ღერძზე ტოლია $x = A\cos\varphi$. თუ A ვექტორი ბრუნავს თანაბრად ω_0 კუთხური სიჩქარით, საათის ისრის საწინააღმდეგოდ, მაშინ $\varphi = \omega_0 t + \varphi_0$, სადაც φ_0 არის φ-ს საწყისი მნიშვნელობა, ხოლო A ვექტორის პროექციის ცვლილება OX ღერძზე დროის მიხედვით (2.8.) კანონით აღიწერება. ასეთ წარმოდგენაში რხევათა ამპლიტუდა წარმოადგენს თანაბრად ბრუნავი A ვექტორის მოდულს, რხევების ფაზა – კუთხეს A ვექტორსა და OX ღერძს შორის, საწყისი ფაზა – ამ კუთხის საწყის მნიშვნელობას, რხევების ბრუნვის წრიული სიხშირე – A ვექტორის ბრუნვის კუთხურ სიჩქარეს, რხევადი წერტილის x წანაცვლება – A ვექტორის პროექციას OX ღერძზე.

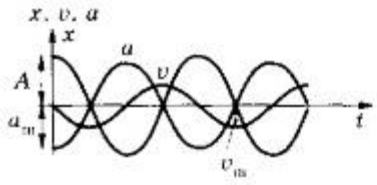
ჰარმონიული რხევისას მატერიალური წერტილის სიჩქარის საპოვნელად უნდა გამოვიყენოთ (2.8.) გამოსახულების წარმოებული დროით.

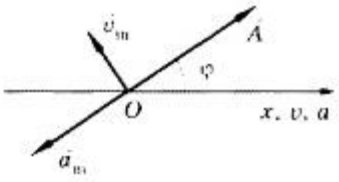
$$\upsilon = \frac{dx}{dt} = -A\omega_0\sin(\omega_0 t + \varphi_0) = -\upsilon_m\sin(\omega_0 t + \varphi_0), \qquad (2.12.)$$

სადაც $\upsilon_m = A\omega_0$ – მაქსიმალური სიჩქარეა (სიჩქარის ამპლიტუდა).



ნახ.2.3.





ნახ.2.4. ნახ.2.5.

ტრიგონომეტრიული ფორმულების საფუძველზე გარდავქმნათ (2.12.):

$$\upsilon = \upsilon_m \cos\left[\frac{\pi}{2} + (\omega_0 t + \varphi_0)\right] \qquad (2.13.)$$

(2.13.) და (2.8.) გამოსახულებების შედარებისას ვამჩნევთ, რომ სიჩქარის ფაზა $\pi/2$-ით მეტია წანაცვლების ფაზაზე, ანუ ფაზის მიხედვით სიჩქარე უსწრებს წანაცვლებას $\pi/2$-ით.

(2.12.) გამოსახულების დიფერენცირებით ვიპოვით აჩქარებას:

$$a = \frac{d\nu}{dt} = -A\omega_0^2 \cos(\omega_0 t + \varphi_0) = -a_m \cos(\omega_0 t + \varphi_0), \qquad (2.14.)$$

სადაც $a_m = A\omega_0$ მაქსიმალური აჩქარებაა (აჩქარების ამპლიტუდა).

(2.14.)-ის მაგივრად ჩავწეროთ

$$a = a_m \cos[\pi + (\omega_0 t + \varphi_0)]. \qquad (2.15.)$$

(2.15.) და (2.8.) გამოსახულებების შედარებიდან გამომდინარეობს, რომ სიჩქარისა და წანაცვლების ფაზები განსხვავდება π-თი, ანუ ეს სიდიდეები იცვლება საწინააღმდეგო ფაზებში. წანაცვლების, სიჩქარისა და აჩქარების დროზე დამოკიდებულების გრაფიკები ნაჩვენებია (2.4.) ნახატზე, ხოლო მათი ვექტორული დიაგრამები – (2.5.) ნახატზე.

მილევადი რხევები. ბუნებაში, რეალურად, რხევად სხეულზე მოქმედებს წინააღმდეგობის (ხახუნის ძალები), რაც ცვლის მოძრაობის ხასიათს და რხევები ხდება მილევადი. იმისათვის, რომ (2.5.) განტოლებიდან ვიპოვოთ

მილევადი რხევების დროსთან დამოკიდებულება, აუცილებელია ვიცოდეთ, რა პარამეტრებზე და როგორ არის დამოკიდებული წინააღმდეგობის ძალა. ჩვეულებრივ, უშვებენ, რომ არცთუ დიდი ამპლიტუდებისა და სიხშირეების შემთხვევაში ეს ძალა მოძრაობის პროპორციულია და ბუნებრივია, რომ მიმართულია სიჩქარის საწინააღმდეგოდ: $F_წ = - rv$, სადაც r ხახუნის (წინააღმდეგობის) კოეფიციენტია და ახასიათებს იმ გარემოს თვისებებს, რომელიც ეწინააღმდეგება მოძრაობას.

ერთგანზომილებიანი მოძრაობისთვის გამოსაყენებლად ბოლო ფორმულას მივცეთ შემდეგი სახე:

$$F_წ = - r\frac{dx}{dt}. \qquad (2.16.)$$

ჩავსვათ გამოსახულება (2.16.) განტოლებაში (2.5.) და მივიღებთ:

$$m\frac{d^2x}{dt^2} = -kx - r\frac{dx}{dt}. \qquad (2.17.)$$

განტოლების ორივე ნაწილი გავყოთ m-ზე, და ჩავწეროთ ის სტანდარტული ფორმით:

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \frac{r}{m}\frac{dx}{dt} + \frac{k}{m}x = 0. \qquad (2.18.)$$

$\frac{r}{m} = 2\beta$ და $\frac{k}{m} = \omega_0^2$ შეცვლების ჩატარებით მივიღებთ თავისუფალი რხევების დიფერენციალური განტოლების საბოლოო ჩანაწერს წინააღმდეგობის ძალების გათვალისწინებით:

$$\frac{d^2x}{dt^2} + 2\beta\frac{dx}{dt} + \omega_0^2 x = 0, \qquad (2.19.)$$

სადაც β მილევის კოეფიციენტია, ხოლო ω_0 – სისტემის საკუთარი რხევების წრიული სიხშირე (მილევის გარეშე).

(2.19.) განტოლების ამოხსნა არსებითად დამოკიდებულია $\omega^2 = \omega_0^2 - \beta^2$ სხვაობის ნიშანზე, სადაც ω მილევადი რხევების წრიული სიხშირეა.

როდესაც $\omega^2 - \beta^2 > 0$, წრიული სიხშირე ω წარმოადგენს რეალურ სიდიდეს და (2.19.) განტოლების ამონახსენი იქნება:

$$x = A_0 e^{\beta t} \cos(\omega t + \varphi_0). \qquad (2.20.)$$

ამ ფუნქციის გრაფიკი ნაჩვენებია (2.6.) ნახაზზე უწყვეტი მრუდით – 1, ხოლო წყვეტილი მრუდით – 2 გამოსახულია ამპლიტუდის ცვლილება:

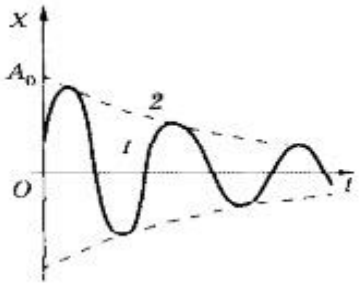
$$A = \pm A_0 e^{\beta t}, \qquad (2.21.)$$

სადაც A_0-ს მნიშვნელობა ნაჩვენებია ნახატზე.

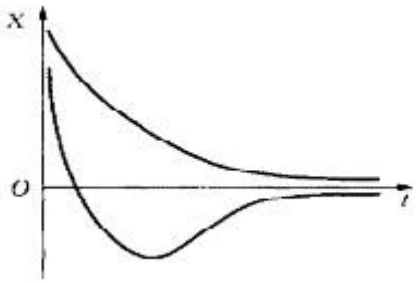
მილევადი რხევების პერიოდი დამოკიდებულია ხახუნის კოეფიციენტზე და განისაზღვრება ფორმულით:

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi}{\sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}}. \qquad (2.22.)$$

ძალიან მცირე (სუსტი) ხახუნის შემთხვევაში $\left(\beta << \omega_0^2\right)$ მილევადი რხევების პერიოდი თითქმის უტოლდება არამილევადი, ჰარმონიული რხევების პერიოდს: $T \approx \frac{2\pi}{\omega_0}$.



ნახ.2.6.



ნახ.2.7.

რხევის ამპლიტუდის შემცირების სიჩქარე მილევის (ტალღის ჩაქრობის) კოეფიციენტით განისაზღვრება: რაც უფრო ძლიერია გარემოს მამუხრუჭებელი მოქმედება, მით მეტია β და, შესაბამისად, ამპლიტუდაც უფრო სწრაფად მცირდება. მაგრამ პრაქტიკულად, მილევის ხარისხი ხშირად მილევის ლოგარითმული დეკრემენტით ხასიათდება. ამ ცნების

ქვეშ იგულისხმება სიდიდე, რომელიც რხევის პერიოდის ტოლი, დროის ინტერვალით დაშორებული ორი მიმდევრობითი ამპლიტუდის დამოკიდებულების ნატურალურ ლოგარითმს წარმოადგენს:

$$\lambda = \ln\frac{A(t)}{A(t+\tau)} = \ln\frac{A_0 e^{\beta t}}{A_0 e^{(\beta t+T)}} - \ln\left(e^{\beta t}\right) = \beta T;$$

აქედან გამომდინარე, მილევის კოეფიციენტი და მილევის ლოგარითმული დეკრემენტი ერთმანეთთან დაკავშირებულია საკმაოდ მარტივი დამოკიდებულებით:

$$\lambda = \beta T. \qquad (2.23.)$$

(2.22) ფორმულიდან ჩანს, რომ ძლიერი მილევის დროს ($\beta^2 > \omega^2$) რხევის პერიოდი წარმოსახვითი სიდიდეა. ამ შემთხვევაში მოძრაობა აღარ იქნება პერიოდული და გახდება აპერიოდული.[1]

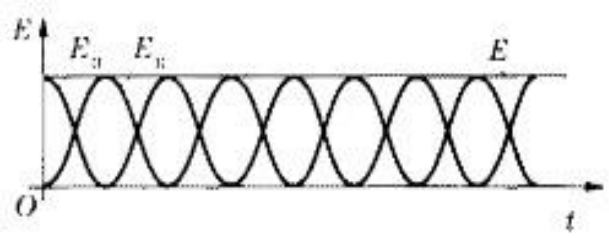
შესაძლო აპერიოდული მოძრაობები გრაფიკის სახით წარმოდგენილია (2.7.) ნახატზე.

2.2. რხევითი მოძრაობის კინეტიკური და პოტენციალური ენერგია

ჰარმონიული კანონის მიხედვით მერხევი მატერიალური წერტილის კინეტიკური ენერგია შეიძლება გამოვიანგარიშოთ ცნობილი ფორმულით და (2.12.) გამოსახულების გამოყენებით:

$$E_{კ} = \frac{1}{2} m v_m^2 \sin^2(\omega_0 t + \varphi_0) = \frac{1}{2} mA^2\omega_0^2 \sin^2(\omega_0 t + \varphi_0) = \frac{1}{2} kA^2 \sin^2(\omega_0 t + \varphi_0). \quad (2.24.)$$

[1] უნდა აღვნიშნოთ, რომ რაიმე ფიზიკური სიდიდის მიერ წარმოსახვითი მნიშვნელობის მიღება ნიშნავს შესაბამისი მოვლენის უჩვეულობას, ექსტრაორდინარულობას. განხილულ მაგალითში ექსტრაორდინარულია ის, რომ პროცესი აღარაა პერიოდული.



ნახ.2.8.

რხევითი მოძრაობის პოტენციური ენერგიის გამოთვლა შეგვიძლია დრეკადი დეფორმაციის პოტენციური ენერგიის ზოგადი ფორმულით $E_ჳ = \frac{1}{2}kx^2$ და (2.8.) გამოსახულების გამოყენებით:

$$E_ჳ = \frac{1}{2}kA^2\cos^2(\omega_0 t+\varphi_0). \qquad (2.25.)$$

კინეტიკური (2.24.) და პოტენციური (2.25.) ენერგიების შეკრებით მივიღებთ ჰარმონიული კანონით რხევადი მატერიალური წერტილის სრულ მექანიკურ ენერგიას:

$$E_ჳ = E_ჳ + E_ჳ = \frac{1}{2}kA^2\sin^2(\omega_0 t+\varphi_0)+\frac{1}{2}kA^2\cos^2(\omega_0 t+\varphi_0) =$$

$$= \frac{1}{2}kA^2\left[\sin^2(\omega_0 t+\varphi_0)+\cos^2(\omega_0 t+\varphi_0)\right] = \frac{1}{2}kA^2 \qquad (2.26.)$$

ხახუნის ძალების არარსებობის პირობებში სისტემის სრული მექანიკური ენერგია არ იცვლება:

$$E = \frac{1}{2}kA^2 = \frac{1}{2}m\omega_0^2A^2(\omega_0 t+\varphi_0). \qquad (2.27.)$$

რხევადი სისტემის კინეტიკური, პოტენციური და სრული მექანიკური ენერგიის დროზე დამოკიდებულება გრაფიკულად ნაჩვენებია (2.8.) ნახატზე.

2.3. იძულებითი რხევები. რეზონანსი

იძულებითი ეწოდება რხევებს, რომლებიც წარმოიქმნება სისტემაში გარეშე ძალის მონაწილეობით და იცვლება პერიოდული კანონის მიხედვით.

დავუშვათ, რომ მატერიალურ წერტილზე კვაზიდრეკადი ძალისა და ხახუნის ძალის გარდა მოქმედებს გარეშე მამოძრავებელი ძალა

$F = F_0 \cos \omega t.$

სადაც F_0 ამპლიტუდაა, ω კი – მამოძრავებელი ძალის რხევების წრიული სიჩქარე. შევადგინოთ დიფერენციალური განტოლება (ნიუტონის მეორე კანონი):

$$m\frac{d^2x}{dt^2} = -kx - r\frac{dx}{dt} + F_0 \cos\omega t,$$

ან

$$\frac{d^2x}{dt^2} + 2\beta\frac{dx}{dt} + \omega_0^2 = f_0 \cos\omega t, \qquad (3.1.)$$

სადაც $f_0 = F_0/m.$

(3.1.) დიფერენციალური განტოლების ამონახსენი წარმოადგენს ორი შესაკრების ჯამს. მათგან ერთი, რომელიც მილევადი რხევების განტოლებას შეესაბამება, მნიშვნელოვან როლს ასრულებს მხოლოდ რხევების წამოწყებისას. დროთა განმავლობაში შესაძლებელია მისი უგულებელყოფა. მეორე შესაკრები აღწერს მატერიალური წერტილის წანაცვლებას ფორმირებულ იძულებით რხევებში:

$x = A \cos(\omega t + \varphi_0),$ (3.2.)

სადაც

$$A = \frac{f_0}{\sqrt{\left(\omega_0^2 - \omega^2\right)^2 + 4\beta^2\omega^2}}, \qquad (3.3.)$$

$$tg\,\varphi_0 = -\frac{2\beta\omega}{\omega^2 - \omega_0^2}. \qquad (3.4.)$$

როგორც (3.2.) ტოლობიდან ჩანს, ფორმირებული იძულებითი რხევა, რომელიც მიმდინარეობს ჰარმონიულად ცვალებადი მამოძრავებელი ძალისზემოქმედებით, ასევე ჰარმონიულ რხევას წარმოადგენს. იძულებითი რხევების სიხშირე ტოლია მამოძრავებელი ძალის სიხშირისა. იძულებითი რხევები, რომელთა გრაფიკი წარმოდგენილია (3.1.) ნახატზე, მამოძრავებელი ძალის მიმართ ფაზით არის წანაცვლებული.

იძულებითი რხევების ამპლიტუდა (3.3.) მამოძრავებელი ძალის ამპლიტუდის პირდაპირპროპორციულია და რთული დამოკიდებულება აქვს როგორც რხევის გარემოს მახასიათებელ მილევის კოეფიციენტთან, ასევე საკუთარი და იძულებითი რხევების წრიულ სიჩქარეებთან. თუ სისტემისთვის დადგენილია ω_0 და β, მაშინ იძულებით რხევებს მაქსიმალური მნიშვნელობა აქვს მამოძრავებელი ძალის ზოგიერთი განსაზღვრული სიხშირის დროს, რომელსაც რეზონანსულს უწოდებენ. თავად მოვლენას –იძულებითი რხევების ამპლიტუდის მაქსიმალური მნიშვნელობის მიღწევას მოცემული ω_0 და β-თვის, რეზონანსი ეწოდება.

რეზონანსული წრიული სიხშირე შეიძლება გამოვითვალოთ(3.3.) გამოსახუ-ლების მნიშვნელის მინიმუმის პირობებიდან:

$$\omega_{\text{რეზ}} = \sqrt{\omega_0^2 - 2\beta^2}\ . \qquad (3.5.)$$

თუ (3.5.) გამოსახულებას შევიტანთ (3.3.) ტოლობაში, ვიპოვით ამპლიტუდას რეზონანსის დროს:

$$A_{\text{რეზ}} = \frac{f_0}{2\beta\sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}}. \qquad (3.6.)$$

(3.6.) გამოსახულებიდან ჩანს, რომ წინააღმდეგობის არარსებობის პირობებში
($\beta = 0$), რეზონანსის დროს, იძულებითი რხევების ამპლიტუდა განუსაზღვრელად იზრდება. ამასთანავე, (3.5) გამოსახულებიდან გამომდინარეობს, რომ $\omega_{\text{რეზ}} = \omega_0$, ანუ არამილევად სისტემაში რეზონანსი მიიღწევა მაშინ, როდესაც მამოძრავებელი ძალის სიხშირე ემთხვევა საკუთარი რხევების სიხშირეს. იძულებითი რხევების ამპლიტუდის დამოკიდებულება მამოძრავებელი ძალის წრიულ სიხშირეზე მილევის კოეფიციენტის სხვადასხვა მნიშვნელობების დროს გრაფიკულად ნაჩვენებია (3.2.) ნახატზე.

მექანიკური რეზონანსი შეიძლება იყოს როგორც სასარგებლო, ასევე საზიანო. რეზონანსის დესტრუქციული მოქმედება, ძირითადად, დაკავშირებულია ნგრევასთან, რომელიც შესაძლოა მან გამოიწვიოს. ასე მაგალითად, ტექნიკაში სხვადასხვაგვარი ვიბრაციების გათვალისწინებისას აუცილებელია მხედველობაში მივიღოთ რეზონანსული პირობების წარმოქმნის ალბათობა, წინააღმდეგ შემთხვევაში შესაძლოა მოხდეს ნგრევა და მსგავსი კატასტროფები. სხეულებს, ჩვეულებრივ აქვთ საკუთარი რხევების რამდენიმე სიხშირე და, შესაბამისად, რამდენიმე რეზონანსული სიხშირე.

ადამიანის შინაგანი ორგანოების მილევის კოეფიციენტი მცირე რომ იყოს, რეზონანსული მოვლენები, რომლებიც შესაძლოა წარმოიქმნას ამ ორგანოებში გარეშე ვიბრაციებისა და ბგერითი ტალღების ზემოქმედებით, გამოიწვევდნენ ტრაგიკულ შედეგებს: ორგანოების გახეთქვა (გასკდომა), მყესების დაზიანება და ა.შ. მაგრამ, ზომიერი გარეშე ზემოქმედებებისას, მსგავი მოვლენები, პრაქტიკულად არ შეინიშნება, რადგან ბიოლოგიური სისტემების მილევის კოეფიციენტი საკმაოდ მაღალია. ამის მიუხედავად, გარეშე მექანიკური ზემოქმედების შედეგად შინაგან ორგანოებში მაინც აქვს ადგილი რეზონანსულ მოვლენებს. როგორც ჩანს, ეს არის ინფრაბგერითი რხევებისა და ვიბრაციების ადამიანის ორგანიზმზე უარყოფითი ზემოქმედების ერთ-ერთი მიზეზი.

2.4 მექანიკური ტალღის განტოლება

მექანიკური ტალღა ეწოდება მექანიკურ შეშფოთებას, რომელიც ვრცელდება სივრცეში და გადააქვს ენერგია.

განასხვავებენ მექანიკური ტალღების ორ ძირითად სახეს: დრეკადი ტალღები (დრეკადი დეფორმაციების გავრცელება) და ტალღები სითხის ზედაპირზე.

დრეკადი ტალღები წარმოიქმნება გარემოს ნაწილაკებს შორის არსებული კავშირების წყალობით: ერთი ნაწილაკის წანაცვლება წონასწორობის მდებარეობიდან იწვევს მეზობელი ნაწილაკების გადაადგილებას. ეს პროცესი ვრცელდება სივრცეში ზღვრული (სასრულო) სიჩქარით.

ტალღის განტოლება ასახავს ტალღურ პროცესში მონაწილე მერხევი წერტილის წანაცვლების (s) დამოკიდებულებას მისი წონასწორობის მდებარეობის კოორდი-ნატებსა და დროზე. ტალღისთვის, რომელიც ვრცელდება OX ღერძის იმართულების გასწვრივ, ეს დამოკიდებულება ჩაიწერება შემდეგი ზოგადი სახით:

$s = f(x,t)$

თუ s და x მიმართულია ერთი წრფის გასწვრივ, მაშინ ტალღა ***გრძივია***, ხოლო თუ ისინი ურთიერთპერპენდიკულარულია, მაშინ–***განივი.***

გამოვიყვანოთ ბრტყელი ტალღის განტოლება. ვთქვათ, ტალღა მილევის გარეშე ვრცელდება OX ღერძის გასწვრივ (ნახ.4.1.) ისე, რომ მისი ნებისმიერი წერტილის რხევის ამპლიტუდა ერთნაირია და უდრის A-ს. $x = 0$ კოორდინატის მქონე წერტილის (რხევების სათავე) რხევა გამოვსახოთ შემდეგი განტოლებით

$s = A\cos\omega t.$

$$s_0 = s\cos\omega t; \quad s = A\cos\left[\omega\left(t - \frac{x}{v}\right)\right] \qquad (4.1.)$$

ნახ.4.1.

კოორდინატის სათავიდან ნებისმიერი კოორდინატის მქონე x წერტილამდე შეშფოთება მიაღწევს τ დროში, ამიტომ ამ წერტილის რხევები შეყოვნებულია:

$s = A\cos[\omega(t - \tau)].$

რადგან ტალღის გავრცელების დრო და სიჩქარე დაკავშირებულია დამოკიდებულებით, (4.1.) განტოლების ნაცვლად მივიღებთ

$$s = A\cos\left[\omega\left(t - \frac{x}{v}\right)\right]. \qquad (4.2.)$$

სწორედ ეს არის ***ბრტყელი ტალღის განტოლება,*** რომელიც საშუალებას გვაძლევს განვსაზღვროთ ტალღურ პროცესში მონაწილე ნებისმიერი

წერტილის შეშფოთება დროის ნებისმიერ მომენტში. კოსინუსის არგუმენტს $\varphi = \omega\left(t - \frac{x}{v}\right)$ უწოდებენ ტალღის ფაზას. იმ წერტილთა სიმრავლეს, რომლებიც ერთდროულად ერთნაირ ფაზაში იმყოფებიან, ***ტალღის ფრონტი*** ეწოდება. განხილული შემთხვევისთვის ტალღის ფრონტს წარმოადგენს სიბრტყე $x = \text{const}$ (OX ღერძის პერპენდიკულარული სიბრტყე), რომლის ნებისმიერ წერტილს ერთდროულად ერთნაირი ფაზა შეესაბამება. აქედან მოდის ტალღის სახელიც – ***ბრტყელი*** ტალღა.

რხევების ფიქსირებული ფაზის გავრცელების სიჩქარეს ***ფაზური*** სიჩქარე ეწოდება. დავუშვათ, რომ $\varphi = \omega\left(t - \frac{x}{v}\right) = \text{const}$. თუ მოვახდენთ ამ ტოლობის დიფერენცირებას, მივიღებთ, რომ $0 = \omega\left(dt - \frac{dx}{v}\right)$, საიდანაც $v = \frac{dx}{dt}$.

აქედან გამომდინარე, ***რხევების ფიქსირებული ფაზის გავრცელების სიჩქარე წარმოადგენს ტალღის გავრცელების სიჩქარეს.***

ფაზური სიჩქარის გარდა განასხვავებენ ჯგუფურ სიჩქარეს. ეს ცნება შემოყავთ იმ შემთხვევაში, თუ შეუძლებელია რეალური ტალღის წარმოდგენა მხოლოდ ჰარმონიული განტოლების (4.2.) საშუალებით, ანუ როცა ტალღა წარმოადგენს სინუსოიდალური ტალღების ჯგუფის ჯამს.

ტალღის სიგრძე ეწოდება მანძილს იმ ორ წერტილს შორის, რომელთა ფაზები ერთი და იგივე მომენტში განსხვავდებიან 2π-თი. ის ტოლია მანძილისა, რომელსაც გადის ტალღა რხევის პერიოდის განმავლობაში:

$$\lambda = Tv. \qquad (4.3.)$$

ტალღის განტოლება (4.2.) წარმოადგენს იმ კერძო წარმოებულებიანი ზოგადი დიფერენციალური განტოლების ერთ-ერთი შესაძლო ამონახსენს, რომელიც აღწერს გარემოში შეშფოთების გავრცელების პროცესს. ასეთ განტოლებას ტალღური განტოლება ეწოდება.

რომ შეგვექმნას წარმოდგენა ტალღურ განტოლებაზე, ჩავატაროთ (4.2.) განტოლების დიფერენცირება ორჯერ დროის და ორჯერ კოორდინატის მიხედვით.

$$\frac{\partial s}{\partial t} = -A\omega \sin\left[\omega\left(t - \frac{x}{\nu}\right)\right], \quad \frac{\partial s}{\partial t} = -A\omega_2 \cos\left[\omega\left(t - \frac{x}{\nu}\right)\right]; \qquad (4.4.)$$

$$\frac{\partial s}{\partial t} = -A\frac{\omega}{\nu} \sin\left[\omega\left(t - \frac{x}{\nu}\right)\right], \quad \frac{\partial^2 s}{\partial x^2} = A\frac{\omega^2}{\nu^2} \cos\left[\omega\left(t - \frac{x}{\nu}\right)\right]; \qquad (4.5.)$$

(4.4.) და (4.5.) განტოლებებში მეორე რიგის წარმოებულების შედარებით მივიღებთ ერთგანზომილებიან ტალღურ განტოლებას

$$\frac{\partial^2 s}{\partial x^2} = \frac{1}{\nu^2}\frac{\partial^2 s}{\partial t^2}. \qquad (4.6.)$$

კერძო წარმოებულებიანი განტოლების ამოხსნა მოცემული კურსის ფარგლებს სცილდება. ერთი ამონახსენი (4.2.) ცნობილია. მაგრამ მნიშვნელოვანია აღვნიშნოთ შემდეგი. თუ რომელიმე ფიზიკური (მექანიკური, სითბური, ელექტრული, მაგნიტური და ა.შ.) სიდიდის ცვლილება პასუხობს (4.6.) განტოლებას, ეს ნიშნავს, რომ შესაბამისი ფიზიკური სიდიდე ტალღის სახით, υ სიჩქარით ვრცელდება.

2.5. დოპლერის ეფექტი

დამკვირვებლის (ტალღების მიმღების) მიერ აღქმული ტალღის სიხშირის ცვლილებას, რომელიც გამოწვეულია ტალღის წყაროსა და დამკვირვებლის ერთმანეთის მიმართ მოძრაობით, დოპლერის ეფექტი ეწოდება. ანუ, თუ ტალღების წყარო და დამკვირვებელი ერთმანეთის მიმართ მოძრაობენ, დამკვირვებლის მიერ აღქმული ტალღის სიხშირე არ ემთხვევა ტალღის წყაროს სიხშირეს.

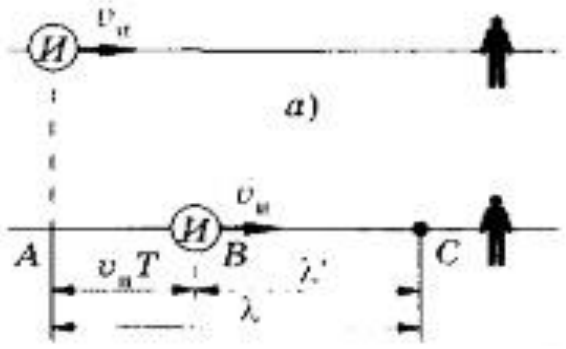
წარმოვიდგინოთ, რომ დამკვირვებელი $\nu_დ$ სიჩქარით უახლოვდება ტალღების წყაროს, რომელიც გარემოს მიმართ უძრავია. ამ დროს მას ხვდება მეტი ტალღა, ვიდრე უძრაობის პირობებში იგივე დროით ინტერვალში. ეს ნიშნავს, რომ აღქმული ν' სიხშირე წყაროს მიერ გენერირებული (წარმოქმნილი) ტალღების სიხშირეზე მეტია. მაგრამ რადგან ტალღის სიგრძე, მისი გავრცელების სიხშირე და სიჩქარე

ურთიერთკავშირშია $\nu' = \frac{\nu}{\lambda}$, ამიტომ $\nu' = \frac{\nu - \nu_დ}{\lambda}$, ანუ $\lambda = \frac{\upsilon}{\nu}$ გამოსახულების გათვალისწინებით

$$\nu' = \frac{\upsilon - \nu_დ}{\upsilon}\nu. \qquad (4.7.)$$

მეორე შემთხვევა: ტალღების წყარო „წ“ მოძრაობს $\nu_წ$ სიჩქარით დამკვირვებ-ლისკენ, რომელიც უძრავია გარემოს მიმართ (ნახ. 4.2., ა). რამდენადაც წყარო მოძრაობს მის მიერვე გენერირებული ტალღების მოძრაობის მიმართულებით, ტალღის სიგრძე იქნება ნაკლები, ვიდრე უძრავი წყაროს შემთხვევაში. მართლაც, ტალღის სიგრძე ტოლია იმ ორ წერტილს შორის მანძილისა, რომელთა შორის ფაზების სხვაობაა 2π. ერთი პერიოდის ტოლი T დროის განმავლობაში ტალღა გავრცელდება λ მანძილზე (ნახ. 4.2., ბ), ხოლო ტალღების წყარო გადაადგილდება $AB = \nu_წ T$ მანძილზე. ამ დროს B და C წერტილების ფაზები განსხვავდება 2π-თი; აქედან გამომდინარე, მათ შორის მანძილი იმ ტალღის λ' სიგრძის ტოლია, რომელიც წარმოიქმნება გამოსხივების წყაროს მოძრაობისას. (4.2.) ნახატისა და $\nu = \frac{\upsilon}{\lambda}$ ტოლობის გამოყენებით შევასრულოთ რამდენიმე გამოთვლა:

$$\nu' = \lambda - \frac{\nu_წ}{\upsilon} = \frac{\nu}{\upsilon} - \frac{\upsilon_წ}{\nu} = \frac{\left(\upsilon - \nu_დ\right)}{\upsilon}. \qquad (4.8.)$$



ნახ.4.2.

ამ შემთხვევაში დამკვირვებელი აღიქვამს ტალღას, რომლის რხევის სიხშირეა

$$\nu'' = \frac{\nu}{\lambda'} = \frac{\nu}{\upsilon - \nu_წ}. \qquad (4.9.)$$

დამკვირვებლისა და წყაროს ერთმანეთისკენ ერთდროული მოძრაობისას აღქმული სიხშირის გასაანგარიშებელი ფორმულა მიიღება (4.9.) ფორმულაში ν-ს ნაცვლად ν'-ის ჩასმით:

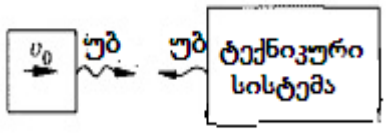
$$\nu''' = \frac{\nu}{\upsilon - \nu_წ}\frac{\upsilon + \nu_დ}{\nu}\nu = \frac{\upsilon + \nu_დ}{\upsilon - \nu_წ}\nu. \qquad (4.10.)$$

როგორც (4.10) გამოსახულებიდან ჩანს, ტალღების წყაროსა და დამკვირვებლის დაახლოვებისას ამ უკანასკნელის მიერ აღქმული სიხშირე გენერირებულზე მეტია. თუ (4.10) ფორმულაში $\nu_დ$-ს და $\nu_წ$-ს შევუცვლით ნიშნებს, მივიღებთ ანალოგიურ ფორმულას დამკვირვებლის (მიმღების) მიმართ ტალღების წყაროს დაშორების შემთხვევისთვის. ამრიგად, შეგვიძლია ჩავწეროთ ზოგადი ფორმულა

$$\nu''' = \frac{\upsilon + \nu_დ}{\upsilon \mp \nu_წ}\nu. \qquad (4.11.)$$

სადაც „ზედა“ ნიშნები ფორმულაში გამოიყენება ტალღების წყაროსა და მიმღების დაახლოების, ხოლო „ქვედა“ ნიშნები, შესაბამისად, – მათი დაშორების შემთხვევაში.

დოპლერის ეფექტი შეიძლება გამოვიყენოთ გარემოში სხეულის მოძრაობის სიჩქარის განსაზღვრისთვის. სამედიცინო თვალსაზრისით ამას განსაკუთრებული მნიშვნელობა აქვს. დაწვრილებით განვიხილოთ ასეთი შემთხვევა.



ნახ.4.3.

დავუშვათ, რომ ულტრაბგერის გენერატორი გაერთიანებულია მიმღებთან ერთგვარი ტექნიკური სისტემის სახით (ნახ.4.3.). ტექნიკური სისტემა უძრავია გარემოს მიმართ. გარემოში $\nu_ო$ სიჩქარით მოძრაობს ობიექტი

(სხეული). გენერატორი გამოასხივებს $\nu_{გ}$ სიხშირის ულტრაბგერას. მოძრავი ობიექტის, როგორც დამკვირვებლის, მიერ აღიქმება $\nu_{დ}$ სიხშირე, რომელიც შეგვიძლია გავიგოთ (4.7.) ფორმულის გამოყენებით:

$$\nu_{დ} = \frac{\upsilon + \nu_{ო}}{\nu}\nu_{გ}, \qquad (4.12.)$$

სადაც ν არის მექანიკური ტალღის (ულტრაბგერის) გავრცელების სიჩქარე.

$\nu_{დ}$ სიხშირის ულტრაბგერითი ტალღა აირეკლება მოძრავი ობიექტის მიერ ტექნიკური სისტემის მიმართულებით. მიმღები აღიქვამს უკვე სხვა სიხშირეს – $\nu_{მიმ}$ (დოპლერის ეფექტი), რომელიც შეგვიძლია გამოვსახოთ (4.9.) ფორმულის გამოყენებით

$$\nu_{მიმ} = \frac{\nu}{\upsilon - \nu_{ო}}\nu_{დ},$$

ან (4.12.) გამოსახულების გათვალისწინებით

$$\nu_{მიმ} = \frac{\nu}{\upsilon - \nu_{ო}}\frac{\upsilon + \nu_{ო}}{\nu}\nu_{გ} = \frac{\nu + \upsilon_{ო}}{\upsilon - \nu_{ო}}\nu_{გ}. \qquad (4.13.)$$

ამრიგად, სიხშირეთა სხვაობა ტოლია

$$\nu_{დოპ} - \nu_{მიმ} - \nu_{გ} = \frac{\nu + \upsilon_{ო}}{\upsilon - \nu_{ო}}\nu_{გ}, \qquad \nu_{გ} = \frac{\nu + \upsilon_{ო} - \upsilon + \nu_{ო}}{\upsilon - \nu_{ო}}\nu_{გ} = \frac{2\nu_{ო}}{\upsilon - \nu_{ო}}\nu_{გ} \qquad (4.14.)$$

და მასსიხშირეთა დოპლერის წანაცვლებასუწოდებენ.

სამედიცინო პროგრამებში ულტრაბგერის სიჩქარე მნიშვნელოვნად აღემატება ობიექტის მოძრაობის სიჩქარეს $\nu >> \nu_{ო}$. ასეთი შემთხვევებისთვის (4.14.) განტოლებიდან მივიღებთ

$$\nu_{დოპ} = \frac{2\nu_{ო}}{\upsilon}\nu_{გ}. \qquad (4.15.)$$

დოპლერის ეფექტი გამოიყენება სისხლის ნაკადის სიჩქარის, სარქველებისა და გულის კედლების, ასევე სხვა ორგანოების მოძრაობის სიჩქარის (დოპლერული ექოკარდიოგრაფია) დასადგენად.

თავი 3. აკუსტიკა

აკუსტიკა ფიზიკის დარგია, რომელიც შეისწავლის დრეკად რხევებს და ტალღებს ყველაზე დაბალი სიხშირეებიდან მაქსიმალურად მაღალი სიხშირეებამდე (~10^{13}ჰც) დიაპაზონში. თანამედროვე აკუსტიკა მოიცავს საკითხთა ფართო წრეს. მასში შედის ფიზიკური აკუსტიკა, რომელიც სწავლობს სხვადასხვა გარემოში დრეკადი ტალღების გავრცელების თავისებურებებს; ფიზიოლოგიური აკუსტიკა, რომელიც შეისწავლის ადამიანისა და ცხოველის ორგანიზმში ბგერის აღმქმელი და ბგერის წარმომშობი ორგანოების მოწყობას და მუშაობას და ა.შ. სიტყვის ვიწრო გაგებით, აკუსტიკაში გულისხმობენ სწავლებას ბგერის შესახებ, ანუ აირებში, სითხეებსა და მყარ სხეულებში მიმდინარე იმ დრეკადი რხევების შესახებ, რომელიც აღქმადია ადამიანის ყურის მიერ (სიხშირეები 16-დან 20 000 ჰც-დე).

3.1. ბგერის ბუნება და მისი ფიზიკური მახასიათებლები

ბგერითი რხევები და ტალღები მექანიკური რხევებისა და ტალღების კერძო შემთხვევაა. მაგრამ სმენითი შეგრძნებების შესაფასებლად აკუსტიკური ცნებების გამოყენების დიდი მნიშვნელობის გამო, ასევე სამედიცინო პროგრამებიდან გამომდინარე, მიზანშეწონილია კონკრეტულად განვიხილოთ ზოგიერთი საკითხი.

განარჩევენ შემდეგ ბგერებს: 1) ტონები, ანუ მუსიკალური ბგერები; 2) ხმაური; 3)ბგერითი დარტყმა (აფეთქება).

ტონი ეწოდება ბგერას, რომელიც პერიოდულ პროცესს წარმოადგენს. თუ ეს პროცესი ჰარმონიულია, ტონს უწოდებენ მარტივს ან სუფთას, ხოლო შესაბამის ბრტყელ ბგერით ტალღას (4.2.) განტოლებით აღწერენ. სუფთა ტონის ძირითადი ფიზიკური მახასიათებელია სიხშირე. ***ანჰარმონიულ*** [2]

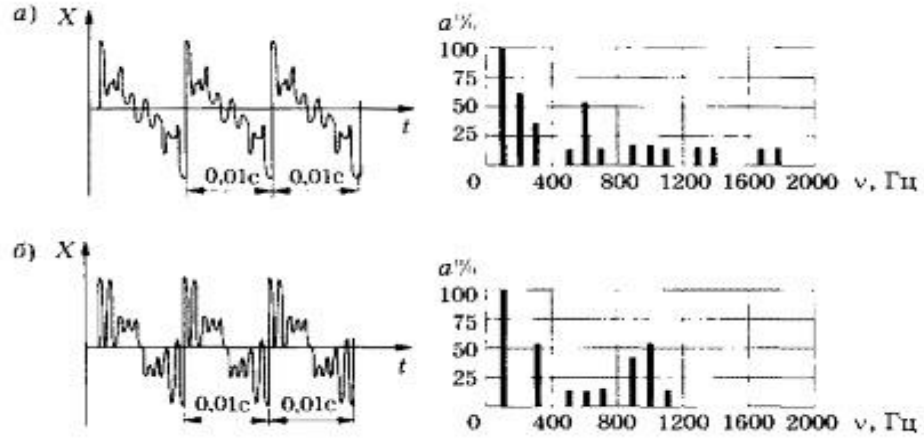
[2]ანჰარმონიული – არაჰარმონიული რხევა.

რხევებს შეესაბამება რთული ტონი. მარტივ ტონს გამოსცემს, მაგალითად, კამერტონი. რთული ტონები იქმნება მუსიკალური ინსტრუმენტებით, მეტყველების აპარატით (ხმოვანი ბგერები) და ა.შ.

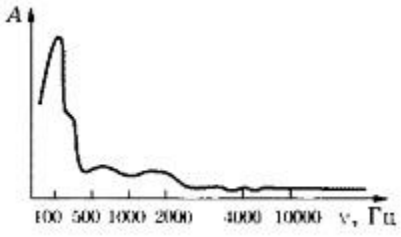
რთული ტონი შეგვიძლია დავშალოთ მარტივ ტონებად. ასეთი დაშლის დროს $\nu_{ბ}$ უმცირესი სიხშირე ***ძირითად ტონს*** შეესაბამება. დანარჩენ ***ობერტონებს*** (ჰარმონიკებს) აქვთ $2\nu_{ბ}$, $3\nu_{ბ}$ და ა.შ. სიხშირეები. სიხშირეთა ნაკრებს მათი ფარდობი-თი ინტენსივობის (ან A ამპლიტუდის) მითითებით ***აკუსტიკური სპექტრი*** ეწოდება. რთული ტონის სპექტრი ხაზოვანია; (5.1.) ნახატზე ნაჩვენებია როიალზე (ა) და კლარნეტზე (ბ) აღებული ერთი და იგივე ნოტის $\nu_{ბ}$=ჰც აკუსტიკური სპექტრები. ამრიგად, აკუსტიკური სპექტრი რთული ტონის მნიშვნელოვანი ფიზიკური თვისებაა.

ხმაური ეწოდება ბგერას, რომელიც ხასიათდება დროსთან არა გან-მეორებადი,რთული დამოკიდებულებით.

ხმაურს მიაკუთვნებენ მანქანების ვიბრაციას, აპლოდისმენტებს, სანთურის ალის ხმაურს, ფაჩუნს, ჭრაჭუნს, მეტყველების თანხმოვან ბგერებს და ა.შ.



ნახ.5.1.



ნახ.5.2.

ხმაური შეიძლება განვიხილოთ, როგორც მოუწესრიგებლად ცვლადი რთული ტონები. თუ შევეცდებით, გარკვეული დონის დაშვებებით, გავშალოთ ხმაური სპექტრად, აღმოჩნდება, რომ ეს სპექტრი უწყვეტია. მაგალითად სპექტრი, რომელსაც იძლევა ბენზინის სანათურში გაზის წვის ხმაური (ნახ. 5.2.).

ბგერითი დარტყმა წარმოადგენს ხანმოკლე ბგერით ზემოქმედებას: დატკაცუნება, აფეთქება და ა.შ. არ უნდა აგვერიოს ერთმანეთში ბგერითი დარტყმა და აფეთქების (დარტყმითი) ტალღა.

ბგერის როგორც მექანიკური ტალღის ენერგეტიკული მახასიათებელია ინტენსივობა.

ბგერის შესაფასებლად პრაქტიკულად მოსახერხებელია არა ინტენსივობის, არამედ ***ბგერის წნევის*** გამოყენება. ანუ იმ წნევისა, რომელიც დამატებით წარმოიქმნება ბგერითი ტალღების თხევად ან აიროვან გარემოში გავრცელებისას. ბრტყელი ტალღის ინტენსივობა დაკავშირებულია ბგერის p წნევასთან შემდეგი დამოკიდებულებით

$$\mathrm{I} = \frac{p^2}{(2\rho c)}, 3$$

სადაც ρ გარემოს სიმკვრივეა, ხოლო c – სინათლის სიჩქარე.

ნორმალური ადამიანის ყური აღიქვამს ბგერის ინტენსივობის საკმაოდ დიდ დიაპაზონს: ასე მაგალითად, 1 კჰც სიხშირეზე სმენადობის ზღურბლიდან ($I_{ბ}$=10-12 ვტ/მ 2ან $p_{ბ}$=105 პა) ტკივილის ზღურბლამდე (I_{max} =10 ვტ/მ2 ან p_{max} =60 პა). ამ ინტენსივობების შეფარდებაა 1013, ამიტომ უფრო მოსახერხებელია ლოგარითმული ერთეულებით და ლოგარითმული სკალით სარგებლობა. ხმის ინტენსივობის დონეების სკალა იქმნება შემდეგნაირად: $I_{ბ}$-ს თვლიან სკალის საწყის დონედ და ნებისმიერი სხვა I ინტენსივობა გამოიხატება მისი $I_{ბ}$-თან შეფარდების ათობითი ლოგარითმით.

[3] უფრო ზუსტად აქ p-ში იგულისხმება ბგერის წნევის ამპლიტუდა.

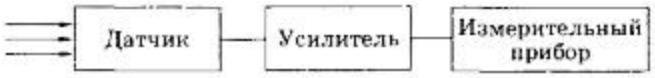
$L_ბ=lg(I/ I_ბ)$, (5.1.)

ხოლო ბგერის წნევისთვის

$L_ბ=lg(p/ p_ბ)$.

დეციბელების გამოყენების შემთხვევაში გვაქვს, შესაბამისად

$L_{დბ}=10lg(I/I_ბ)$ და $L_{დბ}=20lg(p/p_ბ)$. (5.2.)



ნახ.5.3.

აირში ბგერის წნევის გაზომვა წარმოებს საზომი მიკროფონით, რომელიც შედგება აკუსტიკური სიდიდის ელექტრულ სიგნალად გარდამქმნელი მრიც-ხველისგან, ელექტრული გამაძლიერებლისგან და ელექტრული საზომი ხელსა-წყოსგან (ნახ. 5.3.). ეს სქემა წარმოადგენს ზოგადი სტრუქტურული სქემის კერძო შემთხვევას.

3.2. ბგერითი შეგრძნებების დახასიათება.

აუდიომეტრიის ცნება

5.1. პარაგრაფში განვიხილეთ ბგერის ობიექტური მახასიათებლები, რომლებიც შეიძლება შევაფასოთ შესაბამისი ხელსაწყოებით ადამიანისგან დამოუკიდებლად. მაგრამ ბგერა წარმოადგენს სმენითი შეგრძნებების ობიექტს, ამიტომ ადამიანის მიერ სუბიექტურადაც ფასდება.

ტონების აღქმისას ადამიანი მათ განარჩევს სიმაღლის მიხედვით.

ტონის სიმაღლე სუბიექტური მახასიათებელია, რომელიც, პირველ რიგში, ძირითადი ტონის სიხშირით არის განპირობებული.

სიმაღლე ბევრად უფრო ნაკლებად არის დამოკიდებული ტონის სირთულეზე და მის ინტენსივობაზე: რაც უფრო მაღალი ინტენსივობისაა ბგერა, მით უფრო დაბალი ტონის ბგერად აღიქმება.

ბგერის ტემბრი თითქმის სრულად და მხოლოდ მისი სპექტრალური შემადგენლობით განისაზღვრება.

(5.1.) ნახატზე ა) და ბ) განსხვავებული აკუსტიკური სპექტრები სხვადასხვა ტემბრს შეესაბამება, თუმცა მათი ძირითადი ტონი და, შესაბამისად, ტონის სიმაღლე ერთნაირია.

სიმაღლე ბგერის კიდევ ერთი სუბიექტური შეფასებაა, რომელიც ახასიათებს სმენითი შეგრძნების დონეს.

სუბიექტურობის მიუხედავად, სიმაღლე რაოდენობრივადაც შეიძლება გაიზომოს ორი განსხვავებული წყაროდან მიღებული სმენითი შეგრძნებების შედარებით.

სიმაღლის დონეების სკალის შექმნას საფუძვლად უდევს ძალიან მნიშვნელოვანი ფსიქოფიზიკური კანონი, რომელიც ვებერ-ფეხნერის სახელითაა ცნობილი: თუ გაღიზიანება გეომეტრიული პროგრესიით იზრდება (ანუ ერთი და იგივე რიცხვის ჯერადად), მაშინ ამ გაღიზიანების შეგრძნება იზრდება არითმეტიკული პროგრესიით (ანუ ერთი და იგივე სიდიდით). ბგერასთან მიმართებაში ეს ნიშნავს, რომ თუკი ბგერის

ინტენსივობა იღებს რიგ თანამიმდევრულ მნიშვნელობებს, მაგალითად $aI_ბ$, $a^2I_ბ$, $a^3I_ბ$ (სადაც a კოეფიციენტია და $a>1$) და ა.შ., მაშინ მათი შესაბამისი სიმაღლის ბგერის შეგრძნებები იქნება $E_ბ$, $2E_ბ$, $3E_ბ$ და ა.შ.

მათემატიკურად ეს ნიშნავს, რომ ბგერის სიმაღლე ინტენსივობის ლოგარითმის პროპორციულია. თუ ერთდროულად მოქმედებს ორი ბგერითი გამღიზიანებელი I და $I_ბ$ ინტენსივობებით, ამასთანავე $I_ბ$ – სმენადობის ზღურბლია, მაშინ, ვებერ-ფეხნერის კანონის მიხედვითსიმაღლე $I_ბ$-ს მიმართ შემდეგნაირად უკავშირდება ინტენსივობას:

$$E = k\ lg\ (I/I_ბ), \qquad (5.3.)$$

სადაც k პროპორციულობის კოეფიციენტია, რომელიც დამოკიდებულია სიხშირესა და ინტენსივობაზე.

k კოეფიციენტი მუდმივი რომ ყოფილიყო, მაშინ (5.1.) და (5.3.) გამოსახულებებიდან გამომდინარე, ბგერის ინტენსივობის ლოგარითმული სკალა იქნებოდა ბგერის სიმაღლის სკალის შესაბამისი. ამ შემთხვევაში ბგერის სიმაღლეს, ისევე როგორც მის ინტენსივობას, გამოვხატავდით ბელებსა და დეციბელებში. მაგრამ k-ს ძლიერი დამოკიდებულება ბგერის სიხშირესა და ინტენსივობაზე არ გვაძლევს საშუალებას სიმაღლის განსაზღვრა დავიყვანოთ (5.3.) ფორმულის მარტივ გამოყენებამდე.

პირობითად თვლიან, რომ 1კჰც სიხშირეზე ბგერის სიმაღლისა და ინტენსივობის სკალები სრულად ემთხვევა ერთმანეთს, ანუ $k = 1$ და $E_ბ = k\ lg\ (I/I_ბ)$, ან (5.2.) გამოსახულების ანალოგიურად,

$$E_ფ = 10 lg\ (I/I_ბ). \qquad (5.4.)$$

ბგერის ინტენსივობის სკალის სიმაღლის სკალისგან განსასხვავებლად დეციბელებს უწოდებენ ფონებს (ფონი), ამიტომაც შემოგვყავს $E_ფ$ აღნიშვნა.

ბგერის სიმაღლე სხვა სიხშირეებზე შეიძლება გავზომოთ საკვლევი ბგერის შედარებით 1 კჰც სიხშირის ბგერასთან. ამისთვის ბგერის (ხმის) გენერატორის[4] საშუალებით წარმოქმნიან 1კჰც სიხშირის ბგერას. ბგერის

[4]ბგერის გენერატორი ეწოდება ელექტრულხელსაწყოს, რომელიც ახდენს ბგერითი დიაპაზონის სიხშირის ელექტრული რხევების გენერირებას. მაგრამ თავად

ინტენსივობას ცვლიან მანამ, სანამ არ მიაღწევენ სმენით შეგრძნებას, რომელიც საკვლევი ბგერის სიმაღლის შეგრძნების ანალოგიურია. ხელსაწყოს საშუალებით გაზომილი 1კჰც სიხშირის ბგერის ინტენსივობა დეციბელებში ტოლია ამ ბგერის სიმაღლისა ფონებში.

სხვადასხვა სიხშირეებზე ბგერის სიმაღლესა და ინტენსივობას შორის შესაბამისობის დასადგენად სარგებლობენ ტოლი სიმაღლეების მრუდებით (ნახ. 5.4.). ეს მრუდები აგებულია გასაშუალოებული მონაცემების საფუძველზე, რომლებიც მიღებულია ზემოთ აღწერილი მეთოდით ნორმალური სმენის ადამიანების გამოკვლევისას.

ქვედა მრუდი შეესაბამება ყველაზე სუსტი, სმენადობის ქვედა ზღვარზე მყოფი ბგერების ინტენსივობას. ყოველი მათგანისთვის $E_ფ$=0. 1 კჰც-ის შესაბამისი ბგერის ინტენსივობაა $I_გ$=10^{-12} ვტ/მ2. მოყვანილი მრუდებიდან ჩანს, რომ საშუალო ადამიანის ყური ყველაზე უფრო მგრძნობიარეა 2500-3000 ჰც სიხშირეების მიმართ. ყოველი შუალედური მრუდი შეესაბამება ერთნაირ სიმაღლეს, მაგრამ ბგერის სხვადასხვა ინტენსივობას სხვადასხვა სიხშირეებისთვის. ტოლი სიმაღლის შესაბამისი ცალკეული მრუდით შეიძლება ვიპოვოთ ინტენსივობები, რომლებიც განსაზღვრულ სიხშირეებზე ამ სიმაღლის შეგრძნებას იწვევს. ტოლი სიმაღლის მრუდების ერთობლიობის გამოყენებით შეგვიძლია ვიპოვოთ ბგერის სიმაღლეები სხვადასხვა სიხშირეებისთვის, რომელიც შეესაბამება გარკვეულ ინტენსივობას. მაგალითად დავუშვათ, რომ 100 ჰც სიხშირის ბგერის ინტენსივობას შეესაბამება L = 60 დბ. როგორი იქნება ამ ბგერის სიმაღლე? (5.4.) ნახატზე ვპოულობთ წერტილს კოორდინატებით 100 ჰც და 60 დბ. ის ძევს მრუდზე, რომელიც შეესაბამება 30 ფონის ბგერის სიმაღლეს, რაც წარმოადგენს პასუხს ჩვენს კითხვაზე.

იმისათვის, რომ გარკვეული წარმოდგენა შეგვექმნას სხვადასხვა განსხვავებული ხასიათის ბგერებზე, მოვიყვანოთ მათი ფიზიკური მახასიათებლები (ცხრ.1.) სმენის სიმახვილის გაზომვის მეთოდს აუდიომეტრია ეწოდება.

ბგერითი გენერატორი არ წარმოადგენს ბგერის წყაროს. თუმის მიერ წარმოქმნილ რხევებს გადვიტანთ დინამიკებში, წარმოიქმნება ბგერა, რომლის ტონალობა გენერატორის სიხშირეს შეესაბამება. ბგერის გენერატორში გათვალისწინებულია რხევების ამპლიტუდისა და სიხშირის თანდათანობითი (მდორე) ცვლილების შესაძლებლობა.

ცხრილი 1.

ბგერისმიახლოებითიხასიათი	ბგერისინტენსივობა ვტ/მ2	ბგერითიწნევა პა	ბგერის ინტენსივობის დონე სმენადობის ზღურბლის მიმართ, დბ(ან ბგერის სიმაღლის დონე 1კჰც სიხშირის ფონისთვის)
სმენადობის ზღურბლი	10–12	0,00002	0
გულის ტონები სტეტოსკოპში	10–11	0,000064	10
ჩურჩული	10–10	0,0002	20
	10–9	0,00064	30
ლაპარაკი:			
ჩუმი	10–8	0,002	40
ნორმალური	10–7	0,0064	50
ხმამაღალი	10–6	0,02	60
ქუჩის ხმაური	10–5	0,064	70
ყვირილი	10–4	0,2	80
ხმაური			
მეტროს ვაგონში	10–3	0,64	90
მოტოციკლის ძრავის	10–2	2	100

(მაქსიმალური)			
თვითმფრინავის	10–1	6,4	110
იგივე, ოღონდ უშუალო მახლობლობაში	10–0	20	120
ტკივილის შეგრძნების ზღურბლი	10	64	130

აუდიომეტრიის ჩატარებისას სპეციალურ ხელსაწყოთი (აუდიომეტრით) განსაზღვრავენ სმენითი შეგრძნების ზღურბლს სხვადასხვა სიხშირეებზე; მიღებულ მრუდს ეწოდება აუდიოგრამა. ავადმყოფის აუდიოგრამის შედარება სმენითი შეგრძნებების ზღურბლის ნორმალურ მრუდთან გვეხმარება სმენის ორგანოების დაავადებების დიაგნოსტირებაში.

ხმაურის ხმამაღლობის დონის ობიექტური გაზომვისთვის გამოიყენება ხმაურმზომი. სტრუქტურულად ის შეესაბამება (5.3.) ნახატზე გამოსახულ სქემას. ხმაურმზომის თვისებები ადამიანის ყურის თვისებების მსგავსია (იხ. ტოლი სიმაღლეების მრუდები 5.4. ნახატზე), რისთვისაც იყენებენ მაკორექტირებელ ელექტრულ ფილტრებს ხმამაღლობის დონეების სხვადასხვა დიაპაზონისთვის.

3.3. კლინიკური კვლევის ბგერითი მეთოდების ფიზიკური საფუძვლები.

ბგერა, ისევე როგორც სინათლე, ინფორმაციის წყაროა, რაც წარმოადგენს მის ძირითად ფასეულობას.

ბუნების ხმები, ჩვენს გარშემო მყოფი ადამიანების ლაპარაკი, მომუშავე მანქანების ხმაური დიდი ოდენობის ინფორმაციას გვაწვდის. რომ წარმოვიდგინოთ ადამიანისთვის ბგერების მნიშვნელობა, საკმარისია დროებით წავართვათ საკუთარ თავს აღქმის შესაძლებლობა – უბრალოდ დავიხშოთ ყურები.

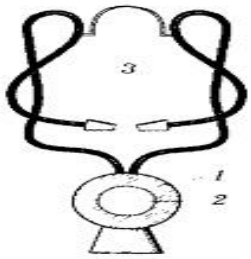
ბუნებრივია, რომ ბგერა შეიძლება იყოს ადამიანის შინაგანი ორგანოების მდგომარეობის შესახებ ინფორმაციის წყაროც.

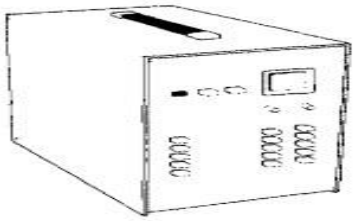
დაავადებების დიაგნოსტიკის გავრცელებული ბგერითი მეთოდია აუსკულტაცია (მოსმენა) – ცნობილი იყო ჯერ კიდევ ჩვ. წ. აღ.-მდე II საუკუნეში. აუსკულტაციისთვის იყენებენ ***სტეტოსკოპს*** ან ***ფონენდოსკოპს***. ფონენდოსკოპი (ნახ. 5.5.) შედგება ღრუ კაფსულისგან (1) ხმის გადამცემი მემბრანით (2), რომელიც უშუალოდ ეხება ავადმყოფის სხეულს. მისგან ექიმის ყურამდე მოდის რეზინის ორი მილი (3). ღრუ კაფსულაში წარმოიქმნება ჰაერის სვეტის რეზონანსი, რაც აძლიერებს ხმას და აუმჯობესებს აუსკულტაციას.

აუსკულტაციით შეგვიძლია მოვისმინოთ სუნთქვითი ხმაურები ფილტვებში, დაავადებისთვის დამახასიათებელი სხვადასხვა ხიხინი. გულის ტონების ცვლილებისა და შუილის წარმოქმნის მიხედვით შესაძლოა გამოვიტანოთ დასკვნა გულის მოქმედების შესახებ. აუსკულტაციის გამოყენებით შეგვიძლია, ასევე, დავადგინოთ კუჭ-ნაწლავის პერისტალტიკა, მოვისმინოთ ნაყოფის გულისცემა.

სასწავლო მიზნით ან კონსილიუმის დროს რამდენიმე მკვლევარის მიერ ავადმყოფის ერთდროულად მოსასმენად იყენებენ სისტემას, რომელშიც შედის მიკროფონი, გამაძლიერებელი და ხმამაღლა მოლაპარაკე, ან რამდენიმე ტელეფონი.

გულის მოქმედების დიაგნოსტიკისთვის გამოიყენება აუსკულტაციის მსგავსი მეთოდი, რომელსაც ***ფონოკარდიოგრაფიას*** უწოდებენ (ფკგ). ამ მეთოდის არსია გულის ტონებისა და შუილების გრაფიკული რეგისტრაცია და მათი დიაგნოსტიკური ინტერპრეტაცია. ფონოკარგიოგრამის ჩაწერა ხდება ფონოკარდიოგრაფიის საშუალებით (ნახ. 5.6.), რომელშიც შედის მიკროფონი, გამაძლიერებელი, სიხშირეთა ფილტრების სისტემა და ჩამწერი მოწყობილობა. (5.7.) ნახატზე ნაჩვენებია ნორმალური ფონოკარდიოგრამა.





ნახ.5.5. ნახ.5.6.

ზემოთ მოყვანილი ორი ბგერითი მეთოდისგან პრინციპულად განსხვავდება პერკუსიის მეთოდი. პერკუსია შინაგანი ორგანოების გამოკვლევის მეთოდია, რომლის დროსაც ხდება სხეულის ზედაპირზე დაკაკუნებით გამოწვეული ხმის საფუძველზე ცალკეულ ორგანოთა მდგომარეობის შესწავლა.

ნახ.5.7.

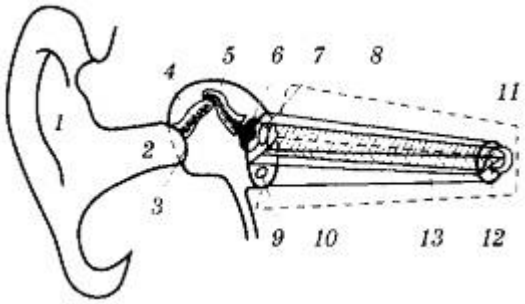
წარმოვიდგინოთ რაიმე სხეულის შიგნით დახურული ღრუ, რომელიც ჰაერით არის სავსე. თუ ამ სხეულში ბგერით რხევებს გამოვიწვევთ, ბგერის გარკვეულ სიხშირეზე ჰაერი ღრუში დაიწყებს რეზონირებას და ამ დროს გამოყოფს და აძლიერებს ტონს, რომელიც ღრუს ზომებსა და მდებარეობას შეესაბამება. სქემატურად ადამიანის სხეული შეგვიძლია წარმოვიდგინოთ, როგორც აირებით (ფილტვები), სითხეებით (შინაგანი ორგანოები) და მყარი ნივთიერებებით (ძვალი) სავსე მოცულობების ერთობლიობა. დარტყმის დროს სხეულის ზედაპირზე იქმნება რხევები, რომელთა სიხშირეებს ფართო დიაპაზონი აქვთ. ამ დიაპაზონიდან ზოგი რხევა საკმაოდ სწრაფად ჩაქრება, მაგრამ ის რხევები, რომლებიც დაემთხვევა ცარიელი ღრუების საკუთარ რხევებს, გაძლიერდება და რეზონანსის შედეგად მოსმენადი გახდება. გამოცდილი ექიმი

პერკუტორული ბგერების ტონის მიხედვით საზღვრავს შინაგანი ორგანოების მდგომარეობას და ტოპოგრაფიას.

3.4. სმენის ფიზიკა

განვიხილოთ სმენის ფიზიკის ზოგიერთი საკითხი გარეთა, შუა და შიგნითა ყურის მაგალითზე.

გარეთა ყური შედგება ყურის ნიჟარისა (1) და გარე სასმენი მილისგან (2) (ნახ.5.8.).



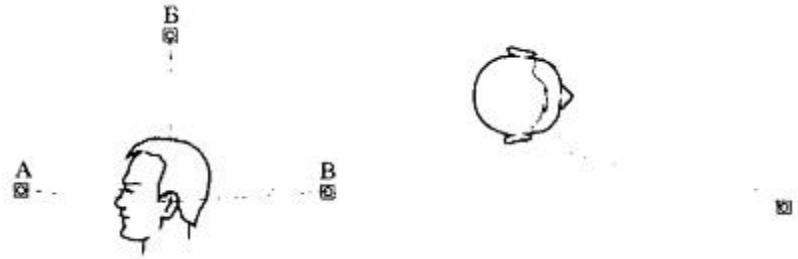
ნახ.5.8.

ადამიანის ყურის ნიჟარა არ თამაშობს არსებით როლს სმენისთვის. ის ხელს უწყობს ბგერის წყაროს ლოკალიზაციის განსაზღვრას, თუ ის განთავსებულია წინა ან უკანა მიმართულებით. უფრო გასაგებად რომ განვმარტოთ: წყაროდან წამოსული ბგერა ხვდება ყურის ნიჟარაში. ვერტიკალურ სიბრტყეში წყაროს მდებარეობიდან გამომდინარე (ნახ. 5.9.) ბგერითი ტალღები განსხვავებულად დიფრაგირებენ ყურის ნიჟარაზე ამ უკანასკნელის სპეციფიური ფორმის გამო. ეს იწვევს გარე სასმენ მილში მოხვედრილი ბგერითი ტალღის სპექტრალური შემადგენლობის ცვლილებასაც. ადამიანმა პრაქტიკული გამოცდილების შედეგად ისწავლა ბგერითი ტალღის სპექტრის ცვლილების ასოცირება დენის წყაროს მიმართულებასთან (ა, ბ, გ მიმართულებები 5.9. ნახატზე).

აღჭურვილია რა ბგერის ორი მიმღებით (ყურით) ადამიანს და ცხოველს შეუძლია დაადგინოს მიმართულება ბგერის წყაროსკენ ჰორიზონტალურ სიბრტყეშიც. (ბინაურალური ეფექტი; ნახ. 5.10). ეს აიხსნება იმით, რომ ბგერა წყაროდან ყურებამდე სხვადასხვა მანძილს გადის და მარჯვენა და მარცხენა ყურის ნიჟარებში მოხვედრილ ტალღებს შორის წარმოიქმნება ფაზათა სხვაობა. კავშირი ამ მანძილებისა (**δ**) და ფაზების (Δ_φ) სხვაობებს შორის ნაჩვენები იქნება სინათლის ინტერფერენციის მოვლენის ახსნისას. თუ ბგერის წყარო ადამიანის სახის პირდაპირ არის, მაშინ δ=0 და Δ_φ=0 თუ ბგერის წყარო განლაგებულია გვერდულად, ერთ-ერთი ყურის ნიჟარის მოპირდაპირედ, მაშინ მეორე ყურის ნიჟარაში ის დაყოვნებით მოხვდება. მიახლოებით ჩავთვალოთ, რომ ამ შემთხვევაში δ არის მანძილი ყურის ნიჟარებს შორის. შეგვიძლია ფორმულის მიხედვით გამოვითვალოთ ფაზათა სხვაობა, თუ ν=1კჰც და δ=0.15მ. ის დაახლოებით 1800-ის ტოლია.

ჰორიზონტალურ სიბრტყეში ბგერის წყაროსკენ სხვადასხვა მიმართულებას შეესაბამება ფაზათა სხვაობა 00-დან 1800-დე დიაპაზონში (ზემოთ მოყვანილი მონაცემებისთვის). თვლიან, რომ ნორმალური სმენის მქონე ადამიანს შეუძლია დააფიქსიროს ბგერის წყაროს მიმართულება 30 სიზუსტით, რასაც შეესაბამება ფაზათა სხვაობა 60. ამიტომ შეიძლება მივიჩნიოთ, რომ ადამიანს უნარი აქვს გაარჩიოს მის ყურებში მოხვედრილი ბგერითი ტალღების ფაზათა სხვაობა 60-ის სიზუსტით.

ბინაურალურ ეფექტს ფაზათა სხვაობის გარდა ხელს უწყობს ბგერის ინტენსივობის განსხვავებულობა მარჯვენა და მარცხენა ყურისთვის. (5.10) ნახატზე სქემატურად არის ნაჩვენები, რომ ბგერა წყაროდან მარცხენა ყურში დიფრაქციის შედეგად ხვდება.



ნახ.5.9.

ნახ.5.10.

ბგერითი ტალღა გადის გარე სასმენ მილს და ნაწილობრივ აირეკლება დაფის აპკით – (3) (იხ. ნახ.5.8.). დაცემული და არეკვლილი ტალღების ინტერენფერენციის შედეგად შეიძლება წარმოიქმნეს აკუსტიკური რეზონანსი. ამ შემთხვევაში ტალღის სიგრძე ოთხჯერ აღემატება გარეთა სასმენი მილის სიგრძეს. ადამიანის სასმენი მილის სიგრძე დაახლოებით 2.3 სმ-ია; შესაბამისად, აკუსტიკური რეზონანსი შეიძლება წარმოიქმნას შემდეგ სიხშირეზე

$$\nu = \frac{c}{\lambda} = \frac{3 \cdot 10^2}{4 \cdot 2{,}3 \cdot 10^{-2}} = 3 \text{ კჰც}.$$

შუა ყურის ყველაზე არსებით ნაწილს წარმოადგენს დაფის აპკი (3) და სასმენ ძვალთა კომპლექსი: ჩაქუჩი (4), გრდემლი (5) და უზანგი (6) შესაბამისი კუნთებით, მყესებითა და იოგებით. სასმენი ძვლები ახორციელებენ მექანიკური რხევების გადაცემას გარეთა ყურის ჰაერის გარემოდან შიგნითა ყურის თხევად გარემოსკენ. შიგნითა ყურის თხევად გარემოს აქვს ტალღური წინაღობა, რომელიც მიახლოებით წყლის ტალღური წინაღობის ტოლია. როგორც უკვე ვაჩვენეთ, ბგერითი ტალღის ჰაერიდან წყალში პირდაპირი გადასვლისას ხდება დაცემული ინტენსივობის მხოლოდ 0.123%-ის გადაცემა. ეს ძალიან ცოტაა. ამიტომ შუა ყურის ძირითადი დანიშნულება შიგნითა ყურისთვის უფრო დიდი ინტენსივობის ბგერის გადაცემაა. თუ ტექნიკურ ტერმინოლოგიას გამოვიყენებთ, შეგვიძლია ვთქვათ, რომ შუა ყური ერთმანეთს უთანხმებს ჰაერისა და შიგნითა ყურის სითხის ტალღურ წინაღობებს.

სასმენი ძვლების კომპლექსი (იხ. ნახ. 5.8.) ერთ ბოლოზე ჩაქუჩით არის დაკავშირებული დაფის აპკთან (ფართობი s_1=64მმ^2), მეორე ბოლოზე – უზანგით შიგნითა ყურის ოვალურ სარკმელთან (7) (ფართობი s_2=3მმ^2),

დაფის აპკზე მოქმედებს ბგერითი წნევა p_1, რაც განაპირობებს ძალას

$$F_1 = p_1 S_1. \qquad (5.9.)$$

შიგნითა ყურის ოვალურ სარკმელზე ამ დროს მოქმედებს F_2 ძალა, რომელის ქმნის p_2 ბგერით წნევას სითხეში. მათ შორის კავშირი:

$$F_1 = p_2 S_2. \qquad (5.10.)$$

სასმენი ძვლების სისტემა მუშაობს როგორც ბერკეტი O ღერძის მიმართ შიგნითა ყურის მხრიდან ადამიანისთვის ძალის 1.3-ჯერ მოგებით (სქემატური გამოსახულება მოცემულია (5.11.) ნახატზე), ამიტომ შეგვიძლია ჩავწეროთ:

$$\frac{F_1}{F_2} = \frac{l_2}{l_1}. \qquad (5.11.)$$

(5.9.)-ს (5.10.)-ზე გაყოფით და შედეგის (5.11)-თან შედარებით მივიღებთ:

$$\frac{F_1}{F_2} = \frac{p_1 S_1}{p_2 S_2} = \frac{l_2}{l_1}.$$

საიდანაც

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{S_1}{S_2} \cdot \frac{l_1}{l_2} = 20 \cdot 1.3 = 26.$$

ანუ ლოგარითმულ ერთეულებში

$L_{დბ} = 20 \lg (p_2/p_1) = 20 \lg 26 = 20 \cdot 1.415 \approx 28$დმ.

ამ დონეზე აძლიერებს შუა ყური გარეთა ბგერითი წნევის გადაცემას შიგნითა ყურისთვის.

შუა ყურის კიდევ ერთი ფუნქციაა რხევების გადაცემის შესუსტება დიდი ინტენსივობის ბგერის შემთხვევაში. ეს შუა ყურის სასმენი ძვლების კუნთების რეფლექტორული მოდუნებით ხდება.

შუა ყური ატმოსფეროს სასმენი (ევსტაქის) ლულით უკავშირდება.

გარეთა ყური და შუა ყური ბგერის გამტარი სისტემის ნაწილებია. შიგნითა ყური კი ბგერის მიმღებ სისტემას წარმოადგენს.

შიგნითა ყურის ძირითადი ნაწილია ლოკოკინა, რომელიც გარდაქმნის მექანიკურ რხევებს ელექტრულ სიგნალად. ლოკოკინას გარდა, შიგნითა ყურს ეკუთვნის ვესტიბულური აპარატიც, რომელსაც არ აქვს კავშირი სმენით ფუნქციებთან.

ადამიანის ლოკოკინა წარმოადგენს დაახლოებით 35 მმ სიგრძის ძვლოვან წარმონაქმნს და აქვს $2\frac{3}{4}$ ხვეულის მქონე, კონუსისმაგვარი სპირალის ფორმა. მისი დიამეტრი საფუძველთან დაახლოებით 9 მმ-ის ტოლია, სიმაღლე 5 მმ-ია.

უკეთ დასანახად 5.8. ნახატზე ლოკოკინა ნაჩვენებია სქემატურადდა გაშლილად. ლოკოკინის გასწვრივ გადის 3 არხი. ერთ-ერთ მათგანს, რომელიც იწყება ოვალურ სარკმელთან (7), ეწოდება ვესტიბულური კიბე (8). მეორე არხი მოდის მრგვალი სარკმლიდან (9). მას დაფის კიბე (10) ქვია. ვესტიბულური და დაფის კიბეები შეერთებულია ლოკოკინის თაღის არეში პატარა ნახვრეტის – ჰელიკოტრემის (11) საშუალებით. ამრიგად, ეს არხები ერთგვარ ერთიან სისტემას წარმოადგენს, რომელიც პერილიმფით არის ავსებული. უზანგის (6) რხევები გადაეცემა ოვალური სარკმლის (7) მემბრანას, მისგან – პერილიმფას და „ამობურცავს“ მრგვალი სარკმლის (9) მემბრანას. სივრცეს ვესტიბულურ და დაფის კიბეებს შორის ლოკოკინას არხი (12) ეწოდება. ის სავსეა ენდოლიმფით. ლოკოკინას არხსა და დაფის კიბეს შორის, ლოკოკინის გასწვრივ გადის ძირითადი (ბაზილარული) მემბრანა (13). მასზე მოთავსებულია კორტის ორგანო, რომელიც შეიცავს რეცეპტორულ (წამწამოვანი) უჯრედებს. ლოკოკინისგან გამოდის სმენის ნერვი (5.8. ნახატზე ეს დეტალები არ არის ნაჩვენები).

სწორედ კორტის ორგანო (სპირალური ორგანო) გარდაქმნის მექანიკური რხევების ელექტრულ სიგნალად.

ძირითადი მემბრანის სიგრძე დაახლოებით 32 მმ-ია, ის ფართოვდება და თხელდება ოვალური სარკმლიდან ლოკოკინის წვეროს მიმართულებით (0.1 მმ სიგანიდან 0.5 მმ-მდე). ძირითადი მემბრანა ფიზიკისთვის საკმაოდ საინტერესო სტრუქტურაა. მას აქვს სიხშირეების არჩევითობის უნარი. ამ თვისებას ჯერ კიდევ ჰელმჰოლცმა მიაქცია ყურადღება, რომელსაც ძირითადი მემბრანა წარმოედგინა პიანინოს აწყობილი სიმების რიგის ანალოგიურად. ნობელის პრემიის ლაურეატმა ბეკეშმა დაადგინა ამ რეზონატორული თეორიის მცდარობა. ბეკეშის ნამუშევრებში ნაჩვენებია, რომ ძირითადი მემბრანა წარმოადგენს მექანიკური აღგზნების გადაცემის არაერთგვაროვან ხაზს. აკუსტიკური სტიმულით ზემოქმედებისას ძირითად მემბრანაში ვრცელდება ტალღა. სიხშირიდან გამომდინარე, ეს ტალღა სხვადასხვა გვარად ილევა. რაც ნაკლებია სიხშირე, ოვალური სარკმლიდან

მით უფრო შორს გავრცელდება ტალღა ძირითად მემბრანაში მანამ, სანამ დაიწყებს მილევას. ასე მაგალითად, 300 ჰც სიხშირის ტალღა (მილევის) დაწყებამდე ვრცელდება ოვალური სარკმელიდან დაახლოებით 25 მმ-ზე, ხოლო 100 ჰც სიხშირის ტალღა თავის მაქსიმუმს დაახლოებით 30 მმ-ზე აღწევს.

ამ დაკვირვებების საფუძველზე შემუშავებული იქნა თეორიები, რომელთა მიხედვითაც ტონის სიმაღლის აღქმა განისაზღვრება ძირითადი მემბრანის რხევის მაქსიმუმის მდგომარეობით. ამრიგად, შიგნითა ყურში იკვეთება გარკვეული ფუნქციური ჯაჭვი: ოვალური სარკმლის მემბრანის რხევა – პერილიმფის რხევა – ძირითადი მემბრანის რთული რხევები – წამწამოვანი უჯრედების (კორტის ორგანოს რეცეპტორების) გაღიზიანება – ელექტრული სიგნალის გენერირება.

სიყრუის ზოგიერთი ფორმა დაკავშირებულია ლოკოკინის რეცეპტორული აპარატის დაზიანებასთან. ამ შემთხვევაში ლოკოკინას არ შეუძლია მექანიკური რხევების ზემოქმედებით ელექტრული სიგნალების გენერირება. ასეთი ყრუების დახმარება შესაძლებელია. ამისათვის აუცილებელია ლოკოკინაში ელექტროდების იმპლანტირება და მათზე ისეთი ელექტრული სიგნალების გადაცემა, რომლებიც შეესაბამება მექანიკური სტიმულის ზემოქმედებით წარმოქმნილ ელექტრულ სიგნალებს.

ლოკოკინის ძირითადი ფუნქციის ასეთი პროთეზირება (კოხლეარული პროტეზირება) მთელ რიგ ქვეყნებში წარმოებს. კოხლეარული პროთეზირება დამუშავებული და განხორციელებულია. კოხლეარული პროთეზი ნაჩვენებია (5.12.) ნახატზე: 1 – ძირითადი კორპუსი, 2 – ყურსამაგრი მიკროფონით, 3 – კვების წყაროსთან მისაერთებელი ჩანგალი.

3.5. ულტრაბგერა და მისი გამოყენება მედიცინაში

ულტრაბგერა (უბ) ეწოდება რხევებს და ტალღებს სიხშირით 20 კჰც. ულტრაბ-გერის სიხშირეების ზედა ზღვარი შეიძლება ჩაითვალოს 10^9 -10^{10} ჰც. ტოლად.

ულტრაბგერის გენერირებისათვის გამოიყენება ხელსაწყო, რომელსაც ეწოდება უბ- გამომსხივებელი. დიდი გამოყენება აქვს ელექტრომექანიკურ გამომსხივებლებს, რომელიც მუშაობს შებრუნებული პიეზოელექტრული ეფექტის საფუძველზე. შებრუნებული პიეზოეფექტი დაფუძნებულია სხეულების მექანიკურ დეფორმა-ციაზე ელექტრული ველის მოქმედების შედეგად. ამ გამომსხივებლის ძირითადი ნაწილი არის პლასტინა, კარგად გამოსახული პიეზოელექტრული თვისებებით (კვარცი, სეგნეტის მარილი, ბარიუმის ტიტანიტი). პლასტინის ზედაპირზე დატანებულია ორი ელექტროდი. თუ ელექტროდებს მოვდებთ ცვლად ელექტრულ დაძაბულობას 3 გენერატორიდან, მაშინ პლასტინა დაიწყებს ვიბრირებას, და გამოასხივებს მექანიკურ ტალღას შესაბამისი სიხშირით.

მექანიკურ ტალღის გამოსხივების საუკეთესო ეფექტი მიიღწევა, როდესაც სრულდება რეზონანსის პირობა. ასე მაგალითად პლასტინისათვის, რომლის სისქე არის 1 მმ. რეზონანსი წარმოიშობა კვარცისათვის – 2,87 მჰც, სეგნეტის მარილისათვის – 1,5 მჰც და ბარიუმის ტიტანისათვის – 2, 75 მჰც.

ულტრაბგერის მიმღები შეიძლება შევქმნათ პიეზოელექტრული ეფექტის მეშვეობით (პირდაპირი პიეზოეფექტი). ამ დროს მექანიკური ტალის უბ – ტალღის მოქმედების შედეგად წარმოიშობა კრისტალის დეფორმაცია. (სურ. 6.13, ბ), რომელიც პიეზოეფექტის დროს, იწვევს ცვლადი ელექტრული ველის გენერაციას. მიღებული ელექტრული დაძაბულობა შეიძლება გაზომოლ იქნას.

ულტრაბგერის გამოყენება მედიცინაში დაკავშირებულია მისი გავრცელების თავისებურებასთან. განვიხილოთ ეს საკითხი.

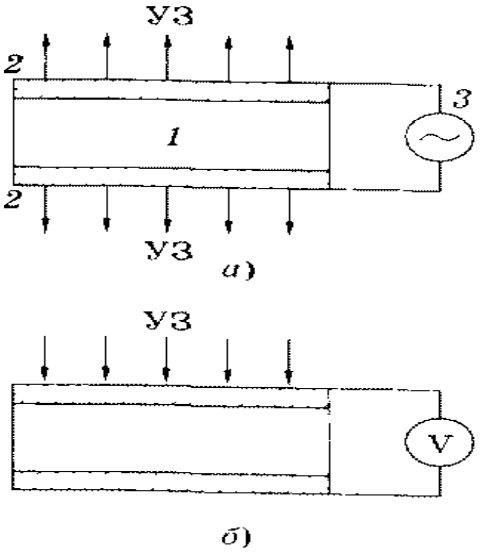
ულტრაბგერა ფიზიკური ბუნებით არის მექანიკური ტალღა. უბ – ს ტალღის სიგრძე უფრო მცირეა, ვიდრე ბგერითი ტალღის სიგრძე.

ორი გარემოს საზღვარზე უბ-ს არეკვლა დამოკიდებულია მათი ტალღების წინააღმდეგობის ფარდობაზე. ულტრაბგერა კარგად აირეკლება საზღვარზე კუნთი – ძვალი. ამიტომ შესაძლებელია განსაზღვროთ სიღრუეების, შინაგანი ორგანოების ადგილმდებარეობა და სიდიდე (უბ –

ლოკაცია). უბ – ლოკაციის დროს იყენებენ როგორც უწყვეტ ისე იმპულსურ გამოსხივებას. პირველ შემთხვევაში იკვლევენ მდგრად ტალღას, მეორე შემთხვევაში იკვლევენ იმპულს და ზომავენ ულტრაბგერის გავრცელების დროს ობიექტიდან ობიექტამდე. თუ ცნობილია ულტრაბგერის გავრცელების სიჩქარე, იგებენ ობიექტის მდებარეობის სიღრმეს.

ულტრაბგერის მედიკო – ბიოლოგიური გამოყენება შეიძლება დაიყოს ორი მიმართულებით: დიაგნოსტიკური მეთოდები და კვლევის და ზემოქმედების მეთოდები.

პირველ მიმართულებას ეკუთვნის ლოკაციური მეთოდები, რომლებიც იყენებენ იმპულსურ გამოსხივებას. ეს არის – ექოენცეფალოგრაფია – სიმსივნის განსასაზღვრავად თავის ტვინში (სურ. 6.14). ულტრაბგერითი კარდიოგრაფია – გულის სიდიდის გაზომვა დინამიკაში. ოფტალომოგია – ულტრაბგერითი ლოკაცია თვალის სიდიდის გასაზომად. ულტრაბგერითი დოპლერის ეფექტის დახმარებით შეისწავლიან გულის სარქველების მოძრაობის ხასიათს და ზომავენ სიჩქარეს. დიაგნოსტიკური მიზნით ულტრაბგერის სიჩქარის მეშვეობით გებულობენ დაზიანებული ძვლის სიმკვრივეს.



ნახ. 6.14

მეორე მიმართულებას ეკუთვნის ულტრაბგერითი ფიზიოთერაპია. პაციენტზე ულტრაბგერის მოქმედებას აწარმოებენ აპარატის სპეციალური გამომსხივებელი დაბოლოებით.

ულტრაბგერით თერაპიის დროს ხდება მექანიკური და სითბური ზემოქმედება ქსოვილზე.

ოპერაციების დროს ულტრაბგერას იყენებენ როგორც ,,ულტრაბგერით სკალპელს", რომელსაც შეუძლია დაანაწევროს რბილი და ძვლოვანი ქსოვილები.

ულტრაბგერის თვისებას, რომ დაშალოს სხეულები, რომლებიც მოთავსებულია სითხეში და შექმნას ემულსია, გამოიყენება ფარმაცევტულ წარმოებაში წამლების დამზადეს დროს. ისეთი დაავადების დროს, ტუბერკულიოზი, ბრონქიალური ასთმა, ზედა სასუნთქი გზების კატარი, იყენებენ აეროზოლებს, რომელსაც ღებულობენ ულტრაბგერის მეშვეობით.

ხდება დაზიანებული ან ტლანსპლატირებული ძვლების ,,შედუღება".

ულტრაბგერას გამოიყენება ქირურგიული იარაღების სტერილიზაციისათვის.

ულტრაბგერას იყენებენ ბრმებისთვის, ულტრაბგერის მეშვეობით ისინი ხედავენ სხეულებს 10 მ. მანძილზე.

3.6. ინფრაბგერა

ინფრაბგერას უწოდებენ მექანიკურ (დრეკად) ტალღებს, რომელთა სიხშირე ადამიანის სმენადობის მინიმალურ სიხშირულ ზღვარზე ნაკლებია (<20 ჰც).

ინფრაბგერის წყარო შეიძლება იყოს როგორც ბუნებრივი (ზღვა, მიწისძვრა, მეხი და ა.შ.), ასევე ხელოვნური (აფეთქებები, ავტომანქანები, ჩარხები და ა.შ.) ობიექტები.

ინფრაბგერას ხშირად ახლავს მოსმენადი ხმაური, მაგალითად ავტომანქანაში, ამიტომაც გარკვეული სირთულეები წარმოიქმნება ინფრაბგერითი რხევების ცალკე გაზომვისა და კვლევის დროს.

ინფრაბგერისთვის დამახასიათებელია სხვადასხვა გარემოს მიერ სუსტი შთანთქმა, ამიტომ ის მნიშვნელოვან მანძილებზე ვრცელდება. ეს საშუალებას გვაძლევს დედამიწის ქერქში ინფრაბგერის გავრცელების მიხედვით დავაფიქსიროთ აფეთქება მისი წყაროდან საკმაოდ დაშორებულ მანძილზეც კი, ინფრაბგერითი ტალღების გაზომვით ხდება ცუნამის პროგნოზირება და ა.შ. რამდენადაც ინფრაბგერის ტალღის სიგრძე მეტია, ვიდრე მოსმენადი ბგერებისა, ის უფრო ძლიერად დიფრაგირებს და დაბრკოლებების გვერდის ავლით აღწევს შენობებში.

ინფრაბგერა მავნე გავლენას ახდენს ორგანიზმის მთელი რიგი სისტემების ფუნქციურ მდგომარეობაზე: იწვევს დაღლილობას, თავის ტკივილს, ძილიანობას, გაღიზიანებას და ა.შ. ვარაუდობენ, რომ ინფრაბგერის მოქმედების პირველადი მექანიზმი რეზონანსული ხასიათისაა. რეზონანსი დგება, როდესაც მამოძრავებელი ძალის სიხშირე და საკუთარი რხევების სიხშირე თანხვდება ან ძალიან უახლოვდება ერთმანეთს (იხ. §5.5.). ადამიანის სხეულის საკუთარი რხევის სიხშირე წოლისას – 3-4 ჰც, დგომისას – 5-12 ჰც, გულმკერდის საკუთარი რხევის სიხშირეები – 5-8 ჰც, მუცლის ღრუს – 3-4 ჰც და ა.შ. შეესაბამება ინფრაბგერის სიხშირეებს.

ჰიგიენის ერთ-ერთი ამოცანაა ინფრაბგერის ინტენსივობის დონის შემცირება საცხოვრებელ, საწარმოო შენობებში და ტრანსპორტში.

თავი 4.

სითხეების დინება და თვისებები

სითხეებს მიაკუთვნებენ ნივთიერებებს, რომლებსაც თავისი თვისებებით შუალედური მდგომარეობა უკავიათ აირებსა და მყარ სხეულებს შორის. სითხეები წარმოადგენს ორგანიზმის უდიდეს ნაწილს, მათი გადაადგილება უზრუნველყოფს ნივთიერებათა ცვლას და უჯრედების ჟანგბადით მომარაგებას, ამიტომაც სითხეთა მექანიკური თვისებები და დინება ექიმებისა და ბიოლოგების განსაკუთრებული ინტერესის საგანია.

ამ თავში გადმოცემული მასალა უშუალო კავშირშია როგორც ჰიდრო-დინამიკასთან – ფიზიკის დარგი, რომელიც შეისწავლის უკუმშველი სითხეების მოძრაობას და ამ დროს მათ ურთიერთქმედებას გარემომცველ მყარ სხეულებთან, ასევე რეოლოგიასთან – ფიზიკის დარგი, რომელიც სწავლობს ნივთიერებების დენადობასა და დეფორმაციებს.

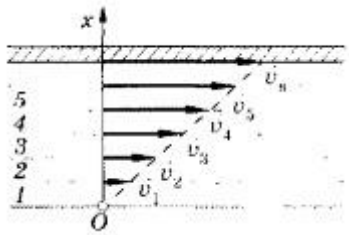
4.1. სითხის სიბლანტე. ნიუტონის განტოლება. ნიუტონისეული

და არანიუტონისეული სითხეები.

რეალური სითხის დინებისას მისი ცალკეული ფენები ურთიერთქმედებენ ერთმანეთზე ფენათაშორისი მხები ძალებით. ამ მოვლენას უწოდებენ შინაგან ხახუნს, ანუ სიბლანტეს.

განვიხილოთ ბლანტი სითხის დინება ორ მყარ ფირფიტას შორის (ნახ. 3.1.), რომელთაგან ქვედა უძრავია, ხოლო ზედა υ სიჩქარით მოძრაობს. პირობითად წარმოვიდგინოთ სითხე რამოდენიმე 1, 2, 3 და ა.შ. ფენის სახით. ფენა, რომელიც „მიწებებულია“ ფსკერზე, უძრავია. ფსკერიდან (ქვედა ფირფიტა) დაშორების შესაბამისად სითხის ფენებს სულ უფრო და

უფრო მეტი სიჩქარეები აქვთ($v_1 < v_2 < v_3 < \cdots$), მაქსიმალური სიჩქარე $v_ზ$ ექნება ფენას, რომელიც „მიეწება“ ზედა ფირფიტას.



ნახ.3.1.

ფენები ურთიერთქმედებენ ერთმანეთთან. ასე მაგალითად, მესამე ფენა ცდილობს დააჩქაროს მეორე ფენის მოძრაობა, იმავდროულად თავად განიცდის დამუხრუჭებას მისი მხრიდან, მაგრამ ჩქარდება მეოთხე ფენისგან და ა.შ. შინაგანი ხახუნის ძალა პროპორციულია ურთიერთმოქმედი ფენების S ფართობისა და მით მეტია, რაც მეტია მათი ფარდობითი სიჩქარე. რამდენადაც ფენებად დაყოფა პირობითია, მიღებულია ძალის გამოსახვა მოცემულ მონაკვეთზე (მონაკვეთი სიჩქარის პერპენდიკულარული x მიმართულებისაა) სიჩქარის ცვლილების შეფარდებით ამ მონაკვეთის სიგრძესთან, ანუ $\frac{dv}{dx}$ სიდიდისგან – სიჩქარის გრადიენტი (წანაცვლების სიჩქარე):

$$F_{xax} = \eta \frac{dv}{dx} S , \qquad (3.1.)$$

ეს არის ნიუტონის განტოლება. აქ η – პროპორციულობის კოეფიციენტია, რომელსაც შინაგანი ხახუნის კოეფიციენტს ან დინამიურ სიბლანტეს (ან უბრალოდ სიბლანტეს) უწოდებენ. სიბლანტე დამოკიდებულია სითხის (ან გაზის) მდგომარეობასა და მოლეკულურ თვისებებზე.

სიბლანტის ერთეულია პასკალი·წამი (პა·წმ). CGS სისტემაში სიბლანტე გამოისახება პუაზეილებში (პ): 1 პა·წმ =10 პ.

მრავალი სითხისთვის სიბლანტე არ არის დამოკიდებული სიჩქარის გრადიენტზე. ასეთი სითხეები ექვემდებარებიან ნიუტონის განტოლებას (3.1.) და მათ ნიუტონისეულ სითხეებს უწოდებენ. სითხეები, რომლებიც არ ექვემდებარებიან (3.1.) განტოლებას, განეკუთვნებიან არანიუტონისეულ

სითხეებს. ზოგჯერ ნიუტონისეულ სითხეების სიბლანტეს უწოდებენ ნორმალურს, ხოლო არანიუტონისეულს – ანომალურს.

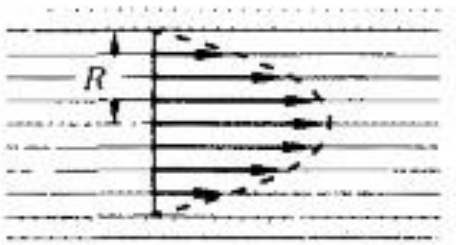
სითხეები, რომლებიც შედგება რთული და მსხვილი მოლეკულებისგან, მაგალითად, პოლიმერების ხსნარები, სისხლი, მიეკუთვნებიან არანიუტონისეულ სითხეებს. მათი სიბლანტე, ბევრად უფრო მაღალია, ვიდრე მარტივი სითხეების სიბლანტე. სიბლანტის გაზრდა გამოწვეულია იმით, რომ ამ სითხეების დინებისას გარეშე ძალის მუშაობა იხარჯება არა მხოლოდ ჭეშმარიტი ნიუტონისეული სიბლანტის გადასალახად, არამედ სივრცული სტრუქტურების დაშლაზე. სისხლი წარმოადგენს არანიუტონისეულ სითხეს.

4.5. ბლანტი სითხის დინება მილებში.

პუაზეილის ფორმულა.

მილებში ბლანტი სითხის დინება განსაკუთრებით საინტერესოა მედიცინის-თვის, რადგან სისხლის მიმოქცევის სისტემა, ძირითადად, სწორედ სხვადასხვა დიამეტრის ცილინდრული სისხლძარღვებისგან შედგება.

სიმეტრიის მოსაზრებებიდან ნათელია, რომ მილში გამავალი სითხის ნაწილაკებს, რომლებიც ღერძიდან ერთნაირად არის დაშორებული, ერთნაირი სიჩქარე აქვთ. უდიდესი სიჩქარე აქვთ ნაწილაკებს, რომლებიც მილის ღერძის გასწვრივ მოძრაობს: მილის კედლების მიმდებარე ფენები კი უძრავია. მილის განივკვეთში სითხის ფენების υ სიჩქარეების მიახლოებითი განაწილება ნაჩვენებია (3.2.) ნახატზე.



ნახ.3.2.

ფენების სიჩქარის ღერძიდან r დაშორებაზე დამოკიდებულების განსაზღვრის მიზნით წარმოვიდგინოთ მოცემული r რადიუსისა და l სიგრძის სითხის ცილინდრუ-ლი მოცულობა (ნახ 3.3.ა). ცილინდრის ბოლოებზე არის, შესაბამისად, p_1 და p_2 წნევა, რაც განაპირობებს ტოლქმედ ძალას.

$$F = p_1\pi r^2 - p_2\pi r^2 = (p_1 - p_2)\pi r^2 . \qquad (3.2.)$$

ცილინდრის გვერდით ზედაპირზე უშუალო ახლობლობაში მყოფი სითხის ფენის მხრიდან მოქმედებს შინაგანი ხახუნის ძალა, რომელიც ტოლია [იხ. (3.1.)]

$$F_{хах} = \eta \frac{d\nu}{dx} S = \eta \frac{d\nu}{dx} 2\pi rl . \qquad (3.3.)$$

სადაც $s = 2\pi rl$ – ცილინდრის გვერდითი ზედაპირის ფართობია. რამდენადაც სითხე თანაბრად მოძრაობს, ძალები, რომლებიც მოქმედებენ გამოყოფილ ცილინდრზე, გაწონასწორებულია $F=F_{ხახ}$. ამ ტოლობაში (3.2.)-ის და (3.3.)-ის ჩასმით მივიღებთ

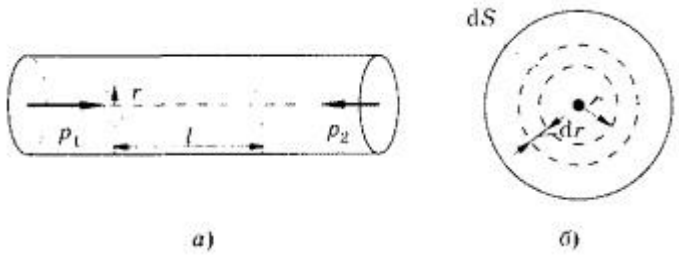
$$(p_1 - p_2)\pi r^2 = -\eta \frac{d\nu}{dr} 2\pi rl . \qquad (3.4.)$$

ნიშანი „–„ განტოლების მარჯვენა ნაწილში განპირობებულია იმით, რომ $\frac{d\nu}{dr} < 0$ (r-ის გაზრდასთან ერთად მცირდება სიჩქარე). (3.4.)-დან გვაქვს

$$d\nu = -\frac{p_1 - p_2}{2l\eta} rdr .$$

მოვახდინოთ ამ განტოლების ინტეგრირება:

$$\int_0^{\nu} d\nu = -\frac{p_1 - p_2}{2l\eta} \int_0^{\nu} rdr, \qquad (3.5.)$$



ნახ.3.3.ა. ნახ.3.3.ბ.

აქ ქვედა ზღვრები შეესაბამება ფენებს, რომლებიც „მიეწებნენ“ მილის შიდა ზედაპირს (v =0, როცა r=R), ხოლო ზედა საზღვრები ცვლადია. ინტეგრირების (3.5.) შედეგად ვიღებთ პარაბოლურ დამოკიდებულებას სითხის ფენების სიჩქარესა და მილის ღერძიდან მათი დაშორების მანძილს შორის (იხ. სიჩქარის ვექტორების წვეროების შემაერთებელი მრუდი 3.2. ნახატზე):

$$v = \frac{p_1 - p_2}{4l\eta}(R^2 - r^2). \qquad (3.6.)$$

უდიდესი სიჩქარე აქვს ფენას, რომელიც მილის ღერძის გასწვრივ (r=0) მიედინება:

$$v_{\max} = (p_1 - p_2)R^2/(4l\eta).$$

დავადგინოთ, რა ფაქტორებზეა დამოკიდებული სითხის Q მოცულობა, რომელიც მიედინება ჰორიზონტალურ მილში ერთ წამში. ამისთვის გამოვყოთ ცილინდრული ფენა r რადიუსით და dr სისქით. ამ ფენის განივკვეთის ფართობია
$dS = 2\pi r dr$ (ნახ 3.3.ბ). რადგან ფენა თხელია, შეგვიძლია ჩავთვალოთ, რომ ის გადაადგილდება ერთნაირი სიჩქარით. ერთ წამში ფენას გადააქვს სითხის მოცულობა

$$dQ = vdS - v\pi r dr. \qquad (3.7.)$$

ჩავსვათ (7.6.)ტოლობა (7.7.)-ში, მივიღებთ

$$dQ = \pi \frac{p_1 - p_2}{2l\eta}\left(R^2 - r^2\right)r dr.$$

საიდანაც მთელი კვეთის მიმართ ინტეგრირებით ვპოულობთ

$$Q = \pi \frac{p_1 - p_2}{2l\eta} \int_0^R \left(R^2 - r^2\right) r dr = \frac{\pi R^2}{8\eta} \frac{p_1 - p_2}{l}. \qquad (3.8.)$$

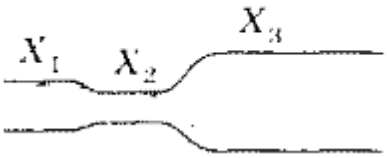
1 წამში R რადიუსის ჰორიზონტალურ მილში გამავალი სითხის Q მოცულობის დამოკიდებულება განისაზღვრება პუაზეილის ფორმულით (3.8.).აქ η სითხის სიბლანტეა, ხოლო $p_1 - p_2$ წარმოადგენს l სიგრძის მილის ბოლოებზე არსებულ წნევათა შორის სხვაობა.

როგორც (3.8.) ნახატიდან ჩანს, მოცემული გარე პირობების (p_1 და p_2) არსებობისას მილში მით მეტი მოცულობის სითხე მიედინება, რაც ნაკლებია მისი სიბლანტე და რაც უფრო მეტია მილის რადიუსი.

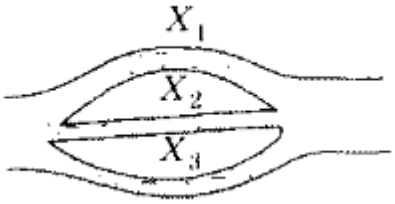
გავატაროთ ანალოგია პუაზეილის ფორმულასა (3.8.) და ომის კანონს შორის, რომელიც სამართლიანია ელექტრული წრედის მონაკვეთისთვის, რომელიც არ შეიცავს დენის წყაროს. პოტენციალთა სხვაობა შეესაბამება მილის ბოლოებზე წნევათა სხვაობას. დენის ძალა – სითხის მოცულობას, რომელიც მილის განივკვეთში გაედინება ერთ წამში, ელექტრული წინაღობა –ჰიდრავლიკურ წინააღმდეგობას:

$$X = 8\eta l / (\pi R^4). \qquad (3.9.)$$

ჰიდრავლიკური წინააღმდეგობა მით მეტია, რაც მეტია η სიბლანტე და მილის l სიგრძე, და რაც ნაკლებია განივკვეთის ფართობი. ელექტრულ და ჰიდრავლიკურ წინააღმდეგობებს შორის ანალოგია საშუალებას გვაძლევს, ზოგიერთ შემთხვევაში გამტარების მიმდევრობითი და პარალელური შეერთების ელექტრული წინაღობის განსაზღვრის წესი გამოვიყენოთ მიმდევრობით და პარალელურად შეერთებული მილების სისტემის ჰიდრავლიკური წინააღმდეგობის განსაზღვრისთვის. ასე მაგალითად, მიმდევრობით (ნახ. 3.4.ა) და პარალელურად (ნახ. 3.7.ბ) შეერთებული სამი მილის საერთო ჰიდრავლიკური წინააღმდეგობა გამოითვლება შესაბამისად ფორმულებით:



ნახ.3.4.ა.



ნახ.3.4.ბ.

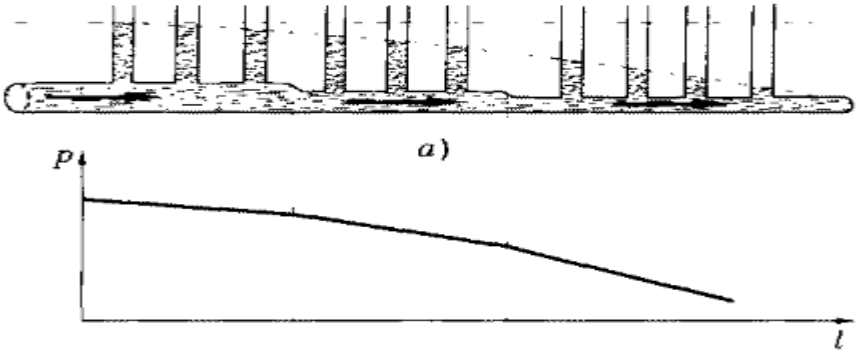
$$X=X_1+X_2+X_3, \qquad (3.10.)$$

$$X=\left(\frac{1}{X_1}+\frac{1}{X_2}+\frac{1}{X_3}\right)^{-1}. \qquad (3.11.)$$

პუაზეილის განტოლებას უფრო ზოგადი სახე რომ მივცეთ, რომელიც სამართლიანი იქნება ცვლადი განივკვეთის მილებისთვისაც, შევცვალოთ $\frac{dp}{dl}$ წნევის გრადიენტით გამოსახულება $\frac{p_1-p_2}{l}$, და მაშინ

$$Q=\frac{\pi R^4}{8\eta}\frac{dp}{dl}. \qquad (3.12.)$$

განსხვავებული განივკვეთების მქონე ჰორიზონტალურად განთავსებული ცილინდრული მილში, რომელშიც ბლანტი სითხე გაედინება, რამდენიმეგან განვათავსოთ მანომეტრული მილაკები (ნახ. 3.5.ა). დავინახავთ, რომ ცვლადი განივკვეთის მილის გასწვრივ სტატიკური წნევა მცირდება l-ის პროპორციულად $\frac{dp}{dl}=const$. რამდენადაც Q სიდიდე ერთნაირია (უკუმშველი სითხე), წნევის გრადიენტი მეტია ნაკლები რადიუსის მილებში (იხ.3.12.). სხვადასხვა რადიუსის მილების გასწვრივ წნევის მანძილზედამოკიდებულების გრაფიკი მიახლოვებით ნაჩვენებია (3.5.ბ.) ნახატზე.



ნახ.3.5.ა. ნახ.3.5.ბ.

4.6. სხეულის მოძრაობა ბლანტ სითხეში.

სტოქსის კანონი

სიბლანტე თავს იჩენს არა მხოლოდ მილებში სითხის მოძრაობის დროს, არამედ სხეულების სითხეში მოძრაობის დროსაც. მცირე სიჩქარეებზე მოძრავ სხეულზე მოქმედი წინააღმდეგობის ძალა, ნიუტონის განტოლების შესაბამისად, პროპორ-ციულია სითხის სიბლანტისა და სხეულის მოძრაობის სიჩქარისა და დამოკიდებულია სხეულის ზომებზე. რადგან წინააღმდეგობის ძალისთვის შეუძლებელია ზოგადი ფორმულის შემუშავება, შემოვიფარგლოთ კერძო შემთხვევის განხილვით.

სხეულის ყველაზე მარტივი ფორმაა სფერო. სფერული სხეულის (მაგ. ბურთულის) სითხიან ჭურჭელში მოძრაობისას წინააღმდეგობის ძალის დამოკიდე-ბულება ზემოთ ჩამოთვლილ ფაქტორებზე გამოიხატება სტოქსის კანონით:

$F_{\text{ხახ}} = 6\,\pi\eta v,$ (3.13.)

სადაც r ბურთულის რადიუსია, v – მოძრაობის სიჩქარე. ეს კანონი მივიღეთ იმ დაშვებით, რომ ჭურჭლის კედლები ზეგავლენას არ ახდენენ სხეულის მოძრაობაზე.

ბლანტ გარემოში ბურთულის ვარდნისას (ნახ. 3.6.) მასზე მოქმედებს სამი ძალა: ა) სიმძიმის ძალა $mg=4/3\rho\pi r^3$; ბ) ამომგდები (არქიმედეს) ძალა $F_ა=m_ა g=4/3\rho_ბ\pi r^3 g$, სადაც $m_ბ$ არის ბურთულის მიერ გამოძებნილი სითხის მასა, $\rho_ბ$ – მისი სიმკვრივე; გ) $F_{ხახ}$ არის წინააღმდეგობის ძალა, რომელიც გამოითვლება (3.13.) ფორმულით.

ბლანტ გარემოში ბურთულის მოხვედრისას მისი სიჩქარე მცირდება. რამდენადაც წინააღმდეგობის ძალა სიჩქარის პირდაპირპროპორციულია, ის აგრძელებს შემცირებას მანამ, სანამ მოძრაობა არ გახდება თანაბარი. ამ შემთხვევაში (ნახ. 3.6.)

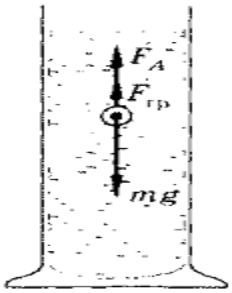
$$mg + F_ა + F_{ხახ} = 0,$$

ან სკალარული ფორმით, ძალების შესაბამისი გამოსახულებების ჩასმით

$$4/3\pi r^3\rho g - 4/3\pi r^3\rho_ბ g - 6\pi\eta r v_0 = 0, \qquad (3.14.)$$

სადაც v_0 ბურთულის თანაბარი მოძრაობის (ვარდნის) სიჩქარეა. (3.14.)-დან ვიღებთ

$$v_0 = \frac{2(\rho - \rho_w)}{9\eta} \quad . \qquad (3.15.)$$



ნახ.3.6.

(3.15.) ფორმულა სამართლიანია ბურთულის არამარტო სითხეში, არამედ აირში მოძრაობის დროსაც. კერძოდ კი, ის შეიძლება, გამოყენებულ იქნეს ჰაერიდან მტვრის დალექვის დროის გამოსათვლელად. ავხსნათ შემდეგი მაგალითით. ჰაერისთვის, ანუ გარემოსთვის, რომელშიც მტვრის სხვადასხვა ნაწილაკებია შეწონასწორებული, სიბლანტე η = 0.0001753. იმ მტვრის დაახლოებით 80%, რომელიც აღმოჩენილია გარდაცვლილთა ფილტვებში, წარმოადგენს 5-დან 0.2 მკმ-მდე ზომის ნაწილაკებს. თუ

მტვრის ნაწილაკებს ჩავთვლით სფეროსებრივად, ხოლო მტვრის სიმკვრივეს მიწის სიმკვრივის ტოლად (ρ = 2.5 გ/სმ3) მაშინ, თუ მტვრის ამ ნაწილაკების ვარდნის სიჩქარეს (3.15.) განტოლებით გამოვითვლით, ვნახავთ, რომ მისი მნიშვნელობა იმყოფება 0,2-0,003 სმ/წმ ფარგლებში. ასეთი მტვრის სრული დალექვისთვის ოთახში, რომლის სიმაღლე 3 მეტრია, საჭირო იქნება დაახლოებით 12 დღე-ღამე იმ პირობით, რომ ჰაერი იქნება აბსოლუტურად უძრავი და ადგილი არ ექნება ბროუნის მოძრაობას.

4.7 სითხის სიბლანტის განსაზღვრის მეთოდები. სისხლის სიბლანტის განსაზღვრის კლინიკური მეთოდი.

სიბლანტის გაზომვის მეთოდების ერთობლიობას ვისკოზიმეტრია ეწოდება, ხოლო ხელსაწყოებს, რომელებიც ამ მიზნით გამოიყენება – ვისკოზიმეტრები. განვიხილოთ ვისკოზიმეტრიის ყველაზე უფრო გავრცელებული მეთოდები.

კაპილარული მეთოდი ემყარება პუაზეილის ფორმულას. ამ მეთოდით ზომავენ სიმძიმის ძალის ზემოქმედებით და წნევათა სხვაობის არსებობისას ცნობილი მასის სითხის კაპილარში გადინების დროს. სხვადასხვა ფორმის კაპილარული ვისკოზიმეტრები ნაჩვენებია (3.7.ა,ბ) ნახაზზე (1. – საზომი რეზერვუარები, M_1 და M_2 – ნიშნულები, რომლებიც ამ რეზერვუარების საზღვრებს აღნიშნავენ, 2. – კაპილარები, 3. –მიმღები ჭურჭლები).

კაპილარული ვისკოზიმეტრი გამოიყენება სისხლის სიბლანტის გასაზომად.

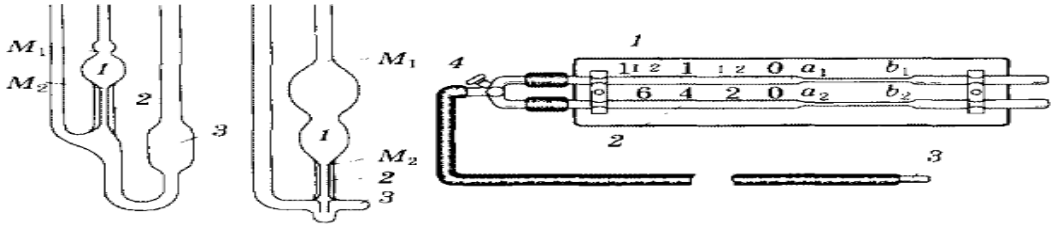
კაპილარული ვისკოზიმეტრებით ზომავენ სიბლანტეს 105 პა·წმ-დან, რომელიც აირებისთვის არის დამახასიათებელი, 104 პა·წმ-მდე, რაც კონსისტენტურ საპოხ მასალებს ახასიათებს.

ბურთულის ვარდნის მეთოდი გამოიყენება ვისკოზიმეტრებში, რომლებიც სტოქსის მეთოდს ეფუძნება. (3.15.) ფორმულიდან ვპოულობთ

$$\eta = \frac{2(\rho - \rho_s)r^2 g}{9v_0}.$$

ამრიგად, თუ ვიცით ამ ფორმულის მარჯვენა ნაწილში შემავალი სიდიდეები და გავზომავთ ბურთულის თანაბარი ვარდნის სიჩქარეს, შევძლებთ, ვიპოვოთ მოცემული სითხის სიბლანტე.

მოძრავ ბურთულიანი ვისკოზიმეტრის გაზომვის საზღვრები მდებარეობს 6·104 – 250 პა·წმ დიაპაზონში.



ნახ.3.7.ა. ნახ.3.7.ბ. ნახ.3.7.გ.

იყენებენ როტაციულ ვისკოზიმეტრებსაც, რომლებშიც სითხე იმყოფება ორ ერთღერძიან სხეულს, მაგალითად ორ ცილინდრს შორის ღრიჭოში. ერთ-ერთი ცილინდრი (როტორი) მოძრაობს, მეორე – უძრავია. სიბლანტე იზომება როტორის კუთხური სიჩქარის მიხედვით, რომელიც განსაზღვრულ მომენტში უძრავ ცილინდრზე ქმნის ძალის მომენტს, ანუ იმ ძალის მომენტის მიხედვით, რომელიც როტორის ბრუნვის მოცემული კუთხური სიჩქარის პირობებში მოქმედებს უძრავ ცილინდრზე.

როტაციული ვისკოზიმეტრების საშუალებით განსაზღვრავენ სითხეების სიბლანტეს 6·104 – 250 პა·წმ ინტერვალში, ანუ საპოხი ზეთების, გამდნარი სილიკატებისა და მეტალების, მაღალი სიბლანტის ლაქებისა და წებოების, თიხოვანი ხსნარების და ა.შ. ინტერვალში.

როტაციულ ვისკოზიმეტრებში შესაძლებელია სიჩქარის გრადიენტის ცვლა როტორისთვის ბრუნვის კუთხური სიჩქარის სხვადასხვა მნიშვნელობების მინიჭებით. ეს საშუალებას გვაძლევს, გავზომოთ სიბლანტე სხვადასხვა გრადიენ-ტების დროს და დავადგინოთ ურთიერთდამოკიდებულება $\eta = f\left(\frac{dv}{dx}\right)$, რომელიც დამახასიათებელია არანიუტონური სითხეებისთვის.

ამჟამად კლინიკებში სისხლის სიბლანტის განსასაზღვრად იყენებენ ჰესის ვისკოზიმეტრს ორი კაპილარით. ამ მოწყობილობის სქემა მოცემულია (3.7.გ.) ნახატზე. ორი ერთნაირი კაპილარი a_1b_1 და a_2b_2 შეერთებულია მილებით (1. და 2.). რეზინის მსხლით (რეზინის ბუშტით) ან ბუნიკიდან (3.) ჰაერის პირით ამოტუმბვით, ონკანიანი განმანაწილებლის (4.) საშუალებით რიგრიგობით ავსებენ a_1b_1 კაპილარს და (1.) მილაკს „0“ ნიშნულამდე – დისტილირებული წყლით, ხოლო a_2b_2 კაპილარს და (2.) მილაკს „0“ ნიშნულამდე – გამოსაკვლევი სისხლით. ამის შემდეგ, იგივე გზით, ერთდროულად გადაადგილებენ ორივე სითხეს მანამ, სანამ სისხლი არ მიაღწევს ნიშნულს „1“, ხოლო წყალი რომელიმე სხვა ნიშნულს თავის მილაკში. რამდენადაც წყლისა და სისხლის დინების პირობები ერთნაირია, (1.) და (2.)მილაკების შევსებული მოცულობები განსხვავდებული იქნება მხოლოდ იმის გამო, რომ ამ სითხეების სიბლანტე სხვადასხვანაირია. მიუხედავად იმისა, რომ სისხლი არანიუტონური სითხეა, ერთგვარი მიახლოებით მაინც შეგვიძლია გამოვიყენოთ პუაზეილის ფორმულა (7.8.) და ჩავწეროთ აშკარა პროპორცია:

$$\frac{Q_{წყლის}}{Q_{სისხლის}} = \frac{\eta_{სისხლის}}{\eta_{წყლის}} . \quad (3.16.)$$

თუ გავითვალისწინებთ, რომ სითხის სრული მოცულობა V მისი თანაბარი დინების დროს დაკავშირებულია Q-სთან ფორმულით $V = Qt$, სადაც t არის სითხის სრული გადინების დრო, (3.16.) განტოლების ნაცვლად მივიღებთ

$$\frac{V_{წყლის}}{V_{სისხლის}} = \frac{V_{სისხლის}}{V_{წყლის}} ,$$

სადაც $V_{სისხლის}$ არის სისხლის მოცულობა (2.) მილაკში „0“ ნიშნულიდან „1“ ნიშნულამდე; $V_{წყლის}$ – წყლის მოცულობა (1.) მილაკში „0“ ნიშნულიდან ნიშნულამდე, რომელიც მივიღეთ გაზომვის დროს; $\eta_{სისხლის}$ და $\eta_{წყლის}$ შესაბამისად სისხლისა და წყლის სიბლანტეებია. ერთნაირი ტემპერატურის პირობებში სისხლის სიბლანტის შეფარდებას წყლის სიბლანტესთან სისხლის ფარდობით სიბლანტეს უწოდებენ.

ჰესის ვისკოზიმეტრში სისხლის მოცულობა ყოველთვის ერთნაირია, ხოლო წყლის მოცულობას გადაითვლიან (1.) მილაკის დანაყოფების მიხედვით, ამიტომ პირდაპირ იღებენ სისხლის ფარდობითი სიბლანტის

მნიშვნელობას. მოხერხებული ათვლისთვის (1.) და (2.) მილაკების განივკვეთები განსხვავებულია ერთმანეთისგან ისე, რომ სისხლის და წყლის განსხვავებული მოცულობების მიუხედავად მათი დონე მილაკებში დაახლოებით ერთნაირი იყოს.

ადამიანის სისხლის სიბლანტე ნორმაში არის 4-5 მპა·წმ, ხოლო პათოლოგიისას მერყეობს 1,7-დან 22,9 მპა·წმ-მდე, რაც გავლენას ახდენს ერითროციტების დალექვის სიჩქარეზე (ედს). ვენური სისხლი შედარებით უფრო ბლანტია, ვიდრე არტერიული. მძიმე ფიზიკური მუშაობის დროს სისხლის სიბლანტე იზრდება. ზოგიერთი არაინფექციური დაავადება ზრდის, ზოგიერთი კი, მაგალითად, მუცლის ტიფი ან ჭლექი, – ამცირებს სისხლის სიბლანტეს.

4.8. ტერბულენტური დინება. რეინოლდსის რიცხვი

სითხის ადრე განხილული დინება ფენოვანი ანუ ლამინარულია. ბლანტი სითხის დინების სიჩქარის გაზრდა, მილის განივკვეთზე წნევის არაერთგვაროვნების შედეგად, ქმნის ერთგვარ „მორევს“ (იწვევს დინების შეშფოთებას) და მოძრაობა ხდება გრიგალისებური, ანუ ტურბულენტური. ტურბულენტური დინების დროს ნაწილაკთა სიჩქარე ყველგან განუწყვეტლად და ქაოტურად იცვლება, მოძრაობა ხდება არასტაციონარული.

მილში სითხის მოძრაობის ხასიათი დამოკიდებულია სითხის თვისებებზე, მისი დინების სიჩქარეზე, მილის ზომებზე და განისაზღვრება რეინოლდსის რიცხვით:

$$Re=\rho_{სითხის}\, \upsilon\, D\, /\eta.$$

სადაც $\rho_{სითხის}$ არის სითხის სიმკვრივე, D – მილის დიამეტრი, ხოლო v – მილის განივკვეთში დინების საშუალო სიჩქარე.

თუ რეინოლდსის რიცხვი კრიტიკულზე მეტია ($Re > Re_{კრიტ}$), სითხის მოძრაობა ტურბულენტურია. მაგალითად, გლუვი ცილინდრული მილებისთვის $Re_{კრიტ} \approx 2300$.

რადგან რეინოლდსის რიცხვი სითხის სიბლანტესა და სიმკვრივეზეა დამოკიდებული, მოსახერხებელია შემოვიტანოთ შეფარდება, რომელსაც კინემატიკურ სიბლანტეს უწოდებენ:

$$\nu = \eta/\rho_{\text{სითხის}}.$$

ამ ცნების გამოყენებით რეინოლდსის რიცხვი შეგვიძლია ასე გამოვსახოთ

$$Re = \upsilon D/\nu \ . \qquad (3.17.)$$

კინემატიკური სიბლანტის ერთეულია კვადრატული მეტრი წამში ($მ^2/წმ$), CGS

სისტემაში კი სტოქსი (სტ). მათ შორის შემდეგი თანაფარდობაა: 1 სტ = 10-4 მ2/წმ.

კინემატიკური სიბლანტე დინამიურზე უფრო სრულად ითვალისწინებს შინაგანი ხახუნის ზეგავლენას სითხის ან აირის დინების ხასიათზე. ასე მაგალითად, წყლის სიბლანტე დაახლოებით 100-ჯერ მეტია ვიდრე ჰაერისა (00C-ზე), მაგრამ მისი კინემატიკური სიბლანტე 10-ჯერ ნაკლებია, ვიდრე ჰაერისა და, ამიტომ, სიბლანტე ჰაერის დინების ხასიათზე უფრო ძლიერად მოქმედებს, ვიდრე წყლისაზე.

როგორც (3.17.) ნახაზიდან ჩანს, სითხის ან აირის დინების ხასიათი არსებითად არის დამოკიდებული მილის ზომებზე. ფართე მილებში შედარებით მცირე სიჩქარეებზეც კი შესაძლოა წარმოიქმნას ტურბულენტური მოძრაობა. ასე მაგა-ლითად, 2 მმ დიამეტრის მილაკში წყლის დინება ტურბულენტური ხდება, თუ დინების სიჩქარე 127 სმ/წმ-ზე მეტია, ხოლო 2 სმ დიამეტრის მილაკში უკვე 12 სმ/წმ-ზე მეტი სიჩქარეების დროს (ტემპერატურა – 16^0C). ასეთ მილში სისხლის დინება ტურბულენტური გახდებოდა 50 სმ/წმ სიჩქარეზე, მაგრამ პრაქტიკაში, 2 სმ დიამეტრის სისხლძარღვებში დინება უფრო მცირე სიჩქარეების დროსაც კი შეიძლება გახდეს ტურბულენტური.

არტერიებში სისხლის დინება ნორმაში ლამინარული პროცესია, მცირე ტურბულენტობა წარმოიქმნება გულის სარქველების მახლობლად. პათოლოგიების დროს, როდესაც სიბლანტე ნორმაზე ნაკლებია, რეინოლდსის რიცხვმა შესაძლოა გადააჭარბოს კრიტიკულ მნიშვნელობას და მოძრაობა ტურბულენტური გახდეს.

ტურბულენტური დინება სითხის მოძრაობისას ენერგიის დამატებით ხარჯვასთან არის დაკავშირებული, რაც, სისხლის შემთხვევაში, გულის დამატებით მუშაობას იწვევს. სისხლის ტურბულენტური დინებისას წარმოქმნილი ხმაური (შუილი) შეიძლება დაავადების დიაგნოსტირებისთვის იქნეს გამოყენებული. სწორედ ეს ხმაური გვესმის სისხლის წნევის გაზომვის დროს მხრის არტერიიდან.

ცხვირის ღრუში ჰაერის დინება ნორმაში ლამინარულია. მაგრამ ანთებითი პროცესის ან ნორმიდან რაიმე სხვა სახის გადახრის შემთხვევაში შესაძლოა ტურბულენტური გახდეს, რაც სუნთქვითი კუნთების დამატებით მუშაობას გამოიწვევს.

რეინოლდსის რიცხვი მსგავსების კრიტერიუმია. ჰიდრო- და აეროდინამიური სისტემების, კერძოდ სისხლძარღვთა სისტემის მოდელირებისას, მოდელს უნდა ჰქონდეს რეინოლდსის ისეთივე რიცხვი, როგორიც აქვს ბუნებრივ სისტემას, წინააღმდეგ შემთხვევაში მათ შორის შესაბამისობა არ იქნება. ეს ეხება სითხესა ან აირში სხეულების მოძრაობის მოდელირებასაც.

(3.17.) განტოლებიდან ჩანს, რომ მოდელის ზომების შემცირება ბუნებრივ სისტემასთან შედარებით უნდა იყოს კომპენსირებული დინების სიჩქარის გაზრდით ან სამოდელო აირისან სითხის კინემატიკური სიბლანტის შემცირება.

დასასრულს აღვნიშნოთ მედიცინის ის დარგები და მიმართულებები, რომელთათვისაც განსაკუთრებული მნიშვნელობა აქვს ბიოლოგიური ქსოვილების პასიური მექანიკური თვისებების შესახებ წარმოდგენის ქონას:

კოსმოსური მედიცინა, რადგან ადამიანი იმყოფება ცხოვრების ახალ, ექსტრემალურ პირობებში;

სპორტულ მიღწევათა შედეგიანობის ზრდის გამო სპორტული მედიკოსები დიდ ყურადღებას აქცევენ ადამიანის საყრდენ-მამოძრავებელის აპარატის ფიზიკურ შესაძლებლობებს;

ადამიანის ვიბრაციისგან დაცვის მიზნით ჰიგიენის სპეციალისტებმა უნდა გაითვალისწინონ ქსოვილების მექანიკური თვისებები;

პროტეზირების პროცესში, ბუნებრივი ორგანოებისა და ქსოვილების ხელოვნურით შეცვლისას მნიშვნელოვანია ბიოლოგიური ობიექტების მექანიკური თვისებებისა და პარამეტრების ცოდნა;

სასამართლო მედიცინაში უნდა იცოდნენ ბიოლოგიური სტრუქტურების სხვადასხვა დეფორმაციებისადმი მდგრადობის შესახებ;

ტრავმატოლოგიასა და ორთოპედიაში განმსაზღვრელია ორგანიზმზე მექანიკური ზემოქმედების საკითხები;

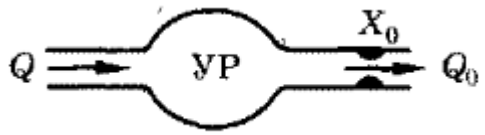
თავი 5.
ჰემოდინამიკის ფიზიკური საკითხები

ჰემოდინამიკა ეწოდება ბიომექანიკის დარგს, რომელიც იკვლევს სისხლძარღვთა სისტემაში სისხლის მოძრაობას. ჰემოდინამიკის ფიზიკური საწყისია ჰიდროდინამიკა. სისხლის დინება დამოკიდებულია როგორც სისხლის თვისებებზე, ასევე სისხლძარღვთა თვისებებზეც.

ამ თავში განხილულია, ასევე, ზოგიერთი ისეთი ტექნიკური მოწყობილობის მუშაობის ფიზიკური საწყისები, რომლებიც გამოიყენება სისხლის მიმოქცევასთან დაკავშირებით.

5.1. სისხლის მიმოქცევის მოდელები

განვიხილოთ სისხლის მიმოქცევის სისტემის ჰიდროდინამიკური მოდელი, რომელიც შემოთავაზებულია ო. ფრანკის მიერ. საკმარისი სიმარტივის მიუხედავად, ის საშუალებას გვაძლევს, კავშირი დავამყაროთ სისხლის დარტყმით მოცულობას (სისხლის მოცულობა, რომელსაც გადმოისვრის გულის პარკუჭი ერთი სისტოლის დროს), სისხლის მიმოქცევის სისტემის პერიფერიული ნაწილის X_0 ჰიდრავლიკურ წინააღმდეგობასა და არტერიებში წნევის ცვლილებას შორის. სისხლის მიმოქცევის სისტემის არტერიული ნაწილის მოდელირება ხდება დრეკადი (ელასტიური) რეზერვუარით (ნახ 4.1., აღნიშნულია „დრ“-თი).



ნახ.4.1.

რამდენადაც სისხლის იმყოფება დრეკად რეზერვუარში, მისი V მოცულობა დროის ნებისმიერ მომენტში დამოკიდებულია P წნევაზე შემდეგ თანაფარდობით:

$$V=V_0+kp. \qquad (4.1.)$$

სადაც k არის რეზერვუარის ელასტიურობა, დრეკადობა (წნევასა და მოცულობას შორის პროპორციულობის კოეფიციენტი), V_0 კი რეზერვუარის მოცულობაა წნევის არარსებობის შემთხვევაში $p = 0$ მოვახდინოთ (4.1.) გამოსა-ხულების დიფერენცირება. მივიღებთ

$$\frac{dv}{dt} = k\frac{dp}{dt}. \qquad (4.2.)$$

დრეკად რეზერვუარს (არტერიას) სისხლი მიეწოდება გულიდან, სისხლის ნაკადის მოცულობითი სიჩქარე Q-ს ტოლია. დრეკადი რეზერვუარიდან სისხლი გადადის სისხლის ნაკადის Q_0 მოცულობითი სიჩქარით პერიფერიულ სისტემაში (არტერიოლები, კაპილარები). ვუშვებთ, რომ პერიფერიული სისტემის ჰიდრავ-ლიკური წინააღმდეგობა მუდმივია. ამის მოდელირება ხდება დრეკადი რეზერვუარის გამოსასვლელთან მიერთებული„ხისტი“ მილაკით (ნახ. 4.1.).

შეგვიძლია შევადგინოთ საკმაოდ გასაგები განტოლება (ნახ. 4 1.)

$$Q = \frac{dv}{dt} + Q_0, \qquad (4.3.)$$

რომელიც აჩვენებს, რომ გულიდან გადმოსროლილი სისხლის ნაკადის მოცულობითი სიჩქარე დრეკადი რეზერვუარის მოცულობის ზრდისა და დრეკადი რეზერვუარიდან სისხლის გადინების სიჩქარეების ჯამის ტოლია.

პუაზეილის განტოლების (3.8.) საფუძველზე და (3.9.) ფორმულით შესა-ძლებელია სისტემის პერიფერიული ნაწილისთვის ჩავწეროთ

$$Q_0 = \frac{p - p_{venuri}}{x_0}, \qquad (4.4.)$$

სადაც p არის წნევა დრეკად რეზერვუარში,ხოლო $p_{ვენური}$ – ვენური წნევა, რომელიც შესაძლოა ნულის ტოლად მივიჩნიოთ. მაშინ (4.4.)-ის მაგივრად გვაქვს

$$Q_0 = \frac{p}{x_0}. \qquad (4.5.)$$

(4.2.)-ის და (4.5.)-ის ჩასმით (4.3.)-ში მივიღებთ

$$Q = k\frac{dp}{dt} + \frac{p}{x_0}$$ ან

$$Qdt = kdp + \frac{p}{x_0}dt. \qquad (4.6.)$$

მოვახდინოთ (4.6.)-ის ინტეგრირება. ინტეგრირების დროითი საზღვრები შეესაბამება პულსის პერიოდს (გულის შეკუმშვის პერიოდს) 0-დან $T_{სრ}$-მდე. ამ დროით საზღვრებს შეესაბამება ერთნაირი წნევა –მინიმალური დიასტოლური წნევა $p_{დიასტ}$:

$$\int_0^{T_{sr}} Qdt = \int_{p_{diast}}^{p_{diast}} dp + \frac{1}{x_0}\int_0^{T_{sr}} pdt. \qquad (4.7.)$$

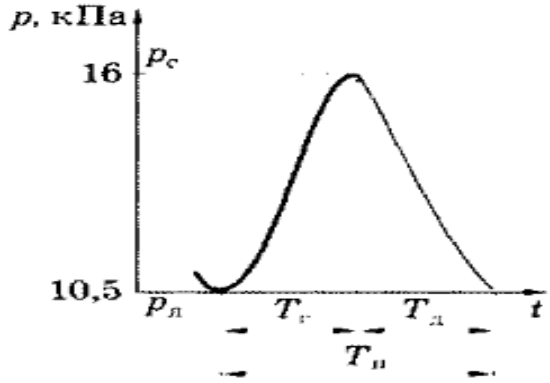
ერთნაირი საზღვრების მქონე ინტეგრალი 0-ის ტოლია, ამიტომ (4.7.)-დან გვაქვს

$$\int_0^{T_{sr}} Qdt = \frac{1}{x_0}\int_0^{T_{sr}} pdt. \qquad (4.8.)$$

(4.2.) ნახატზე ექსპერიმენტული მრუდი (ნაჩვენებია უწყვეტი წირით), აჩვენებს საძილე არტერიაში წნევის დამოკიდებულებას დროზე. ნახატზე ნაჩვენებია პულსის პერიოდი სისტოლისა $T_{სისტ}$ და დიასტოლის $T_{დიასტ}$ ხანგრძლივობით, $T_{სისტ}$ წნევის მაქსიმალური (სისტოლური) მნიშვნელობაა.

ინტეგრალი (4.8.) განტოლების მარცხენა ნაწილში სისხლის იმ მოცულობის ტოლია, რომელსაც გადმოისვრის გული ერთი შეკუმშვის დროს – დარტყმითი მოცულობა. მისი პოვნა შესაძლებელია ექსპერიმენტულად. ინტეგრალი (4.8.) განტოლების მარჯვენა ნაწილში შეესაბამება იმ ფიგურის ფართობს, რომელიც შემოსაზღვრულია მრუდით და დროითი ღერძით (იხ. ნახ. 4.2.).მისი პოვნაც შესაძლებელია. ინტეგრალების ზემოთ მოყვანილი მნიშვნელობების გამოყენებით (4.8.)-

დან შეგვიძლია გამოვითვალოთ სისხლის მიმოქცევის სისტემის პერიფერიული ნაწილის ჰიდრავლიკური წინააღმდეგობა.



ნახ.4.2.

სისტოლის პერიოდში (გულის შეკუმშვა) ხდება დრეკადი რეზერვუარის გაფართოება, სისტოლის შემდგომ, დიასტოლის დროს – სისხლის გადასროლა პერიფერიებზე, $Q = 0$. ამ პერიოდისთვის (4.6.) ტოლობიდან გვაქვს

$$0 = kdp + \frac{p}{x_0}dt \text{, ან } \frac{dp}{p} = -\frac{dt}{kx_0}. \qquad (4.9.)$$

(4.9.)განტოლების ინტეგრირებით ვიღებთ რეზერვუარში წნევის დამოკიდებულებას დროზე სისტოლის შემდგომ:

$$p = p_{\text{სისტ}} e^{-\frac{t}{kx_0}}. \qquad (4.10.)$$

შესაბამისი მრუდი (4.2.) ნახატზე თხელი ხაზით არის გამოსახული. (4.5.)-ის საფუძველზე ვიღებთ სისხლის უკუდენის მოცულობით სიჩქარის დამოკიდებულებას დროზე:

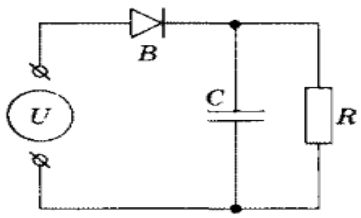
$$Q = Q_{\text{სისტ}} e^{-\frac{t}{kx_0}}. \qquad (4.11.)$$

სადაც $Q_{\text{სისტ}} = p_{\text{სისტ}} / x_0$ არის დრეკადი რეზერვუარიდან სისტოლის ბოლოს (დიასტოლის დასაწყისში) სისხლის ნაკადის მოცულობითი სიჩქარე.

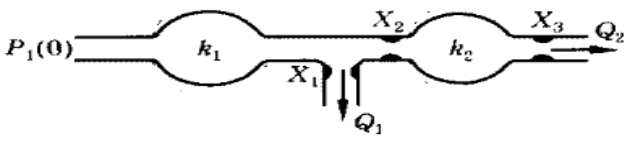
(4.10.) და (4.11.) დამოკიდებულებები წარმოადგენს ექსპონენტებს. თუმცა მოცემული მოდელი საკმაოდ უხეშად აღწერს რეალურ მოვლენას, ის უაღრესად მარტივია და ზუსტად ასახავს პროცესს დიასტოლის დასრულების მომენტში. ამ მოდელის მეშვეობით დიასტოლის საწყის მომენტში წნევის ცვლილების ასახვა შეუძლებელია.

მექნიკური მოდელის საფუძველზე და მისი ანალოგიით შესაძლებელია ელექტრული მოდელის შექმნა (ნახ. 4,3,).

აქ U წყარო, რომელიც იძლევა არასინუსოიდალურ ცვლად ელექტრულ დაძაბულობას, წარმოადგენს გულის ანალოგს, დენის გარდამქმნელი – გულის სარქველის ანალოგს. C კონდენსატორი ნახევარპერიოდის განმავლობაში აგროვებს მუხტს, ხოლო შემდეგ განიმუხტება R რეზისტორზე, და ამგვარად ხდება რეზისტორში გამავალი დენის ძალის გასწორება. კონდენსატორის მოქმედება ანალოგიურია დრეკადი რეზერვუარის (აორტის, არტერიის) მოქმედებისა, რომელიც ასწორებს არტერიოლებსა და კაპილარებში სისხლის წნევის რხევებს (პერიოდულ ცვლილებას). რეზისტორი წარმოადგენს სისხლძარღვების პერიფერიული სისტემის ელექტრულ ანალოგს.



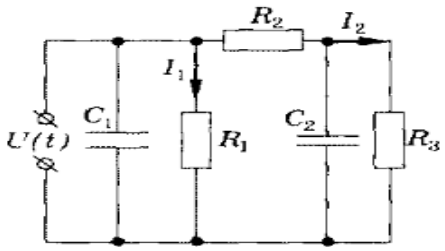
ნახ.4.3.



ნახ.4.4.

იმ ფაქტის გათვალისწინებით, რომ ვასკულატურა წარმოადგენს სივრცეში განაწილებულ სისტემას, ვასკულატურის უფრო ზუსტ მოდელში გამოყენებული იყო ელასტიური რეზერვუარების მეტი რაოდენობა. მოდელის აწყობისას სისხლის ინერციული თვისებების გათვალისწინებისთვის ვივარაუდეთ, რომ ელასტიურ რეზერვუარებს, რომლებიც წარმოადგენდნენ აორტის აღმავალი და დაღმავალი შტოების მოდელებს, სხვადასხვა დრეკადობა აქვთ. (4.4.) ნახატზე ასახულია როსტონის მოდელი, რომელიც შედგება სხვადასხვა ელასტიურობის

(დრეკადობის) მქონე ორი რეზერვუარისა და რეზერვუარებს შორის განთავსებული, განსხვავებული ჰიდრავლიკური წინააღმდეგობის მქონე, არადრეკადი რგოლებისგან. ამ მოდელს შეესაბამება (4.5.) ნახატზე ნაჩვენები ელექტრული სქემა. აქ დენის წყარო იძლევა პულსირებად ძაბვას $U(t)$, რომელიც წარმოადგენს $p(t)$ წნევის ანალოგს; C_1 და C_2 მოცულობები შეესაბამება რეზერვუარების k_1 და k_2 დრეკადობებს, ელექტრული წინაღობები R_1, R_2 და $R_3 - X_1$, X_2 და X_3 ჰიდრავლიკურ წინააღმდეგობებს, დენის ძალები I_1 და I_2 – სისხლის ნაკადის მოცულობით სიჩქარეებს Q_1 და Q_2.



ნახ.4.5.

ასეთი მოდელი მათემატიკურად აღიწერება პირველი რიგის ორი დიფერენ-ციალური განტოლების სისტემით, მათი ამონახსენი გვაძლევს ორ მრუდს, რომლებიც პირველ და მეორე კამერებს შეესაბამება.

ორკამერიანი მოდელი უკეთ აღწერს ვასკულატურაში მიმდინარე პროცესებს, მაგრამ ისიც ვერ ხსნის დიასტოლის დასაწყისში წნევის რხევებს (პერიოდულ ცვლილებებს).

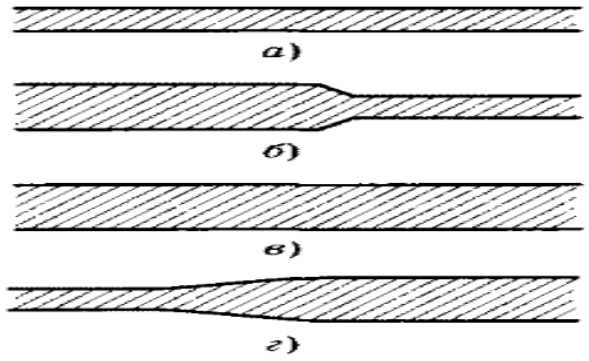
მოდელებს, რომლებიც ასობით ელემენტებს შეიცავს, ეწოდებათ განაწილებული პარამეტრების მქონე მოდელები.

5.2. პულსური ტალღა

გულის კუნთის შეკუმშვისას (სისტოლა) სისხლი გულიდან გადმოისროლება აორტაში და აორტიდან გამომდინარე არტერიებში. ამ სისხლძარღვების კედლები ხისტი რომ ყოფილიყო, სისხლის გულიდან გამოსროლისას წარმოქმნილი წნევა ბგერის სიჩქარით გადაეცემოდა პერიფერიებს. სისხლძარღვთა კედლების დრაკედობის გამო სისტოლის პერიოდში გულიდან გადმოსროლილი სისხლი ჭიმავს აორტას, არტერიებს და არტერიოლებს, ანუ მსხვილი სისხლძარღვები სისტოლის დროს თავის თავზე მეტ სისხლს იღებენ, ვიდრე პერიფერიებზე გადაისროლება. ადამიანის სისტოლური წნევა ნორმაში არის დაახლოებით 16 კპა. გულის მოდუნების (დიასტოლის) დროს დაჭიმული სისხლძარღვები ისევ ეშვება და მათთვის სისხლის საშუალებით გულიდან გადაცემული პოტენციური ენერგია გადადის სისხლის ნაკადის კინეტიკურ ენერგიაში. ამ დროს დიასტოლური წნევა დაახლოებით 11 კპა-ს ტოლია.

მომატებული წნევის ტალღას, რომელიც სისტოლის დროს მარცხენა პარკუჭიდან აორტასა და არტერიებში სისხლის გადმოსროლით არის გამოწვეული, პულსური ტალღა ეწოდება.

პულსური ტალღა ვრცელდება 1-10 მ/წმ და მეტი სიჩქარით. აქედან გამომდინარე, სისტოლის პერიოდში (დაახლოებით 0,3 წმ) ის უნდა გავრცელდეს 1,5-3 მ მანძილზე, რაც აღემატება მანძილს გულიდან კიდურებამდე. ეს ნიშნავს, რომ პულსური ტალღის დასაწყისი კიდურებს მით ადრე მიაღწევს, რაც უფრო ადრე დაიწყება აორტაში წნევის ვარდნა. არტერიების ნაწილების პროფილი სქემატურად არის ნაჩვენები (4.6.) ნახატზე: ა. – პულსური ტალღის გავლის შემდეგ, ბ. – პულსური ტალღის დასაწყისი არტერიაში, გ. – პულსური ტალღა არტერიაში, დ. – იწყება მომატებული წნევის ვარდნა.



ნახ.4.6.

პულსურ ტალღას შეესაბამება სისხლის ნაკადის პულსირება მსხვილ არტერიებში, თუმცა სისხლის სიჩქარე (მაქსიმალური მნიშვნელობაა 0,3-0,5 მ/წმ), პულსური ტალღის გავრცელების სიჩქარეზე ბევრად ნაკლებია.

მოდელირების გამოცდილებიდან და გულის მუშაობის შესახებ საერთო წარმოდგენით აშკარა ხდება, რომ პულსური ტალღა არ არის სინუსოიდალური (ჰარმონიული). როგორც ნებისმიერი პერიოდული პროცესი, პულსური ტალღაც შეიძლება წარმოვადგინოთ ჰარმონიული ტალღების ჯამის სახით. ამიტომ ყურადღება დავითმოთ ჰარმონიულ პულსურ ტალღას,როგორც ერთგვარ მოდელს.

დავუშვათ, რომ ჰარმონიული ტალღა ვრცელდება სისხლძარღვში X ღერძის გასწვრივ υ სიჩქარით. სისხლის სიბლანტე და სისხლძარღვის კედლების ვისკოელასტიური თვისებები ამცირებს ტალღის ამპლიტუდას. შეიძლება ჩავთვალოთ, რომ ტალღის მილევა ექსპონენციალური იქნება. ამის საფუძველზე პულსური ტალღისთვის შეგვიძლია ჩავწეროთ შემდეგი განტოლება:

$$p = p_0 e^{-\chi x} \cos\left[\omega\left(t - \frac{x}{v}\right)\right], \qquad (4.12.)$$

სადაც p_0 წნევის ამპლიტუდაა პულსურ ტალღაში; x – რხევების წყაროდან (გულიდან) ნებისმიერ წერტილამდე მანძილი; t – დრო; ω – რხევების წრიული სიჩქარე; X – ერთგვარი მუდმივა, რომელიც განსაზღვრავს

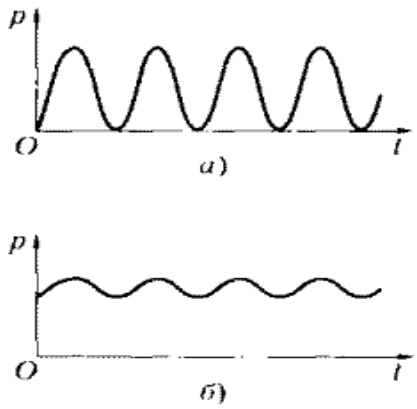
ტალღის მილევას. პულსური ტალღის სიგრძე შეიძლება ვიპოვოთ ფორმულით

$$\lambda = \frac{\nu}{\nu} = \frac{2\pi\nu}{\omega}. \qquad (4.13.)$$

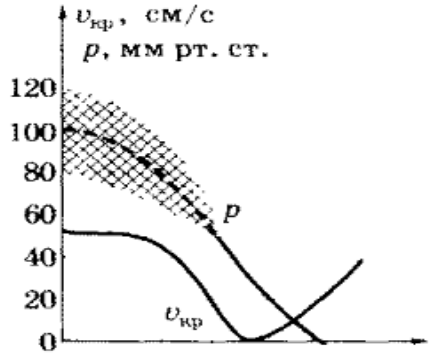
წნევის ტალღა წარმოადგენს ერთგვარ „მოჭარბებულ“ წნევას. ამიტომ, „ძირითადი“ წნევის (ატმოსფერული წნევის, ან სისხლძარღვის გარემომცველი გარემოს წნევის) $p_{ატმ}$ გათვალისწინებით შეიძლება წნევის ცვლილება შემდეგნაირად ჩავწეროთ:

$$p = p_{atm} + p_0 e^{-x^x} \cos\left[\omega\left(t - \frac{x}{\nu}\right)\right]. \qquad (4.14.)$$

როგორც (4.14.) განტოლებიდან ჩანს, სისხლის წინსვლასთან ერთად (x-ის ზრდის შესაბამისად) წნევის რხევები გლუვდება. (4.7.) ნახატზე სქემატურად არის ნაჩვენები წნევის რხევები აორტაში, გულის სიახლოვეს (ა.) და არტერიოლებში (ბ.) გრაფიკები შედგენილია პულსური ტალღის ჰარმონიულობის მოდელის დაშვებით.



ნახ.4.7.



ნახ.4.8.

(4.8.) გრაფიკზე მოყვანილია ექსპერიმენტული გრაფიკები, რომლებიც აჩვენებს წნევის საშუალო მნიშვნელობის ცვლილებისა და სისხლის ნაკადის $\nu_{სისხ}$ სიჩქარის დამოკიდებულებას სისხძარღვთა ტიპისგან. სისხლის ჰიდროსტატიკურ წნევას არ ითვალისწინებენ. წნევა

ატმოსფერულზე ჭარბია. დაშტრიხული არე შეესაბამება წნევის რხევებს (პულსურ ტალღას).

მსხვილ სისხლძარღვებში პულსური ტალღის სიჩქარე შემდეგნაირად არის დამოკიდებული მათ პარამეტრებზე (მოენს – კორტევეგას ფორმულა):

$$v = \sqrt{\frac{Eh}{\rho d}}, \qquad (4.15.)$$

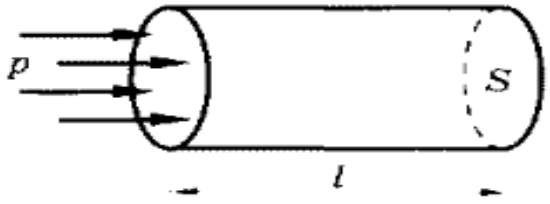
სადაც E დრეკადობის მოდულია, ρ – სისხლძარღვის ნივთიერების სიმკვრივე, h – სისხლძარღვის კედლის სისქე, ხოლო d – სისხლძარღვის დიამეტრი. საინტერესოა, შევადაროთ (4.15.) ტოლობა თხელ ზამბარაში ბგერის გავრცელების სიჩქარის გამოსახულებას:

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \qquad (4.16.)$$

ადამიანის ასაკის ზრდასთან ერთად სისხლძარღვების დრეკადობის მოდული იზრდება, ამიტომ, როგორც (4.15.)-დან გამომდინარეობს, იზდება პულსური ტალღის სიჩქარეც.

5.3. გულის მუშაობა და სიმძლავრე. სისხლის მიმოქცევის ხელოვნური აპარატი.

გულის მიერ შესრულებული მუშაობა იხარჯება წნევის გადალახვაზე და სისხლისთვის კინეტიკური ენერგიის მინიჭებაზე.



ნახ.4.9.

გამოვითვალოთ მუშაობა, რომელიც სრულდება მარცხენა პარკუჭის ერთჯერადი შეკუმშვის დროს. სისხლის დარტყმითი მოცულობა $V_დ$ გამოვსახოთ ცილინდრის სახით (ნახ. 4.9.). შეიძლება ჩავთვალოთ, რომ გული უბიძგებს ამ მოცულობას S განივკვეთის აორტისკენ, l მანძილზე p საშუალო წნევის პირობებში. ამ დროს შესრულებული მუშაობა

$A_1=Fl-pSl = pV_დ$.

ამ მოცულობის სისხლისთვის კინეტიკური ენერგიის გადაცემაზე იხარჯება მუშაობა

$$A_2 = \frac{mv^2}{2} = \frac{\rho V_d v^2}{2},$$

სადაც ρ სისხლის სიმკვრივეა, ხოლო v – სისხლის სიჩქარე აორტაში. ამრიგად, გულის მარცხენა პარკუჭის მუშაობა შეკუმშვის დროს ტოლია

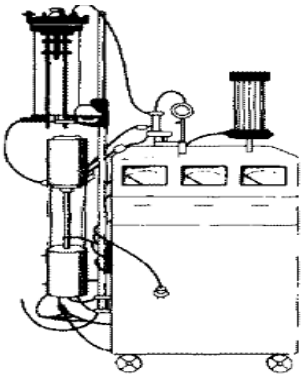
$$A_{marcx} = A_1 + A_2 = pV_d + \frac{\rho V_d v^2}{2} \ .$$

რამდენადაც მარჯვენა პარკუჭის მუშაობა მიჩნეულია მარცხენა პარკუჭის მუშაობის 0.2 ნაწილად, მთლიანად გულის მუშაობა ერთჯერადი შეკუმშვისას ტოლია

$$A = A_{marcx} + 0.2A_{marcx} = 1.2\left(pV_d + \frac{\rho V_d v^2}{2} \right). \qquad (4.17.)$$

(4.17.) ფორმულა სამართლიანია ორგანიზმის როგორც მოსვენების, ასევე აქტიური მდგომარეობისთვის. ეს მდგომარეობები განსხვავდება სისხლის დინების სიჩქარეებით. (4.17.) ფორმულაში p = 13 კპა, $V_დ$ = 60 მლ=6·105მ^3, ρ=1,05·103 კგ/მ^3, v = 0,5 მ/წმ მნიშვნელობების ჩასმით მივიღებთ მოსვენების მდგომარეობაში გულის ერთჯერადი შეკუმშვის მუშაობას: $A_1 \approx$ 1 ჯ. თუ ჩავთვლით, რომ საშუალოდ გული წამში ერთ შეკუმშვას ასრულებს, ვიპოვით გულის მიერ დღე-ღამეში შესრულებულ მუშაობას: $A_{24სთ}$ = 86400 ჯ. კუნთების აქტიური მოქმედების დროს გულის მუშაობა, შესაძლოა, რამდენჯერმე გაიზარდოს.

თუ გავითვალისწინებთ, რომ სისტოლის ხანგრძლივობა t დაახლოებით 0,3 წამია, მაშინ ერთი შეკუმშვის პერიოდში გულის საშუალო სიმძლავრე იქნება $(W) = \frac{A_1}{t} = 3{,}3$ ვტ.



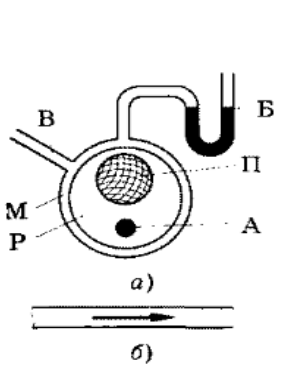
ნახ.4.10.

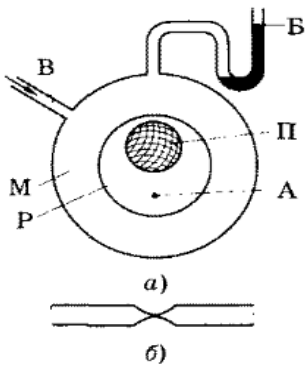
გულზე იმ ოპერაციების ჩატარებისას, რომლებიც მოითხოვენ მის დროებით გამორთვას სისხლის მიმოქცევის სისტემიდან, იყენებენ ხელოვნური სისხლის მიმოქცევის სპეციალურ აპარატებს (ნახ. 4.10.). არსებითად, ეს აპარატი წარმოადგენს ხელოვნური გულისა (სატუმბი სისტემის) და ხელოვნური ფილტვების (ოქსიგენატორის – სისტემის, რომელიც უზრუნველყოფს სისხლის ჟანგბადით გაჯერებას) ერთობლიობას.

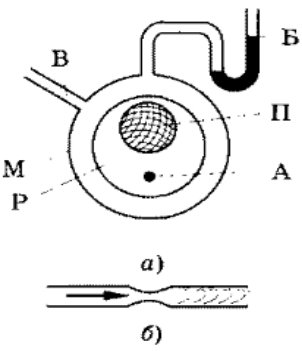
5.4. სისხლის წნევის გაზომვის კლინიკური მეთოდის ფიზიკური საფუძვლები

ფიზიკური პარამეტრი – სისხლის წნევა – დიდ როლს თამაშობს მრავალი დაავადების დიაგნოსტიკაში. არტერიაში სისტოლური და დიასტოლური წნევა შეიძლება გაიზომოს უშუალოდ მანომეტრთან შეერთებული ნემსით. მაგრამ მედიცინაში ფართოდ გამოიყენება ნ.ს.კოროტკოვის მიერ შემოთავაზებული უსისხლო მეთოდი. განვიხილოთ ამ მეთოდის ფიზიკური საწყისები მხრის არტერიაში სისხლის წნევის გაზომვის მაგალითზე.

მხარსა და იდაყვს შორის ხელზე ახვევენ მანჟეტს. მანჟეტის კვეთა „მ“, ხელის ნაწილი „ხ“, მხრის ძვალი „მხ“, და მხრის არტერია „ა“, ნაჩვენებია (4.11. ა. – 4.13. ა.) ნახატებზე. „შ“ შლანგით მანჟეტში ჰაერის ჩატუმბვისას ხელი იკუმშება. შემდეგ იგივე შლანგიდან ჰაერს უშვენებ და „მნმ“ მანომეტრის საშუალებით ზომავენ ჰაერის წნევას მანჟეტში. იმავე ნახატების (ბ.) პოზიციებზე ნაჩვენებია მხრის არტერიის განივკვეთის გამოსახულება თითოეული შემთხვევის შესაბამისად. თავდაპირველად ჰაერის ატმოსფერულზე ჭარბი წნევა მანჟეტში ნულის ტოლია (ნახ. 4.11.), მანჟეტი არ კუმშავს ხელს და არტერიას. მანჟეტში ჰაერის ჩატუმბვის შესაბამისად ის უჭერს მხრის არტერიას და წყვეტს სისხლის დინებას (ნახ. 4.12.). თუ კუნთები (მუსკულატურა) მოშვებულია, ჰაერის წნევა მანჟეტის შიგნით, რომელიც ელასტიური კედლებისგან შედგება, დაახლოებით ტოლია მანჟეტთან უშუალო შეხებაში მყოფი რბილ ქსოვილებში წნევისა. ამაში მდგომარეობს წნევის გაზომვის მეთოდის ძირითადი ფიზიკური არსი.







ნახ.4.11. ნახ.4.12. ნახ.4.13.

ჰაერის გამოშვებით მცირდება წნევა მანჟეტში და რბილ ქსოვილებში, რომლებთანაც ის არის შეხებაში. როდესაც წნევა სისტოლურის ტოლი

გახდება, სისხლი შეეძლება გაარწიოს მოჭიმულ არტერიაში და წარმოიქმნება ტურბულენტური დინება (ნახ. 4.13.).

ამ პროცესის დამახასიათებელ ტონებს და ხმაურებს უსმენს ექიმი წნევის გაზომვისას, როდესაც ფონენდოსკოპს მანჟეტის დისტალურად (ანუ გულიდან უფრო დიდ მანძილზე) ადებს ხელზე. მანჟეტში წნევის შემცირების გაგრძელებით შესაძლოა, აღვადგინოთ სისხლის ლამინარული დინება, რაც შესამჩნევი ხდება მოსმენილი ტონების მკვეთრი შესუსტებით. წნევა მანჟეტში, რომელიც შეესაბამება არტერიაში ლამინარული დინების აღდგენას, რეგისტრირდება, როგორც დიას-ტოლური.

არტერიული წნევის გასაზომად იყენებენ ხელსაწყოებს, რომლებიც (4.14.) ნახატზეა ნაჩვენები: „ა“ – სფიგმომანომეტრი ვერცხლისწყლიანი (სინდიყიანი) მანომეტრით, „ბ“ – სფიგმოტონომეტრი ლითონის მემბრანული მანომეტრით, აქ „მ“ არის მანჟეტი, „გ“ – რეზინის მსხლისებრი ბუშტულა, „რ“ – მანომეტრი.

თავი 6.

ელექტრული ველი

ელექტრული ველი წარმოადგენს მატერიის ნაირსახეობას, რომლის მეშვეობითაც ხდება ძალის ზემოქმედება ამ ველში მყოფ ელექტრულ მუხტებზე. ბიოლოგიური სტრუქტურების მიერ გენერირებული ელექტრული ველების მახასიათებლები წარმოადგენს ორგანიზმის მდგომარეობის შესახებ ინფორმაციის წყაროს.

6.1. დაძაბულობა და პოტენციალი – ელექტრული ველის მახასიათებლები.

ელექტრული ველის ძალურ მახასიათებლებს წარმოადგენს დაძაბულობა, რომელიც ტოლია ველის მოცემულ წერტილში წერტილოვან მუხტზე მოქმედი ძალის ფარდობისა ამ მუხტთან

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}. \qquad (5.1.)$$

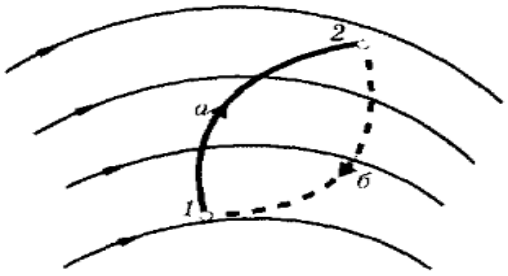
დაძაბულობა არის ვექტორი, რომლის მიმართულება თანხვდება ველის მოცემულ წერტილში დადებითად დამუხტულ წერტილოვან მუხტზე მოქმედი ძალის მიმართულებას.

ელექტრული ველის დაძაბულობა ნებისმიერ წერტილში ანალიტიკურად გამოისახება შემდეგი სამი განტოლებით:

$$E_x = f_1(x, y, z); \qquad E_y = f_2(x, y, z); \; E_z = f_3(x, y, z); \;, \qquad (5.2.)$$

სადაც E_x, E_y და E_z ველის აღსაწერად შემოყვანილ კოორდინატთა შესაბამის ღერძებზე დაძაბულობის ვექტორის პროექციებია. გრაფიკულად მოსახერხებელია ელექტრული ველის წარმოდგენა ძალწირებით, რომელთა რხევები თანხვდება დაძაბულობის ვექტორის მიმართულებას ველის შესაბამის წერტილებში.

ჩვეულებრივ, ძალწირებს ისეთი სიხშირით ატარებენ, რომ მათ პერპენდიკულა-რულად, ფართობის ერთეულში გამავალი წირების რიცხვი პროპორციული იყოს ელექტრული ველის დაძაბულობის მნიშვნელობისა ველის შესაბამის წერტილებში.



ნახ.5.1.

წარმოვიდგინოთ, რომ q მუხტი გადაადგილდება ელექტრულ ველში 1-ა-2 ტრაექტორიით (ნახ. 5.1.). ამ დროს ველის ძალები ასრულებენ მუშაობას, რომელიც შეიძლება გამოვსახოთ დაძაბულობის საშუალებით [იხ. (5.1.)]:

$$A = \int_1^2 E_l q dl = q \int_1^2 E_l dl , \qquad (5.3.)$$

სადაც dl ელემენტარული გადაადგილებაა; $E_l - \vec{E}$ ვექტორის პროექცია dl მიმართულებით. ვაჩვენოთ, რომ ელექტროსტატიკური ველის (უძრავი მუხტების ელექტრული ველი) მუშაობა არ არის დამოკიდებული ტრაექტორიაზე, რომლითაც გადაადგილდება მუხტი ამ ველში.ველებს, რომლებსაც ასეთი თვისება აქვთ, პოტენციურ ველებს უწოდებენ.

ვთქვათ, q მუხტი გადაადგილდა ჩაკეტილი ტრაექტორიით 1-ა-2-ბ-1 (ნახ. 5.1.). რამდენადაც ველი ელექტროსტატიკურია, ამ დროს არ იცვლება ველის წარმომშობი მუხტის მდგომარეობა და უცვლელი რჩება

პოტენციური ენერგიაც, რომელიც დამოკიდებულია მათ ურთიერთგანლაგებაზე. ამიტომ, ელექტროსტატიკური ველის მუშაობა მუხტის ჩაკეტილ ტრაექტორიაზე გადანაცვლებისთვის ნულის ტოლია[5]:

$$A = \oint E_l dl = q\int_1^2 E_l dl + q\int_2^1 E_l dl = 0 . \qquad (5.4.)$$

(„ა“-ს მიხედვით)(„ბ“-ს მიხედვით)

რადგან q მუხტზე მოქმედი ძალები განისაზღვრება ველში მისი მდებარეობით, ამიტომ ერთნაირი ტრაექტორიით, მაგრამ ურთიერთსაწინააღმდეგო მიმართუ-ლებით მუხლის გადანაცვლებისთვის დახარჯული მუშაობის გამოსახულებები განსხვავდება მხოლოდ ნიშნით:

$$q\int_2^1 E_l dl = -q\int_1^2 E_l dl .$$

(„ბ“-ს მიხედვით).

(„ბ“-ს მიხედვით)

ამ გამოსახულების (5.4.) გამოსახულებაში ჩასმა გვაძლევს:

$$q\int_1^2 E_l dl = q\int_1^2 E_l dl . \qquad (5.5.)$$

(„ა“-ს მიხედვით)(„ბ“-ს მიხედვით)

(5.5.) ტოლობა ნიშნავს, რომ ელექტროსტატიკური ველის მუშაობა არ არის დამოკიდებული მუხტის ტრაექტორიაზე, მაგრამ დამოკიდებულია მის სიდიდეზე, ტრაექტორიის საწყისი და საბოლოო წერტილების მდებარეობაზე და ველის დაძაბულობაზე.

ამ თვისების საფუძველზე შემოაქვთ პოტენციალთა სხვაობის $\Delta\varphi$ ცნება, რომელიც ელექტროსტატიკური ველისთვის U დაძაბულობის ტოლია.

ველის წერტილებს შორის პოტენციალთა სხვაობას უწოდებენ ველის ძალების მიერ წერტილოვანი დადებითი მუხტის ერთი წერტილიდან

[5] იმ ვარაუდით, რომ გამოსხივებისას დანაკარგები უმნიშვნელოდ მცირეა.

მეორეში გადატანისას შესრულებული მუშაობის ფარდობას გადატანილ მუხტთან:

$$U_{12} = \Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 = \frac{A}{q} = \frac{q\int_2^1 E_l dl}{q} = q\int_1^2 E_l dl\,, \qquad (5.6.)$$

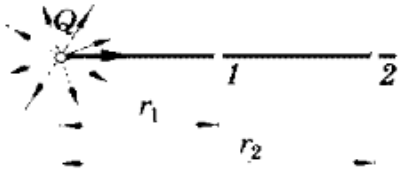
სადაც φ_1 და φ_2 ელექტრული ველის პოტენციალებია (1) და (2) წერტილებში, U_{12} არის ამ წერტილებს შორის დაძაბულობა. როგორც (5.6.) განტოლებიდან გამომდინარეობს, ორ წერტილს შორის პოტენციალთა სხვაობა დამოკიდებულია არჩეული წერტილების მდებარეობასა და ელექტრული ველის დაძაბულობაზე.

პოტენციალთა სხვაობასთან ერთად ელექტრული ველის მახასიათებლად იყენებენ პოტენციალის ცნებას. მაგრამ ველის მოცემული წერტილისთვის მას ცალსახა მნიშვნელობა აქვს მხოლოდ იმ შემთხვევაში, თუ მოცემულია რომელიმე ნებისმიერად არჩეული წერტილის პოტენციალი. პრაქტიკაში ითვლება, რომ მიწასთან შეერთებული გამტარების პოტენციალი, ან შასის პოტენციალი, რომლზედაც დამონტაჟებულია რადიომოწყობილობა (ორივე შემთხვევაში საუბარია დამიწებაზე), ნულის ტოლია. თეორიულ ამოცანებში, ჩვეულებრივ, ნულის ტოლად თვლიან უსასრულოდ დაშორებული წერტილების პოტენციალს.

გამოვითვალოთ იმ წერტილოვანი მუხტის ველის პოტენციალი, რომელიც განლაგებულია ε დიელექტრიკული შეღწევადობის მქონე ერთგვაროვან იზოტროპულ დიელექტრიკში (ნახ. 5.2.). ჩავთვალოთ, რომ (1) და (2) წერტილები ერთ ძალხაზზე, ველის წყაროდან შესაბამისად r_1 და r_2 მანძილებზე იმყოფება. მოვახდინოთ (5.6.) გამოსახულების ინტეგრირება 1-2 მონაკვეთზე იმის გათვალისწინებით, რომ კულონის კანონის მიხედვით (წერტილოვანი მუხტისთვის) $E_l = E - \frac{Q}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0 r^2}$ და $dr = dl$:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = q\int_{r_1}^{r_2} E dl = -\frac{Q}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0}\int_{r_1}^{r_2}\frac{dr}{r^2} = \frac{Q}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0 r_1} - \frac{Q}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0 r_2}, \qquad (5.7.)$$

სადაც $\varepsilon_0 \approx 8{,}85 \cdot 10^{12}$ფ/მ – ელექტრული მუდმივაა[6].



ნახ.5.2.

დავუშვათ, რომ პოტენციალი უსასრულოდ დაშორებულ წერტილში ნულის ტოლია: $\varphi_2 \to 0$ როცა $r_2 \to \infty$. მაშინ (5.7)-დან მივიღებთ

$$\varphi_1 = \frac{Q}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0 r_1},$$

ან უფრო ზოგადი სახით

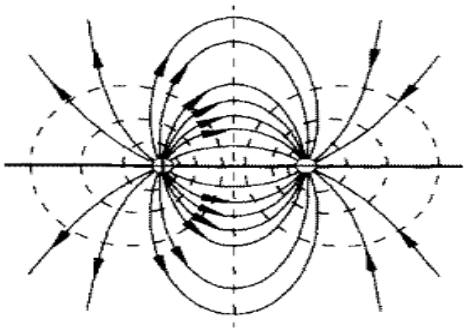
$$\varphi = \frac{Q}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0 r}, \qquad (5.8.)$$

შესაძლოა ყოფილიყო სხვა ვარაუდებიც უსასრულოდ დაშორებულ წერტილში პოტენციალის მნიშვნელობის შესახებ, მაგრამ ზემოთ გაკეთებულმა დაშვებამ ყველაზე მარტივ გამოსახულებამდე მიგვიყვანა (5.8.), რომლის მიხედვითაც ჩვეულებრივ გამოითვლება წერტილოვანი მუხტის ველის პოტენციალი.

ელექტრული ველის პოტენციალი სხვადასხვა წერტილებში შეგვიძლია თვალსაჩინოებისთვის წარმოვიდგინოთ ერთნაირი პოტენციალის ზედაპირების (ექვიპოტენციური ზედაპირების) სახით. ჩვეულებრივ ექვიპოტენციურ ზედაპირებს ავლებენ ისე, რომ მეზობელი ზედაპირები ერთმანეთისგან პოტენციალის ერთი და იგივე მნიშვნელობით განსხვავდება. 5.3. ნახატზე გამოსახულია ორი საპირისპირო მუხტის მქონე წერტილოვანი

[6] ელექტრული მუდმივის ε_0 განზომილება გამოიხატება ასეც: $\frac{\text{კლ}^2}{\text{ნ} \cdot \text{მ}^2}$, რაც კულონის კანონიდან გამომდინარეობს.

მუხტის ველის ექვიპოტენციური ზედაპირები[7] (წყვეტილი ხაზები) და ძალწირები (უწყვეტი ხაზები).



ნახ.5.3.

ანალიტიკურად ელექტრული პოტენციალის დამოკიდებულება კოორ-დინატებზე ველის სხვადასხვა წერტილებშიგამოისახება კოორდინატების ერთგვარი ფუნქციით

$$\varphi = f(x, y, z), \qquad (5.9.)$$

რომელსაც, კერძო შემთხვევებში, მაგალითად, ასეთი სახე აქვს (5.8.)

რადგან ელექტრული ველის დაძაბულობა განისაზღვრება ძალის საშუალებით, ხოლო პოტენციალი – ველის ძალების მიერ შესრულებული მუშაობით, ეს მახასიათებლები ერთმანეთთან ძალისა და მუშაობის ურთიერთკავშირის ანალოგიურად არის დაკავშირებული. ველის დაძაბულობისა და პოტენციალის ინტეგრალური დამოკიდებულება გადმოიცემა (5.6.) ფორმულით ან გამოსახულებით

$$U_{12} = \varphi_2 - \varphi_1 = \int_1^2 E_l dl \,. \qquad (5.10.)$$

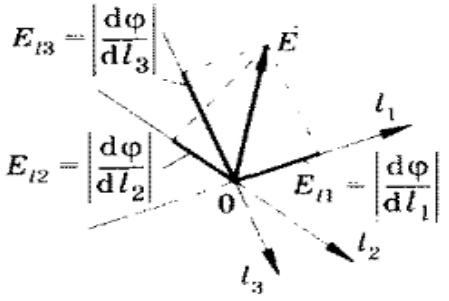
აქ, ,,–,, ნიშნის გათვალისწინებით შეცვლილია ინტეგრირების საზღვრები: ინტეგრალის ზედა საზღვარს განტოლების მარცხენა ნაწილში შეესაბამება φ_2 საკლები, ხოლო ქვედას – φ_1 მაკლები.

[7] ნახაზის სიბრტყეზე ექვიპოტენციური ზედაპირები გამოსახულია ექვიპოტენციური წირებით

მივიღებთ დიფერენციალურ კავშირს E-ს და φ-ს შორის. დავუშვათ, რომ „1“ და „2“ წერტილები განლაგებულია უსასრულოდ ახლოს, მაშინ (5.10.)-დან მივიღებთ

$$d\varphi = -E_l dl\ ,\ \text{ან}\ \ E_l = \frac{d\varphi}{dl}. \qquad (5.11.)$$

პოტენციალის წარმოებული $\frac{d\varphi}{dl}$ მიმართულებით ახასიათებს $d\varphi$ პოტენციალის ნამატის დამოკიდებულებას dl მანძილზე l მიმართულებით; E არის $\vec{E}$ ვექტორის პროექცია ამ მიმართულებით.



ნახ.5.4.

(5.11.) ფორმულის არსი ნაჩვენებია (5.4.) ნახატზე. O წერტილიდან გავლებულია $\vec{E}$ ვექტორი, რომელიც პროეცირებულია l_1, l_2 და l_3 მიმართულებებზე. ეს პროექციები მოდულის მიხედვით ტოლია პოტენციალის წარმოებულისა შესაბამისი მიმართულებით: $|\ d\varphi\ /dl_1\ |$, $|\ d\varphi\ /dl_2\ |$, $|\ d\varphi\ /dl_3\ |$. მანძილის ერთეულზე პოტენციალის უდიდესი ცვლილება გვაქვს წრფის გასწვრივ, რომელიც $\vec{E}$-ის მიმართულებას ემთხვევა; (5.11.) ტოლობაში ნიშანი „–“ ნიშნავს, რომ პოტენციალი ყველაზე ჩქარა მცირდება E-ს მიმართულებით და ყველაზე სწრაფად იზრდება - E-ს მიმართულებით. შეგვიძლია ვთქვათ, რომ $\vec{E}$ ვექტორი ტოლია პოტენციალის გრადიენტისა საპირისპირო ნიშნით:

$$\vec{E} = -\overline{grad\varphi}\ .^{8} \qquad (5.12.)$$

ძალწირის პერპენდიკულარული მიმართულებით გვაქვს

$$E_l = 0 \to \frac{d\varphi}{dl} = 0 \to \varphi = const\,. \qquad (5.13.)$$

აქედან გამომდინარეობს, რომ ძალწირები და ექვიპოტენციური ზედაპირები ურთიერთპერპენდიკულარულებია. თუ ველი ერთგვაროვანია, მაგალითად, ბრტყელი კონდენსატორის ველი, მაშინ (5.6.) ფორმულიდან ვპოულობთ, რომ ორი წერტილისთვის, რომლებიც ერთ ძალწირზეა განლაგებული ერთმანეთისგან l მანძილზე,

$$E = \frac{(\varphi_1 - \varphi_2)}{l} = \frac{U_{12}}{l}\,. \qquad (5.14.)$$

(5.11.) და (5.9.) ფორმულების გათვალისწინებით შეგვიძლია ჩავწეროთ ელექტრული ველის დაძაბულობის ვექტორის პროექციები კოორდინატების სამივე ღერძზე:

$$E_x = \frac{d\varphi}{dx},\ E_y = \frac{d\varphi}{dy},\ E_z = \frac{d\varphi}{dz}. \qquad (5.15.)$$

მაშინ დაძაბულობას ანგარიშობენ ფორმულით

$$E = \sqrt{E_x^2 + E_y^2 + E_z^2}\ . \qquad (5.16.)$$

თუ ველი შექმნილია N რაოდენობის წერტილოვანი მუხტებით, მაშინ დაძაბულობა ნებისმიერ წერტილში შეგვიძლია გამოვიანგარიშოთ, როგორც თითოეული მუხტის მიერ ამ წერტილში შექმნილი ველის დაძაბულობების ვექტორული ჯამი (სუპერპოზიციის პრინციპი):

$$\dot{E} = \sum_{i=1}^{N} \dot{E}_i. \qquad (5.17.)$$

[8] პოტენციალის გრადიენტი არის ვექტორი, რომლის მოდული ტოლია $\varphi = f(x, y, z)$ ფუნქციის წარმოებულისა ნორმალის ექვიპოტენციური ზედაპირის მიმართულებით(5.9.)

ხოლო ელექტრული პოტენციალი ამ წერტილში, როგორც ყოველი მუხტის პოტენციალების ალგებრული ჯამი, იმ დაშვებით, რომ უსასრულოდ დაშორებული წერტილის პოტენციალი ნულის ტოლია:

$$\varphi = \sum_{i=1}^{N} \varphi_i = \sum_{i=1}^{N} \frac{Q}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0 r_i}. \qquad (5.18.)$$

არსებული ელექტრო (გამზომი) მოწყობილობები გათვლილია პოტენციალთა სხვაობის, და არა დაძაბულობის გაზომვაზე. მისი გაგება შეიძლება E-სა და φ-ს შორის კავშირის გამოყენებით.

6.2. ელექტრული დიპოლი

ელექტრული დიპოლი (დიპოლი) ეწოდება სისტემას, რომელიც შედგება ერთმანეთისგან გარკვეული მანძილით (დიპოლის მხარი) დაშორებული ორი ტოლი, მაგრამ საწინააღმდეგოდ დამუხტული წერტილოვანი ელექტრული მუხტისგან.

ნახ.5.5.

დიპოლის (ნახ. 5.5.) ძირითადი მახასიათებელია მისი ელექტრული მომენტი (დიპოლური მომენტი) – უარყოფითი მუხტიდან დადებითისკენ მიმართული ვექტორი, რომელიც ტოლია მუხტის ნამრავლისა l დიპოლის მხარზე:

$$\dot{p} = q\dot{l}. \qquad (5.19.)$$

ელექტრული მომენტის ერთეულია კულონი·მეტრი.

მოვათავსოთ დიპოლი E დაძაბულობის ერთგვაროვან ელექტრულ ველში (ნახ.5.6).

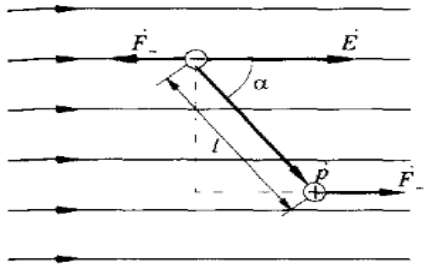
დიპოლის თითოეულ მუხტზე მოქმედებს ძალები $\dot{F}_+ = q\dot{E}$ და $\dot{F}_- = -q\dot{E}$, ეს ძალები ტოლია მოდულით, ურთიერთსაწინააღმდეგოდაა მიმართული და ქმნის ძალთა წყვილის მომენტს. როგორც ნახატიდან ჩანს, ის ტოლია:

$$M = qEl \sin\alpha = p\,E \sin\alpha, \qquad (5.20.)$$

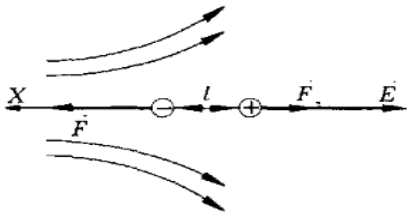
ან ვექტორულად

$$\dot{M} = \dot{p} \times \dot{E}. \qquad (5.21.)$$

ამრიგად, ერთგვაროვან ელექტრულ ველში დიპოლზე მოქმედებს ზალის მომენტი, რომელიც დამოკიდებულია როგორც დიპოლის ელექტრულ მომენტზე და ორიენტაციაზე, ასევე ველის დაძაბულობაზე.



ნახ.5.6.



ნახ.5.7.

ქვემოთ განვიხილავთ დიპოლს არაერთგვაროვან ელექტრულ ველში. დავუშვათ, რომ დიპოლი განლაგებულია ძალწირის გასწვრივ (ნახ. 5.7.). მასზე მოქმედებს ძალები

$$\dot{F}_+ = q\dot{E} \text{ და } \dot{F}_- = -q\dot{E},$$

სადაც E_+ და E_- ველის დაძაბულობებია დადებითი და უარყოფითი მუხტების განლაგების წერტილებში (5.7. ნახ.-ზე $E_- > E_+$). ამ ძალების ტოლქმედის მნიშვნელობაა

$$F = F_- - F_+ = qE_- - E_+ = q\,(F_- - F_+). \qquad (5.22.)$$

შემოვიტანოთ შეფარდება $\frac{(E_- - E_+)}{l}$, რომელიც ახასიათებს დიპოლის მხარის სიგრძის ერთეულზე დაძაბულობის საშუალო ცვლილებას. რამდენადაც, ჩვეულებრივ მხარი არ არის დიდი, მიახლოებით შეგვიძლია ჩავთვალოთ

$$\frac{\left(E_- - E_+\right)}{l} = \frac{dE}{dx}. \qquad (5.23.)$$

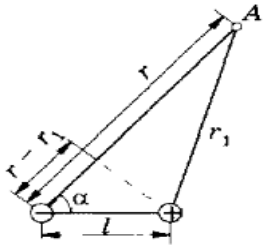
სადაც $\frac{dE}{dx}$ არის ელექტრული ველის დაძაბულობის წარმოებული OX ღერძის მიმართულებით, რომელიც წარმოადგენს ელექტრული ველის არაერთგვაროვნების საზომს შესაბამისი მიმართულებით. (5.23.)-დან გამომდინარეობს, რომ

$$\left(E_- - E_+\right) = l\frac{dE}{dx},$$

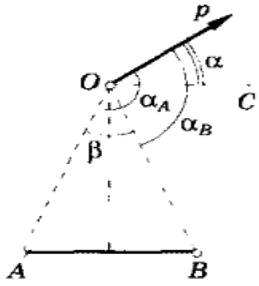
მაშინ (5.22.) ფორმულა შეგვიძლია ამ სახით წარმოვადგინოთ

$$F = ql\frac{dE}{dx} = p\frac{dE}{dx}. \qquad (5.24.)$$

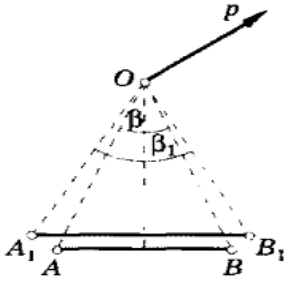
ამრიგად, დიპოლზე მოქმედებს ძალა, რომელიც დამოკიდებულია მის ელექტრულ მომენტზე და $\frac{dE}{dx}$ ველის არაერთგვაროვნებაზე. თუ დიპოლი არაერთგვაროვან ელექტრულ ველში არ არის ორიენტირებული ძალწირის გასწვრივ, მასზე დამატებით ძალის მომენტიც მოქმედებს. ამრიგად, თავისუფალი დიპოლი ორიენტირებულია ძალწირების გასწვრივ და მიიზიდება ველის დაძაბულობის მეტი მნიშვნელობების მქონე არეებისკენ.



ნახ.5.8.



ნახ.5.9.



ნახ.5.10.

აქამდე განვიხილავდით დიპოლს, რომელიც ელექტრულ ველში იმყოფებოდა, მაგრამ თავად დიპოლიც წარმოადგენს ველის წყაროს. (5.8.)-

ის საფუძველზე ჩავწეროთ გამოსახულება დიპოლის მიერ შექმნილი ელექტრულიველის პოტენციალისთვის ნებისმიერ A წერტილში, რომელიც დაშორებულია მუხტებიდან, შესაბამისად, r და r_1 მანძილით (ნახ. 5.8.):

$$\varphi = \frac{q}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0}\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r}\right) = \frac{q}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0}\frac{r - r_1}{rr_1}. \qquad (5.25.)$$

ჩვეულებრივ თვლიან, რომ $l << r$, $l << r_1$; მაშინ $r \approx r_1$ და

$$rr_1 \approx r^2, \; r - r_1 \approx l\cos\alpha, \qquad (5.26.)$$

სადაც α არის კუთხე $\dot{p}$ ვექტორსა და დიპოლიდან A წერტილისკენ მიმართულებას შორის (ნახ. 5.8.). (5.25.) გამოსახულების გამოყენებით (5.25.) ტოლობიდან მივიღებთ

$$\varphi = \frac{ql\cos\alpha}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0}\frac{p\cos\alpha}{r^2}. \qquad (5.27.)$$

განვიხილოთ (5.27.) ფორმულის გამოყენების ზოგიერთი შემთხვევა.

დავუშვათ, რომ დიპოლი, რომლის ელექტრული მომენტი $\dot{p}$ -ს ტოლია, იმყოფება A წერტილში (ნახ. 5.9.), მისი მხარი კი მცირეა. (5.27.) გამოსახულების გამოყენებით ჩავწეროთ ველის ორი, დიპოლისგან ერთნაირი მანძილით დაშორებული, A და B წერტილების პოტენციალთა სხვაობა (α_A და α_B კუთხეები ნაჩვენებია 5.9. ნახატზე):

$$\varphi_B - \varphi_A = \frac{1}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0}\frac{p}{r^2}\left(\cos\alpha_B - \cos\alpha_A\right). \qquad (5.28.)$$

კუთხე $\dot{p}$ -სა და AB ან OC წრფეს შორის აღვნიშნოთ α-თი, $< AOB = \beta$, კუთხეები $\alpha_A = \alpha + \beta/2 + \pi/2$, $\alpha_B = \alpha - \beta/2 + \pi/2$.

ამ ტოლობების გათვალისწინებით შევასრულოთ ტრიგონომეტრიული გარდაქმნები:

$$\cos\alpha_B - \cos\alpha_A = -2\sin\frac{2\alpha + \pi}{2}\sin\left(-\frac{\beta}{2}\right) = 2\sin\frac{\beta}{2}\cos\alpha. \qquad (5.29.)$$

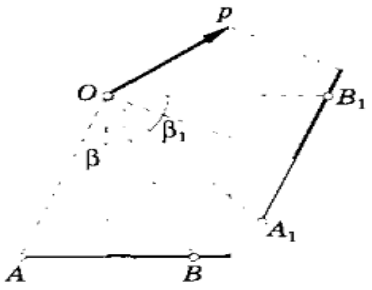
(5.29) გამოსახულება ჩავსვათ (5.28.) ტოლობაში. მივიღებთ

$$\varphi_B - \varphi_A = \frac{1}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0}\frac{p}{r^2}2\sin\frac{\beta}{2}\cos\alpha = \frac{\sin(\beta/2)}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0 r^2}p\cos\alpha\,. \qquad (5.30.)$$

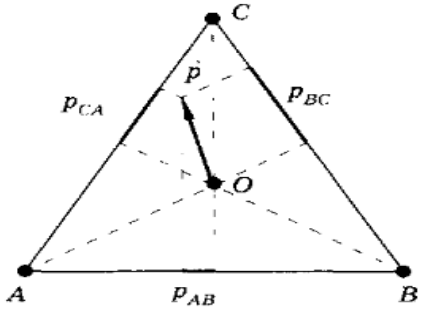
როგორც (5.30) ტოლობიდან ჩანს, დიპოლის ველის ორი, მისგან ერთნაირი მანძილით დაშორებული, წერტილის პოტენციალთა სხვაობა (თუ მოცემულია ε და r), დამოკიდებულიაიმ ნახევარკუთხის სინუსზე, რომლითაც ჩანს ეს წერტილები დიპოლიდან (ნახ. 5.10) და დიპოლის ელექტრული მომენტის $p\cos\alpha$ პროექციაზე ამ წერტილების შემაერთებელ ღერძზე (5.11.). ეს შენიშვნები სამართლიანია მხოლოდ (5.27.)ფორმულის გამოყვანისას დაშვებული შეზღუდვების ფარგლებში:

დავუშვათ დიპოლი, რომელიც ქმნის ელექტრულ ველს (5.27.), იმყოფება ABC ტოლგვერდა სამკუთხედის ცენტრში (ნახ. 5.12.). მაშინ (5.30.) ტოლობის საფუძველზე მივიღებთ, რომ დაძაბულობები ამ სამკუთხედის გვერდებზე ისე შეეფარდება ერთმანეთს, როგორც ვექტორის პროექციები შესაბამის გვერდებზე:

$$U_{AB} : U_{BC} : U_{CA} = P_{AB} : P_{BC} : P_{CA}. \qquad (5.31.)$$



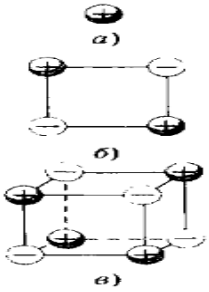
ნახ.5.11.



ნახ.5.12.

6.3. მულტიპოლის ცნება

დიპოლი წარმოადგენს გარკვეული სიმეტრიის მქონე ელექტრული მუხტების სისტემის კერძო შემთხვევას. შეგვიძლია, მოვიყვანოთ მუხტების სიმეტრიული სისტემების სხვა მაგალითებიც (ნახ. 5.13.). მუხტების მსგავსი განაწილების საერთო დასახელებაა–ელექტრული მულტიპოლები.



ნახ.5.13.

ელექტრული მულტიპოლები შეიძლება იყოს სხვადასხვა რიგისა (l =0, 1, 2 და ა.შ), მულტიპოლისმუხტებისრაოდენობა განისაზღვრება გამოსახულებით 2^l. ასე მაგალითად, ნულოვანი რიგის მულტიპოლი (2^0 = 1) წარმოადგენს ერთ წერტილოვან მუხტს (ნახ. 5.13.ა.), პირველი რიგის მულტიპოლი (2^1= 2) არის დიპოლი, მეორე რიგის მულტიპოლი (2^2 = 4) – კვადრუპოლი (ნახ.5.13.ბ.), მესამე რიგის მულტიპოლს (2^3 = 8) ოქტუპოლს უწოდებენ (ნახ. 5.13.გ.) და ა.შ.

მულტიპოლის ველის პოტენციალი მცირდება მისგან მნიშვნელოვან r მანძილებზე $\frac{1}{r^{l-1}}$-ის პროპორციულად. ასე მაგალითად, წერტილოვანი მუხტისთვის ტოლია (l = 0) $\varphi \sim \frac{1}{r}$, დიპოლისთვის – (l = 1) $\varphi \sim \frac{1}{r^2}$, კვადრუპოლისთვის – ($l$ = 1) $\varphi \sim \frac{1}{r^3}$ და ა.შ.

თუ მუხტი გადანაწილებულია სივრცის რაიმე არეში, მაშინ მუხტების სისტემის გარეთ ნებისმიერ A წერტილში ელექტრული ველის პოტენციალი შეიძლება წარმოვიდგინოთ ერთგვარი მიახლოებული რიგის სახით:

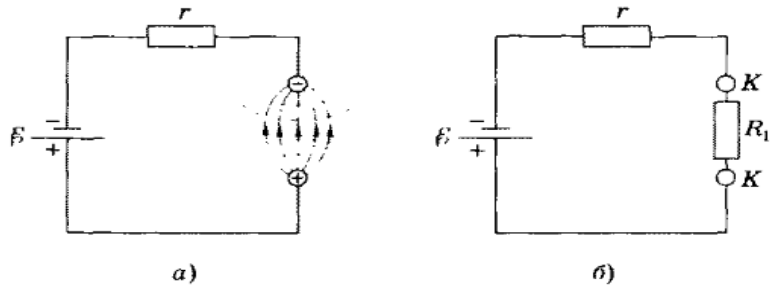
$$\varphi = \frac{f_1}{r} + \frac{f_2}{r^2} + \frac{f_3}{r^3} \ldots . \qquad (5.32.)$$

აქ r არის მანძილი მუხტთა სისტემიდან φ პოტენციალის მქონე A წერტილამდე;
$f_1, f_2, f_3,$ კი ერთგვარი ფუნქციები, რომლებიც დამოკიდებულია მულტიპოლის სახეობაზე, მის მუხტებსა და A წერტილისკენ მიმართულებაზე. (5.32.) გამოსახუ-ლებაში პირველი შესაკრები შეესაბამება მონოპოლს, მეორე – დიპოლს, მესამე – კვადრუპოლს და ა.შ. მუხტების ნეიტრალური სისტემის შემთხვევაში, პირველი შესაკრები ნულის ტოლია. თუ r იმდენად დიდია, რომ შეგვიძლია, უგულებელვყოთ რიგის ყველა წევრი მესამედან დაწყებული, მაშინ (5.32.) გამოსახულებიდან ვიღებთ დიპოლის ველის პოტენციალს (იხ. 5.27.).

6.4. დიპოლური ელექტრული გენერატორი (დენის დიპოლი)

ვაკუუმში ან იდეალურ იზოლატორში ელექტრული დიპოლი შეიძლება არსებობდეს უსასრულოდ დიდი ხნის განმავლობაში. მაგრამ რეალურ სიტუაციაში (ელექტროგამტარ გარემოში) დიპოლის ელექტრული ველის ზემოქმედებით წარმოიქმნება თავისუფალი მუხტების მოძრაობა და ხდება დიპოლის ან ეკრანირება ან ნეიტრალიზება.

დიპოლს შეიძლება მივუერთოთ დაძაბულობის წყარო, სხვა სიტყვებით რომ ვთქვათ, დაძაბულობის წყაროს კლემები წარმოვიდგინოთ, როგორც დიპოლი. ამ შემთხვევაში, დიპოლი გამტარ გარემოში ელექტროდენის არსებობის მიუხედავადაც კი შენარჩუნდება (ნახ.5.14.ა.). R_1 რეზისტორი წარმოადგენს გამტარი გარემოს წინააღმდეგობის ექვივალენტს, ε – ელექტრომამოძრავებელი ძალის (ემძ) წყაროს, r – მის შინაგან წინააღმდეგობას (ნახ. 5.14.ბ.).



ნახ. 5.14.

სრული წრედისთვის ომის კანონის საფუძველზე

$$I = \frac{\varepsilon}{r + R_1},$$

თუ $r >> R_1$, მაშინ $I = \varepsilon / r$.

შეიძლება, დავასკვნათ, რომ ამ შემთხვევაში შიდა წრედში დენის ძალა თითქმის უცვლელი დარჩება, რადგან ის თითქმის არ არის დამოკიდებული გარემოს თვისებებზე (იმ პირობით, რომ $r >> R_1$). ასეთ ორპოლუსიან სისტემას, რომელიც შედგება დენის წყაროსა და მიმღებისაგან, ბიპოლურ ელექტრულ გენერატორს ან დენის დიპოლს უწოდებენ.

დიპოლურ ელექტრულ გენერატორსა და ელექტრულ დიპოლს შორის დიდი ანალოგიაა, რომელიც ეყრდნობა ელექტროსტატიკურ ველსა და გამტარ გარემოში არსებულ ელექტრულ ველს შორის არსებულ ზოგად ანალოგიას.

თვალსაჩინოებისთვის ვაჩვენოთ ეს ანალოგია ბრტყელი კონდესატორის მაგალითზე.

დავუშვათ, რომ ბრტყელი კონდესატორის ფირფიტებს შორის არის ρ კუთრი ელექტრული წინააღმდეგობის ან, სხვაგვარად, γ ($\gamma = 1/\rho$) კუთრი ელექტრული გამტარობის მქონე გარემო. კონდესატორის, როგორც S განივკვეთისა და l სიგრძის გამტარის, ფირფიტებს შორის წინააღმდეგობა ტოლია

$$R = \rho \frac{l}{S} = \frac{1}{\gamma} \frac{l}{S}.$$

ელექტრული გამტარობა ტოლია

$$G = \frac{1}{R} = \gamma \frac{S}{l}. \qquad (5.33.)$$

თუ (5.33.) ტოლობას შევადარებთ ბრტყელი კონდესატორის მოცულობისთვის მიღებულ გამოსახულებას

$$C = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{l}, \qquad (5.34.)$$

შეგვიძლია, დავასკვნათ, რომ გამტარობის (5.33.) ფორმულა მიიღება ტევადობის (5.34.)ფორმულიდან $\varepsilon\varepsilon_0$ ნამრავლის γ-ითჩანაცვლებით.

ელექტროობის გამტარ გარემოში ელექტრული ველისა და ელექტროსტატიკური ველის ანალოგიების არსი მდგომარეობს შემდეგში:

– ელექტროდების ერთნაირი ფორმის შემთხვევაში ძალწირები (ელექტრული ველი გამტარ გარემოში) თანხვდება ელექტროსტატიკური ველის დაძაბულობის წირებს;

– როგორც ერთ, ისე მეორე შემთხვევაში, ბევრ ფორმულას მსგავსი სახე აქვს. ერთი ფორმულებიდან მეორეზე გადასვლა ხდება შემდეგიჩანაცვლებების განხორციელებით: $\varepsilon\varepsilon_0 \to \gamma,\ q \to I,\ C \to G$ (ან $\frac{1}{c} \to R$). ომის კანონი ანალოგიურია
$C = q/U$ ფორმულისა.

ვისარგებლოთ ამ ანალოგიით და მივიღოთ გამოსახულება დენური დიპოლისთვის. დიპოლის ელექტრული მომენტის ანალოგიურად შემოვიტანოთ დიპოლური ელექტრული გენერატორის დიპოლური მომენტი:

$p_\tau = Il,$

სადაც l – არის დენის წყაროსა და მიმღების წერტილებს შორის მანძილი. დიპოლური ელექტრული გენერატორის ველის პოტენციალი გამოისახება ფორმულით, რომელიც (5.27.) ფორმულის ანალოგიურია:

$$\varphi = \frac{1}{4\pi\gamma}\frac{p_\tau \cos\alpha}{r^2} \qquad (5.35.)$$

(უსაზღვრო გარემოში). ელექტრული დიპოლის ელექტროსტატიკური ველის დაძაბულობის წირებისა და დენური დიპოლის ელექტრული ველის დაძაბულობის წირების (ისინი თანხვდებიან დენის წირებსაც) კონფიგურაცია ერთნაირია (იხ.ნახ.5.3.). 5.3. პარაგრაფში გადმოცემული მასალის შესაბამისად შეგვიძლია შემოვიტანოთ მულტიპოლური ელექტრული გენერატორის ცნებაც.

არსებითად, მულტიპოლური ელექტრული გენერატორი წარმოადგენს ელექტრული დენების ერთგვარ სივრცით ერთობლიობას (სხვადასხვა დენების წყაროებისა და მიმღებების ერთობლიობას). ყველაფერი, რაც ზემოთ ითქვა მუხტების სისტემათა ველების პოტენციალებზე (ელექტროსტატიკური ველი), სამართლიანია ასეთი გენერატორისთვისაც (დენური მულტიპოლი) სუსტად გამტარ გარემოში.

6.5. ელექტროკარდიოგრაფიის ფიზიკური საფუძვლები

ცოცხალი ქსოვილები წარმოადგენს ელექტრული პოტენციალების (ბიოპოტენ-ციალების) წყაროს.

დიაგნოსტიკური (კვლევითი) მიზნებით ქსოვილებისა და ორგანოების ბიოპოტენციალების რეგისტრაციამ მიიღო ელექტროგრაფიის სახელი. ასეთი ზოგადი ტერმინი შედარებით იშვიათად გამოიყენება, უფრო გავრცელებულია შესაბამისი დიაგნოსტიკური მეთოდების კონკრეტული დასახელებები: ელექტროკარდიოგრაფია (ეკგ) – აღზნების დროს გულის კუნთში წარმოქმნილი ბიოპოტენციალების რეგისტრაცია, ელექტრომიორ-გაფია – კუნთების ბიოელექ-ტრული აქტოვობის რეგისტრაციის მეთოდი, ელექტროენცეფალოგრაფია (ეეგ) – თავის ტვინის ბიოელექტრული აქტივობის რეგისტრაციის მეთოდი და სხვ.

უმეტეს შემთხვევაში ბიოპოტენციალების ჩვენების რეგისტრირება ხდება არა უშუალოდ ორგანოსთან (გული, თავის თვინი) ელექტროდების

მიერთების საშუალებით, არამედ სხვა მეზობელი ქსოვილებიდან, რომლებშიც ამ ორგანოების მიერ იქმნება ელექტრული ველი. კლინიკური თვალსაზრისით ეს არსებითად აიოლებს თავად იმპულსების რეგისტრაციის პროცედურას და მას უსაფრთხოსა და მარტივს ხდის.

ელექტროკარდიოგრაფიისადმი ფიზიკური მიდგომა ითვალისწინებს ელექტ-რული გენერატორის ისეთი მოდელის შექმნას (არჩევას), რომელიც შეესაბამება „ჩაწერილი“ პოტენციალების სურათს. ამასთან დაკავშირებით ორი ფუნდამენტალური თეორიული ამოცანაა გადასაჭრელი: პირდაპირი ამოცანა – პოტენციალის გამოთვლა გაზომვის გარემოში ელექტრული გენერატორის (მოდელისთვის) მოცემული მახასიათებლების მიხედვით, და შებრუნებული ამოცანა – გაზომილი პოტენციალის მიხედვით ელექტრული გენერატორის მახასიათებლების გამოთვლა.

ელექტროკარდიოგრაფიის მაგალითზე გავაგრძელთ ელექტროგრაფიის ფიზიკური ასპექტების შემდგომი კონკრეტული განხილვა.

თეორიული ელექტროკარდიოგრაფიის ერთ-ერთი ძირითადი ამოცანაა გულის კუნთების ტრანსმემბრანული პოტენციალის განაწილების გამოთვლა იმ პოტენციალების საშუალებით, რომლებიც გულის კუნთის გარეთ არის „ჩაწერილი“. მაგრამ, თეორიულადაც კი შეუძლებელია ასეთი ამოცანის ამოხსნა, რადგან გულის ბიოპოტენციალების ერთი და იგივე „გარე“ გამოვლენას ექნება ადგილი მათ განსხვავებული „შიდა“ განაწილების დროს.

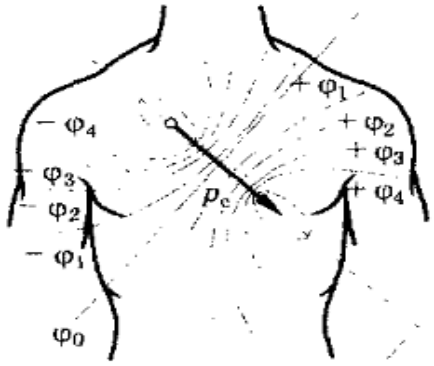
ფიზიკური (ბიოფიზიკური) მიდგომაგულის ბიოპოტენციალებსა და მათ გარეშე გამოვლინებებს შორის კავშირის დადგენისადმი მდგომარეობს ამ ბიოპოტენციალების წყაროების მოდელირებაში.

ელექტრული თვალსაზრისით გული მთლიანობაში წარმოადგენს ერთგვარ ექვივალენტურ ელექტრულ გენერატორს – ან წარმოსახვითს (ჰიპოთეტურს), ან რეალურ მოწყობილობას, როგორც ელექტრული წყაროების ერთობლიობას ადამიანის სხეულის ფორმის მქონე გამტარში. გამტარის ზედაპირზე ექვივალენტური ელექტრული გენერატორის ფუნქციონირებისას იქმნება ელექტრული დაძაბულობა, რომელიც გულის მუშაობის დროს წარმოიშვება ადამიანის სხეულის ზედაპირზე. ვარაუდობენ, რომ გულს გარს აკრავს უსასრულო და (γ) ერთგვაროვანი კუთრი ელექტრული გამტარობის მქონე გარემო.

ამ შემთხვევაში ნებისმიერი წერტილის პოტენციალისთვის შეგვიძლია ჩავწეროთ (5.32.) ფორმულის ანალოგიური ფორმულა. იმ დაშვებების ფარგლებში, რომლებიც გვქონდა (5.3.) პარაგრაფში, *r*-ის დიდი მნიშვნელობებისთვის აქაც შეგვიძლია შემოვიფარგლოთ დიპოლური მიახლოებით და დიპოლის ველის პოტენციალისთვის გამოვიყენოთ (5.35.) ფორმულა.

ეს ნიშნავს, რომ გულის მულტიპოლურ ექვივალენტურ გენერატორში ადამიანის სხეულის ზედაპირზე არსებული პოტენციალში ძირითადია მისი დიპოლური შემადგენელი ნაწილი. სხვა სიტყვებით რომ ვთქვათ, გულის ელექტრული ფუნქციონირების მოდელირება სავსებით დასაშვებია, თუ გამოვიყე-ნებთ დიპოლურ ექვივალენტურ ელექტროგენერატორს. გარემოს შეზღუდულობის (დასრულებულობის) პირობებში შეიძლება მივიდეთ გამოსახულებამდე, რომელიც (5.32.) გამოსახულებიაგან მხოლოდ მამრავლით განსხვავდება.

გულის შესახებ დიპოლური წარმოდგენა საფუძვლად უდევს ეინდჰოვენის განხრის თეორიას. ამ თეორიის თანახმად, გული წარმოადგენს P_c დიპოლური მომენტის მქონე დიპოლს, რომელიცგულის ციკლის განმავლობაში ბრუნავს, იცვლის მდგომარეობას და მოდების წერტილს (ამ ვექტორის მოდების წერტილის ცვლილებას ხშირად უგულებელყოფენ).



ნახ.5.15.

(5.15.) ნახატზე ნაჩვენებია $\dot{p}_c$ ვექტორისა და ექვიპოტენციური წირების მდებარეობა დროის იმ მომენტისთვის, როდესაც დიპოლური მომენტი მაქსიმალურია; კარდიოგრამაზე ეს შეესაბამება R „კბილს“(იხ. ნახ. 5.17.).

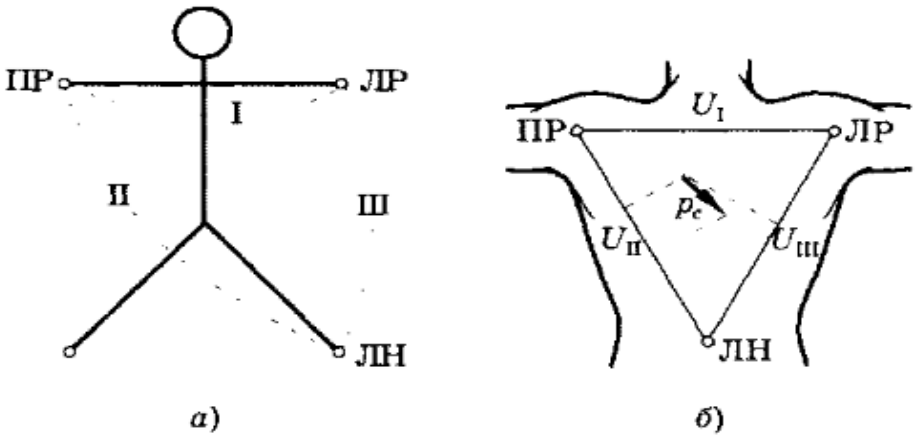
მეორე ცხრილში მოყვანილია ადამიანისა და ზოგიერთი ცხოველის გულის დიპოლური მომენტების მაქსიმალური მნიშვნელობები, ისინი შედარებულია გულისა და სხეულის მასებთან.

ვ.ეინდჰოვენმა შემოგვთავაზა გულის ბიოპოტენციალების სხვაობის აზომვა ტოლგვერდა სამკუთხედის წვეროებს შორის, რომელიც მიხლოებით განლაგებულია მარჯვენა ხელზე (მარჯვ.ხ.), მარცხენა ხელზე (მარცხ.ხ.) და მარცხენა ფეხზე (მარცხ.ფ.) (ნახ. 5.16.ა.). (5.16.ბ.) ნახატზე ეს სამკუთხედი სქემატურად არის გამოსახული.

ცხრილი 2.

ობიექტი	გულისმასა გრ	სხეულისმასა გრ	გულისმაქსიმალურიდიპოლურიმომენტი, მა·სმ
ბაყაყი	0.16	0.036	0.005
ვირთხა	1.1	0.277	0.107
ძაღლი	108	14.2	1.63
ადამიანი	300	71.5	2.32
ცხენი	3060	419	13

ფიზიოლოგების ტერმინოლოგიით სხეულის ორ წერტილს შორის რეგისტრირებადი ბიოპოტენციალების სხვაობას განხრაეწოდება.

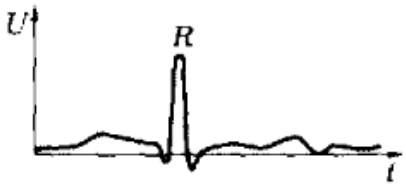


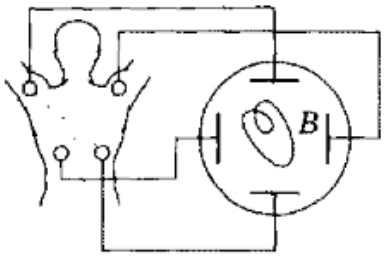
ნახ. 5.16.

განასხვავებენ I განხრას (მარჯვენა ხელი – მარცხენა ხელი), II განხრას (მარჯვენა ხელი – მარცხენა ფეხი) და III განხრას (მარცხენა ხელი – მარცხენა ფეხი), რომლებიც პოტენციალთა U_I, U_{II}, U_{III}, სხვაობებს შეესაბამება. ეინდჰოვენის მიხედვით გული სამკუთხედის ცენტრშია მოთავსებული. (5.31.) ფურმულის გამოყენებით განხრები საშუალებას გვაძლევს განვსაზღვროთ თანაფარდობა სამკუთხედის გვერდებზე გულის ელექტრული მომენტის პროექციებს შორის.

რადგან გულის, როგორც დიპოლის, ელექტრული მომენტი დროის მიხედვით იცვლება, განხრებში მივიღებთ დაძაბულობის ცვლილებას დროის მიხედვით, რასაც ელქტროკარდიოგრამას უწოდებენ.

5.17. ნახატზე ნაჩვენებია ადამიანის ნორმალური კარდიოგრამა ერთ-ერთ განხრაში.





ნახ.5.17. ნახ.5.18.

ელექტროკარდიოგრამა არ იძლევა წარმოდგენას $\dot{p}_c$ ვექტორის სივრცული ორიენტაციის შესახებ.მაგრამ ასეთი ინფორმაცია მნიშვნელოვანია დიაგნოსტიკური მიზნებისთვის. ამიტომ იყენებენ გულის ელექტრული ველის სივრცული გამოკვლევის მეთოდს. მას ვექტორ-კარდიოგრაფია ეწოდება.

ვექტორ-კარდიოგრამა წარმოადგენს იმ წერტილების გეომეტრიულ ერთობლიობას, რომელსაც ქმნის $\vec{p}_c$ ვექტორის ბოლო (წვერო) გულის ციკლის განმავლობაში თავისი მდგომარეობის ცვლილების შედეგად.

პრაქტიკულად, ვექტორ-კარდიოგრამის პროექცია სიბრტყეზე, მაგალითად, ფრონტალურ სიბრტყეზე, შეიძლება მივიღოთ ორი ურთიერთპერპენდიკულარული განხრის შეკრებით. (5.18.) ნახატზე ნაჩვენებია ასეთი შეკრების შედეგი ოსცილოგრაფის საშუალებით, რომლის ეკრანზე ჩანს B მრუდი. მრუდის ფორმის მიხედვით გამოაქვთ დიაგნოსტიკური დასკვნები.

თავი 7. რხევები

7.1. მილევადი რხევები

რეზისტორის არსებობისას კონტურში მიმდინარე პროცესი აღიწერება განტოლებით, რომელიც მექანიკური რხევების განტოლების ანალოგიურია. არც თუ დიდი მილევის პირობებში, ანუ როცა $\omega_0^2 - \beta^2 = \omega^2 > 0 \ \ (\omega_0 > \beta)$, ვპოულობთ შემდეგ ამოხსნას:

$$q = q_m e^{-\beta t} \cos(\omega t + \varphi_0). \qquad (6.1.)$$

ამ ფუნქციის გრაფიკი (5.6.) ნახატზე გამოსახული გრაფიკის ანალოგიურია. თუ მილევა საკმაოდ მცირეა $\left(\omega_0^2 >> \beta^2\right)$, მაშინ $\omega \approx \omega_0$. ამ შემთხვევაში მილევის ლოგარითმული დეკრემენტისთვის გვაქვს

$$\lambda = \beta T = \frac{R}{2L} \cdot 2\pi\sqrt{LC} = \pi R\sqrt{\frac{c}{L}}. \qquad (6.2.)$$

კონდენსატორის აპერიოდული განმუხტვა რეზისტორზე (ძლიერი მილევა). ძლიერი მილევის პირობებში $\omega_0 > \beta$, $\omega_0^2 < \beta^2$, ანუ, (6.4.) გამოსახულების გამოყენებით,

$$\frac{1}{Lc} < \frac{R^2}{4L^2}, \text{ ან } \frac{1}{c} < \frac{R^2}{4L}. \qquad (6.3.)$$

(6.12.) უტოლობა სრულდება, კერძოდ, კონტურში ინდუქტივობის არარსებობის დროსაც ($L \to 0$). ამ შემთხვევისთვის (კონდენსატორის განმუხტვა რეზისტორზე) (6.1.)-დან გვაქვს

$$LR = -\frac{q}{c}, \ \frac{dq}{dt}R = -\frac{q}{c}, \text{ ან } \frac{dq}{q} = -\frac{dt}{RC}. \qquad (6.4.)$$

ბოლო განტოლების ინტეგრირებით ვპოულობთ

$$\int_{q_m}^{q} \frac{dq}{q} = -\int_{0}^{t} \frac{dt}{RC}, \ln\frac{q}{q_m} = -\frac{t}{RC}. \qquad (6.5.)$$

(6.5.)-ს მეორე გამოსახულების პოტენცირებით ვიღებთ

$$q = q_m e^{-\frac{t}{RC}}. \qquad (6.6.)$$

ტალღათა ენერგიის ნაკადის სიმკვრივეს (ტალღის ინტენსივობას) გამოვითვლით (6.55.) ზოგადი ფორმულიდან მასში (6.59) და (6.53.) გამოსახულებების ჩასმით:

$$I = 0{,}5\sqrt{\frac{\varepsilon\varepsilon_0}{\mu\mu_0}} E_m B_m \frac{1}{\sqrt{\varepsilon\varepsilon_0\mu\mu_0}} = 0{,}5\frac{E_m B_m}{\mu\mu_0}. \qquad (6.60.)$$

(6.57)-დან შეგვიძლია მივიღოთ $E_m B_m = E_m^2\sqrt{\varepsilon\varepsilon_0\mu\mu_0}$. თუ ამ გამოსახულებას შევიტანთ (6.59)-ში, მივიღებთ:

$$0{,}5\sqrt{\frac{\varepsilon\varepsilon_0}{\mu\mu_0}} E_m^2 = 0{,}5\sqrt{\frac{\varepsilon\varepsilon_0}{\mu\mu_0}} B_m^2. \qquad (6.61.)$$

როგორც ვხედავთ, ელექტრომაგნიტური ტალღის ინტენსივობა პროპორციულია ელექტრული ველის დაძაბულობის ამპლიტუდის კვადრატისა. უნდა აღვნიშნოთ, რომ ანალოგიური კავშირი არსებობს ინტენსივობასა და ამპლიტუდას შორის მექანიკური ტალღებისთვისაც.

7.2.ელექტრომაგნიტური ტალღების სკალა. მედიცინაში მიღებული სიხშირული ინტერვალების კლასიფიკაცია

მაქსველის თეორიიდან გამომდინარეობს, რომ სხვადასხვა სახის ელექტრომაგ-ნიტურ ტალღებს, მათ შორის – სინათლის ტალღებსაც, ერთნაირი ბუნება აქვთ. ამასთან დაკავშირებით მიზანშეწონილია

წარმოვიდგინოთ ყველა შესაძლო ელექტრომაგნიტური ტალღა (ელექტრომაგნიტური გამოსხივება) ერთ სკალაზე (ნახ.6.1.).

ნახ.6.1.

მთელი სკალა პირობითად დაყოფილია ექვს დიაპაზონად: რადიოტალღები (გრძელი, საშუალო და მოკლე), ინფრაწითელი, ხილული (სინათლე), ულტრაიისფერი, რენტგენის ტალღები და გამა-გამოსხივება. ეს კლასიფიკაცია განისაზღვრება ამ ტალღების წარმოქმნის მექანიზმითა და სიხშირით, ან ადამიანის მიერ მათი ვიზუალური აღქმის უნარით.

რადიოტალღები განპირობებულია ცვლადი დენებით გამტარებში და ელექტრონულინაკადებით (მაკროგამომსხივებლები). ინფრაწითელი, ხილული და ულტრაიისფერი გამოსხივების წყაროა ატომები, მოლეკულები და სწრაფი დამუხტული ნაწილაკები (მიკროგამომსხივებლები). რენტგენის გამოსხივება წარმოიქმნება ატომის შიდა პროცესებში, ხოლო γ-გამოსხივება ბირთვული ბუნებისაა.

ზოგიერთი დიაპაზონები გადაიფარება, რადგან ერთი და იგივე სიგრძის ტალღები შეიძლება წარმოიქმნას განსხვავებული პროცესების დროს. ასე მაგალითად, ყველაზე მოკლეტალღოვანი ულტრაიისფერი გამოსხივება გადაიფარება რენტგენის გამოსხივების გრძელი ტალღებით.

ამ მხრივ ძალიან საინტერესოა ინფრაწითელი ტალღებისა და რადიოტალღების სასაზღვრო არე. 1922 წლამდე ამ დიაპაზონებს შორის ხარვეზი იყო. ამ შეუვსებელი შუალედის ყველაზე მოკლეტალღოვან გამოსხივებას მოლეკულური (ატომური) წარმოშობა ჰქონდა (გაცხელებული სხეულის გამოსხივება), ხოლო ყველაზე

გრძელტალღოვანს ჰერცის მაკროსკოპიული ვიბრატორები გამოასხივებდნენ. რუსი ფიზიკოსის ა.ა.გლაგოლევა-არკადიევას[9] მიერ შემოთავაზებული იყო ნაპერწკლის გაშვება დიდი რაოდენობის ლითონის წვრილი ნაქლიბისა და ზეთის ნარევში. ამ დროს შესაძლებელი იყო 82 მკმ და მეტი სიგრძის განსხვავებული ელექტრო-მაგნიტური ტალღების მიღება. ამგვარად, ინფრაწითელი და რადიოტალღების დიაპაზონებს შორის ხარვეზი შეივსო.

დღეს არავის უკვირს, რომ მილიმეტრული ტალღების გენერირებაც კი შესაძლებელია არა მარტო რადიოტექნიკური საშუალებებით, არამედ მოლეკულური გადასვლებითაც. შეიქმნა ახალი მიმართულება – რადიოსპექტროსკოპია, რომელიც შეისწავლის ნივთიერებების მიერ რადიოტალღების შთანთქმასა და გამოსხივებას.

მედიცინაში მიღებულია ელექტრომაგნიტური რხევების შემდეგი პირობითი დაყოფა სიხშირეთა დიაპაზონის მიხედვით (ცხრილი 3).

დაბალი (დს)	20 ჰც-დე
ბგერითი (ბს)	20 ჰც – 20 კგც
ულტრაბგერითიანზებგერითი (უბს)	20 კჰც – 200 კჰც
მაღალი (მს)	200 კჰც – 30 მჰც
ულტრამაღალი (უმს)	30 მჰც – 300 მჰც
ზემაღალი	300 მჰც – 300 უჰც
უკიდურესადმაღალი	300 გჰც-ისზევით

ხშირად დაბალი და ბგერითი სიხშირეების ფიზიოთერაპევტულ ელექტრონულ აპარატურას დაბალსიხშირულს უწოდებენ. ყველა სხვა

[9] ალექსანდრა ანდრეის ასულ გლაგოლევა-არკადიევა იყო მოსკოვის მეორე სამედიცინო ინსტიტუტის (ამჟამად რუსეთის სამედიცინო ინსტიტუტის) ფიზიკის კათედრის პირველი გამგე.

სიხშირის ელექტრონულ აპარატურას კი ერთი სახელწოდების ქვეშ აერთიანებენ – მაღალსიხშირული.

თავი 8. დენისა და ელექტრომაგნიტური ველების ზემოქმედებით ქსოვილებში მიმდინარე ფიზიკური პროცესები

ყველა ნივთიერება შედგემა მოლეკულებისგან. ყოველი მოლეკულა წარმოადგენს მუხტების სისტემას. ამიტომ სხეულის მდგომარეობა არსებითად არის დამოკიდებული მათში გამავალ დენებზე და მათზე მოქმედ ელექტრომაგნიტურ გამოსხივებაზე. ბიოლოგიური სხეულების ელექტრული თვისებები უფრო რთულია, ვიდრე არაცოცხალი ობიექტებისა, რადგან ორგანიზმი ყველაფერთან ერთად წარმოადგენს სივრცეში ცვლადი კონცენტრაციის მქონე იონების ერთობლიობას. ელექტრული დენებისა და ელექტრომაგნიტური ველების ორგანიზმზე ზემოქმედების პირველადი მექანიზმი ფიზიკურია, და სწორედ მას განვიხილავთ ამ თავში სამედიცინო სამკურნალო მეთოდებთან მიმართებაში.

8.1. მუდმივი დენის პირველადი ზემოქმედება ორგანიზმის ქსოვილებზე. გალვანიზაცია. სამკურნალო საშუალებების ელექტროფორეზი

ადამიანის ორგანიზმი უმთავრესად შედგება დიდი რაოდენობით იონების შემცველი ბიოლოგიური სითხეებისგან, რომლებიც მონაწილეობენ სხვადასხვა მიმოცვლით პროცესებში.

ელექტრული ველის გავლენით იონები მოძრაობენ სხვადასხვა სიჩქარეებით. გროვდებიან უჯრედის მემბრანის სიახლოვეს და ქმნიან შემხვედრ ელექტრულ ველს, რომელსაც პოლარიზაციული ველი ეწოდება. ამგვარად, მუდმივი დენის პირველადი მოქმედება დაკავშირებულია იონების მოძრაობასთან, მათ დაყოფასთან და ქსოვილების სხვადასხვა ელემენტებში მათი კონცენტრაციის ცვლილებასთან.

ორგანიზმზე მუდმივი დენის ზემოქმედება დამოკიდებულია დენის ძალაზე, ამიტომ საკმაოდ არსებითია ქსოვილების და, პირველი რიგში – კანის, ელექტრული წინააღმდეგობა. ნესტი, ოფლი მნიშვნელოვნად ამცირებს წინააღმდეგობას, რამაც მცირე დაძაბულობების დროსაც კი შეიძლება გამოიწვიოს ორგანიზმში მნიშვნელოვანი (საგრძნობი) დენის გატარება.

60-80 ვოლტი ძაბვის მუდმივი უწყვეტი დენიმედიცინაში გამოიყენება, როგორც ფიზიოთერაპიის სამკურნალო მეთოდი(გალვანიზაცია).

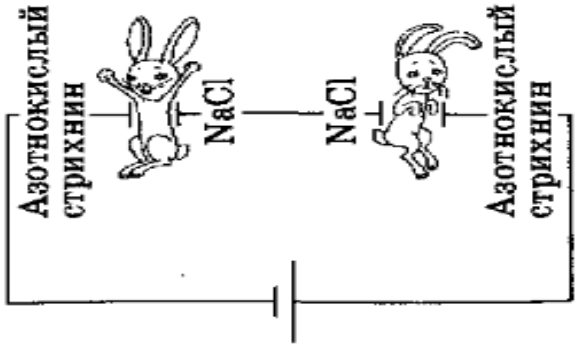
დენის წყაროდ, ჩვეულებრივ, იყენებენ დენის ორპერიოდიან გამმართველს – გალვანიზირების აპარატს. ამ მიზნით, ასევე, გამოსადეგია ტყვიის ან სტანიოლის 0.3-0.5 მმ სისქის ფირფიტებისგან დამზადებული ელექტროდები. ქსოვილებში არსებული სუფრის მარილის წყალხსნარის ელექტროლიზის პროდუქტები იწვევენ დამწვრობას, ამიტომ ელექტროდებსა და კანს შორის ათავსებენ ჰიდროფილურ შუასადებს, რომელიც გაჟღენთილია, მაგალითად, თბილი წყლით.

მუდმივი დენის ძალის დოზირება ხდება მილიამპერმეტრის ჩვენების მიხედვით, ამ დროს აუცილებლად ითვალისწინებენ დენის მაქსიმალურად დასაშვებ სიმკვრივეს – 0.1 მა/სმ ^{2}.

მუდმივი დენი გამოიყენება სამკურნალო პრაქტიკაში კანიდან ან ლორწოვანიდან სამკურნალწამლო საშუალებების ორგანიზმში შესაყვანად. ამ მეთოდს სამკურნალწამლო საშუალებების ელექტროფორეზი უწოდეს.

ამ მიზნით ისევე იქცევიან, როგორც გალვანიზაციისას, მაგრამ აქტიური ელექტროდის შუასადებს შესაბამისი სამკურნალწამლო საშუალების ხსნარით ასველებენ. წამალი იმ პოლუსიდან შეყავთ, რა ნიშნის მუხტიც მას აქვს: ანიონები – კათოდიდან, ხოლო კათიონები – ანოდიდან.

მუდმივი დენის დახმარებით სამკურნალწამლო საშუალებების შეყვანა თვალსაჩინოდ არისნაჩვენები შემდეგ ცდაში. ორ ბოცვერს გაუპარსეს ორივე ფერდი და გაპარსულ ადგილებზე მიამაგრეს ფლანელის შუასადებები.



ნახ.7.1.

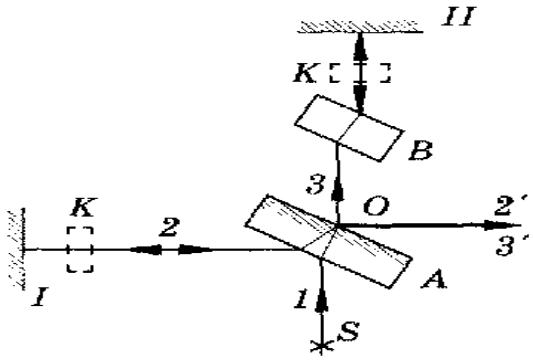
თითო შუასადები სუფრის მარილის ხსნარით გაჟღინთეს, მეორეს – სტრიქნინის ნიტრატით (ნახ.7.1.) ფლანელს დაადეს ელექტროდები და გაატარეს 50 მა დენი. რამდენიმე ხნის შემდეგ ბოცვერი, რომელთანაც სტრიქნინიანი შუასადებიანოდს ეხებოდა,დაიღუპა ამ ნივთიერებით მოწამვლის ტიპიური სურათით. მეორე ბოცვერი კი, რომელთანაც სტრიქნინიანი შუასადები კათოდს ეხებოდა, ცოცხალი დარჩა, მაგრამ თუ შევცვლით დენის მიმართულებას, ისიც დაიღუპება.

თავი 9.
ინტერფერომეტრები და მათი გამოყენება

9.1. ცნება ინტერფერენციული მიკროსკოპის შესახებ

სინათლის ინტერფერენცია გამოიყენება სპეციალურ ხელსაწყოებში – ინტერფერომეტრებში. ამ ხელსაწყოებით დიდი სიზუსტით აწარმოებენ ტალღების სიგრძეების, მცირე მანძილების, ნივთიერებათა გარდატეხის მაჩვენებლების გაზომვას და ოპტიკური ზედაპირების ხარისხის განსაზღვრას.

(8.1.) ნახატზე ნაჩვენებია მაიკელსონის ინტერფერომეტრის პრინციპიალური სქემა, რომელიც ორსხივიანი ინტერფერომეტრების ჯგუფში შედის, რადგან მასში სინათლის ტალღა ორად იყოფა[10] და ორივე ნაწილი, გაივლის რა სხვადასხვა მანძილს, ინტერფერირებს.



ნახ.8.1.

მონოქრომული სინათლის (1) სხივი *S* წყაროდან 450 კუთხით ეცემა ბრტყელპარალელურ *A* ფირფიტაზე, რომლის უკანა კედელი ნახევრად-გამჭვირ-ვალეა, რადგან დაფარულია ვერცხლის ძალიან თხელი ფენით. *O*

[10]ურო ზუსტად მრავალჯერად არეკვლებით შესაძლოა ორზე მეტი სხივის წარმოქმნა, მაგრამ მათი ინტენსივობა უმნიშვნელოა.

წერტილში ეს სხივი ორ (2) და (3) სხივებად იხლიჩება, რომელთა ინტენსივობა დაახლოებით ერთნაირია.

(2) სხივი მიდის *I* სარკემდე, აირეკლება, გარდატყდება *A* ფირფიტაში და ნაწილობრივ გამოდის ფირფიტიდან – (2') სხივი.(3) სხივი *O* წერტილიდან მიდის *II* სარკემდე, აირეკლება, ბრუნდება *A* ფირფიტასთან, რომლიდანაც ნაწილობრივ აირეკლება – (3') სხივი. (2') და (3') სხივები, რომლებსაც დამკვირვებლის თვალი აღიქვამს, კოჰერენტულია და შესაძლოა მათი ინტერფერენციის დარეგისტრირება.

ჩვეულებრივ *I* და *II* სარკეებს ისე აყენებენ, რომ (2) და (3) სხივები დაცილებიდან შეხვედრამდე ერთი და იგივე სიგრძის მანძილს გადიან. ოპტიკური მანძილებიც რომ ერთნაირი გახადონ, (2) სხივის მიერ *A* ფირფიტაში გავლილი ორი გზის საკომპენსაციოდ (3) სხივის გზაზე აყენებენ *A* ფირფიტის ანალოგიურ გამჭვირვალე *B* ფირფიტას. ამ შემთხვევაში ადგილი აქვს მაქსიმალურ ინტერფერენციას.

თუ ერთ-ერთ სარკეს $\lambda/4$ მანძილზე გადავაადგილებთ, მაშინ სხივების სვლათაშორისი სხვაობა $\lambda/2$ გახდება, რაც მინიმუმს შეესაბამება და მოხდება ინტერფერენციული სურათის წანაცვლება ნახევარი ზოლით.

თუ სარკეს საწყისი მდგომარეობიდან $\lambda/2$ მანძილით გადავაადგილებთ, ინტერფერირებადი სხივების ოპტიკური სვლათაშორისი სხვაობა შეიცვლება λ-თი, რაც შეესაბამება მაქსიმუმს და მოხდება ინტერფერენციული სურათის წანაცვლება მთელი ზოლით. ასეთი კავშირი სარკის გადანაცვლებასა და ინტერფერენციული სურათის ცვლილებას შორის საშუალებას იძლევა გავზომოთ ტალღის სიგრძე სარკის წანაცვლებით, და პირიქით – სარკის წანაცვლება ტალღის სიგრძის მიხედვით.

9.2. ჰოლოგრაფიის ცნება. მისი გამოყენება მედიცინაში

ჰოლოგრაფია – ტალღური ველის ჩაწერის და აღდგენის მეთოდი, რომელიც დამყარებულია ტალღის ინტერფერენციაზე და დიფრაქციაზე.

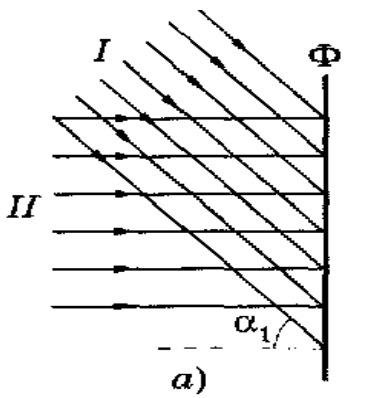
ჰოლოგრაფიის იდეა პირველად იქნა წამოყენებული დ. გაბერის მიერ 1948 წელს. მისი პრაქტიკული გამოყენება შესაძლებელი გახდა ლაზერის აღმოჩენის შემდეგ.

ჰოლოგრაფია იძლევა საშუალებას დავარეგისტრიროთ და აღვადგინოთ სრული ინფორმაცია ობიექტზე ტალღის ამპლიტუდის და ფაზების გათვალისწინებით, რომელსაც აირეკლავს ობიექტი. ფაზის რეგისტრაცია შესაძლებელია ტალღის ინტერფერენციის შედეგად.

ბრტყელი ტალღის ჰოლოგრამა. ამ შემთხვევაში ჰოლოგრამაზე ფიქსირდება ბრტყელი სასიგნალო ტალღა I , რომელიც ეცემა α კუთხით ფოტოპლასტინაზე (ნახ.9.1).

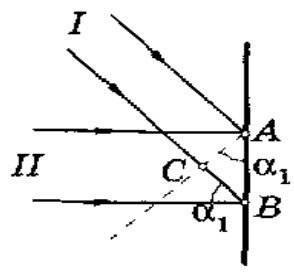
საყრდენი ტალღა II ეცემა ნორმალურად, ამიტომ ფოტოპლასტინის ყველა წერტილში მისი ფაზები ერთნაირია. სიგნალური ტალღის ფაზა, მისი დახრილობის გამო განსხვავებულია. აქედან გამომდინარეობს რომ ფაზების სხვაობა საყრდენ და სასიგნალო თალღების დამოკიდებულია ამ სხივების შეხვედრის ადგილზე ფოტოპლასტინაზე და მიღებული ჰოლოგრამა შედგებოდეს იქნება მუქი და ღია შრეებისაგან.

დავუშვათ AB (ნახ.9.1) შეესაბამება მანძილს მუქი და ღია შრეების ცენტრებს შორის მანძილს. ეს ნიშნავს რომ *A* და *B* წერტილების ფაზები სასიგნალო ტალღის განსხვავდება 2π. ავაგოთ ნორმალი მისი სხივების მიმართ. ჩანს, რომ *A* და *C* წერტილების ფაზები ერთნაირია.



ΔABC გვაქვს

$$AB=BC/\sin\alpha - \lambda/\sin\alpha \qquad (9.1)$$



ნახ.91

ჰოლოგრამა დიფრაქციული მესრის მსგავსია, რადგან შუქმგრძნობიარე ზედაპირზე დარეგისტრირებულია გაძლიერებული (მაქსიმუმი) და შესუსტე-

ბილი (მინიმუმი) რხევები, რომელთა შორის *AB* მანძილი (8.1.) ფორმულით გამოითვლება.

რადგან სასიგნალო ტალღა წარმოიქმნება საყრდენი ნაწილის საგნიდან არეკვლით, გასაგები ხდება, რომ მოცემულ შემთხვევაში საგანი არის ბრტყელი სარკე ან პრიზმა, ანუ ისეთი მოწყობილობები, რომლებიც გარდაქმნიან ბრტყელ საყრდენ ტალღას სასიგნალო ტალღად (9.1. ნახატზე ტექნიკური დეტალები არ არის ნაჩვენები).

მივმართოთ ჰოლოგრამაზე *II* საყრდენი ტალღა (ნახ.9.2.) და მოვახდინოთ დიფრაქცია. პირველი მთავარი მაქსიმუმები *(k=1)* შეესაბამება მიმართულებებს

$$\sin\alpha = \pm\lambda / c. \qquad (8.2.)$$

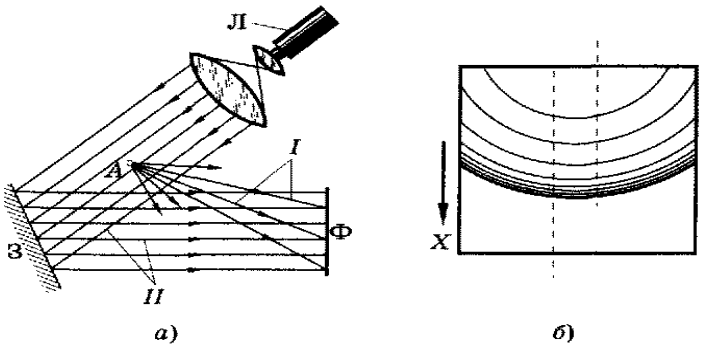
ამ გამოსახულებაში *c*-ს ნაცვლად ჩავსვათ *AB* (19.43.)-დან, მივიღებთ

$$\sin\alpha = \pm\lambda \frac{\min\alpha_1}{\lambda} = \pm\sin\alpha_1, \qquad (8.3.)$$

საიდანაც

$$\alpha = \pm\alpha_1. \qquad (8.4.)$$

(8.4.) ტოლობიდან გამომდინარეობს, რომ I^1 ტალღის (ნახ.9.2.) მიმართულება, დიფრაგირებული α_1 კუთხით, შეესაბამება სასიგნალოს: ასე აღადგენენ საგნის მიერ არეკლილ (განფანტულ) ტალღას. I^{11} ტალღა და სხვა მთავარი მაქსიმუმების ტალღები (ნაჩვენებია ნახატზე) ასევე აღადგენენ (რეპროდუცირებენ) ჰოლოგრამაში დაფიქსირებულ ინფორმაციას.



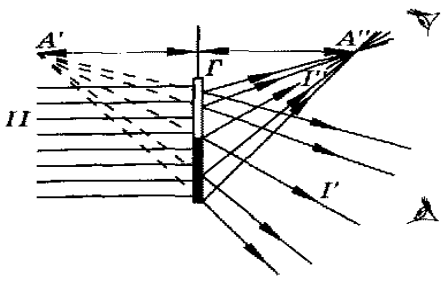
а) *б)*

ნახ.9.3.

წერტილის ჰოლოგრამა. *II* ტალღის საყრდენი ნაწილი ეცემა *A* წერტილოვან ობიექტს (ნახ.9.3.ა.) და განიბნევა მისგან სფერული სასიგნალო *I* ტალღის სახით, მეორე ნაწილი კი ბრტყელი „ს“ სარკიდან არეკვლით ეცემა „ფ“ ფოტოფირზე, სადაც ხდება ამ ტალღების ინტერფერირება. გამოსხივების წყაროა „ლ“ ლაზერი. (9.3.ბ.) ნახატზე სქემატურად არის ნაჩვენები მიღებული ჰოლოგრამა.

მართალია მოყვანილ მაგალითში სასიგნალო ტალღა სფერულია, მაგრამ თუ ერთგვარი მიახლოებით გამოვიყენებთ (8.1.) ფორმულას, შევამჩნევთ, რომ α_1 კუთხის ზრდის შესაბამისად მცირდება *AB* მანძილი მეზობელ ზოლებს შორის. ჰოლოგრამზე ქვედა რკალები (ნახ.9.3.ბ.) უფრო მჭიდროდაა განლაგებული.

თუ ჰოლოგრამიდან ამოვჭრით ვიზრო ზოლს, რომელიც (9.3.ბ.) ნახატზე დაშტრიხულია, ის იქნება ვიწრო დიფრაქციული მესრის მსგავსი, რომლის მუდმივაც *X* ღერძის მიმართულებით მცირდება. ასეთ მესერზე პირველი ძირითადი მაქსიმუმის შესაბამისი მეორადი ტალღების გადახრა იზრდება ნასვრეტის *X* კოორდინატის ზრდის შესაბამისად:c მცირდება, ხოლო $|\sin\alpha|$ – იზრდება.



ნახ.8.4.

ამრიგად, ბრტყელი საყრდენი ტალღით გამოსახულების აღდგენისას დიფრაგირებული ტალღები უკვე აღარ იქნება ბრტყელი. (8.4.) ნახატზე ნაჩვენებია *I′* ტალღა, რომელიც წარმოქმნის *A* წერტილის მოჩვენებით *A′* გამოსახულებას და *I″* ტალღა, რომელიც ქმნის *A″* რეალურ გამოსახულებას.

რამდენადაც საგნის მიერ გაბნეული ტალღები საყრდენ ტალღასთან ერთად ხვდებიან ჰოლოგრამის ყველა წერტილში, მისი ყველა უბანი შეიცავს ინფორმაციას საგნის შესახებ და გამოსახულების აღსადგენად არ არის აუცილებელი სრული ჰოლოგრამის გამოყენება. მაგრამ ისიც უნდა აღინიშნოს, რომ აღდგენილი გამოსახულების ხარისხი მით უარესია, ჰოლოგრამის რაც უფრო მცირე ნაწილიაგამოყენებილი ამ მიზნით. (8.4.)

ნახატზე ჩანს, რომ მოჩვენებითი და რეალური გამოსახულებები წარმოიქმნება იმ შემთხვევაშიც, თუ აღდგენას ახორციელებენ, მაგალითად, ჰოლოგრამის ქვედა ნახევრით, მაგრამ გამოსახულება ამ დროს ნაკლები რაოდენობის სხივებით ყალიბდება.

ნებისმიერი საგანი წარმოადგენს წერტილების ერთობლიობას, ამიტომ შესაძლოა ერთი წერტილისთვის წარმოებული მსჯელობა განვაზოგადოთ ნებისმიერი საგნის ჰოლოგრაფირებაზე. ჰოლოგრაფიული გამოსახულებები მოცულობითია, ხოლო მათი მხედველობითი აღქმა არაფრით გამოირჩევა შესაბამისი საგნის აღქმისგან. გამოსახულების სხვადასხვა წერტილების ნათელი ხედვა ხორციელდება თვალის აკომოდაციის საშუალებით; ხედვის წერტილის ცვლისას იცვლება პერსპექტივაც და გამოსახულების ერთმა დეტალებმა შეიძლება გადაფარონ სხვა დეტალები.

გამოსახულების აღდგენისას შესაძლოა საყრდენი ტალღის სიგრძის შეცვლა. ასე მაგალითად, ჰოლოგრამა, რომელიც უხილავი ელექტრომაგნიტური ტალღებითაა (ულტრაიისფერი, ინფრაწითელი და რენტგენის) წარმოქმნილი, შეიძლება აღდგეს ხილული სინათლით. რამდენადაც სხეულების მიერ ელექტრომაგნიტური ტალღების არეკვლისა და შთანთქმის პირობები დამოკიდებულია, კერძოდ, ტალღის სიგრძეზე, ჰოლოგრაფიის ეს თავისებურება საშუალებას გვაძლევს, გამოვიყენოთ ის, როგორც შინაგანი ხედვის, ანუ ინტროსკოპიის მეთოდი.

ულტრაბგერით ჰოლოგრაფიასთან დაკავშირებით განსაკუთრებით საინტერესო და მნიშვნელოვანი პერსპექტივები იშლება. ულტრაბგერითი მექანიკური ტალღებით ჰოლოგრამის წარმოქმნის შემდგომ შესაძლოა მისი აღდგენა ხილული სინათლით. პერსპექტივაში ულტრაბგერითი ჰოლოგრაფია შეიძლება გამოყენებულ იქნას მედიცინაში დიაგნოსტიკური მიზნით ადამიანის შინაგან ორგანოთა დასათვალიერებლად. ამ მეთოდის მაღალი ინფორმატიულობისა და ულტრაბგერის მიერ რენტგენის გამოსხივებასთან შედარებით არსებითად ნაკლები ზიანის გათვალისწინებით მოსალოდნელია, რომ მომავალში ულტრაბგერითი ჰოლოგრა-ფიული ინტროსკოპია შეცვლის ტრადიციულ რენტგენოდია-გნოსტიკას.

ჰოლოგრაფიის კიდევ ერთი სამედიცინო-ბიოლოგიური გამოყენება დაკავშირებულია ჰოლოგრაფიულ მიკროსკოპთან. ჰოლოგრაფიული

მიკროსკოპის აწყობის ერთ-ერთი საშუალება დაფუძნებულია იმაზე, რომ საგნის გამოსახულება გამოდის გადიდებული, თუ ბრტყელი საყრდენი ტალღით ჩაწერილ ჰოლოგრამას გავანათებთ განშლადი სფერული ტალღით.

ჰოლოგრაფიის განვითარებაში დიდი წვლილი შეიტანა საბჭთა ფიზიკოსმა იუ.ნ.დენისიუკმა, რომელმაც ფერადი ჰოლოგრაფიის მეთოდი შეიმუშავა.

დღეს რთულია, სრულად შეფასდეს ჰოლოგრაფიის გამოყენების ყველა სფერო: კინო, ტელევიზია, დამმახსოვრებელი მოწყობილობები და ა.შ. უდავოა მხოლოდ ის, რომ ჰოლოგრაფია წარმოადგენს XX საუკუნის ერთ-ერთ უდიდეს გამოგონებას.

თავი 10.
სინათლის პოლარიზაცია

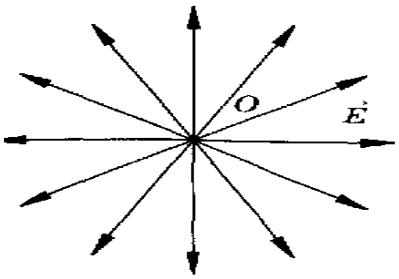
ამ თავში განხილულია სინათლის ტალღებში ელექტრული და მაგნიტური ვექტორების მოწესრიგებული ორიენტაციის მიღების მეთოდები და ამგვარი ტალღების ზოგიერთი თვისება.

10.1. ბუნებრივი და პოლარიზებილი სინათლე. მალიუსის კანონი

ელექტრომაგნიტურ ტალღას, რომელშიც $\vec{E}$ და, შესაბამისად, $\vec{B}$ ვექტორები ძევს განსაზღვრულ სიბრტყეებში, სიბრტყეზე პოლარიზებული ეწოდება. [სიბრტყეზე პოლარიზებული ეწოდება განივ ტალღას, რომლის რხევები ერთ სიბრტყეში მიმდინარეობს, ხოლო განივია ტალღა, რომელშიც რხევის მიმართულება ტალღის გავრცელების (ენერგიის გადატანის) მიმართულების მართობულია].

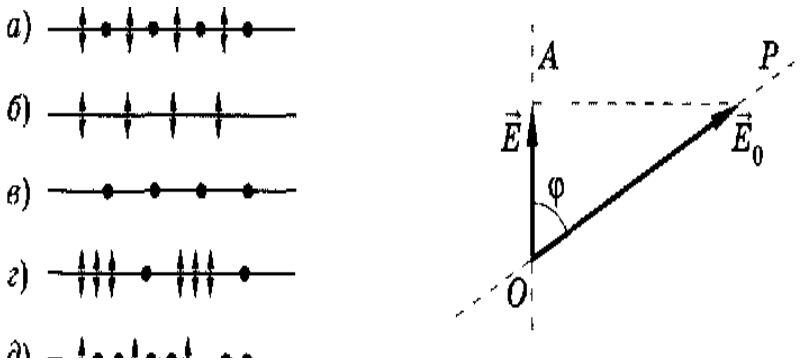
სიბრტყე, რომელიც გადის $\vec{E}$ ელექტრულ ვექტორსა და ელექტრომაგნიტური ტალღის გავრცელებისმიმართულებაზე,პოლარიზაციის სიბრტყესწარმოადგენს.

სიბრტყეზე პოლარიზებულ ტალღებს გამოასხივებს ცალკეული ატომები. ბუნებრივ სინათლეში, რომელიც მოდის მზისგან, ნათურის ვარვარების ძაფიდან, ანთებული გაზქურიდან, ალიდან და ა.შ., ერთმანეთს ედება დიდი რაოდენობით ატომების გამოსხივება, ამიტომ ცალკეული $\vec{E}$ ვექტორების მიმართულება ვერ ჯდება ერთ სიბრტყეში. ასეთ სინათლე შეიძლება განვიხილოთ, როგორც ქაოსურად ორიენტირებული რხევის სიბრტყეების მქონე სიბრტყეზე პოლარიზებული ტალღების ურთიერთგადაფარვა. ელექტრული ვექტორები ორიენტირებულია სხივის პერპენდიკულარული ყველა შესაძლო მიმართულებით. (10.1.) ნახატზე ნაჩვენებია O სხივის კვეთა დროის რომელიღაც მომენტში და $\vec{E}$ ვექტორების ქაოსური ორიენტაცია სხივის პერპენდიკულარულ სივრცეში.



ნახ.9.1.

თუ ამოვირჩევთ ხილული სინათლის სხივში გამავალ ნებისმიერ ორ ურთიერთპერპენდიკულარულ სიბრტყეს და მოვახდენთ $\vec{E}$ ვექტორების პროეცირებას ამ სიბრტყეებზე, დავინახავთ, რომ ეს პროექციები დაახლოებით ერთნაირი იქნება. ამიტომ ბუნებრივი სინათლის სხივის გამოსახვა მოსახერხებელია წრფით, რომელზედაც ისრებისა და წერტილების სახით ნაჩვენებია ამ თუ იმ პროექციების ერთნაირი რაოდენობა (ნახ.10.2.ა.). ამრიგად, სიბრტყეზე პოლარიზებული სინათლის სხივი გრაფიკულად ხაზებიანი (ნახ.19.2.ბ.) ან წერტილებიანი (ნახ.10.2.გ.) წრფით აღინიშნება.



ნახ.10.2.

(10.2.დ.) და (10.2.ე.) ნახატებზე გამოსახულია სინათლის სხივი, რომელიც შედგება პოლარიზებული და არაპოლარიზებული კომპონენტებისგან. მას ნაწილობრივ პოლარიზებულს უწოდებენ. ამასთანავე, ისრებისა და წერტილების რაოდენობის შეფარდება პირობითად აჩვენებს

პოლარიზაციის ხარისხს, ანუ პოლარიზებული კომპონენტის ინტენსივობის წილს სინათლის სრულ ინტენსივობასთან შეფარდებით.

ხელსაწყოს, რომელიც საშუალებას გვაძლევს, ბუნებრივი სინათლისგან პოლარიზებული სინათლე მივიღოთ, პოლარიზატორი ეწოდება. ის ატარებს $\vec{E}$ ვექტორის კომპონენტს მხოლოდ ერთ სიბრტყეზე – პოლარიზატორის ძირითად სიბრტყეზე, რომელიც შეიცავს $\vec{E}$ სინათლის ვექტორს და სინათლის გავრცელების მიმართულებას. ამ დროს პოლარიზატორიდან გამოდის პოლარიზებული სინათლე[11], რომლის ინტენსივობაც დაცემული ბუნებრივი (არაპოლარიზებული) სინათლის ინტენსივობის ნახევრის ტოლია. ხილული სინათლის სხივის მიმართ პოლარიზატორის ბრუნვისას ბრუნავს მისგან გამოსული,სიბრტყეზე პოლარიზებული სინათლის რხევის სიბრტყეც, მაგრამ მისი ინტენსივობა არ იცვლება. შესაძლოა პოლარიზატორის გამოყენება პოლარიზებული სინათლის ანალიზისთვის. მაშინ მას ანალიზატორს უწოდებენ.

თუ ანალიზატორზე ეცემა $\vec{E}_0$ ელექტრული ვექტორის ამპლიტუდის მქონე სიბრტყეზე პოლარიზებული სინათლე, მასში გაივლის მხოლოდ ის კომპონენტი, რომელიც ტოლია

$$E = E_0 \cos\varphi, \qquad (9.1.)$$

სადაც φ არის P პოლარიზატორისა და A ანალიზატორის მთავარ სიბრტყეებს შორის კუთხე (ნახ.9.3.).

რადგან სინათლის ინტენსივობა რხევათა ამპლიტუდის კვადრატის პროპორციულია (იხ. 14.60.), მაშინ (9.1.) გამოსახულებიდან ვიღებთ

$$I = I_0 \cos^2 \varphi. \qquad (9.2.)$$

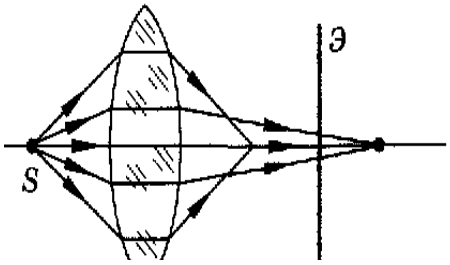
[11] პოლარიზატორის მიერ სინათლის შთანთქმის შესაძლებლობას აქ და შემდგომ არ გავითვალისწინებთ.

თავი 11. გეომეტრიული ოპტიკა. ასტიგმატიზმი

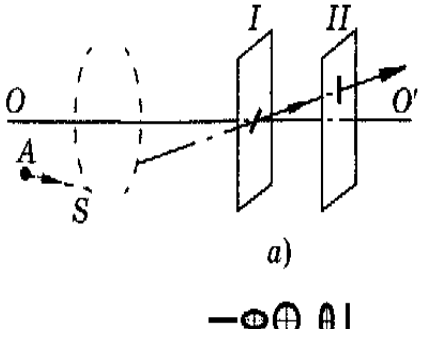
ასტიგმატიზმი ოპტიკური სისტემის ნაკლია, რომლის დროსაც სინალის სფერული ტალღა ოპტიკური სისტემის გავლისას განიცდის დეფორმირებას და აღარ არის სფერული.

განასხვავებენ ასტიგმატიზმის ორ სახეს. ერთ-ერთი მათგანი განპირობებულია ოპტიკურ სისტემაზე ისეთი სხივების დაცემით, რომლებიც მნიშვნელოვან კუთხეს ქმნიან ოპტიკურ ღერძთან (ირიბი კონების ასტიგმატიზმი).

დავუშვათ, საგნის *A* წერტილი განლაგებულია მთავარი ოპტიკურიღერძის გარეთ (ნახ.11.2.ა.); ამ წერილიდან გამომავალი სხივების ერთობლიობიდან გამოვყოთ მცირე ელემენტარული კონა ისე, რომ მისი ცენტრალური *AS* სხივი განლაგებული იყოს მთავარ ოპტიკურ *OO′* ღერძთან ერთ სიბრტყეში. ნებისმიერ სიბრტყეს, რომელიც გადის მთავარ ოპტიკურ ღერძზე, მერიდიონალურს უწოდებენ; მოცემულ მაგალითში ავიღოთ სიბრტყე, რომელზეც ძევს ელემენტარული კონის ცენტრალური სხივი და მთავარი ოპტიკური ღერძი(10.2.ა.ნახატზე – ნახაზის სიბრტყე).



ნახ.11.1.

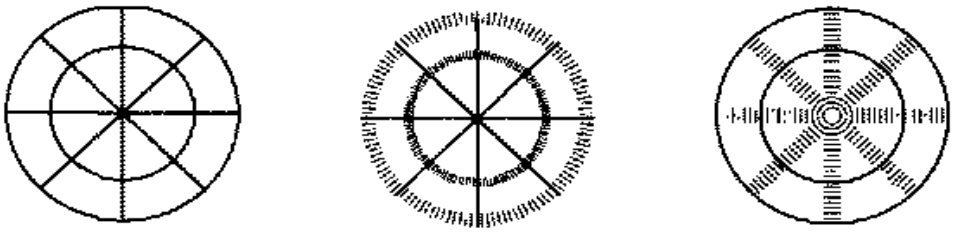


ნახ.11.2.

ელემენტარული სხივის დახრილად დაცემის დროს ლინზა ქმნის *A* წერტილის ორ გამოსახულებას წრფის მონაკვეთების სახით. ერთი

მათგანი ძევს მერიდიონალურ სიბრტყეში და გარკვევით ჩანს *II* ეკრანზე (იხ.ნახ.11.2.ა.), მეორე – პერპენდიკულარულ სიბრტყეში, რომელსაც საგიტალურს უწოდებენ, ის გარკვევით ჩანს *I* ეკრანზე. *I* და *II* სიბრტყეებს შორის მონაკვეთზე ჩანს განბნევის ლაქა, რომელსაც ელიფსის ან წრეწირის ფორმა აქვს (ნახ.11.2.ბ.). თუ საგანი წრფის მონაკვეთია, გამოსახულების ხარისხი დამოკიდებულია მის ორიენტაციაზე. მერიდიონალურ სიბრტყეებში განლაგებული მონაკვეთები იძლევიან მკაფიო გამოსახულებას *II*, ხოლო საგიტალურ სიბრტყეებში მყოფი გამოსახულებები – *I* სიბრტყეში.

ირიბი კონების ასტიგმატიზმის დემონსტრირებისთვის მოსახერხებელია (10.3.) ნახატზე წარმოდგენილი ბადე. თუ მას, როგორც საგანს, მოვათავსებთ ოპტიკური ღერძის პერპენდიკულარულად და ავიღებთ მონაკვეთების სისტემას, რომელიც ძევს მერიდიონალურ (რადიუსები) და საგიტალურ (წრეწირები) სიბრტყეებში, დავინახავთ ამ მონაკვეთების გამოსახულებებს, რომლებიც შესაბამის სიბრტყეებშია მიღებული [იხ.ნახ. (11.3.ბ.) და (11.3.გ.)].

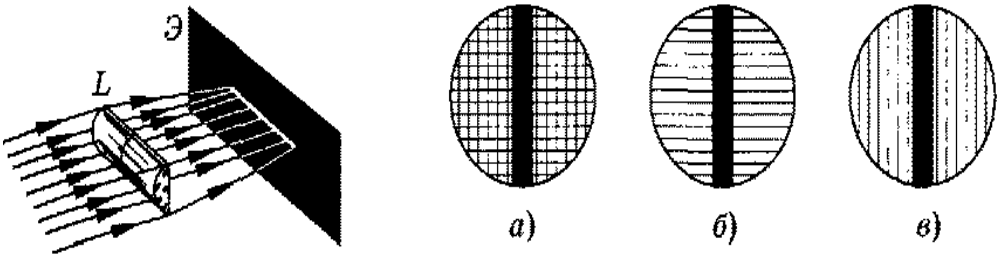


ნახ.11.3.

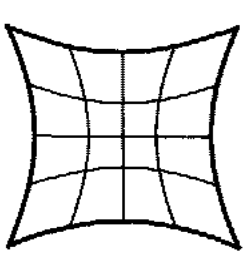
ასტიგმატიზმის შესასწორებლად ქმნიან რთულ ოპტიკურ სისტემებს, რომლებიც რამოდენიმე ლინზისგან შედგება. მათი წყალობით შესაძლებელი ხდება კარგი ხარისხის გამოსახულების მიღება სხივების დაცემის 50-700 კუთხეებისთვისაც კი.

ასტიგმატიზმის მეორე სახე განპირობებულია ოპტიკური სისტემის ასიმეტრიით. ასეთი აბერაციის მქონე ლინზებს ასტიგმატური ლინზები

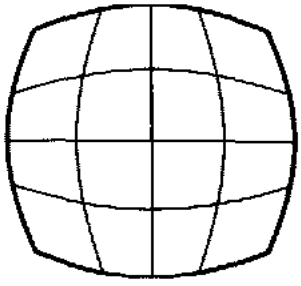
ეწოდება. ისინი, ისევე, როგორც ირიბი კონების ასტიგმატიზმის შემთხვევაში, ქმნის გამოსახულებას, რომელშიც სხვადასხვა მიმართულებით ორიენტირებულ კონტურებსა და ხაზებს განსხვავებული სიმკვეთრე აქვს.



ასეთი ტიპის ასტიგმატიზმი ყველაზე უფრო თვალსაჩინოდ შეგვიძლია ვაჩვენოთ ცილინდრული ლინზის მაგალითზე (ნახ. 11.4.). მთავარი ოპტიკური ღერძის პარალელური სხივების კონა L ლინზით მხოლოდ ცილინდრის მსახველის პერპენდიკულარულ სიბრტყეებში გარდატყდება, ამიტომ ლინზის ფოკალურ სიბრტყეში განთავსებულ „ე“ ეკრანზე ჩანს სწორი ხაზი, და არა წერტილი, როგორც სფერული ლინზების შემთხვევაში. თუ ცილინდრული ლინზის საშუალებით ეკრანზე გამოვსახავთ მავთულისთხელ ბადეს კვადრატული უჯრედებით (ნახ.11.5.ა.), ყველაზე მკაფიო გამოსახულებასმივიღებთ ცილინდრის მსახველის გასწვრივ მიმართული პარალელური ხაზების სისტემის სახით (11.5.ბ. და 11.5გ.ნახატებზე მოცემული გამოსახულებები შეესაბამება ცილინდრული ლინზის ორ ურთიერთპერპენ-დიკულარულ მდგომარეობას).



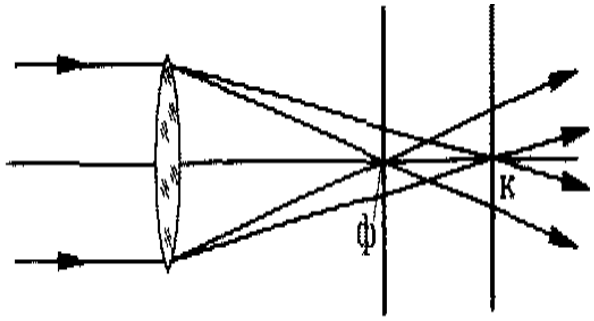
ნახ.11.4.



ნახ.11.5.

დისტორსია. აბერაციის ეს სახე წარმოიქმნება მაშინ, როდესაც საგნის მიერ სისტემაში გაშვებული სხივებიდიდ კუთხეებს ადგენენ ოპტიკურ ღერძთან.

ამ დროს წრფივი ზრდის დამოკიდებულება კონის კუთხეზე იწვევს საგნისა და გამოსახულების მსგავსების მოშლას. დისტორსიის ტიპიური გამოვლინებები ნაჩვენებია (11.6.) ნახატზე: ა – ბალიშისმაგვარი, ბ – კასრისმაგვარი; საგანი წარმოადგენს კვადრატული უჯრედების მქონე ბადეს.



ნახ.11.6.

ასეთი აბერაციის შესწორება შესაძლებელია საწინააღმდეგო დისტორსიული თვისებების მქონე რამდენიმე ლინზისგან შედგენილი სისტემის შერჩევით.

ქრომატული აბერაცია. ლინზის ფოკუსური მანძილი განისაზღვრება გარდატეხის მაჩვენებლით, რომელიც ტალღის სიგრძეზეა დამოკიდებული. ამიტომ, მთავარი ოპტიკური ღერძის პარალელურად გადაადგილებადი თეთრი სინათლის სხივი ფოკუსირდება მის სხვადასხვა წერტილებში, დაიშლება სპექტრად „ი“ – იისფერი და„წ“ – წითელი სხივები)და ეკრანზე გამოსახული წრე გაფერადებულად გამოჩნდება. ეს არის ქრომატული აბერაციის არსი, რაც ხშირად თან ახლავს ლინზებში გამოსახულების გარდატეხას. ამ სახის აბერაციის შესასწორებლად ქმნიან ლინზებისგან შედგენილ აქრომატულ ოპტიკურ სისტემებს, რომლებიც განსხვავებული დისპერსიული თვისებებისმქონე შუშებისგანმზადდება: აქრომატები და აპოქრომატები.

ოპტიკურ მოწყობილობებში იყენებენ ლინზათა სისტემას, რომელსაც ანასტიგმატებს უწოდებენ. მათში შესწორებულია არა მარტო ქრომატული, არამედ სფერული და ასტიგმატური აბერაციებიც.

არსებობს აბერაციის სხვა სახეებიც, რომლებსაც აქ არ განვიხილავთ.

ყველა სახის აბერაციის ერთდროული აღმოფხვრა შესაძლოა, ძალიან რთული ან გადაუჭრელი ამოცანაც კი იყოს. ამიტომ, ჩვეულებრივ, მხოლოდ იმ ხარვეზებს აღმოფხვრიან, რომლებიც არსებითად უშლის ხელს ოპტიკური სისტემის ძირითად დანიშნულებას. ასე მაგალითად, მიკროსკოპის ობიექტივისთვის მნიშვნელოვანია ფოკუსის ახლოს მდებარე და ფართო კონებით გამოსახული ობიექტების განხილვისას წარმოქმნილი სფერული აბერაციის ხარვეზების აღმოფხვრა.

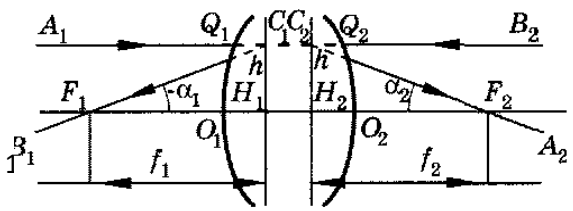
11.1 იდეალურად ცენტრირებული ოპტიკური სისტემის ცნება

რეალურად, ოპტიკური სისტემები სხვადასხვა დეტალებისგან შედგება და რამდენიმე ლინზას შეიცავს. ლინზების თავისუფალი განლაგების შემთხვევაში გამოსახულების აგება და გათვლა შესაძლოა, საკმაოდ რთული აღმოჩნდეს.

პრაქტიკაში ხშირად გამოიყენება სფერული ზედაპირების (ლინზების) სისტემები, რომელთა ცენტრები ერთ წრფეზე – მთავარ ოპტიკურ ღერძზე დევს. ასეთ ოპტიკურ სისტემებს ცენტრირებულებს უწოდებენ.

განვიხილოთ იდეალურად ცენტრირებული ოპტიკური სისტემების გაუსის თეორიის ზოგიერთი დასკვნა. ასეთ სისტემებში საგანთა სივრცის ნებისმიერ წერტილს ან ხაზს შეესაბამება გამოსახულებათასივრცის მხოლოდ ერთი წერტილი ან ხაზი. ორივე სივრცის წერტილებისა და ხაზების შესაბამის წყვილებს შეუღლებული წყვილები ეწოდება. იდეალურად ცენტრირებულ ოპტიკურ სისტემასთან მიახლოებულია ისეთი სისტემები, რომლებშიც გამოიყენება პარაქსიალური სხივები. ასეთი სისტემა წარმოადგენს ფიზიკურ აბსტრაქციას, რომელიც საშუალებას გვაძლევს, გავთვალოთ რეალური სისტემები მათი იდეალურისგან გადახრის გათვალისწინებით.

ვაჩვენოთ ცენტრირებული ოპტიკური სისტემის დამახასიათებელი წერტილები და სიბრტყეები (ნახ. 11.8.; Q_1 და Q_2 წარმოადგენს სასაზღვრო სფერულ



ნახ.11.8.

ზედაპირებს), რომელიც გაუსის თეორიაშია მიღებული. მათი დახმარებით შესაძლებელია საგნების გამოსახულებების აგება.

გავატაროთ საგანთა სივრცეში O_1O_2 მთავარი ოპტიკური ღერძის პარალელური A_1 სხივი. გამოსახულებათა სივრცეში მასთან შეუღლებულია F_2 წერტილზე გამავალი A_2 სხივი. გამოსახულების სივრცის F_2 წერტილი, რომელიც საგანთა სივრცის უსასრულოდ დაშორებულ წერტილთან არის შეუღლებული, წარმოადგენს სისტემის მეორე, ან უკანა ფოკუსს.

ანალოგიურად, გამოსახულებათა სივრცის B_2 სხივს შეესაბამება F_1 წერტილზე გამავალი B_1 სხივი საგანთა სივრცეში. საგანთა სივრცის F_1 წერტილი, რომელიც შეუღლებულია გამოსახულებათა სივრცის უსასრულო დაშორებულ წერტილთან, წარმოადგენს პირველ, ანუ წინა ფოკუსს.

მთავარი ოპტიკური ღერძის პერპენდიკულარულ ფოკუსებზე გამავალ სიბრტყეებს ფოკალურ სიბრტყეებს უწოდებენ.

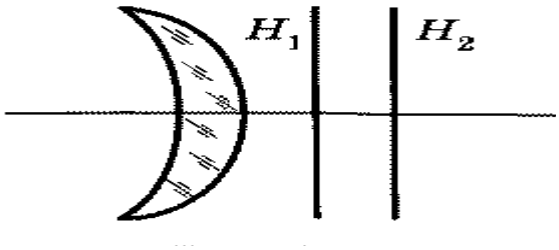
რამდენადაც A_1 და B_1 სხივები წყვილ-წყვილად შეუღლებულია A_2 და B_2 სხივებთან, შეუღლებული იქნება ამ სხივების ან მათი გაგრძელებების C_1 და C_2 გადაკვეთის წერტილებიც. O_1O_2 ღერძის პერპენდიკულარულად C_1 და C_2 წერტილებზე სიბრტყეების გავლებით მივიღებთ H_1 და H_2 წერტილებს. საბოლოოდ გვაქვს წყვილ-წყვილად შეუღლებული ეს სიბრტყეები, H_1 და H_2 წერტილები და C_1H_1 და C_2H_2 მონაკვეთები.

C_1H_1 და C_2H_2 მონაკვეთები არა მარტო შეუღლებული, არამედ ტოლიც $\left(\left|C_1H_1\right| = \left|C_1H_1\right| = h\right)$ არის და აქვთ ოპტიკური ღერძის მიმართ ერთნაირი მიმართულება (ერთნაირი ნიშნები); აქედან გამომდინარე, მათთვის წრფივი ზრდა ტოლია $\beta = +1$. ოპტიკურ სისტემას აქვს ოპტიკური ღერძის პერპენდიკულარული ორი შეუღლებული სიბრტყე, რომელთათვისაც შეუღლებული მონაკვეთების წრფივი ზრდა არის $\beta = +1$; ასეთ სიბრტყეებს და მთავარ ოპტიკურ ღერძზე მათ შესაბამის H_1 და H_2 წერტილებს მთავარს უწოდებენ.

ფოკუსებსა და შესაბამის მთავარ წერტილებს შორის მანძილს ფოკუსური მანძილი ეწოდება:

$$F_1H_1 = -f_1, F_2H_2 = -f_2. \qquad (10.4.)$$

მთავარი სიბრტყეები და H_1 და H_2 წერტილები შესაძლოა იყოს ცენტრირებული არა მხოლოდ ოპტიკური სისტემის შიგნით (იხ. ნახ. 10.8.), არამედ მის გარეთაც და სრულიად არასიმეტრიულად სასაზღვრო ზედაპირების მიმართ (ნახ. 11.9.).



ნახ.11.9.

მთავარ წერტილებს და ფოკუსებს კარდინალურ წერტილებს უწოდებენ, ხოლო შესაბამის სიბრტყეებს – კარდინალურ სიბრტყეებს. ეს წერტილები და სიბრტყეები გამოიყენება სისტემაში სხივების ჭეშმარიტი სვლისგანდამოუკიდებელი გამოსახულების ასაგებად. ზოგადი პრინციპები თხელ ლინზაში გამოსახულების აგების წესების ანალოგიურია.

(11.10.) ნახატზე მოყვანილია ცენტრირებულ ოპტიკურ სისტემაში გამოსახუ-ლების აგების მაგალითი. მანათობელი S_1 წერტილიდან გამომავალ (1) სხივს, რომელიც მთავარი ოპტიკური ღერძის პარალელურია, აგრძელებენ გამოსახულების სივრცის მთავარ სიბრტყესთან კვეთამდე, ხოლო შემდეგ ატარებენ F_2 ფოკუსზე. (2) სხივი გადის F_1 ფოკუსზე საგნების სივრცის მთავარ სიბრტყესთან გადაკვეთამდე, შემდეგ კი, ოპტიკური ღერძის პარალელურად. სწორედ ამ ორი სხივის გადაკვეთა (S_2 წერტილი)გვაძლევს S_1 წერტილის გამოსახულებას.

N_1 და N_2 წერტილებს (იხ. ნახ.11.10.) საკვანძო წერტილებს უწოდებენ. საკვანძო წერტილების თავისებურება ის არის, რომ მათში გამავალი შეუღლებული სხივები (3), ერთნაირად არის დახრილი ოპტიკური ღერძის მიმართ, ე.ი. პარალელურია.

თუ ოპტიკური სისტემის ორივე მხარეს გარდატეხის ერთნაირი მაჩვენებლების მქონე სივრცეებია, მაშინ საკვანძო წერტილები თანხვდება შესაბამის მთავარ წერტილებს.

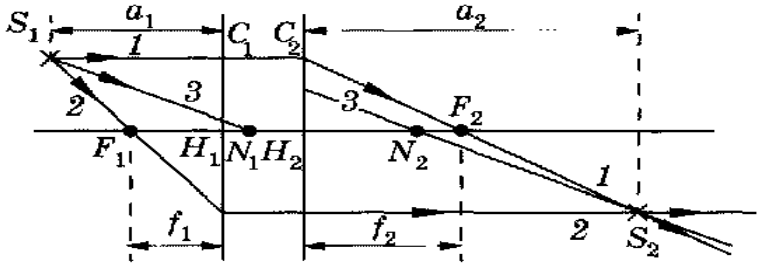
ამრიგად, ოპტიკურ სისტემას ახასიათებს ექვსი კარდინალური წერტილი და ექვსი კარდინალური სიბრტყე.

დასკვნების გარეშე მოვიყვანოთ ცენტრირებული ოპტიკური სისტემისთვის უმნიშნელოვანესი ფორმულები:

$$\frac{f_1}{a_1}+\frac{f_2}{a_2}=1 \qquad (10.5.)$$

$$\frac{f_1}{f_2}=\frac{n_1}{n_2}, \qquad (10.6.)$$

სადაც n_1 და n_2 არის ოპტიკური სისტემის ზღვრული სფერული ზედაპირებიდან მარჯვნივ და მარცხნივ არსებული გარემოს გარდატეხის მაჩვენებლები; a_1, a_2, f_1, f_2 აღნიშვნები განმარტებულია (11.10.) ნახატზე. a_1 და f_1 მონაკვეთების ათვლა ხდება H_1, ხოლო a_2 და f_2 მონაკვეთებისა – H_2 ძირითადი წერტილებიდან. მათ თვლიან დადებითად, თუ მათი მიმართულება თანხვდება სინათლის გავრცელების მიმართულებას და უარყოფითებად, თუ მიმი საწინააღმდეგო მიმართულებისაა. ჩვეულებრივ, გეომეტრიულ ოპტიკაში მიღებულია ნახატებზე სინათლის გავრცელების მიმართულება მარცხნიდან მარჯვნივ.



ნახ.11.10.

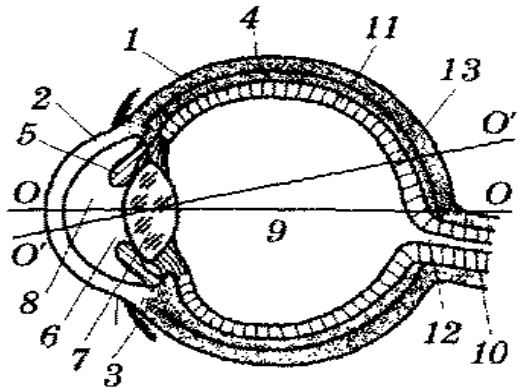
რამდენადაც თხელი ლინზა წარმოადგენს ცენტრირებული ოპტიკური სისტემის კერძო შემთხვევას, ბუნებრივია, რომ ყოველივე ზემოთ თქმული მისთვისაც სამართლიანია. ამ შემთხვევაში ოთხი კარდინალური წერტილი – ძირითადი და საკვანძო – თანხვდება ლინზის ცენტრს. ასეთ ლინზებში გამოსახულების აგების წესები, რომლებიც მკითხველისთვის საშუალო სკოლის პროგრამიდანაა ცნობილი, ასევე წარმოადგენს ზემოთ აღწერილი შედარებით ზოგადი მეთოდის კერძო შემთხვევას.

11.2. თვალის ოპტიკური სისტემა და მისი ზოგიერთი თავისებურება

ადამიანის თვალი წარმოადგენს ერთგვარ ოპტიკურ ხელსაწყოს, რომელსაც ოპტიკაში განსაკუთრებული ადგილი უჭირავს. ეს, პირველ რიგში, აიხსნება იმით, რომ მრავალი ოპტიკური ინსტრუმენტი არის გათვლილი ხედვით აღქმაზე. მეორე რიგში, ადამიანის (და ცხოველის) თვალს, როგორც ევოლუციის პროცესში სრულყოფილ ბიოლოგიურ სისტემას, ბიონიკის ფარგლებში შეუძლია ოპტიკური სისტემების კონსტრუირებისა და გაუმჯობესების იდეების შემოტანა.

ექიმებისთვის თვალი არა მარტო ფუნქციონალური დარღვევებისა და დაავადებების შესაძლებლობების მქონე ორგანოა, არამედ სხვა, ისეთი დაავადებების შესახებ ინფორმაციის წყარო, რომელიც არ არის თვალთან დაკავშირებული.

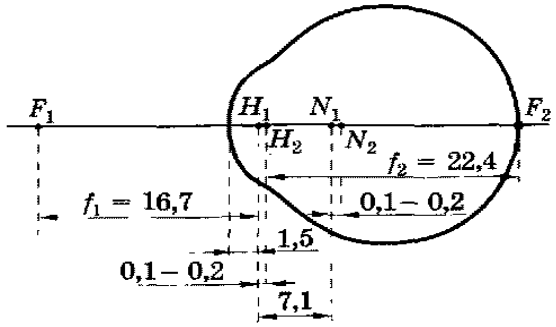
მოკლედ შევჩერდეთ ადამიანის თვალის აგებულებაზე.



ნახ.11.10

საკუთრივ თვალს (ნახატი 11.10.) უწოდებენ თვალის კაკალს, რომელსაც არასწორი ბურთის მაგვარი ფორმა აქვს: ზრდასრული ადამიანის თვალის წინა-უკანა ზომა დაახლოებით 24.3 მმ-ია, ვერტიკალური – 23.4 მმ და ჰორიზონტალური – 23.6 მმ. თვალის კედლები შედგება კონცეტრირებულად განლაგებული სამი გარსისგან: გარე, შუა და შიდა. გარე ცილოვანი გარსი – სკლერა (1.) – თვალის წინა ნაწილში გადადის

გამჭვირვალე ამობურცულ რქოვან გარსში – რქოვანაში (2.). რქოვანის სისქე ცენტრში დაახლოებით 0.6 მმ-ია, პერიფერიებში – 1 მმ-მდე. ოპტიკური თვისებებით რქოვანა თვალის ყველაზე უფრო ძლიერად გარდამტეხი ნაწილია. ის წარმოადგენს ერთგვარ ფანჯარას, რომლითაც თვალში სინათლის სხივები შედის. რქოვანას სიმრუდის რადიუსი დაახლოებით 7-8 მმ-ია. მისი ნივთიერების გარდატეხის მაჩვენებელი – 1.38. რქოვანას გარე საფარი გადადის კონიუნქტივში (3.), რომელიც გუგებზეა მიმაგრებული.



ნახ.11.11.

სკლერასთან განლაგებულია სისხლძარღვოვანი გარსი (4.), რომლის შიდა ზედაპირი მოფენილია მუქი პიგმენტური უჯრედების ფენით, რომლებიც ხელს უშლის თვალში სინათლის შიდა დიფუზურ განბნევას. თვალის წინა ნაწილში სისხლძარღვოვანი გარსი გადადის ფერად გარსში (5.), რომელშიც არის მრგვალი ფორმის ხვრელი – გუგა (6.). გუგას თვალის შიდა მხრიდან უშუალოდ ეხება ბროლი (7.) – გამჭვირვალე და დრეკადი სხეული, რომელიც ორმხრივ ამობურცული ლინზის მსგავსია. ბროლის დიამეტრია 8-10 მმ, წინა ზედაპირის სიმრუდის რადიუსი, საშუალოდ, – 10 მმ, უკანა ზედაპირის – 6 მმ. ბროლის ნივთიერების გარდატეხის მაჩვენებელი ოდნავ აღემატება მნიშვნელობას n=1.4.

რქოვანასა და ბროლს შორის მოთავსებულია თვალის წინა საკანი (8.). ის სავსეა თვალშიდა სითხით (ნამით), რომელიც ოპტიკური თვისებებით წყალს უახლოვდება. მთლიანად თვალის შიდა ნაწილი ბროლიდან უკანა კედლამდე ავსებულია გამჭვირვალე ლაბოვანი მასით, რომელსაც მინისებრი სხეული (9.) ეწოდება. მინისებრი სხეულის გარდატეხვის მაჩვენებელი ისეთივეა, როგორიც თვალშიდა სითხისა.

თვალის ის ელემენტები, რომლებიც ზემოთ განვიხილეთ, ძირითადად, მისი შუქისგამტარი აპარატის ნაწილია.

მხედველობის ნერვი (10.) შედის თვალის კაკალში უკანა კედლიდან, განშტოვდება და ასე გადადის თვალის ყველაზე შიდა ფენაში – ბადურაში, ანუ რეტინაში (11.). ბადურა თვალის სინათლის აღმქმელი (რეცეპტორული) აპარატია. ბადურა რამდენიმე შრისგან შედგება და არაერთგვაროვანია სისქისა და სინათლისადმი მგრძნობელობის მიხედვით. მასში არის სინათლისადმი მგრძნობიარე (ფოტოსენსიტიური) მხედველობითი უჯრედები, რომელთა გამონაზარდებს აქვთ სხვადასხვა ფორმა. წაგრძელებულიგამონაზარდების მქონე უჯრედებს ეძახიან ჩხირებს, ხოლო გამსხვილებილ, კონუსისმაგვარს – კოლბებს. ჩხირების სიგრძე 63 – 81 მკმ-ია, დიამეტრი – დაახლოებით 1.8. მკმ. კოლბებისთვის, შესაბამისად, 35 და 5-6 მკმ. ადამიანის თვალის ბადურაზე განლაგებულია დაახლოებით 130 მილიონი ჩხირი და 7 მილიონი კოლბა.

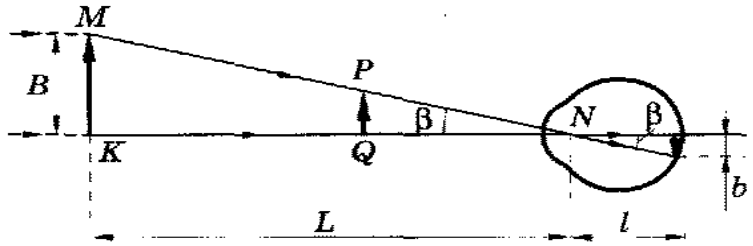
მხედველობით ნერვის შესვლის ადგილას არის სინათლის მიმართ უგრძნობი, ბრმა ხალი (12.). ბადურის შუაში, საფეთქელის არისკენ უფრო ახლოს დევს სინათლის მიმართ ყველაზე მგრძნობიარე ყვითელი ხალი, რომლის ცენტრალური ნაწილის დიამეტრი დაახლეობით 0.4. მმ-ია.

კოლბები და ჩხირები ბადურაში არათანაბრად არის განაწილებული. კოლბები, ძირითადად, ბადურის ცენტრალურ ნაწილში, ყვითელ ლაქაშია განლაგებული. ყვითელი ლაქის ცენტრში მხოლოდ კოლბებია, ბადურის კიდეებზე – მხოლოდ ჩხირები.

პირველი რიგში განვიხილოთ თვალის, როგორც სინათლისგამტარი აპარატის თავისებურებები.

თვალი შეიძლება წარმოვიდგინოთ, როგორც ცენტრირებული ოპტიკური სისტემა, რომელსაც წარმოქმნის რქოვანა, წინა საკნის სითხე და ბროლი (ოთხი გარდამტეხი სიბრტყე) და წინიდან შემოსაზღვრულია ჰაერის გარემოთი, უკნიდან კი – მინისებრი სხეულით. OO მთავარი ოპტიკური ღერძი (იხ. ნახ. 11.11.) გადის რქოვანას, გუგისა და ბროლის გეომეტრიულ ცენტრებზე. გარდა ამისა, ანსხვავებენ თვალის $O'O'$ მხედველობით ღერძსაც, რომელიცგანსაზღვრავს სინათლისადმი მაქსიმალური მგრძნობელობის მიმართულებას და ბროლისა და ყვითელი ხალის

ცენტრებზე გადის. მთავარ ოპტიკურ და მხედველობით ღერძებს შორის კუთხე დაახლოებით 50-ია.



ნახ.11.12

(11.12) ნახაზზე ნაჩვენებია ფოკუსები, მთავარი წერტილები, სიბრტყეები და წერტილები ერთგვარი გასაშუალოებული თვალისთვის (მანძილები ნაჩვენებია მილიმეტრებში). სიმარტივისთვის ამ სისტემას ხშირად ანაცვლებენ დაყვანილი (რედუცირებული) თვალით, ანუ ლინზით, რომელიც საგანთა სივრცის მხრიდან ჰაერით არის გარშემორტყმული, ხოლო გამოსახულების სივრცის მხრიდან თვალშიდა სითხის გარდატეხის მაჩვენებელია n=1.336$n = 1{,}336.$ რედუცირებული თვალის ერთ-ერთ მოდელში ერთიანი მთავარი სიბრტყე რქოვანას წინა ზედაპირიდან დაშორებულია 1.6 მმ-ით, საკვანძო წერტილები თანხვდება და განლაგებულია რქოვანას ზედაპირიდან 7.2 მმ-ზესინათლის გარდატეხა, ძირითადად, რქოვანას გარე საზღვარზე ხდება. რქოვანას ოპტიკური ძალა მიახლოებით 40 დპ-ია, ბროლისა – დაახლოებით 20 დპ, ხოლო მთლიანად თვალისა – დაახლოებით 60 დპ.

სხვადასხვა მანძლით დაშორებული სხეულები ბადურაზე ერთნაირად მკვეთრ გამოსახულებებს უნდა იძლეოდეს. ჩანს, რომ ამის განხორციელება შესაძლებელია ან მთავარ სიბრტყესა და ბადურას შორის a_2 მანძილის ცვლით, იმის ანალოგიურად, როგორც ამას ფოტოაპარატებში აკეთებენ, ან ბროლის სიმრუდისა და, აქედან გამომდინარე, f_1 და f_2 ფოკუსური მანძილების ცვლით. ადამიანის თვალში მეორე შემთხვევის რეალიზება ხდება.

თვალის შეგუებას სხვადასხვა მანძილით დაშორებული საგნების მკვეთრ ხედვასთან – „სიმკვეთრის დაყენებას“ – აკომოდაციას უწოდებენ.

უსასრულობაში მყოფი საგნის გამოსახულება ნორმალურ თვალში ბადურაზე აისახება. ამ დროს ბროლი აკომოდირებულია უსასრულობაზე და მისი ოპტიკური ძალა მინიმალურია. თუ საგანს მივუახლოებთ თვალს, გაიზრდება ბროლის სიმრუდე; რაც უფრო ახლოს არის საგანი, მით მეტია თვალის ოპტიკური ძალა, მისი ცვლილება დაახლოებით 60-70 დპ-ს ფარგლებში ხდება.

საგნის თვალთან 25 სმ-მდე მიახლოებისას ზრდასრული ჯანმრთელი ადამიანის თვალში აკომოდაცია ყოველგვარი დაძაბვის გარეშე ხდება და დასათვალიერებელი საგნების ხელში დაჭერის ჩვევის წყალობით თვალი უფრო ხშირად აკომოდირებულია ზუსტად ამ მანძილზე, რომელსაც საუკეთესო ხედვის მანძილი ეწოდება.

კიდევ უფრო ახლოს განლაგებული საგნების დასათვალიერებლად გვიხდება აკომოდაციური აპარატის დაძაბვა. მაქსიმალურად ახლო მანძილს, რომელზეც ჯერ კიდევ შესაძლებელია თვალის ბადურაზე მკაფიო გამოსახულების მიღება, თვალის უახლოესი წერტილი (მკაფიო მხედველობის უახლოესი წერტილი) ეწოდება. მანძილი თვალის უახლოეს წერტილამდე ასაკის ზრდასთან ერთად იზრდება; შედეგად მცირდება აკომოდაცია.

ბადურაზე გამოსახულების ზომები დამოკიდებულია არა მარტო საგნის ზომებზე, არამედ თვალიდან მის დაშორებაზეც, ანუ იმ კუთხეზე, რომლითაც ვხედავთ საგანს. ამასთან დაკავშირებით შემოაქვთ ხედვის კუთხის ცნება. ეს არის კუთხე იმ სხივებს შორის, რომლებიც გამოდის სხეულის უკიდურესი წერტილებიდან და გაივლის თანმხვედრ საკვანძოწერტილებს (ნახ. 10.13). ნახაზიდან ჩანს, რომ, პირველ რიგში, ერთი და იგივე β ხედვის კუთხე შეიძლება შეესაბამებოდეს სხვადასხვა KM და QP საგნებს, და მეორე – ხედვის კუთხე სრულად განსაზღვრავს გამოსახულების ზომას ბადურაზე:

$$b = l\beta, \qquad (11.7.)$$

სადაც l არის მანძლი ერთიანი საკვანძო N წერტილიდან ბადურამდე (l≈17მმ). (10.7.) ფორმულა ჩაწერილია იმ დაშვებით, რომ ხედვის კუთხე მცირეა. შეიძლება დავამყაროთ კავშირი საგნის B ზომას, თვალიდან, უფრო ზუსტად საკვანძო წერტილებიდან მის L დაშორებასა და ხედვის β კუთხეს შორის:

$$B = L\beta, \qquad (11.8.)$$

საიდანაც (10.7.) გამოსახულების გათვალისწინებით მივიღებთ

$$b = \frac{l\beta}{L}. \qquad (11.9.)$$

თვალის გარჩევადობის უნარის დასახასიათებლად იყენებენ ხედვის უმცირეს კუთხეს, რომელზეც ადამიანის თვალი ჯერ კიდევ ანსხვავებს საგნის ორ წერტილს. ეს კუთხე დაახლოებით 1'-ის ტოლია, რაც შეესაბამება წერტილებს შორის 70 მკმ დაშორებას (იხ. ნახ. 10.8.), თუ ისინი მოთავსებულია საუკეთესო ხედვის მანძილზე. ასეთ შემთხვევაში ბადურაზე გამოსახულების ზომა 5 მკმ-ია, რაც შეესაბამება ბადურაზე ორ კოლბას შორის საშუალო მანძილს. ამიტომ, თუ ორი წერტილის გამოსახულება ბადურაზე დაიკავებს 5 მკმ-ზე მოკლე ხაზს, ეს წერტილები ვერ განირჩევიან, ანუ თვალი მათ ვერ განასხვავებს.

ხედვის უმცირესი კუთხის ასეთივე მნიშვნელობას მივიღებთ, თუ გავითვალისწინებთ სინათლის დიფრაქციით განპირობებულ შეზღუდვებს. განსაცვიფრებელია ბუნების მიზანშეწონილობა – „არაფერი ზედმეტი“: ბადურის ფართობის ერთეულზე არსებული კოლბების რიცხვი გეომეტრიული ოპტიკის ზღვრული შესაძლებლობების შესაბამისია.

თვალის გარჩევადობის უნარი ფასდება მხედველობის სიმახვილით. მის ნორმად მიღებულია ერთიანი, ამ შემთხვევაში ხედვის უმცირესი კუთხე 1'-ის ტოლია.

ნორმიდან გადახრების დროს მხედველობის სიმახვილე იმდენჯერ ნაკლებია ნორმაზე, რამდენჯერაც მხედველობის იმცირესი კუთხე მინუტაზე მეტია. თუ მხედველობის უმცირესი კუთხე 4'-ის ტოლია, მხედველობის სიმახვილე ტოლი იქნება 1 : 4 = 0,25.

ცალკეულ შემთხვევებში ადამიანის თვალი ანსხვავებს უფრო მცირე სიდიდეებს, ვიდრე ისინი, რომლებიც 1' კუთხეს შეესაბამება. ასე მაგალითად, მოძრავი საგნების გადანაცვლება შესამჩნევია, როდესაც ის აღწევს 20"-ს რკალზე, ორი თხელი ხაზის დაუმთხვევლობის გარჩევა შეიძლება მათ შორის მინიმუმ 12"-იანი კუთხის არსებობისას და ა.შ. ფიზიკურ გაზომვებში ხშირად იყენებენ ხელსაწყოებს, რომელთა ისარი არ უნდა გადაადგილდეს სკალის ნულოვანი დანაყოფიდან (შტრიხიდან)

(პოტენციომეტრები, ხიდები). თვალის მიერ ხაზების მცირე გადაადგილების გამოვლენის უნარის წყალობით ასეთი ხელსაწყოები გვაძლევენ უფრო ზუსტ ჩვენებებს, ვიდრე ისინი, რომლებშიც განისაზღვრება მანძილი შტრიხსა და ისარს შორის.[12]

თვალის სინათლისა და ფერისადმი მგრძნობელობა, ასევე მხედველობის ბიოფიზიკური საკითხები განხილულია მეშვიდე თავში.

11.3. თვალის ოპტიკური სისტემის ნაკლოვანებები და მათი კომპენსირება

ლინზებისთვის დამახასიათებელი აბერაციები თვალში თითქმის არ შეიმჩნევა.

სფერული აბერაცია შეუმჩნეველია გუგის სიმცირის გამო და ვლინდება მხოლოდ ბინდბუნდში, როცა გუგა გაფართოებულია: გამოსახულებები არამკვეთრია. მიუხედავად იმისა, რომ თვალი არ წარმოადგენს აქრომატიულ სისტემას, გუგის მცირე ზომების გამო ქრომატული აბერაციები მაინც არ იგრძნობა. ირიბი კონების ასტიგმატიზმსაც არ აქვს ადგილი, რადგან თვალი ყოველთვის მიმართულია დაკვირვების საგნისკენ. გამონაკლისს შეადგენს მხოლოდ ასტიგმატიზმი, რომელიც ოპტიკური სისტემის ასიმეტრიით (რქოვანას ან ბროლის არასფერული ფორმა) არის განპირობებული.

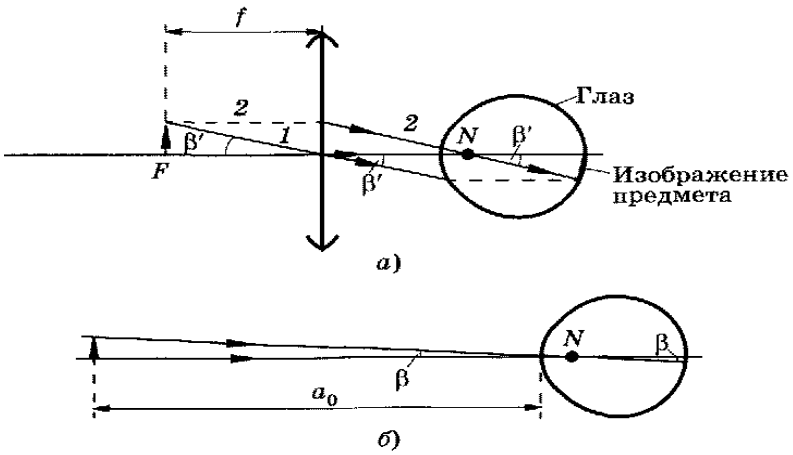
ეს ვლინდება, კერძოდ, თვალის მიერ გამოსაცდელ ცხრილში ურთიერთ-პერპენდიკულარული ხაზების ერთნაირი ხედვის უუნარობაში. თვალის ამ ნაკლის კომპენსაცია ხდება ცილინდრული ლინზებიანი სპეციალური სათვალით.

თვალის ოპტიკურ სისტემას ახასიათებს ზოგიერთი სპეციფიური ნაკლი.

აკომოდაციის არარსებობის პირობებში ნორმალურ თვალში უკანა ფოკუსი თანხვდება ბადურას. ასეთ თვალს ემმეტროპული ეწოდება; თვალს უწოდებენ ამეტროპულს, თუ ეს პირობა არ სრულდება.

[12] ეს საკითხი არა მარტო ფიზიკური, არამედ ფიზიოლოგიურიცაა.

ამეტროპიის ყველაზე გავრცელებული სახეებია ახლომხედველობა (მიოპია) და შორსმხედველობა (ჰიპერმეტროპია). ახლომხედველობა თვალის ნაკლია, რომლის დროსაც აკომოდაციის არარსებობისას უკანა ფოკუსი დევს ბადურის წინ; შორსმხედველობის შემთხვევაში აკომოდაციის არარსებობისას უკანა ფოკუსი დევს ბადურის უკან. ახლომხედველი თვალის კორექციისთვის გამფანტველ, ხოლო შორსმხედველისთვის – შემკრებ ლინზებს იყენებენ.



ნახ.11.13.

საგნის დეტალების გარჩევადობის უნარი დამოკიდებულია თვალის ბადურაზე მისი გამოსახულების ზომებსა და ხედვის კუთხეზე. ხედვის კუთხე შეიძლება გავზარდოთ, თუ საგანს თვალთან ახლოს მივიტანთ, მაგრამ ეს დაკავშირებულია ზოგიერთ შეზღუდვასთან: 1) რიგ შემთხვევებში ტექნიკურად შეუძლებელია საგანსა (მაგალითად, მზეს ან ვარსკვლავებს) და თვალს შორის მანძილის არსებითად შეცვლა; 2) აკომოდაციის სასრული შესაძლებლობების გამო შეუძლებელია საგნის თვალთან მიახლოება უფრო მეტად, ვიდრე თვალის უახლოესი წერტილია.

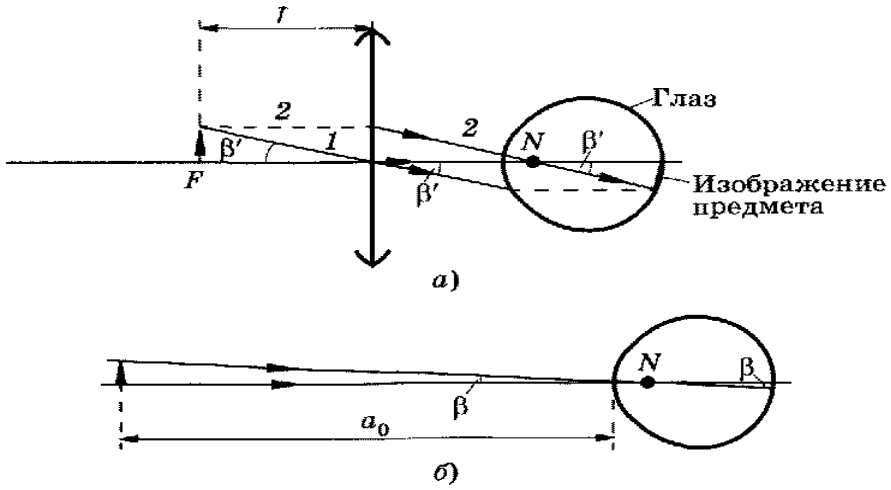
ამასთან დაკავშირებით მხედველობის კუთხის გაზრდის მიზნით იყენებენ ოპტიკურ ხელსაწყოებს: ტელესკოპებს, ლუპებს, მიკროსკოპებსა და ა.შ.

განვიხილოთ ერთ-ერთი ყველაზე მარტივი ოპტიკური ხელსაწყო – ლუპა.

ლუპა ეწოდება ოპტიკურ სისტემას, რომლის წინა ფოკალურ სიბრტყეში, ან მის უშუალო სოახლოვეს მოთავსებულია დაკვირვების ობიექტი.

ლუპით შექმნილი გამოსახულება უსასრულობაშია ან თვალისთვის მოსახერხებელ მანძილზე. თუ გამოსახულება უსასრულობაშია, თვალი მას აკომოდაციის გარეშე აღიქვამს.

(11.14.ა) ნახატზე ორი სხივით არის ნაჩვენები, თუ როგორ ხდება ლუპის საშუალებით გამოსახულების ბადურაზე ფორმირება; N არის თვალის ოპტიკური სისტემის გაერთიანებული საკვანძო წერტილი, საგანი მოთავსებულია წინა ფოკალურ სიბრტყეში. სხივი 1 გაივლის ლუპის ცენტრს გარდატეხის გარეშე და შემდეგ თვალით გარდატყდება. სხვა სხივები, რომლებიც საგნის იმავე წერტილიდან გამოდიან, ლუპაში გარდატეხის შემდეგ 1 სხივის პარალელურად იმოძრავებენ. იმისათვის, რომ განვსაზღვროთ ბადურაზე გამოსახულების მდებარეობა, ამ სხივებიდან ამოვირჩიოთ ის, რომელიც გაივლის გაერთიანებულ საკვანძო წერტილს (სხივი 2). ის არ გარდატყდება თვალში. მისი ბადურასთან გადაკვეთის ადგილი გვიჩვენებს საგნის გამოსახულების მდებარეობას. სრული სურათის წარმოსადგენად საჭიროა 2 სხივის საწყისი და 1 სხივის ბოლო ნაწილების გავლება (ნაჩვენებია წყვეტილი ხაზებით).



ნახ.11.14.

ლუპის გადიდება ეწოდება ხედვის β' კუთხის, რომლითაც ვხედავთ საგნის გამოსახულებას (იხ. ნახ. 11.14.ა) შეფარდებას ხედვის β კუთხესთან,

რომლითაც ვხედავთ თვალიდან საუკეთესო ხედვის მანძილით დაშორებულ საგანს α_0=25სმ (ნახ. 11.14.ბ.)

ნახატებიდან ჩანს, რომ:

$$\beta' = \frac{B}{f},\ \beta = \frac{B}{\alpha_0}, \qquad (11.1.)$$

სადაც საგნის წრფივი ზომაა. (10.10) გამოსახულების გათვალისწინებით მივიღებთ ლუპის გადიდებას

$$\Gamma = \frac{\beta'}{\beta} = \frac{\alpha_0}{f}. \qquad (11.2)$$

აქედან ჩანს, რომ გადიდების ფორმულა აკავშირებს ერთმანეთთან ლუპის ფოკუსური მანძილის f მუდმივას საუკეთესო ხედვის მანძილთან, რომელიც საკმაოდ პირობითი სიდიდეა. ახლომხედველი თვალისთვის α_0<25სმ, შორსმხედველისთვის – α_0<25სმ, ამიტომ ახლომხედველი თვალისთვის ერთიდაიგივე ლუპის გადიდება ნაკლებია, ვიდრე შორსმხედველისთვის.

თუ გაივთვალისწინებთ, რომ აკომოდაციის დაძაბულობა ძლიერად ღლის თვალებს და დასაშვებია მხოლოდ მცირე დროით, საჭიროა ლუპით სარგებლობისას საგანი ფოკალურ სიბრტყეში მოვათავსოთ, ხოლო თვალი – ლუპასთან ახლოს.

ლუპებს ამზადებენ ერთი ან რამდენიმე ლინზისგან. ლუპის გადიდება დამოკიდებულია მის კონსტრუქციაზე და იცვლება 2-დან 40-50-ჯერფარგლებში. ყველაზე გავრცელებულია 10-ჯერადი გადიდების ლუპები.

ლუპის საშუალებით ორ წერტილს შორის დაშორების გარჩევადობა შეგვიძლია გამოვიანგარიშოთ (10.8) ფორმულით. მაგალითად, თუ 10-ჯერადი გადიდების ლუპისთვის ავიღებთ β = 0,1' ≈ 3 · 10^{-5}რად; L =α_0=25სმ, მაშინ მივიღებთ, რომ B = 0,25 x 3 · 10^{-5}= მკმ

11.3. ორგანიზმი, როგორც ფიზიკური ველების წყარო

ნებისმიერი სხეული წარმოადგენს ფიზიკური ველების წყაროს. ტერმინით – ფიზიკური ველი აღნიშნავენ მატერიის განსაკუთრებულ მდგომარეობას, რომელიც გამოიხატება ამ ველში მოთავსებულ სხვა სხეულებზე ზემოქმედებაში. ასე მაგალითად, განასხვავებენ გრავიტაციულ, ელექტრულ, მაგნიტურ, ელექტრომაგ-ნიტურ, ბირთვულ ველებს. ბგერა შეგვიძლია განვიხილოთ, როგორც აკუსტიკური ველი.

ადამიანის სხეული, როგორც ფიზიკური სხეული, ასევე ფიზიკური ველების წყაროს წარმოადგენს. ამ ველების რეგისტრაცია და მახასიათებლების ცვლილებაშესაძლოა გამოვიყენოთ ორგანიზმის, მისი ორგანოებისა და ქსოვილების მდგომარეობის შესახებ ინფორმაციის მისაღებად, ანუ დიაგნოსტიკისთვის.

ამ მიზნით განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია შემდეგი ფიზიკური ველები:

1. აკუსტიკური ველი (აუსკულტაცია, ფონოკარდიოგრაფია).

2. ელექტრული ველი (ელექტროკარდიოგრაფია).

3. მაგნიტური ველი (მაგნიტოკარდიოგრაფია).

4. ელექტრომაგნიტური ველი (თერმოგრაფია).

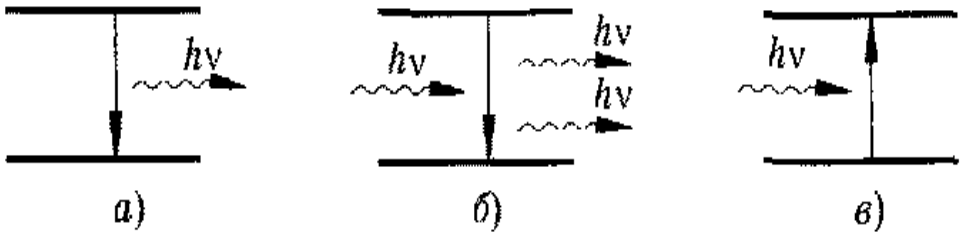
პოპულარულ ლიტერატურაში ხშირად გამოიყენება ტერმინი „ბიოველი“. ამ ცნების ქვეშ იგულისხმება ორგანიზმის ერთგვარი სპეციფიური გავლენა გარემომცველ სხეულებზე, ანბიოლოგიური ობიექტების ერთგვარი სპეციფიური გამოსხივება. ამასთან დაკავშირებით გარკვევით უნდა ითქვას, რომ ორგანიზმი წარმოადგენს ფიზიკური ველების წყაროს და არავითარ განსაკუთრებულ „ბიოველებს“ არ ქმნის.

განსაკუთრებული საკითხია, თუ როგორ წარმოვადგინოთ ორგანიზმის (ორგანოების, ქსოვილების) ფიზიკური ველის გამოკვლევის (რეგისტრაციის) შედეგები დიაგნოსტიკური მიზნებისთვის. ეს სხვადასხვაგვარად ხდება. ასე მაგალითად, აუსკულტაციის დროს ექიმი ისმენს ბგერებს, ანუ სუბიექტურად აფასებს მათ სიმაღლესა და სიხშირეს. ელექტროკარდიოგრაფიის ჩატარებისას დოკუმენტურად ფიქსირდება პაციენტის სხეულზე გულის მუშაობით გამოწვეული პოტენციალთა

სხვაობის დროზე დამოკიდებულება. თერმოგრაფიის პროცესში სითბური გამოსხივება აისახება ხელსაწყოს ეკრანზე.

11.5. ლაზერები და მათი გამოყენება მედიცინაში

სინათლის ტალღებისა და რადიოტალღების ერთნაირი ხასიათის მიუხედავად ოპტიკა და რადიოელექტრონიკა მრავალი წლის განმავლობაში ერთმანეთისგან დამოუკიდებლად ვითარდებოდა. მიიჩნევდნენ, რომ სინათლის წყაროს – აგზნებულ ნაწილაკებს და რადიოტალღების გენერატორებს მცირე რამ აქვთ საერთო. მხოლოდ XX საუკუნის შუა წლებში გამოქვეყნდა პირველი ნაშრომები მოლეკულური გამაძლიერებლებისა და რადიოტალღების გენერატორების შექმნის შესახებ, რამაც საფუძველი ჩაუყარა ფიზიკის ახალი, დამოუკიდებელი დარგის – კვანტური ელექტრონიკის განვითარებას.

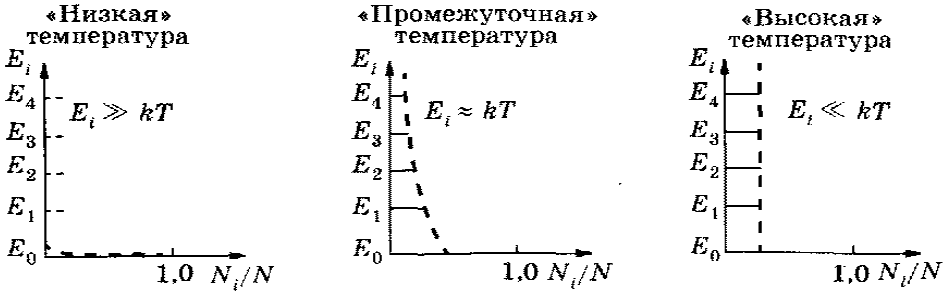


ნახ.11.15

კვანტური ელექტრონიკა სწავლობს ელექტრომაგნიტური რხევების გენერაციასა და გაძლიერებას კვანტური სისტემების იძულებითი გამოსხივების გამოყენებით. ცოდნის ამ სფეროს მიღწევები სულ უფრო ფართო გამოიყენება მეცნიერებასა და ტექნიკაში. გავეცნოთ ზოგიერთ მოვლენას, რომლებიც საფუძვლად უდევს კვანტურ ელექტრონიკას და ოპტიკური კვანტური გენერატორების – ლაზერების მუშაობას.

ლაზერების შექმნა შესაძლებელი გახდა ფიზიკის სამი ფუნდამენტური იდეის რეალიზაციის შედეგად. ეს იდეებია: იძულებითი გამოსხივება (1), ატომების ენერგეტიკული დონეების თერმოდინამიურად არაწონასწორული ინვერსიული შევსების განხორციელება (2) და დადებითი უკუკავშირის გამოყენება (3).

აგზნებულ მოლეკულებს (ატომებს) ლუმინესცენციური ფოტონების გამოსხივების უნარი აქვთ. ეს გამოსხივება სპონტანური პროცესია (ნახ. 11.15.ა.). ის შემთხვევითი და ქაოსურია დროის, სიხშირის (შესაძლოა მოხდეს გადასვლები სხვადასხვა დონეებს შორის), გავრცელების მიმართულებისა და პოლარიზაციის მიხედვით. მეორე გამოსხივება – იძულებითი, ანუ ინდუცირებული (ნახ. 11.15.ბ.), წარმოიქმნება ფოტონის აგზნებულ მოლეკულასთან ურთიერთმოქმედებით, თუ ფოტონის ენერგია ენერგიების შესაბამისი დონეების სხვაობის ტოლია. იძულებითი (ინდუცირებილი) გამოსხივების დროს 1 წამში განხორციელებული გადასვლების რაოდენობა დამოკიდებულია ამავე დროში ნივთიერებაში მოხვედრილი ფოტონების რაოდენობაზე, ანუ სინათლის ინტენსივობაზე და აგზნებული მოლეკულების რიცხვზე. სხვა სიტყვებით რომ ვთქვათ, იძულებითი გადასვლები რიცხვი მით მეტია, რაც მეტად არის შევსებული შესაბამისი აგზნებული ენერგეტიკული დონე.



ნახ.11.15

ინდუცირებული გამოსხივება დაცემული გამოსხივების იდენტურია ყველა მახასიათებლის მიხედვით, მათ შორის ფაზითაც, ამიტომ შეიძლება ვილაპარაკოთ ელექტრომაგნიტური ტალღის კოჰერენტულ გაძლიერებაზე, რაც ლაზერული გენერაციის პრონციპებში გამოიყენება როგორც პირველი და ძირითადი იდეა.

ჩვეულებრივ პირობებში იძულებითი გამოსხივების ალბათობა საკმაოდ მცირეა. (11.15.) ნახატზე ნაჩვენებია ენერგეტიკული დონეების მოლეკულებით შევსება, რომელიც ბოლცმანის განაწილებით აღიწერება. ნახატზე ყოველი დონის „სიგრძე“ პროპორციულია იმ ნაწილაკების რიცხვისა, რომელთაც შესაბამისი ენერგია აქვთ (E_0 – ძირითადი მდგომარეობა, E_1, E_2, ..., – აგზნებული მდგომარეობები, N – ნაწილაკების საერთო რაოდენობა, N_i – ნაწილაკების რაოდენობა ენერგიის i-ურ დონეზე). ჩანს, რომ „დაბალ“ ტემპერატურებზე აგზნებული მოლეკულების რაოდენობა ძალიან მცირეა, ტემპერატურის ზრდასთან ერთად ისიც იზრდება, „მაღალ“ ტემპერატურაზე კი პრაქტიკულად ყველა ენერგეტიკული დონე ერთნაირად იქნება შევსებული. ნებისმიერ შემთხვევაში, როცა სისტემა გარემოსთან სითბურ წონასწორობაშია (ეს სიტუაცია ყველაზე ხშირია), მოლეკულათა დიდი ნაწილი ძირითად მდგომარეობაში იმყოფება. ამიტომ ფოტონები, ძირითადად, არააგზნებულ მოლეკულებს ეჯახება და ხდება სინათლის შთანთქმა. ცალკე აღებული ნაწილაკისთვის ერთნაირად ლბათურია იძულებითი შთანთქმა როგორც ძირითად (ნახ. 11.15.გ.), ასევე აგზნებულ მდგომარეობაში (ნახ. 11.15.ბ.) ყოფნისას. ამიტომ, მაშინაც კი, როცა ნივთიერებაში აგზნებულ და ძირითად მდგომარეობებში მყოფი ნაწილაკების რიცხვი ერთნაირია („მაღალი“ ტემპერატურა (11.15) ნახატზე), დაცემული ელექტრომაგნიტური ტალღის გაძლიერება არ ხდება. რეალურად, ნივთიერების ჩვეულებრივ მდგომარეობაში („დაბალი“ ტემპერატურა (11.15.) ნახატზე) ტალღის გაძლიერების პირობები არ სრულდება, ანუ ნივთიერებაში გავლისას ხდება ტალღის შთანთქმა.

მეორე იდეა, რომლის რეალიზებაც მოხდა ლაზერების შექმნისას, მდგომარეობს თერმოდინამიკურად არაწონასწორული სისტემების შექმნაში, რომლებშიც, ბოლცმანის კანონის მიუხედავად, მაღალ დონეზე მეტი ნაწილაკია, ვიდრე დაბალ დონეზე. გარემოს ისეთ მდგომარეობას, რომელშიც თუნდაც ორი ენერგეტიკული დონისთვის სრულდება პირობა, რომ მეტი ენერგიის მქონე ნაწილაკების რიცხვი აჭარბებს ნაკლები ენერგიის მქონე ნაწილაკების რიცხვს, დონეების ინვერსიული შევსების მდგომარეობას უწოდებენ, ხოლო გარემოს – აქტიურს. სწორედ აქტიური გარემო, რომელშიც ფოტონები ურთიერთქმედებენ აგზნებულ ატომებთან და იწვევენ იძულებით გადასვლას შედარებით დაბალ დონეზე, ინდუცირებული (იძულებითი) გამოსხივების კვანტების გამოყოფით,

წარმოადგენს ლაზერის სამუშაო ნივთიერებას. დონეების ინვერსიული შევსების მდგომარეობა, ფორმალურად, გამომდინარეობს ბოლცმანის განაწილებიდან, როცა $T < 0^o K$ ამიტომ მას ზოგჯერ „უარყოფითი“ ტემპერატურის მდგომარეობასაც უწოდებენ. აქტიურ გარემოში სინათლის გავრცელებისას მისი ინტენსივობა იზრდება და ადგილი აქვს სინათლის შთანთქმის საწინააღმდეგო მოვლენას, ანუ სინათლის გაძლიერებას. ეს ნიშნავს, რომ ბუგერის კანონში $k\lambda < 0$ ამიტომ ინვერსიული შევსება შეესაბამება შთანთქმის უარყოფით მაჩვენებლიან გარემოს.

შესაძლებელია ინვერსიული შევსების მდგომარეობის შექმნა, თუ გადავარჩევთ ნაკლები ენერგიის მქონე ნაწილაკებს, ან სპეციალურად მოვახდენთ ნაწილაკების აგზნებას, მაგალითად, სინათლით ან ელექტრული განმუხტვით. თავისთავად, უარყოფითი ტემპერატურის მდგომარეობა დიდხანს არ ნარჩუნდება.

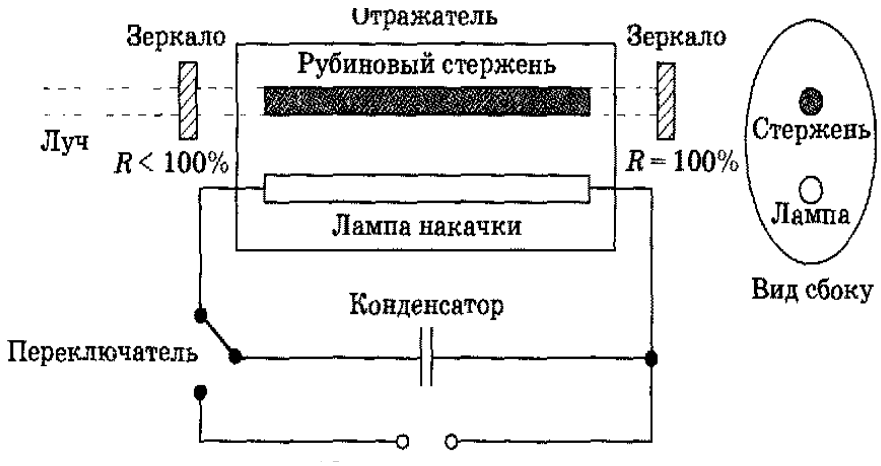
მესამე იდეა, რომელიც გამოიყენება ლაზერული გენერაციის პრინციპებში, წარმოიშვა რადიოფიზიკაში და გულისხმობს დადებითი უკუკავშირის გამოყენებას. მისი განხორციელებისას გენერირებული იძულებითი გამოსხივების ნაწილი რჩება სამუშაო ნივთიერებაში, ზემოქმედებს მასზე და იწვევს იძულებით გამოსხივებას სულ უფრო და უფრო მეტი რაოდენობის ახალი ატომებიდან. ამ პროცესის რეალიზებისთვის აქტიურ გარემოს ათავსებენ ოპტიკურ რეზონატორში, რომელიც, ჩვეულებრივ, ორი სარკისგან შედგება. საკრეები ისეა შერჩეული, რომ მათში წარმოქმნილმა გამოსხივებამ მრავალჯერადად გაიაროს აქტიური გარემო და გადააქციოს ის კოჰერენტული იძულებითი გამოსხივების გენერატორად.

პირველი ასეთი გენერატორი ზემაღალი სიხშირეების დიაპაზონში (მაზერი) კონსტრუირებულია 1955 წელს ერთმანეთისგან დამოუკიდებლად, ერთის მხრივ, საბჭოთა მეცნიერების ნ.გ.ბასოვისა და ა.მ.პროხოროვის და, მეორეს მხრივ, ამერიკელი მეცნიერების ჩ.ტაუნსონისა და სხვ. მიერ. რამდენადაც ამ ხელსაწყოს მუშაობა დამყარებული იყო ამიაკის მოლეკულათა იძულებით გამოსხივებაზე, გენერატორს მოლეკულური უწოდეს.

1960 წელს შექმნეს ხილული დიაპაზონის გამოსხივების პირველი კვანტური გენერატორი – ლაზერი, რომლის სამუშაო ნივთიერება (აქტიური გარემო) ლალის კრისტალი იყო. იმავე წელს შექმნეს ჰელიუმ-ნეონური გაზის ლაზერი. დღეისათვის შექმნილი უამრავი რაოდენობის

სხვადასხვაგვარი ლაზერების კლასიფიცირება შესაძლებელია მათი სამუშაო ნივთიერებების მიხედვით: აირის, სითხის, ნახევარგამტარული და მყარი ლაზერები. ლაზერის ტიპის მიხედვით ინვერსიული შევსების შესაქმნელად აუცილებელი ენერგიის გადაცემა სხვადასხვა საშუალებებით ხდება: უკიდურესად ინტენსური სინათლით აგზნებით – „ოპტიკური ჩატუმბვით“, ელექტრული გაზური განმუხტვით, ნახევარგამტარულ ლაზერებში – ელექტრული დენით. ნათების ხასიათის მიხედვით ლაზერები იყოფა იმპულსურად და უწყვეტად.

განვიხილოთ მყარი ლალის ლაზერის მუშაობის პრინციპი. ლალი წარმოადგენს ალუმინის ოქსიდის Al_2O_3 კრისტალს, რომელიც მინარევების სახით დაახლოებით 0,05% ქრომის იონებს Cr^{34} შეიცავს. ქრომის იონების აგზნება ხორციელდება ოპტიკური ჩატუმბვის მეთოდით დიდი სიმძლავრის სინათლის იმპულსური წყაროების საშუალებით. ერთ-ერთ კონსტრუქციაში გამოყენებულია მილაკოვანი ამრეკლი, რომელსაც ელიფსის კვეთის ფორმა აქვს. ამრეკლის შიგნით მოთავსებულია ქსენონისსწორი იმპულსური ნათურა და ლალის ცილინდრული ღერო, რომლებიც ელიფსის ფოკუსზე გამავალი ხაზის გასწვრივ არის განლაგებული (ნახ. 11.17). ალუმინის ამრეკლის შიდა ზედაპირი კარგად არის პოლირებული ან მოვერცხლილი. ელიფსური ამრეკლის ძირითადი თვისება ის არის, რომ მისი ერთი ფოკუსიდან (ქსენონის ნათურიდან) გამოსული და მისი კედლებიდან არეკლილი სინათლე ხვდება ამრეკლის მეორე ფოკუსში (ლალის ღერო).

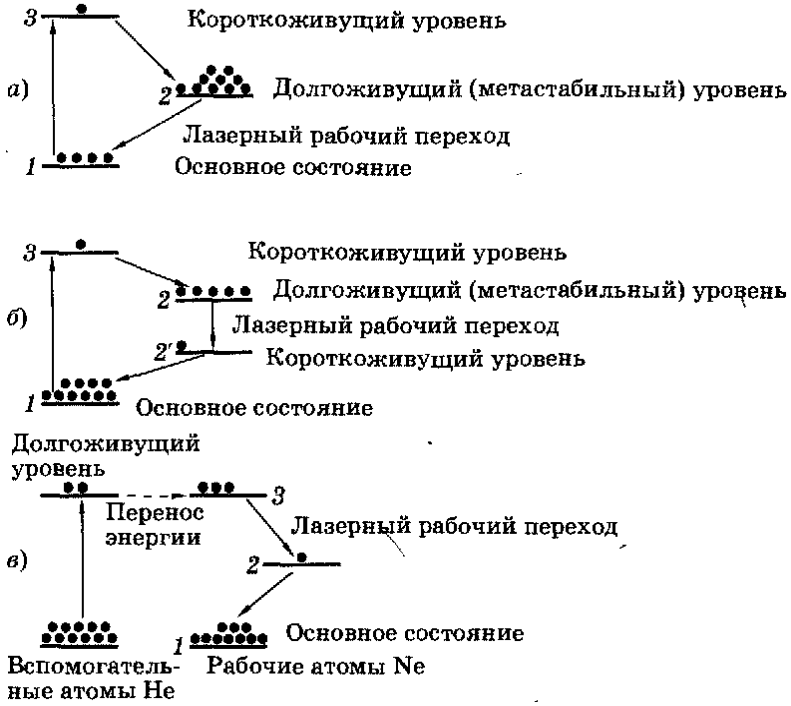


ნახ.11.17.

ლალის ლაზერი მუშაობს სამდონიანი სქემით (ნახ. 11.18.ა). ოპტიკური ჩატუმბვის შედეგად ქრომის იონები გადადის ძირითადი (1) დონიდან არასტაბილურ (სიცოცხლის მოკლე პერიოდის მქონე) აგზნებულ მდგომარეობაში (3). შემდეგ ხდება გამოსხივების გარეშე გადასვლა გრძელვადიან (მეტასტაბილურ) მდგომარეობაში (2), რომლიდანაც სპონტანული გამოსხივებითი გადასვლის ალბათობა შედარებით მცირეა. ამიტომ ხდება აგზნებული იონების დაგროვება (2) მდგომარეობაში და იქმნება ინვერსიული შევსება (1) და (2) დონეებს შორის. ბუნებრივ პირობებში (2)-დან (1) დონეზე გადასვლა ხდება სპონტანურად და 694.3 ნმ ტალღის სიგრძის ლუმინესცენციის თანხლებით. ლაზერის რეზონატორში ორი სარკეა. ერთ-ერთი მათგანის არეკვლის კოეფიციენტია

$R = \frac{I_{\text{არეკვლის}} \cdot 100}{I_0} = 100\%$ ($I_{\text{არეკვლის}}$ და I_0 არის სარკეზე დაცემული და

სარკიდან არეკლილი სინათლის ინტენსივობები), მეორე სარკე ნახევრად გამჭვირვალეა და უშვებს მასზე დაცემული გამოსხივების მხოლოდ ნაწილს (R<100%). ლუმინესცენციის კვანტები, მათი მოძრაობის მიმრთულებიდან გამომდინარე, ან გამოისროლება ლალის-ცილინდრული ღეროს გვერდითი ზედაპირიდან და იკარგება, ან მრავალჯერადად აირეკლება სარკეებიდან და თავად იწვევს იძულებით გადასვლებს. ამრიგად, სარკეების პერპენდიკულარულ სხივს ექნება უდიდესი განვითარება და შეძლებს ნახევრად გამჭვირვალე სარკეში გასვლას. ასეთი ლაზერი მუშაობს იმპულსურ რეჟიმში.



ნახ.11.18.

ლალის ლაზერთან ერთად, რომელიც სამდონიანი სქემით მუშაობს, ფართო გავრცელება ჰპოვა კრისტალურ ან შუშის მატრიცაში ჩანერგილ იშვიათ მიწათაელემენტების (ნეოდიმი, სამარიუმი და ა.შ.) იონებზე მომუშავე ოთხდონიანი ლაზერების სქემებმა. ასეთ შემთხვევებში ინვერსიული შევსება იქმნება ორ აგზნებულ დონეს შორის: სიცოცხლის დიდი პერიოდის მქონე (სტაბილურ) (2) დონესა და სიცოცხლის მოკლე პერიოდის მქონე (არასტაბილურ) (2')დონეს შორის.

ძალიან გავრცელებულია ჰელიუმ-ნეონის აირადი ლაზერი, რომელშიც აგზნება წარმოიქმნება ელექტრული განმუხტვის დროს. მასში აქტიურ გარემოს წარმოადგენს ჰელიუმისა და ნეონის ნაზავი შეფარდებით 10:1, დაახლოებით 150 პა წნევის პირობებში. გამოსხივება ხდება ნეონის ატომებიდან. ჰელიუმის ატომები დამხმარე როლს თამაშობს. ნაჩვენებია ჰელიუმისა და ნეონის ატომების ენერგეტიკული დონეები. გენერაცია ხდება ნეონის (3) და (2) დონეებში გადასვლის დროს. იმისათვის, რომ მათ შორის შეიქმნას ინვერსიული შევსება, აუცილებელია, შეივსოს (3) დონე და დაცარიელდეს (2) დონე. (3) დონის შევსება ჰელიუმის ატომების

საშუალებით ხდება. ელექტრული განმუხტვის დროს ელექტრონული დარტყმით ხდება ჰელიუმის ატომების აგზნება სიცოცხლის დიდი პერიოდის მქონე (სტაბილურ)მდგომარეობამდე (სიცოცხლის პერიოდი დაახლოებით10-3წმ-ია). ამ მდგომარეობის ენერგია ძალიან ახლოსაა ნეონის (3) დონის ენერგიასთან, ამიტომ ჰელიუმის აგზნებული ატომის შეჯახებისას ნეონის არააგზნებულ ატომთან ხდება ენერგიის გადაცემა, რის შედეგადაც ივსება ნეონის (3) დონე. სუფთა ნეონისთვის ამ დონეზე ცხოვრების პერიოდი მცირეა და ატომები გადადიან (1) ან (2) დონეებზე, ხდება ბოლცმანის განაწილების რეალიზება. ნეონის (2) დონის დაცარიელება, ძირითადად, განმუხტვის მილაკის კედლებთან შეჯახებისას მისი ატომების ძირითად მდგომარეობაში სპონტანური გადასვლით ხორციელდება.ასე ხდება ნეონის (2) და (3) დონეების სტაციონარული ინვერსიული შევსების უზრუნველყოფა.

ჰელიუმ-ნეონის ლაზერის ძირითად კონსტრუქტიულ ელემენტს (ნახ. 11.19.) წარმოადგენს დაახლოებით 7 მმ დიამეტრის აირგანმმუხტველი მილაკი. გაზური განმუხტვისა და ჰელიუმის აგზნების შესაქმნელად მილაკში ჩამონტაჟებულია ელექტროდები. მილაკის ბოლოებზე ბრუსტერის კუთხით განლაგებულია ფანჯრები, რომელთა წყალობითაც გამოსხივება ხდება ბრტყლად პოლარიზებული. რეზონატორის ბრტყელი პარალელური სარკეები მილის გარეთ მონტაჟდება, ერთ-ერთი მათგანი ნახევრად გამჭვირვალეა (არეკვლის კოეფიციენტი R<100). ამგვარად, იძულებითი გამოსხივების კონა გამოდის გარეთ ნახევრადგამჭვირვალე სარკის გავლით. ეს არის უწყვეტი მოქმედების ლაზერი. რადგან ნეონის (2) და (3) დონეები რთული სტრუქტურისაა, ამიტომ ჰელიუმ-ნეონის ლაზერს შეუძლია ხილული და ინფრაწითელი დიაპაზონის 30 განსხვავებულ ტალღის სიგრძეზე მუშაობა. რეზონატორის სარკეებს უკეთებენ მრავალშრიან დაფარვას და ინტერფერენციის შედეგად იქმნება მოცემული ტალღის სიგრძისთვის აუცილებელი არეკვლის კოეფიციენტი. ყველაზე ხშირად იყენებენ ჰელიუმ-ნეონის ლაზერებს, რომლებიც ასხივებენ 632.8 ნმ ტალღის სიგრძის მქონე წითელ სინათლეს. ასეთი ლაზერების სიმძლავრე არც თუ დიდია, ის არ აღემატება 100 მვტ-ს.

ნახ.11.19.

ლაზერების გამოყენება დამყარებულია მათი გამოსხივების თვისებებზე: მაღალი მონოქრომატულობა ($\Delta\lambda \approx 0.01$Å), საკმაოდ მაღალი სიმძლავრე, კონის სივიწროვე და კოჰერენტულობა.

სინათლის კონის სივიწროვემ და მისმა მცირე განშლადობამ საშუალება მოგვცა, გამოგვეყენებინა ლაზერები დედამიწასა და მთვარეს შორის მანძილის გასაზომად (მიღებული სიზუსტე, დაახლოებით, ათეულობით სმ-ია), ვენერასა და მერკურის ბრუნვის სიჩქარეები და სხვ.

ლაზერული გამოსხივების კოჰერენტობას ემყარება მათი გამოყენება ჰოლოგრაფიაში. ჰელიუმ-ნეონის ლაზერის საფუძველზე ბოჭკოვანი ოპტიკის გამოყენებით შემუშავებულია გასტროსკოპები, რომლებიც საშუალებას იძლევა, შევქმნათ კუჭის შიდა ღრუს მოცულობითი ჰოლოგრაფიული გამოსახულება.

ლაზერული გამოსხივების მონოქრომატიულობა მოსახერხებელია ატომებისა და მოლეკულების მიერ სინათლის კომბინაციური განბნევის სპექტრების აღსაგზნებად.

ლაზერებმა ფართო გამოყენება ჰპოვეს ქირურგიაში, სტომატოლოგიაში, ოფტალმოლოგიაში, დერმატოლოგიასა და ონკოლოგიაში. ლაზერული გამოსხივების ბიოლოგიური ეფექტები დამოკიდებულია როგორც ბიოლოგიური მასალის თვისებებზე, ასევე ლაზერის გამოსხივების თვისებებზეც.

მედიცინაში გამოყენებადი ყველა ლაზერი პირობითად შეიძლება ორ სახედ დავყოთ: დაბალინტენსიური (ინტენსივობა არ აღემატება 10 ვტ/სმ^2,

ყველაზე ხშირად არის დაახლოებით 0.1 ვტ/სმ ^{2}) – გამოიყენება თერაპიაში და მაღალინტენსიური – ქირურგიული. ყველაზე მძლავრი ლაზერების ინტენსივობა შეიძლება აღწევდეს 10^{14} ვტ/სმ2, მედიცინაში, ჩვეულებრივ, იყენებენ ლაზერებს, რომელთა ინტენსივობაა $10^2 – 10^6$ ვტ/სმ2.

დაბალ ინტენსიურია ლაზერები, რომლებიც არ იწვევენ ქსოვილებზე შესამჩნევ დესტრუქციულ ზემოქმედებას უშუალოდ დასხივების დროს. სპექტრის ხილულ და ულტრაიისფერ დიაპაზონებში მათი ეფექტი განპირობებულია ფოტოქიმიური რეაქციებით და არ განსხვავდება ეფექტისგან, რომელსაც იწვევს ჩვეულებრივი, არაკოჰერენტული წყაროებიდან მიღებული მონოქტომატული სინათლე. ასეთ შემთხვევებში ლაზერი წარმოადგენს, უბრალოდ, სინათლის მოსახერხებელ მონოქრომატულ წყაროს, რომელიც უზრუნველყოფს წერტილოვან ლოკალიზაციას და დოზირებულ ზემოქმედებას. მაგალითებად შეგვიძლია მოვიყვანოთ ჰელიუმ-ნეონის ლაზერების სინათლის გამოყენება ტროფიკული წყლულების, გულის იშემიური დაავადებების და სხვათა სამკურნალოდ, ასევე კრიპტონისა და სხვ. ლაზერების გამოყენება ფოტოდინამიურ თერაპიაში სიმსივნეების ფოტოქიმიური დაზიანებისთვის.

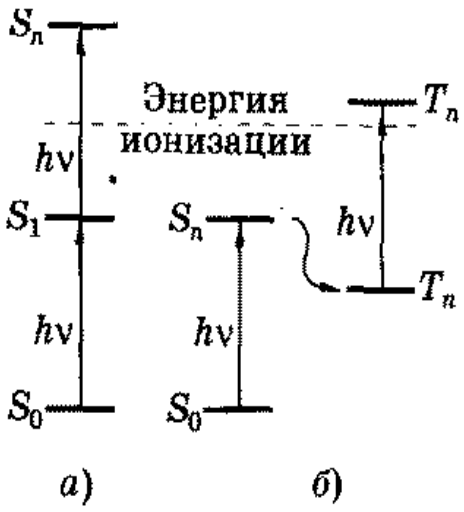
ხარისხობრივად ახალ მოვლენას აქვს ადგილი ხილული ან ულტრაიისფერი გამოსხივების დიაპაზონის მაღალ ინტენსიური ლაზერების გამოყენებისას. ლაბორატორიულ ფოტოქიმიურ ექსპერიმენტებში სინათლის ჩვეულებრივი წყაროების გამოყენებისას, ასევე ბუნებაში მზის სინათლის ზემოქმედებით, ჩვეულებრივ, ხორციელდება ერთფოტონიანი შთანთქმა. ამის შესახებ არის საუბარი ფოტოქიმიის მეორე კანონში, რომლის ფორმულირება მოგვცეს შტარკმა და ეინშტეინმა: ყოველი მოლეკულა, რომელიც სინათლის ზემოქმედებით მიმდინარე ქიმიურ რეაქციაში მონაწილეობს, შთანთქავს გამოსხივების 1 კვანტს, რომელიც იწვევს რეაქციას. მეორე კანონით აღწერილი ერთფოტონური შთანთქმა ხორციელდება იმიტომ, რომ სინათლის ჩვეულებრივი ინტენსივობების დროს პრაქტიკულად შეუძლებელია ძირითად მდგომარეობაში მყოფ მოლეკულაში ერთდროულად ორი ფოტონის მოხვედრა. ეს რომ შესაძლებელი იყოს, გამოსახულება მიიღებდა შემდეგ სახეს:

$2h\nu = E_i - E_k$,

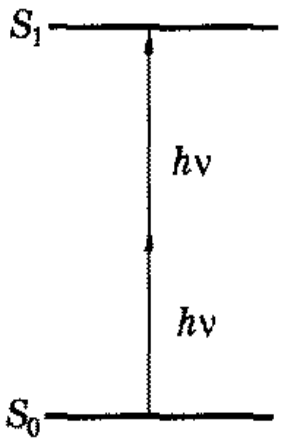
რაც მიანიშნებდა მოლეკულის E_k ენერგეტიკული მდგომარეობიდან E_i ენერგეტიკულ მდგომარეობაში გადასვლისთვის ორი ფოტონის ენერგიების შეკრებაზე. ასევე არ ხდება ფოტონების შთანთქმა ელექტრონულად აგზნებული მოლეკულების მიერ, რადგან მათი სიცოცხლის პერიოდი მოკლეა, ხოლო ჩვეულებრივ გამოყენებადი გამოსხივებების ინტენსივობები – მცირე. ამიტომ, ელექტრონულად აგზნებული მოლეკულების კონცენტრაცია და მათ მიერ კიდევ ერთი ფოტონის შთანთქმის ალბათობა უაღრესად დაბალია.

მაგრამ, იმ შემთხვევაში, თუ სინათლის ინტენსივობას გავზრდით, შესაძლებელი გახდება ორფოტონიანი შთანთქმა. მაგალითად, დნმ-ის ხსნარების დასხივება მაღალინტენსიური იმპულსური ლაზერით, რომლის გამოსხივების ტალღის სიგრძე, დაახლოებით, 266 ნმ-ია, იწვევს დნმ-ის მოლეკულების იონიზაციას, რაც γ-გამოსხივების მიერ გამოწვეული იონიზაციის მსგავსია. დაბალინტენსიური ულტრაიისფერი გამოსხივების ზემოქმედება არ იწვევს იონიზაციას. დადგენილია, რომ ნუკლეინმჟავების ან მათი ფუძეების წყალხსნარების პიკოწამური (იმპულსის ხანგრძლივობაა 30 პწმ) ან ნანოწამური (10 ნწმ) დასხივება 10^6 ვტ/სმ2 ინტენსივობის იმპულსებით იწვევს ელექტრონულ გადასვლებს, რომლებიც მოლეკულების იონიზაციით სრულდება. პიკოწამური იმპულსების შემთხვევაში მაღალი ელექტრონული დონეების შევსება ხდება $\left(S_0 \xrightarrow{h\nu} S_1 \xrightarrow{h\nu} S_n\right)$ სქემით მიხედვით, ხოლო ნანოწამური. იმპულსების შემთხვევაში – $\left(S_0 \xrightarrow{h\nu} S_1 \rightarrow T_1 \xrightarrow{h\nu} T_n\right)$ სქემით. ორივე შემთხვევაში მოლეკულები იღებდნენ ენერგიას, რომელიც იონიზაციის ენერგიას აღემატებოდა.

დნმ-ის შთანთქმის ზოლი მდეობარეობს სპექტრის ულტრაიისფერ დიაპაზონში, ტალღის სიგრძეზე $\lambda<315$ წმ, ხილულ სინათლეს ნუკლეინის მჟავები საერთოდ არ შთანთქავს. მაგრამ, 532ნმ გამოსხივების მაღალინტენსიური ლაზერით ზემოქმედებას დნმ გადაყავს ელექტრონულად აგზნებულ მდგომარეობაში ორი ფოტონის ენერგიების შეკრების ხარჯზე.



ნახ.11.20.

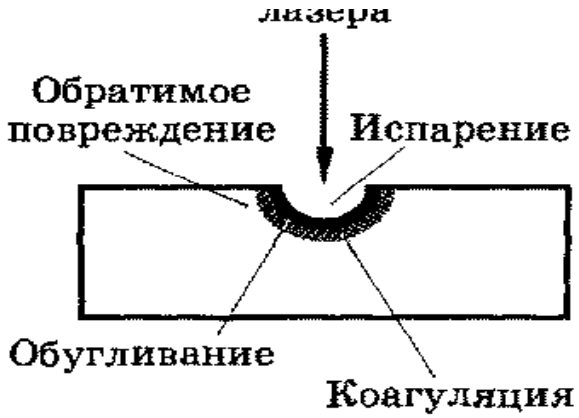


ნახ.11.21.

ნებისმიერი გამოსხივების შთანთქმა იწვევს გარკვეული რაოდენობის ენერგიის სითბოს სახით გამოყოფას, რომელიც აგზნებული მოლეკულებიდან გარემოში განიბნევა. ინფრაწითელი გამოსხივება, უმთავრესად, წყლით შთაინთქმება და ძირითადად სითბურ ეფექტებს იწვევს. ამიტომ, მაღალინტენსიური ინფრაწითელი ლაზერების გამოსხივება ქსოვილებზე მყისიერ და შესამჩნევ სითბურ ზემოქმედებას ახდენს. ლაზერული გამოსხივების სითბურ ზემოქმედებად მედიცინაში ითვლება, ძირითადად, აორთქლება (ჭრა) და ბიოქსოვილების კოაგულაცია. ეს ეხება სხვადასხვა ლაზერებს, რომელთა ინტენსივობა 1-დან 10^7 ვტ/სმ^2-ია, ხოლო დასხივების ხანგრძლივობა მერყეობს მილიწამიდან რამდენიმე წამამდე. მათ განეკუთვნება, მაგალითად, გაზური CO^2-ლაზერი (10.6 მკმ ტალღის სიგრძით), Nd:YAG-ლაზერი (1.064 მკმ) და სხვ. Nd:YAG-ლაზერი წარმოადგენს ყველაზე ფართოდ გამოყენებად ოთხდონიან მყარ ლაზერს. გენერაცია ხორციელდება Y3Al5O12 ნიტრიუმ-ალუმინიანი ძოწის (YAG) კრისტალებში შეყვანილი ნეოდიმის იონების (Nd3+) გადასვლების პროცესში. ქსოვილის გათბობასთან ერთად ხდება სითბოს ნაწილის გამოტანა სითბოგამტარობისა და სისხლის მიმოქცევის ხარჯზე. 40^0C დაბალ ტემპერატურებზე შეუქცევადი დაზიანებები არ შეიმჩნევა. 60^0C ტემპერატურებზე და ზევით იწყება ცილების დენატურაცია, ქსოვილების კოაგულაცია და ნეკროზი. $100 – 150^0C$ ტემპერატურები იწვევს

გაუწყლოვანებას და დანახშირებას, ხოლო 300^0C ტემპერატურების ზევით ქსოვილი ორთქლდება.

როდესაც გამოსხივება გამოდის მაღალინტენსიური ფოკუსირებული ლაზერიდან, გამოყოფილი სითბოს რაოდენობა დიდია და ქსოვილებში წარმოიქმნება ტემპერატურული გრადიენტი. სხივის დაცემის ადგილას ქსოვილი ორთქლდება, მის მიმდებარედ ხდება დანახშირება და კოაგულაცია (ნახ. 11.21.). ფოტოაორთქლება წარმოადგენს ქსოვილის შრო-ვან მოცილებას და დაჭრას. კოაგულაციის შედეგად სისხლძარღვები დუღაბდება და სისხლდენა ჩერდება. ასე მაგალითად, უწყვეტი მოქმედების CO^2-ლაზერის ფოკუსირებული სხივით (λ=10,6მ კმ), რომლის სიმძლავრე, დაახლოებით $2\cdot10^3$ ვტ/სმ^2-ის ტოლია, სარგებლობენ, როგორც ქირურგიული სკალპელით ბიოლოგიური ქსოვილების გასაჭრელად.



ნახ.11.21

თუ შევამცირებთ ზემოქმედების ხანგრძლივობას და გავზრდით ინტენსივობას, შესაძლებელი იქნება დანახშირებისა და კოაგულაციის ზონების ზომების უგულებელყოფა. ასეთ პროცესს ფოტოაბლაცია (ფოტომოცილება) ეწოდება და მას იყენებენ ქსოვილის შრე-შრედ მოსაცილებლად. ფოტოაბლაცია წარმოიქმნება ენერგიის 0.01 – 100 ჯ/სმ^2 სიმკვრივის დროს.

ინტენსივობის შემდგომი გაზრდით (10^{11} ვტ/სმ^2 და ზემოთ) განხორციელებადი ხდება კიდევ ერთი პროცესი – „ოპტიკური გარღვევა“.

ამ მოვლენის არსი ის არის, რომ ლაზერული გამოსხივების ელექტრული ველის ძალიან მაღალი (ატომისშიდა ელექტრული ველების დაძაბულობის რიგის) დაძაბულობის გამო ხდება მატერიის იონიზირება, წარმოიქმნება პლაზმა და გენერირდება მექანიკური დარტყმითი ტალღები. ოპტიკური გარღვევისთვის არ არის საჭირო ნივთიერების მიერ სინათლის კვანტების შთანთქმა, როგორც ეს ჩვეულებრივ ესმით. ამ მოვლენას ადგილი აქვს გამჭვირვალე გარემოში, მაგალითად ჰაერში.

თავი 12.
ატომების და მოლეკულების ფიზიკა

12.1კვანტური ბიოფიზიკის ელემენტები

XIX საუკუნის ბოლომდე ატომი ითვლებოდა როგორც განუყოფელი ნაწილი. მაგრამ ელექტრონის და სხვა ელემენტარული ნაწილაკების აღმოჩენამ დაარწმუნა მეცნიერები ატომის რთულ აგებულებაში.

ატომის სტრუქტურის გაგებისათვის გადამწყვეტი როლი ითამაშა რეზერ-ფორდის ცდებმა α-ნაწილაკების გაბნევის შესწავლისას. შეიქმნა წინაპირობა ატომის ფიზიკის განვითარების, რომელიც შეისწავლის ატომების შემადგენლობას და მდგომარეობას. ესენია: ატომის თეორია, ატომური და ოპტიკური სპექტროსკოპია, რენტგენული სპექტროსკოპია, რადიოსპექტროსკოპია და სხვა.

ექიმს უნდა ჰქონდეს წარმოდგენა ადამიანის ორგანიზმში ფიზიკურ და ფიზიკო-ქიმიურ პროცესების შესახებ. ეს თემები ერთიანდებიან ტერმინით ,,კვანტური ბიოფიზიკა‘‘.

12.2. ნაწილაკების ტალღური ბუნება კვანტური მექანიკის ელემენტები.

კვანტურ მექანიკას უწოდებენ თეორიას, რომელიც აღწერს მიკრონაწი-ლაკების კანონებს (ელემენტარული ნაწილაკების, ბირთვების, ატომების, მოლეკულების და მათი სისტემების, კერძოდ კრისტალების და სხვა). კვანტურ მექანიკური შეხედულებები, განსხვავდება კლასიკური ფიზიკის წარმოდგენისაგან. პირველ რიგში ეს განსხვავება შეეხო ნაწილაკების და მათი მოძრაობის პრინციპებს.

12.3. დე -ბროილის ჰიპოტეზა.ელექტრონის

დიფრაქციის ცდები

კვანტური მექანიკის შექმნის გადამწყვეტ ეტაპად ითვლება მიკრონაწილაკების ტალღური ბუნების დადგენა. იდეა ნაწილაკების ტალღური ბუნების შესახებ პირველად გამოთქვა როგორც ჰიპოტეზა ფრანგმა ფიზიკოსმა ლუი დე ბროილმა (1924 წ).

ფიზიკაში დიდი ხნის მანძილზე ბატონობდა თეორია, რომლის თანახმად სინათლე იყო ელექტრომაგნიტური ტალღა. მაგრამ პლანკის (სითბური გამოსხივება), აინშტაინის (ფოტოეფექტი) სამუშაოების შემდეგ ცხადი გახდა, რომ სინათლეს გააჩნია კორპუსკულარული ბუნება.

სინათლე უნდა განვიხილოთ, როგორც ნაწილაკების ფოტონების – ნაკადი. კორპუსკულარული თეორია არა თუ უარყოფს, არამედ ამტკიცებს მის ტალღურ ბუნებას. ე.ი. ფოტონს – ელემენტარული ნაწილაკს – რომელიც მოძრაობს სინათლის სიჩქარით, გააჩნია ტალღური ბუნება და აქვს ენერგია:

$$\varepsilon = h\nu$$

სადაც ν – სინათლის ტალღის სიხშირეა.

ლოგიკურია აღვნიშნოთ, რომ ელექტრონებსაც და ნეიტრონრბსაც გააჩნიათ ტალღური თვისებები.

ფოტონის იმპულსის $p_{ფ}$ გამოსახულება მიიღება აინშტაინის ცნობილი ფორმულიდან

$\varepsilon = m ც^2$ და დამოკიდებულებიდან $\varepsilon = h/\nu$ და $p_{ფ} = m ც$

$$p_{ფ} = h\nu/ც = h/\lambda \qquad (12.1)$$

სადაც ც – სინათლის სიჩქარეა ვაკუუმში, λ – სინათლის ტალღის სიგრძე.

ეს ფორმულა გამოიყენა დე-ბროილმა სხვა მიკრონაწილაკებისათვის m მასით, რომლებიც მოძრაობენ v -სიჩქარით:

$p = m\,v = \hbar/\lambda$

საიდანაც $\lambda = \hbar / mv = \hbar/p$ (1232)

დე – ბროილის მიხედვით, ნაწილაკის მოძრაობა, მაგ. ელექტრონის აღიწერება ტალღური პროცესით ტალღის სიგრძით λ. ამ ტალღებს უწოდებენ დე -ბროილის ტალღებს.

ამ ჰიპოტეზამ წლების შემდეგ მიიღო ექსპერიმენტალური დამტკიცება, აღმოჩენილ იქნა ელექტრონების დიფრაქცია.

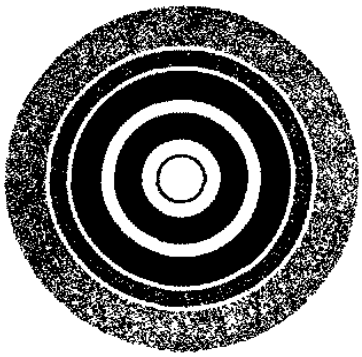
ვიპოვოთ ელექტრონების ტალღის სიგრძის დამოკიდებულება ველის U დაძაბულობისგან, რომელშიც ის მოძრაობს. ელექტრონის ელექტრონის კინეტი-კური ენერგიის ცვლილება ტოლია ველის ძალების მუშაობის:

$E_к = A$, ან $mv^2/2 = eU$

ვიპოვოთ აქედან v სიჩქარე და ჩავსვათ (23.2) – ში, მივიღებთ

$$\lambda = h / \sqrt{2meU} \qquad (12.3)$$

ამ შემთხვევაში, როცა დაძაბულობა ტოლია 1 კვ. $\lambda = 0.4^{10} – 10$ მვ, რაც შეესაბამება რენტგენული გამოსხივების ტალღას.



ნახ.12.1

კ. დევიდსონი და ლ. დჟერმერი პირველად აკვირდებოდნენ ელექტრონის დიფრაქციას ნიკელის მონოკრისტალზე, ჯ. ტომსონი და პ. ს ტარტაკოვსკი – მეტალის ფოლგაზე. სურ. 12.1 გამოსახულია ელექტროგრამა – პოლიკრისტალი ფოლგაში.

დიფრაგირების თვისებით ხასიათდებიან სხვა ნაწილაკებიც, როგორც დამუხტული (პროტონები, იონები და სხვა), ისე ნეიტრალური (ნეიტრონები, ატომები, მოლეკულები). ბოლო დროს დიდი გამოყენება აქვს ელექტრონოგრაფიის მეთოდს (ელექტრონების დიფრაქცია) და ნეიტრონოგრაფიას (ნეიტრო-

ნების დიფრაქციას). ელექტრონების ნაკადის დიფრაქციის ცდებმა აჩვენეს რომ ამ დროს ელექტრონი არ განიბნევა სხვადასხვა მიმართულებით, არამედ იქცევა როგორც შეესაბამება მაქსიმუმებს დიფრაქციაზე, ნაკლებ სავარაუდოა მინიმუმში მოხვედრა. ე.ი. ტალღური ბუნება ახასიათებს არა მარტო ელექტრონების კოლექტივს, არამედ თითოელ ელექტრონს.

12.4. ელექტრონული მიკროსკოპი

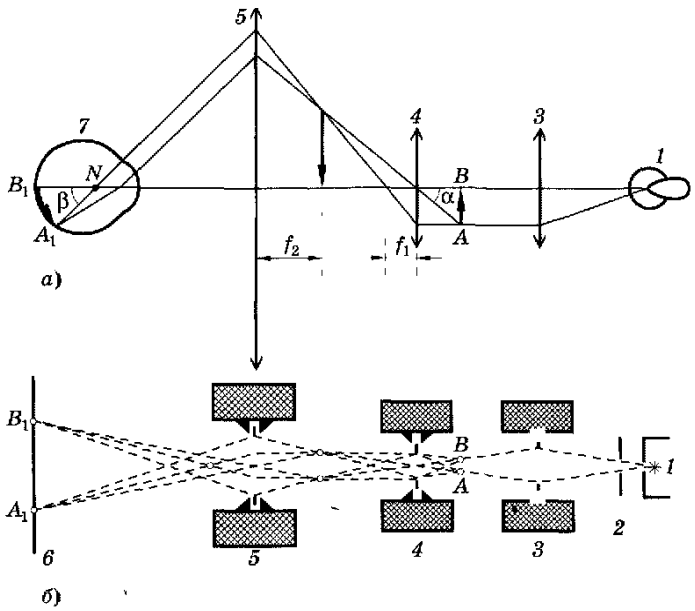
ელექტრონული ოპტიკის შესახებ

ნაწილაკების ტალღური თვისება გამოიყენება არა მარტო დიფრაქციული სტრუქტურული ანალიზისათვის, არამედ სხეულის გადიდებული გამოსახულების მისაღებად.

ელექტრონების ტალღური ბუნების აღმოჩენამ საშუალება მისცა შექმნილიყო ელექტრონული მიკროსკოპი. იმისათვის რომ გავიგოთ ელექტრონული მიკროსკოპის გარჩევის ზღვარი, ფორმულაში ჩავსვათ დე ბროილის ტალღის სიგრძის მნიშვნელობა. ვიპოვოთ ელექტრონული მიკროსკოპის გარჩევის ზღვარი

$$Z = \frac{O,5h}{\sqrt{2emU}n\sin\frac{u}{2}} \qquad (12.41)$$

ჩანს, რომ z ელექტრონული მიკროსკოპის გარჩევის ზღვარი დამოკიდებულია აჩქარებულ დაძაბულობაზე U.



(სურ. 12.2)

ელექტრონული მიკროსკოპი და მისი ელემენტები, არის ისეთივე როგორც ოპტიკური მიკროსკოპის. ამიტომ გამოვიყენებთ ოპტიკას ამის ასახსნელად. ორივე მიკროსკოპის სქემები გამოსახულია (სურ. 12.2). (ა – ოპტიკური, ბ – ელექტრონული).

ოპტიკურ მიკროსკოპში ინფორმაციის მატარებელია *AB* სხეულის შესახებ ფოტონები, სინათლე. სინათლის წყაროდ გამოიყენება ვარვარების ნათურა 1. სხეულთან ურთიერთქმედების შემდეგ (შთანთქმა, გაბნევა, დიფრაქცია) ფოტონების ნაკადი გარდაიქმნება და გააჩნია სხეულის შესახებ ინფორმაცია. ფოტონების ნაკადი ფორმირდება ლინზების დახმარებით: კონდესორი – 3, ობიექტივი – 4, okულარი – 5.

გამოსახულება A_1,B_2 რეგისტრირდება თვალის მეშვეობით-7. (ან ფოტოპლანშეტით, ფოტოლუმინისცერებული ეკრანით და სხვა). ელექტრონულ მიკროსკოპში ინფორმაციის მატერებელი სხეულის შესახებ არის ელექტრონები, მისი წყაროა – გახურებული კათოდი *1*.

ელექტრონის აჩქარება ნაკადის წარმოშობა ხორციელდება ფოკუსირებული ელექტროდით და ანოდით – სისტემით, რომელსაც ეწოდება ელექტრონული ზარბაზანი – 2, სხეულთან ურთიერთქმედების

შემდეგ ელექტრონის ნაკადი გარდა- იქმნება და აქვს ინფორმაცია სხეულის შესახებ. ელექტრონის ნაკადის ფორმირება ხდება ელექტრული ველის (ელექტროდის და კონდენსატორის სისტემა)და მაგნიტური (ხვიების დენის სისტემა). ამ სისტემებს უწოდებენ ელექტრონულ ლინზებს, რომლების ახდენენ სინათლის ნაკადის ფორმირებას (3 – კონდენსატორი, 4 – ელექტრონული ობიექტივი, 5 – პროექციული). გამოსახულება რეგისტრირდება ან ფოტოფირზე ან კათოდო-ლუნისცირებულ ეკრანზე – 6.

ვაჩვენოთ ელექტრონული მიკროსკოპის ექსპლუატაციის ზოგიერთი თავისებურება. იმ ნაწილში, სადაც მიფრინავენ ელექტრონები უნდა იყოს ვაკუუმი, თუ ვაკუუმი არ იქნა ელექტრონების დაჯახება ჰაერის მოლეკულებთან (გაზი) მივყავართ გამოსახულების დამახინჯებასთან. ეს მოთხოვნა ელექტრულ მიკროსკოპში ართულებს გამოკვლევის პროცედურას და ხდის აპარატურას ძალიან დიდს და ძვირს.

ვაკუუმი აღიზიანებს ბიოლოგიურ ობიექტებს, ზოგ შემთხვევაში შლის ან ახდენს დეფორმაციას. ელექტრონულ მიკროსკოპიაში იყენებენ თხელ ჩამონათვალს (სისქე 0,1 მკმ), ელექტრონები ძლიერად შთაითქმებიან და განიბნევიან ნივთიერებაში. უჯრედების, ვირუსების და მიკროობიექტების ზედაპირის გეომეტრიული სტრუქტურის გამოკვლევისას აკეთებენ ამონაბეჭდს პლასტმასის თხელ ფენაზე. მასზე აფრქვევენ მძიმე მეტალს (პლატინას).

ელექტრონული მიკროსკოპის უპირატესობად შეიძლება ჩაითვალოს მისი დიდი გარჩევისუნარიანობა, რომელიც იძლევა საშუალებას დავაკვირდეთ დიდ მოლეკულებს. ოპტიკის კანონები შეიძლება გამოვიყენოთ დამუხტული ნაწილაკების მოძრაობის აღსაწერად მაგნიტურ და ელექტრულ ველში.

ეს ანალოგია იძლევა საშუალებას გამოვყოთ როგორც დამოუკიდებელი განყოფილება – ელექტრონული ოპტიკა, – ფიზიკის ნაწილი, რომელშიც შეისწავლება დამუხტული ნაწილაკების სტრუქტურა. ელექტრონული ოპტიკა შეიძლება დავყოთ გეომეტრიულ (სხივური) და ტალღურ (ფიზიკური) ნაწილებად.

ელექტრონული გეომეტრიული ოპტიკის საზღვრებში შესაძლებელია აღიწეროს დამუხტულ ნაწილაკთა მოძრაობა ელექტრულ და მაგნიტურ

ველებში და აგრეთვე გამოსახულების სქემატური აგება ელექტრონულ მიკროსკოპში.

12.5. ტალღური ფუნქცია და მისი ფიზიკური აზრი.

ნაწილაკის მდებარეობა კვანტურ მექანიკაში აღიწერება ტალღური ფუნქციით, რომელიც დამოკიდებულია კოორდინატზე და დროზე ψ (x, y, z, t).

თუ ძლიერი ველი, რომელიც მოქმედებს ნაწილაკზე, არის სტაციონალური ე.ი. არ არის დროზე დამოკიდებული, მაშინ ψ ფუნქცია შეიძლება წარმოვიდგინოთ ორი მამ-

რავლის ნამრავლისაგან, ერთი დამოკიდებულია დროზე, მეორე კოორდინატზე.

$$\psi (x, y, z, t)= f (t) \psi (x, y, z) \qquad (12.5)$$

მომავალში განვიხილავთ მარტო სტაციონალურ მდგომარეობას.

სივრცეში გამოვყოთ მარტო მცირე მოცულობა $dV = dxdydz$, სადაც ψ ფუნქცია შეიძლება ჩავთვალოთ ერთნაირი. ამ მოცულობაში dW ნაწილაკის ალბათური ყოფნა პროპორციულია მოცულობის და მ.ბორის თანახმად განისაზღვრება ψ ფუნქციის მოდულის კვადრატით.

$$dW_ა = |\psi|^2 dV \qquad (12.6)$$

აქედან გამომდინარეობს ტალღური ფუნქციის ფიზიკური აზრი:

$$|\psi|^2 = dW_ა / dV \qquad (23.7)$$

ე.ი. ტალღური ფუნქციის მოდულის კვადრატი ტოლია სიმკრივის ალბათობის. (23.6)

განტოლების ინტეგრირებით რაღაც V მოცულობაში, ვღებულობთ ამ მოცულობაში

ნაწილაკის ყოფნის ალბათობას

$$W_{ა} = \int |\psi|^2 \, dV \qquad (23.8)$$

აქედან ვღებულობთ ტალღური ფუნქციის ნორმირების პირობას

$$\int |\psi|^2 \, dV = 1$$

სადაც ინტეგრირება ხდება მთელ უსასრულო სივრცეში, სადაც ნაწილაკის ყოფნის ალბათობა ერთის ტოლია.

12.6. განუზღვრელობის თანაფარდობა

კვანტურიმექანიკის უმნიშვნელოვანეს მოვლენას წარმოადგენს განუზღვრელობის თანაფარდობა, რომელიც შემოთავაზებულ იქნა ვ. გეიზენბერგის მიერ. არსებობენ ფიზიკური ნაწილაკების სხვადასხვა წყვილები, რომლებიც განსაზღვრა შესაძლებელია შეზღუდული სიზუსტით. ვთქვათ ერთდროულად ზომავენ ნაწილაკის მდგომარეობას და იმპულსს,ამ დროს კოორდინატისა და იმპულსის გაზომვის განუზღვრელობა, მაგ. x , ტოლია Δx და Δp_x.

კლასიკურ მექანიკაში არ არის არავითარი შეზღუდვა, რომ გავზომოთ როგორც ერთი ისე მეორე სიდიდე, ე.ი. $\Delta x \to 0$ და $\Delta p_x \to 0$. კვანტურ მექანიკაში მდგომარეობა უფრო სხვაა: Δx და Δy დაკავშირებულია დამოკიდებულებით:

$$\Delta x \quad \Delta p_x \geq \frac{h}{2\pi} \qquad (12.9)$$

მაშასადამე, რაც უფრო ზუსტადაა განსაზღვრული კოორდინატთა $x(\Delta x \to 0)$, მით ნაკლებად ზუსტადაა განსაზღვრული იმპულსის პროექცია p_x ($\Delta p_x \to \infty$) და პირიქით.

ანალოგიურად x და z -სთვის.

$$\Delta y \Delta py \geq \frac{h}{2\pi} ; \Delta z \Delta pz \geq \frac{h}{2\pi} ; \qquad (12.10)$$

(12.9), (12.10) ფორმულებს ეწოდება კოორდინატის სა იმპულსის განუზღვრელობის თანაფარდობა. გამოთვლები, ჩატარებული ელექტრონისათვის აჩვენებენ რომ მისი ლოკალიზება ატომის ბირთვის შიგნით შეუძლებელია, რადგანაც ამ შემთხვევაში მისი სიჩქარის განუზღვრელობა სინათლის სიჩქარეზე მეტია. მართლაც, თუ $\Delta x \approx 10^{-14}$ მ. (ატომის ბირთვის ზომა), მაშინ (12.9) – დან ჩანს რომ Δpx უნდა

გადააჭარბოს $\frac{h}{2\pi}$ $1/\Delta x = 1{,}06\ 10 - 20$ ჯ/მწმ, აქედან ელექტრონის სიჩქარის

განუზღვრელობა $\Delta v \geq \frac{\Delta p_x}{m} = \frac{1{,}06 10^{-20}}{9{,}1 10^{31}} = 1{,}16\ 10^{10}$ მ/წმ, მაშინ როცა სინათლის სიჩქარე უდრის $3\ 10^{8}$ მ/წმ.

კიდევ ერთ წყვილს წარმოადგენს E და დრო t. ამ ცვლადების განუზღვრელობის თანაფარდობას აქვს შემდეგი სახე:

$$\Delta E \Delta t \geq \frac{h}{2\pi} \qquad (12.11)$$

სადაც ΔE – ენერგიის განუზღვრელობაა, Δt – მისი არსებობის დრო. (12.11) დამოკი -

დებულება აჩვენებს, რომ რაც უფრო მცირეა რაღაც სისტემის არსებობის დრო, მით მეტია ამ მდგომარეობის ენერგიის განუზღვრელობა.

ერთი ენერგეტიკული მდგომარეობიდან მეორე ენერგეტიკულ მდგომარეობაში

სისტემის გადასვლისას ადგილი აქვს ფოტონის (ΔE) და მისი სიხშირის (Δv) ენერგიის განუზღვრელობას.

$\Delta E = \Delta (hv) = h\Delta v$ (12.12)

ეს ექსპერიმენტალურად ვლინდება სპექტრული ხაზების გაფართოებაში.

12.7. შრედინგერის განტოლება. ელექტრონი პოტენციალურ ორმოში.

მიკრონაწილაკების მდგომარეობა აღიწერება ψ ფუნქციით, ამიტომ უნდა მივუთითოთ ამ ფუნქციის პოვნის საშუალება გარე პირობების გათვალისწინებით. ეს შესაძლებელია კვანტური მექანიკის ძირითადი განტოლების ამოხსნით, რომელიც მიიღო ე. შრედინგერმა 1926 წელს. ასეთი განტოლება კვანტურ მექანიკაში იგივეა, რაც კლასიკურში ნიუტონის კანონი (ნიუტონი II კანონი).

ნაწილაკის სტაციონალური მდგომარეობისათვის შრედინგერის განტოლება ჩაიწერება:

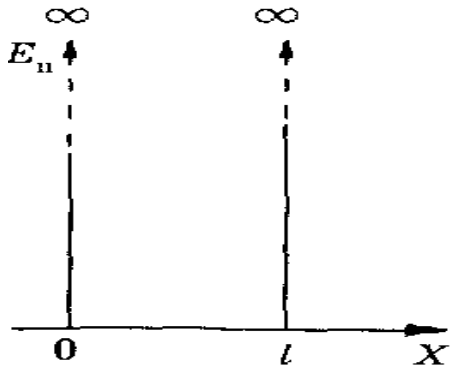
$$\frac{\partial^2\Psi}{\partial} + \frac{\partial^2\Psi}{\partial} + \frac{\partial^2\Psi}{\partial} + \frac{8\pi^2 m}{h^2}(\mathrm{E} - \mathrm{E}\,\mathrm{n})\,\psi = 0. \qquad (12.13)$$

სადაც m – ნაწილაკის მასაა, E და $E\,n$ – მისი სრული პოტენციალური ენერგიაა.

თუ ნაწილაკი გადაადგილგება ox ღერძის გასწვრივ შრედინგერის განტოლება მარტივდება და ჩაიწერება:

$$\frac{\partial^2\Psi}{\partial} + \frac{8\pi^2 m}{h^2}(E - E\,n)\,\psi = 0. \qquad (12.14)$$

შრედინგერის განტოლების გამოყენების მარტივ მაგალითს წარმოადგენს ნაწილაკის მოძრაობის ამოცანის ამოხსნა „პოტენციალურ ორმოში“.



ნახ.12.7

ვთქვათ, ელექტრონი გადაადგილდებოდა OX ღერძის გასწრივ $O < x < l$ საზღრებში. (სურ. 12.7). ეს ნიშნავს, რომ მოცემულ ინტერვალში ψ ფუნქცია განსხვავებულია ნულისაგან, ხოლო ინტერვალს გარეთ ($x \leq 0, x \geq l$) ტოლია ნოლის. ნაწილაკზე გამოყოფილ ინტერვალში $O < x < l$ ძალოვანი ველი არ მოქმედებს, პოტენციალურ ენერგიას შეიძლება ქონდეს ნებისმიერი მუდმივი მნიშვნელობა ($E_n = 0$). ამ ინტერვალს გარეთ ელექტრონი არ არის, ე.ი. ელექტრონს არ შეუძლია გავიდეს ინტერვალის საზღვრებს გარეთ, ამიტომ ($x \leq 0, x \geq l$) უბანში შეიძლება ჩავთვალოთ პოტენციალური ენერგია ძალიან დიდად, ხოლო ტალღური ფუნქცია 0 – ს ტოლად.

($\psi = 0$). სურ. 12.7 ნაჩვენებია გრაფიკული დამოკიდებულება ($E_n = f(x)$. $O < x < l$ ინტერვალს, უწოდებენ ერთგანზომილებიანი პოტენციალურ ორმოს უსასრულოდ მაღალი კედლებით.

$En = 0$ გათვალისწინებით შრედინგერის განტოლებას (23.14) $O < x < l$ ინტერვალისათვის აქვს სახე:

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{8\pi^2 m}{h^2} E\psi = 0 \qquad (12.14)$$

გაცვლის შემდეგ

$$\varpi^2 = 8\pi^2 E / h^2 \qquad (12.15)$$

მივიღებთ

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \omega^2 \psi = 0 \qquad (12.16)$$

ეს განტოლება არის ჰარმონიული რხევითი დეფერენციალური განტოლების ანალოგიური. ამოხსნა ჩავწეროთ

$$\psi = \psi_0 \cos(\omega x + \varphi_0) \qquad (12.17)$$

სადაც ψ_0 - ტალღური ფუნქციის ამპლიტუდა, φ_0 – მისი საწყისი ფაზა.

რომ ვიპოვოთ 2 მუდმივი ψ_0 და φ_0, ასევე ϖ ან E, ვიპოვოთ სასაზღვრო პირობები

1) როცა x=0, ψ_0 =0

2)) როცა x=l, ψ_0 =0

ჩავსვათ ეს მნიშვნელობები (23.17)-ში, მივიღებთ

0= φ_0 ცos(0+ φ_0)= φ_0 ცos φ_0

ფიზიკურ აზრს აქვს მხოლოდ ერთი მნიშვნელობა

ცos φ_0 = 0, საიდანაც φ_0 = $\frac{\pi}{2}$

(23.17) გათვალისწინებით გვაქვს 0 = φ_0 ცos$\left(\varpi l + \frac{\pi}{2}\right)$

ფიზიკურ აზრს აქ აქვს მხოლოდ ერთი მნიშვნელობა ცos$\left(\varpi l + \frac{\pi}{2}\right)$ =0

საიდანაც

$$\omega = \frac{n\pi}{2} \qquad (12.18)$$

სადაც n -მთელი რიცხვია, ღებულობს მნიშვნელობებს 1,2,3....., n. n-უწოდებენ კვანტურ რიცხვს. (23.16) -დან ვიპოვოთ ენერგია

$$E=\frac{h^2\omega^2}{8ml^2}n^2$$

რაც (12.18) გათვალისწინებით გვაძლევს

$$E\,n=\frac{h^2}{8ml^2}n^2 \qquad (23.19)$$

ინდექსი n გვიჩვენებს, რომ კვანტური რიცხვი სხვადასხვა მნიშვნელობებს შეესაბამება სხვადასხვა ენერგია.

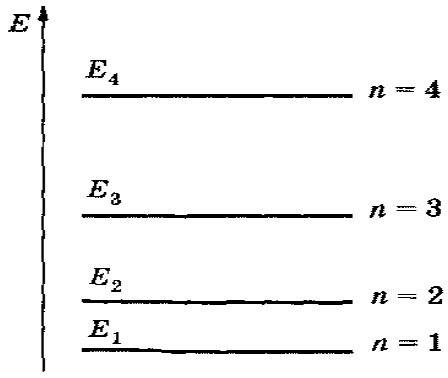
ჩავსვათ ω (12.18)-დან (23.17)-ში და გავითვალისწინოთ $\varphi_0=\frac{\pi}{2}$ მივიღებთ

$$\psi=\psi_0 \text{ცos(n x } \frac{\pi}{l}+\frac{\pi}{2}) \qquad (23.20)$$

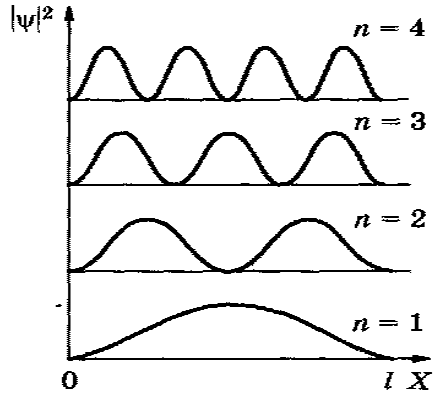
გავაანალიზოთ გამოსახულება (12.19) და (12.20). აღსანიშნავია,რომ შრედინგერის განტოლების ამოხსნას ელექტრონისათვის პოტენციალურ ორმოში მივყავართ დისკრეტულ, ენერგიის დაკვანტვის მნიშვნელობასთან

$$E_1=\frac{h^2}{8ml^2}, E_2=\frac{h^2}{8ml^2}4$$ და ა.შ.

E_1,E_2, E_3, E_4 ენერგეტიკული დონეები სქემატურად ნაჩვენებია სურ.12.8



ნახ.12.8



ნახ.12.9

გამოვთვალოთ ენერგიების სხვაობა მეზობელ დონეებზე n+1 და n:

$$\Delta E = E_{n+1} - E_n = \frac{h^2(n+1)^2}{8ml^2} - \frac{h^2n^2}{8ml^2} = \frac{h^2(2n+1)}{8ml^2} \qquad (23.21)$$

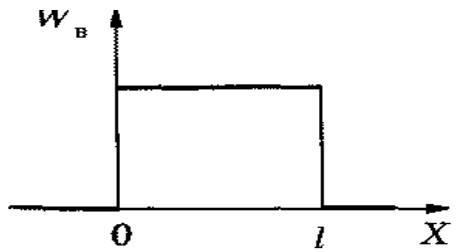
(23.21)-დან ჩანს, n დისკრეტულობა, ე.ი. ენერგიების განსხვავება მეზობელ დონეებზე იმდენად მცირეა, რამდენით მეტია პოტენციალური ორმოს ზომა. განვიხილოთ ორი შემთხვევა როცა n=1.

1). l=5 ^{10} -5მ-ს, მაშინ $\Delta E = 4{,}5$ ევ.

2). l=10 -1მ-ს, ეს შეესაბამება პოტენციალური ორმოს ისეთ სიგანეს, რომ ელექტრონი შეიძლება ჩაითვალოს თავისუფალ ნაწილაკად. ამ დროს $\Delta E = 1{,}1 10^{-6}$ ევ. აქ დისკრეტულობა მცირეა, შეიძლება ჩაითვალოს რომ ელექტრული ენერგია იცვლება უწყვეტად.

თუ (12.20) ავიყვანთ კვადრატში, მივიღებთ $|\psi|^2$ ელექტრონის სიმკრივის ალბათობას პოტენციალურ ორმოში.

სურ. 12.9 ნაჩვენებია გრაფიკული დამოკიდებულება $|\psi|^2$ x-სგან სხვადასხვა დისკრეტული მდგომარეობისათვის, ე.ი.სხვადასხვა კვანტური რიცხვისათვის. როგორც ჩანს სურათიდან ელექტრონს შეუძლია სხვადასხვა ალბათობით იმყოფებოდეს პოტენციალური ორმოს სხვადასხვა ადგილას. არის ისეთი წერტილები, სადაც ელექტრონის ყოფნა =0-ს. ეს განსხვდება კლასიკური ფიზიკის წარმოდგენისგან, სადაც ნაწილაკის ყოფნა პოტენციალურ ორმოში თანაბარია. (სურ.12.8). ე.ი. შეუძლებელია ორმოს დაყოფა წერტილებით.



ნახ.12.8

შრედინგერის განტოლება შეიძლება გამოვიყენოთ უფრო რთულ ძალურ ველებთან, მაგ.ელექტრონი ატომში.

12.8. შრედინგერის განტოლების გამოყენება წყალბადის ატომისათვის. კვანტური რიცხვები.

ატომისა და მოლეკულების აღწერა შრედინგერის განტოლებით წარმოადგენს რთულ ამოცანას. შედარებით მარტივად იხსნება ერთი ელექტრონისათვის, რომელიც იმყოფება ბირთვის ველში. ასეთი სისტემები შეესაბამებიან წყალბადის ატომს. უპირველეს ყოვლისა შრედინგერის განტოლებაში (12.13) საჭიროა შევიტანოთ პოტენციალური ენერგია, რომელიც ორი წერტილოვანი მუხტისათვის – e (ელექტრონი) და ze (ბირთვი), რომლებიც იმყოფებიან r მანძილძე ვაკუუმში, გამოისახება შემდეგნაირად

$$E = \frac{(-e)Ze}{4\pi\varepsilon_0 r} = \frac{Ze^2}{4\pi\varepsilon_0 r} \qquad (12.22)$$

ჩავწეროთ სფერულ კოორდინატებში

$$\psi(r,\theta,\varphi) = f_1(r)\ f_2(\theta)\ f_2(\varphi) \qquad (12.23$$

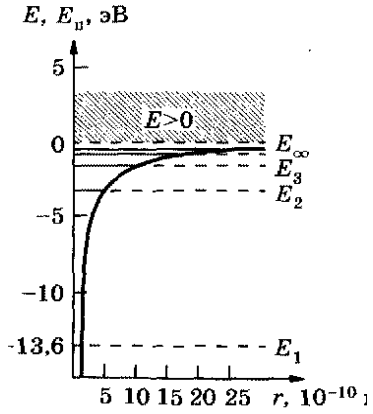
წყალბადის ატომისათვის ვღებულობთ ფუნქციებს $f_1,\ f_2\ f_3$.

შრედინგერის განტოლების ამოხსნით შემოყავთ სამი კვანტური რიცხვი. კვანტური რიცხვი ეწოდება მთელ (0, ± 1, ± 2) ან ნახევარ (± 1/2, ± 3/2, ± 5/2) რიცხვებს

პირველი – მთავარი კვანტური რიცხვი n = 1,2,3 .....ის განსაზღვრავს წყალბადის ატომში ელექტრონის ენერგიის დონეებს (z = 1)

$$E = \frac{-8e^4 z^2}{8\varepsilon_0{}^2 h^2 n^2} \qquad (12.24)$$

სურ.12.10 დაშტრიხული წრფეებით ნაჩვენებია წყალბადის ატომში სრული ენეერგიის დონეების მნიშვნელობები ელექტრონისათვის (E_1, E_2, E_3) და პოტენციალური ენერგიის დამოკიდებულების გრაფიკი r მანძილზე ელექტრონსა და ბირთვს შორის.



ნახ.12.10

მთავარი კვანტური რიცხვის *n* ზრდით დიდდება *r*. ხოლო სრული და პოტენციალური ენერგია მიისწრაფის 0-სკენ. კინეტიკური ენერგიაც მიისწრაფის 0-სკენ.

მეორე – ორბიტალური კვანტური რიცხვი l, რომელიც ღებულობს მნიშვნელო-ბებს 0, 1, 2 ..... $n-1$. ეს რიცხვი ახასიათებს ელექტრონის იმპულსის L_I ორბიტალურ მომენტს:

$$L_I = \frac{h}{2\pi}\sqrt{l(l+1)} \qquad (12.25)$$

მესამე კვანტური რიცხვი – მაგნიტური კვანტური რიცხვი m_I, რომელიც ღებულობს მნიშვნელობებს 0, ± 1, ± 2, ... ± l, სულ $2l+1$მნიშვნელობას.

$$L\ Iz = \frac{h}{2\pi} m_i \qquad (12.26)$$

მეოთხე კვანტური რიცხვი – სპინური კვანტური რიცხვი m_s. მას აქვს მნიშვნე-ლობა (± 1/2).

$$L\,sz = \frac{h}{2\pi} m_s \qquad (12.27)$$

ატომში ელექტრონების მდგომარეობას აღნიშნავენ შემდეგნაირად: *1s*, 2*s*, 2*p*, 3*s* და სხვა. აქ ციფრი უთითებს მთავარი კვანტური რიცხვის მნიშვნელობას, ხოლო ასო -ორბიტალურ კვანტურ რიცხვს: *s, p, d, f* სიმბოლოებს შეესაბამება მნიშვნელობა l =0,1,2,3.

მდგომარეობის რიცხვი ტოლია 2(2*l*+1). რომ ვიპოვოთ მდგომარეობის საერთო რიცხვი, ავჯამოთ 2(2*l*+1) შემდეგი მნიშვნელობებით *l* =0 დან *l* = n – 1 -მდე.

$$\sum 2(2l+1) = 2\pi^2 \qquad (12.28)$$

ე.ი. წყალბადის ატომის ენერგიის ერთ დონეს შეესაბამება ელექტრონის ორი მდგომარეობა, მეორეს რვა, მესამეს თვრამეტი.(ცხრილი 30).

ელექტრონის ატომში ყოფნის კარგ წარმოდგენას იძლევა ელექტრული ღრუბელის ფოტომოდელი (სურ.12.11). სურათები გადაღებულია ანთებული ნათურის მოდელით.

სპინური და მაგნიტური მომენტები ურთიერთქმედებენ ერთმანეთთან, ეს ცვლის ატომის ენერგეტიკულ დონეების სისტემას. სპინ-ორბიტალური ურთიერთქმედება იწვევს ენერგეტიკულ დონეების გახლეჩვას და გამოსხივების სპექტრალური ხაზების ნაზი სტრუქტურის წარმოქმნას. აქ და მაგივრად გამოიყენება სხვა კვანტური რიცხვები

კვანტური რიცხვი *j* გამოსახავს ელექტრონის იმპულსის სრული მომენტის *Lj* დისკრეტულ მნიშვნელობას:

$$Lj = \frac{h}{2\pi}\sqrt{j(j+1)} \qquad (12.29)$$

ღებულობს მნიშვნელობას:

$$J = l \pm \frac{1}{2}$$

მაგნიტური კვანტური რიცხვი m j ჩაიწერება:

$$Lj\ z = \frac{h}{2\pi} m_j \qquad (12.30)$$

მოცემული *j* კვანტური რიცხვი m j ღებულობს 2j+1 მნიშვნელობას: *-j,-j+1,…..*+j.

12.9. ბორის თეორია

1913 წელს დანიელმა ფიზიკოსმა ნ. ბორმა წარმოადგინა თეორია წყალბადის ატომის შესახებ, რომელიც ეყრდნობოდა პლანეტარულ მოდელს და 2 პოსტულატს.

ბორის პოსტულატები ვერ ჯდებოდა კლასიკური ფიზიკის ჩარჩოებში.

პირველი პოსტულატის თანახმად, ატომებს და ატომურ სისტემებს დიდი ხანი შეუძლიათ იმყოფებოდნენ განსაზღვრულ სტაციონალურ მდგომარეობაში. ამ მდგომარეობაში ყოფნისას, ატომი არც ასხივებს და არც შთანთქავს ენერგიას. სტაციონალური მდგომარეობა შეესაბამება ენერგიის დისკრეტულ მნიშვნელობას:

E_1, E_2 …… ატომის ენერგიის ნებისმიერი ცვლილება დაკავშირებულია ერთი სტაციონალური მდგომარეობიდან მეორე სტაციონალურ მდგომარეობაში გადასვლასთან.

მეორე პოსტულატის მიხედვით ატომის ერთი მდგომარეობიდან მეორე მდგომარეობაში გადასვლისას ატომი ასხივებს ან შთანთქავს ფოტონს ν, რომლის ენერგია გამოისახება E_I, E_k. ენერგიის სხვაობით:

$$h\nu = E_l - E_k \qquad (12.31)$$

გადასვლა მაღალი ენერგეტიკული მდგომარეობადან უფრო მცირე ენერგიით მდგომარეობაში იწვევს ფოტონის გამოსხივებას. პირიქით პროცესს ახლავს ფოტონის შთანთქმა.

ბორის თეორიის თანახმად წყალბადის ატომში ელექტრონები ბრუნავს ბირთვის ორბიტის გარშემო. იმპულსის მომენტი

$$mv_n r_n = \frac{h}{2\pi} n \text{, n=1,2,3……} \qquad (12.32)$$

სადაც m – ელექტრონის მასა, v_n -მისი სიჩქარე, r_n -მისი რადიუსი.

ელექტრონზე, რომელიც წრიულ ორბიტაზე ბრუნავს, მოქმედებს კულონის მიზიდულობის ძალა

$$\frac{Z_e e}{4\pi\varepsilon_0 r^2{}_n} = \frac{Ze^2}{4\pi\varepsilon_0 r_n^{\,2}} = \frac{mv^2{}_n}{r_n} \qquad (12.33)$$

სადაც e-ელექტრული მუხტი, Ze-ბირთვის მუხტი .წყალბადისათვის z=1, გამოვრიცხოთ v_n (12.32 და 12.33)-ში, მივიღებთ

$$l = \frac{\varepsilon_0 h^2 n^2}{nZe^2 m} \qquad (12.34)$$

(12.33) გამოყენებით ვიპოვით ელექტრონის კინეტიკურ ენერგიას

$$E_k = \frac{mv^2{}_n}{2} = \frac{Ze^2}{8\pi\varepsilon_0 r} \qquad (12.35)$$

ხოლო კინეტიკური (12.35) და პოტენციალური (12.22) ენერგიების ჯამი გვაძლევს ელექტრონის სრული ენერგია.

$$E = E_k + E_p = \frac{Ze^2}{8\pi\varepsilon_0 r_n} - \frac{Ze^2}{4\pi\varepsilon_0 r_n} = -\frac{Ze^2}{8\pi\varepsilon_0 r_n} \qquad (12.36)$$

ჩავსვათ (12.24) (12.36) -ში, ვღებულობთ En დისკრეტულ ენერგიას:

$$E_n = \frac{me^4 z^2}{8\varepsilon^2{}_0 n^2 r^2}$$

ბორის თეორიამ თავის დროზე მოახდინა ტრიუმფი ატომის ფიზიკის განვითარებაში.

თავი 13.
ატომების და მოლეკულების მიერ ენერგიის გამოსხივება და შთანთქმა

13.1. სინათლის შთანთქმა

სინათლის ინტენსივობა, რომელიც ვრცელდება გარემოში, შეიძლება შემცირდეს მისი მოლეკულების შთანთქმის და გამოსხივების შედეგად.

სინათლის შთანთქმა ეწოდება სინათლის ინტენსივობის შემცირებას ნებისმიერ ნივთიერებაში გავლისას. ამ დროს სინათლის ენერგია გარდაიქმნება სხვა სახის ენერგიაში. სინათლის კვანტის შთანთქმა ხდება მისი დაჯახებისას მოლეკულასთან (ატომთან), რაც იწვევს ფოტონის ენერგიის გადაცემას ნივთიერებისათვის.

სინათლის კვანტის შთანთქმის ალბათობა ნივთიერებისაგან, რომლის სისქე l, აღიწერება შთანთქმის კოეფიციენტის 1-T სიდიდით.

$$1-T=\frac{I_0-I}{I_0}$$

სადაც I გასული სინათლის ინტენსივობაა, T=$\frac{I}{I_0}$ გატარების კოეფიციენტი.

გამოვიყვანოთ სინათლის შთანთქმის კანონი. გამოვყოთ ნივთიერებაში თხელი ფენა dx, რომელიც პერპენდიკულარულია მონოქრომატული სინათლის ინტენსივობის

$$\frac{-d_i}{i}=k_\lambda dx \qquad (13.1)$$

გავაინტეგრალოთ (13.1) და გამოვიყენოთ ინტეგრირების საზღვრები x-სათვის 0-დან l და i სათვის i -დან -I მდე. მივიღებთ

$$\int \frac{d_i}{i} = -k_\lambda \int d_x \text{ ან } \ell_n \frac{I}{I_0} = -k_x \ell$$

პოტენცირების შემდეგ, გვაქვს

$$I=I_0 e^{-k_x \ell} \qquad (13.1)$$

ამ ფორმულას ეწოდება ბუგერის შთანთქმის კანონი.

თავი 14.
მაგნიტური რეზონანსი

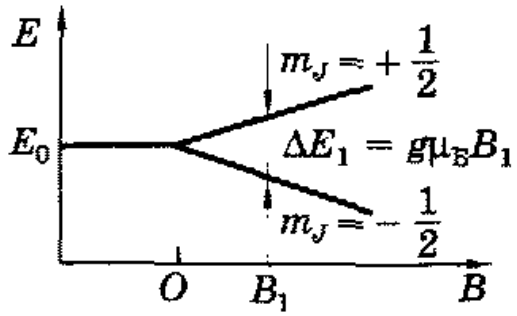
14.1. მაგნიტურ ველში ატომების ენერგეტიული დონეების გახლეჩვა

მაგნიტური რეზონანსი – მაგნიტურ ველში მოთავსებული ნივთიერების მიერ ელექრომაგნიტური ტალღების შერჩევითი შთანთქმაა.

ატომის მოთავსებისას მაგნიტურ ველში ყველა ენერგეტიკული დონე იხლიჩება 2 +1 ქვედონეებად. ენერგიის სხვაობა მეზობელ ქვედონეებს შორის ტოლია

$\Delta E = g\mu B$

ენერგეტიკული დონეების გახლეჩვა იწვევს სპექტრალური ხაზების გახლეჩვას. ამ მოვლენას ეწოდება ზეემანის ეფექტი.



ნახ.14.1

ჩავწეროთ ორი ქვედონის E_1 და E_2 გამოსახულება, როცა მოდებულია მაგნიტური ველი:

$$E_1 = E_{01} + g_1 \mu_B B m_{j1} \qquad (14.1)$$

$$E_1 = E_{02} + g_2 \mu_B B m_{j2}$$

სადაც E_{01} და E_{02} – ატომის ენერგეტიკული დონეებია, როცა არ არის მოდებული მაგნიტური ველი.

ატომის მიერ გამოსხივებული სიხშირეების გამოსახულებას:

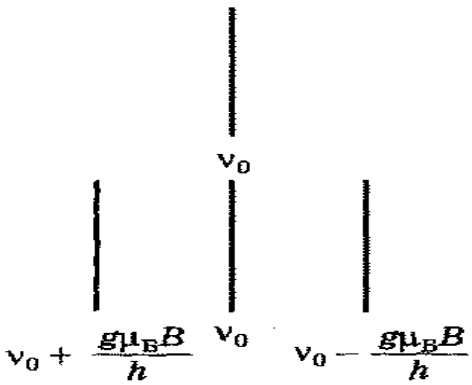
$$\upsilon = \frac{E_{02} - E_{01}}{h} + \mu_B B(g_2 mj_2 - g_1 mj)/h + \upsilon_0 + \Delta\upsilon \qquad (14.2)$$

სადაც $\upsilon_0 = \frac{E_{02} - E_{01}}{h}$ (14.3) არის სპექტრალური ხაზის სიხშირე, მაგნიტური ველის არ არსებობის დროს $\Delta\upsilon$ დამოკიდებულია მაგნიტური კვანტური რიცხვისაგან, ლანჟეს მამრავლისაგან და ველის მაგნიტური ინდუქციისაგან. თუ $g_1 = g_2 = g$, მაშინ

$$\Delta\upsilon = \frac{g\mu_B(m_{j_2} - mj_1)}{h} \qquad (14.4)$$

ეს შეეფარდება სამ სიხშირეს:

$$\upsilon_0 + g\mu_B B/h,\ \upsilon_0,\ \upsilon_0 - g\mu_B B/h$$



ნახ. 14.2

ე.ი. მაგნიტურ ველში სპექტრალური ხაზი იხლიჩება და გარდაიქმნება ტრიპლეტში. (სურ.14.2). ასეთ გახლეჩას უწოდებენ ზეემანის ეფექტს. ის დაიმზირება ძლიერ მაგნიტურ ველში, როცა $g_1 = g_2$. სუსტ მაგნიტურ ველში როცა $g_1 \neq g_2$ არსებობს ანომალური ზეემანის ეფექტი და სპექტრალური ხაზის გახლეჩა უფრო რთულია.

14.2.ელექტრონული პარამაგიტური რეზონანსი და მისი მედიკო-ბიოლოგიური გამოყენება

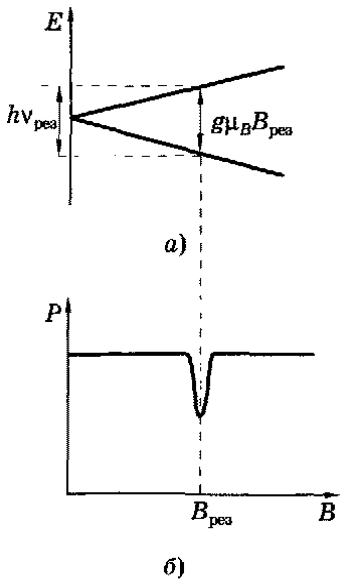
ატომს, რომელიც მოთავსებულია მაგნიტურ ველში, ქვედონეებს შორის სპონტანური გადასვლები ნაკლებად სავარაუდოა. თუმცა ასეთი გადასვლები ხდება ინდუცირებულად ელექტრომაგნიტური ტალღის მოქმედების შედეგად.

ელექტროპარამაგნიტური რეზონანსი სრულდება ნივთიერებებში, რომლებიც შეიცავენ პარამაგნიტურ ნაწილაკებს: მოლეკულებს, ატომებს, იონებს, რადიკალებს, რომლებსაც გააჩნიათ მაგნიტური მომენტები.

ელექტროპარამაგნიტური რეზონანსი აღმოჩენილ იქნა 1944 წელს ე.ზავოისკის მიერ.

ენერგიის რეზონანსული შთანთქმა გამოისახება ფორმულით $h\nu = g\beta h$.

მაგნიტური რეზონანსი დაიმზირება, თუ ნაწილაკზე მოქმედებს ინდუქციის B მუდმივი ველი და ელექტრომაგნიტური ველი სიშირით ν.



ნახ.14.3

ნახ.14.3 ნაჩვენებია ელექტრონის ენერგეტიკული დონის გახლეჩვა (ა) და ელექტრომაგნიტური ტალღის p სიმძლავრის ცვლილება, რომელმაც გაიარ ნიმუშში. ამ დროს წარმოიშობა ეპრ მოვლენა.

სპექტრალური ხაზის ფორმა და ინტენსივობა, რომელიც დაიმზირება ეპრ-ში განისაზღვრება ელექტრომაგნიტური მომენტების ურთიერთქმედებით. გამოვიკვ-ლიოთ ეს ფა-

ქტორები როგორ მოქმედებს სპექტრების მახასიათებლებზე.

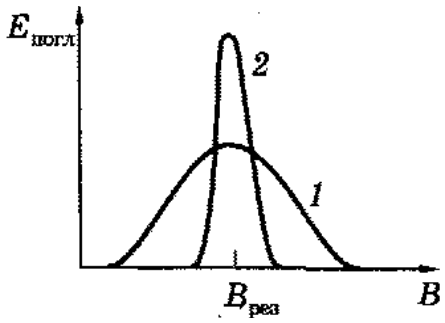
ენერგიის შთანთქმისათვის საჭიროა, რომ ნივთიერების ატომებს ჰქონდეს დიდი დასახლება ქვედა ქვედონეებზე, ვიდრე ზედაზე. საწინააღმდეგო შემთხვევაში გვექნება ინდუცირებული გამოსხივება.

ელექტრონული პარამაგიტური რეზონანსის დროს ენერგიის შთანთქმისა და ზედა ქვედონეების დასახლება იზრდება. ხდება საწინააღმდეგო პროცესი – არაგამოსხივებადი გადასვლები ქვედა ქვედონეებზე და ნაწილაკის ენერგია გადაეცემა მესერს.

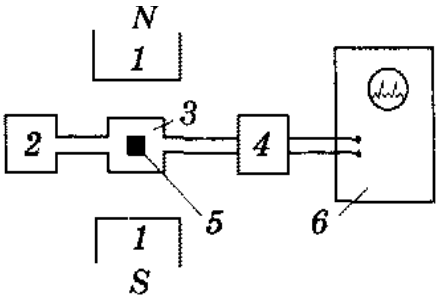
ნაწილაკის ენერგიის გადაცემის პროცესს მესერისათვის ეწოდება სპინ – მესერული რელაქსაცია. ის ხასიათდება τ დროით. გეიზენბერგის მიხედვით) იწვევს დონის გაფართოებას.

ე.ი. რეზონანსული შთანთქმა გამოიწვევა არა მარტო ერთი B-ს მნიშვნელობისათვის, არამედ ΔB ინტერვალში (სურ.14.31).

გვექნება დიდი სიგანის ხაზი. რაც ნაკლებია სპინ – მესერული რელაქსაციის დრო, მით მეტია ხაზის სიგანე ($\tau_1 < \tau_2$)შესაბამისად მრუდები 1 და 2 (14.32) სურათზე.



ნახ.14.31



ნახ,14.32

ეპრ ხაზის გაგანიერება ასევე დამოკიდებულია ელექტრონის სპინების ურთიერთქმედებისგან (სპინ – სპინური ურთიერთქმედება) და სხვა პარამაგნიტური ნაწილაკების ურთიერთქმედებისგან. სხვადასხვა ტიპის ურთიერთქმედება მოქმედებს არა მარტო შთანქმის სიგანეზე, არამედ მის ფორმაზე.

ეპრ მიერ შთანთქმული ენერგია, ე.ი.ხაზის ინტეგრალური ინტენსივობა პროპორციულია პარამაგნიტური ნაწილაკების რიცხვისა. ინტეგრალური ინტენსივობის მიხედვით შეიძლება ვიმსჯელოთ ნაწილაკთა კონცენტრაციაზე.

მთავარ პარამეტრს, რომელიც შთანთქავს სინგლეტურ ხაზს, წარმოადგენს ν, B, g (რეზონანსული წერტილის მდებარეობა). მუდმივი სიხშირის ν დროს B დამოკიდებულია g – ფაქტორზე. g – ფაქტორი იძლევა საშუალებას განვსაზღროთ სისტემის მაგნეტიზმის ხასიატი (სპინ – სპინური ან ორბიტალური) . g – ფაქტორის გაზომვა იძლევა საშუალებას მივიღოთ ინფორმაცია შიგამოლეკულური კავსირების შესახებ.

მედიკო – ბიოლოგიური გამოკვლევები ბაზირდება ხაზების ჯგუფის ანალიზზე. ეპრ -ში ახლო ხაზების ჯგუფს უწოდებენ გახლეჩვას. ეპრ-ში გვაქვს ორი ტიპის გახლეჩვა.

პირველი – ელექტრონული გახლეჩვა – წარმოიშობა მაშინ, როცა მოლეკულას ან ატომს გააჩნია არა ერთი, არამედ რამდენიმე ელექტრონი. მეორე – ზენაზი გახლეჩვა – დაიმზირება ელექტრონების ურთიერთქმედება ბირთვის მაგნიტურ მომენტთან.

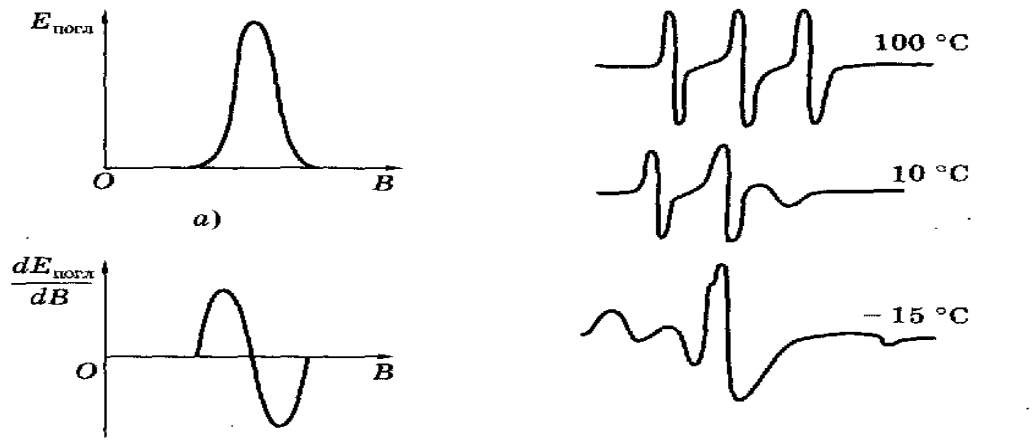
ხელსაწყოს რომელიც გამოიყენება ასეთი კვლევებისათვის ეწოდება ეპრ – სპექტრომეტრი. ის შედგება შემდეგი (სურ.14.32) ნაწილებისაგან: 1-ელექტრომაგნიტი, რომელიც ქმნის ძლიერ ერთგვაროვან მაგნიტურ ველს, რომლის ინდუქცია შეიძლება იცვლებოდეს, 2 – გენერატორი СВЧ (ზემაღალი სიხშირე) -ელექტრომაგ-ნიტური ველის გამომსხივებელი. 3 – სპეციფიკური „მშთანთქავი უჯრედი“, რომელიც იძლევა საშუალებას აღმოვაჩინოთ ენერგიის შთანთქმა ნიმუშის მიერ (რეზონატორი), 4 – ელექტრული სქემა, რომელიც იძლევა საშუალებას ჩავწეროთ ეპრ – სპექტრი, 5 – ნიმუში, 6 – ოსცილოგრაფი.

თანამედროვე ეპრ – სპექტრომეტრებში გამოიყენება სიხშირე 10 გჰც (ტალღის სიგრძე 0,03 მ). პრაქტიკულად, ეპრ – სპექტრომეტრზე რეგისტრირდება არა შთანთქმსდი ენერგისს მრუდი, არამედ მისი წარმოებული (სურ.14.31) ბ).ეპრ მეთოდის ერთ-ერთ მედიკო – ბიოლოგიურ გამოყენებას წარმოადგენს თავისუფალი რადიკალების ეპრ-სპექტრების აღმოჩენა და გამოკვლევა.

ეპრ ფართოდ გამოიყენება ფოტოქიმიური პროცესების შესასწავლად, კერძოდ ფოტოსინთეზის. იკვლევენ ზოგიერთი სხეულის კანცეროგენურ აქტივობას.

სანიტარო – ჰიგიენური მიზნით იყენებენ სპინ – ნიშნულებს. ეპრ - სპექტრების მეშვეობით ადგენენ მოლეკულაში სპინ – ნიშნულის მდებარეობას. სპინ – ნიშნულის შეყვანის შემდეგ მოლეკულაში, შეიძლება დადგინდეს ატომში სხვადასხვა ჯგუფების განლაგება, მათი ურთიერთქმედება, შევისწავლოთ ქიმიური კაცშირი ბუნება და ორიენტაცია.

იყენებენ აგრეთვე სპინ-ზონდებს – პარამაგნიტურ ნაწილაკებს, რომლებიც მოლეკულასთან დაკავშირებულია არაკოვალენტურად. სპინ-ზონდის ეპრ სპექტრის ცვლილება გვაძლევს ინფორმაციას მის გარშემო მოლეკულის მდგომარეობის შესახებ. სურ.14.4 ნაჩვენებია ნიტროქსილური რადიკალის ეპრ სპექტრი, რომელიც როგორც სპინ-ზონდი მოთავსებილია გლიცერინში. ტემპერატურის გაზრდასთან მცირდება გლიცერინის სიბლანტე და ეს ცვლის ეპრ სპექტრს. ე.ი. ეპრ სპექტრის ფორმის მიხედვით შეიძლება დავადგინოთ სპინური ზონდის ახლო გარემოს სიბლანტე. მთლიანობაში ეპრ მეთოდით ბიოლოგიური ობიექტების კვლევას აქვს გამოყენების ფართო სპექტრი.



ნახ.14.4

14.3. ბირთვულ მაგნიტური რეზონანსი.

ბმრ – ინტროსკოპია (მაგნიტო – რეზონანსული ტომოგრაფია)

ბირთვულ მაგნიტური რეზონანსი არ მიეკუთვნება ატომის და მოლეკულების განყოფილებას, არამედ ის განიხილება ერთ თავში ეპრ – რთან, როგორც მაგნიტური რეზონანსის მოვლენა.

ბირთვის მაგნიტური მომენტი ჯამდება ნუკლონების მაგნიტური მომენტები-საგან. ეს მომენტი გამოისახება ბირთვული მომენტებისაგან $\mu_{ბ}$, $\mu_{ბ} = 5{,}05\ 10^{-27}$ა. მ ^{2},. პროტონის მაგნიტური მომენტი ტოლია $P_{mპ} = 2{,}79\ \mu_{ბ}$, ხოლო ნეიტრონის $P_{mნ} = -1{,}91\ \mu_{ბ}$. ნიშანი „ – “ ნიშნავს, რომ ნეიტრონის მაგნიტური მომენტი ორიენტირებულია სპინის საწინააღმდეგოდ.

ბირთვის მაგნიტურ მომენტს, მოთავსებულის მაგნიტურ ველში, შეუძლია მიიღოს მხოლოდ დისკრეტული ორიენტაცია. ეს ნიშნავს, რომ ბირთვს შეესაბამება ქვედონეები, რომელთა შორის მანძილი დამოკიდებულია მაგნიტური ველის ინდუქციისაგან.

თუ ამ ქვედონეებში ბირთვზე ვიმოქმედებთ ელექტრომაგნიტური ველით, შეიძლება გამოვიწვიოთ გადასვლები ქვედონეებს შორის. რომ განვახორციელოთ ეს გადასვლები, საჭიროა შესრულდეს პირობა:

$$h\upsilon = g\mu B \qquad (14.1)$$

სადაც g – არის ლანჟეს ბირთვული მამრავლი.

ბმრ-ს შეიძლება დავაკვირდეთ (14.1) პირობის შესრულებისას მხოლოდ თავისუფალი ატომის ბირთვებასათვის. ბირთვს რეზონანსული სიხშირეების ექსპერიმენტალური მნიშვნელობები არ შეესაბამება. ამ დროს ხდება „ქიმიური წანაცვლება“, რომელიც წარმოიშობა ლოკალური მაგნიტური ველის მოქმედების გამო. ასეთი „დიამაგნეტიკური ეფექტის“ გამო წარმოიშობა დამატებითი მაგნიტური ველი, რომლის ინდუქცია პროპორციულია გარე მაგნიტური ველის ინდუქციის, მაგრამ

საწინააღმდეგოა მისი მიმართულების. ამიტომ სრული მაგნიტური ველი, რომრლიც მოქმედებს ბირთვზე, ხასიათდება ინდუქციით

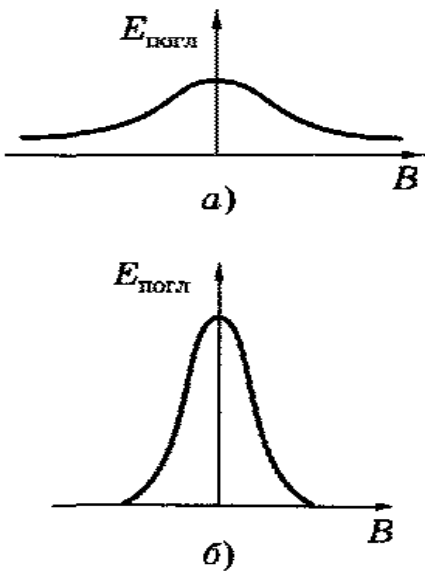
$$B_{\text{ეფ}} = (1-\sigma)B \qquad (14.2)$$

სადაც σ – ეკრანირების მუდვივაა.

აქედან გამომდინარეობს, რომ ამ ტიპის ბირთვებისათვის, რეზონანსი დაიმზირება სხვადასხვა სიხშირეების დროს. ეს იწვევს ქიმიურ წანაცვლებას.

თუ ორი ან მეტი ბირთვები მოლეკულაში ეკრანირებულია სხვადასხვანაირად, ე.ი. ბირთვები მოლეკულაში იკავებენ ქიმიურად არაექვივალენტურ მდგომარეობას, მათ გააჩნიათ სხვადასხვა ქიმიური ცანაცვლება. ბმრ სპექტრებს გააჩნიათ იმდენი რეზონანსული ხაზი, რამდენიც ქიმიურად არაექვივალენტური ბირთვების χგუფი იქ იმყოფებოდა. ყოველი ხაზის ინტენსივობა პროპორციულია მოცემულ χგუფში ბირთვების რიცხვისა.

ბმრ სპექრებში სიგანის მიხედვით განარჩევენ ორი ტიპის ხაზებს. მყარი სხეულის სპექტრებს აქვს დიდი სიგანე, და მას უწოდებენ დიდი სიგანის ბმრ სპექტრს. სითხეში დაიმზირება ვიწრო ხაზები და მას უწოდენ მაღალი გარჩევის ბმრ.



ნახ.14.5

სურ.14.5 გამოსახულია მყარი სხეულების (ა) და სითხეების (ბ) ბმრ მრუდები. სითხეში პიკის სივიწროვე დაკავშირებულია შემდეგზე. ყოველი ბირთვი ურთიერთქმედებს თავის მეზობელთან. ბირთვის მაგნიტური მომენტები იცვლება წერტილიდან წერტილამდე., მაშინ სრული მაგნიტური ველი, ასევე იცვლება. ეს ნისნავს, რომ ბირთვის რეზონანსის უბანს წარმოადგენს ფართო ხაზი.

ქიმიური შენაერთებისათვის დაიმზირება ერთეულოვანი ხაზი.უფრო რთული შენაერთები გვაძლევენ სპექტრების უფრო მეტ ხაზებს. ქიმიური

წანაცვლებით, სპექტრალური ხაზების რიცხვით და მდებარეობით შეიძლება დადგინდეს მოლეკულის სტრუქტურა. ქიმიკოსები და ბიოქიმიკოსები ფართოდ იყენებენ ბმრ რეზონანს მათი სტრუქტურის დასდგენად. ამ მეთოდის უპირატესობა არია ის რომ ის არ შლის გამოსაკვლევ ობიექტს, როგორც ხდება ქიმიური ანალიზის დროს.

ბმრ-ს დიდი გამოყენება აქვს მედიცინაში. ბმრ მეთოდით შეიძლება ნიმუშის სხვადასხვა წერტილის გამოკვლევა, თანდათან მიმდევრობით გავიაროთ მთელი ნიმუსი (სკანირებით), შეიძლება მივიღოთ მთლიანი წარმოდგენა მოლეკულის სივრცული განაწილების შესახებ.

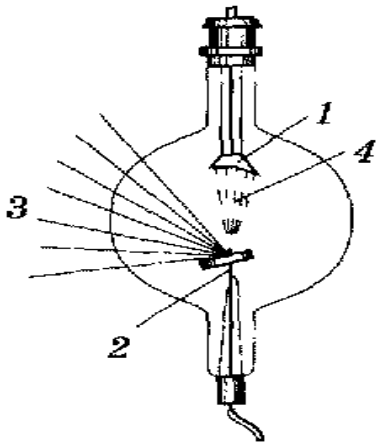
ბმრ მეთოდით ყველა გამოკვლევა ხდება ორგანიზმის დაშლის გარეშე, ამიტომ შეიძლება შეიძლება ჩავატაროთ კვლევები ცოცხალ ობიექტებზე. ასეთ მეთოდს უწოდებენ ბმრ – ინტროსკოპიას ან მაგნიტურ რეზონანსულ ტომოგრაფიას (მრტ(. ის იძლევა საშუალებას, გავარჩიოთ სხვადასხვა ძვლები, სისხძარღვები, ნორმალური ქსოვილები და სიმსივნით დაავადებული ქსოვილები. ბმრ – ინტროსკოპია იძლევა საშუალებას გავარჩიოთ ჯამრთელი ქსოვილები დაავადებულისაგან. ამიტომ ბმრ – ინტროსკოპია არის ეფექტური მეთოდი დაავადების დიაგნოსტირებისათვის.

ელექტრომაგნიტური ტალღების სიხშირე, რომელიც იწვევს ეპრ-ში და ბმრ-ში ენერგეტიკულ დონეებზე გადასვლებს შეესაბამება რადიოდიაპაზონს. ამიტომ ორივე ეს მეთოდი მიეკუთვნება რადიოსპექტროსკოპიას.

თავი. 15.
რენტგენული გამოსხივება

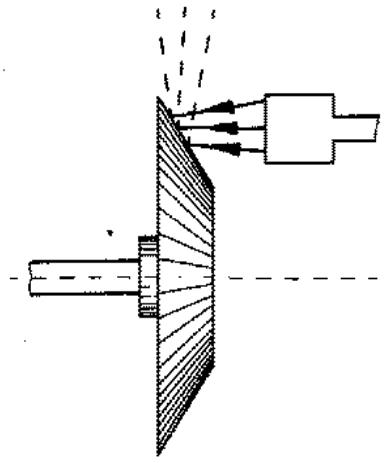
რენტგენული მილის აგებულება

ელექტრომაგნიტურ გამოსხივებას, რომლის ტალღათა სიგრძე მოიცავს 10 ნმ-დან 310^{-2} ნმ-მდე დიაპაზონს, რენტგენულ სხივებს უწოდებენ. გრძელი ტალღის სიგრძის რენტგენული გამოსხივება ესაზღვრება მოკლე ტალღის სიგრძის ულტრაიისფერ გამოსხივებას, ხოლო მოკლე ტალღის სიგრძის სხივები კი გრძელტალღოვან _ გამოსხივებას.

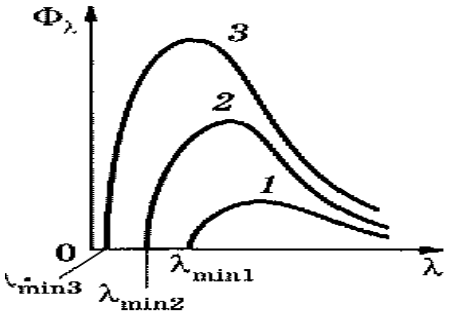


ნახ.15.1

რენტგენული გამოსხივების ყველაზე გავრცელებული ხელოვნური წყაროა რენტგენული მილი. მისი ძირითადი ელემენტები ნაჩვენებია სურ.15.1-ზე. მინის ბალონში, რომლიდანაც ჰაერი ამოტუმბულია ჩარჩილურია ორი ელექტროდი: კათოდი (1), რომელიც ვარვარების ძაფით ხურდება და ელექტრონებს ამოაფრქვევს, და დახრილი ზედაპირის მქონე ანოდი (2) (ანტიკათოდი). ანოდს და კათოდს შორის ძაბვა $4010^3 – 6010^3$ ვ-ის ფარგლებში იცვლება. თერმოელექტრონული ემისიის შედეგად კათოდიდან ამოფრქვეული ელექტრონები (4) აჩქარებით მოძრაობს დადებითი პოტენციალის მქონე ანოდისაკენ. დიდი კინეტიკური ენერგიის მქონე ელექტრონების ანოდზე დამუხრუჭების შედეგად წარმოიქმნება რენტგენული გამოსხივება (3). სადიაგნოსტიკო მიზნებისათვის აუცილებელია რენტგენულ გამოსხივებას იძლეოდეს წერტილოვანი წყარო. ეს იმას ნიშნავს, რომ ელექტრონები უნდა ეცემოდეს ანოდის ზედაპირის ერთ ადგილზე. ამ მიზნით ახდენენ ელექტრონების ნაკადის ფოკუსირებას.



ანოდის ერთი ადგილის ელექტრონებით ბომბარდირება კი, თავისი მხრივ, იწვევს ანოდის გადახურებას. ასეთ არასასურველ ეფექტს თავიდან იცილებენ შემდეგი გზით: ჯერ ერთი, ანოდის ზედაპირი მზადდება ძნელად დნობადი ლითონისაგან (ვოლფრამი, $t=3400^0$ C). მეორე მხრივ კი ანოდს აცივებენ წყლით, ან ზეთით, ან ამზადებენ სპეციალური კონსტრუქციის რენტგენულ მილს, რომელშიც ანოდი ბრუნავს. ამ შემთხვევაში ელექტრონების ნაკადი ანოდის სხვადასხვა უბანზე ეცემა და ის არ გადახურდება.



ნახ.15.2

..

კათოდიდან ამოფრქვეული ელექტრონები აჩქარებით მოძრაობს ანოდისაკენ. მათი კინეტიკური ენერგია $\frac{mv^2}{2} = eU$, სადაც m ელექტრონის მასაა, v მისი სიჩქარე ანოდის ზედაპირთან, e ელექტრონის მუხტი. ხოლო U ძაბვა კათოდსა და ანოდს შორის.

ანოდის შემადგენელი ატომების ელექტრონებისა და ბირთვის ელექტროსტატი-კური ველის გავლენით ანოდის ზედაპირზე დაცემული ელექტრონი მუხრუჭდება. ამ პროცესის შედეგად გამოსხივდება ელექტრომაგნიტური ტალღა. თუ ტალღის სიხშირე ემთხვევა რენტგენის სხივების სიხშირეთა დიაპაზონს, მაშინ ასეთ გამოსხივებას რენტგენულ გამოსხივებას უწოდებენ.

დამუხრუჭებითი რენტგენული გამოსხივების მექანიზმი შეიძლება ასე ავხსნათ: მოძრავ ელექტრონს აკრავს მაგნიტური ველი, რომლის ინდუქციის სიდიდე დამოკიდებულია ელექტრონის სიჩქარეზე. ელექტრონის დამუხრუჭებისას მისი მაგნიტური ველის ინდუქცია თითქმის ნულამდე მცირდება. მაშასადამე ელექტრონის მაგნიტური ველი იცვლება. მაქსველის თეორიის თანახმად, ასეთი ველის სივრცის მეზობელ უბანში აღძრავს ცვლად ელექტრულ ველს, რომელიც, თავის მხრივ წარმოშობს ცვლად მაგნიტურ ველს და ა.შ. ამგვარად გარემოში გავრცელდება

ელექტრომაგნიტური ტალღა, რომელიც ელექტრონის დამუხრუჭების შედეგად გამოსხივდება.

დავუშვათ, რომ ელექტრონის კინეტიკური ენერგია მთლიანად გადადის რენტგენული გამოსხივების ფოტონის ენერგიაში. მაშინ მართებულია ასეთი ტოლობა:

$eU=h\nu_{მაქს}=\frac{hc}{\lambda}$, საიდანაც $\lambda=\frac{hc}{eU}$

ამ ფორმულაში λ რენტგენული გამოსხივების მინიმალური ტალღის სიგრძეა. h პლანკის მუდმივაა, ც სინათლის სიჩქარე. თუ h,ც და e მნიშვნელობებს შევიტანთ ფორმულაში, მივიღებთ:

$\lambda=\frac{12,3}{U}$ ნმ.

მაშასადამე, რენტგენულ მილში ძაბვის (რენტგენის გამოსხივების ნაკადი) გაზრდა ან შემცირება იწვევს λ წანაცვლებას უფრო მოკლე, ან გრძელი ტალღებისაკენ.

თუ კათოდის ვარვარების ტემპერატურას გავზრდით მატულობს დენის ძალა მილში (ამოფრქვეული ელექტრონების რიცხვი) და შესაბამისად რენტგენული გამოსხივების ნაკადიც.

რენტგენული გამოსხივების ნაკადი გამოითვლება ფორმულით:

$\Phi = K I U^2 Z$

სადაც I დენის ძალა მილში, U ძაბვა, Z ანოდის ნივთიერების რიგითი ნომერი, ხოლო K პროპორციულობის კოეფიციენტი.

16. რენტგენული გამოსხივების გამოყენება მედიცინაში

რენტგენული გამოსხივება ფართოდ გამოიყენება სამედიცინო პრაქტიკაში სადიაგნოსტიკო (რენტგენოდიაგნოსტიკა) და სამკურნალო (რენტგენოთერაპია) მიზნით. დაავადების დიაგნოზის დადგენისათვის

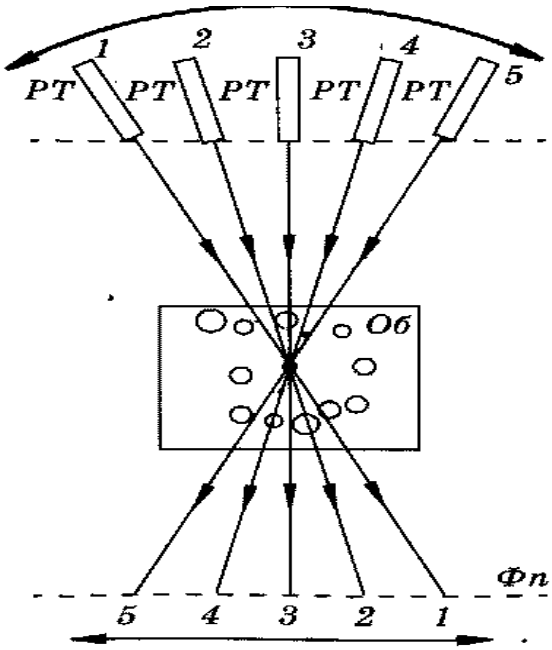
ყველაზე უფრო მნიშვნელოვანია შინაგანი ორგანოების „გაშუქება“ რენტგენული სხივების მეშვეობით.ამ მიზნით იყენებენ 60-120კევ ენერგიის ხისტ გამოსხივებას, რომელიც ნივთიერების განჭოლვის დიდი უნარით ხასიათდება. მასთან ასეთი ტალღის სიგრძის გამოსხივების შთანთქმის უნარი სხვადასხვა ქსოვილისათვის მკვეთრად განსხვავებულია (განსაკუთრებით ძვლის ქსოვილისათვის). სწორედ ეს გვაძლევს საშუალებას დავინახოთ ადამიანის შინაგანი ორგანოების ჩრდილის პროექცია. იყენებენ რენტგენო – დიაგნოსტიკის ორ ვარიანტს: 1.რენტგენოსკოპიის დროს დაავადებული ორგანოს გამოსახულებას გამოიკვლევენ განათებულ – ე.წ. რენტგენოლუმინესცირებად ეკრანზე. 2. რენტგენოგრაფიის შემთხვევაში კი ორგანოს გამოსახულებას აფიქსირებენ სპეციალურ ფოტოფირზე.

თუ გამოსაკვლევი ორგანოს გარემომცველი ქსოვილების შთანთქმის უნარი დაახლოებით ერთნაირია, იყენებენ სპეციალურ კონტრასტულ ნივთიერებას. მაგ. კუჭისა ნაწლავის „გაშუქებისას“ ავადმყოფს აძლევენ ბარიუმის ფოსფატისგან დამზადებულ ფაფას. ამ ნივთიერებით სავსე კუჭისა და ნაწლავის დამოსახულება მკვეთრია.

მაღალი ხარისხის, ნათელი გამოსახულების მისაღებად საჭიროა დიდი ინტენსივობის რენტგენული სხივების გამოყენება. მაგრამ ასეთ გამოსხივებას შეუძლია გამოიწვიოს არასასურველი ბიოლოგიური ეფექტები. მცირე ინტენსივობის სხივების გამოყენებისას გამოსახულების ხარისხის გასაუმჯოსებლად მიმართავენ სხვადასხვა ტექნიკურ საშუალებას. მაგალიტად, მფლუოროგრაფიული მეთოდის გამოყენების დროს პატარა ზომის ლუმინესცირებადი ეკრანიდან მიღებულ სურათს სპეციალური გამადიდებლის მეშვეობით გამოიკვლევენ.

ბოლო ხანებში შეიმუშავეს ე.წ.რენტგენული ტომოგრაფიის მეთოდი – ორგანოს შრეული სურათის გადაღების მეთოდი. მეთოდის არსი შემდეგში მდგომარეობს: ობიექტის ერთ მხარეზე ათავსებენ რენტგენის მილაკს, ხოლო მეორეზე – ფოტოფირს. მათ პერიოდულად გადაადგილებენ ურთიერთსაწინააღმდეგო მიმართულებით (საწინააღმდეგო ფაზებით) ისე, რომ რენტგენის სხივი მილაკის ნებისმიერ მდებარეობის დროს გადის ერთსა და იმავე წერტილში (მიკროუბანში). ამ წერტილის გამოსახულება გამოსახულება საკმაოდ მკვეთრია, ვინაიდან ასეთი პერიოდული

მოძრაობის დროს ორგანიზმის სხვა გაუმჭვირი უბნები (მაგ. ძვლები) ყოველთვის არ ჩრდილავს „საკვლევ უბანს“. (ნახ.16.1)



ნახ.16.1

რენტგენის მილაკისა და ფოტოფირის მოძრაობის ცენტრის ცვლილებით შეიძლება საკვლევი ობიექტის შრეული სურათის – ტომოგრამას გადაღება. ფირის ადგილზე მეცნიერებმა ჰაუნსფილდმა და მაკ-კორმაკმა მოათავსეს ეკრანი, რომელიც შედგებოდა მაიონებელი გამოსხივების ნახევარგამტარული დეტექტორისაგან. მონაცემები დეტექტორიდან გადაეცემოდა კომპიუტერს, რომრლიც ახორციელებდა მიღებული სიგნალების ანალიზს და დამუსავებას. ასეთი დანადგარის საშუალებით შესაძლებელია 2მმ ზომის დეტალის გარჩევა.

კომპიუტერი რენტგენული ტომოგრაფის შექმნისათვის ჰაუნსფილდსა და მაკ-კორმაკს ნობელის პრემია მიანიჭეს.

სამკურნალო მიზნით რენტგენული სხივების გამოყენებას საუძვლად უდევს მისი დამანგრეველი მოქმედება. გამოსხივებისადმი განსაკუთრებულად მგრძნობიარეა ახალგაზრდა, ზრდის პროცესში მყოფი უჯრედები (მაგ. სიმსივნური უჯრედები). სამკურნალო მიზნით რენტგენული სხივების გამოყენებისას ნორმალური უჯრედები რომ

ნაკლებად დავაზიანოთ დღეისათვის საკმაოდ ეფექტური მეთოდებია შემუშავებული.

თავი 17.
მაიონებელი გამოსხივება

17.1. მაიონებელი გამოსხივების სახეები

ნივთიერებასთან ურთიერთქმედებისას ატომებისა და მოლეკულების დაიონებას (იონიზაცია) იწვევს მაღალი სიხშირის ელექტრომაგნიტური გამოსხივება და დიდი ენერგიის ნაწილაკების ნაკადი. თუ ატომის (მოლეკულის) მიერ შთანთქმული ენერგია მეტი იქნება იონიზაციის ენერგიასთან შედარებით, ელექტრონი ამოვარდება ატომიდან.

მაიონებელი გამოსხივება თავისი ბუნებით იყოფა ორ სახედ: კორპუსკულურ და მაღალი სიხშირის ელექტრომაგნიტურ გამოსხივებად.

მაღალი სიხშირის ელექტრომაგნიტურ გამოსხივებას მიეკუთვნება რენტგენის სხივები და γ გამოსხივება. რენტგენის სხივების ტალღის სიგრძე $10 - ^{8} - 10^{1}$ მ. ტალღის სიგრძეთა დიაპაზონშია, ხოლო γ -სხივების ტალღის სიგრძე 10^{-11} მ-ზე ნაკლებია.

რენტგენისა და γ – სხივების კვანტის ენერგია გამოითვლება ფორმულით:

$E=h\nu= hც/ \lambda$,

სადაც E კვანტის ენერგიაა, λ – ტალღის სიგრძე, ც – სინათლის სიჩქარე, h – პლანკის მუდმივა.

კვანტის ენერგია იზომება ელექტრონ ვოლტებით (ევ); 1 ევ =1,6 10^{-9} კ.ვ. = 1,6 10^{-19} ჯ.

რენტგენის სხივების ენერგია შეიძლება ასეული ელექტრონვოლტიდან რამდენიმე ათეულ კილოელექტრონვოლტამდე (კევ) დიაპაზონში იცვლებოდეს, ხოლო γ – კვანტების ენერგია კი რამდენიმე მილიონ ელექტრონვოლტს (მევ) აღწევს (1 კევ=10^{3} ევ, 1 მევ = 10^{6} ევ).

რენტგენული სხივები წარმოიქმნება რადიოაქტიური დაშლის დროს. ტექნიკაში ამ გამოსხივებას ღებულობენ რენტგენის მილაკებში. მაღალი

ენერგიის რენტგენულ გამოსხივებას ღებულობენ ბირთვული ნაწილაკების სპეციალურ ამაჩქარებლებში – ბეტატრონებში.

γ -კვანტებს გამოასხივებს ატომები ბირთვული რეაქციის განხორციელებისას.

კორპუსკულარული გამოსხივება ელემენტარული ნაწილაკების ნაკადია, რომელიც წარმოიქმნება რადიოაქტიური იზოტოპების დაშლისა და ბირთვული რეაქციის დროს. ასეთია, მაგალითად:

1. α – ნაწილაკების გამოსხივება: ეს ნაწილაკები ჰელიუმის ბირთვებია.

2. β – ნაწილაკების გამოსხივება: ეს ნაწილაკები ელექტრონების ან პოზიტრონების ნაკადია.

3. პროტონების და დეიტრონების გამოსხივება; ისინი მსუბუქი (p) და მძიმე (np) წყალბადის ბირთვებია.

4. ნეიტრონების – უმუხტო ნაწილაკების გამოსხივება.

ნაწილაკების შემთხვევაში ენერგია განისაზღვრება ფორმულით $E_к = mv^2/2$, სადაც

Eк კინეტიკური ენერგიაა, m – ნაწილაკის მასა, v – მისი სიჩქარე.

მაიონებელი გამოსხივების ნივთიერებასთან ურთიერთქმედების ფიზიკური მექანიზმები

მაიონებელი გამოსხივების ნივთიერებასთან ურთიერთქმედების დროს ატომების იონიზაცია ხდება. ატომები (მოლეკულები) გარდაიქმნება დადებით იონებად, ხოლო ამოგდებული ელექტრონები შეიძლება შეუერთდეს ნეიტრალურ ატომებს ან მოლეკულებს და წარმოქმნას უარყოფითი იონები.

იონიზაციის ეფექტის არსი შემდეგში მდგომარეობს: მაღალი ენერგიის ელექტრომაგნიტური გამოსხივების კვანტისა (რენტგენისა და γ – სხივები) და ნაწილაკების (α – და β – ნაწილაკები, პროტონები, დეიტრონები, ნეიტრონები და სხვა) ნივთიერებაში გავლისას ისინი ეჯახებიან ატომებს და მოლეკულებს და გადასცემენ მათ ენერგიას. ენერგიის შთანთქმის მექანიზმი განსხვავებულია, მაგრამ ეს პროცესები ერთსადაიმავე

საბოლოო შედეგს იძლევა. ნივთიერებაში წარმოიქმნება იონები, აგზნებული ატომები და მოლეკულები.

რენტგენული გამოსხივების ფოტონების ან γ – კვანტების ატომებთან და მოლეკულებთან ურთიერთქმედების ხასიათი დამოკიდებულია თვითონ შთანთ-ქმული გარემოს თვისებებსა და შედგენილობაზე. მაგალითად, ზოგ შემთხვევაში γ – კვანტი მთლიანად აძლევს თავის ენერგიას ატომიდან ან მოლეკულიდან ამოგდებულ ელექტრონს და თვითონ შეწყვეტს არსებობას (ფოტოეფექტი). სხვა შემთხვევაში იგი ამოგდებულ ელექტრონს აძლევს ენერგიის მხოლოდ ნაწილს. ამ დროს ელექტრონი ატომიდან ან მოლეკულიდან გამოიტყორცნება ერთი მიმართულებით, ხოლო კვანტი, რომლის ენერგია შემცირებულია, სხვა მიმართულებით (კომპტონის ეფექტი). ასეთი ელექტრონი თავის კინეტიკურ ენერგიას ხარჯავს სხვა ატომების იონიზაციასა და აგზნებაზე. კვანტი კი განაგრძნობს ნივთიერებასთან ურთიერთქმედებას, სანამ ფოტოეფექტის შედეგად გაქრება.

ნივთიერებაში დამუხტული ნაწილაკის გავლისას იგი ურთიერთქმედებს ატომის ან მოლეკულის გარეთა შრის ელექტრონთან, რის შემდეგაც ელექტრონსა და ატომს შორის კავშირი წყდება. ატომი (მოლეკულა) გადაიქცევა დადებით იონად. მაშასადამე, წარმოიქმნება იონთა წყვილი: დადებითი იონი და ატომიდან ამოგდებული ელექტრონი. ასეთი წყვილის წარმოქმნაზე მაიონებელი ნაწილაკი ხარჯავს ენერგიის მხოლოდ ნაწილს. ნაწილაკის მთელი ენერგიის შთანთქმისას წარმოიქმნება იონთა ბევრი წყვილი. ნაწილაკთა დაჯახების შდეგად ატომიდან ამოგდებული ელექტრონი, ახდენს სხვა ატომებისა და მოლეკულების იონიზაციას მანამ, სანამ ენერგიას დაკარგავს, ასეთი ელექტრონი შემდეგ უერთდება ნეიტრალურ ატომს (მოლეკულას) და წარმოქმნის უარყოფით იონს.

ყოველი წყვილი იონის წარმოქმნას თან სდევს რამდენიმე ატომის ან მოლეკულის აგზნება. აგზნებისას ელექტრონი გადადის უფრო მაღალ (დაშორებულ) ენერგეტიკულ დონეზე. საწყის დონეზე დაბრუნებისას ელექტრონი ასხივებს ჭარბ ენერგიას ხილული, ულტრაიისფერი ან რენტგენული გამოსხივების ფოტონების სახით.

განსხვავებულ ეფექტთან გვაქვს საქმე ნივთიერებასთან უმუხტო ნაწილაკების, მაგ. ნეიტრონების ურთიერთქმედების დროს.

მაღალი ენერგიის (1 მევ) ნეიტრონი ნივთიერებაში გავლისას ეჯახება წყალბადის ბირთვს – პროტონს და გადასცემს მას თავისი კინეტიკური ენერგიის ნაწილს. ასეთ პროტონს უკუცემის პროტონს უწოდებენ. სწორედ ასეთი პროტონები იწვევს უშუალოდ ატომებისა და მოლეკულების იონიზაციას. ნეიტრონები რამდენიმე დაჯახების შედეგად კარგავს ენერგიას და გადადის ნელი, სითბური ნეიტრონების კატეგორიაში. სითბური ნეიტრონი ძირითადად მონაწილეობს რეაქციაში, რომელიც რადიაციული წატაცების სახით არის ცნობილი.

ნეიტრონების წატაცებას თან სდევს γ – კვანტის გამოსხივება. ასეთი რეაქციის მაგალითია მსუბუქი წყალბადის ბირთვის მიერ ნეიტრონის წატაცება, რის შედეგადაც წარმოიქმნება მძიმე წყალბადი:

1 H 1 + 0 n 1 – 1 D 2 + γ – γ კვანტი

ცოცხალ ორგანიზმში ნეიტრონების შთანთქმისას ასევე რადიოაქტიური ატომები წარმოიქმნება. სწორედ ასეთ პროცესს აღწერს ქვემოთ მოყვანილი ორი რეაქცია:

11 Na 23 + 0 n 1 – 11 Na 24 + γ კვანტი

15 P 31 + 0 n 1 – 15 P 32 + γ კვანტი

სადაც 11 Na 24 – ნატრიუმის, ხოლო 15 P 32 – ფოსფორის რადიოაქტიური იზოტოპია.

17.2. დოზიმეტრიის საკითხები. გამოსხივების დოზა და მისი ერთეულები.

მაიონებელი რადიაციის რაიმე ობიექტზე განსაკუთრებით კი ცოცხალ სისტემაზე მოქმედბის ხარისხი დამოკიდებულია შთანთქმული ენერგიის სიდიდეზე. სხვადა სხვა ტიპის გამოსხივების მოქმედებას ხშირად აფასებენ მის მიერ გამოწვეული იონიზაციური ეფექტთ. Si სისტემაში რენტგენისა და γ – გამოსხივების დოზის ერთეულად მიღებულია 1 კულონი/ კგ. ეს ასეთი

დოზაა, რომელიც (თუ გამოსხივების მთელი ენერგია ხმარდება იონიზაციას) 1 კგ მშრალ ჰაერში წარმოქმნის 1 კულონის ტოლ ერთ ნიშნის იონთა ჯამურ მუხტს. CGSE სისტემაში ერთეულად მიღებულია 1 რენტგენი. მთლიანი იონიზაციური შთანთქმის დროს, თუ 1 სმ ^{3} ჰარში წარმოქმნილი ერთი ნიშნის იონების ჯამური მუხტი 1 CGSE – ტოლია, შთანთქმული (გამოსხივებული) დოზა 1 რენტგენს უდრის. 1რენტგენი 85 ერგი/გ სიდიდის ეკვიქვალენტურია. ამ სიდიდეს რენტგენის მექანიკურ, ანუ ფიზიკურ ეკვივალენტს უწოდებე (რფე). ეს იმას ნიშნავს , რომ ნორმალურ პირობებში (t = 0 ^{0} C, p = 760 მმ ვწყ სვ) მშრალი ჰაერი შთანთქავს მაიონებელი გამოსხივების 85ერგ ენერგიას. მაშინ ასეი რენტგენის ფიზიკური ექვივალენტია.

ზოგადად, მაიონებელი გამოსხივების მიერ რაიმე მოცულობისათვის გადაცემული ენერგია განისაზღვრება ფორმულით:

$E = \sum E_1 - \sum E_2 - \sum U.$

სადაც $\sum E_1$ ამ მოცულობაში შესული ყველა მაიონებელი ნაწილაკის ჯამური ენერგიაა.

$\sum E_2$ – ამ მოცულობიდან გამოსული მაიონებელ ნაწილაკთა ჯამური ენერგიაა, ხოლო

$\sum U$ ბირთვებისა და ელემენტარული ნაწილაკების გარდაქმნის დროს დროს გამოყოფილი ჯამური ენერგიაა.

ფარდობას W=E/m, სადაც m აღებულ მოცულიბაში ნივთიერების მასაა, გადაცემულ კუთრ ენერგიას უწოდებენ. გადაცემული კუთრი ენერგია მნიშვნელოვნად განსხვავდება შთანთქმული დოზისაგან. შთანთქმული დოზის სიმძლავრის სპეციალური ერთეულია – 1 გრეი /წმ, 1 გრეი = 1 ჯ /კგ.

სხვადასხვა მაიონებელი გამოსხივების ერთი და იგივე დოზა (ენერგიის რაოდენობა) იძლევა განსხვავებულ ბიოლოგიურ ეფექტს. ასევე არ არსებობს ერთნიშნა დამოკიდებულება საბოლოო ბიოლოგიური ეფექტის სიდიდესა და მაიონებელი ნაწლაკების ენერგიას შორის. მაგალითად, 2,5 მევ ენერგიის α ნაწილაკი უფრო ეფექტურია, ვიდრე 27 მევ მევ ენერგიის β ნაწილაკი. მეორე მხრივ, ერთი და იგივე ენერგიის მქონე β და α ნაწილაკების დამაზიანებელი მოქმედება არსებითად განსხვავებულია.

მაიონებელი გამოსხივების მოქმედების ბიოლოგიური ეფექტურობის შეფასებისათვის შემოღებულია სიდიდე – ნაწლაკის ენერგიის დიფერენციალური დანაკარგი ერთეულ მანძილზე – dE/dx, მას „ენერგიის წირით გადაცემას“ (ენგ) უწოდებენ. მათემატიკურ გამოსახულებაში იგი L -ით არის აღნიშნული.

ნაწილაკის მიერ ნივთიერებისათვის გადაცემული ენერგია (კევ)

$$L = - \frac{\text{ნაწილაკის მიერ ნივთიერებისათვის გადაცემული ენერგია (კევ)}}{\text{ნაწილაკის მიერ გავლილი გზა (მკმ)}}$$

ნაწილაკის მიერ გავლილი გზა (მკმ)

გამოყენებულია აგრეთვე სიდიდე L/ρ , სადაც ρ ნივთიერების სიმკრივეა. ეს სიდიდე სიმკრივეზე არ არის დამოკიდებული. L სიდიდე გვიჩვენებს ენერგიის განაწილებას ნაწილაკის ტრეკის (ტრაექტორიის) გასწვრივ. თუ ვიცით L -ის მნიშვნელობა, ადვილად გამოვითვლით ნაწილაკის მიერ გავლილი გზის ერთეულზე წარმოქმნილ იონთა საშუალო რიცხვს. ამისათვის L უნდა გავყოთ იონთა ერთი წყვილის წარმოსაქმნელად საჭირო ენერგიის მნიშვნელობაზე.

თუ პროცესს ამ სიდიდით დავახასიათებთ, ნაწილაკის ან კვანტის ფიზიკური ბუნება არ მოახდენს გავლენას ბიოლოგიური მოქმედების სპეციფიკაზე. მაგალითად, ტოლი L-ის მქონე რენტგენის გამოსხივება და α ნაწილაკები ერთნაირი ეფექტურობით თრგუნავს უჯრედთა გამრავლებას.

17.3. მაიონებელი გამოსხივების ბიოფიზიკური მოქმედების მექანიზმი

მაიონებელი გამოსხივების მოქმედებით ორგანიზმში ვითარდება ფიზიკურ-ქიმიური პროცესები, რომლებსაც თან სდევს აგზნებული ატომებისა და მოლეკულების, იონების, აქტიური რადიკალებისა და

ზეჟანგის წარმოქმნა. ასეთი ნაერთები შეიძლება წარმოიქმნას როგორც წყლიან, ასევე უწყლო ფაზაში. მათი მონაწილეობა ორგანიზმში მიმდინარე რთულ ბიოქიმიურ რეაქციებსი იწვევს ნორმალური ფუნქციური პროცესების დარრვევას. თუ ასეთი დარღვევა შეუქცევადია, სხივური დაავადება ვითარდება.

თუ ორგანიზმი დასხივებისას არ ღებულობს სხივური ენერგიის დიდ დოზას (რომელიც მაშინვე სიკვდილს იწვევს), პროცესი მიმდინარეობს სამ სტადიად.

I – სტადიის დროს ზემოთ აღნიშნული აქტიური ნაერთები წარმოიქმნება და ბიოლოგიურ პროცესში მათი ჩართვის შემდეგ ფიზიოლოგიური ფუნქციები ირღვევა.

II – სტადიაში ყველა ის გადახრა ნორმალური მაჩვენებლიდან, რომლებიც I სტადიაში ვლინდება, უბრუნდება საწყის მნიშვნელობას.

II – სტადიის ხანგრძლივობა საკმაოდ დიდია, იგი სხვადასხვა ორგანიზმში სხვადასხვაა. მაგ.ცხოველების და ადამიანის ორგანიზმში II სტადია გრძელდება 5-21 დღემდე.

III სტადია სხივური დაავადებაა. ამ დროს ფიზიოლოგიური და ბიოქიმიური ცვლილებები სწრაფად პროგრესირებს და პათოლოგია ჩამოყალიბებულ სახეს ღებულიბს.

მაიონებელი გამოსხივების ზემოქმედების ბიოლოგიური ეფექტურობა დამოკი-დებულია შთანთქმული ენერგიის დოზაზე. დოზის სიდიდე, რომლის დროსაც ორგანიზმი იღუპება, სხვადასხვა სახეობისათვის განსხვავებულია.

გამოსხივებისადმი ყველაზე მგრძნობიარები არიან ძუძუმწოვრები და ადამიანი, ყველაზე ნაკლებად მგრძნობიარეა დაბალი განვითარების ცხოველები – ტრიტონი, გველი, მორიელი და სხვა.

ასევე განსხვავებული მგრძნობიარობა ახასიათებს ორგანიზმის სხვადასხვა ქსოვილს. სხივურ ზემ,ოქმედებისადმი მაღალ მგრძნობიარობას იჩენს ძვლის ტვინი, ლიმფური კვანძები, ნაწლავის ეპითელიუმი და სხვა.

როგარც ცნობილია, ავთვისებიანი სიმსივნის უჯრედები ინტენსიურად იყოფა, ისინი ნაკლებად დიფერენცირებულია. ამიტომ გაცილებით მეტ

მგრძნოარობას იჩენს გამოსხივებისადმი, ვიდრე ნორმალური ქსოვილები. ამ ფაქტზეა დამოკიდებული ავთვისებიანი სიმსივნის რენტგენოთერაპია და რადიოთერაპია.

გამოკვლევებით დადგინდა, რომ თუ დასხივებულ ორგანიზმს მოვათავსებთ მაღალი ტემპერატურის პირობებში, სხივური დაავადება უფრო ეფექტურად მიმდინარეობს. დასხივებისადმი ქსოვილთა მგრძნობიარობა დამოკიდებულია ასევე ჟანგბადის პარაციალურ წნევაზე. იგი კლებულობს ჟანგბადის პარაციალური წნევის შემცირებასთან ერთად.

ცოცხალ სისტემაზე მაიონებელი გამოსხივების მოქმედების მოქმედების შესახებ რამდენიმე თეორიაა დამუშავებული. ერთ-ერთი პირველია გროვეტერის ე.წ. სამიზნის თეორია. ამ თეორიის თანახმად, ცოცხალ უჯრედში თითქოს და არის განსაკუთრებით მგრძნობიარე უბანი – სამიზნე. სამიზნეს მიერ კვანტის ან ნაწილაკის ენერგიის შთანთქმს იწვევს შეუქცევად ცვლილებებს, რაც განაპირობებს უჯრედის დაღუპვას. ამ თეორიის მომხრე მკლევარების აზრით, ასეთი სამიზნის როლი შეიძლება შეიძლება შეასრულოს უჯრედის ბირთვმა, ბირთვაკებმა, გენმა და სხვა. ცდებით დადასტურდა, რომ ამ თეორიას ბევრი ნაკლი გააჩნია. მაგალითად, იგი ვერ ხსნის სხივური დაავადების ბევრ პროცესს: მეორე სტადიის მოჩვენებითი გაუმჯობესების ფაზის მექანიზმს, ტემპერატურის, ჟანგბადის, ქიმიური დამცველებისა და სხვა მოქმედების მექანიზმს და ა.შ.

ვეისმა და დეილიმ შეიმუშავეს არაპირდაპირი მოქმედების თეორია, რომლის თანახმად, მაიონებელი გამოსხივების ცოცხალ სისტემებზე მოქმედებაში მთავარი როლი ეკუთვნის წყლიან ფაზაში იონების, რადიკალებისა და ზეჟანგის წარმოქმნას წყლის რადიოლიზმის შდეგად. ეს პროდუქტები რეაქციაში შედის ორგანულ მოლეკულებთან და იწვევს მათი ფიზიკურ-ქიმიური და სტრუქტურული თვისებების შეცვლას. ამის შედეგად სხივური დაავადება ვითარდება.

პირდაპირი მოქმედების თეორიის ავტორია ბარონი. ამ თეორიის თანახმად, მაიონებელი გამოსხივება უშუალოდ მოქმედებს ცოცხალი სისტემის ორგანულ მოლეკულაზე, იწვევს მათსი ცვლილებას, რაც საფუძვლად უნდა ედოს სხივური დაავადების განვიტარებას. ბარონის აზრით, ამ პროცესში ყველაზე მთავარ როლს ასრულებს ფერმენტების დაზიანება, რაც ძირითადად მათი *SH* ჯგუფების დაჟანგვით უნდა იყოს გამოწვეული.

სხვა მეცნიერთა აზრით გამოსხივების მოქმედებით ციტოპლაზმური მემბრანისა და უჯრედის განვლადობა იცვლება. ამის შედეგად დიდი რაოდენობით ფერმენტები გამოთავისუფლდება, რაც იწვევს ბიოქიმიურ პროცესების დეზინტეგრაციას და უჯრედების აუტოლიზმს. თეორია ვერ ხსნის განვლადობის ცვლილების მექანიზმს.

დღეისათვის ყველაზე უფრო სრულყოფილია ე. წ. ჯაჭვური პროცესების თეორია, რომლის ავტორია ტარუსოვი.

ამ თეორიის თანახმად, სხივური ზემოქმედების შდეგად იონები, რადიკალები, ზეჟანგები და სხვა აქტიური ნაერთები წარმოიქმნება როგორც წყლიან ფაზაში, ასევე ორგანულ სუბსტრატში. მასთან, პროცესის განვითარებისათვის არავითარი მნიშვნელობა არ აქვს იმას, თუ სად წარმოიქმნება აქტიური ნაერთი – წყლიან ფაზაში, თუ ორგანულ სუბსტრატში. იონებს, რადიკალებს და ზესანგებს შეუძლიათ სხვადასხვა ქიმიური რეაქციის და მათ შორის, რაც ყველაზე მნიშვნელოვანია, ჯაჭვური ჟანგვითი რეაქციის გამოწვევა. ჯაჭვური რეაქციების თანდათან განვითარება განაპირობებს ნორმალური ბიოფიზიკური პროცესების დარღვევას და სხივური დაავადების განვითარებას.

ამოცანათა კრებული

სამედიცინო ფიზიკაში

(ამოცანების ამოხსნის მაგალითები)

სარჩევი

281**$ 1. მექანიკური რხევები და ტალღები. ბგერა.** 193

ამოცანების ამოხსნა 200

$ 2. სითხეების დინება. ბერნულის განტოლება. 220

ამოცანების ამოხსნა 223

$ 3. თერმოდინამიკა.თერმოდინამიკის I კანონი. 239

ამოცანების ამოხსნა

$ 4. **ფარმაკოლოგია**

ხსნარების კონცენტრაციის ერთეულები და კოლიგატიური

თვისებები. 249

ამოცანების ამოხსნა 256

$ 5. ფიზიკური პროცესები ბიოლოგიურ მემბრანებში. 272

ამოცანების ამოხსნა 273

$ 6. ელექტროდინამიკა. ელექტრონიკა. 273რრორ! ოკმარკ ნოტ დეფინედ.

ამოცანების ამოხსნა

5.1 მაგნიტური ველი. დამუხტული ნაწილაკების მოძრაობა ელექტრულ და მაგნიტურ ველში 289

$ 7. ოპტიკა. დიფრაქციული მოვლენები. 301

6.1 **სინათლის პოლარიზება** 310

ამოცანების ამოხსნა 326

$ 8. ატომების და მოლეკულების ფიზიკა. 314

ამოცანების ამოხსნა 316

§ 9. მაიონებელი გამოსხივება

ამოცანების ამოხსნა

§ 10. ბირთვი. რადიოაქტიურობა. 324

ამოცანების ამოხსნა

ცხრილები 328

ლიტერატურა 344

მექანიკური რხევები და ტალღები. ბგერა.

სამედიცინო ფიზიკა შეისწავლის იმ ფიზიკურ მოვლენებს და კანონებს, რომეთაც დიდი გამოყენება აქვთ სამედიცინო სადიაგნოსტიკო ხელსაწყოების ადამიანის ორგანიზმში განვითარებული სხვადასხვა პათოლოგიური პროცესების შესასწავლად და გამოსაკვლევად. ამ ფიზიკური პროცესების ცოდნა აუცილებელია რათა სწორად იქნას დასმული დიაგნოზი, მკურნალობის კურსის წარმატებით განხორციელე-ბისთვის. ამასთან ზოგიერთი ფიზიკური მოვლენები სხვადასხვა ხელსაწყოების საშუალებით გამოიყენება, როგორც სამკურნალო ფიზიოთერაპიული საშუალება. პერიოდული მექანიკური მოძრაობა მატერიის საერთო ფუნდამენტური თვისებაა. პერიოდული ეწოდება ისეთ მოძრაობას, რომელიც ზუსტად მეორდება დროის განსაზღვრული ინტერვალის შემდეგ. თუ პერიოდული მოძრაობისას სხეული გადაადგილდება რაიმე წონასწორული მდებარეობის მიმართ, ხან ერთ, ხან მეორე მხარეს, მაშინ სხეულის ასეთ მოძრაობას რხევა ეწოდება. რხევას, რომელიც შინაგანი ძალებით არის განპირობებული, თავისუფალი რხევა ეწოდება. როდესაც მერხევ სხეულზე შინაგან ძალებთან ერთად მოქმედებენ გარეშე პერიოდული ძალებიც, იძულებითი რხევა ეწოდება. თავისუფალი ძალები ყოველთვის მილევადია.რხევა არ მიილევა, თუ მას

იძულებითი ხასიათი აქვს. ე.ი. გამოწვეულია პერიოდულად ცვლადი ძალით. რხევებს შორის ყველაზე მარტივი ჰარმონიული რხევაა. რხევებს ეწოდება ჰარმონიული, თუ მისი მახასიათებელი ფიზიკური სიდიდე სინუსის ან კოსინუსის კანონით იცვლება. პერიოდული (რხევითი) მოძრაობა უდევს საფუძვლად გულის, ფილტვების, ნაწლავების მუშაობას, არტერიის გასწვრივ წნევის პულსური წნევის გავრცელებას (პულსური ტალღა-პულსი) და სხვა. მექანიკური რხევების გამოყენების ერთ-ერთი მაგალითია შინაგანი ორგანოების გამოსახულების მიღება მაღალი სიხშირის მექანიკური რხევების გამოყენებით. ამ მეთოდს ულტრაბგერითი ვიზუალიზაციის მეთოდი ეწოდება. ვიზუალიზაციის მეთოდებს მიეკუთვნებიან ექოსკოპები, სადაც გამოყენებულია ულტრაბგერა, ორგანზომი-ლებიანი B – სკანირება, ექოენცელოგრაფიით შეიძლება თავის ტვინის დაზიანების დიაგნოსტიკა, ექოოფტალმოგრაფიით მხედველობის ორგანოს გამოკვლევა, ექოკარდიოგრაფიით გულის დაზიანების დიაგნოსტიკა.

ექოგრაფის მეთოდით იკვლევენ კუჭის, ღვიძლის და სხვა ორგანოების გამოსახულებებს. მოძრავი ობიექტის (ორგანოს) გამოსახულების მისაღებად გამოყენებულია ექოგრაფიის მეთოდი, რომრლიც დაფუძნებულია დოპლერის ეფექტზე. შექმნილია ექოგრაფი სისხლძარღვთა სისტემაში – ვენებსა და არტერიებში სისხლის მიმოქცევის გამოკვლევისათვის.

თავისუფალი მიულევადი რხევების დიფერენციალური განტოლება ჩაიწერება:

$$\frac{d^2x}{dt^2} = -\omega_0{}^2 x \quad (1.1)$$

სადაც x – მერხევი მატერიალური წერტილის წონასწორობიდან გადახრაა, t – დრო.

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{\kappa}{m}} \qquad (1.2)$$

ω_0 – რხევის წრიული სიხშირეა, k – კვაზიდრეკადი ძალის კოეფიციენტია (ზამბარის სიხისტე). (F = – kx) არის ძალა რომელიც წარმოიშობა სისტემაში მისი წონასწორობის მდგომარეობიდან გამოსვლისას.

m – მერხევი სხეულის მასაა.

(1.1) განტოლების ამონახსნია:

$$x = A\cos(\omega_0 t + \varphi_0) \quad (1.3)$$

სადაც A – რხევის ამპლიტუდაა, წონასწორობის მდგომარეობიდან მაქსიმალური გადახრა, $\omega_0 t$ – რხევის ფაზა, φ_0 - რხევის საწყისი ფაზაა ($\varphi = \varphi_0$. როცა t =0)

რხევის პერიოდი – დრო რომელსაც ანდომებს მერხევი სხეული ერთი სრული რხევის შესრულებას.

მათემატიკური ქანქარის შემთხვევაში:

$$T = \frac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi\sqrt{\frac{\ell}{g}} \qquad (1.4)$$

სადაც ℓ – ქანქარის სიგრძეა, g- თავისუფალი ვარდნის აჩქარებაა

ზამბარიანი ქანქარის შემთხვევაში:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}} \qquad (1.5)$$

ფიზიკური ქანქარას შემთხვევაში:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{J}{mgl}} \quad (1.6)$$

სადაც J– ფიზიკური ქანქარის ინერციის მომენტია . ℓ – არის მანძილი დაკიდების წერტილსა და ქანქარის მასის ცენტრს შორის.

ფიზიკური ქანქარის დაყვანილი სიგრძე

$$\ell_{\text{დაყ}} = \sqrt{\frac{\mathrm{J}}{\mathrm{m}\ell}} \quad (1.7)$$

მატერიალური წერტილის სიჩქარე, რომელიც ასრულებს ჰარმონიულ რხევებს:

$$\upsilon = \frac{dx}{dt} = -A\omega_0 \sin(\omega_0 t + \varphi_0) = -\upsilon_{\max} \sin(\omega_0 t + \varphi_0) = \upsilon_{\max} \cos\left(\omega_0 t + \varphi_0 + \frac{\pi}{2}\right) \quad (1.8)$$

სადაც $\upsilon_{\max} = A\omega_0$ – სიჩქარის ამპლიტუდაა.

მატერიალური წერტილის აჩქარება, რომელიც ასრულებ ჰარმონიულ რევებს:

$$a = \frac{d\upsilon}{dt} = -A_0{\omega_0}^2 \cos(\omega_0 t + \varphi_0) = -a_{\max} \cos(\omega_0 t + \varphi_0) = a_{\max} \cos(\omega_0 t + \varphi_0 + \pi)$$

(1.9)

სადაც $a_{\max} = A\omega^2{}_0$ – აჩქარების ამპლიტუდა.

მერხევი მატერიალური წერტილის ენერგია:

კინეტიკური

$$E_k = \frac{kA^2}{2}\sin^2(\omega_0 t + \varphi_0) \qquad (1.10)$$

პოტენციალური

$$E_p = \frac{kA^2}{2}\cos^2(\omega_0 t + \varphi_0) \qquad (1.11)$$

სრული $E = E_k + E_p = \frac{kA^2}{2}$

რთული რხევის ამპლიტუდა

$$A = \sqrt{A_1^2 + A^2{}_2 + 2A_1A_2\cos(\varphi_{o2} - \varphi_{01})} \qquad (1.13)$$

სადაც A_1, A_2 – შესაკრები ჰარმონიული რხევის ამპლიტუდებია, $\varphi_{01,}\varphi_{02}$ – მათი საწყისი ფაზებია.

რთული რხევის საწყისი ფაზა

$$\varphi_0 = arctg\frac{A_1\sin\varphi_{01} + A_2\sin\varphi_{02}}{A_1\cos\varphi_{01} + A_2\cos\varphi_{02}} \qquad (1.14)$$

თავისუფალი მილევადი რხევების დიფერენციალური განტოლება

$$\frac{d^2x}{dt^2} + 2\beta\frac{dx}{dt} + \omega_0{}^2 x = 0 \qquad (1.15)$$

სადაც $\beta = \frac{r}{2m}$ – მილევის კოეფიციენტია. r -არის პროპორციულობის კოეფიციენტი მატერიალური წერტილის სიჩქარესა და ხახუნის ძალას შორის, რომელიც ტოლია $F = -r\upsilon$

(1.15) განტოლების ამონახსნია

$$x = A_0 e^{-\beta t}\cos(\omega t + \varphi_0) \qquad (1.17)$$

მილევადი რხევის პერიოდი

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi}{\sqrt{\omega^2{}_0 - \beta^2}} \qquad (1.18)$$

მილევადი რხევის ამპლიტუდა

$$A = A_0 e^{-\beta t} \qquad (1.19)$$

მილევის ლოგარითმული დეკრემენტი

$$\lambda = \ln \frac{A(t)}{A(t+T)} \qquad (1.20)$$

სადაც A(t) და A(t+T) – 2 მიმდევრობითი რხევების ამპლიტუდებია

მილევადობის ლოგართმული დეკრემენტის და მილევადობის კოეფიციენტს შორის კავშირი

$$\lambda = \beta t \qquad (1.21)$$

იძულებითი რხევების დიფერენციალური განტოლება

$$\frac{d^2x}{dt^2} + 2\beta \frac{dx}{dt} + \omega^2 x = f_0 \cos \varpi t \qquad (1.22)$$

სადაც $f_0 = \frac{F_0}{m}$, F_0 – მაიძულებელი ძალის ამპლიტუდაა.

მატერიალური წერტილის გადახრა იძულებითი რხევების დამყარების შემდეგ

$$x = A\cos(\omega t + \varphi_0) \qquad (1.23)$$

სადაც $A = f_0 / \sqrt{(\omega^2{}_0 - \omega^2)^2 + 4\beta^2\omega^2}$, $tg\varphi_0 = -2\beta\omega/(\omega^2 - \omega^2{}_0)$

იძულებითი რხევების წრიული სიხშირე რეზონანსისას

$$\omega_{რეზ.} = \sqrt{\omega_0^2 - 2\beta^2} \qquad (1.24)$$

იძულებითი რხევების ამპლიტუდა რეზონანსისას

$$A_{რეზ} = f_0 / (2\beta\sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}) \qquad (1.25)$$

ბრტყელი დრეკადი ტალღის განტოლება

$$S = A\cos\omega(t - \frac{y}{\upsilon}) \qquad (1.26)$$

სადაც S – მერხევი წერტილების გადახრა ტალღაში წონასწორობის მდგომარეობის მიმართ. y – რომელიმე წერტილის წონასწორობაში მდებარეობის კოორდინატაა, υ – ტალღის გავრცელების სიჩქარე (ფაზური სიჩქარე)

ტალღის ინტენსივობა (ენერგიის ნაკადის სიმკვრივე)

$$J = \omega_0 \upsilon \qquad (1.27)$$

სადაც ω_0 – რხევითი მოზრაობის ენერგიის მოცულიბითი სიმკვრივეა. υ – ტალრის სიჩქარე.

(დოპლერის ეფექტი)

რხევის სიხშირე, რომელსაც აღიქვამს დამკვირვებელი

$$\nu' = \frac{\upsilon \pm \upsilon_1}{\upsilon \mp \upsilon_2} \nu \qquad (1.28)\ (1.28)$$

სადაც υ_1 და υ_2 – დამკვირებლის და დრეკადი ტალღის წყაროს სიჩქარეებია გარემოს მიმართ. ν - გამომსხივებელი რხევის სიშირე. (1.28) ფორმულაში ზედა მნიშვნელობები შეესაბამება დამკვირებლისა და წყაროს თანმხვედრ მოძრაობას, ქვედა მნიშვნელობები მოძრაობას საწინააღმდეგო მიმართულებით..

დოპლერის სიხშირის წანაცვლება

$$\nu_{\text{დოპ}} = \frac{2\upsilon_0}{\upsilon} \nu \qquad (1.29)$$

სადაც υ_0 – მოძრავი სხეულის სიჩქარეა, υ – ტალღის სიჩქარე (ულტრაბგერა)

ბრტყელი ტალღისათვის ბგერის I ინტენსივობის და ბგერის წნევას P შორის კავშირი

$$I = \frac{p^2}{2\rho\upsilon} \qquad (1.30)$$

სადაც ρ – გარემოს სიმკვრივეა, რომელშიც ვრცელდება ბგერა, υ – მისი სიჩქარე..

ბელი (ბ) – არის ლოგარითმული ფარდობითი სიდიდის ერთეული (2-ერთსახელიანი ფიზიკური სიდიდის ფარდობის ლოგარითმი)

მაგალითად

$$\mathrm{L_ბ} = \lg(\frac{\mathrm{I}}{\mathrm{I_0}}),\ I = 10^{L_ბ} \cdot I_o \qquad (1.31)$$

სადაც

$\mathrm{L_ბ}$ არის ინტენსივობის I ინტენსივობის დონე I_0 მიმართ გამოსახული ბელებში. I_0 არის სკალის საწყისი დონე.

$\mathrm{L_ბ}$ - შეიძლება გამოვსახოთ კიდევ დეციბელებში (დც).

$$\mathrm{L_{დბ}} = 10\lg(\frac{\mathrm{I}}{\mathrm{I_0}}),\quad I = 10^{\mathrm{L_{დბ}}^{10}} I_0 \qquad (1.32)$$

(1.30) და (1.32)-დან გამომდინარეობს

$$\lg\frac{\mathrm{I}}{\mathrm{I_o}} = \lg\frac{\rho^2}{\rho_0^2} = 2\lg\frac{\rho}{\rho_0}$$

ითვლება, რომ ხმამაღლობის სკალა (E) და ბგერის ინტენსივობა (L) ემთხვევა ერთმანეთს 1კჰც სიხშირეზე

$$E_b = \mathrm{L_ბ} = \lg(\frac{\mathrm{I}}{\mathrm{I_0}}) \qquad (1.33)$$

ან ფონებში

$$\mathrm{E_ფ} = \mathrm{L_{დბ}} = 10(\frac{\mathrm{I}}{\mathrm{I_0}})\ . \qquad (1.34)$$

ამოცანების ამოხსნა

ამოცანა 1. (Ремизов А. Н. –2. 38)

დაწერეთ ჰარმონიული რხევის განტოლება, თუ სიჩქარის ამპლიტუდა

υ_{max} = 63 სმ/წმ, რხევის პერიოდი T=1 წმ. წერტილის გადახრა წონასწორობის მდებარეობიდან დროის საწყის მომენტში ნულის ტოლია. გაიგეთ აჩქარების ამპლიტუდა , რხევის სიხშირე.

მოც: .

υ_{max}= 63 სმ/წმ = 0,63მ/წმ

T =1წმ. t = 0, x =0.

უ.ვ. a_x, υ

ამოხსნა:

სიჩქარის ამპლიტუდა

$\upsilon_{max} = \omega A$

აჩქარების ამპლიტუდა უდრის

$a_{max} = \omega^2 A$

აქედან

$a_{max} = \upsilon_{max} A$

რხევის სიხშირე

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = \frac{2\pi}{1} = 2\pi \text{ წმ}^{-1}$$

$$A = \frac{\omega_{max}}{\omega} = \frac{0,63}{2 \cdot 3,14} = \frac{0,63}{2 \cdot 3,14} = 0,1$$

ჰარმონიული რხევის განტოლება ჩაიწერება

$x = A\cos(\omega t + \varphi_0)$; $x = 0,1 \cos \varphi_0 = 0$;

$\cos\varphi_0 = 0;\ \ \varphi_0 = 90^0 = \frac{\pi}{2};\ x = 0{,}1\cos(2\pi t + \frac{\pi}{2})$

აჩქარების ამპლიტუდა

$a_x = \omega^2 A = 4\pi^2 \cdot 0{,}1 = 0{,}4\pi^2 = 4{,}0\ მ/წმ^2$

რხევის სიხშირე

$\nu = \frac{1}{T} = \frac{1}{1} = 1ჰც.$

ამოცანა 1.1. (Ремизов А. Н. –2. 39)

ქანქარა ასრულებს ჰარმონიულ რხევას. რა დროის შემდეგ გადაიხრება ქანქარა პირველი რხევის შედეგად წონასწორობის მდებარეობიდან მანძილით, რომელიც ტოლია ამპლიტუდის 1/2-ის, თუ რხევის პერიოდი T = 4 სმ. საწყისი ფაზა $\varphi_0 = \frac{\pi}{2}$.

მოც: .

$x = \frac{A}{2}$

T = 4 წმ.

$\varphi_0 = \frac{\pi}{2}$

უ.ვ.. ვ. t

ამოხსნა:

ამოცანის პირობის თანახმად, რხევის ამპლიტუდა

$\frac{A}{2} = A\cos(\omega t + \frac{\pi}{2});$

$\omega = \frac{2\pi}{T} = \frac{2\pi}{4} = \frac{\pi}{2}$

$\frac{1}{2} = \cos(\frac{\pi}{2}t + \frac{\pi}{2})$, $\frac{1}{2} = \sin\frac{\pi t}{2}$, $\sin\frac{\pi}{6} = \sin\frac{\pi t}{2}$, $\frac{\pi}{6} = \frac{\pi t}{2}$,

t = $\frac{1}{3}$ წმ.

ამოცანა 1.2. (Ремизов А. Н. –2.40)

m =2 გრ. მასის მატერიალური წერტილი ასრულებს ჰარმონიულ რხევას. რაღაც დროის შემდეგ წერტილის გადახრა გახდება x = 5 სმ, სიჩქარე υ = 20 სმ/წმ, აჩქარება ა = 80 სმ/წმ^2. გაიგეთ წრიული სიხშირე, პერიოდი, რხევის ფაზა დროის მოცემულ მომენტში, ასევე მერხევი წერტილის ამპლიტუდა და სრული ენერგია.

მოც: .

m = 2გრ. = 2 10 $^{-3}$ კგ

x = 5 სნ. = 0,05 მ.

υ = 20 სმ/წმ = 0,2მ/წმ

ა = 80 სმ/წმ^2 = 0,8 მ/წმ^2.

უ.ჱ. ω, T, φ, A, E

ამოხსნა:

სიჩქარის ამპლიტუდა

$\upsilon_{max} = \omega A = 0{,}2$ მ/წმ

აჩქარების ამპლიტუდა

$ა_{max} = \omega^2 A = \upsilon_{max}\omega = 0{,}8$ მ/წმ^2

$\omega = \frac{a_m}{\upsilon_m} = \frac{0{,}8}{0{,}2} = 4$ წმ$^{-1}$

$\omega = \frac{2\pi}{T}$; T = $\frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi}{4} = \frac{\pi}{2}$ წმ.

ჰარმონიული რხევის განტოლება

x = Aცos($\omega t + \varphi_0$); 0,05 = Aცos($\omega t + \varphi_0$);

0,05 = 5ცos($\omega t + \varphi_0$); 0,01 = ცos($\omega t + \varphi_0$);

E = $\frac{m\omega^2 A^2}{2} = \frac{2\times10^{-3}\cdot16\cdot25\times10^{-4}}{2} = 400\cdot\times0^{-4} = 0{,}4$ χ.

ამოცანა 1.3 (Ремизов А. Н. –2.41)

წერტილის რხევის საწყისი ფაზა უდრის 0-ს, რხევის პერიოდი T =1 წმ. განსაზღვრეთ, დროის უახლესი მომენტები, როცა გადახრა, სიჩქარე და აჩქარება 2-ჯერ ნაკლებია ამპლიტუდური მნიშვნელობისა.

მოც: .

$\varphi_o = 0$

T=1წმ

x = $\frac{x_0}{2}$

$\upsilon = \frac{\upsilon_m}{2}$

ა = $\frac{a_m}{2}$

უ.გ. t, $t_1 = \frac{1}{6}$, $t_2 = \frac{1}{12}$, $t_3 = \frac{1}{6}$

ამოხსნა:

წერტილის გადახრა

$x = x_0 \cos(\omega t + \varphi_0)$ (1)

მაშინ, რადგანაც $\varphi_0 = 0$

$x = x_0 \cos \omega t$;

რადგანაც

T = 1 წმ. $\omega = 2\pi / T$;

ამიტომ

$\omega = 2\pi$;

ჩავსვათ ω – ს მნიშვნელობა (1)-ში

$x = x_0 \cos 2\pi t$;

პირობის თანახმად $x = x_0 / 2$, ამიტომ

$\cos 2\pi t = 1/2$, $\cos 2\pi t = \cos\frac{\pi}{3}$, $\cos\frac{\pi}{6} = 60^0$, $2\pi t = \frac{\pi}{3}$, $t_1 = \frac{1}{6}$ წმ.

რხევის სიჩქარისათვის

$$\upsilon = \upsilon_m \cos(\omega t + \varphi_o + \frac{\pi}{2}), \quad \frac{\upsilon_m}{2} = \upsilon_m \cos(2\pi t + \frac{\pi}{2})$$

$$\sin\frac{\pi}{6} = \sin 2\pi t, \quad \frac{\pi}{6} = 2\pi t, \quad t_2 = \frac{1}{2} \quad \text{წმ.}$$

რხევის აჩქარებისათვის $a_m = \upsilon_m \omega$, ხოლო ა უდრის

$$a = a_m \cos(\omega_o t + \varphi_o + \pi) = \frac{a_m}{2}, \quad \cos(2\pi t + \pi) = \frac{1}{2}, \cos 2\pi t = \cos\frac{\pi}{3},$$

$$2\pi t = \frac{\pi}{3}, \quad t_3 = \frac{1}{6} \text{ წმ.}$$

ამოცანა 1.4 (Ремизов А. Н. –2.45)

m = 5კგ. მასის სხეული ასრულებს ჰარმონიულ რხევას. A = 4 სმ ამპლიტუდით. გაიგეთ რხევის პერიოდი, თუ მერხევი სხეულის მაქსიმალური კინეტიკური ენერგია $E_k = 0{,}98$ ჯ.

მოც: .

m = 5კგ.

A = 4სმ = $4 \cdot 10^{-2}$მ.

$E_k = 0{,}98$ჯ

უ. ვ. T

ამოხსნა:

მერხევი სხეულის კინეტიკური ენერგია

$$E_k = \frac{m\omega^2 A^2}{2},$$

აქედან

$$\omega^2 = \frac{2E}{mA^2},$$

მერხევი სხეულის სიხშირე

$$\omega^2 = \frac{4\pi^2}{T^2}; \quad \frac{4\pi^2}{T^2} = \frac{2E}{mA^2}$$

$$T^2 = \frac{4\pi^2 mA^2}{2E}, \text{ აქედან}$$

$$T = \sqrt{\frac{2 \cdot 10 \cdot 5 \cdot 16 \cdot 10^{-4}}{0{,}08}} = \sqrt{16 \cdot 10^{-2}} = 0{,}4\text{წმ}.$$

ამოცანა 1.5 (Ремизов А. Н. –2.63)

ℓ = 50 სმ. სიგრძის მატემატიკური საქანი, რომელიც გამოვიდა წონასწორობის მდებარეობიდან პირველი რხევის შედეგად გადაიხარა x_1 = 5 სმ-ით, მეორე რხევისას (იგივე მხარეს) x_2 = 4სმ-ით. გაიგეთ მილევადობის ლოგარითმული დეკრემენტი და რელაქსაციის დრო (ამპლიტუდის შემცირების დრო e – ჯერ) ამ რხევებისათვის.

მოც: .

ℓ = 50სმ = 0,5მ

x_1 = 5სმ = 5×10^{-2}მ

x_2 = 4სმ = 4×10^{-2}მ

უ. 3. A, t

ამოხსნა:

მილევადობის ლოგარითმული დეკრემენტი ჩაიწერება

$$\lambda = \ln\frac{A(t)}{A(t+T)} = \ln\frac{5\times10^{-2}}{4\times10^{-2}} = \ln 1{,}25 = 0{,}223$$

$$A = A_0 e^{-\beta t}$$

პირობის თანახმად

$$\frac{A_0}{A} = e = \mathrm{e}^{\beta t} \ ;$$

სადაც βt = 1; $t = \frac{1}{\beta}$; $\lambda = \beta t$;

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{\ell}{g}} = 6{,}28\sqrt{\frac{0{,}5}{10}} = 5{,}28\sqrt{0{,}05} = 1{,}39 \text{ წმ.}$$

რელაქსაციის დრო

$$t = \frac{T}{\lambda} = \frac{1{,}39}{0{,}223} = 6{,}25 \text{ წმ.}$$

ამოცანა 1.6 (Ремизов А. Н. –2.64)

Δt = 10 წმ. დროის განმავლობაში რხევის ამპლიტუდა შემცირდა e – ჯერ. გაიგეთ ამ რხევების მილევის კოეფიციენტი.

მოც: .

$\Delta t = 10$სმ.

$\frac{A_0}{A} = e$

უ.ჭ. β

ამოხსნა:

$A = A_0 e^{-\beta \Delta t}$; $\frac{A_0}{A} = e = e^{\beta \Delta t}$; $\beta \Delta t = 1$

$\beta = \frac{1}{\Delta t} = \frac{1}{10} = 0{,}1$წმ$^{-1}$

ამოცანა 1.7(Ремизов А. Н. –2.65)

კამერტონის მილევადობის ლოგარითმული დეკრემენტი, რომელიც ირხევა $\nu = 100$ ჰც. სიხშირით, ტოლია A = 0,002. რა დროის შემდეგ შემცირდება კამერტონის რხევის ამპლიტუდა 100-ჯერ.

მოც: .

$\nu = 100$ჰც.

$\lambda = 0{,}002$

$\frac{\Delta A_0}{A} = 100$

უ.ჭ Δt

ამოხსნა:

$$\lambda = \beta t;\ \ T = \frac{1}{\nu} = \frac{1}{100} = 0{,}01\text{წმ}.$$

$$A = A_0 e^{-\beta \Delta t};\ \ \frac{A_0}{A} = e^{\beta \Delta t} = 100;\ \ e^{\beta \Delta t} = 100;\ \ \beta \Delta t = \ln 100$$

$$\Delta t = \ln \frac{100}{\beta} = \ln \frac{100T}{\lambda} = \frac{4{,}60{,}01}{0{,}002} = \frac{46}{2} = 23\text{წმ}.$$

ამოცანა 1.8 (Ремизов А. Н. –2.66)

ქანქარას მილევადობის ლოგარითმული დეკრემენტი ტოლია λ =0.02. რამდენჯერ შემცირდება ქანქარის A ამპლიტუდა 50 სრული რხევის შესრულების შემდეგ?

მოც: .

$\lambda = 0{,}02$

$\Delta t = 50T$

უ.ჱ. $\frac{A_0}{A} = e$

ამოხსნა:

$$\frac{A_0}{A} = e^{\beta t};\ \lambda = \beta t;\ \beta = \frac{\lambda}{T};$$

$$\frac{A_0}{A} = e^{\frac{\lambda}{T} 50\ T} = e^{50\,\lambda} = e^{\,50 \times 0{,}02} = e;$$

ამოცანა 1.9 (Ремизов А. Н. –2.67)

Δt = 10წმ. შემდეგ ქანქარის რხევის ამპლიტუდა შემცირდა 3-ჯერ. რა დროის შემდეგ შემცირდება ის 10-ჯერ.

მოც: .

$\Delta t = 10$ წმ

$\frac{A_0}{A} = 3$

$\frac{A_0}{A} = 10$

უ.ვ. t

ამოხსნა:

$$\frac{A_0}{A} = 3 = e^{\beta\ \Delta t'}\ ;\ \ln 3 = \beta\ \Delta t';\ \ln 3 = 10\beta;\ \ \beta = \frac{\ln 3}{10}$$

$$\frac{A_0}{A} = 10 = e^{\beta\ \Delta t''}\ ;\ \ln 10 = \beta\ \Delta t;\ \ln 10 = \frac{\ln 3}{10} t;$$

$$t = \frac{10 \ln 10}{\ln 3} = \frac{10 \cdot 2{,}30 \times 25}{1{,}098} = 20{,}96 \text{ წმ.}$$

ამოცანა 1.10 (Ремизов А. Н. –2.70)

მილევადი რხევის ამპლიტუდა 10 რხევის განმავლობაში მცირდება საწყისი ამპლიტუდის 1/10-ჯერ. რხევის პერიოდი T=0,40. განსაზღვრეთ მილევის ლოგარითმული დეკრემენტი და მილევის კოეფიციენტი.

მოც: .

t = 10T

A = A_0 = 9/10A_0

T = 0,4წმ^2

უ.ჱ. β, λ

განსხვავდებიან ინტენსივობით

$$A = A_0 e^{-\beta t};\ \ \ln\frac{A_0}{\frac{9}{10}A_0} = \beta t;\ \ \ln\frac{10}{9} = \beta \times 10T;\ \ \ln 1{,}1 = 4\beta;$$

$$\beta = \frac{\ln 1{,}1}{4} = 0{,}025\text{სმ};$$

$$\lambda = \beta T;$$

$$\lambda = 0{,}025 \times 0{,}4 = 0{,}01.$$

ამოცანა 1.11 (Ремизов А. Н. –2.93)

2 ერთნაირი სიხშირის ბგერა განსხვავდებიან ინტენსივობით $\Delta L =$ 30დბ. იპოვეთ ბგერის წნევის ამპლიტუდის ფარდობა.

მოც: .

$\Delta L = 30$დბ.

უ.ჱ. P_1/P_2

ამოხსნა:

$$\mathrm{L}_{\text{დბ}} = 10\ln\frac{I}{I_0};\ \ \lg\frac{I_1}{I_2} = 2\lg\frac{P_1}{P_2};\ \ L_{1\text{დბ}} = 10\times\lg\frac{I_1}{I_0} = 20\times\lg\frac{P_1}{P_0};$$

$$\mathrm{L}_2 = 10\times\lg\frac{I_2}{I_0} = 20\times\lg\frac{P_2}{P_0}$$

$$L_{1დბ} - L_{2დბ} = \Delta L = 20 \times \lg \frac{P_1}{Po} - 20 \times \lg \frac{P_2}{Po} = 20(\lg \frac{P_1}{Po} - \lg \frac{P_2}{Po}) = 30;$$

$$2 \lg \frac{P_1}{P_2} = 3; \ \frac{P_1}{P_2} = 10^{3/2}; \ \frac{P_1}{P_2} = \sqrt{1000} = 32$$

ამოცანა 1.12 (Ремизов А. Н. –2.94)

წარმოების გარკვეული პირობების გათვალისწინებით დადგენილია, რომ ხმაურის დასაშვები ფონი E =70 დბ. განსაზღვრეთ ბგერის დასაშვები მაქსიმალური ინტენსივობა. პირობითად ჩავთვალოთ, რომ ხმაური შეესაბამება ბგერას სიხშირით $\nu = 1$ კჰც.

მოც: .

$\nu =$ 1კჰც.

E = 70ფონი.

უ.ვ. I_{max}

ამოხსნა:

$$E = 10 \lg \frac{I}{I_0}; \ 10 \times \lg \frac{I}{I_0} = 70; \ \frac{I}{I_0} = 10^7; \ I_{max} = I_0 10^7; \ I_o = 10^{-12} \text{ვტ/მ}^2$$

$I_{max} = 10^{-12} \times 10^7 = 10^{-5}$ ვტ/მ^2

ამოცანა 1.13 (Ремизов А. Н. –2.95)

ყურის მემბრანის დაზიანება იწყება, როცა ბგერის ინტენსივობა L=150 დბ. განსაზღვრეთ ინტენსივობა, ბგერითი წნევის ამპლიტუდური მნიშვნელობა და ტალღაში ნაწილაკების გადახრის ამპლიტუდა ბგერისათვის სიხშირით ν=1კჰც, როდესაც შეიძლება დაზიანდეს ყურის მემბრანა.

მოც: .

L = 150დბ.

უ. ვ. A

ამოხსნა:

$$L = 10 \times \lg \frac{I}{I_0};\ 150 = 10 \times \lg \frac{I}{I_0};$$

$$\nu = 1кჰც.$$

$$\frac{I}{I_0} = 10^{15} \times I_m = 10^{15} \times 10^{-12} = 10^3 \ \text{ვტ/მ}^2 = 1кვტ/მ^2$$

$$P = \sqrt{2\rho\upsilon I} = 937 \text{პა.} \ \text{რადგან} \ \ I = \omega_\rho \upsilon = 2\pi^2 \nu^2 \rho \upsilon A$$

$$A = \frac{1}{n\nu\sqrt{\frac{I}{2\rho\nu}}} = 3{,}4 \times 10^{-4} \text{მ.}$$

ამოცანა 1.14 (Ремизов А. Н. –2.37)

დაწერეთ ჰარმონიული რხევის განტოლება, თუ აჩქარების ამპლიტუდა a_{max}=50 სმ/წმ^2, რხევის სიხშირე $\nu = 0.5$ ჰც, წერტილის გადახრა წონასწორობის მდებარეობიდან საწყის მომენტში -ში $x_0 = 25$ მმ. გაიგეთ სიჩქარის ამპლიტუდა.

პასუხი: $x = 0{,}05\cos(\pi t + \frac{\pi}{3})$მ, $\upsilon_{მაქს}$ 0,16მ/წმ.

ამოცანა 1.15 (Ремизов А. Н. –2.42)

m=5 გრ. მატერიალური წერტილის რხევა აღიწერება $x = 10\cos(2t + \varphi_0)$ კანონით. გა-

იგეთ წერტილზე მოქმედი მაქსიმალური ძალა და სრული ენერგია.

პასუხი: 2 მნ, 0,1 მკჯ.

ამოცანა 1.16 (Ремизов А. Н. –2.43)

ჰარმონიული რხევის დიფერენციალურ განტოლებას აქვს სახე $0.2 \times \frac{d^2x}{dt^2} + 0.8x = 0$. იპოვეთ ამ რხევების პერიოდი და სიხშირე.

პასუხი: 3,14 წმ. 2 რად/წმ.

ამოცანა 1.17 (Ремизов А. Н. –2.44)

ზამბარა, რომელზეც დაკიდებულია სხეული, გაიჭიმა 4 სმ-ით. განსაზღვრეთ ზამბარიანი ქანქარას რხევის სიხშირე.

პასუხი: 2,5 ჰც.

ამოცანა 1.18 (Ремизов А. Н. –2.47)

m = 50 გრ. მასის არეომეტრი, რომლის ზედა ნაწილი წარმოადგენს ცილინდრულ მილს დიამეტრით D =1 სმ, ცურავს წყალში. განსაზღვრეთ არეომეტრის თავისუფალი ვერტიკალური რხევების სიხშირე წონასწორობის მდებარეობის მახლობლად.

პასუხი: 0,6 ჰც.

ამოცანა № 1.19 (Ремизов А. Н. –2.68)

ქანქარის რხევის ამპლიტუდა მცირდება 10 – ჯერ 100 სრული რხევის შესრულებისას.განსაზღვრეთ მილევის ლოგარიტმული დეკრემენტი? რამდენი რხევის შემდეგ ქანქარის ამპლიტუდა შემცირდება e – ჯერ.

პასუხი: $\lambda = 0,23$, n = 43,5

ამოცანა № 1.20 (Ремизов А. Н. –2.71)

ზამბარაზე ჩამოკიდებული სხეული, რომელიც ჭიმავს მას $\Delta x = 5$ სმ-ითით. დაწერეთ ზამბარიანი ქანქარას რხევის დიფერენციალური განტოლება და მისი ამონახსნი, როცა საწყისი ამპლიტუდა $A_0 = 10$ სმ. თუ $\Delta t = 5$ წმ. დროის შემდეგ რხევის ამპლიტუდა სემცირდება e – ჯერ.

პასუხი:

$$\frac{d^2x}{d^2t} + 0{,}4\frac{dx}{dt} + 196x = 0, \quad x = 0{,}10e^{-2t}\cos 14t$$

ამოცანა № 1.21 (Ремизов А. Н. –2.72)

ფოლადის ბურთულა $D = 23$სმ$^{-1}$. დიამეტრით მიერთებულია ზამბარასთან. მისი რხევის წრიული სიხშირე ჰაერში $\omega_0 = 5$ წმ$^{-1}$, გლიცერინში $\omega = 4$წმ$^{-1}$. განსაზღვრეთ გლიცერინის სიბლანტე. გაითვალისწინეთ, რომ ბურთულაზე გლიცერინში მოქმედებს ხახუნის ძალა $F = 6\pi\eta R\upsilon$ (სტოქსის კანონი), სადაც $-\eta$ გლიცერინის სიბლანტეა. გლიცერინში ჰაერის სიბლანტე და ზამბარის წინააღმდეგობა უგუვებელყავით.

პასუხი: $\eta = \frac{4}{9}\rho R^2\sqrt{\omega_0^2 - \omega_1^2} = 543$ პა.წმ

სადაც ρ - ფოლადის სიმკრივეა

ამოცანა № 1.22 (Ремизов А. Н. –2.76)

$m = 2{,}5$ კგ. მასის ტვირთი ჩამოკიდებულია ზამბარაზე, რომლის სიხისტე $k = 3{,}6\ 10^2$ ნ/მ, ასრულებს იძულებით რხევებს $F = 13{,}5 \sin 6t$ ტოლი გარე ძალის მოქმედების შედეგად. იპოვეთ ტვირთის იძულებითი რხევის ამპლიტუდა. ხახუნი უგულვებელყავით.

პასუხი: $A = \dfrac{F_0}{m(\omega_0{}^2 - \omega^2)}$

$\omega_0{}^2 = \dfrac{k}{m}$, $A = 5 \cdot 10^{-2}$ მ.

ამოცანა № 1.23 (Ремизов А. Н. –2.77)

ბგერის წყარო ირხევა $x = \sin 2000\pi t$ კანონით. ბგერის გავრცელების სიჩქარე ტოლია 340 მ/წმ. დაწერეთ რხევის განტოლება წერტლისათვის, რომელიც იმყოფება წყაროდან y = 102 მ. მანძილზე. ენერგიის დანაკარგი უგულებელყავით. ტალღა ჩათვალეთ ბრტყელ ტალღად.

პასუხი: $S = \sin 2000\pi(t - 0{,}3)$

ამოცანა № 1.24 (Ремизов А. Н. –2.79)

როგორია რხევის სიხშირე, თუ წერტილებს შორის უმცირესი მანძილი, რომლებიც ირხევიან ერთ ფაზაში ტოლია $\Delta y = 1$მ? ტალღის გავრცელების სიჩქარე $\upsilon = 300$სმ/წმ.

პასუხი: 300 ჰც.

ამოცანა № 1.25 (Ремизов А. Н. –2.82)

2 წერტილი იმყოფება ერთ წრფეზე, რომლის გასწვრივ ვრცელდება ტალღა სიჩქარით $\upsilon = 50$ მ/წმ. რხევის პერიოდი T = 0.05 წმ-ის ტოლია, წერტილებს შორის მანძილი $\Delta y = 50$სმ-ის. გაიგეთ ამ რხევის ფაზების სხვაობა.

პასუხი: $0{,}4\pi$

ამოცანა № 1.26 (Ремизов А. Н. –2.83)

განსაზღვრეთ პულსურ ტალღაში ფაზების სხვაობა არტერიის 2 წერტილს შორრის, რომლებიც მდებარეობენ ერთმანეთისაგან L=20 სმ. მანძილზე. პულსური ტალღის სიჩქარე ჩავთვალოთ 10მ/წმ-ის. ტოლი, ხოლო გული ჰარმონიულად ირხევა $\nu = 1,2$გჰც. სიხშირით.

პასუხი: $0,048\pi$.

ამოცანა № 1.27 (Ремизов А . Н. –2.84)

ბგერითი ტალღების სვლის სხვაობა , რომელსაც ადგილი აქვს ადამიანის მარჯვენა და მარცხენა ყურში, ტოლია 1სმ. განსაზღვრეთ ფაზების სვლა ორივე ბგერითი შეგრძნებებს შორის ტონისათვის, რომლის სიხშირე $\nu = 1000$ჰც.

პასუხი: $\pi/17$

ამოცანა № 1.28 (Ремизов А. Н. –2.86)

ცნობილია, ადამიანის ყური აღიქვამს დრეკად ტალღებს $\nu_1 = 20$ჰც. და $\nu_2 == 20$ კჰც. სიხშირეთა ინტერვალში. ტალღების როგორ სიგრძეს შეესაბამება ეს ინტერვალი ჰაერში?, წყალში? ბგერის სიჩქარე ჰაერში და წყალში შესაბამისად ტოლია $\upsilon_1 = 340$მ/წმ. და $\upsilon_2 = 1400$მ/წმ.

პასუხი: წყლისათვის

$\lambda_1 = 17$
$\lambda_2 = 0,017$ მ.

ჰაერისათვის

$\lambda_1 = 70m$
$\lambda_2 = 0,7m$

ამოცანა № 1.29 (Ремизов А. Н. –2.89)

2 ავტომანქანა მოძრაობს ერთმანეთის შესახვედრად υ_1 = 20მ/წმ და υ_2 = 10მ/წმ სიჩქარეებით. პირველი მანქანა იძლევა სიგნალს ν_1=800 ჰც. სიხშირის. როგორი სიხშირის სიგნალს გაიგებს მეორე მძღოლი

ა) მანქანების შეხვედრამდე

ბ) მანქანების შეხვედრის შემდეგ.

პასუხი: ა) 874ჰც.

ბ) 733ჰც.

ამოცანა № 1.30 (Ремизов А. Н. –2.92)

ν=1კჰც. ერთნაირი სიხშირის 2 ბგერა განსხვავდება ერთმანეთისაგან ხმამაღ-ლობით და ის უდრის ΔE = 20ფონს. რამდენჯერ განსხვავდება მათი ინტენსივობები?

პასუხი: 100- ჯერ.

ამოცანა № 1.31 (Ремизов А. Н. –2.99)

ქუჩის ხმაური, რომელსაც შეესაბამება ბგერის ინტენსივობის დონე L_1=5დბ. ისმის ოთახში ისე, როგორც ხმაური L_2=30დბ. გაიგეთ ბგერის ინტენსივობები ქუჩისათვის და ოთახისათვის და მათი ფარდობა.

პასუხი: ა) 874 ჰც. ბ) 733 ჰც.

სითხეების დინება. ბერნულის განტოლება.

თერმოდინამიკა ბიომექანიკის ერთ – ერთი მნიშვნელოვანი ნაწილია. მისი ძირითადი ამოცანაა სისხლძარღვთა სისტემაში სისხლის მოძრაობის გამოკვლევა. სისხლი ორგანიზმის უმნიშვნელოვანესი სითხეა. მისი მეშვეობით ხდება ქსოვილების და ორგანოების მომარაგება ჟანგბადით და მკვებავი ნივთიერებებით. სისხლი მიეკუთვნება არანიუტონისეულ ბლანტ სითხეთა ჯგუფს. სისხლი მოძრაობის ძირითადი განტოლებები და მახასიათებელი სიდიდეებია: სითხის უწყვეტობის განტოლება, ბერნულის განტოლება, ნიუტონის ფორმულა, პუაზეილის ფორმულა, რეინოლდსის რიცხვი, ლამინარული და ტურბულენტური დინება, სტოქსის კანონი. სისხლის სიბლანტეს ზომავენ კაპილარული და ვისკოზიმეტრიის მეთოდით, რომელიც პუაზეილის ფორმულის საფუძველზეა დამუშავებული. სისხლის წნევას ზომავენ – კოროტკოვის მეთოდით. სისხლის დინების გაზომვისათვის იყენებენ ულტრაბგერით მეთოდს, რომელიც დოპლერის მეთოდზეა დამყარებული.

ბერნულის განტოლება ჩაიწერება:

$$P_0 + \frac{P\upsilon^2}{2} + \rho gh = const. \qquad (2.1)$$

სადაც P_0 – სტატიკური, $\frac{P\upsilon^2}{2}$ – დინამიკური და ρgh – ჰიდროსტატიკური წნევებია. ρ – სითხის სიმკრივე, υ – მისი სიჩქარე, h- სითხის რომელიღაც წერტილის სიმაღლე გარკვეული დონის (დედამიწის ზედაპირის) მიმართ.

შინაგანი ხახუნის ძალა, რომელიც მოქმედებს S ფართობის სითხის დონეებს შორის. (ნიუტონის ფორმულა).

$$F_{\text{ხახ}} = \eta \frac{d\upsilon}{dx} s \qquad (2.2)$$

სადაც η – სითხის სიბლანტეა, $\frac{d\upsilon}{dx}$ – სიჩქარის გრადიენტია.

პუაზეილის ფორმულა

$$Q = \frac{\pi R^4}{8\eta} \times \frac{P_1 - P_2}{\ell} \qquad (2.3)$$

სადაც ℓ – მილის სიგრძეა, რომლის ბოლოებს შორის არის წნევა P_1-P_2.

ჰიდრავლიკური წინააღმდეგობა

$$x = \frac{8\eta\ell}{\pi R^4} \qquad (2.4)$$

შინაგანი ხახუნის ძალა, რომელიც მოქმედებს სფერულ ბურთულაზე, რადიუსით – r (სტოქსის კანონი):

$$F_{\text{ხახ}} = 6\pi\eta\, r\, \upsilon \qquad (2.5)$$

რეინოლსის რიცხვი

$$R_e = \frac{\rho_{\text{ხახ}}\upsilon D}{\eta} = \frac{\upsilon D}{\nu} \qquad (2.6)$$

$\nu = \frac{\eta}{\rho_s}$ – კინეტიკური სიბლანტეა.

სითხის სფერული ზედაპირია ქცეშ არსებული დამატებითი წნევა

$$\Delta P = 2\sigma / r$$

სადაც σ – სითხის ზედაპირული დაწიმულობაა, r - სფერული ზედაპირის რადიუსი.

კაპილარში სითხის აწევის (დაწევის) სიმაღლე

$$h = \frac{2 \quad \cos\theta}{R \quad \rho_{\text{ხოხხ}} g}\sigma$$

სადაც θ – ზღვრული კუთხეა, R - კაპილარის რადიუსი, $\rho_{\text{სისხ}}$-სითხის სიმკვრივე.

ჰუკის კანონი

$$\sigma = \varepsilon E$$

სადაც σ – მექანიკური დაძაბულობაა, ε – ფარდობითი დეფორმაცია, E – დრეკადობის მოდული (იუნგის მოდული).

ბლანტი ელემენტისათვის

$$\varepsilon\eta = \sigma\, t$$

სადაც η – სითხის სიბლანტეა, t - დეფორმაციის გამომწვევი ძალის მოწმედების დრო.

დრეკადი და ბლანტი ელემენტების პარალელური შეერთებისას (კელვინ – ფოიგტის) მოდელი

$$\varepsilon = \sigma/E(1- e^{Et/\eta})$$

სისხლძარღვის კედლის მექანიკური დაძაბულობა

$$\sigma = P\frac{r}{h}$$

სადაც r - სისხლძარღვის კედლის შიდა რადიუსი, h - სისხლძარღვის კედლის სისქე.

სისხლძარღვში სისხლის დინების Q მოცულობითი და $\upsilon_{\text{სისხ}}$ წირითი (ხაზოვანი) სიჩქარეებს შორის კავშირი ასეთია

$$Q = \upsilon_{\text{სისხ}}\ \ S$$

სადაც S სისხლზარღვის კვეთის ფართია.

პულსური ტალღის გავრცელების სიჩქარე მსხვილ სისხლძარღვში

$$\upsilon = \sqrt{\frac{Eh}{2\rho r}}$$

სადაც r – სისხლძარღვის სიღრუის რადიუსია.

h – სისხლძარღვის კედლის სისქე

ρ – სისხლძარღვის სიმკრივე

E – დრეკადობის (იუნგის) მოდულია

ამოცანების ამოხსნა

ამოცანა 2.1 (Ремизов А. Н. –2.104)

ჰორიზონტალური მილის რომელიღაც კვეთაში წყლის დინების სიჩქარე ტოლია

$\upsilon = 5$სმ/წმ. იპოვეთ დინების სიჩქარე მილის იმ ნაწილში, რომელსაც გააჩნია

2-ჯერ ნაკლები განივკვეთის დიამეტრი, 2-ჯერ ნაკლებიფართი.

მოც: .

$\upsilon = 5$სმ/წმ$= 5 \cdot 10^{-2}$ მ/წმ.

უ. 3. υ_2

ამოხსნა:

სითხის უწყვეტობის განტოლებიდან

$\upsilon_1 \times S_1 = \upsilon_2 \times S_2$

სადაც υ_1 წყლის ჭავლის სიჩქარეა S_1 ფართში, ხოლო υ_2 წყლის ჭავლის სიჩქარეა S_2 ფართში.

$S = \pi r^2 = \pi D^2/4$

$S_{1_1} = \pi D_1^2 / 4$; $S_2 = \pi D_2^2 / 4$,

ამოცანის პირობიდან

$D_2 = D_1/2$, $D_1 = 2D_2$,

$S_1 = \pi 4D_1^2 / 4$; $S_2 = \pi 4D_2^2 / 4$;

$= \upsilon_1 S_2 = \upsilon_1 \pi D_2^2 4/4\pi D_2^2 = 4\upsilon_1$.

$\upsilon_2 =$ 5სმ/წმ $4 =$ 20 სმ/წმ $=$ 0,2მ/წმ;

ამოცანის პირობის თანახმად $S_1 = 2S_2$

$\upsilon_2 = \upsilon_1 2S_1/S_1 = 2\upsilon_1 =$ 5/2სმ/წმ $=$ 10სმ/წმ $=$ 0,1მ/წმ.

ამოცანა 2.2 (Ремизов А. Н. –2.105)

თუ დავაკვირდებით მიკროსკოპის საშუალებით ერიტროციტების მოძრაობას კაპილარში, შეიძლება გავზომოთ სისხლის დინების სიჩქარე ($\upsilon_{\text{სისხ}} =$ 0,5მ/წმ).

აორტაში სისხლის დინების საშუალო სიჩქარე $\upsilon_{ა} =$ 40სმ/წმ. ამ მონაცემების საფუძველზე განსაზღვრეთ ყველა ფუნქციონირებადი კაპილარის განივკვეთების ჯამი რამდენით მეტია აორტის განივკვეთზე.

მოც: $\upsilon_{\text{სისხ}} =$
$= 0,5$მმ/წმ.$= 5 \cdot 10^{-4}$ მ/წმ.

$\upsilon_{ა} =$ 40სმ/წმ$= 0,4$ მ/წმ.

უ. 3. Sჯამ.კაპ./Sაორტა

ამოხსანა:

სისხლის ჭავლის უწყვეტობის განტოლების თანახმად

$\upsilon_{\text{აორტ}} S_0 = \upsilon_{\text{კაპ}} S_{\text{ჯამური კაპ.}}$

$S_{\text{ჯამ. კაპ}} / S_{\text{აორტ.}} = \upsilon_{\text{აორტ}} / \upsilon_{\text{კაპ}} = 40/0.5 = 400/0.5 = 800$ ჯერ.

ამოცანა 2.3 (Ремизов А. Н. –2.106)

ჰორიზონტალურად განთავსებულ 1,5 სმ. დიამეტრის სამედიცინო შპრიციდან გამოიდევნება ფიზიოლოგიური ხსნარი F=10ნ. ძალით. ხსნარის სიმკრივე $\rho = 1{,}03$გრ/სმ^3. დგუშის განივკვეთი გაცილებით მეტია ნემსის განივკვეთზე. რატომ არ არის დამოკიდებული ხსნარის გამოსვლის სიჩქარე ნემსის განივკვეთისაგან?

მოც. r-1,5სმ

F=10ნ

$\rho = 1{,}03$გრ/სმ^3

უ.ჭ. υ

დავწეროთ:

$$p_1 + \rho\upsilon_1^2 / 2 = p + \rho\upsilon^2 / 2$$

სადაც p , v დგუშის განივკვეთის წნევა სა სიჩქარეა.

ჭავლის უწყვეტობის განტოლებიდან გვაქვს:

$$s_1\upsilon_1 = s\upsilon$$

რადგანაც

$s_1 \square s$, მაშინ $\upsilon_1 \square \upsilon$, შეიძლება ჩავთვალოთ, რომ $\upsilon_1 \approx 0$

მაშინ

$p_1 = p + \rho\upsilon^2/2$, p – ატმოსფერული წნევაა.

რადგანაც $p_1 \square p$, შეიზლება დავწეროთ

$p_1 - p = \frac{F}{S} = \rho\upsilon^2/2$, საიდანაც

$\upsilon = \sqrt{\frac{2F}{S\rho}} \approx 10,5$ მ.

ამოცანა 2.4 (Ремизов А. Н. –2.108)

ჰორიზონტალური მილის განიერ ნაწილში წყალი მიედინება υ = 50სმ/წმ სიჩქარით. განსაზღვრეთ წყლის დინების სიჩქარე მილის ვიწრო ნაწილში, თუ ვიწრო და ფართო ნაწილებს შორის წნებათა სხვაობა Δp = 1,33კპა.

მოც: υ = 50სმ/წმ=0,5მ/წმ

Δp = 1,33კპა.

$\rho = 10^3$ კგ/მ^3

უ.33. υ_2

ამოხსნა:

ბერნულის განტოლების თანახმად ჰორიზონტალურად მოთავსებული მილისათვის

$\rho\frac{\upsilon_1^2}{2} + p_1 = \frac{\rho\upsilon_2^2}{2} + p_2$, სადაც υ_1 = სითხის დინების სიჩქარეა მილის იმ ნაწილში, სადაც წნევა p_1; υ_2 - სითხის დინების სიჩქარეა მილის იმ ნაწილში, სადაც წნევა p_2.

$$\Delta p = p_1 - p_2 = \frac{\rho}{2}(\upsilon_2{}^2 - \upsilon_1{}^2); \quad \upsilon_2{}^2 - \upsilon_1{}^2 = \frac{2\Delta p}{\rho};$$

$$\upsilon_2{}^2 = \frac{2\Delta p}{\rho} + \upsilon_1{}^2;$$

$$\upsilon_2 = \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho} + \upsilon_1{}^2} = \sqrt{\frac{2 \times 1{,}33 \times 10^3}{10^3}} \text{-}0{,}25 = \sqrt{(2{,}66 - 0{,}25)} = \sqrt{2{,}41} = 1{,}5 \text{ მ/წმ}.$$

ამოცანა2.5 (Ремизов А. Н. –2.111)

ცვლადი განივკვეთის ჰორიზონტალურ მილში მიედინება წყალი. x_0 წერტილში სტატიკური წნევა p_0 =0,3პა, ხოლო წყლის სიჩქარე υ_0=4სმ/წმ. გაიგეთ სტატიკური და დინამიკური წნევები x_1 წერტილში, თუ მილის განივკვეთის ფართობა $S_{x_0} : S_{x_1} = 0,5$.

მოც: . p_0 =0,3პა

$\upsilon_0 = 4$ სმ/წმ

$S_{x_o} : S_{x_1} = 0,5$

უ.ვ. p_1
p_d

დავწეროთ

$$p_0 + \frac{\rho \upsilon^2}{2} = p_1 + \frac{\rho \upsilon_1^2}{2}$$

$$S_{x_o} \upsilon_1 = S_{x_1} \upsilon_1$$

$$\upsilon_1 = (\frac{S_{x_0}}{S_{x_1}}) \upsilon_0$$

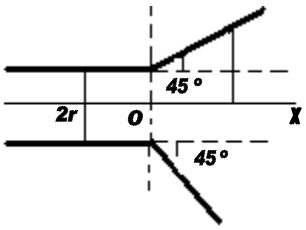
$$p_1 = p_0 + \frac{\rho}{2}(\upsilon_0^2 - \upsilon_1^2) = P_0 + \frac{\rho \upsilon^2}{2} \times (1 - \frac{s_{X_0}^2}{s_{X_1}^2} = 0,9$$

$$P_d = \frac{\rho \upsilon_1^2}{2} = \frac{\rho \upsilon_0^2 S_{x_0}^2}{2 S_{x_1}^2} = 0,2$$

ამოცანა 2.5 (Ремизов А. Н. –2.112)

ცილინდრული მილი გადადის კონუსში (ნახ.1). ამ სისტემაში მიედინება წყალი x ღერძის მიმართულებით. ჩათვალეთ წყალი იდეალურ სითხედ. მიიღეთ დამოკიდებულება p = f (x) და გამოსახეთ ის გრაფიკულად. ჰიდრავლიკური წნევა უგულვებელყავით.

ამოხსნა:



ნახ. 1

$x \angle 0$ მონაკვეთზე მილის განივკვეთი ერთნაირია და შესაბამისად p=ცonst.

$x \geq 0$ მონაკვეთზე გვაქვს

$$p_0 + \frac{\rho \upsilon_0^{\ 2}}{2} = p(x) + \frac{\rho \upsilon^2(x)}{2}$$

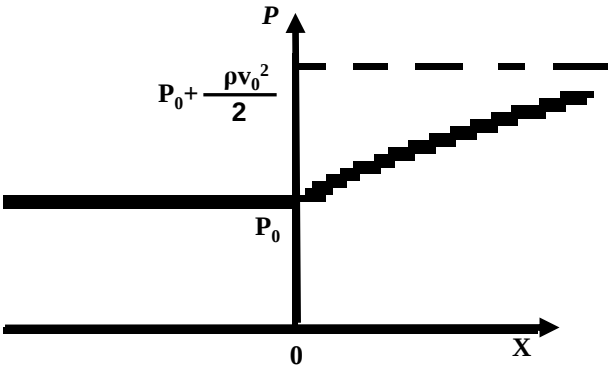
რადგანაც

$$S_0 \upsilon_0 = S\upsilon$$

გვაქვს $\upsilon = \frac{r\upsilon_0^{\ 2}}{(x - r^2)}$

მაშინ

$$p(x) = p_0 + \frac{\rho}{2}(\upsilon_0^{\ 2} - \upsilon) = p_0 + \frac{\rho \upsilon_0^{\ 2}}{2} \times (1 - \frac{r^4}{(x+r)^4})$$



ნახ. 2

ნახ. 2-ზე გამოსახულია p(x) დამოკიდებულება.

ამოცანა 2.6 (Ремизов А. Н. –2.113)

გამოიყენეთ **(Ремизов А. Н. –2.112)** ამოცანის პირობა. გამოთვალეთ დამოკიდებულება p=f(x) და გამოსახეთ ის გრაფიკულად. სითხე არის ბლანტი.

ამოხსნა

x>0 მონაკვეთზე გვაქვს

$$\frac{dp}{dx} = \frac{\theta 8\eta}{\pi(x+r)^4}$$

$$dp = \frac{8\theta\eta}{\pi(x+r)^4} \cdot dx$$

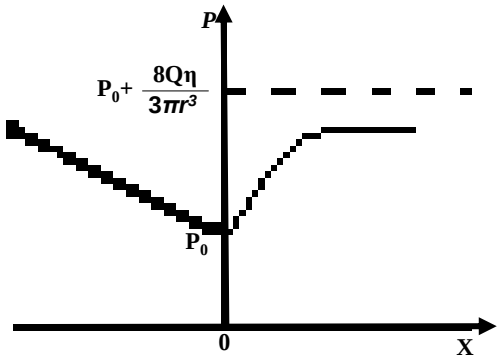
ინტეგრირების შედეგად გვაქვს:

$$\int_{p_0}^{p} dp = \int_{0}^{x} \frac{8\theta\eta}{\pi} \cdot \frac{dx}{(x+r)^4}$$

$$p(x) = p_0 = \frac{8\theta\eta}{3\pi}\left[\frac{1}{(x+r)^3} - \frac{1}{r^3}\right]$$

x<0 მონაკვეთზე გვაქვს

$$p(x) = p_0 - \frac{8\theta\eta}{\pi^2} \cdot x$$



ნახ. 3

p(x) დამოკიდებულება გამოსახულია ნახ. 3

ამოცანა 2.7 (Ремизов А. Н. –2.118)

გაიგეთ r = 2მკმ რადიუსის ნაწილაკების (ნივთიერების სიმკვრივე ρ=2,5გრ/სმ^3) დალექვის სიჩქარე და დრო წყლის ფენაში, რომლის სისქეა $\ell = 3$სმ. ორ შემთხვევაში: ა) სიმძიმის ძალის მოქმედებისას, ბ) ცენტრიფუგირებისას n=500სმ$^{-1}$-სას. ცენტრიფუგის რადიუსია R-10სმ.

მოც. r = 2მკმ

ρ =2,5გე/სმ

l = 3სმ

n = 500სმ

R = 10სმ

უ.ვ. t, v

ამოხსნა

ა)სტოქსის კანონის თანახმად

$$\upsilon = \frac{2(\rho - \rho_s)r^2 g}{9\eta} 1,3 \cdot 10^{-5} \text{მ/}$$

მაშინ $t = 2,310^3\, wm$

ამოცანა 2.8 (Ремизов А. Н. –2.117)

სტოქსის კანონის გამოყენებით, განსაზღვრეთ რა დროის განმავლობაში დაილექება მტვერი ოთახში, რომლის სიმაღლეა h = 3მ. მტვრის ნაწილაკები ჩათვალეთ სფეროსებურად d = 1 მკმ. ნივთიერების სიმკვრივე ρ = 2,5 მ/სმ^3.

მოც: . $h=$ 3მ

d = 1მკმ $=10^{-6}$ მ

$\rho=$ 2,5მ/სმ$^{3=}$

$=2{,}5\cdot10^{3}$ კგ/მ^{3}

უ.3. t

ამოხსნა:

ბურთულის თანაბარი მოძრაობის სიჩქარე ბლანტ სითხეში განისაზღვრება სტოქსის განტოლებით

$\upsilon=\frac{2}{9}\frac{(\rho-\rho_{\text{სითხ}})r^2g}{\eta}$, სადაც $\rho_{\text{სითხ}}-$ სითხის სიმკვრივეა

η – სითხის სიბლანტეა (ამ შემთხვევაში ჰაერის)

r- ბურთულას რადიუსი.

მტვრის ნაწილაკების მცირე მასის გამო, მისი მოძრაობისათვის ჰაერში შეიძლება გამოვიყენოთ სტოქსის ფორმულა, იმ დაშვებით, რომ ჰაერი ბლანტი სითხეა. ჰაერის დინამიური სიბლანტე

$\eta_h=$181მკ.პ,ა.წმ. ჰაერის სიმკრივე = 1,29კგ/მ$^{3.}$

აქედან გამომდინარე

$$\upsilon=\frac{2}{9}\frac{(2{,}5\times10^{3}-1{,}29)(0{,}5\times10^{-6})^2\times10}{6\eta}=\frac{12{,}5\times10^{-3}}{9\times16}=\frac{12{,}5}{162{,}9}\times10^{-3}=0{,}077\times10^{-3}$$

მმ/წმ =

= 0,077სმ/წმ

$\upsilon=\frac{h}{t},\quad t=\frac{\upsilon}{h}$

$t=\frac{300}{0{,}077}=\frac{3876}{0{,}077}$ წმ = 65წთ

სფეროსებურად d = 1 მკმ. ნივთიერების სიმკვრივე $\rho =$ 2,5 მ/სმ^3.

მოც: . $h =$ 3მ

d = 1მკმ $= 10^{-6}$ მ

$\rho =$ 2,5მ/სმ$^{3=}$

$= 2{,}5 \cdot 10^3$ კგ/მ^3

უ.3. t

ამოხსნა:

ბურთულის თანაბარი მოძრაობის სიჩქარე ბლანტ სითხეში განისაზღვრება სტოქსის განტოლებით

$\upsilon = \frac{2}{9}\frac{(\rho - \rho_{\text{სითხ}})r^2 g}{\eta}$, სადაც $\rho_{\text{სითხ}}$ – სითხის სიმკვრივეა

η – სითხის სიბლანტეა (ამ შემთხვევაში ჰაერის)

r- ბურთულას რადიუსი.

მტვრის ნაწილაკების მცირე მასის გამო, მისი მოძრაობისათვის ჰაერში შეიძლება გამოვიყენოთ სტოქსის ფორმულა, იმ დაშვებით, რომ ჰაერი ბლანტი სითხეა. ჰაერის დინამიური სიბლანტე

$\eta_h =$181მკ.პ,ა.წმ. ჰაერის სიმკრივე = 1,29კგ/მ$^{3.}$

აქედან გამომდინარე

$$\upsilon = \frac{2}{9}\frac{(2{,}5\times10^3 - 1{,}29)(0{,}5\times10^{-6})^2 \times 10}{6\eta} = \frac{12{,}5\times10^{-3}}{9\times16} = \frac{12{,}5}{162{,}9}\times10^{-3} = 0{,}077\times10^{-3}$$

მმ/წმ =

= 0,077სმ/წმ

$\upsilon = \frac{h}{t}, \quad t = \frac{\upsilon}{h}$

$$t = \frac{300}{0{,}077} = \frac{3876}{0{,}077}\ \text{წმ} = 65\text{წთ}$$

ამოცანა 2. 9 (Ремизов А. Н. –2.119)

განსაზღვრეთ სისხლის მაქსიმალური რაოდენობა, რომელმაც შეიძლება გაიაროს $t =$ 1წმ-ში, რომ დინება შენარჩუნდეს ლამინარული. აორტის დიამეტრია $D = 2$ სმ, სისხლის $\eta = 5$ მპაწმ.

მოც: . $t =$ 1წმ

$D = 2\text{სმ}\ 2 \cdot 10^{-2}\ \text{მ}$

$\eta = 5\text{მპაწმ} = 5 \cdot 10^{-3}\ \text{პაწმ}$

უ. 3. m

ამოხსნა:

$R_e = 2300$

$R_e = \frac{\rho_{სით} \upsilon D}{\eta}$ (1) გლუვი ცილინდრული მილებისათვის.

ერთ წამში აორტაში გასული სისხლის მასა

$m = \rho_{სით} s\upsilon$, სადაც $s = \frac{\pi D^2}{2}$ აორტის განივკვეთია.

$$m = \rho_{ი} \frac{\pi D^2}{4} \upsilon$$

რეინოლდსის განტოლების თანახმად

$$\upsilon = \frac{R_e \eta}{\rho_{ი} D}$$

$$m = \rho_{სით} \frac{\pi D^2}{4} \times \frac{R_e}{\rho_{ი} D} r = \frac{\pi D R_e \upsilon}{4} = \frac{3{,}14 \times 2 \times 10^{-2} \times 2300 \times 5 \times 10}{4} = 0{,}18 \text{ კგ}.$$

ამოცანა 2.10 (Ремизов А. Н. –2.129)

როგორია სისხლძარღვის ჰიდრავლიკური წინააღმდეგობა, რომლის სიგრძეა $0{,}12$მ. და რადიუსი $0{,}1$მმ.

მოც: $l = 0{,}12$ მ

$r = 0{,}1$მმ $= 10^{-4}$ მ.

უ. 3. x

ამოხსნა:

ჰიდრავლიკური წინააღმდეგობა ტოლია:

$x = \frac{8\eta\ell}{\pi R^4}$, სადაც $\eta -$ სისხლის სიბლანტეა

$\eta = \ 5000$მკპაწმ $= 5\times10^{-3}$პაწმ

$$x = \frac{8\times5\times10^{-6}\times0{,}12}{3{,}14\times(10^{-4})^4} = \frac{4{,}8\times10^{-6}}{3{,}14\times10^{-6}} = 1{,}5\times10^{10}\ \text{პა.წმ/მ}^3.$$

ამოცანა № 2.11 (Ремизов А. Н. –2.132)

იპოვეთ აორტაში სისხლის ნაკადის მოცულობითი სიჩქარე, თუ აორტის შიგა რადიუსი r = 1,75სმ, ხოლო სისხლის წრფივი სიჩქარე შეადგენს υ = 0,5მ/წმ.

მოც: . r =1,75სმ=$1{,}75\times10^{-2}$ მ.

υ = 0,5მ/წმ.

უ. 3. Q

ამოხსნა:

Q = $\upsilon_{\text{სისხ}}$ S,

სადაც Q – სისხლის ნაკადის მოცულობითი სიჩქარეა. υ-სისხლის წრფივი სიჩქარეა..

$Q = 0{,}5$მ/წმ $\pi r^2 = 0{,}5\cdot3{,}14(\cdot1{,}75\cdot1{,}75)^{-4} = 4{,}8\times10^{-4}$ მ^3/წმ.

ამოცანა 2.12 (Ремизов А. Н. –2.135)

დოპლერის სიხშირის წანაცვლება მექანიკური ტალღის მოძრავი ერიტროცი-ტებისაგან არეკვლისას ტოლია 50 ჰც, გენერატორის სიხშირეა 100კჰც. განსაზღვრეთ სისხლის მოძრაობის სიჩქარე სისხლძარღვში.

მოც: $\Delta\nu = 50$ჰც

$\nu = 100$კჰც $= 10^5$ჰც.

უ. 3. $\nu_{\text{დოპლერი}}$

ამოხსნა:

$\nu_{\text{დოპლერი}} = \frac{2\upsilon_0}{\upsilon}\nu$ სადაც υ_o – სხეულის მოძრაობის სიჩქარეა (ჩვენს შემთხვევაში ერიტროციტის, რომელიც მოძრაობს სისხლის დინების სიჩქარით). υ – ტალღის მოძრაობის სიჩქარეა გარემოში. $\nu_{\text{დოპლერი}}$ – დოპლერის წანაცვლებაა, ν – წყაროს სიხშირე.

$\nu =$ 1482მ/წმ.

$$\upsilon_0 = \frac{\nu_{\text{დოპლერი}}\upsilon}{2\nu} = \frac{50\times 1482}{2\times 10^5} = 0{,}3705\text{მ/წმ}.$$

ამოცანა № 2.12 (Ремизов А. В 2.131)

არტერიის პულსური ტალღის სიჩქარე არის 8მ/წმ. რას უდრის დრეკადობის მოდული, თუ ცნობილია, რომ სიღრუის რადიუსის ფარდობა კედლების სისქესთან ტოლია 6-ს, ხოლო სისხლძარღვის კედლის სიმკვრივე ტოლია 1.15გრ/სმ^2.

მოც:

მოც. $\upsilon = 8\text{მ/წმ}$

$$\frac{r}{h} = 6$$

$$\rho = 1{,}15 = \frac{1{,}15\cdot 10^{-3}}{10^{-6}} = 1{,}15\cdot 10^3\ \text{კგ/მ}^2$$

უ.ჭ. E

$$\upsilon^2 = E\frac{h}{r\,2\,\rho} \quad \text{E} = \upsilon^2\frac{r}{h}2\rho$$

$$\text{E} = (8)^2\cdot 6\cdot 2\cdot 1{,}15\cdot 10^3 = 64\cdot 12\cdot 1{,}15\cdot 10^3 = 883{,}2\cdot 10^3 = 0{,}83\cdot 10^6\ \text{კგ/მწმ}^2$$

ამოცანა № 2.13 (Ремизов А. В 2.110)

მცირე ნახვრეტიდან, რომელიც მოთავსებულია ფართე ჭურჭლის ფსკერზე, გამოედინება სითხე. გაიგეთ ნაკადის უდიდესი სიჩქარე, თუ ცნობილია, რომ ჭურჭელში სითხის სიმაღლე h = 1მ. ახსენით, რატომ არ არის დამოკიდებული ამოცანის ამოხსნა, გამომდინარე სითხის თვისებისაგან.

პასუხი: 44მ/წმ.

ამოხსნა № 2.13 (Ремизов А. В 2.133)

რამდენი პროცენტით შეიცვლება ულტრაბგერის სიხშირე არტერიაში მოძრავი ერიტროციტიდან არეკვლისას? მოძრავი ერიტროციტის საშუალო სიჩქარე ტოლია 40 სმ/წმ.

პასუხი: 0,054 %

თერმოდინამიკა. თერმოდინამიკის I კანონი.

ცოცხალ ორგანიზმებში ნივთიერებათა ემორჩილება თერმოდინამიკის I კანონს. ცოცხალ ორგანიზმებსა და გარემოს შორის ენერგეტიკული მიმოცვლა განისაზ-ღვრება კალორიმეტრიის მეშვეობით, რომელიც იყოფა პირდაპირ და არაპირდაპირ კალორიმეტრიად. უფრო გავრცელებულია არაპირდაპირი კალორიმეტრია. ამ შემთხვევაში ორგანიზმში მიმდინარე რეაქციის ჯამურ სითბურ ეფექტს განსაზღვრავს ჟანგბადის კალორიმეტრიული კოეფიციენტი. ის გვიჩვენებს, სითბოს როგორი რაოდენობა გამოიყოფა მოცემული ნივთიერების სრული დაჟანგვისას ნახშირორჟანგსა და წყლამდის ორგანიზმის მიერ შთანთქმულ ჟანგბადის თითოეულ ლიტრზე. დადგენილია, რომ ეს კოეფიციენტი ნახშირწყალბადებისათვის ტოლია 20,3კჯ, ცხიმებისათვის – 19,7 და ცილებისათვის – 20,3კჯ. მაგრამ ცოცხალ ორგანიზმში მიდის აგრეთვე ნივთიერების სინტეზი, რომელიც შეიძლება დაიჟანგოს, რომ გავითვალისწინოთ სითბოს საერთო რაოდენობა, რომელიც გამოთავისუფლდება ცოცხალი ორგანიზმების მიერ დროის გარკვეულ მონაკვეთში უნდა გავითვალისწინოთ სუნთქვის კოეფიციენტი, რომელიც უდრის იმავე დროის განმავლობაში მოხმარებული ნახშირორჟანგის მოცულობის ფარდობისა ჟანგბადის მოცულობასთან.

ნახშირწყლებისათვის სუნთქვითი კოეფიციენტი -1, ცილებისათვის – 0,8, ცხიმებისათვის – 0,7. არსებობს კავშირი სუნთქვის და კალორიმეტრიულ კოეფიციენტებს შორის (ცხრილი 1). ეს გვაძლევს საშუალებას დავადგინოთ ორგანიზმის ენერგიის ხარჯვა, თუ ვიცით შთანთქმული ჟანგბადისა და გამოყოფილი ნახშირორჟანგის მოცულობა.

თერმოდინამიკის I კანონი.

$$Q = \Delta U + A \quad (3.1)$$

სადაც Q –სითბოს რაოდენობაა, გადაეცემა სისტემას, ΔU - სისტემის შინაგანი ენერგიის ცვლილება, A – მუშაობაა, რომელსაც ასრულებს სისტემა.

მუშაობა, რომელსაც ასრულებს გაზი მოცულობის υ_1 -დან υ_2– მდე ცვლილებისა.

$$A = \int_{\upsilon_1}^{\upsilon_2} p d\upsilon, \qquad (3.2)$$

სადაც p – წნევაა.

ადიაბატური პროცესისათვის (Q=0)

$$\Delta U = A = nC_{\upsilon}(T_2 - T_{1)}) \qquad (3.3)$$

აქ n – იდეალური გაზის მოლების რიცხვია, C_v -მოლური სითბოტევადობაა. მუდმივი მოცულობის დროს და T_1 დ$_ა$ T_2– საწყისი და საბოლოო ტემპერატურებია.

სითბოს რაოდენობა შექცევადი პროცესის დროს

$$Q = \int TdS \qquad (3.4)$$

სხეულის ენტროპიის ცვლილება, რომელსაც ვათბობთ ან ვაცივებთ $\mathbf{T_1}$ – დან –$\mathbf{T_2}$ ტემპერატურამდე.

$$\Delta S = nC_p \ln\frac{T_1}{T_2} \qquad (.3.5)$$

სადაც Cp – მოლური სითბოტევადობაა მუდმივი წნევის დროს.

ცოცხალი ორგანიზმის სტაციონალური მდგომარეობის ენტროპიის ცვლილების სიჩქარე

$$\frac{dS}{dt} = \frac{dS_1}{dt} + \frac{dS_2}{dt} = 0 \quad (3.6)$$

სადაც

$\frac{dS_1}{dt}$ – ენტროპიის ცვლილების სიჩქარეა, რომელიც დაკავშირებულია შეუქცევად პროცესთან.

$\frac{dS_2}{dt}$ - ენტროპიის ცვლილების სიჩქარე გარემოსთან ურთიერთქმედების შედეგად.

ამოცანების ამოხსნა

ამოცანა 3.0 (Ремизов А. Н. –3.3)

გამოთვალეთ შინაგანი ენერგიის ცვლილება წყლის აორთქლების შედეგად, რომელსაც ჩვენ ვხარჯავთ ინსტრუმენტების სტერილიზაციაში, თუ ამ დროს წნევა იყო მუდმივი და ტოლი 10 პა, ხოლო აორთქლდა 18 გრ. წყალი.

მოც: p = 10 პა.

m = 18 გრ.

უ. 3. ΔU

ამოხსნა:

მოცემულ შემთხვევაში ადგილი აქვს სითხის იზოთერმულ აორთქლებას მუდმუვი წნევის დროს. პირველ რიგში სისტემას მიეწოდება სითბო სითხის გასათბობად, მეორე რიგში წარმოშობილი ორთქლი ფართოვდება ატმოსფერული წნევის საწინააღმდეგოდ, რის შედეგადაც ის ასრულებს მუშაობას. სისტემაში წყლის რაოდენობა უდრის 1 მოლს, ამ დროს სითბო უდრის აორთქლების მოლურ სითბოს და ამის გამო მუშაობა უდრის.

$\Delta U = A = nC_v(T_2 - T_1)$ სადაც n- იდეალური გაზის მოლების რიცხვია.

c_v -გაზის მოლური სითბოტევადობა მუდმივი მოცულობის დროს.

T_1 და T_2 -საწყისი და საბოლოო ტემპერატურებია.

რადგან ორთქლდება 1 მოლი წყალი და დასაწყისში გაზი არ იმყოფება სისტემაში, ამიტომ მოლეკულების რიცხვის ცვლილება უდრის 1-ს. ე.ი.

$Q = 40{,}62$ კჯ.

$A = 3{,}1$ კჯ

$\Delta U = Q - A = 37{,}5$ კჯ.

ამოცანა 3.1 (Ремизов А. Н. –3.4)

5 მოლი ერთატომიანი იდეალური გაზი ადიაბატურად ფართოვდება საწყისი 1 მპა წნევიდან. ამ დროს გაზის ტემპერატურა 320-დან 275 K – მდე. როგორი მუშაობა სრულდება ამ დროს.

მოც: .

$p = 1$მპა.

$T_1 = 275^0 K$

$T_2 = 320^0 K$

უ. ჳ. **A**

ამოხსნა:

$\Delta U = A = nC_v(T_2 - T_1)$, (3.3) ფორმულიდან

ვიპოვოთ ΔU. უნდა გავითვალისწინოთ, რომ ერთატომიანი იდეალური გაზისათვის

$c_v = 3$. მოცემულ პროცესში

$A = -\Delta u = 27{,}8 \times 10^2$ მპა (ორატომიანი გაზისათვის $c_v = 5$)

ამოცანა 3.2 (Ремизов А. Н. –3.8)

განსაზღვრეთ ადამიანის ენერგიის ხარჯვა, კუნთების მოსვენებულ მდგომარეობაში, თუ 10 წთ-ში ის ამოისუნთქავს 60 ლ. ჰაერს, რომელიც შეიცავს 15% ჟანგბადს და 5% ნახშირჟანგს.

მოც: . t = 10წმ.

$O_2 - 15\%$

$V = 60 \cdot 10^{-6}$ მ^3

$CO_2 - 5\%$

უ. 3. E

ამოხსნა:

ჟანგბადის კალორიულობის კოეფიციენტი განსაზღვრავს რა რაოდენობის სითბო გამოიყოფა მოცემული ნივთიერების სრული დაჟანგვის დროს წყლამდე და ნახშირჟანგბადამდის. დადგენილია, რომ ნახშირწყლებისათვის ეს კოეფიციენტი ტოლია 20,9, ცხიმებისათვის 19,7, ხოლო ცილებისათვის 20,3კჯ. სუნთქვითი კოეფიციენტი ტოლია ნახშირჟანგის მოცულობის ფარდობისა, იმავდროულად მოხმარებული ჯანგბადის მოცულობასთან. ნახშირწყლებისათვის იგი ტოლია 1-ის, ცილებისათვის 0,8, ცხიმებისათვის კი შეადგენს 9,7. არსებობს კავშირი სუნთქვით კოეფიციენტსა და კალორიულ კოეფიციენტს შორის, რაც შესაძლებლობას გვაძლევს გამოვიანგარიშოთ ორგანიზმის ენერგიის ხარჯვა, თუ ვიცით შთანთქმული ჟანგბადის და გამოყოფილი ნახშირჟანგის რაოდენობა. ატმოსფეროს ჰაერი შეიცავს 21% 0_2-ს და 0,03% $C0_2$. თუ ამონასუნთქ ჰაერში არის 15% ჟანგბადი, მაშასადამე მოხმარებული ჟანგბადის რაოდენობა ტოლია

21% – 15% = 6%

ხოლო ამონასუნთქი $C0_2$ ტოლია 5% – 0,03% = 4,97%

ე.ი. სუნთქვის კოეფიციენტი ტოლია

$$= \frac{4,97\%}{6\%} = 0,83$$

ცხრილის საშუალებით ვადგენთ, რომ კალორიულობის კოეფიციენტი

$\eta_{kal} = 20{,}256 კჯ$

ე.ი. 1ლ. 0_2 დაწვისას გამოიყოფა 20,256 კვ. ენერგია, მაგრამ ადამიანი ამოისუნთქავს 60ლ. ჰაერს, რომელშიც 15% 0_2, ე.ი. 6% 0_2.. ე.ი. მოხმარებული 0_2-რაოდენობაა

$\frac{60 \times 6\%}{100\%} = 3{,}6$ ლ. 0_2-ს.

ამიტომ სულ მოხმარებული ენერგია ტოლია

$3{,}6 \times 20{,}256 = 72{,}9 კჯ.$

ამოცანა 3.3 (Ремизов А. Н. –3.9)

სპორტსმენი გარბის რა დისტანციაზე, 1 წუთში გამოყოფს 90ლ. ჰაერს, რომელიც შეიცავს 12% ჟანგბადს და 8% ნახშიროჟანგს. რა ენერგიას ხარჯავს სპორტსმენი დისტანციაზე 5წთ. განმავლობაში.

მოც: . t=1წთ.

V=90ლ.

$O_2 - 12\%$

$CO_2 - 8\%$

უ. ვ. E

ამოხსნა:

თუ ამონასუნთქ ჰაერში 12% ჟანგბადია, ე.ი. სპორტსმენს 1 წთ. მოუხმარია

21%-12%=9% 0_2, ხოლო ამოუსუნთქავს 8%-0,03%=7,97% CO_2. ამრიგად

$L = \frac{7,97\%}{9\%} 0,89$ $L -$ სუნთქვითი კოეფიციენტია.

ცხრილიდან (იხილეთ დანართი) სუნთქვით კოეფიციენტსა და კალორიულობის კოეფიციენტს შორის კავშირიდან

$\eta_k = 20,566$კჯ. 1ლ. 0_2-ზე.

90ლ. ჰაერში თუ 9% 0_2 , ის შეიცავს

$\frac{90 \times 9\%}{100\%} = 8,1$ ლ. 0_2-ს, ამრიგად 1 წთ-ში მოხმარებული ენერგია

ტოლია:

$8,1 \times 20,566$კჯ $.=$ 166,58კჯ.

ხოლო 5წთ-ში

166,58კჯ.$\times 5$ წთ $=$ 832,9კჯ.

ამოცანა 3.4 (Ремизов А. Н. –3.7)

2 მოლი ჟანგბადი ფართოვდება საწყისი 400პა. წნევიდან გარეშე წნევის 100კპა. წნევის საწინააღმდეგოდ. გაზი იმყოფება 22^0 C ტემპერატურის ქვეშ. გაიგეთ ჟანგბადის მოცულობის საბოლოო მნიშვნელობა.

მოც:

$p_1 = 400$
$p_2 = 100$ კპა
$T = 22^0 C$

უ.ვ. υ_2

ამოხსნა:

υ_1- მნიშვნელობა გამოითვლება იდეალური გაზის კანონიდან

$$\upsilon_1 = \pi RT / p_1$$
$$\upsilon_1 = 11,3$$

გაზის მოცულობის საბოლოო მნიშვნელობას ვღებულობთ განტოლებიდან

$$p_1 \upsilon_1^{7/5} = p_2 \upsilon_2^{7/5}$$

მხედველობაში მივიღოთ, რომ

$c_p / c_v = 7/5$ —— (ორატომიანი გაზისათვის)

მაშინ, ამ შემთცვევაში

$$\upsilon_2 = 12,7 \text{ლ.}$$

ამოცანა № 3.5 (R. Change)

ფილტვების ალვეოლებში მოხვედრილი ჰაერი დიფუნდირებს სისხლში. ალვეოლების საშუალო რადიუსი 0.0050სმ., ხოლო ჰაერი შეიცავს 14% ჟანგბადს/მოლში. ჩავთვალოთ რომ ალვეოლებში ატმოსფერული წნევა 1.0 ატმოსფეროს ტოლია, ხოლო ტემპერატურა 37^0C. გამოთვალეთ ერთ ალვეოლში ჟანგბადის მოლეკულების რაოდენობა.

მოც: . $r = 0.0050$სმ

$p = 10$ატმ.

$t = 37^0 C$

უ.ვ. n

ამოხსნა:

ერთი ალვეოლის მოცულობა ტოლი არის

$$\upsilon = \frac{4}{3}\pi r^3 = \frac{4}{3}\pi(0.0050) = 5.2\times10^{-7}\,\text{სმ}^3 = \ 5.2\times10^{-10}\,\text{ლ.}$$

ერთ ალვეოლში ჰაერის მოლების რიცხვი ტოლია

$$n = \frac{pV}{RT} = \frac{(1.0_{\text{ატმ.}})(5.2\times10^{-10}\,l)}{(0.08206\frac{l._{\text{ატმ.}}}{K})\times 310K} = 2.0\times10^{-11}\,\text{მოლი.}$$

იმის გამო, რომ ალვეოლებში ჰაერი შეიცავს ჟანგბადის 14%, მოლეკულების რაოდენობა ალვეოლებში ტოლი იქნება.

$$2.0\times10^{-11}\times\frac{14\%\times 0_2}{100\%}\times\frac{6.022\times10^{23}0_2\,\text{მოლეკ}}{1\text{მოლი}\times 0_2} = 1.7\times10^{12}\times 0_2\,\text{მოლეკულა.}$$

ამოცანა № 3. 5 (Ремизов А. Н. 3.2)

ბაროკამერაში საჭირო წნევის შესაქმნელად იყენებდნენ გაზის ბალონს მოცულობით 20 ლ. ბალონიდან მთელი გაზის გამოსვლისას სრულდებოდა 350ჯ. მუსაობა. როგორია ბაროკამერის მოცულობა, თუ ტემპერატურა რჩებოდა მუდმივი და ტოლი იყო 22^0 C.

პასუხი: $23,1210^{-3}მ^3$.

ამოცანა № 3. 6 (Ремизов А. Н. 3.6)

0.85 მოლი ერთატომიანი იდეალური გაზი, დასაწყისში იმყოფება 1,5 მპა წნევის ქვეშ 300 K დროს, ფართოვდება იზოთერმულად, სანამ წნევა არ გახდება 100კპა. გამოთვალეთ ამ დროს შესრულებული მუშაობა, თუ გაფართოება ხდება: 1)შექცევადად 2) შინაგანი წნევის 100კპა-ს საწინააღმდეგოდ.

პასუხი: ა) 5749ჯ. ბ) 1978 ჯ.

ამოცანა № 3.7 (Ремизов А. Н. 3.11)

რამდენი გრადუსით შეიცვალა აზოტის ტემპერატურა, რომელიც ადიაბატურად ფართოვდება 20^0C ტემპერატურაზე, თუ გავხსნით ბალონის კლაპანს სადაც იმყოფება აზოტი 10პა წნევის ქვეშ. გარე წნება მუდმივია და ტოლია 100კპა.

პასუხი: 41 K.

ამოცანა № 38 (Ремизов А. Н. 3.13)

.5კგ. მასის კურდღელმა 1სთ-ში შთანთქა 1.5ლ. ჟანგბადი. განსაზღვრეთ , რამდენ ენერგიას ხარჯავს კურდღელი დღე-ღამეში, თუ ჟანგბადის საშუალო კალორიული კოეფიციენტი ტოლია 20.52კჯ.

ამოცანა № 3.9 (Ремизов А. Н. 3.17)

როგორი ტემპერატურა ჰქონდა 2 მოლ წყალს ჭურჭელში, თუ მისი გათბობისას 100^0C- მდე ენტროპია გაიზარდა 23.5ჯ/კ-ით.

პასუხი: 319 K.

ამოცანა № 3.10 (Ремизов А. Н. 3.24)

განსაზღვრეთ კუნთის ტემპერატურა, თუ ჩავთლით, რომ ის მუშაობს როგორც სითბური მანქანა, $\eta = 30\%$ 25^0C ტემპერატურის დროს.

პასუხი 121,4 კჯ/მოლი

ხსნარების კონცენტრაციის ერთეულები და კოლიგატიური თვისებები

ხსნარების კონცენტრაციის ერთეულები:

ხსნარების შესაწავლას დიდი მნიშვნელობა გააჩნია, რადგან უმეტესი საინტერესო და სასარგებლო ქიმიური და ბიოლოგიური პროცესები ხორციელდება ხსნარებში. ზოგადად, ხსნარი განისაზღვრება როგორც ორი ან მეტი კომპონენტისგან შემდგარი ნარევი, რომელიც წარმოქმნის ერთ ფაზას. უმეტესი ხსნარები წარმოსდგენენ სითხეებს, თუმცა არსებობენ როგორც აიროვანი ასევე მყარი ხსნარები. მაგალითად ჰაერი ან ბრინჯაო. ხსნარების ნებისმიერი რაოდენობრივი შესწავლა გულისხმობს რომ ცნობილია გამხსნელში გახსნილი ნივთიერების რაოდენობა ანუ ხსნარის კონცენტრაცია. ქიმიკოსები იყენებენ ხსნარის კონცენტრაციის სხვადასხვა ერთეულებს, რომელთაგან თითოეულს გააჩნია უპირატესობა სხვებთან შედარებით, ან შეზღუდვა. ხსნარების მოხმარება განისაზღვრება იმით, თუ როგორ განვსაზღვრავთ მათ კონცენტრაციებს. აქ ჩვენ განვიხილავთ კონცენტრავიის ოთხ ერთეულს: წონით პროცენტს, მოლურ წილს, მოლარობას და მოლალობას.

წონითი პროცენტი:

ხსნარის წონითი პროცენტი (ან წონითი მასა) სითხეში განისაზღვრება როგორც
წონითიპროცენტი:

$$\text{წონითი პროცენტი} = \frac{\text{გახსნილი ნივთიერების წონა}}{\text{გამხსნელის წონა} + \text{გახსნილი ნივთიერების წონა}} \times 100$$

$$\% = = \frac{\text{გახსნილი ნივთიერების წონა}}{\text{ხსნარის წონა}} \times 100\%$$

მოლური წილი:

რაღაც i –ური კომპონენტის მოლური წილი ხსნარში განისაზღვრება, როგორც ამ კომპონენტის მოლების რაოდენობის ფარდობა, ხსნარში არსებული კომპონენტების (გამხსნელის ჩათვლით) მოლების ჯამთან.

$$X_i = \frac{i-\text{ური კომპონენტის მოლების რიცხვი}}{\text{ყველა კომპონენტის მოლების რიცხვების ჯამთან}} = \frac{n_i}{\sum n_i}$$

მოლურ წილს არ გააჩნია ერთეული.

მოლარობა (M):

მოლარობა განისაზღვრება როგორც გახსნილი ნივთიერების მოლების რიცხვი ერთ ლიტრ ხსნარში

$$\text{მოლარობა} = \frac{\text{გახსნილი ნივთიერების მოლების რიცხვი}}{\text{ერთ ლიტრ ხსნარში}}$$

ამრიგად, მოლარობის ერთეულია მოლი/ლ ანუ მოლი$\times$ ლ.$^{-1}$ პირობითად მოლარობის აღსანიშნავად იყენებენ კვადრატულ ფრჩხილებს **[ ].**

მოლალობა (m):

მოლალობა განისაზღვრება როგორც გახსნილი ნივთიერების მოლების რიცხვი,

რომელიც მოდის გამხსნელის ყოველ 1000 გრ-ზე.

$$\text{მოლალობა} = \frac{\text{გახსნილი ნივთიერების მოლების რიცხვი}}{\text{გამხსნელის წონა კილოგრამებში}}$$

ამრიგად, მოლალობის ერთეულია მოლი შეფარდებული კილოგრამთან ($mol \times kg^{-1}$).

ჩვენ შეგვიძლია შევადაროთ ერთმანეთს ამ ოთხი კონცენტრაციის ერთეულის სარგებლიანობა. წონით პროცენტს გააჩნია ის უპირატესობა, სხვა ერთეულებთან შედარებით, რომ არა არის აუცილებელი გახსნილი ნივთიერების მოლური მასის ცოდნა. ეს ერთეული სასარგებლოა ბიოქიმიკოსებისათვის, რომლებიც ხშირად მუშაობენ უცნობი მასისა და უცნობი სისუფთავის მაკრომოლეკულებთან. ზოგადი ერთეული ცილებისა

და დნმ-ის ხსნარებში არის მგმლ$^{-1}$ ანუ მგ/მლ. უფრო მეტიც, ხსნარის წონითი პროცენტი დამოკიდებულია ტემპერატურისაგან, რადგან იგი განსაზღვრულია წონითი სიდიდეებით. მოლური წილი ხელსაყრელია აირების პარციალური წნევების გასაზომად და ხსნარების ორთქლის წნევების შესასწავლად. მოლარობას ყველაზე ხშირად იყენებენ ხსნარების კონცენტრაციების დასახასიათებლად. მოლარობის უპირატესობა სხვა ერთეულებთან შედარებით მდგომარეობს იმაში, რომ უფრო იოლია ხსნარის მოცულობის გაზომვა ზუსტად და-კალიბრებული მოცულობის გასაზომი ჭურჭლით, ვიდრე გამხსნელის წონის გასაზღვრა. მოლარობის ნაკლი მდგომარეობს იმაში, რომ ჩვენ არ ვიცით ხსნარში გამხსნელის რაოდენობა, ამასთან მოლარობა დამოკიდებულია ტემპერატურაზე, რადგან ტემპერატურის ზრდით იზრდება მოცულობა, ხოლო გახსნილი ნივთიერების რაოდენობა მუდმივი რჩება. ამ ნაკლისგან თავისუფალია მოლალობა, რადგან იგი წარმოადგენს მასის ფარდობას ასევე მასასთან.

ხსნარების კოლიგატიური თვისებები:

როდესაც გამხსნელში ვხსნით მცირედაქროლად (მყარ) ნივთიერებას, იცვლება გამხსნელის ფიზიკური თვისებები (ორთქლის წნევა, გაყინვისა და დუღილის ტემპერატურა) და წარმოიქმნება ოსმოსური წნევა. თუ გამხსნელი და ხსნარი გამიჯნულია ნახევრად განვლადი მემბრანით (მემბრანაში შეიძლება გავიდეს გამხსნელის, მაგრამ არა გახსნილი ნივთიერების მოლეკულები). ხსნარის ამ თვისებებს – კოლიგატიურ თვისებებს უწოდებენ. ამ ოთხი თვისებიდან მთავარია პირველი – გამხსნელის ორთქლის წნევის შემცირება მისი კონცენტრაციის შემცირებასთან ერთად, ხოლო დანარჩენი სამი ამის შედეგია.

გამხსნელის ორთქლის წნევის შემცირება, როდესაც მასში ვხნით არააქროლად ნივთიერებას წარმოდგენილია რაულის კანონით:

$$P = P_0 X_1 \quad (1)$$

სადაც $P -$ ხსნარის ორთქლის წნევაა, P_0 - სუფთა გამხსნელის ორთქლის წნევაა მოცემულ ტემპერატურაზე, X_1 - გამხსნელის მოლური წილია ხსნარში.

თუ ხსნარი შედგებან ორი კომპონენტისგან, სადაც გამხსნელის მოლური წილია - $X_{1,}$, ხოლო X_2 - გახსნილი ნივთიერების მოლური წილია

მაშინ $\frac{P_0 - P}{P_0} = X_2$ (2)

რადგან $X_1 + X_2 = 1$ (3)

მოლური წილის განმარტების თანახმად

$$X_2 = \frac{n_2}{n_1 + n_2} \quad (4)$$

სადაც n_1 – გამხსნელის მოლების რიცხვია, n_2 - გახსნილი ნივთიერების მოლების რიცხვი.

განზავებული ხსნარებისათვის $n_2 \angle\angle n_1$ (5)

მაშინ

$$\frac{P_0 - P}{P_0} = \frac{n_2}{n_1} \quad (6)$$

$$n_2 = \frac{\omega_2}{M_2}, \quad n_2 = \frac{\omega_1}{M_1}$$

სადაც ω_2 – გახსნილი ნივთიერების წონაა, M_2 - მისი მოლეკულური წონაა, ω_1 - გამხსნელის წონა ხსნარში, M_1 - მისი მოლეკულური წონა.

$$\frac{P_0 - P}{P_0} = \frac{\omega_2 M_1}{\omega_1 M_2} \quad (7)$$

ხსნარის მოლარობა – m განისაზღვრება როგორც

$$m = \frac{\omega_2 / M_2}{\omega_1 / 1000} = \frac{1000\omega_2}{\omega_1 M_2} \quad (8)$$

აქედან

$$\frac{P_0 - P}{P_0} = \frac{mM_1}{1000} \quad (9)$$

თუ გამხსნელს წარმოადგენს წყალი – $M_1 = 18,$ მაშინ

$$\frac{P_0 - P}{P_0} = 0{,}018m \quad (10)$$

ამრიგად ოსმოსური წნევის გაზომვით შეიძლება განვსაზღვროთ გახსნილი ნივთიერების მოლური მასა.

როგორც აღინიშნა ერთ-ერთ კოლიგატიურ თვისებას წარმოსდგენს გამხსნელის გაყინვის ტემპერატურის შემცირება, როდესაც მასში ვხსნით ვხსნით ნაკლებად აორთქლად ნივთიერებას

$$\Delta T_{\text{გაყ}} = mK_k \quad (11)$$

სადაც $\Delta T_{\text{გაყ}}$-გამხსნელის გაყინვის ტემპერატურის შემცირებაა, m-ხსნარის კონცენტრაცია მოლურ ერთეულებში, K_k- ეწოდება გამხსნელის კრიოსკოპიული მუდმივა და მოცემული გამხსნელისათვის მოიცემა ფრჩხილებში.

ასევე, გამხსნელის დუღილის ტემპერატურის გაზრდა მოიცემა ანალოგიური განტოლებით:

$$\Delta T_{\text{დულ}} = mK_{\text{ე}} \quad (12)$$

სადაც $\Delta T_{\text{დულ}}$-გამხსნელის დუღილის ტემპერატურის გაზრდაა, m-ხსნარის მოლალობაა, $K_{\text{ე}}$- ეწოდება მოცემული გამხსნელის ებულოსკოპური მუდმივა და მოცემულია ცხრილებში სხვადასხვა გამხსნელისათვის.

ამ ორი უკანასკნელი განტოლებიდან $\Delta T_{\text{გაყ}}$ და $\Delta T_{\text{დულ}}$ გაზომვით შეიძლება განვსაზღვროთ – m და შესაბამისად გახსნილი ნივთიერების მოლური მასა M_2 ხსნარში.

თუ ჭურჭელი გაყოფილია ორ ნაწილად ნახევრადგანვლადი მემბრანით და მემბრანის ორივე მხარეზე გვაქვს ერთიდაიგივე ხსნარი სხვადასხვა

კონცენტრაციით, გამხსნელი იწყებს გადასვლას დაბალი კონცენტრაციის უბნიდან მაღალი კონცენტრაციის უბანში, ვიდრე ხსნარის კონცენტრაცია მემბრანის ორივე მხარეს არ გათანაბრდება. გამხსნელის გადასვლა დაბალი კონცენტრაციის უბნიდან მაღალისაკენ შეიძლება შევანელოთ, შევაჩეროთ ან შევაბრუნოთ კიდეც, თუ მაღალი კონცენტრაციის უბანს მოვსდებთ დამატებით წნევას. იმ დამატებით წნევას, რომელიც შეაჩერებს გამხსნელის გადასვლას დაბალი კონცენტრაციის უბნიდან მაღალში ეწოდება ოსმოსური წნევა. ძლიერ განზავებული ხსნარებისათვის $\Pi = CRT$ (13)

სადაც Π - ოსმოსური წნევაა,

R – აირის უნივერსალური მუვივაა,

C - ხსნარის კონცენტრაციაა.

T - აბსოლუტური ტემპერატურაა.

$[C_{\text{მოლი}}] = \frac{n}{V}$ (14)

სადაც n – გახსნილი ნივთიერების მოლების რიცხვი

V – ხსნარის მოცულობა

$n = \frac{\omega}{M}$ (15)

სადაც ω – გახსნილი ნივთიერების წონაა

M – მისი მოლეკულური წონაა

$\Delta T_{\text{დუღ}} = mK_{\text{ე}}$ (12)

სადაც $\Delta T_{\text{დუღ}}$ -გამხსნელის დუღილის ტემპერატურის გაზრდაა, m - ხსნარის მოლალობა, $K_{\text{ე}}$ - ეწოდება მოცემული გამხსნელის ებულოსკოპური მუდმივა.

ამ ორი უკანასკნელი $\Delta T_{\text{გაყ}}$ და $\Delta T_{\text{დუღ}}$ გაზომვით შეიძლება განვსაზღვროთ – m და გახსნილი ნივთიერების მოლური მასა M_2 ხსნარში.

თუ ჭურჭელი გაყოფილია ორ ნაწილად ნახევრადგანვლადი მემბრანით და მემბრანის ორივე მხარეზე გვაქვს ერთიდაიგივე ხსნარი სხვადასხვა კონცენტრაციით, გამხსნელი იწყებს გადასვლას დაბალი კონცენტრაციის უბნიდან მაღალი კონცენტრაციის უბანში, ვიდრე ხსნარის კონცენტრაცია მემბრანის ორივე მხარეს არ

გათანაბრდება. გამხსნელის გადასვლა დაბალი კონცენტრაციის უბნიდან მაღალისაკენ შეიძლება შევანელოთ, შევაჩეროთ ან შევაბრუნოთ კიდეც, თუ მაღალი კონცენტრაციის უბანს მოვსდებთ დამატებით წნევას. იმ დამატებით წნევას, რომელიც შეაჩერებს გამხსნელის გადასვლას დაბალი კონცენტრაციის უბნიდან მაღალში ეწოდება ოსმოსური წნევა. ძლიერ განზავებული ხსნარებისათვის გათანაბრდება. გამხსნელის გადასვლა დაბალი კონცენტრაციის უბნიდან

$$\Pi = CRT \quad (13)$$

სადაც Π - ოსმოსური წნევაა,

R – აირის უნივერსალური მუდმივა

C - ხსნარის კონცენტრაცია

T - აბსოლუტური ტემპერატურა.

$$[C_{\text{მოლი}}] = \frac{n}{V} \quad (14)$$

სადაც $n-$ გახსნილი ნივთიერების მოლების რიცხვია

$V-$ ხსნარის მოცულობა

$$n = \frac{\omega}{M} \quad (15)$$

სადაც $\omega -$ გახსნილი ნივთიერების წონაა

M – მისი მოლეკულური წონა

$$\Pi = \frac{\omega}{VM} RT$$
$$\Pi = \frac{C'RT}{M} \qquad (16)$$

C' – ხსნარის კონცენტრაცია $[\frac{გ}{სმ^3}]$ – ში.

ამრიგად, თუ გავზომავთ ოსმოსურ წნევას და ვიცით ხსნარის კონცენტრაცია შეიძლება მოცემულ ტემპერატურაზე განვსაზღვროთ გახსნილი ნივთიერების მოლეკულური წონა.

ამოცანა 7.1 {R. Chang}

რამდენი გრამი წყალი უნდა დაუმატოთ 20.0გრ. შარდოვანას, რომ მივიღოთ შარდოვანას 5% წონითი პროცენტიანი ხსნარი.

5% – 5გრ. დავუმატოთ 95გრ. H_2O

5% – 20 გრ. ---------- x

$$x = \frac{20}{5} \times 95 = 380გრ. H_2O$$

ამოცანა 7.2 {R. Chang}

რის ტოლია 2.12მოლი/კგ H_2SO_4 – ის მოლარობა? ხსნარის სიმკვრივე ტოლია 1.3გ/სმ^3.

მოც:

$m = 2{,}12 \frac{\text{მოლი}}{\text{კგ}}\ H_2SO_4$

$\rho = 1{,}3 \frac{\text{გ}}{\text{სმ}^3} = 1{,}3 \cdot 100^3 \frac{\text{კგ}}{\text{მ}^3}$

უ.ვ. M

განვსაზღვროთ $2{,}12 \frac{\text{მოლი}}{\text{კგ}}$ კონცენტრაციის შესაბამისი H_2SO მასა

$\text{მასა} = n[M]$

სადაც M - H_2SO-ის მოლური მასაა, n – მოლების რიცხვი.

მასა $= 2{,}12 \cdot 98\text{გრ} = 207{,}76\text{გრ}.$

ხსნარის ჯამური მასა $= 1000\text{გრ} + 207{,}76\text{გრ} = 1207{,}7\text{გრ}.$

ხსნარის მოცულობა

$$V = \frac{\text{ჯამური მასა}}{\rho\{\text{სიმკვრივე}\}} = \frac{1207{,}7\text{გრ}}{1{,}3 \frac{\text{გრ}}{\text{სმ}^3}} = 929\text{სმ}^3$$

ამრიგად
$$\begin{matrix} 929\text{სმ}^3 - & 2{,}12 \\ 1000\text{სმ}^3 - & x \end{matrix}$$

$$x = \frac{2{,}12 \cdot 1000\text{სმ}^3}{929\text{სმ}^3} 2{,}28M$$

ამოცანა 7.28 {R. Chang}

სუფთა წყლის ორთქლის წნევა $298^0 K$ ტოლია 237 მმ. ვრც. წყ., ხოლო ზღვის წყლის 22,98 მმ. ვრც. წყ. ჩათვალეთ, რომ ზღვის წყალი შეიცავს

მხოლოდ $NaCl$ – ს და განსაზღვრეთ მისი კონცენტრაცია
$\{NaCl$ – წარმოადგენს ძლიერ ელექტროლიტს$\}$.

ამოხსნა:

$$\frac{P_0 - P}{P_0} = 0{,}018m$$

რაულის კანონის თანახმად

$$m = \frac{P_0 - P}{P_0 \cdot 0{,}018} = \frac{23{,}76 - 22{,}98}{0{,}018 \cdot 23{,}76} = \frac{0{,}78}{0{,}4277} = 1{,}8237$$

რადგან $NaCl$ – ძლიერი ელექტროლიტია, ეს ნიშნავს, რომ ის განიცდის 100% დისოციაციას, ამიტომ $NaCl$ – ის კონცენტრაცია მოლარულ ერთეულებში

$$m = \frac{1{,}82}{2} = 0{,}912.$$

ამოცანა 7.4 {R. Chang}

გოგირდმჟავას წონითი პროცენტი, რომელსაც ჩვენ ვიყენებთ ლაბორატორიებში ტოლია 98%. გამოთვალეთ გოგირდმჟავას მოლარობა, თუ ხსნარის სიმკვრივე 1.83 გ/სმ

ამოხსნა:

წონითი პროცენტის განმარტების თანახმად 100გრ. ხსნარში 98გრ. H_2SO_4 – ია,

ხოლო 2გრ. H_2O. მოლალობა ტოლია მოლების რიცხვისა რომელიც მოდის ყოველი 1000გრ. გამხსნელზე. თუ გადავითვლით:

98გრ. $500 = 2$გრ. 500

მივიღებთ ყოველ 1000გრ. წყალზე მოდის 500 98გრ.=500მოლი H_2SO_4 – ანუ

$$[C] = 500m$$

რაც შეეხება მოლარობა ტოლია მოლების რიცხვისა 1 ლ. ხსნარში. თუ 100გრ. ხსნარში 98გრ. H_2SO_4 – ია, ხოლო 2გრ. წყალი, მაშინ ამ ხსნარის მოცულობა ტოლია

$V = \frac{m}{\rho} = \frac{100}{1,83} = 54,64სმ^3$ ე.ი. $54,64სმ^3$ მოცულობის ხსნარის მოლარობა ტოლია $1M$, მაშინ $1000სმ^3$ ხსნარში მოლების რიცხვი ტოლი იქნება

$54,64სმ^3 - 1M$

$1000სმ^3 - x$

$$x = \frac{1000სმ^3}{54,64სმ^3} = 18,3M$$

ამოცანა 7.8 {R. Chang}

ალკოჰოლური სასმელების სიმაგრეს ჩვეულებრივ განსაზღვრავენ **"proof"** ტერმინებში, რომელიც განისაზღვრება, როგორც ეთანოლის მოცულობითი გრადიენტის გაორმაგებული სიდიდე. გამოთვალეთ ალკოჰოლის გრამების რიცხვი 2კვარტ. (1კვარტი=0,946ლ) 75 **"proof"** -ის ჯინში. (ეთანოლის სიმკრივე) $d = 0,8გ/სმ^3 = 800გ/ლ$

მოც:

$$[C] = 75\text{"}\ proof\text{"} = \frac{75\%}{2} = 37{,}5\%$$

$$d = 0{,}8\frac{\text{გ}}{\text{სმ}^3}$$

$$V = 2\text{კვარტ} = 2 \cdot 0{,}946$$

უ.ვ. m

ამოხსნა:

მოცულობითი პროცენტის განმარტების თანახმად ყოველ 100 მლიტრ ჯინში 37,5მლ. ალკოჰოლია

2კვარტ. მოცულობაში მილილიტრების რიცხვი ტოლია
$V = 2 \bullet 946\text{მლ} = 1892\text{მლ}.$

ეთანოლის მოცულობა ტოლია

100მლ ———————— 37,5 მლ

1892მლ ———————— x

$$x = \frac{1892 \quad 37{,}5}{100} = 70{,}5\text{მლ}$$

ხოლო ეთანოლის მასა

$$m = dV = 0{,}8 \quad 709 = 56{,}7\text{გ}.$$

ამოცანა 7.1 {R. Chang}

რამდენი გრამი წყალი უნდა დაუმატოთ 20.0გრ. შარდოვანას, რომ მივიღოთ შარდოვანას 5% წონითი პროცენტიანი ხსნარი.

5% – 5გრ. დავუმატოთ 95გრ. $H_2 0$

5% – 20 გრ. ---------- x

$$x = \frac{20}{5} \times 95 = 380 \text{გრ.} H_2 0$$

ამოცანა 7.2 {R. Chang}

რის ტოლია 2.12 მოლო/კგ. H_2SO_4 – ის მოლარობა? ხსნარის სიმკრივე ტოლია 1.3გ/სმ^3.

მოც:

$$m = 2{,}12 \frac{\text{მოლი}}{\text{კგ}} \ H_2SO_4$$

$$\rho = 1{,}3 \frac{\text{გ}}{\text{სმ}^3} = 1{,}3 \cdot 100^3 \frac{\text{კგ}}{\text{მ}^3}$$

უ.ვ. M

განვსაზღვროთ $2{,}12 \frac{\text{მოლი}}{\text{კგ}}$ კონცენტრაციის შესაბამისი H_2SO მასა

$$\text{მასა} = n[M]$$

სადასც M - H_2SO-ის მოლური მასაა, n – მოლების რიცხვი.

მასა $= 2{,}12 \cdot 98\text{გრ} = 207{,}76\text{გრ}.$

ხსნარის ჯამური მასა $= 1000\text{გრ} + 207{,}76\text{გრ} = 1207{,}7\text{გრ}.$

ხსნარის მოცულობა

$$V = \frac{\text{ჯამური მასა}}{\rho\{\text{სიმკვრივე}\}} = \frac{1207{,}7\text{გრ}}{1{,}3\frac{\text{გრ}}{\text{სმ}^3}} = 929\text{სმ}^3$$

ამრიგად $\begin{matrix} 929\text{სმ}^3 - & 2{,}12 \\ 1000\text{სმ}^3 - & x \end{matrix}$

$$x = \frac{2{,}12 \cdot 1000\text{სმ}^3}{929\text{სმ}^3} 2{,}28M$$

ამოცანა 7.28 {R. Chang}

სუფთა წყლის ორთქლის წნევა ტოლია 237 მმ.ვრცხ.წყ.სვ., ხოლო ზღვის წყლის 22,98 მმ. ვრცხ.წყ.სვ. ჩათვალეთ, რომ ზღვის წყალი შეიცავს მხოლოდ $NaCl-$ს და განსაზღვრეთ მისი კონცენტრაცია $\{NaCl-$ წარმოადგენს ძლიერ ელექტროლიტს.

ამოხსნა:

$$\frac{P_0 - P}{P_0} = 0{,}018m$$

რაულის კანონის თანახმად

$$m = \frac{P_0 - P}{P_0 \cdot 0{,}018} = \frac{23{,}76 - 22{,}98}{0{,}018 \cdot 23{,}76} = \frac{0{,}78}{0{,}4277} = 1{,}8237$$

რადგან $NaCl-$ ძლიერი ელექტროლიტია, ომ ის განიცდის 100% დისოციაციას, ამიტომ $NaCl-$ის კონცენტრაცია მოლარულ ერთეულებში

$$m = \frac{1{,}82}{2} = 0{,}912.$$

ამოცანა 7.4 {R. Chang}

გოგირდმჟავას წონითი პროცენტი, რომელსაც ჩვენ ვიყენებთ ლაბორატორიებში ტოლია 98%. გამოთვალეთ გოგირდმჟავას მოლარობა, თუ ხსნარის სიმკვრივე 1.83 გ/სმ.

ამოხსნა:

წონითი პროცენტის განმარტების თანახმად 100გრ. ხსნარში 98გრ. H_2SO_4 – ია,

ხოლო 2გრ. H_2O. მოლალობა ტოლია მოლების რიცხვისა რომელიც მოდის ყოველი 1000გრ. გამხსნელზე. თუ გადავითვლით:

98გრ. 500= 2გრ. 500

მივიღებთ ყოველ 1000გრ. წყალზე მოდის 500 98გრ.=500მოლი H_2SO_4 – ანუ

$[C] = 500m$

რაც შეეხება მოლარობა ტოლია მოლების რიცხვისა 1ლ. ხსნარში. თუ 100გრ. ხსნარში 98გრ. H_2SO_4 – ია, ხოლო 2რგრ. წყალი, მაშინ ამ ხსნარის მოცულობა ტოლია

$V = \frac{m}{\rho} = \frac{100}{1{,}83} = 54{,}64სმ^3$ ე.ი.ნ 54,64სმ^3 მოცულობის ხსნარის მოლარობა ტოლია $1M$, მაშინ $1000სმ^3$ ხსანარში მოლების რიცხვი ტოლი იქნება

$54{,}64სმ^3 - 1M$

$1000სმ^3 - x$

$x = \frac{1000სმ^3}{54{,}64სმ^3} = 18{,}3M$

ამოცანა 7.8 {R. Chang}

ალკოჰოლური სასმელების სიმაგრეს განსაზღვრავენ **"proof"** ტერმინებში, რომელიც განისაზღვრება, როგორც ეთანოლის მოცულობითი გრადიენტის გაორმაგებული სიდიდე. გამოთვალეთ ალკოჰოლის გრამების რიცხვი 2

კვარტ.(1 კვარტი=0,946ლ) 75 **“proof”** -ის ჯინში. (ეთანოლის სიმკვრივე

$d = 0{,}8$გ 10^3მ^3 $= 800\frac{\text{გ}}{\text{ლ}}$

მოც:

$$[C] = 75\text{''}\,proof\text{''} = \frac{75\%}{2} = 37{,}5\%$$

$$d = 0{,}8\frac{\text{გ}}{\text{სმ}^3}$$

$$V = 2\text{კვარტ} = 2 \cdot 0{,}946$$

უ.ვ. m

ამოხსნა:

მოცულობითი პროცენტის განმარტების თანახმად ყოველ 100 მლიტრ ჯინში 37,5მლ. ალკოჰოლია. 2კვარტ. მოცულობაში მილილიტრების რიცხვი ტოლია $V = 2 \bullet 946$მლ $= 1892$მლ.

ეთანოლის მოცულობა ტოლია

100მლ ———— 37,5 მლ

1892მლ ———— x

$$x = \frac{1892 \quad 37{,}5}{100} = 70{,}5\text{მლ}$$

ხოლო ეთანოლის მასა

$m = dV = 0{,}8$ 709=56,7გ.

ამოცანა 7.29 {R. Chang}

ხეები მკაცრი ზამთრის პირობებში უძლებენ $-60^0 C$ ტემპერატურასაც კი. განსაზღვრეთ ხეში არსებული წყალხსნარების კონცენტრაცია, რომელიც არ იყინება ამ ტემპერატურაზეც. არის თუ არა ეს შესაძლებელი?

ამოცანა 7.33 {R. Chang}

ავტომობილის რადიატორისათვის "ანტიფრიზს" ამზადებენ ეთილენ გლიკოლი-საგან, $CH_2\{OH\}CH_2\{OH\}$. ამ ნივთიერების რამდენი მილი-ლიტრი უნდა დაუმატოთ 6,5ლ. წყალს, რომ წყალი რადიატორში არ გაიყინოს -20^0C.

ამოცანა 7.35 {R. Chang}

ყველაზე უფრო მაღალ ხეებს, როგორც ცნობილია, წარმოადგენენ კა-ლიფორნიაში საკვოია. ჩათვალეთ რომ საკვოიას სიმაღლე დაახლოე-ბით 105მ. დაადგინეთ ოსმოსური წნევის ის მნიშვნელობა, რომელიც აუცილებელია რათა წყალმა მიაღწიოს ხის კენწეროს.

ამოცანა 7.39 {R. Chang}

ქათმის კვერცხის ცილისაგან გამოყოფილი ლიზოციმის მოლური მასა $13930\frac{\text{გ}}{\text{მოლი}}$ ტოლია. ამ ცილის 0,1გრ. გახსნეს 50გრ. წყალში 298^0K ტემპერა-ტურაზე. განსაზღვრეთ წყლის ორთქლის წნევის შემცირება, გაყინვის ტემპერატურის შემცირება, დუღილის ტემპერატურის გაზრდა და ამ ხსნარის ოსმოსური წნევა. სუფთა წყლის ორთქლის წნევა 298^0K ტემპერატურაზედ ტოლია 23,76მმ.ვრც.წყ.

ამოცანა 7.43 {R. Chang}

საბაჟოს ქიმიკოსს გადასცეს თეთრი ფერის ფხვნილი ანალიზისათვის. მან ამ ნივთიერების 0,5გრ. გახსნა 8,0გრ. ბენზინში. ხსნარი გაიყინა $3,9^0C$ –ზე. შეუძლია თუ არა ქიმიკოსს დაასკვნას, რომ ფხვნილი წარ-მოადგენს კოკაინს $C_{17}H_{21}NO_4$?

რა დასკვნის გაკეთება შეიძლება ანალიზის შედეგების მიხედვით? სუფთა ბენზინის გაყინვის ტემპერატურაა $-5{,}5^{0}C$.

ამოცანა 7.6 {R. Chang}

განზავებულ წყალხსნარებში,რომლის სიმკრივე მიახლოებით ტოლია სუფთა გამხსნელისა, მოლარობა ტოლია მოლალობისა. აჩვენეთ, რომ ეს მტკიცება სამართლიანია 0,010 M შარდოვანას წყალხსნარისათვის $[(NH_2)_2C)]$.

ამოცანა 7.7 {R. Chang}

დიაბეტურ პაციენტებში შაქრის (გლუკოზის) რაოდენობა დაახლოებით 0,140გ გლუკოზა/100მლ. სისხლში. ყოველდღიურად პაციენტი იღებს 40გ. გლუკოზას, რის შედეგად გლუკოზის დონე სისხლში იწევს დაახლოებით 0,240გ/100მლ.-მდე. გაიანგარიშეთ გლუკოზის მოლების რიცხვი მილილიტრებში სისხლში და მოლების საერთო რიცხვი და გლუკოზის რაოდენობა გრამებში გლუკოზის მიღებამდის და მიღების შემდეგ. (ჩათვალეთ, რომ სისხლის საერთო მოცულობა ორგანიზმში დაახლოებით 5,0ლ.)

ამოცანა 7.5 {R. Chang}

გადაიყვანეთ 0,25მოლი/კგ საქაროზის ხსნარის კონცენტრაცია წონით პროცენ-ტებში. ხსნარის სიმკრივე $d = 1{,}2\frac{\text{გ}}{\text{სმ}^3}$.

ამოცანა 3.12 (В. Уильямс, Х. Уильямс)

100გრ. ბენზოლს დაუმატეს 2გრ. უცნობი ნივთიერება, ამის შედეგად ბენზოლის ორთქლის წნევა შემცირდა 1მმ.ვრც.სვ. რის ტოლია ნივთიერების მოლეკულური მასა, თუ 20^0C ტემპერატურაზე სუფთა ბენზოლის ორთქლის წნევა ტოლია 76,5მმ.ვრც.სვ?

მოც:

$\omega_1 = 100$წ.
$\omega_2 = 2$წ.
$\Delta P = P_0 - P = 1$მმ.ვრც.სვ.
$t = 20^0 C$
$P_0 = 76{,}5$მმ.ვრც.სვ.
$M_1 = 78$

უ.ვ. $M_2 - ?$

ამოხსნა:

$\frac{P_0 - P}{P_0} = \frac{mM_1}{1000}$ რაულის კანონი

$m = \frac{1000 \cdot \Delta P}{P_0 M_1} = \frac{1000 \cdot \omega_2}{\omega_1 M_2}$ მოლალობის განმარტების თანახმად

$M_1 = C_6H_6 = 78$

$M_2 = \frac{P_0 \omega_2 M_1}{\omega_1 \Delta P} = \frac{2 \cdot 76{,}6 \cdot 78}{100 \cdot 1} = \frac{76{,}5 \cdot 78}{50} = 119$ დალტონი.

ამოცანა 3.20 (В. Уильямс, Х. Уильямс)

75გ. ნივთიერება გახსნილია 1000გ. წყალში. ამ ხსნარის სიმკრივე $25^0 C$ არის 1,02გ/სმ^3, ხოლო ოსმოსური წნევა 2,1ატმ. განსაზღვრეთ მოლეკულური წონა, გამოიყენეთ განტოლება $\Pi = \frac{n_2}{V} RT$, სადაც V ხსნარის მოცულობაა.

მოც:

$\omega_2 = 75$გ $= 75 \cdot 10^{-3}$კგ
$\omega_1 = 1000$გ $= 1$კგ
$t = 25^0 C \qquad T = 298^0 K$
$\rho = 1{,}02 \frac{\text{გ}}{\text{სმ}^3} = 1{,}02 \cdot 10^{-3} \frac{\text{კგ}}{\text{მ}^3}$
$\Pi = 2{,}1$ატმ.
$R = 0{,}082$

უ. 3. M_x

ამოხსნა:

$\Pi = n_2 RT \qquad n_2 = \frac{\omega_2}{M_x}$

ამიტომ $\Pi = \frac{\omega_2}{M_x V} RT$ $V = \frac{m}{\rho}$

ამიტომ $\Pi = \frac{\omega_2 \rho}{\Pi m} RT$

$$M_x = \frac{\omega_2 \rho}{\Pi m} RT = \frac{\omega_2 RT}{\Pi V} = \frac{75 \cdot 10^{-3} \cdot 10^{-3} 0{,}082 \cdot 298}{2{,}1 \cdot 1054 \cdot 10^{-3}} = \frac{1832{,}76 \cdot 10^3}{2213{,}4} = 0{,}828 \cdot 10^3 = 828M$$

ამოცანა 3.5 (В. Уильямс, Х. Уильямс)

განსაზღვრეთ 100გ. წყალში გახსნილი 1000გ. გლუკოზის ხსნარის წნევა $20^0 C$ ტერმპერატურაზე, თუ ჩავთვლით რომ გლუკოზა და წყალი ქმნიან იდეა-ლურ ხსნარს. ამ ტემპერატურაზე წყლის ორთქლის წნევა $P_0 = 17{,}53$მმ.ვრც.სვ.

მოც:

$\omega_1 = 100$გ.
$\omega_2 = 1{,}000$გ.
$M_{\text{გლუკ}} = 180{,}16$
$P_0 = 17{,}535$მმ.ვრც.სვ.

უ.ვ. $P - ?$

რაულის კანონის თანახმად

$\frac{P_0 - P}{P_0} = \frac{\omega_2 M_1}{\omega_1 M_2}$ $M_2 = M_{\text{გლუკ}} = 180{,}16$

$P_0 - P = \frac{P_0 \omega_2 M_1}{\omega_1 M_2}$ $P = P_0 - \frac{P_0 \omega_2 M_1}{\omega_1 M_2}$

$$P = 17{,}517 - \frac{17{,}517 \cdot 1 \cdot 18}{100 \cdot 180{,}16} = 17{,}517 - \frac{315{,}306}{18016} = 17{,}517 - 0{,}0175 = 17{,}499$$

ამოცანა 3.4. (В. Уильямс, Х. Уильямс)

სისხლი იყინება – $0{,}560^0 C$. რის ტოლია შრატში გახსნილი ნივთიერების ეფექტური მოლალული კონცენტრაცია? ამ კონცენტრაციის მიმართ განსაზღვრეთ რის ტოლია შრატში ოსმოსური წნევა $37^0 C$ ფიზიოლოგიურ ტემპერატურაზე?

მოც:

$\Delta T = -0{,}560^0 C$
$t = 37^0 C$
$T = 310^0 K$

უ.ვ. $m_{\text{ეფექტ}}$
Π

ამოხსნა:

$\Delta T = K_k m$ $\qquad K_k = 1.86$
სადაც K_k წყლის კრიოსკოპული მუდმივაა
$m = \frac{\Delta T}{K_k} = \frac{-0{,}560}{-1{,}86} = 0{,}3m$
$\Pi = CRT$ $\qquad \Pi = 0{,}3 \cdot 1{,}986 \cdot 310 = 184{,}79$მმ.ვრც.სვ.

ამოცანა 3.16 (В. Уильямс, Х. Уильямс)

ზოგიერთ პროტოპლასტებში სითხის ოსმოსური წნევა 5ატმ. რის ტოლია საქაროზის წყალხსნარის მოლალული კონცენტრაცია $30^0 C$ -ზე, თუ ის არის იზოოსმოსური ამ უჯრედების მიმართ?

ამოცანა 3.9 (В. Уильямс, Х. Уильямс)

საქაროზის $C_{12}H_{22}O_4$ წყალხსნარი დამზადებულია 34,6გ. შაქრის გახსნით 1000გ. წყალში

განსაზღვრეთ ხსნარის ორთქლის წნევა $20^0 C$.

ამოცანა 3.13 (В. Уильямс, Х. Уильямс)

განსაზღვრეთ წყალხსნარის გაყინვის ტემპერატურა, თუ იგი დამზადებულია 50,0გ. ეთილენგლიკოლის გახსნით 500გ. წყალში. ეთილენგლუკოლის $M_{ეთ}$=62,07.

ამოცანა 3.22 (В. Уильямс, Х. Уильямс)

150გ. წყალში გახსნეს 5გ. ნივთიერება A, ამის შედეგად ხსნარის დუღილის ტემპერატურა გაიზარდა 0,01-ით. რის ტოლია A ნივთიერების მოლეკულური წონა? წყლის ებულოსკოპური მუდმივა $K_ე$=0,514 გრად/მოლი.

ფიზიკური პროცესები ბიოლოგიურ მემბრანებში.

ფიკის განტოლება

$$J=-D\frac{dc}{dx} \qquad (4.1)$$

სადაც J-დიფუნდირებული ნივთიერების სიმკვრივეა, D - დიფუზიის კოეფიციენტი, $\frac{dc}{dx}$ – კონცენტრაციის გრადიენტის პროექცია ღერძის მიმართ

თეორელის განტოლება

$$J=-CU\frac{d\mu}{dx} \qquad (4.2)$$

μ – ელექტროქიმიური პოტენციალია, $U=\frac{D}{Rl}$ – ძვრადობაა, R - გაზის მოლური მუდმივაა.

ნივთიერების მოლეკულის საშუალო გადახრის სიდიდე ხსნარში.

$$\left\langle X^2 \right\rangle = 2Dt \qquad (4.3)$$

სადაც D – დიფუზიის კოეფიციენტია, t – დრო

წონასწორული კონცენტრაციის დამყარების მახასიათებელი დრო

$$t=0,69\frac{V}{pS} \qquad (4.4)$$

სადაც V-უჯრედის მოცულობაა, S-უჯრედული მემბრანის ზედაპირის ფართობია.

$$P=\frac{D}{l}K$$

სადაც P-მემბრანის განვლადობაა l - მემბრანის სისქე, K – განაწილების კოეფიციენტი.

ნერსტის ფორმულა

$$\Delta\varphi=\frac{RT}{ZF}\ln\frac{c_0}{c_r} \qquad (4.5)$$

სადაც $\Delta\varphi$ -მემბრანის პოტენციალია $ც_0$ და $ც_r$ მოცემული იონის კონცენტრაცია უჯრედის გარეთ და შიგნით, F – ფარადეის მუდმივა, Z – იონის ვალენტობა.

ამოცანების ამოხსნა

ამოცანა 1. (Ремизов А. Н. –3.35)

განსაზღვრეთ მიტოქონდრიების მემბრანული პოტენციალი, თუ 37^0C მემბრანის შიგნით $pH = 9$, ხოლო გარემოში $pH = 7.0$. ტემპერატურა 20^0C

მოც: . $t = 37^0C$

$pH = 9$

$\boldsymbol{pH = 7}$

უ. 3. $\boldsymbol{\Delta\varphi}$

ამოხსნა:

ნერნსტის განტოლების თანახმად მემბრანული პოტენციალი

$\Delta\varphi = \frac{RT}{F_n}\ln\frac{c}{c}$ გარე/შიგა

სადაც R-უნივერსალური გაზური მუდმივაა.

$R = 8{,}31ჯ/მოლი\ გრად$

F – ფარადეის რიცხვია

$F = 96500კ/ბიოექვ.$

$c_{გარე}$ და $c_{შიგა}$ არის იონების კონცენტრაცია მემბრანის გარეთ და შიგნით შესაბამისად.

n- იონის მუხტია ელექტრონის მუხტის ერთეულებში

T-აბსოლუტური ტემპერატურა

ამოცანის პირობის თანახმად

$t = 20^0 C$, $T = 293 K$

$$\Delta\varphi = 58 \lg \frac{c_{\text{გარე}}}{c_{\text{შიგა}}}$$

თუ $pH = 9$, მაშინ $[H^+] = 10^{-9}$ მოლი/ლ

$pH = 7$, მაშინ $[H^+] = 10^{-7}$ მოლი/ლ

ამრიგად $\Delta\varphi = 58 \times \lg 10^2 = 116$მვ.

ამოცანა 1.2. (Ремизов А. Н. –3.37)

განსაზღვრეთ მემბრანაზე წონასწორული მემბრანული პოტენციალი, თუ ნატრიუმის გარე და შიდა კონცენტრაცია უჯრედში არის 1) 1/1 2) 10/1 3) 100/1.

მოც:

$$\frac{c_{\text{შ}}}{c_{\text{გ}}} = 1:1, \quad 10:1, \quad 100:1$$

უ. 3. $\Delta\varphi$

ამოხსნა:

ნერსტის ფორმულის თანახმად წონასწორული მემბრანული პოტენციალი $\Delta\varphi$

ტოლია

$$\Delta\varphi = \frac{RT}{ZF} \ln \frac{c_0}{c_t},$$

სადაც – c_0 და c_t მოცემული იონის კონცენტრაციებია მემბრანის გარეთ და შიგნით შესაბამისად.

F - ფარადეის მუდმივაა,

Z - იონის ვალენტობა ელექტრონის მუხტის ერთეულში.

წონასწორული მემბრანული პოტენციალი

$$\Delta\varphi = \frac{8{,}31\times 293}{}\lg\frac{c_0}{c_e}$$

$\Delta\varphi = 58\lg\frac{c_0}{c_i}$ მვ, ამრიგად

თუ უჯრედში Na^+ კონცენტრაციათა ფარდობა:

1) 1/1 , $\Delta\varphi = 58\lg 1 = 0$ 0

2) 10/1, $\Delta\varphi = 58\lg 10 = 58$ მვ. 67,3მვ

3) 100/1, $\Delta\varphi = 58\lg 100 = 2\times 58 = 116$მვ. 134,7მვ

ამოცანა 1.3. (Ремизов А. Н. –3.44)

კიბორჩხალის კიდურების ნერვის მოსვენების პოტენციალი ტოლია 89მვ. რის ტოლია კალიუმის იონების კონცენტრაცია ნერვის შიგნით, თუ გარეთ ის ტოლია 12 მმოლის. ტემპერატურა უდრის 20^0C.

მოც: $\Delta\phi = 89$მვ$=89\cdot 10^{-3}$ვ

$c_0 = 12$მმოლი$=12\cdot 10^{-3}$მოლი

უ. 3. c_i

ამოხსნა:

როგორც ამოცანა (4.2) ვნახეთ, ამ პირობებში

$$\Delta\varphi = 58\lg\frac{c_0}{c_i} \quad (1)$$

სადაც c_0 – კალიუმის იონების კონცენტრაცია ნერვის გარეთ, $c_ι$ – ნერვის შიგნით.

(1) – დან

$$\frac{\Delta\varphi}{58} = \lg\frac{c_0}{c\iota}$$

$10^{\frac{\Delta\varphi}{58}} = \frac{c_0}{c_ι}$; $c_ι = \frac{c_0}{10^{\frac{\Delta\varphi}{58}}} = \frac{12\times10^{-3}}{10^{58^{\frac{89}{}}}} = \frac{12\times10^{-3}}{\sqrt[3]{100}} = \frac{12}{4{,}5}\times10^{-3} = 2{,}75\times10^{-3}.$=275მმოლი.

ამოცანა № 3.5 (Ремизов А. Н. – 3.2)

იპოვეთ გადახრის საშუალო მნიშვნელობა ფორმამიდინის მოლეკულის წყალში და სახაროზის ხსნარში 1 წუთის განმავლობაში, თუ დიფუზიის კოეფიციენტები ამ ნივთიერების წყალში და ხსნარში ტოლია შესაბამისად $1{,}6\times 10$ და $0{,}3\times 10$წმ-ის.

პასუხი: 4,4 მ/წმ^2

ამოცანა № 3.6 (Ремизов А. Н. – 3.29)

გაიგეთ დიფუზიის კოეფიციენტი პლაზმატიკური მემბრანა Mycoplasma ფორმამიდისათვის, თუ ამ ნივთიერების კონცენტრაციის სხვაობა მემბრანის შიგნით და გარეთ ტოლია 0.5 10^{-4}-მოლი. ხოლო მემბრანაში გამავალი ნაკადი ტოლია 8 10^{-4} Mსმ/წმ.

პასუხი: 2,4 სმ^2/წმ.

ამოცანა № 3.7 (Ремизов А. Н. – 3.30)

მემბრანა-ელექტროლიტის საზღვარზე ორმაგი ფენის სისქე ხასიათდება დებაის რადიუსით δ. გაიგეთ δ შემთხვევისათვის, როცა ელექ-

ტროლიტის ხსნარში არის მარტო კალციუმის იონები კონცენტრაციით: 1) 10^{-5} M, 2) 10^{-2}. M.

პასუხი: 8 10^{-6} სმ^2/წმ.

ამოცანა № 3.8 (Ремизов А. Н. – 3.43)

განსაზღვრეთ კალმარის მოსვენების პოტენციალი, თუ ცნობილია, რომ ნატრიუმის იონების კონცენტრაცია გარედან ტოლია 440 მმოლის, ხოლო შიგნით 49 მმოლის. (ტემპერატურა უდრის 20^0C).

პასუხი: 134,7 მვ.

ელექტროდინამიკა. ელექტრონიკა.

ველი მატერიის არსებობის ერთ-ერთი ფორმაა. უძრავი მუხტი ქმნის ელექტრულ ველს. ელექტრული ველი 2 სიდიდით ხასიათდება: დაძაბულობა- ელექტრული ველის ძალური მაჩვენებელია, პოტენციალი- ენერგეტიკული.

დიპოლი ეწოდება 2 ℓ მანძილით დაშორებულ, ტოლ და საწინააღმდეგო

ნიშნის მქონე წერტილოვან მუხტთა სისტემას. დიპოლი თვითონ არის ელექტრული ველის წყარო. დიპოლზე მაბრუნებელი მომენტის მოქმედება და მისი გადაადგილება სწორედ მისი და გარეშე მაგნიტური ველის ურთიერთქმედებითაა გამოწვეული.

ცოცხალი ქსოვილები ელექტრული პოტენციალების- ბიოპოტენციალების წყაროა. ორგანიზმში მიმდინარე ფიზიკურ-ქიმიური პრიცესების დროს მუხტების სივრცული განაწილება იცვლება. ეს იწვევს შესაბამისი ორგანოს ან სისტემის ბიოპოტენციალების შეცვლას. ქსოვილთა და ბიოპოტენციალების რეგისტრაციას ელექტროგრაფიას უწოდებენ. გულის კუნთის აგზნებით გამოწვეულ ბიოპოტენციალთა ცვლილების რეგის-

ტრაციის მეთოდს ელექტროკარდიოგრაფიას უწოდებენ, ხოლო თავის ტვინის ნეირონების ბიოპოტენციალთა ცვლილების რეგისტრაციას ელექტროენცეფალოგრაფიის მეთოდი. გულის წარმოდგენას დიპოლის სახით საფუძვლად უდევს ეინდჰოვენის თეორია. ამ თეორიის თანახმად, გული დენური დიპოლია, რომლის დიპოლური მომენტი მუშაობის ერთი ციკლის განმავლობაში შემობრუნდება, იცვლის თავის მდებარეობას და სიდიდეს. ბიოპოტენციალთა სხვაობა ისაზღვრება იმ წარმოსახვით ტოლგვერდა სამკუთხედის წვეროებს შორის, რომელიც ადამიანის ფრონტალურ სიბრტყეშია მოთავსებული. სამკუთხა წვეროები განლაგებულია ხელებზე და მარცხენა ფეხზე, გული კი მდებარეობს სამკუთხედის ცენტრში. სამკუთხედის წვეროებს შორის ბიოპოტენციალთა გაზომვის საფუძველზე შესაძლებელია სამკუთხედის გვერდებზე გულის ელექტრული ვექტორის პროექციების თანაფარდობის განსაზღვრა. შესაბამისად კარდიოგრამა არის მრუდი, რომელიც გამოხატავს ეინდჰოვენის სამკუთხედის წვეროებს შორის პოტენციალთა სხვაობას დროში.

დიპოლის ელექტრული (დიპოლური) მომენტი

$$p = ql \quad (5.1)$$

სადაც q – ელექტრული მუხტია, l – მუხტებს შორის მანძილი.

ძალის მომენტი, რომელიც მოქმედებს დიპოლზე ელექტრულ ველში.

$$M = p\,E \sin\alpha \quad (5.2)$$

სადაც α – არის კუთხე დიპოლის ელექტრულ მომენტსა და დძაბულობას შორის

ძალის პროექცია, რომელიც მოქმედებს დიპოლზე არაერთგვაროვან ელექტრულ ველში, 0X ღერძის გასწვრივ

$$F_x = p_x \frac{dE_x}{dx} \quad (5.3)$$

სადაც p_x, E_x - არის p და E -ს პროექციები $0X$ ღერძზე

ელექტრული ველის პოტენციალი შექმნილი დიპოლის მიერ რაღაც r მანძილზე A წერტილში

$$\varphi = \frac{1}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0}\frac{p}{r^2}\cos\alpha \qquad (5.4)$$

სადაც α –არის კუთხე p-სა და A წერტილის მიმართულებას შორის, ε - გარემოს დიელექტრიკული შეღწევადობა, ε_0 – ელექტრული მუდმივა

ორი წერტილის პოტენციალთა სხვაობა, რომლებიც დიპოლიდან – ველის წყაროდან თანაბრადაა დაშორებული

$$\varphi_B - \varphi_A = \frac{\sin(\frac{y}{2})}{2\pi r_i \varepsilon_0 r^2} p\cos\beta \qquad (5.5)$$

სადაც γ -არის კუთხე, საიდანაც ჩანს A და B წერტილები დიპოლიდან, β -არის p და AB წრფეს შორის კუთხე.

პოლარიზება

$$\mathrm{p} = \varepsilon_0\ (\varepsilon_r - 1)\mathrm{E} \quad (5.6)$$

დამუხტული კონდენსატორის ენერგია

$$E_{ელ} = \frac{q\times U}{2} = \frac{q^2}{2\times C} = \frac{C\times U^2}{2} \qquad (5,7)$$

ელექტრული ველის ენერგიის მოცულობითი სიმკვრივე

$$\omega_{ელ} = \frac{\varepsilon_r\varepsilon_0 E^2}{2} \qquad (5.8)$$

დენის სიმკვრივე

$$j = qn\upsilon \qquad (5.9)$$

სადაც q და n დენის მატარებელი მუხტი და კონცენტრაციაა. υ – მათი მოძრაობის საშუალო სიქარე.

დენის სიმკვრივე ელექტროლიტებში

$j=qn(b_+ + b_-)E$ (5.9.1)

სადაც b_+ და b_- შესაბამისი ნიშნების იონების ძვრადობაა, E– ელექ-ტრული ველის დაძაბულობა.

ამოცანების ამოხსნა

ამოცანა 4.0 (Ремизов А. Н. –4.1)

ურედის შიდა ნაწილსა და გარე ხსნარს შორის არსებული პოტენციალთა სხვაობა (უძრაობის მემბრანული პოტენციალი) ტოლია $\Delta\varphi$ =80მვ. ჩავთვალოთ, რომ ელექტრული ველი მემბრანის შიგნით ერთგვაროვანია და განვსაზღვროთ ამ ველის დაძაბულობა, თუ ჩავთვლით, რომ მემბრანის სისქე 8 ნმ-ია.

მოც: . $\Delta\varphi$=80მვ=810^{-2}ვ

d =8ნმ

უ. ვ. $|\vec{E}|$

ამოხსნა:

ელექტრული ველის დაძაბულობა

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{\varepsilon q}, (1)$$

სადაც $|\vec{F}| = |\vec{E}|\varepsilon q$ (2)

ამოცანა 7.29 {R. Chang}

ხეები მკაცრი ზამთრის პირობებში უძლებენ $-60^0 C$ ტემპერატურასაც კი. განსაზღვრეთ ხეში არსებული წყალხსნარების კონცენტრაცია, რომელიც არ იყინება ამ ტემპერატურაზეც. არის თუ არა ეს შესაძლებელი?

ამოცანა 7.33 {R. Chang}

ავტომობილის რადიატორისათვის "ანტიფრიზს" ამზადებენ ეთილენ გლიკო-ლისაგან, $CH_2\{OH\}CH_2\{OH\}$. ამ ნივთიერების რამდენი მილილიტრი უნდა დაუმატოთ 6,5ლ. წყალს, რომ წყალი რადიატორში არ გაიყინოს $-20^0 C$.

ამოცანა 7.35 {R. Chang}

ყველაზე უფრო მაღალ ხეებს, როგორც ცნობილია, წარმოადგენენ კალიფორ-ნიაში საკვოია. ჩათვალეთ რომ საკვოიას სიმაღლე დაახლოებით 105მ. დაადგინეთ ოსმოსური წნევის ის მნიშვნელობა, რომელიც აუცილებელია რათა წყალმა მიაღწიოს ხის კენწეროს.

ამოცანა 7.39 {R. Chang}

ქათმის კვერცხის ცილისაგან გამოყოფილი ლიზოციმის მოლური მასა $13930 \frac{\text{გ}}{\text{მოლი}}$ ტოლია. ამ ცილის 0,1გრ. გახსნეს 50გრ. წყალში $298^0 K$ ტემპერატურაზე. განსაზღვრეთ წყლის ორთქლის წნევის შემცირება, გაყინვის ტემპერატურის შემცირება, დუღილის ტემპერატურის გაზრდა და ამ ხსნარის ოსმოსური წნევა. სუფთა წყლის ორთქლის წნევა $298^0 K$ ტემპერატურაზედ ტოლია 23,76მმ.ვრც.წყ.სვ.

ამოცანა 7.43 {R. Chang}

საბაჟოს ქიმიკოსს გადასცეს თეთრი ფერის ფხვნილი ანალიზისათვის. მან ამ ნივთიერების 0,5გრ. გახსნა 8,0გრ. ბენზინში. ხსნარი გაიყინა $3,9^0 C$ –ზე. შეუძლია თუ არა ქიმიკოსს დაასკვნას, რომ ფხვნილი წარმოადგენს კოკაინს $C_{17}H_{21}NO_4$?

რა დასკვნის გაკეთება შეიძლება ანალიზის შედეგების მიხედვით? სუფთა ბენზინის გაყინვის ტემპერატურაა $-5,5^0 C$.

ამოცანა 7.6 {R. Chang}

განზავებულ წყალხსნარებში,რომლის სიმკრივე მიახლოებით ტოლია სუფთა გამხსნელისა, მოლარობა ტოლია მოლალობისა. აჩვენეთ, რომ ეს მტკიცება სამართლიანია 0,010 M შარდოვანას წყალხსნარისათვის $[(NH_2)_2C)]$.

ამოცანა 7.7 {R. Chang}

დიაბეტურ პაციენტებში შაქრის (გლუკოზის) რაოდენობა დაახლოებით 0,140გ გლუკოზა/100მლ. სისხლში. ყოველდღიურად პაციენტი იღებს 40გ. გლუკოზას, რის შედეგად გლუკოზის დონე სისხლში იწევს დაახლოებით 0,240გ/100მლ.-მდე. გაიანგარიშეთ გლუკოზის მოლების რიცხვი მი-

ლილიტრებში სისხლში და მოლების საერთო რიცხვი და გლუკოზის რაოდენობა გრამებში გლუკოზის მიღებამდის და მიღების შემდეგ. (ჩათვალეთ, რომ სისხლის საერთო მოცულობა ორგანიზმში დაახლოებით 5,0ლ.)

ამოცანა 7.5 {R. Chang}

გადაიყვანეთ 0,25მოლი/კგ საქაროზის ხსნარის კონცენტრაცია წონით პროცენ-ტებში. ხსნარის სიმკრივე $d = 1{,}2\frac{\text{გ}}{\text{სმ}^3}$.

ამოცანა 3.12 (В. Уильямс, Х. Уильямс)

100გრ. ბენზოლს დაუმატეს 2გრ. უცნობი ნივთიერება, ამის შედეგად ბენზოლის ორთქლის წნევა შემცირდა 1მმ.ვრც.სვ. რის ტოლია ნივთიერების მოლეკულური მასა, თუ 20^0C ტემპერატურაზე სუფთა ბენზოლის ორთქლის წნევა ტოლია 76,5მმ.ვრც.სვ?

მოც:

$\omega_1 = 100$გ.
$\omega_2 = 2$გ.
$\Delta P = P_0 - P = 1$მმ.ვრც.სვ.
$t = 20^0C$
$P_0 = 76{,}5$მმ.ვრც.სვ.
$M_1 = 78$

უ.ვ. $M_2 - ?$

ამოხსნა:

$\frac{P_0 - P}{P_0} = \frac{mM_1}{1000}$ რაულის კანონი

$m = \frac{1000 \cdot \Delta P}{P_0 M_1} = \frac{1000 \cdot \omega_2}{\omega_1 M_2}$ მოლალობის განმარტების თანახმად

$$M_1 = C_6H_6 = 78$$

$$M_2 = \frac{P_0\omega_2 M_1}{\omega_1 \Delta P} = \frac{2 \cdot 76{,}6 \cdot 78}{100 \cdot 1} = \frac{76{,}5 \cdot 78}{50} = 119 \text{ დალტონი.}$$

ამოცანა 3.20 (В. Уильямс, Х. Уильямс)

75გ. ნივთიერება გახსნილია 1000გ. წყალში. ამ ხსნარის სიმკრივე 25^0C არის 1,02გ/სმ^3, ხოლო ოსმოსური წნევა 2,1ატმ. განსაზღვრეთ მოლეკულური წონა, გამოიყენეთ განტოლება $\Pi = \frac{n_2}{V}RT$, სადაც V ხსნარის მოცულობაა.

მოც:

$\omega_2 = 75\text{გ} = 75 \cdot 10^{-3}$ კგ
$\omega_1 = 1000\text{გ} = 1$კგ
$t = 25^0C \qquad T = 298^0K$
$\rho = 1{,}02 \frac{\text{გ}}{\text{სმ}^3} = 1{,}02 \cdot 10^{-3} \frac{\text{კგ}}{\text{მ}^3}$
$\Pi = 2{,}1$ატმ.
$R = 0{,}082$

უ. 3. M_x

ამოხსნა:

$$\Pi = n_2RT \qquad n_2 = \frac{\omega_2}{M_x}$$

ამიტომ $\Pi = \frac{\omega_2}{M_x V}RT \qquad V = \frac{m}{\rho}$

ამიტომ $\Pi = \frac{\omega_2 \rho}{\Pi m}RT$

$$M_x = \frac{\omega_2 \rho}{\Pi m} RT = \frac{\omega_2 RT}{\Pi V} = \frac{75 \cdot 10^{-3} \cdot 10^{-3} 0{,}082 \cdot 298}{2{,}1 \cdot 1054 \cdot 10^{-3}} = \frac{1832{,}76 \cdot 10^3}{2213{,}4} = 0{,}828 \cdot 10^3 = 828M$$

ამოცანა 3.5 (В. Уильямс, Х. Уильямс)

განსაზღვრეთ 100გ. წყალში გახსნილი 1000გ. გლუკოზის ხსნარის წნევა $20^0 C$ ტერმპერატურაზე, თუ ჩავთვლით რომ გლუკოზა და წყალი ქმნიან იდეა-ლურ ხსნარს. ამ ტემპერატურაზე წყლის ორთქლის წნევა $P_0 = 17{,}53$მმ.ვრც.სვ.

მოც:

$\omega_1 = 100$გ.
$\omega_2 = 1{,}000$გ.
$M_{\text{გლუკ}} = 180{,}16$
$P_0 = 17{,}535$მმ.ვრც.სვ.

უ.ვ. $P - ?$

რაულის კანონის თანახმად

$$\frac{P_0 - P}{P_0} = \frac{\omega_2 M_1}{\omega_1 M_2} \qquad M_2 = M_{\text{გლუკ}} = 180{,}16$$

$$P_0 - P = \frac{P_0 \omega_2 M_1}{\omega_1 M_2} \qquad P = P_0 - \frac{P_0 \omega_2 M_1}{\omega_1 M_2}$$

$$P = 17{,}517 - \frac{17{,}517 \cdot 1 \cdot 18}{100 \cdot 180{,}16} = 17{,}517 - \frac{315{,}306}{18016} = 17{,}517 - 0{,}0175 = 17{,}499$$

ამოცანა 3.4 (В. Уильямс, Х. Уильямс)

სისხლი იყინება – $0{,}560^0 C$. რის ტოლია შრატში გახსნილი ნივთიერების ეფექტური მოლალული კონცენტრაცია? ამ კონცენტრაციის მიმართ

განსაზ-ღვრეთ რის ტოლია შრატში ოსმოსური წნევა 37^0C ფიზიოლოგიურ ტემპერატურაზე?

მოც:

$\Delta T = -0,560^0C$
$t = 37^0C$
$T = 310^0K$

უ.ვ. $m_{ეფექტ}$

Π

ამოხსნა:

$\Delta T = K_k m$ $K_k = 1.86$

სადაც K_k წყლის კრიოსკოპული მუდმივაა

$$m = \frac{\Delta T}{K_k} = \frac{-0,560}{-1,86} = 0,3m$$

$\Pi = CRT$ $\Pi = 0,3 \cdot 1,986 \cdot 310 = 184,79$მმ.ვრც.სვ.

ამოცანა 3.16 (В. Уильямс, Х. Уильямс)

ზოგიერთ პროტოპლასტებში სითხის ოსმოსური წნევა 5ატმ. რის ტოლია საქაროზის წყალხსნარის მოლალული კონცენტრაცია 30^0C-ზე, თუ ის არის იზოოსმოსური ამ უჯრედების მიმართ?

ამოცანა 3.9 (В. Уильямс, Х. Уильямс)

საქაროზის $C_{12}H_{22}O_4$ წყალხსნარი დამზადებულია 34,6გ. შაქრის გახსნით 1000გ. წყალში

განსაზღვრეთ ხსნარის ორთქლის წნევა 20^0C.

ამოცანა 3.13 (В. Уильямс, Х. Уильямс)

განსაზღვრეთ წყალხსნარის გაყინვის ტემპერატურა, თუ იგი დამზადებულია 50,0გ. ეთილენგლიკოლის გახსნით 500გ. წყალში. ეთილენგლუკოლის $M_{ეთ}$=62,07.

ამოცანა 3.22 (В. Уильямс, Х. Уильямс)

150გ. წყალში გახსნეს 5გ. ნივთიერება A, ამის შედეგად ხსნარის დუღილის ტემპერატურა გაიზარდა 0,01-ით. რის ტოლია A ნივთიერების მოლეკულური წონა? წყლის ებულოსკოპური მუდმივა $K_ე$=0,514 გრად/მოლი.

მაგნიტური ველი.

დამუხტული ნაწილაკების მოძრაობა

ელექტრულ და მაგნიტურ ველში

მაგნიტური ველის წყაროს წარმოადგენს მოძრავი ელექტრული მუხტი. თუ ელექტრული მუხტი უძრავია, ის თავის ირგვლივ ქმნის ელექტროსტატიკურ ველს, მაგრამ თუ მუხტი ამოძრავდა ელექტრულ ველთან ერთად იგი წარმოქმნის მაგნიტურ ველს. მაგნიტური ველის ძალურ მახასიათებლად მიღებულია მაგნიტური ინდუქციის ვექტორი.

მაგნიტურ ველს დიდი გამოყენება აქვს მედიცინაში. ადამიანის გულს გააჩნია მაგნიტური ველი. ამ ველის დაძაბულობა (მაგნიტური ინდუქცია) შეიძლება გავზომოთ მაგნიტოგრაფიის მეთოდით. მაგნიტოგრამა ელექტროკარდიოგრამის მსგავსია. მაგნიტოგრაფია არაკონტაქტური მეთოდია. ველის გაზომვა შეიძლება საკონტაქტო ელექტროდების გარეშე, ობიექტიდან გარკვეულ მანძილზე. სადიაგნოსტიკო მიზნებისათვის გამოიყენება ზკიგ- მაგნიტომეტრები, რომლებსაც საფუძვლად უდევს ზეგამტარობის მოვლენა. ზეგამტარებს იყენებენ ძლიერი მაგნიტური ველის მისაღებად. ასეთი დიდი დაძაბულობის ველს იყენებენ ბმრ-ტომოგრაფიაში.

მაგნიტურ ველის დაძაბულობასა და მაგნიტური ინდუქციას შორის ერთგვაროვან გარემოში კავშირი შემდეგია

$$B = H \mu_r \mu_0 \qquad (5.11)$$

სადაც μ_0 – მაგნიტური მუდმივაა, μ_r – მაგნიტური შეღწევადობაა.

ბიო-სავარ-ლაპლასის კანონი

$$\Delta H = \frac{I \times dl \times \sin\alpha}{4\pi \times r^2} \qquad (5.12)$$

სადაც dH – მაგნიტური ველის დაძაბულობის ვექტორია, რომელსაც ქმნის – Idl დენის ელემენტი, r - რადიუს-ვექტორია.

მაგნიტური ველის დაძაბულობა, რომელსაც ქმნის დენიანი გამტარის წრფივი მონაკვეთი

$$H = \frac{1}{4\pi b}(\sin\alpha_1 + \sin\alpha_2) \qquad (5.13)$$

სადაც b-გამტარის ღერძიდან A-წერტილამდე მანძილია

მაგნიტური ველის დაძაბულობა წრიული დენის ცენტრში, რომლის რადიუსია r.

$$\mathrm{H} = \frac{I}{2r} \qquad (5.14)$$

მაგნიტური ველის დაძაბულობა, რომელსაც ქმნის წრფივი უსასრულოდ გრძელი დენიანი გამტარი

$$H = \frac{I}{2\pi b} \qquad (5.15)$$

სადაც b –არის მანძილი გამტარის ღერძიდან A წერტილამდე.

მაგნიტური ველის დაძაბულობა სოლენოიდის ცენტრში

$$H = \frac{I \times N}{\ell} \qquad (5.16)$$

სადაც N– ხვიების რიცხვია, ℓ – სოლენოიდის სიგრძე.

ძალა, რომელიც მოქმედებს $Id\ell$ დენის ელემენტზე მაგნიტურ ველში B ინდუქციით. (ამპერის კანონი)

$$dF = I \times B \times d\ell \sin\beta \quad (5.17)$$

სადაც β -არის კუთხე **B** და $d\ell -$ ს შორის

ინდუქციის ე.მ.ძ, რომელიც წარმოიშობა შეკრულ კონტურში

$$\xi_i = -\frac{d\Phi}{dt} \qquad (5.18)$$

ინდუქციური დენის ძალა კონტურში $R-$ წინაღობით

$$I = \frac{1}{R}\frac{d\Phi}{dt} \qquad (5.19)$$

სადაც R - წინაღობაა

ინდუქციური ელექტრობის რაოდენობა კონტურში $R-$ წინაღობით

$$q = \frac{\Delta\Phi}{R} \qquad (5.20)$$

სადაც $\Delta\Phi$ – ნაკადის ცვლილებაა

თვითინდუქციის ე.მ.ძ, წარმოშობილი ჩაკეტილ კონტურში დენის ძალის ცვლილებისას

$$\xi = -M\frac{dI}{dt} \qquad (5.21)$$

სადაც M- ინდუქტივობაა, $\frac{dI}{dt}$ -დენის ძალის სიჩქარის ცვლილება მეზობელ კონტურში

თვითინდუკციის ე.მ.ძ, რომელიც წარმოიშობა დენის ძალის ცვლილებისას ჩაკეტილ კონტურში

$$\xi_r = -L\frac{dI}{dt} \qquad (5.22)$$

სადაც – L -კონტურის ინდუქტიურობაა

სოლენოიდის ინდუქტიურობა

$$L = \mu_0\mu_r N^2 S/\ell \qquad (5.23)$$

სადაც N – ხვიების საერთო რაოდენობა, ℓ - სოლენოიდის სიგრძე, S კვეთის ფართობი.

დენის მაგნიტური ველის ენერგია

$$E = \frac{LI^2}{2} \qquad (5.24)$$

მაგნიტური ველის ენერგიის მოცულობითი სიმკვრივე

$$\omega_მ = \frac{1}{2}BH = \frac{1}{2}\frac{B^2}{\mu_0\mu_r} = \frac{\mu_0\mu_r H^2}{2} \qquad (5.25)$$

ლორენცის ძალა

$$f_ლ = q\upsilon B\sin\beta \qquad (5.26)$$

სადაც β-კუთხეა ნაწილაკის მოძრაობის v- სიჩქარესა და B– ინდუქციას შორის.

ლორენცის ძალა ვექტორულად.

$$\overrightarrow{f_ლ} = q\vec{\upsilon}\times\vec{B} \quad (5.27)$$

მარეზულტირებელი ძალა, რომელიც მოქმედებს მოძრავ დამუხტულ ნაწილაკზე ერთდროულად, როგორც ელექტრული, ასევე მაგნიტური ველიდან

$$\overrightarrow{f_{ემ}} = \overrightarrow{f_ე} + \overrightarrow{f_მ} = \overrightarrow{qE + q\vec{\upsilon}\times\vec{B}} \quad (5.28)$$

ამოცანა 6.0 (Ремизов – 4.57)

ერთგვაროვან მაგნიტურ ველში თავისუფლად T = 10წმ. პერიოდით ირხევა ჩარჩო I = 0.1ა. დენით. ჩარჩოს ფართობია S = 10 სმ^2, ინერციის მომენტი უდრის I =2 10^{-3} კგმ^2. განსაზღვრეთ ველის მაგნიტური ინდუქცია.

მოც: . $T = 10$წმ.

$I = 0.1$ა.

$S = 10$სმ^2

$I_{inerc.} = 2 \times 10^{-3}$ კგ/სმ^2.

უ. 3. B

ამოხსნა:

დენიან ჩარჩოზე ერთგვაროვან მაგნიტურ ველში მოქმედებს ბრუნვითი მომენტი

$M = p_m B$, მდგრადი წონასწორული მდგომარეობისას

$p_m \uparrow\uparrow B$ და $M = 0$

ჩარჩოს მცირე თავისუფალი რხევები განხორციელდება მდგრადი წონასწორული მდგომარეობის მახლობლად. ჩავწეროთ ნიუტონის II კანონი ჩარჩოსათვის:

$$I\frac{d^2\varphi}{dt^2} = -p_m \times B_\varphi \quad \text{ან} \quad \frac{d^2\varphi}{dt^2} + \frac{p_m B}{I}\varphi = 0$$

ამ განტოლების ამონახსნი იქნება:

$\varphi = \varphi_0 \cos\omega t$, სადაც $\omega = \sqrt{\frac{p_m B}{I}} = \sqrt{\frac{ISB}{T}} = \frac{2\pi}{T}$, აქედან

$$B = \frac{4\pi^2 I}{T^2 IS} = 8 \text{ ტლ.}$$

ამოცანა 6.1. (Ремизов – 4.60)

კვადრატული ჩარჩო $\ell - 10$სმ. გვერდით მოთავსებულია მაგნიტურ ველში ისე, რომ ჩარჩოს სიბრტყე ქმნის $\alpha = 30^0$-ან კუთხეს ველის ინდუქციის მიმართულებასთან, რომელიც იცვლება კანონით $B = 0.1\sin\pi t$. განსაზღვრეთ კანონი, რომლითაც იცვლება ე.მ.ძ ჩარჩოში და იპოვეთ ე.მ.ძ $t =$ 4წმ. მომენტში.

მოც: . $\ell = 10$**სმ**.

$B = 0.1\sin \pi t$

$t = 4$წმ.

უ. 3. ξ

ამოხსნა:

ჩარჩოზე გამავალი მაგნიტური ნაკადი

$$\Phi = B\ell^2 \cos(90^0 - \alpha) = 0.1 \times \ell^2 \times \cos(90^0 - \alpha)\sin \pi t$$

ე.მ.ძ ჩარჩოში იცვლება კანონით

$$\xi = \frac{d\Phi}{dt} = 0.1 \times \pi \times \ell^2 \cos(90^0 - \alpha)\cos \pi t = 15{,}7^{-4} \times \cos \pi t$$

t = 4წმ. მომენტში ჩარჩოს ე.მ.ძ ტოლია

$\xi = 15{,}7 \times 10^{-4}$ ვ.

ამოცანა 6.1. (Ремизов – 4.78)

გრძელ წრფივ გამტარში მიედინება დენი I=3ა. განსაზღვრეთ, როგორი მანძილით მცირდება მაგნიტური ველის ენერგიის სიმკვრივე პირდაპირი დენისაგან. იპოვეთ მაგნიტური ველის ენერგიის სიმკრივე b=5სმ. მანძილზე პირდაპირი დენისაგან. გარემო-ჰაერი.

მოც: . $I = 3$ **ა.**

$b = 5$ სმ.

უ. 3. $\omega_{\text{მაქს}}$

ამოხსნა:

მაგნიტური ველის ენერგიის სიმკრივე

$$\omega_{მაქს} = \mu_\nu \mu_0 \frac{H^2}{2}$$

პირდაპირი დენისათვის

$H = \frac{I}{2\pi b}$, სადაც b -მანძილია დენიდან

მაშინ $\omega_{მაქს} = \frac{\mu_r \mu_0 I^2}{8\pi^2 x^2}$, ე.ი. მაგნიტური ენერგიის სიმკრივე მცირდება დენიდან მანძილის კვადრატის პროპორციულად. x = r მანძილზე, ე. ი.

როცა r = 5 სმ. მაშინ

$\omega_{მაქს} = 1.1 \times 10^{-4}$ ჯ/მ^3

ამოცანა 6.3 (Ремизов – 4.81)

ელექტრონი, რომელიც გადის $U =$ 300ვ. პოტენციალთა სხვაობაში, შეფრინდება მაგნიტურ ველში დაძაბულობით $H =$810^{3}ა/მ ინდუქციური ველის პერპენ-დიკულარულად. განსაზღვრეთ მისი ტრაექტორიის რადიუსი.

მოც: . $U = 300$ვ.

$H = 8 \times 10^3$ ა/მ.

უ. 3. r

ამოხსნა:

ელექტრონი რომელიც გაივლის პოტენციალთა სხვაობას –ს, შეიძენს კინეტიკურ ენერგიას $\frac{m\upsilon^2}{2} = e \times U$, საიდანაც $\upsilon = \frac{\sqrt{2U_e}}{m}$

მაგნიტურ ველში ელექტრონზე მოქმედებს ლორენცის ძალა

$I_{\text{ლორენც}} = e\upsilon B = e\upsilon\mu_0 H$, რომელიც გამოიწვევს ცენტრისკენულ აჩქარებას და ნიუტონის II კანონის თანახმად

$$e\upsilon\mu_0 H = \frac{m\upsilon^2}{r}, \text{ ან}$$

$$r = \frac{1}{\mu_0 H} \times \sqrt{\frac{2U}{\frac{e}{m}}} = 5{,}8\,\text{მმ}.$$

ამოცანა 6.4 (Ремизов – 4.82)

ერთგვაროვან მაგნიტურ ველში ინდუქციით $B = 0.1$ტლ. მოძრაობს პროტონი. მისი მოძრაობის ტრაექტორია არის ხრახნული, რადიუსით $r = 30$სმ. და ბიჯით $h = 20$სმ. განსაზღვრეთ პროტონის ენერგია. მისი მასა $m = 1.67\times10^{-27}$კგ.

მოც: . $B = 0.1$ტლ.

$r = 30$სმ.

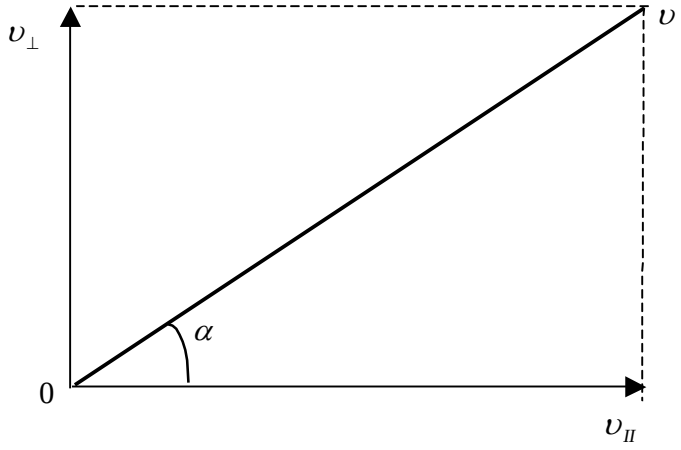
$h = 20$სმ.

$m = 1.67\times10^{-27}$კგ

უ. 3. $E_{\text{კინეტ}}$

ამოხსნა:

პროტონი მაგნიტურ ველში შეფრინდება v – სიჩქარით, რომელიც B– ინდუქციის ვექტორთან ქმნის α – კუთხეს.



ნახაზი 5.

ნახაზიდან ჩანს, რომ

$\upsilon_\perp = \upsilon \sin\alpha$

$\upsilon_{II} = \upsilon \cos\alpha$

$\upsilon_\perp qB = m \times \upsilon^2{}_\perp / r$, აქედან

$\upsilon_\perp = Brq/m$, ხრახნული ხაზის ბიჯი $h = \upsilon_{II} T$, სადაც T არის პროტონის შემოწერის პერიოდი და ის უდრის

$T = \dfrac{2\pi r}{\upsilon_\perp}$, მაშინ $h = \dfrac{\upsilon_{II}}{\upsilon_\perp} 2\pi r = \upsilon_{II} \dfrac{2\pi}{Bq/m}$, აქედან

$$\upsilon_{II} = \frac{hB}{2\pi}\frac{q}{m}$$

$$\upsilon^2 = \upsilon^2{}_{II} + \upsilon^2{}_\perp = B^2 (\frac{q}{m})^2 [\frac{h^2}{4\pi^2} + r^2]$$

თუ υ- გამოვთლით , ვიპოვით

$E_{\text{კინეტ}} = \dfrac{m\upsilon^2}{2} = 7 \times 10^{-15}$ ჯ.

ამოცანა 6.5 (Ремизов – 4.2)

ბიოლოგიურ მემბრანათა სტრუქტურის და ფუნქციის შესასწავლად იყენებენ მოდელს – ხელოვნურ ფოსფოლიპიდურ მემბრანებს, რომლებიც შედგებიან ფოსფოლიპიდების ბიომოლეკულური ფენისაგან. ხელოვნური მემბრანის სისქე ტოლია L=6მმ-სა. გაიგეთ 1სმ² ასეთი მემბრანის ელექტროტევადობა. მისი ფარდობითი დიელექტრიკული შეღწევადობა ε=3.

პასუხი: C/S= εε/L ,მაშინ

მემბრანისათვის მივიღებთ

0,44მკფარადი/სმ²

ამოცანა 6.6 (Ремизов – 4.19)

განსაზღვრეთ ადამიანის სხეულის ელექტროტევადობა, თუ ჩავთვლით მას

ტოლს ელექტროგამტარის ბურთის მოცულობის ტოლად. სხეულის საშუალო სიმკვრივე მივიღოთ ტოლად ρ=1გრ/სმ. ადამიანის მასა m=60კგ.

პასუხი: $C = 4\pi\varepsilon R =$

$= 4\pi\varepsilon^3\sqrt{3m/4\pi\rho} = 9$პფარადი.

ამოცანა 6.7 (Ремизов – 4.40)

$\ell = 40$სმ გამტარისაგან გაკეთებულია კვადრატული ჩარჩო, რომელშიც მიედინება დენი I = 10ა. გაიგეთ დაძაბულობა და მაგნიტური ველის ინდუქცია ამ ჩარჩოს ცენტრში. გარემოს ფარდობითი მაგნიტური შეღწევადობა $\mu = 2$.

პასუხი: H=90ა/მ.

ამოცანა № 6.7 (Ремизов А. Н. –4.45)

გამტარში მიედინება I=3.2.ა. დენი. რას უდრის მაგნიტური ველის ინდუქცია ნახევარწრის ცენტრში, რომლის რადიუსი ტოლია r=5სმ.

პასუხი: $D = \frac{I\mu_0}{4\pi} = 2 \cdot 10^{-5}$ ტლ.

ამოცანა 6.8 (Ремизов – 4.52)

გაიგეთ სოლენოიდის მაგნიტური მომენტი I = 0,3 ა. დენის დროს, თუ ხვიების რიცხვი N=500, ხვიების ფართობი S = 20სმ^2.

პასუხი: 0,3ამ^3.

ამოცანა № 6.9 (Ремизов А. Н. –4.62)

თვითმფრინავი, რომლის ფრთების გაშლა $\ell = 40მ$-ია მიფრინავს ჰორიზონ-ტალურად $\upsilon = 900კმ / სთ$. განსაზღვრეთ პოტენციალთა სხვაობა ფრთების ბოლოში, თუ დედამიწის მაგნიტური ველის დაძაბულობის ვერტიკალური მდგენელი H = 40ა/მ.

პასუხი: 5მნ/სმ

ამოცანა 6.10 (Ремизов – 4.53)

ბორის თეორიის თანახმად წყალბადის ატომში ელექტრონი მაძრაობს ბირთვის ირგვლივ წრეწირზე რადიუსით $r = 0,53 \times 10^{-8}$სმ. და $v = 2,2 \times 10^{8}$სმ/წმ. სიჩქარით. გაიგეთ წყალბადის ატომის მაგნიტური მომენტი, რომელიც გამოწვეულია ამ წრიული დენით.

პასუხი: $p_m = e\upsilon r/2 = 0,93 \times 10^{-25}$ ა·მ^2

ამოცანა № 6.11 (Ремизов А. Н. –4.72)

სოლენოიდში დენის ძალა იცვლება $I=10\,t-t^2$ კანონით. სოლენოიდის ინდუქტიურობა L=10ჰც. სოლენოიდში როგორი თვითინდუქციის ე.მ.ძ იქნება $\Delta t=2$წმ. შემდეგ.

პასუხი: 60ვ.

ამოცანა 6.12 (Ремизов – 4.74)

როგორია მაგნიტური ველის ენერგია კოჭაში, რომლის სიგრძეა $\ell = 50$სმ, გააჩნია $N=10^3$ ხვია d=20სმ. დიამეტრით, თუ მასში გადის I=2მა დენი? გაიგეთ ენერგიის მოცულობითი სიმკრივე?

პასუხი: $1{,}6\times10^{-7}$ჯ.

ამოცანა 6.13 (Ремизов – 4.75)

გაიგეთ მაგნიტური ველის ენერგია კოჭაში, თუ მისი სიგრძე $\ell = 50$სმ, განივკვეთის ფართობი $S=20$სმ^2, ხვიების რიცხვი N =1000.კოჭაში მიედინება დენი I=2ა. ასეთი დენის დროს რკინის გულანაში მაგნიტური შეღწევადობა არის $\mu = 150$.

პასუხი: 1,5ჯ.

ამოცანა 6.14 (Ремизов – 4.83)

ელექტრონი შეფრინდება ერთგვაროვან მაგნიტურ ველში B=0,1მტლ, ინდუქციით. ელექტრონი მოძრაობს ხრახნულ ტრაექტორიაზე $r=1{,}8\times10^{-2}$მ. რადიუსით და h=0,2მ. ბიჯით. გაიგეთ ელექტრონის სიჩქარე და მისი მიმართულება.

პასუხი: $\upsilon = B\dfrac{\mathrm{rB}}{\sin\alpha}\dfrac{\mathrm{e}}{\mathrm{m}} = 6{,}34 \quad 10^8$მ/წმ, $\quad \mathrm{tg}\alpha = \dfrac{2\pi\,\mathrm{r}}{\mathrm{h}}0{,}58,\ (\alpha = 30^0)$

ამოცანა 6.15 (Ремизов – 4.84)

ელექტრონი მოძრაობს წრეწირზე ერთგვაროვან მაგნიტურ ველში ინდუქციით B =0,18ტლ. გაიგეთ ელექტრონის შემოწერის პერიოდი.

პასუხი: $T = \frac{2\pi}{Be/m} = 2 \cdot 10^{-10}$წმ.

ოპტიკა. დიფრაქციული მოცლენები

დიფრაქციის მაქსიმუმის პირობა

$$a \sin\alpha = \pm (2k+1)\lambda/2 \ , \ (\alpha = 0) \qquad (6.1)$$

დიფრაქციის მინიმუმის პირობა

$$a \sin\alpha = \pm k\lambda \qquad (6.2)$$

სადაც ა – ხვრელის სიგანეა, k=1, 2, 3, -მაქსიმუმის ან მინიმუმის რიგითი ნომერი.

α - კუთხეა

დიფრაქციული მესერის ძირითადი ფორმულა

$$c \sin \alpha = \pm \kappa\lambda \quad (6.3)$$

სადაც $k = 1,2,3$ – ძირითადი მაქსიმუმების რიგი, c – დიფრაქციული მესერის მუდმივა.

კუთხური დისპერსია

$$D = \frac{d\alpha}{d\lambda} \qquad (6.4)$$

დიფრაქციული მესერის კუთხური დისპერსია

$$D = \frac{\kappa}{c\cos\alpha} \quad (6.5)$$

დიფრაქციული მესერის გარჩევისუნარიანობა

$$R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = \kappa N \quad (6.6)$$

სადაც $\Delta\lambda = (\lambda_1 \quad \lambda_2)$ – არის სხვადასხვა სიგრძისა და ტალღების სხვაობა, N - მესერის ხვრელების რიცხვი.

მთავარი მაქსიმუმების პირობა, როდესაც დიფრაქციულ მესერს ეცემა სინათლე დახრილად

$$c\,(\sin\beta - \sin\alpha) = \pm\kappa\lambda \qquad (6.7)$$

სადაც β – არის სხივის დაცემის კუთხე მესერზე.

მთავარი მაქსიმუმების პირობა, როდესაც ხდება კრისტალიდან რენტგენული სხივების არეკვლა (ვულფ- ბრეგის ფორმულა)

$$2\ell\sin\theta = \kappa\lambda \quad (6.8)$$

სადაც ℓ – სიბრტყეებსშორისი მანძილია, β - სრიალის კუთხე, k-1,2,3…

მიკროსკოპის გარჩევისუნარიანობის ზღვარი, როდესაც ობიექტზე სინათლე ეცემა დახრილად.

$$Z = 0.5\frac{\lambda}{n\sin(\frac{u}{2})} = 0.5\frac{\lambda}{A} \qquad (6.9)$$

სადაც λ – ტალღის სიგრძე ვაკუუმში, n- გარემოს გარდატეხის მაჩვენებელი, მოთავსებულს საგანსა და ობიექტივის ლინზას შორის, u- კუთხური აპერტურა,

$$A = n\sin(\frac{u}{2}) \text{ – რიცხვითი აპერტურა} \qquad (6.10)$$

ამოცანების ამოხსნა

ამოცანა 7.0 (Ремизов –5.6)

ინტერფერენციული სხივების სვლის ოპტიკური სხვაობა $\delta = 2.5$ მკმ. იპოვეთ ხილული დიაპაზონის (0.76-დან 0.4მკმ) ყველა ტალღის სიგრძე, რომლებიც ამ შემთხვევაში იძლევიან ინტერფერენციის მაქსიმუმს.

მოც: . $\delta = 2.5$მკმ.

0,76-0,4

უ. 3. $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$

ამოხსნა:

დავწეროთ ინტერფერენციის დროს სინათლის ინტენსივობის მაქსიმუმის პირობა:

$\delta = \kappa\lambda$, აქედან

$$\kappa = \frac{\delta}{\lambda},$$

სადაც $\kappa =$ არის მთელი რიცხვი, რომელიც აკმაყოფილებს პირობას

$$\frac{2.5}{0.4} \text{მკმ/მკმ} \geq \kappa \geq \frac{2.5}{0.76} \text{მკმ/მკმ}, \text{ ან}$$

$6.25 \geq \kappa \geq 3.29$, აქედან

$\kappa = 4,5,6$ და მაშინ

$$\lambda_1 = \frac{2.5}{4} = 0.625\text{მკმ}$$

$$\lambda_2 = \frac{2.5}{5} = 0.5 \text{ მკმ}$$

$$\lambda_3 = \frac{2.5}{6} = 0.4\text{მკმ}.$$

ამოცანა 7.1 (Ремизов –5.15)

2 კოჰერენტული სინათლის წყარო ($\lambda = 0.5$მკმ) გვაძლევს ეკრანზე ინტერფე-რენციულ სურათს. როგორ შეიცვლება ეს სურათი, თუ ერთ-ერთი სხივის გზაზე მოვათავსებთ ბრტყელპარალელურ მინის ($n_2 - 1.5$) პლასტინას, რომლის სისქეა $\ell = 10$მკმ.

მოც: . $\lambda = 0.5$მკმ.

$n_2 = 1.5$

$\ell = 10$მკმ.

უ. 3. k

ამოხსნა:

ვიპოვოთ თუ რამდენი ტალღის სიგრძეზე (λ) შეიცვალა სვლის ოპტიკური სხვაობა პლასტინის შეტანისას:

$$\kappa = \frac{\delta_2 - \delta_1}{\lambda} = \frac{n_2\ell - n_1\ell}{\lambda} = 10.5$$

სადაც n_1- ჰაერის გარდატეხის მაჩვენებელია.

მიღებული k–ს მნიშვნელობა გვიჩვენებს, რომ სვლის ოპტიკური სხვაობა შეიცვალა ნახევარტალღის კენტ რიცხვჯერ. საიდანაც გამოდის, რომ ინტერფერენციული სურათი შეიცვალა საწინააღმდეგოდ: მუქი ხაზების ადგილას გაჩნდა ღია, ხოლო ღიას ადგილას გაჩნდა მუქი ხაზები.

ამოცანა 7.3 (Ремизов – 5.25)

2 ბრყელპარალელური მინის პლასტინებს შორის, რომლებიც ერთმანეთზე დევს, მოათავსეს წვრილი მავთული. მავთული იმყოფება $\ell = 50$სმ. მანძილზე პლასტინის შეხების ადგილიდან და მისი პარალელურია. (ნახაზი 6). ზედა პლასტინაზე ეცემა მონოქრომატული სინათ-

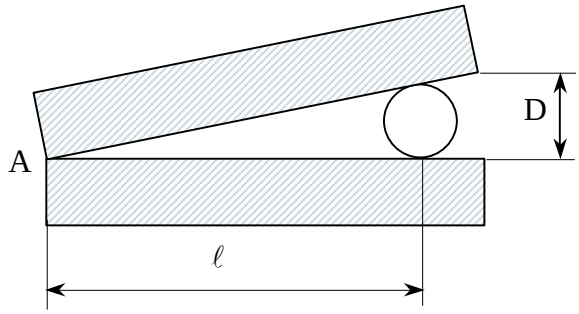
ლე ($\lambda = 0.6$ მკმ). არეკლილ სინათლეში ყოველ სანტიმეტრის მანძილზე მოჩანს 20 ინტერფერენციული ხაზი. იპოვეთ მავთულის სიგრძე

მოც: . $\ell = 50$**სმ**

$\lambda = 0.6$ მკმ.

უ. 3. D

ამოხსნა:



ნახაზი 6

ღია და მუქი ხაზების საერთო რიცხვი რაღაც ℓ მანძილზე ტოლია $m\ell$,სადაც m -არის ღია და მუქი ხაზების რიცხვი. მავთულის სისქე გამოითვლება ფორმულით:

$$D = \frac{\lambda}{2} ml = \frac{0.6 \times 10^{-6}}{2} \times 2000 \quad 5 \times 10^{-2} = 3 \times 10^{-5} \text{მ}.$$

ამოცანა 7.40 (Ремизов –5.27)

ბრტყელამოზნექილ ლინზას ეხება ბრტყელი მინის პლასტინა.(ნახ. 7). ლინზაზე ეცემა პარალელური სინათლის კონა. სხივებს შორის, არეკლილს სფერული ლინზის ზედაპირიდან (a) და პლასტინის ზედაპირიდან (b), არსებობს სვლის სხვაობა, რომელიც დამოკიდებულია მანძილზე ლინზასა და პლასტინას შორის. ამ სხივების ინტერფერენციის გამო წარმოიშობიან ერთნაირი სისქის ხაზები- მუქი და ნათელი რგოლები (ნიუტონის რგოლები), რომლებსაც შეიძლება დავაკვირდეთ, როგორც არეკლილ ისე გამსვლელ სხივებში. მიიღეთ გამოსახულება r_k

რადიუსებისათვის მუქ და ნათელ ნიუტონის რგოლებისათვის არეკლილ სხივებში. ლინზის სიმრუდის რადიუსი R - ცნობილია. ლინზასა და პლასტინას შორის მოთავსებულია ჰაერი.

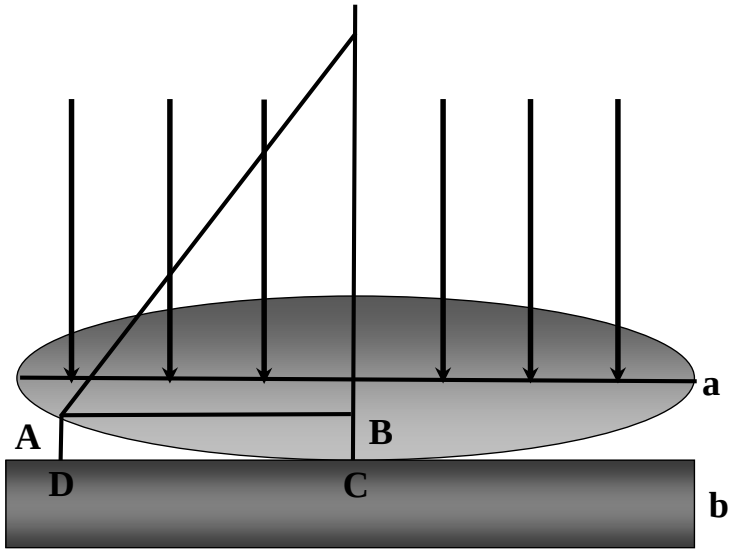
მოც: . R

უ. 3. r_k

ამოხსნა:

ინტერფერენციული სხივების სვლის ოპტიკური სხვაობა დამოკიდებულია საჰაერო მონაკვეთის სისქისაგან. მაგალითად $AD = x$ (ნახ. 6) და აქ ადგილი აქვს ნახევარტალღის კარგვას, როდესაც სხივი აირეკლება δ ზედაპირიდან:

$$\delta = 2x + \frac{\lambda}{2}$$



ნახაზი 7

ნათელი ხაზებისათვის (მაქსიმუმი) არეკლილი სინათლისათვის გვაქვს

$$\delta = 2x + \frac{\lambda}{2} = \kappa\ \lambda$$

$$x = (2\kappa - 1) \cdot \frac{\lambda}{4} \quad (1)$$

მუქი ხაზებისათვის (მინიმუმი)

$\delta = 2x + \frac{\lambda}{2} = (2\kappa + 1)\frac{\lambda}{2}$: $x = \frac{\kappa\lambda}{2}$: სადაც k=0,1,2

შემოვიღოთ აღვნიშვნები:

$|AO| = |OC| = R$: $|AB| = r_\kappa$: $|OB| = R - x$:

$\Delta ASO =$ დან $R^2 = r_\kappa - (R^2 - x)^2 = r^2 + R^2 - 2Rx + x^2$

რადგანაც x- მცირეა, ამიტომ x^2- შეიძლება უგულვებელყოთ. მაშინ

$$r_\kappa = \sqrt{2Rx}$$

(3) (2) და(1) შედარება გვაძლევს, მუქი რგოლების რადიუსის გამოსახუ-ლებას

$r_\kappa = \sqrt{\kappa R\lambda}$, და ღია ფერის რგოლებისათვის $r_\kappa = \sqrt{(2\kappa - 1)\frac{R\lambda}{2}}$

ამოცანა № 7.5 (Ремизов А. Н. 5.36)

ა = 0.2მმ. სიგანის ხვრელზე ეცემა ნორმალურად მონოქრომატული სი-ნათლე (λ = 0.64მკმ). იპოვეთ ცენტრალური ნათელი ზოლის სიგანე

კუთხურ ერთეულებში. ჩათვალეთ, რომ ნათელი ხაზის საზღვარს შეესაბამება მინიმუმი.

პასუხი: $3,2\ 10^{-3}$ რად

ამოცანა № 7.6 (Ремизов А. Н. 5.39)

ა = 0.1მმ. სიგანის ხვრელი განათებულია მონოქრომატული სინათლით ($\lambda = 500ნმ$), რომელიც ეცემა ნორმალურად და მას აკვირდება დამკვირვებელი რომელიც იმყოფება ხვრელის უკან. რას ხედავს დამკვირვებლის თვალი, თუ მხედველობის სხივი ქმნის ნორმალთან ერთად ხვრელის ზედაპირთნ 17^0კუთხეს, 43^0 კუთხეს.

პასუხი: 0,5 მკმ.

ამოცანა № 7.7 (Ремизов А. Н. 5.49)

იპოვეთ უდიდესი რიგი დიფრაქციული სპექტრის ნატრიუმის ყვითელი ხაზისთვის ($\lambda = 589ნმ$) დიფრაქციულ მასერში, რომელიც შეიცავს 1მმ-ზე 200 შტრიხს.

პასუხი: 8.

ამოცანა № 7.8 (Ремизов А. Н. 5.56)

დიფრაქციული მასერის მუდმივა ც = 0.02მმ. მესერის სიგანე $\ell = 1სმ$. შეიძლება თუ არა, როცა ვიყენებთ ამ მესერს დავინახოთ განცალკევებულად I რიგის სპექტრში ვერცხლისწყლის ყვითელი ხაზის დუპლეტი ($\lambda_1 = 576,96ნმ, \lambda_2 = 578,06ნმ$)

პასუხი: შეიძლება.

ამოცანა № 7.9 (Ремизов А. Н. 5.58)

დიფრაქციულ მესერს ც = 3 მკმ. მუდმივათი გააჩნია n = 1000 შტრიხი. გაიგეთ მასერის უდიდესი გარჩევისუნარიანობა ნატრიუმის ხაზისათვის $\lambda = 589.6ნმ$. სიგრძისათვის.

პასუხი: როცა

$$\sin\alpha = 1,\ l_{\max} \le \frac{c}{\lambda} = 5{,}088,\ \ \kappa_{\max} 5 \text{ და } R = \kappa N = 5 \cdot 1000 = 5000$$

ამოცანა № 7.10 (Ремизов А. Н. 5.62)

განსაზღვრეთ მიკროსკოპის გარჩევის ზღვარი, როცა გვაქვა საუკეთესო განათება ობიექტებისათვის: ა) არაიმერსიული, შემდეგი რიცხვითი აპერტურით

A = 0.9 ბ). ზეთოვანი იმერსია (n = 1.6) .გამოთვლები ჩაატარეთ $\lambda = 550ნმ$. სიგრძის ტალღებისათვის.

პასუხი: ა) 0,3მკმ, ბ) 0,19 მკმ.

ამოცანა № 7.11 (Ремизов А. Н. 5.63)

თანამედროვე ოპტიკურ მიკროსკოპებში აპერტურის კუთხე აღწევს უდიდეს მნიშვნელობას $U = 140^0$, გაიგეთ ასეთი მიკროსკოპის გარჩევის ზღვარი 2 შემთხვევაში: 1) ხილული სინათლის მოკლე ტალღურ ნაწილში 2) $555ნმ$ ტალღის სიგრძისთვის, რომელიც არის უფრო მგრძნობიარე თვალისათვის.

პასუხი: ა) 213წმ, ბ) 295 წმ.

სინათლის პოლარიზაცია.

ანალიზატორიდან გამოსული სინათლის ინტენსივობა

(მალიუსის კანონი)

$$I = I_0 \cos^2 \varphi \quad (6.11)$$

სადაც I_0 – ბრტყელპოლარიზებული სინათლის ინტენსივობაა, რომელიც ეცემა ანალიზატორიდან φ = არის kუთxე პოლარიზებული სინათლის პოლარიზაციის სიბრტყეს და ანალიზატორის მთავარ სიბრტყეს შორის.

ბრიუსტერის kანონი

$tg\ i_ბ = n$ (6.12)

სადაც n = ორი გარემოს გარდატეხის fარდობითი მაCვენებელია, $i_ბ$ - სრული პოლარიზაციის კუთხე.

პოლარიზაციის სიბრტყის მობრუნების kუთხე

$$\alpha = \alpha_0 \ell \quad (6.13)$$

ხსნარისათვის

$$\alpha = [\alpha_0] c \ell \quad (6.14)$$

სადაც α – ბრუნვის მუდმივა, $[\alpha_0]$ - ხვედრითი ბრუნვა, c- ოპტიკურად აქტიური ნივთიერების ხსნარის კონცენტრაცია, ℓ -ოპტიკურად აქტიური ნივთიერების ან ხსნარის ფენის სისქე.

ამოცანა № 8.0 (Ремизов А. Н. 5.68)

რას უდრის კუთხე პოლარიზატორსა და ანალიზატორის მთავარ სიბრტყეებს შორის, თუ ბუნებრივი სინათლის ინტენსივობა, რომელიც გადის ამ პრიზმაში, შემცირდა 4-ჯერ. სინათლის შთანთქმა უგულებელვყოთ.

პასუხი: $\alpha = 45^0$

ამოცანა №8.1 (Ремизов А. Н. 5.74)

სითხეში სხივის გარდატეხის კუთხე $r = 35^0$. იპოვეთ სითხის გარდატეხის მაჩვენებელი, თუ არეკლილი სხივი არის მაქსიმალურად პოლარიზებული.

პასუხი: 1,4

ამოცანა № 8.2 (Ремизов А. Н. 5.78)

სინათლის სხივის გადასვლისას მინიდან წყალში ზღვრული კუთხე აღმოჩნდა ტოლი $i_{ზრ} = 62^0$. როგორი კუთხით უნდა დაეცეს მინას სხივი, რომელიც გადის წყალში, რომ არეკლილი სხივი უნდა იყოს სრულებით პოლარიზებული.

ამოცანა № 8.3 (Ремизов А. Н. 5.81)

მონოქრომატული სინათლის კონა ეცემა ნორმალურად კრისტალური კვარცის პლასტინას, რომელიც ამოჭრილია ოპტიკური ღერძის პარალელურად. განსაზღვრეთ, პლასტინის სისქე, რომლის დროსაც მოხდება ჩვეულებრივი და არაჩვეულებრივი ტალღების ფაზების 90^0-ით წანაცვლება.

გამოყენებული სინათლისათვის $(\lambda = 600\,ნმ)$ გარდატეხის მაჩვენებლი ჩვეულებრივი და არაჩვეულებრივი სხივებისათვის ტოლია $n_0 = 1{,}544$ და $n_1 = 1{,}553$.

პასუხი: $0.016ნმ$.

ამოცანა № 8.4 (Ремизов А. Н. 5.82)

გაიგეთ კვარცის პლასტინის სისქე, რომლისთვისაც სინათლის პოლარიზაციის სიბრტის მობრუნების კუთხე $\lambda = 500ნმ$ სიგრძის ტალღით ტოლია

$\alpha = 48^0$. კვარცის ბრუნვის მუდმივა ამ ტალღის სიგრძისათვის $\alpha_0 = 30^0$/მმ.

პასუხი: 1,6 მმ.

ამოცანა № 8.6 (Ремизов А. Н. 5.85)

გაიგეთ შაქრის ხსნარის ხვედრითი ბრუნვა, რომლის კონცენტრაცია c =0,33გრ/სმ^3, თუ ხსნარიან მილში მონოქრომატული სინათლის გავლისას პოლარიზაციის სიბრტყის მობრუნების კუთხე $\alpha = 22^0$. მილის სიგრძე უდრის $\ell = 10სმ$.

პასუხი: 6,67 გრად. სმ^2/გრ.

ამოცანა № 8.7 (Ремизов А. Н. 5.87)

$\ell = 20სმ$. სიგრძის მილში ჩასხმულია შაქრის ხსნარი და ის მოთავსებულია პოლარიზატორშა და ანალიზატორს შორის, რომელიც აბრუნებს სინათლის ($\lambda = 0,5მკმ$) პოლარიზაციის სიბრტყეს $\alpha = 30^0$. გრადუსით. გაიგეთ შაქრის კონცენტრაცია ხსნარში, თუ ხვედრითი ბრუნვა ამ სიგრძის ტალღისათვის არის $[\alpha_0] = 6,67სმ^2 / გრ$.

პასუხი: 0,22 გრ/სმ^3.

ატომების და მოლეკულების ფიზიკა.

ნაწილაკების ტალღური თვისებები.

ატომების და მოლეკულების ენერგეტიკული დონეები

$p = m\nu$ **-იმპულსის მქონე ნაწილაკის ტალღის სიგრძე**

(დე – ბროილის სიგრძე)

$$\lambda = \frac{h}{m\upsilon}$$

სადაც m – ნაწილაკის მასაა, υ - მისი სიჩქარე, h – პლანკის მუდმივა.

ელექტრული მიკროსკოპის გარჩევის ზღვარი

$$Z = 0.5\frac{h}{\sqrt{2emU}\,\sin(\frac{u}{2})} \qquad (7.1)$$

სადაც U – ამაჩქარებელი დაძაბულობაა, u კუთხური აპერტურა, m – და e – ელექტრონების მასა და მუხტია.

განუზღვრელობის თანაფარდობა

$$\Delta x\Delta p_x \geq h/2\pi;\quad \Delta y\Delta p_y \geq h/2\pi;\quad \Delta z\Delta p_z \geq h/2\pi; \qquad (7.1)$$

სადაც $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ – კოორდინატების განუზღვრელობაა, $\Delta p_x, \Delta p_y, \Delta p_z$ – იმ-პულსის განუზღვრელობა

$$\Delta E\Delta t \geq h/2\pi \quad (7.1)$$

სადაც ΔE – ენერგიის განუზღვრელობაა, Δ t- მისი არსებობის დრო.

შრედინგერის განტოლება სტაციონარული მდგომარეობისათვის

$$\frac{d^2\psi}{dx^2} + \frac{8\pi^2 m}{h^2}(E \quad E_p)\psi = 0 \quad (7.1)$$

სადაც ψ - ტალღური ფუნქცია, ψ - დამოკიდებულია x–ზე

E და E_p ნაწილაკის სრული და პოტენციალური ენერგიაა.

ელექტრონის ენერგია, რომელიც შეესაბამება მდგომარეობას მთავარი კვანტური რიცხვით n (n=1, 2, 3 …)

$$E_n = \frac{Z^2 e^4 m}{8h^2 \varepsilon^2_q n^2} \qquad (7.1)$$

სადაც e– ელექტრონის მუხტია, Z - მენდელეევის პერიოდული სისტემის ელემენტთა რიგითი ნომერი.

ელექტრონის იმპულსის მომენტი ბირთვის მიმართ

$$L_\ell = \frac{h}{2\pi}\sqrt{L(\ell+1)} \qquad (7.2)$$

სადაც ℓ – ორბიტალური კვანტური რიცხვია ℓ =(1,2,3…n-1)

ელექტრონის სპინის პროექცია მაგნიტური ველის ინდუქციის მიმართულებით.

$$L_{ზ} = \frac{h}{2\pi} m_s \quad (7.3)$$

სადაც m_s – არის სპინის კვანტური რიცხვი (m_s=±1/2)

სინათლის სიხშირე, რომელსაც ასხივებს (შთანთქავს) წყალბადის ატომი

$$\nu = \frac{me^4}{8h^3\varepsilon^2_0}\left(\frac{1}{n^2_k} - \frac{1}{n^2_i}\right) \qquad (7.4)$$

სადაც i–და k– დონეების რიგითი ნომრებია, რომლის შორისაც ხდება კვანტური გადასვლები

როცა n_k=1, n_i= 2,3,4,… – ფორმულა შეესაბამება ლაიმანის სერიის ხაზებს.

როცა n_k=2, n_i= 3,4,5,… – ბალმერის სერიას

როცა n_k=3, n_i=4,5,6,… – პაშენის სერიას

B – ინდუქციის მაგნიტურ ველში მოთავსებული ატომის ენერგიის ქვედონეებს შორის მანძილი.

$$\Delta E = g\mu_b B, \qquad (7.5)$$

სადაც g- ლანდეს მამრავლია, $\mu_ბ$ ბორის მაგნეტონი.

ამოცანების ამოხსნა

ამოცანა 9.0 (Ремизов –6.5)

გაიგეთ ელექტრონული მიკროსკოპის გარჩევის ზღვარი, როდესაც ამაჩქარებელი დაძაბულობა $U=100$კვ, ხოლო კუთხური აპერტურა $u=10^{-2}$რად. გამოთვლები აწარმოეთ 2 შემთხვევსათვის, ა) ელექტრონის რელატივისტური მასის გაუთვალისწინებლად ბ) მისი გათვალისწინებით.

მოც: . $U=100$კვ.

$u=10^{-2}$ რად.

უ. 3. Z

ამოხსნა:

ა) 0.194ნმ.

ბ) ვპოულობთ ელექტრონის სიჩქარეს რელატივისტური მასის გათვალისწინებით:

$\frac{m_0c^2}{\sqrt{1-\nu^2/c^2}}$ $m_0c^2=eU$, საიდანაც

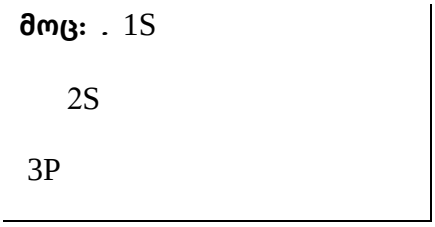
$$\nu=c\sqrt{1-\frac{m^2{}_0c^4}{(eU+m_0c^2)^2}}=1.64\times10^6 \text{მ/წმ}.$$

$$p=mu=\frac{m_0\upsilon}{\sqrt{1-\nu^2/c^2}}=m_0c^4/\sqrt{c^2-\upsilon^2}=1.78\times10^{-22}\text{კგმ/წმ}$$

$$Z=0.5\times\frac{h}{p\sin(\frac{u}{2})}=0.185\text{ნმ}.$$

ამოცანა 9.1 (Ремизов –6.11)

გაიგეთ წყალბადის ატომის ელექტრონის ენერგია და იმპულსის მომენტი, რომლებიც შეესაბამებიან $1S$, $2S$ და 3P მდგომარეობებს.



უ. 3. E

ამოხსნა:

$E = -2\pi^2 me^4/(h^2 n^2)$, აქედან გვაქვს

13,4ევ. 3.4ევ. 3.4ევ.

$L_l = \frac{h}{2\pi}\sqrt{\frac{\ell}{\ell+1}}$, აქედან ვღებულობთ

0: 0: 1.5 10^{-34} მ^{2}კგ/წმ.

ამოცანა № 9.2 (Ремизов А. Н. 6.1)

რას უდრის ელექტრონისთვის დე – ბროილის ტალღის სიგრძე, რომელსაც გააჩნია სიჩქარე $\upsilon = 1000$ კმ / წმ.

პასუხი: 7,3 10^{-10}მ.

ამოცანა № 9.3 (Ремизов А. Н. 6.2)

შეადარეთ დე – ბროილის ტალღის სიგრძე ელექტრონისთვის და ბურთულასთვის მასით m = 1გრ, თუ მათი სიჩქარეები ტოლია და უდრის $\upsilon = 100$ მ / წმ.

პასუხი: 7,27 10^{-6} მ, და 6,63 10^{-13}მ.

ამოცანა № 9.4 (Ремизов А. Н. 6.3)

გაიგეთ დე – ბროილის ტალღის სიგრძე ნეიტრონისათვის, რომელიც იმყოფება თერმოდინამიკურ წონასწორობაში გარემოში ტემპერატურით $t = 20^0C$.

პასუხი: $\lambda = 1{,}47 \cdot 10^{-10}$ მ.

ამოცანა № 9.5 (Ремизов А. Н. 6.4)

ფერადი ტელევიზორის მილში ამაჩქარებელი დაძაბულობა U=20კვ. რას უდრის დე – ბროილის ტალღის სიგრძე ელექტრონისათვის აჩქარებული პროცესის ბოლოს.

პასუხი: $\lambda = 8{,}86$ნმ.

ამოცანა № 9.6 (Ремизов А. Н. 6.5)

მონოქრომატიული სინათლის ინტენსივობა, რომელიც გამოწვეულია ატომის მე-2 დონიდან პირველ დონეზე გადასვლისას ლაიმანის სერიაში ტოლია 163ტ. ასეთ ინტენსივობას რამდენი ფოტონი ქმნის წამში.

პასუხი: ა) 0,194ნმ, ბ) $\upsilon = 1{,}6410^{8}$მ/წმ,

$p=1{,}79\ 10^{-22}$კგმ/წმ, Z=0,185ნმ.

ამოცანა №9.7 (Ремизов А. Н. 6.18)

გაიგეთ ატომის ქვედონეებს შორის მანძილი, რომელიც მოთავსებულია მაგნიტურ ველში ინდუქციით B=0.5ტლ. g-ფაქტორი მივიღოთ 2-ს ტოლად. ელექტრომაგნიტური გამოსხივების როგორ სიხშირეს და ტალღის სიგრძეს შეესაბამება გადასვლა ერთი ქვედონიდან მე-2-ზე.

პასუხი: $9{,}27\ 10^{-24}$ჯ, $1{,}4\ 10^{10}$ჰც, 2,1სმ.

ამოცანა № 9.9 (Ремизов А. Н. 6.19)

ელექტრონულ პარამაგნიტური რეზონანსის რადიოსპექტრომეტრის მიერ შთანთქმული მაღალსიხშირული ელექტრომაგნიტური ენერგია შეესაბამება $\lambda = 3см$. ტალღის სიგრძეს. როგორი მუდმივი მაგნიტური ველის ინდუქციის დროს დაიმზირება ელექტრო პარამაგნიტური რეზონანსის მოვლენა. g-ფაქტორი მივიღოთ 2-ს ტოლად.

პასუხი: 0,36 ტლ.

მაიონებელი გამოსხივება

რენტგენული გამოსხივება

დამუხრუჭებითი რენტგენული გამოსხივების სპექტრის საზღვარი

$$\lambda_{\min} = 1,2,3/U \qquad (8.1)$$

სადაც U– არის დაძაბულობა რენტგენულ მილაკში, კვ; $\lambda_{\min}$ - ნმ-ში.

რენტგენული გამოსხივების ნაკადი

$$\Phi = \kappa \cdot I \cdot U^2 \cdot Z \qquad (8.2)$$

სადაც I–და U- რენტგენულ მილაკში დენის ძალა და დაძაბულობა, Z-ანო-

დის ნივთიერების რიგითი ნომერი, k= 10^{-9} ვ$^{-1}$.

რენტგენული გამოსხივების დასუსტების მასური კოეფიციენტი

$$\mu_m = \kappa\lambda^3 Z^3 \qquad (8.3)$$

სადაც k–პროპორციულობის კოეფიციენტი, λ - ტალღის სიგრძე, Z-მშთანმთქავი

ნივთიერების ელემენტის რიგითი ნომერი.

რენტგენული გამოსხივების დასუსტების ხაზოვანი კოეფიციენტი

$$\mu = \mu_m \times \rho \qquad (8.4)$$

სადაც ρ – ნივთიერების სიმკვრივეა

ამოცანების ამოხსნა

ამოცანა №10.1 (Ремизов –7.1)

იპოვეთ დამუხრუჭებითი რენტგენული გამოსხივების საზღვარი (სიხშირე და ტალღის სიგრძე) შემდეგი დაძაბულობებისათვის U_1 =2კვ. და U_2 =20კვ. რამდენჯერ მეტია ამ გამოსხივების ფოტონის ენერგია იმ ფოტონის ენერგიაზე, რომელსაც შეესაბამება λ =760ნმ. სიგრძე (წითელი ფერი).

მოც: . $U_1 = 2$კვ.

$U_2 = 20$ კვ.

$\lambda = 760$ ნმ.

უ. ვ. $\lambda_{\min.}$

ამოხსნა:

$\lambda_{\min} = hc/(eU)$; 6×10^{-10}მ. და 0.6×10^{-10} მ. 5×10^{17} ჰც. და 5×10^{18}ჰც.

ფოტონის ენერგია 1.27×10^{12} და 1.27×10^{13} ჯერ მეტია.

ამოცანა № 10.2 (Ремизов А. Н. 7.2)

როდის მოხდება რენტგენული გამოსხივების ნაკადის დიდი გაზრდა: დენის ძალის 2-ჯერ გაზრდისას, მაგრამ დაძაბულობის უცვლელად, თუ პირიქით, დაძაბულობის 2-ჯერ გაზრდით, მაგრამ დენის ძალის შენარჩუნებით. როგორ შეიძლება გავზარდოთ დენის ძალა, თუ რენტგენულ მილში დაძაბულობა უცვლელია. გაანალიზეთ პროცესები, რომელსაც ადგილი აქვს დენის ძალის ცვლილებისას, დაძაბულობის ცვლილებისას?

ამოცანა №10.3 (Ремизов А. Н. 7.3)

იპოვეთ რენტგენული გამოსხივების ნაკადი U=10კვ. და I=1ა. დროს. ანოდი დამზადებულია ვოლფრამისაგან. რამდენ ფოტონს წამში შეესაბამება ეს ნაკადი, თუ დავუშვებთ, რომ გამოსხივდება ელექტრომაგნიტური ტალღა, რომლის სიგრძე უდრის 3/2 იმ ტალღისა, რომელიც შეესაბამება დამუხრუჭებითი რენტგენული გამოსხივების სპექტრის საზღვარს.

პასუხი: $h\nu_{\max}\frac{2}{3}eU,\quad N=\frac{\Phi}{h\nu}=6{,}9\quad 10^{12}$ ფოტონი/წმ.

ამოცანა № 10.4 (Ремизов А. Н. 7.4)

ჩავთვალოთ, რომ რენტგენული გამოსხივების შთანთქმა არ არის დამოკიდებული იმაზე, თუ როგორ შენაერთშია წარმოდგენილი ატომი ნივთიერებაში. განსაზღვრეთ ძვლის ($Ca(PO_4)_2$) დასუსტების მასური კოეფიციენტი რამდენჯერ მეტია წყლის დასუსტების მასურ კოეფიციენტზე.

პასუხი: 68-ჯერ.

ბირთვი. რადიოაქტიურობა.

ბირთვის ბმის ენერგია:

$$\Delta E_{ბმა}=931{,}5\,[Zm_H+(A-Z)m_n-m_a]\ (9.1)$$

სადაც m_H, m_n, m_a - არის შესაბამისად ^1H წყალბადის იზოტოპის, ნეიტრონის და ატომის მასები, **ა.e.m.,** Z –არის პროტონების რიცხვი ბირთვში (ელემენტის რიგითი ნომერი); A- ნუკლონების რიცხვი ბირთვში (მასური რიცხვი); $\Delta E_{ბმა}$ - გამოისახება მაგაელექტრონ – ვოლტებში.

რადიოაქტიური დაშლის ძირითადი კანონი:

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad (9.2)$$

სადაც N_0 – რადიაქტიური ბირთვების საწყისი რიცხვია,

N -მათი რიცხვი t- დროის მომენტში

$$\lambda = \ln \frac{2}{T_{1/2}} \quad (9.3)$$

λ - დაშლის მუდმივაა, $T_{1/2}$ – ნახევარდაშლის პერიოდი

პრეპარატის აქტივობის ცვლილება დროში

$$A = \lambda \cdot N_0 e^{-\lambda t} \quad (9.4)$$

ამოცანა № 11.0 (Ремизов 7.11)

როგორ მივიღოთ ვერცხლისწყლიდან ოქრო?

ამოხსნა:

$$^{198}_{80}Hg \rightarrow ^{1}_{0}n \rightarrow ^{198}_{80}Hg \rightarrow ^{198}_{79}Au + ^{1}_{1}H$$

რადგანაც ნეიტრონები იშვიათად ხვდებიან ვერცხლისწყლის ბირთვში, ენერგიის დანახარჯი ამ შემთხვევაში არის ძალიან დიდი. ე.ი. ოქროს მიღება ვერცხლისწყლიდან ნეიტრონების ბომბარდირებისას არის ეკონომიურად არა ხელსაყრელი.

ამოცანა № 11.1 (Ремизов 7.6)

იპოვეთ ურანის $^{238}_{92}U$ ბმის ენერგია და ბმის ენერგია, რომელიც მოდის 1 ნუკლონზე.

პასუხი: $1,8\times10^3$ მევ/ნუკლონი

ამოცანა 11.2 (Ремизов 7.7)

იპოვეთ წყალბადის იზოტოპის დეიტერიუმის და ტრინიტრიუმის ბმა. რას უდრის ბმის ენერგია, რომელიც მოდის 1 ნუკლონზე.

პასუხი: 2,2 მევ. 8,5მევ. 1,1 მევ/ნუკლონი. 2,8მევ/ნუკლონი

ამოცანა № 11.3 (Ремизов 7.9)

გამოთვალეთ $^{130}_{53}I$ ბირთვების რიცხვი, რომლებიც დაიშალნენ პირველი დღის განმავლობაში, თუ პირველადი ბირთვების რიცხვი $N_0=10^{22}$.

პასუხი: $N_i=N_0-N=0,73\times10^{22}$

ამოცანა № 11.4 (Ремизов 7.12)

რატომაა, რომ α – ნაწილაკებს, გამოსხივებულს რადიაქტიური პრეპარატების მიერ არ შეუძლია გამოიწვიოს ბირთვული რეაქციები მძიმე ელემენტებში.

პასუხი: α – ნაწილაკის ენერგია არაა

საკმარისი იმისათვის, რომ

დაძლიოს მძიმე ელემენტის ბირთვის

განზიდვის ძალა და შეაღწიოს

შიგნით.

ამოცანა № 11.5 (Ремизов 7.13)

ურანის $^{238}_{92}U$ რამდენი ბირთვი დაიშალა 1 წლის განმავლობაში, თუ ურანის საწყისი მასა იყო m = 1კგ. პასუხი:

$$N_0 = \frac{N_A}{A}, \quad dN = \lambda \cdot N_0 dt = 0{,}4 \cdot 10^{12}$$

ამოცანა № 11.6 (Ремизов 7.16)

როგორია პრეპარატის აქტიურობა, თუ 10წთ. განმავლობაში იშლება ამ ნივთიერების 10000 ბირთვი.

პასუხი: რადგანაც ნახევარდაშლის პერიოდი

3 თვეზე მეტია, შეიძლება ჩავთვალოთ,

რომ ყოველ თვეში იშლება ერთი და

იგივე რაოდენობის ბირთვები.

$$dN = \lambda \cdot N_0 \cdot dt = 0{,}065 \cdot 10^{12}$$

ამოცანა № 11.7 (Ремизов 7.17)

იპოვეთ ურანის $^{238}_{92}\mathrm{U}$ ხვედრითი მასური აქტივობა.

პასუხი:

$$\frac{dN}{dt \cdot m} = \lambda \frac{N_A}{A} = \frac{\ln \cdot 2 N_A}{T \cdot A} = 1{,}2 \cdot 10^6 \text{ ბეკერ/კგ.}$$

ცხრილები

ცხრილი №1

ჯერადი და წილობრივი ერთეულები

ჯერადი და წილობრივი ერთეულები	დასახელება	აღვნიშვნა	
		რუსული	საერთაშორისო
$1\ 000\ 000\ 000\ 000 = 10^{12}$	ტერა	Т	T
$1\ 000\ 000\ 000 = 10^{9}$	გიგა	Г	G
$1\ 000\ 000 = 10^{6}$	მეგა	М	M
$1\ 000 = 10^{3}$	კილო	К	k
$100 = 10^{2}$	ჰექტო	Г	h
$10 = 10^{1}$	დეკა	да	da

$0,1 = 10^{-1}$	დეცი	де	d
$0,01 = 10^{-2}$	სანტი	с	ც
$0,001 = 10^{-3}$	მილი	м	m
$0,000\ 001 = 10^{-6}$	მიკრო	мк	μ
$0,000\ 000\ 001 = 10^{-9}$	ნანო	н	n
$0,000\ 000\ 000\ 001 = 10^{-12}$	პიკო	п	p
$0,000\ 000\ 000\ 000\ 001 = 10^{-15}$	ფემტო	ф	f
$0,000\ 000\ 000\ 000\ 000\ 001 = 10^{-18}$	ატო	а	ა

ცხრილი № 2.

ძირითადი ფიზიკური და მათემატიკური კონსტანტები

სინათლის სიჩქარე ვაკუუმში	ც = 2997822458 მ/წმ.
ავოგადროს მუდმივა	N_A= 6,022×10^{23} მოლი$^{-1}$
გაზის მოლური მუდმივა	R = 8,3 ჯ/მოლი·K
ბოლცმანის მუდმივა	k = 1,38·10^{-23}ჯ/K
ელემენტარული მუხტი	e = 1,601892·10^{-19}კლ
ელექტრონის უძრაობის მასა	m_e = 9,1·10^{-31} კგ
ელექტრონის ხვედრითი მუხტი	e/m_e = 1,76·10^{11}კლ/კგ
პროტონის უძრაობის მასა	m_p = 1,007276470 a.e.მ
ნეიტრონის უძრაობის მასა	m_n =1,008665012 a.e.მ
ელექტრული მუდმივა	e_0 = 10^{-9}/36π ფ/მ= 8,64 ფ/მ.
მაგნიტური მუდმივა	μ =4π10^{-7}ჰ/მ=12,37·10^{-7}ჰ/მ
სტეფან-ბოლცმანის მუდმივა	σ = 5,67·10^{-8} ვატ/მ^{2}K^2
ვინის წანაცვლების მუდმივა	b =2,9·10^{-1}მ/K
პლანკის მუდმივა	h =6,63·10^{-34}ჯწმ
π რიცხვი	**π** =3,14159
ნატურალური ლოგარითმის ფუძე	e = 2,71828
ათობითი და ნატურალური ლოგა-რითმების კავშირი	lnა = 2,3 lgა lgა = 0,43lnა

ცხრილი № 3

ფიზიკური სიდიდეების ერთეულები

ძირითადი და დამატებითი ერთეულები SI სისტემაში

სიდიდე	დასახელება	აღნიშვნა
ძირითადი		
სიგრძე	მეტრი	მ
მასა	კილოგრამი	კგ
დრო	წამი	წმ
ელექტრული დენის ძალა	ამპერი	ა
თერმოდინამიკური ტემპერატურა	კელვინი	K
სინათლის ძალა	კანდელა	კანდელი
ნივთიერების რაოდენობა	მოლი	მოლი
დამატებითი		
ბრტყელი კუთხე რადიანი		რად.
სხეულოვანი კუთხე სტერადიანი		სტერად.

ცხრილი № 4

სიდიდე	ერთეული		წარმოებული ერთეულის გამოსახულება	
	დასახელება	აღ-ნიშ-ვნა	CI სისტე-მის სხვა ერთეულში	CI სისტემის ძირითად ერთეულებ-ში
სიხშირე	ჰერცი	ჰც.	_____	წმ$^{-1}$
ძალა	ნიუტონი	ნ.	_____	მკგწმ$^{-2}$
წნევა	პასკალი	პა.	ნ/მ^2	მ ^{1}კგწმ$^{-2}$
ენერგია, მუშაობა, სითბოს რაოდენობა	ჯოული	ჯ	ნ მ	მ^{2}კგწმ$^{-2}$
სიმძლავრე, ენერგიის ნაკადი, ელექტრობის რაოდენობა	ვატი	ვტ	ჯ/წმ	მ^{2}კგწმ$^{-3}$
ელექტრული მუხტი	კულონი	კლ	აწმ	წმა
ელექტრული დაძაბუ-ლობა, ელექტრული პოტენციალი	ვოლტი	ვ	ვატი/ა	მ^{2}კგწმ$^{-3}$ა$^{-1}$
ელექტრული ტევადო-ბა	ფარადა	ფ	კლ/ვოლტი	მ $^{-2}$კგ $^{-1}$წმ^{4}ა^2
ელექტრული წინაღო-ბა	ომი	ომი	ვოლტი/ა	მ^{2}კგწმ$^{-3}$ა$^{-2}$
ელექტრული გამტა-	სიმენსი	სიმ	ა/ვ	მ$^{-2}$კგ$^{-1}$წმ^{3}ა^2

რებლობა				
მაგნიტური ინდუქცი-ის ნაკადი	ვებერი	ვბ	ვოლტი წმ	მ ^{2}კგწმ $^{-2}$ა $^{-1}$
მაგნიტური ინდუქცია	ტესლა	ტსლ.	ვებერი/მ^{2}	კგ წმ$^{-2}$ ა$^{-1}$
ინდუქტიურობა	ჰენრი	ჰრ	ვებერი/ა	მ ^{2}კგ წმ$^{-2}$ ა$^{-2}$
სინათლის ნაკადი	ლუმენი	ლმ	_____	კანდელა× სტერადიანი
განათებულობა	ლუქსი	ლქ	_____	მ $^{-2}$ კანდე-ლა× სტე-რადიან
რადიონუკლიდის აქ-ტიურობა	ბეკერელი	ბეკ	დაშლა/წმ	წმ$^{-1}$
გამოსხივების დოზა	გრეი	გი	ჯ/კგ	მ^{2}წმ$^{-2}$

ცხრილი 5

სისტემის გარეშე ფიზიკური სიდიდეების ერთეულები და მათი თანაფარდობა

SI სისტემის ერთეულებთან.

სიდიდე	ერთეული CGC სისტემაში	აღნიშვნა	ერთეულის სიდიდე CI სისტემაში
სიგრძე	ანგსტრემი იქსი-ერთეული	A X	10^{-10}მ. 10^{-13}მ
მოცულობა	ლიტრი	C	10^{-3}მ^3
მასა	ტონა მასის ატომური ერთეული	ტ. მ.ა.ე. ა.e.m.	1000კგ. 1,6605655 10^{-27}კგ.
დრო	სუტკა საათი წუთი	სუტ. სთ. წთ.	86400წმ. 3600წმ. 60წმ.
სიჩქარე	კილომეტრი საათში	კმ/სთ	2,7840^{-1}მ/წმ.
ბრტყელი კუთ-	გრადუსი	0	1,75 10^{-2}რად.

ხე	წუთი წამი	' "	2,9 10^{-4}რად 4,35 10^{-6}რად
ბრუნვის სიხშირე	შემოვლა წმ-ში “––––––” წთ-ში	შემ/წმ შემ/წთ	$ც^{-1}$ $1/60ც^{-1}$
წნევა	ბარი ტექნიკური ატმოსფერო ფიზიკური ატმოსფერო ვერცხლის-წყლის სვეტის მილიმეტრი	ბარი კგწმ/სმ^2 ატმ. მმ. ვერცხლ. სვეტის	105პა 9,81 10^4პა 1,01 10^5პა 1,3 10^2პა
დინამიური სიბლანტე	პუაზი	პ.	0,1 პაწმ
კინემატიკური სიბლანტე	სტოქსი	სტ.	10^{-4}მ^2/წმ
ენერგია, მუშაობა, სითბოს რაოდენობა	ვატი-საათი კალორია ერგი ელექტრონ-ვოლტი	ვტწმ. კალ. ერგ. ევ.	3600ჯ. 4,19ჯ. 10^{-7}ჯ. 1,6 10^{-19}ჯ
სიმძლავრე	ცხენისძალა	ცხ.ძ	735,5ვტ
ელექტრობის რაოდენობა	ელექტრობის რაოდენობის	CGC_q	3,34 10^{-19}კლ

	ერთეული		
ელექტრული პოტენციალი, დაძაბულობა	დაძაბულობის ერთეული	CGC φ	300ვ
ელექტრული ტევადობა	ელექტრული ტევადობის სანტიმეტრი	სმ	1,11 10^{-12}ფ.
დიპოლის ხვედრითი მომენტი	დებაი	დებაი	3,343 10^{-30}კლმ
ხვედრითი ელექტრული წინაღობა	_____	ომიმმ^2/მ	10^{-6}ომიმ
მაგნიტური ინდუქცია	გაუსი	გაუსი	10^{-4}ტსლ.
მაგნიტური ველის დაძაბულობა	ერსტედი	ერსტ.	79,6ა/მ
მაგნიტური ნაკადი	მაქსველი	მქს.	10^{-8}ვბ.
მაგნიტური მომენტი	ბორის მაგნეტონი	_____	9,27 10^{-24}ჯ/ტლ.
ინდუქტიურობა, თვითინდუქცია	ინდუქტივობის სანტიმეტრი	სმ	10^{-9}ჰრ
რადიოაქტიური პრეპარატის აქტიურობა	კიური	კიური	3,7 10^{10}ბკ.

იონიზირებული გამოსხივების დოზები: შთანთქმული ექსპოზიციური ექვივალენტური	რადიანი რენტგენი ბერი	რად. რენტგენი ბერი	10^{-12}გრ. $2,58\ 10^{-4}$კლ/კგ 10^{-2}ჯ/კგ

ცხრილი 6

ზოგიერთი ფიზიკური სიდიდეების მნიშვნელობები

ნივთიერების სიმკრივე. კგ/მ^3

ალუმინი	2700	მშრალი ტყავი	800
ბენზინი	680-720	სისხლი	1050
ბენზოლი 0^0C	899	ყინული0^0C	917
თხევადი ბრომი	3120	კასტოროვის ზეთი	960
წყალი 4^0C	1000	სპილენძი	8930
ჰაერი ნორმალურ პირობებში	1,29	რძე	1082
მშრალი ხე:		ტყვია	11342
ბერიოზა	600-800	სმოგი	1020
მუხა	700-1000		
რკინა	7870	სპირტი	789
ოქრო	19300	ფოლადი	7700-7900
ნავთი	820	ძვლის ქსოვილი	1700-2000

ცხრილი 7

მატერიალების დრეკადობის მოდული, გპა

მუხა	14
ტყავი	$1,3\ 10^{-5}$
კოლაგენი	1
ძვლის ქსოვილი	10
ყინული	3
აბრეშუმის ძაფი	6,5
ობობა	3
ფოლადი	195–206

ცხრილი 8

სხვადასხვა სითხეების ზედაპირული დაჭიმულობა “სითხე-ჰაერი” საზღვარზე 20^0C დროს. მჰ/მ

ქათმის კვერცხის ცილა	53
ბენზოლი	30
წყალი 0^0C 20^0C	75,6 72,6
ბრომი	44,2
სისხლი	58
კასტოროვის ზეთი	36,4
რძე	42-46
საპნის ხსნარი	40
ვერცხლისწყალი	50
ეთილირებული სპირტი	22

ცხრილი # 9

სხვადასხვა ნივთიერების დინამიური სიბლანტე. მკ· პა· წმ

წყალი (0^0C)	1787

(20^0C) (100^0C)	1005 280
ჰაერი (0^0C)	18,1
გლიცერინი (0^0C) (20^0C)	$12{,}1\cdot10^{6}$ $1{,}48\cdot10^{-16}$
თევზის ქონი	$4{,}6\cdot10^{4}$
ჟანგბადი (0^0C)	$19{,}1\cdot10^{6}$
სისხლი (20^0C)	5000
კასტოროვის ზეთი (20^0C)	$970\cdot10^{9}$
ეთილის სპირიტი (0^0C)	1778
რძე (20^0C)	1800

ცხრილი # 10

ბგერის სიჩქარე სხვადასხვა ნივთიერებაში, მ/წმ.

წყალი 0^0C 20^0C	1402 1482
წყალბადი	1284
ჰაერი	331
გლიცერინი 20^0C	1923
ჟანგბადი	316
ყინული -4^0C	3980
ეთილირებული სპირტი 20^0C	1165

ცხრილი # 11

სხვადასხვა ბგერის ინტენსივობები 1კჰც. სიხშირისათვის. ვტ/მ^2

სმენადობის ზღვარი	10^{-12}
სტეტოსკოპით გაზომილი გულის ტონები	10^{-11}
ჩურჩული, საათის წიკწიკი	10^{-10}
ლაპარაკი: ხმადაბალი ნორმალური	 10^{-8} 10^{-7}

ხმამაღალი	10^{-6}
ქუჩის ხმაური	10^{-5}
ყვირილი	10^{-4}
ხმაური: მეტროს მატარებელში მოტოციკლის დიდი სიჩქარით მიმავალი მატარებლის ხმაური	 10^{-3} 10^{-2} 10^{-1}
რეაქტიული ძრავა, ქუხილი	1
ტკივილის შეგრძნების ზღვარი	10

ცხრილი # 12

1ლ. ჟანგბადის კალორიული კოეფიციენტის და სუნთქვითი კოეფიციენტის კავშირი.

სუნთქვითი კოეფიციენტი	კალორიული კოეფიციენტი (*K.K*) კ.ჯ.	სუნთქვ. კოეფიც.	კალორ. კოეფიც. (*K.K*) კ.ჯ.	სუნთქვ. კოეფიც.	კალორ. კოეფიც. (*K.K*) კ.ჯ.	სუნთქვ. კოეფიც	კ.ჯ.
0,70	19,619	0,78	19,996	0,86	20,44	0,94	20,821
0,71	19,636	0,79	20,051	0,87	20,44	0,95	20,871
0,72	19,686	0,80	20,101	0,88	20,515	0,96	20,921
0,73	19,737	0,81	20,151	0,89	20,566	0,97	20,976
0,74	19,791	0,82	20,201	0,90	20,016	0,98	21,026

0,75	19,841	0,88	20,256	0,91	20,666	0,99	21,076
0,76	19,896	0,84	20,306	0,92	20,716	1,00	21,131
0,77	19,946	0,85	20,360	0,93	20,767	————	————

ცხრილი # 13

1 გრ. მკვებავი ნივთიერების დაჟანგვისას მოხმარებული 0_2 და გამოყოფილი CO_2-ს მოცულობა.

ნივთიერება	მოხმარებული 0_2, ლ.	გამოყოფილი $C0_2$, ლ.	სუნთქვითი კოეფიციენტი
ცილა	0,97	0,77	0,8
ქონი	2,0	1,4	0,7
ნახშირწყალი	0,83	0,83	1,0

ცხრილი # 14

ფარდობითი დიელექტრიკული გამტარებლობა

წყალი	8,1
სანთელი	2,8-2,9
გლიცერინი	4,3
სისხლი	85

კასტორის ზეთი	4,5-4,8
პარაფინი	2
ფურთხი	7,5
სპირტი	26

ცხრილი # 15

ხვედრული ელექტრული წინაღობა 20^0C-ის დროს. ომი მ.

ალუმინი	$2,8\ 10^{-8}$
წყალი	$10^3 – 10^4$
ხერხემლის ტვინის სითხე	0,55
მშრალი ტყავი	10^8
ძვალი	10^7
სისხლი	1,66
ვერცხლისწყალი	$0,958\ 10^{-8}$
+ეთილირებული სპირტი	$10^4 – 10^5$
ცხიმოვანი ქსოვილი: ტვინის კუნთოვანი	33,3 14,3 2

ცხრილი # 16

გარდატეხის მაჩვენებელი

ალმაზი	2,417
წყალი	1,333
წყალბადი	1,000138
ჰაერი	1,000292

ჟანგბადი	1,000272
ყინული	1,31
ნახშირორჟანგის ოქსიდი	1,000334
შაქარი	1,56
ეთილირებული სპირტი	1,362
მინა	1,51

ცხრილი # 17

შინაგანი არეკვლის ზღვრული კუთხე, გრად

წყალი	49
გლიცერინი	48
ეთილირებული სპირტი	47

ცხრილი # 18

ხილული სპექტრის ძირითადი ფერების ტალღის სიგრძის მიახლოებითი მნიშვნელობები, ნმ

წითელი	760 – 620
აგურისფერი	620 – 590
ყვითელი	590 – 560
მწვანე	560 – 500
ცისფერი	500 – 480
ლურჯი	480 – 450
იისფერი	450 – 380

ცხრილი # 19

სხვადასხვა ატომის მასები, c.m.e.

^{1}H	1,00783
^{2}H	2,01410
^{3}H	3,01606
^{3}He	3,01603
^{4}He	4,00260
^{12}C	12,00000
^{16}O	15,29491
^{56}CO	55,93991
^{235}U	235,04277

^{238}U	238,04808

ცხრილი # 20

სხვადასხვა რადიოაქტიური ბირთვების ნახევარდაშლის პერიოდები

^{2}H	12,262 წელიწადი
^{14}C	5730 წელიწადი
$^{60}C_0$	5,263 წელიწადი
^{130}J	12,3 საათი
^{131}J	8,05 სუტკა
238U	$4,51\ 10^{9}$ წელიწადი

ლიტერატურა:

1. **სამედიცინო ფიზიკა და ბიოფიზიკა** – **ა**. ციბაძის და ი. კვაჭაძის რედაქციით, თბილისი, 2005, 322გვ.

2. **А. Н. Ремизов. “Сборник задач по медицинской и биологической физике”, Москва, 1996г.**

3. **В. Уильямс, Х. Уильямс, “Физическая Химия для биологов”, Изд. “Мир”, Москва, 1976.**

4. **Raymond Chang “Physical Chemistry for the Chemical and Biological Sciences “ University Science Books, Sansalito, California, 2000, p. 1-1045.**

gamomcemloba `universali~

vlitkovskaias #4. ☎: 5(99) 33 52 02, 5(99) 17 22 30

E-mail: universal505@ymail.com; gamomcemlobauniversali@gmail.com