

ივანე ჯავახიშვილის სახელობის თბილისის სახელმწიფო უნივერსიტეტი

შოთა გოგიჩაიშვილი

ზუსტ და საბუნებისმეტყველო მეცნიერებათა ფაკულტეტი
ფიზიკის მიმართულება

*ერთწლიან მცენარეთა ფესვებში წყლის კრისტალიზაციისა და
ყინულის დნობის პროცესების თავისებურებანი. კალორიმეტრიული
კვლევები*

ს ა დ ო ქ ტ ო რ ო დ ი ს ე რ ტ ა ც ი ა

ხელმძღვანელები:

პროგრამის ხელმძღვანელები,

ანდრონიკაშვილის ფიზიკის
ინსტიტუტის მთავარი
მეცნიერ თანამშრომელი
ფიზ.-მათ.-მეცნ. დოქტორი

ნუგ ზარ ბაქრაძე

თსუ ასოცირებული პროფესორი,
ფიზ.-მათ.-მეცნ. დოქტორი

თამაზ მძინარიშვილი

სამეცნიერო ხელმძღვანელი,
ელ. ანდრონიკაშვილის სახელობის
ფიზიკის ინსტიტუტის მთავარი
მეცნიერ თანამშრომელი
ფიზ.-მათ.-მეცნ. დოქტორი

ნუგ ზარ ბაქრაძე



თბილისი 2009 წელი

ს ა რ ჩ ე გ ი

შესავალი – 4

I თავი. ლიტერატურული მიმოხილვა – 5

- § 1.1. მცენარის ფესვის სტრუქტურა – 5
- § 1.2. მცენარეული უჯრედი – 7
- § 1.3. პლაზმური მემბრანის სტრუქტურა და განჭოლადობა – 10
- § 1.4. 0°C ქვემოთ გაცივებისას უჯრედებში მიმდინარე პროცესები – 22
- § 1.5. შიდაუჯრედული ცინულის ფორმირების მექანიზმები და ზოგადი ცნებები კრისტალების წარმოქმნის თეორიიდან – 29
- § 1.6. დაბალტემპერატურული სკანირებადი დიფერენციალური მიკროკალორიმეტრია – 33

II თავი. კვლევის მეთოდი და საკვლევი ობიექტი – 51

- § 2.1. საკვლევი ნიმუშები – 51
- § 2.2. დაბალტემპერატურული დიფერენციალური სკანირებადი რევერსიული მიკროკალორიმეტრი – 53
- § 2.3. ექსპერიმენტალური მრუდების დამუშავება – 57

III თავი. შედეგები და განხილვა – 59

- § 3.1. ნიმუშში არსებული წყლის კრისტალიზაციისა და ცინულის დნობის პროცესების ამსახველი კალორიმეტრიული მრუდების ზოგადი აღწერა – 59
- § 3.2. ცინულის მდგრადი ჩანასახის წარმოქმნის ალბათობა, როგორც ტემპერატურისა და დროის ფუნქცია – 61
- § 3.3. ნიმუშის გაცივების პროცესში სხვადასხვა ეტაპზე გაყინული წყლის იდენტიფიკაცია და კრისტალიზაციის პირველ ეტაპზე მიმდინარე პროცესების სცენარი – 61
- § 3.4. ცინულის დნობის პროცესის ამსახველი ურთიერთგადაფარული კალორიმეტრიული პიკების იდენტიფიკაცია და კრისტალიზაციისა და დნობის მაქსიმუმებს შორის ურთიერთშესაბამისობის დადგენა – 64
- § 3.5. წყლის კრისტალიზაციის დაბალტემპერატურული პროცესი – 70
- § 3.6. ოსმოსური წნევები უჯრედშიდა და -გარე მოცულობებში – 71

§ 3.7. წყლის ფაზური გადასვლის დროს ახალი ფაზის წარმოქმნის
იმტენსივობის განსაზღვრა – 76

§ 3.8. კორელაციები წყლის გადაციების ტემპერატურას, წონასწორული
ფაზური გადასვლის ტემპერატურას, გადაციებასა და ქსოვილის
წყლის შემცველობას შორის – 81

დასკვნები – 91

ციტირებული ლიტერატურა – 93

შესავალი

მცენარეთა ცხოველქმედების პროცესები, ისევე როგორც ზოგადად ცოცხალი ორგანიზმებისა, მიმდინარეობს წყლის გარემოში და მნიშვნელოვანწილად განისაზღვრება წყლისა და სხვადასხვა ნივთიერებათა წყალხსნარების უნიკალური ფიზიკური და ქიმიური თვისებებით. წყალი ახდენს ბიოლოგიურად აქტიური მაკრომოლეკულების სტრუქტურისა და გამომდინარე აქედან უჯრედის, ქსოვილისა და მთლიანად ორგანიზმის სტაბილიზაციას. წყალი არის გამხსნელი როგორც მინერალური ნივთიერებებისა, რომლებიც წყალთან ერთად მიეწოდება მცენარეულ ორგანიზმს ფესვის საშუალებით, აგრეთვე ფოტოსინთეზის პროდუქტებისა, რომლებიც აგრეთვე წყლის თანხლებით ტრანსპორტირდება მცენარეული ორგანიზმის სხვადასხვა ქსოვილებში.

წყლის მნიშვნელოვანი გადაციების უნარს მივყავართ საინტერესო შედეგებამდე: ორგანიზმის გაციებისას 0°C -ზე დაბალ ტემპერატურებზე პირველად კრისტალიზაციას განიცდის უჯრედგარე წყალი. ხოლო შემდეგ, განსაზღვრული რეჟიმით გაციებისას დაიძირება წყლის გამოსვლა უჯრედებიდან და კრისტალიზაცია უჯრედშორისში. 0°C -ზე დაბალ ტემპერატურებზე მიმდინარე პროცესების შესასწავლად ჩატარებულია და კვლავ ტარდება მრავალი კვლევა, როგორც ექსპერიმენტალური ასევე თეორიული. აღნიშნული კვლევები მეტწილად ეძღვნება ცხოველურ უჯრედებსა და ქსოვილებს, ძირითადად კონსერვაციის პრობლემებს.

ჩატარებულია აგრეთვე კვლევები, ძირითადად ექსპერიმენტალური, რომლებიც ეძღვნება მცენარეული ორგანიზმების მედეგობას დაბალი ტემპერატურების მიმართ.

ბიოლოგიურ სისტემებში წყლის მდგომარეობისა და კრისტალიზაციის პროცესის ექსპერიმენტალური კვლევისას საკმაოდ ინფორმაციულია კალორიმეტრიული მეთოდი. ქსოვილში წყლის ნაკადებთან დაკავსირებული პროცესების თეორიული აღწერისათვის გამოიყენება არაწონასწორული თერმოდინამიკის მეთოდები.

წინამდებარე შრომაში არის მცდელობა აღიწეროს მცენარეულ ქსოვილებში მიმდინარე პროცესები და მათი თავისებურებები 0°C -ე დაბალ ტემპერატურებზე. ამ მიზნით შექმნილია დაბალტემპერატურული, ახალი ტიპის დიფერენციალური რევერსიული სკანირებადი მიკროკალორიმეტრი, რომლის კონსტრუირებისას გათვალისწინებული იყო ამ კონკრეტული ამოცანის მოთხოვნები. თუმცა აღნიშნული მოდელის კალორიმეტრის გამოყენება შესაძლებელია სხვა ამოცანებისთვისაც.

I თავი. ლიტერატურული მიმოხილვა

§1.1. ფესვის სტრუქტურა [1]

ფესვის სისტემას აქვს სამი ძირითადი ფუნქცია: 1 მცენარის ფიქსაცია ნიადაგზე; 2 წყლისა და მინერალების აღსორბცია ნიადაგიდან; 3 ფოთლებში მიმდინარე ფოტოსინთეზის შედეგად მიღებული პროდუქტის შენახვა. ფესვის სტრუქტურა არის საკმაოდ რთული, იგი შეიძლება შესდგებოდეს მილიონობით განშტოებებისაგან, რომელთა ჯამური სიგრძე აღწევს 600 კილომეტრს, შეიძლება ჰქონდეს რამდენიმე მილიარდი ფესვური თმა და ჯამური ზედაპირის ფართობი ფესვებისა და თმებისა შეიძლება იყოს 1000 მ².

ფესვის განვითარება

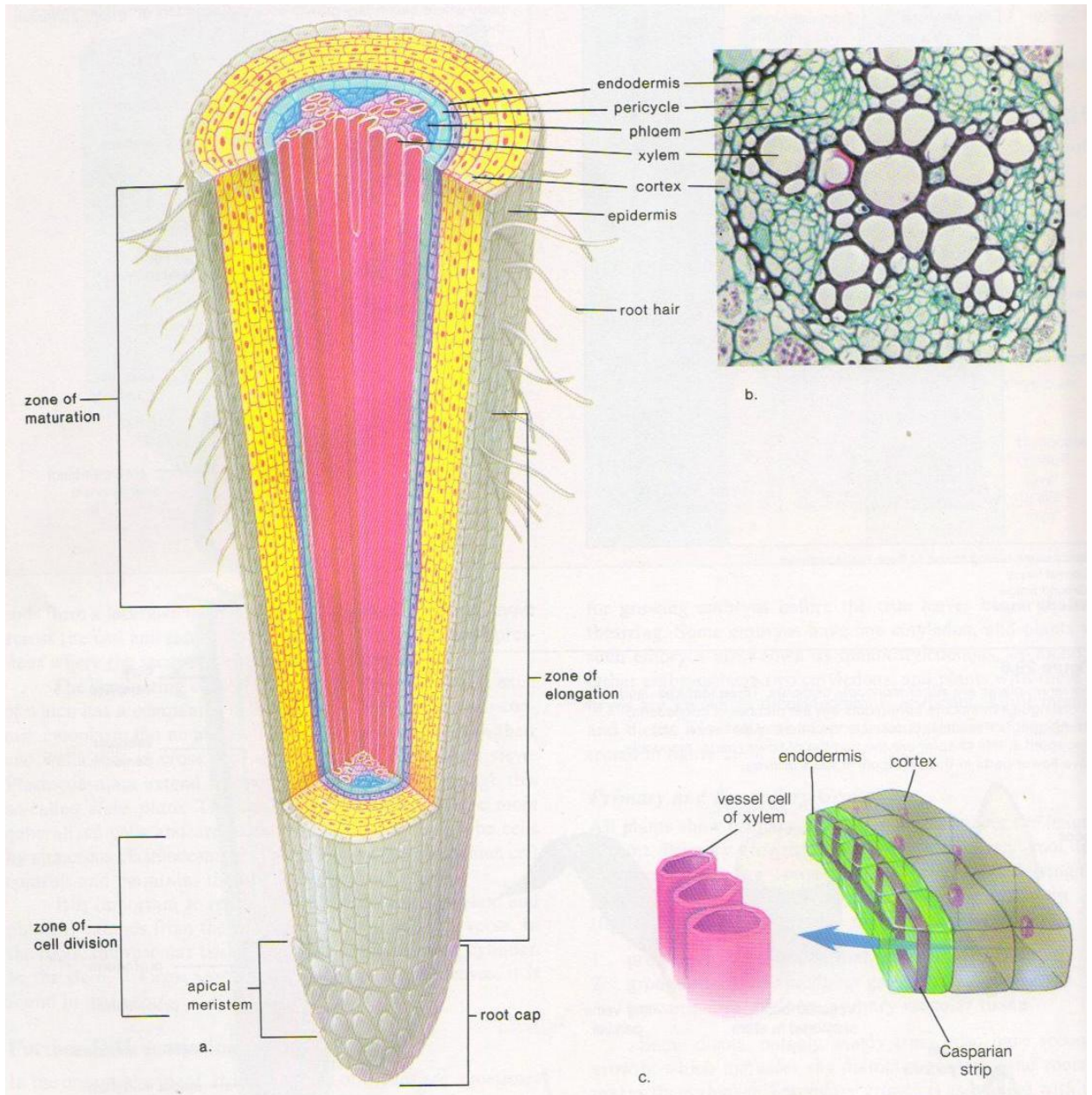
სურ. 1-ზე ნაჩვენებია ფესვის სამი განსხვავებული უბანი, რომლებშიც უჯრედები იმყოფებიან დიფერენციაციის სხვადასხვა ეტაპზე. დასაწყისში არის უჯრედების დაყოფის ზონა (ეპიკალური მერისტემა), უჯრედები განუწყვეტლივ ემატება ფესვის “ქუდს” (ფესვის უშუალოდ ბოლო ნაწილი), რომელიც არის ფესვის წვეროს დამცავი საფარი. ფესვის ქუდის უჯრედები მუდმივად იცვლება, რადგან ისინი იქერცლება ნიადაგში უხეშ სხეულებთან ურთიერთქმედების შედეგად. დაყოფის ზონის ზემოდ, უჯრედები არიან სპეციალიზაციის სტადიაში – დაყოფნების ზონა. და ბოლოს არის ფესვის უბანი, რომელშიც უჯრედები უკვე სპეციალიზებული და საბოლოო სახით ჩამოყალიბებულია – სიმწიფის ზონა. სიმწიფის ზონის იდენტიფიცირება შესაძლებელია ფესვური თმებით, რომელსაც წარმოშობს აღნიშნული ზონის ეპიდერმული უჯრედები. ფესვური თმები ძალიან მნიშვნელოვნად ზრდიან ფესვის აღსორბციული უნარის მქონე ზედაპირის ფართობს.

ფესვის სიმწიფის ზონაში არსებული ძირითადი ქსოვილები

ეპიდერმისი. ეპიდერმისი ფესვის გარე შრეა, რომელიც შეიცავს უჯრედების მონოფენას. ეპიდერმული ქსოვილების უჯრედებს ძირითადად აქვთ თხელი უჯრედის გარსი და აქვთ მართკუთხა პარალელეპიპედის ფორმა. სიმწიფის ზონაში მათ უმეტესობას აქვთ ფესვური თმა, რომელიც სიგრძეში შეიძლება აღწევდეს 8 მმ-ს.

კორტექსი. ეპიდერმისის შემდეგ განლაგებულია დიდი ზომის თხელკედლიანი უჯრედული გარსის მქონე ფარენჰიმული უჯრედები, რომლებიც ქმნიან ფესვის კორტექსს. ეს უწესრიგი ფორმის უჯრედები მეჩხრადაა განლაგებული და წყალსა და მინერალებს შეუძლიათ გაიარონ კორტექსი უჯრედების განჭოლის გარეშე. კორტექსი ასრულებს საკვების შემნახველის ფუნქციას, მისი უჯრედები შეიცავენ სახამებლის გრანულებს.

ენდოდერმა. ენდოდერმული ქსოვილი ეპიდერმისის მსგავსად შეიცავს უჯრედების მონოფენას, რომელთაც აქვთ აგრეთვე მართკუთხა პარალელეპიპედის ფორმა. ენდოდერმა წარმოადგენს საზღვარს კორტექსსა და ვასკულარულ ცილინდრს შორის. უჯრედები კომპაქტურადაა განლაგებული ისე, რომ თითოეული უჯრედი დაკავშირებულია ოთხ მეზობელ უჯრედთან ცილოვანი ზონარით – კასპარის ზონარით. აღნიშნული ზონარი საშუალებას არ აძლევს წყალსა და მინერალურ იონებს გაიარონ უჯრედებს შორის. ამგვარად მათ უხდებათ განჭოლონ უშუალოდ ენდოდერმული უჯრედები. სავარაუდოდ ენდოდერმა არეგულირებს მოლეკულების შეღწევადობას ვასკულარულ ცილინდრში.



სურათი 1. ფესვის სტრუქტურა. [1]

ვასკულარული ცილინდრი. ვასკულარული ცილინდრის პირველი გარე ფენა არის პერიციკლი. პერიციკლი შედგება უჯრედების ერთი ან ორი (იშვიათად რამოდენიმე) შრისაგან და განლაგებულია მთლიანი რგოლის სახით ენდოთელის ქვეშ. პერიციკლის უჯრედებს აქვთ უნარი უზრუნველყოს გვერდითი და დამატებითი ფესვების და აგრეთვე სხვა სტრუქტურების ჩასდახვა. ვასკულარული ცილინდრი შეიცავს აგრეთვე ვარსკვლავის ფორმის ქსილემას და ფლოემას, რომელიც განლაგებულია ქსილემის ქიმებს შორის. ქსილემის საშუალებით ხდება წყლისა და არაორგანული საკვები ნივთიერებების მოძრაობა ქვევიდან ზევით. ხოლო ფლოემის საშუალებით ხდება წყალში გახსნილი ორგანული ნივთიერებების გადაადგილება ფოთლებიდან ღეროსა და შემდეგ ფესვებში (დაღმავალი ნაკადი).

§1.2. მცენარეული უჯრედი

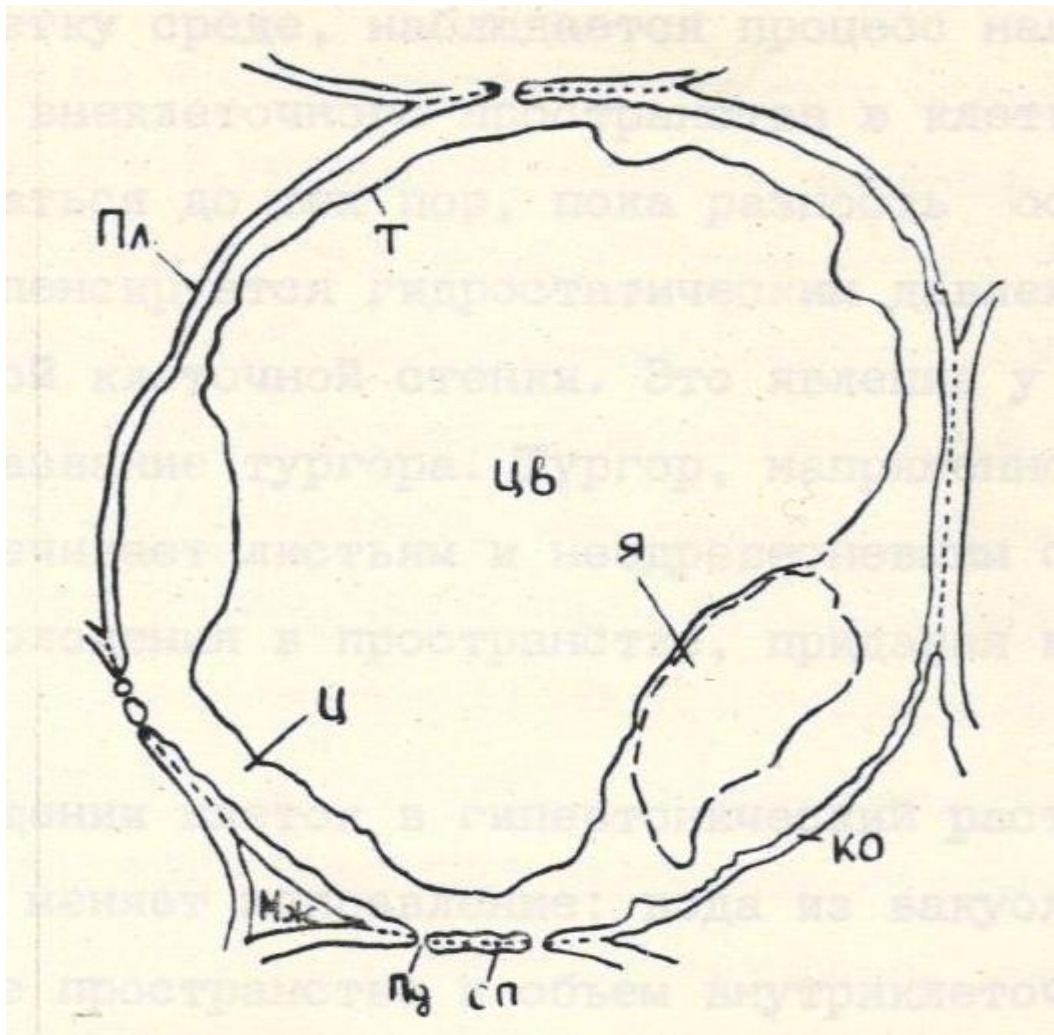
მცენარეულ უჯრედს, ისევე როგორც ცხოველურს, გააჩნია საკმაოდ რთული სტრუქტურა. თუმცა იმის გამო, რომ ნაშრომში დასმული ამოცანა არ მოითხოვს უჯრედის ყველა შემადგენელი კომპონენტების სტრუქტურისა და ფუნქციის განხილვას, ჩვენ შემოვიფარგლებით შედარებით გამარტივებული მოდელის განხილვით. მცენარეული უჯრედის აღწერისას გამოყენებული იქნა კარგად ცნობილი ლიტერატურული მონაცემები [2].

ზრდასრული მცენარეული უჯრედი შეიძლება განვიხილოთ როგორც სამი ძირითადი კომპონენტის ერთობლიობა: 1. მეტნაკლებად ხისტი ცელულოზის გარსი; 2. უჯრედის ცენტრალურ ნაწილში განთავსებული ვაკუოლი, რომელიც შეიცავს უჯრედის წვენს; 3. პროტოპლასტი, რომელიც მოთავსებულია ვაკუოლსა და ცელულოზურ გარს შორის და მას ორივე მხრიდან გარს ერტყმის ნახევრადგანჭოლადი ცილოვან-ლიპიდური მემბრანები – ტონოპლასტი და პლაზმოლემა (სურ.2).

პროტოპლასტი წარმოადგენს რთულ სისტემას, რომელიც შეიცავს მრავალ კომპონენტს – ორგანელებს. პროტოპლასტის თითოეულ კომპონენტს გააჩნია სპეციფიური მახასიათებელი სტრუქტურა და ფუნქცია უჯრედში.

მცენარეული და ცხოველური უჯრედების ორგანელებს გააჩნიათ მსგავსი ქიმიური შემადგენლობა და მოლეკულური სტრუქტურული ორგანიზაცია, რაც განპირობებულია მათი ფუნქციების მსგავსებით. ამაში გამოიხატება მცენარეული და ცხოველური უჯრედების ცხოველქმედების პროცესების მსგავსი ბუნება. მაგრამ მათ შორის მნიშვნელოვანი განსხვავებებიც არსებობს. მცენარეული უჯრედების თავისებურება მდგომარეობს იმაში, რომ მას მყარი გარსი და ცენტრალური ვაკუოლი გააჩნია.

ვაკუოლი გვხვდება თითქმის ყველა მცენარეულ უჯრედში. ისინი წარმოადგენენ ღრუებს უჯრედებში, რომლებიც გავსებულია უჯრედული წვენით. პროტოპლასტისაგან უჯრედული წვენი იზოლირებულია შერჩევითად გამტარი ვაკუოლური მემბრანით – ტონოპლასტით. უმაღლესი მცენარეების უჯრედებისათვის დამახასიათებელია ცენტრალური ვაკუოლი, რომელიც, როგორც წესი იმდენად დიდია (უჯრედის მოცულობის 70-90%), რომ ციტოპლაზმა თავისი ორგანელებით განლაგებულია ვიწრო შრის სახით პლაზმოლემასა და ტონოპლასტს შორის.



სურათი 2. მცენარეული უჯრედის სქემატური გამოსახულება. ЦВ-ცენტრალური ვაკუოლი, Пл-პლაზმოლემა, Т-ტონოპლასტი, Я-ბირთვი, КФ-უჯრედის გარსი, ПД -პლაზმოდესმა, СХ-შუალედური დისკო, К-ციტოპლაზმა. [107]

ვაკუოლის შიგთავსი – უჯრედული წვენი – წარმოადგენს სხვადასხვა ნივთიერებების წყალხსნარს. ამგვარად, წყალი უჯრედული წვენის ძირითადი კომპონენტია. ქიმიური შემადგენლობით ვაკუოლის შიგთავსი მნიშვნელოვნად განსხვავდება პროტოპლასტისაგან.

მცენარეულ უჯრედში ვაკუოლი მნიშვნელოვან ფუნქციებს ასრულებს, მათ შორისაა ტურგორის შენარჩუნება. ვინაიდან იონებისა და შაქრების კონცენტრაცია ცენტრალური ვაკუოლის უჯრედულ წვენში მეტია, ვიდრე უჯრედის გარე არეში და ვაკუოლი შემოფარგლულია ტონოპლასტით, რომელიც მნიშვნელოვნად ამცირებს მისგან ამ ნივთიერების დიფუზიას, საკმარისი წყალმომარაგების შემთხვევაში ვაკუოლში შედის წყალი, რომლისათვის ტონოპლასტი თავისუფლად გამტარია. უჯრედული წვენი ქმნის წნევას პროტოპლასტზე და შესაბამისად უჯრედის გარსზე, იწვევს მის დაძაბულობას ანუ უჯრედის ტურგორს [3].

უჯრედს თუ მოვათავსებთ რომელიმე მარილის ან შაქრის ჰიპერტონულ ხსნარში (უჯრედულ წვენზე მეტი ოსმოსური კონცენტრაციის მქონე ხსნარში), დაიწყება წყლის გამოსვლა ვაკუოლიდან. ამ პროცესის შედეგად უჯრედის მოცულობა მცირდება, ელასტიური პლაზმოლემა გარსს შორდება – გადაადგილდება უჯრედის ცენტრის მიმართულებით, ტურგორი ქრება და იწყება უჯრედის პლაზმოლიზი (სურ.6) [3,7].

ჩვეულებრივ პლაზმოლიზი შექცევადია – უჯრედის ჰიპერტონურ ხსნარში გადატანისას წყალი ისევ შედის ცენტრალურ ვაკუოლში, პლაზმური მემბრანა ისევ ეკვრის გარსს და ტურგორი აღდგება.

მტკიცე გარსის არსებობა – დამახასიათებელია მცენარეული უჯრედებისათვის, ცხოველურისაგან განსხვავებით. უჯრედს გარსი ანიჭებს გარკვეულ ფორმას და სიმტკიცეს. იგი იცავს უჯრედის ცოცხალ შემადგენლობას – პროტოპლასტს და პლაზმოლემას. ჩვეულებრივ პირობებში გარსის გარეშე მცენარეული უჯრედის არსებობა შეუძლებელია, რადგან მისთვის დამახასიათებელი ტურგორული წნევა აუცილებლად გამოიწვევდა პლაზმოლემის გარღვევას და პროტოპლასტის დაზიანებას. გარსი პროტოპლასტის მიერ იქმნება უჯრედის განვითარების პროცესში და ამიტომაც შეიძლება ჩამოყალიბდეს მხოლოდ მასთან კონტაქტში. გარსი არ წარმოადგენს დაბრკოლებას წყლის მოლეკულებისა და მასში გახსნილი დაბალმოლეკულური ნივთიერებების გადაადგილებისათვის.

უჯრედული გარსი ძირითადად აგებულია პოლისაქარიდებისაგან, რომელთა მონომერები ერთმანეთთან ჯაჭვის სახით გლიკოზიდური კავშირებით შეკრული შაქრებია. პოლისაქარიდების გარდა გარსის შემადგენლობაში შედიან ცილები, მინერალური მარილები, ლიპიდები. ჩვეულებრივ გარსი გაუღებელია წყლით.

უმაღლესი მცენარეების უჯრედის გარსის ჩონჩხს წარმოადგენს ცელულოზა. გარსში მისი ძაფისებრი მოლეკულები ერთმანეთის მიმართ პარალელურად არიან განლაგებულნი და ათეულობით ჯგუფდებიან ისე, რომ იქმნება სამგანზომილებიანი მესერი, ისეთი როგორც დამახასიათებელია კრისტალებისათვის [7].

ეს დაჯგუფებები, რომელთა შექმნაში მონაწილეობს კოვალენტური და წყალბადური კავშირები, შეადგენენ მიკროფიბრილების საფუძველს, ბოჭკოებს, რომლებიც ქმნიან გარსის ჩონჩხს. მიკროფიბრილების დიამეტრი სხვადასხვა

უჯრედებისათვის სხვადასხვაა (10 - 30 ნმ), ხოლო სიგრძე შეიძლება აღწევდეს რამოდენიმე მიკრომეტრს [7].

უჯრედის გარსისაგან განსხვავებით ტონოპლასტი და პლაზმოლემა გარკვეულ დაბრკოლებას წარმოადგენს გახსნილი ნივთიერებებისათვის, რის შედეგადაც უჯრედებს გააჩნია ოსმოსური სისტემების თვისებები. მემბრანები ქმნიან ზღუდეს ციტოპლაზმასა და ცენტრალურ ვაკუოლს, და აგრეთვე ციტოპლაზმასა და უჯრედშორისს შორის.

მცენარეული უჯრედის, როგორც ოსმოსური სისტემის განხილვისას, ჩვენ ვივარაუდებთ, რომ ციტოპლაზმა, ტონოპლასტისა და პლაზმოლემის ჩათვლით – წარმოადგენს ნახევრადგამჭობლ ზღუდეს, რომელიც უჯრედის ოსმოსურ თვისებებს განაპირობებს.

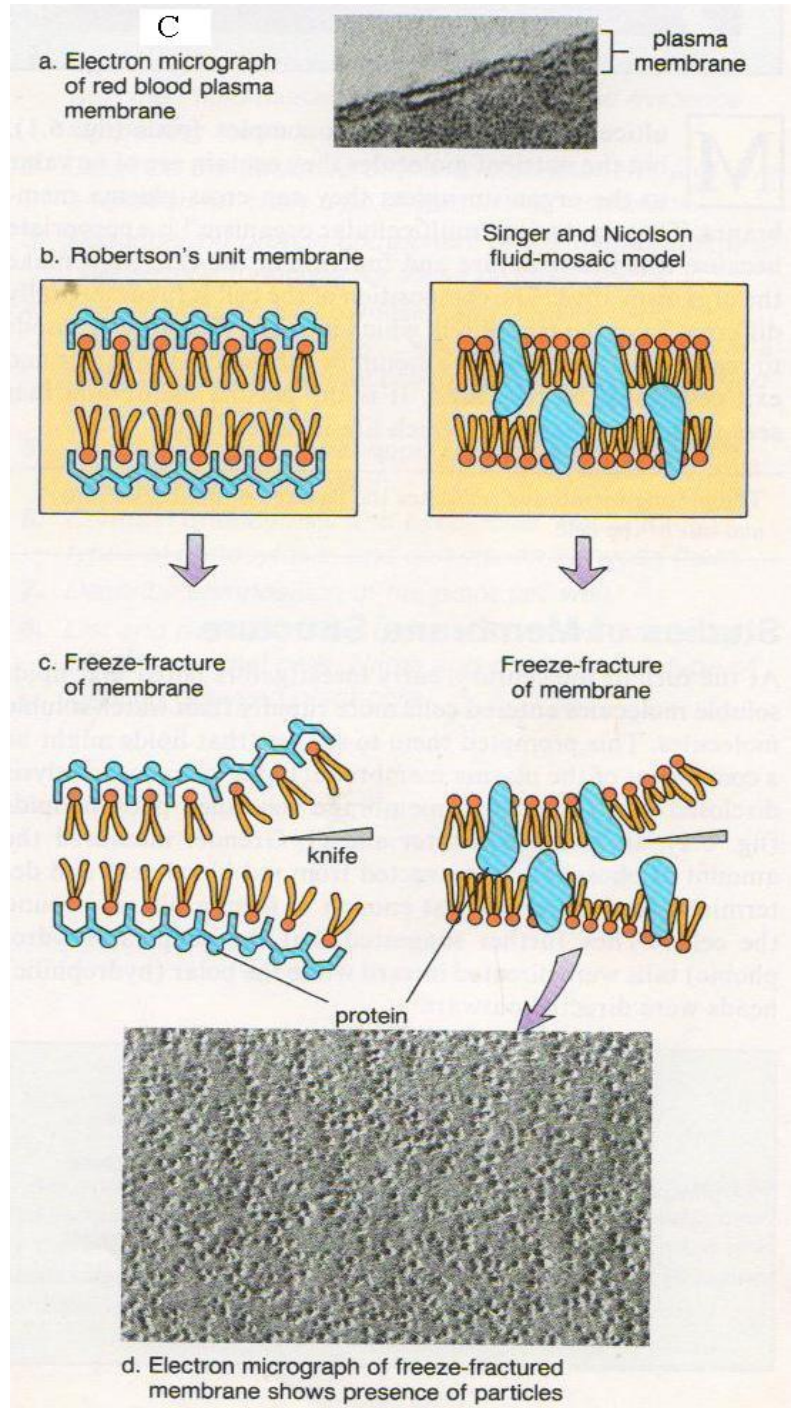
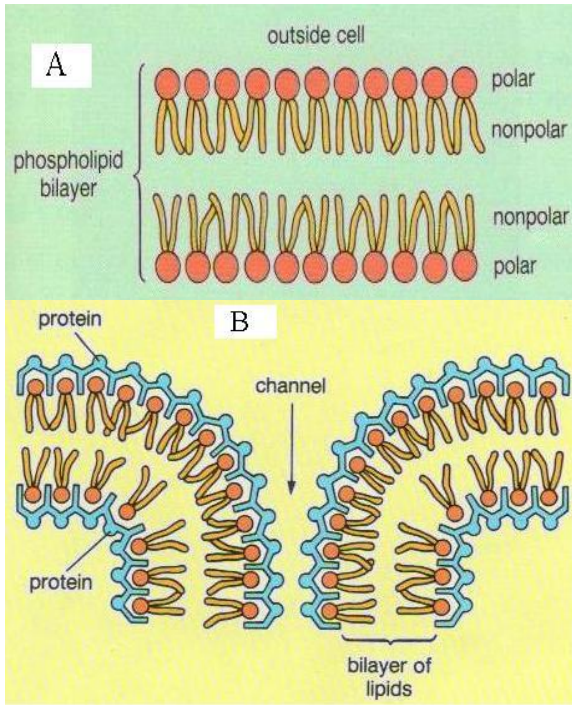
§1.3. პლაზმური მემბრანის სტრუქტურა და განჭოლადობა

მრავალუჯრედიანი ცხოველები იღებენ კომპლექსურ საკვებს, მაგრამ საკვები მოლეკულები არ წარმოადგენს ღირებულებას ორგანიზმისთვის თუ მათ არ შეუძლიათ შეაღწიონ პლაზმურ მემბრანაში. უჯრედის კომპოზიცია არის ფუნდამენტალურად განსხვავებული გარემოსაგან რომელშიც იგი იმყოფება. ტიპი და რაოდენობა სუბსტანციებისა რომლებიც შედის და გამოდის უჯრედიდან არის რეგულირებადი. სწორედ პლაზმური მემბრანა ახდენს აღნიშნულ რეგულირებას, რომელზეც დამოკიდებულია სიცოცხლე.

მემბრანის სტრუქტურა [5-7]

გასული საუკუნის დასაწყისში მკვლევარებმა შენიშნეს, რომ ცხიმში ხსნადი მოლეკულები უჯრედში აღწევდნენ უფრო სწრაფად ვიდრე წყალში ხსნადი. ამ ფაქტის საფუძველზე მათ მიერ ნავარაუდები იყო, რომ პლაზმური მემბრანა უნდა შედგებოდეს ლიპიდებისაგან. მოგვიანებით ქიმიურმა ანალიზმა აჩვენა, რომ პლაზმური მემბრანა შეიცავდა ფოსფოლიპიდებს. 1925 წელს ე. გორტერმა და გ. გრენდელმა გაზომა სისხლის წითელი უჯრედებიდან ექსტრაგირებული ფოსფოლიპიდების რაოდენობა და დაადგინეს, რომ ფოსფოლიპიდების რაოდენობა იყო იმდენი, რომ შეექმნათ ბიშრე უჯრედის გარშემო. მათ შემდეგში შემოგვთავაზეს, რომ ლიპიდების არაპოლარული (ჰიდროფობული) კუდები მიმართული უნდა ყოფილიყო მემბრანის შიდა მხარეს, ხოლო პოლარული (ჰიდროფილური) თავები – გარე მიმართულებით (სურ.3A).

ლიპიდების არსებობა არ აღმოჩნდა საკმარისი პლაზმური მემბრანის ყველა თვისების ასახსნელად. რათა გათვალისწინებული ყოფილიყო მემბრანის განვლადობა გარკვეული არალიპიდური სუბსტანციების მიმართ, ჯ. დანიელისა და ჰ. დევსონის მიერ ნავარაუდები იყო, რომ მემბრანის შემადგენლობაში უნდა შედიოდეს გლობულარული ცილებიც. მათ შემოგვთავაზეს მემბრანის სტრუქტურის “სენდვიჩის” მოდელი, რომელშიც ფოსფოლიპიდების ბიშრე მოთავსებულია პროტეინების ორ შრეს შორის, რომლებიც განლაგებულია ისე, რომ ქმნიან არსებს, რომლებშიც პოლარულ სუბსტანციებს შეუძლიათ გავლა (სურ.3B).



სურათი 3. პლაზმური მემბრანის სტრუქტურა. [7]

50-იანი წლების ბოლოს ელექტრონული მიკროსკოპია განვითარდა ისე, რომ შესაძლებელი იყო პლაზმური მემბრანისა და უჯრედში არსებული სხვა მემბრანების დამზერა (სურ. 3C), ჯ. დ. რობერტსონის თანახმად გარე მუქი შრე (მძიმე მეტალებით შეღებილი) შეიცავს პროტეინებისა და ფოსფოლიპიდების ჰიდროფილურ თავებს. შიდა ნაწილი არის ჰიდროფობული კუდები. რობერტსონი მივიდა იმ ვარაუდამდე, რომ უჯრედში ყველა მემბრანას აქვს ერთი კომპოზიცია და ამ მოდელს ეწოდა “ელემენტარული მემბრანის” მოდელი.

მემბრანის სტრუქტურის ეს მოდელი აღიარებული იყო სულ მცირე ათი წლის განმავლობაში, მიხედვად იმისა რომ მკვლევარებმა დაიწყეს ეჭვის შეტანა მის სიზუსტეში. მაგალითად ყველა მემბრანას არ ჰქონდა მსგავსი სახე ელექტრონულ მიკროგრაფებში, და აგრეთვე მათ აშკარად არ ჰქონდათ მსგავსი ფუნქციები. მიტოქონდრიების შიდა მემბრანა, რომელიც მონაწილეობას იღებს უჯრედის სუნთქვით პროცესში, დაფარულია რიგი ნაწილაკებით; შესაბამისად მათ აქვთ საკმაოდ განსხვავებული სახე და ფუნქცია ვიდრე პლაზმურ მემბრანას.

ბოლოს, 1972 წელს, ს. სინგერმა და გ. ნიკოლსონმა წარმოადგინა მემბრანის სტრუქტურის თხევად-მოზაიკური მოდელი, რომელის თანახმადაც მემბრანა არის ფოსფოლიპიდების ბიშრე, რომელსაც აქვს თხევადი ცხიმის კონსისტენცია, რომელშიც პროტეინის მოლეკულები ჩაძირულია ნაწილობრივ ან მთლიანად. პროტეინები გაბნეულია მემბრანაზე ისე რომ ქმნიან მოზაიკურ სურათს (სურ.4). მემბრანის სტრუქტურის თხევად კრისტალური მოდელი განსაკუთრებით მხარდაჭერილ იქნა გაყინული და ფრაქცირებული მემბრანების ელექტრონული მიკროგრაფიით. აღნიშნული მოდელი ამჟამადაც ფართოდ გამოიყენება.

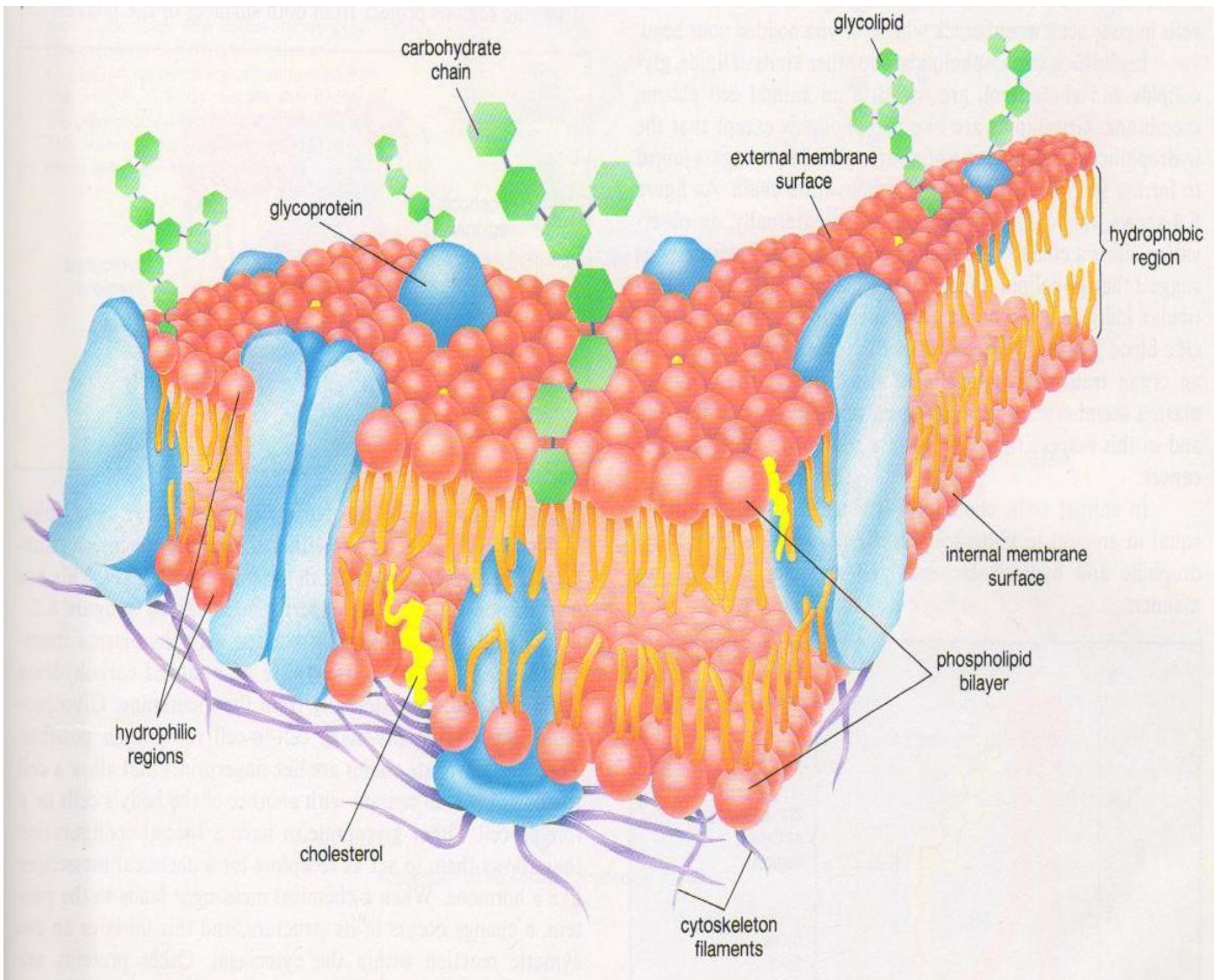
პლაზმური მემბრანის შესახებ წარმოდგენები იცვლებოდა წლების განმავლობაში. იყო რამდენიმე მოდელი. ყოველი მომდევნო მოდელი ანვითარებდა წინამორბედს, რათა მორგებოდა ჭეშმარიტ სურათს. ეს არის კარგი ილუსტრაცია იმ ფაქტისა, რომ მეცნიერული ცოდნა ყოველთვის ცვლილებების საგანია და ხდება მოდიფიკაციები როგორც კი ხელმისაწვდომი ხდება ახალი მონაცემები. მოდელი ხელსაყრელია რადგან იგი ითავსებს ხელმისაწვდომ ინფორმაციას და გვეკარნახობს კვლევის ახალ მიმართულებებს.

პლაზმური მემბრანის თხევად-მოზაიკური მოდელი

მემბრანის სტრუქტურის თხევად მოზაიკური მოდელი შედგება ორი ძირითადი კომპონენტისაგან – ლიპიდებისა და პროტეინებისაგან. ლიპიდები ქმნიან მემბრანის მატრიქსს, ხოლო პროტეინები კი განაპირობებენ მის ყველა სპეციფიურ ფუნქციას.

ლიპიდური კომპონენტები. პლაზმურ მემბრანაში ლიპიდების უმრავლესობა ფოსფოლიპიდია. ლაბორატორიულ კონტინერში ფოსფოლიპიდები სპონტანურად ქმნიან ბიშრეს ისე რომ ჰიდროფილური თავები მიმართულია წყლისკენ ორივე მხარეს, ხოლო ჰიდროფობული კუდები ერიდება წყალთან კონტაქტს და მიმართულია მემბრანის სიღრმეში. ამგვარად კუდები არაა კონტაქტში წყალთან, ფოსფოლიპიდების ბიშრე სპონტანურად იღებს სფეროს ფორმას – იგი ქმნის ბარიერს პლაზმური მემბრანის მსგავსად.

სხეულის ტემპერატურაზე პლაზმური მემბრანის ფოსფოლიპიდების ბიშრე არის თხევად მდგომარეობაში; მას აქვს ზეითუნის ზეთის კონსისტენცია. რაც მეტია გაუჯერებელი ცხიმოვანი მუკების ნაშთების რაოდენობა მით მეტად



სურათი 4. პლაზმური მემბრანის თხევად მოზაიკური მოდელი. [7]

დენადია ბიშრე. თითოეულ მონოშრეში ჰიდროკარბონის კუდები მოძრაობს და მთელ მოლექულას შეუძლია გადაადგილდეს გვერდითი მიმართულებით. (ფოსფოლიპიდის მოლექულები იშვიათად გადადიან ერთი შრიდან მეორეში, რადგან ამ შემთხვევაში ჰიდროფილურ თავს უწევს გაიაროს მემბრანის ჰიდროფობული ცენტრალური შრე). ფოსფოლიპიდების ბიშრის თხევადი მდომარეობა აგრეთვე ნიშნავს, რომ უჯრედები არის მოქნილი. ეს ერთ-ერთი აუცილებელი თვისებაა უჯრედისა, რადგან მათ ხშირად უხდებათ დეფორმაციები.

ფოსფოლიპიდების გარდა ცხოველური უჯრედის პლაზმურ მემბრანაში გვხვდება კიდევ ორი ტიპის ლიპიდი – გლიკოლიპიდები და ქოლესტეროლი. გლიკოლიპიდები ფოსფოლიპიდის მსგავსია, მაგრამ მათ აქვთ განსხვავებული ჰიდროფილური თავი, რომელიც წარმოდგენილია მრავალფეროვანი მარტივი შაქრებით, რომლებიც დაკავშირებულია ერთმანეთთან ისე, რომ ქმნიან სწორ ან განშტოებების მქონე კარბოჰიდრატულ ჯაჭვს. როგორც სურ4-ზეა ნაჩვენები, ეს ჯაჭვები ყოველთვის პლაზმური მემბრანის გარე ზედაპირზეა განლაგებული. მკვლევარების აზრით გლიკოპროტეინები ახდენენ ამა თუ იმ კონკრეტული ინდივიდის კუთვნილი უჯრედების იდენტიფიცირებას. ამით შეიძლება აისხნას სისხლის სპეციფიური ჯგუფების არსებობა და აგრეთვე ის ფაქტი რომ ხშირად პაციენტის ორგანიზმი ვერ ეგუება ორგანოს ტრანსპლანტაციას. გლიკოლიპიდები აგრეთვე არეგულირებენ პლაზმური მემბრანის პროტეინების მოქმედებას, რომელიც დაკავშირებულია უჯრედის ზრდასთან.

ცხოველურ უჯრედებში, ქოლესტეროლი არის მნიშვნელოვანი მემბრანული ლიპიდი, ზომით ფოსფოლიპიდების ტოლი. ქოლესტეროლს აქვს ორივე ჰიდროფილური და ჰიდროფობული ბოლო. მემბრანაში ქოლესტეროლის ამცირებს მის განჭოლასდობას უმრავლესი ბიოლოგიური მოლექულები მიმართ.

პლაზმური მემბრანის ფოსფოლიპიდური ბიშრე ქმნის ჰიდროფობულ გაუმტარ ბარიერს, რომელიც ზღუდავს პოლარული (უმრავლესი ბიოლოგირი) მოლექულების გადაადგილებას მემბრანის გავლით. მაგრამ ასეთი მოლექულების ტრანსპორტი ხორციელდება მემბრანის პროტეინული კომპონენტების საშუალებით.

პროტეინული კომპონენტები. პლაზმურ მემბრანასთან ასოცირებული პროტეინები არის დაკავშირებული მემბრანის შიდა ზედაპირთან ან ჩაძირულია ლიპიდურ ბიშრეში. პროტეინებს ხშირად აქვთ ჰიდროფობული და ჰიდროფილური რეგიონები; ჰიდროფობული რეგიონები გვხვდება მემბრანის შიგნით, ხოლო ჰიდროფილური – ამოშვერილია ბიშრის ორივე ზედაპირიდან.

მიუხედავად იმისა, რომ პროტეინები ორიენტირებულია ისე, რომ სპეციფიური ჰიდროფილური რეგიონი ყოველთვის კონტაქტშია წყალთან, ხოლო ჰიდროფობული – ჩაძირულია ლიპიდურ ბიშრეში, მათ შეუძლიათ მოძრაობა განივად თხევად პლაზმურ მემბრანაში. თავისი ფუნქციების განსახორციელებლად ზოგიერთი მემბრანული ცილები თავისუფლად უნდა მოძრაობდნენ და გადაადგილდებოდნენ ლიპიდურ მატრიკსში.

მემბრანა არ შეიძლება განხილულ იქნას როგორც სტატიკური წარმონაქმნი, რომელიც დროში და სივრცეში არ იცვლის თავის ფორმას. პირიქით, შეიძლება წარმოვიდგინოთ მემბრანა როგორც დინამიური სისტემა, რომლის ცალკეული უბნები განუწყვეტლივ გადაეწყობიან ერთმანეთის მიმართ.

პლაზმურ მემბრანასთან ასოცირებული ზოგიერთი პროტეინი არის გლიკოპროტეინი; მათ დაკავშირებული აქვთ კარბოჰიდრატული ჯაჭვი, რომელიც მიმართულია უჯრედის გარე მიმართულებით. გლიკოპროტეინები, გლიკოლიპიდების მსგავსად, მონაწილეობას იღებენ უჯრედების ერთმანეთის მიმართ ამოცნობაში. მათი კარბოჰიდრატული ჯაჭვები არის თითის ანაბეჭდის მსგავსი, რომლებიც საშუალებას აძლევენ უჯრედს გამოიცნოს კონტაქტში არის ორგანიზმის სხვა უჯრედებთან თუ უცხო ორგანიზმის უჯრედთან. ზოგ გლიკოპროტეინს აქვს სპეციფიური კომფიგურაცია, რაც საშუალებას აძლევს მათ იმოქმედონ როგორც რეცეპტორებმა. როდესაც ქიმიური მესენჯერი უკავშირდება ცილას, მიმდინარეობს სტრუქტურული ცვლილებები, და ეს იწვევს ციტოპლაზმაში ფერმენტული რეაქციების ინიცირებას. ზოგი ცილა თავად არის ფერმენტი, რომლებიც მართავენ მეტაბოლურ რეაქციებს. ენდომემბრანული სისტემა მრავლად შეიცავს ამგვარ ფერმენტულ ცილებს.

პროტეინები მონაწილეობენ მემბრანის გავლით მოლეკულების ტრანსპორტში. ზოგიერთ მათგანს აქვს არხი, რომელშიც პოლარულ სუბსტანციას თავისუფლად შეუძლია გავლა; სხვები არის გადამტანები, რომლებიც იკავშირებენ სუბსტანციას და შველიან მას მემბრანის გავლაში.

მოლეკულების მოძრაობა პლაზმური მემბრანის გავლით [7]

პლაზმური მემბრანა აბსოლუტურად განჭოლადი რომ ყოფილიყო, ყველა სუბსტანცია გაივლიდა მასში დაბრკოლების გარეშე. თუმცა, დაკვირვებების შედეგად დადგენილია, რომ პლაზმური მემბრანა არის ნახევრად განჭოლადი; ანუ ნაწილი სუბსტანციებისათვის განვლადია ნაწილისათვის კი არა. პროტეინები ხშირად მონაწილეობენ სუბსტანციების ტრანსპორტში. აგრეთვე, ენდოციტოზისა და ეგზოციტოზის საშუალებით ხორციელდება დიდი ზომის მოლეკულების ტრანსპორტი უჯრედის შიგნით და ძალიან დიდი ზომის მოლეკულებისა – უჯრედის გარეთ. პლაზმური მემბრანა სელექციური გამტარია – მას გააჩნია სპეციალური მექანიზმი რათა არეგულიროს მოლეკულების ტრანსპორტი.

დიფუზია [10]. იონები და მოლეკულები ჰაერში და წყალში გამუდმებით მოძრაობენ ქაოსურად. თუმცა, შეიძლება დემონსტრირებული იყოს რომ მოლეკულების მოძრაობა უფრო ინტენსიურია მაღალი კონცენტრაციის უბნიდან დაბალი კონცენტრაციის უბნის მიმართულებით. მაგალითად, როდესაც საღებავის კრისტალს ვათავსებთ წყალში საღებავის მოლეკულები მოძრაობს ყველა მიმართულებით, მაგრამ ყველაზე ინტენსიურად მოძრაობს კონცენტრირებული უბნიდან გარე მიმართულებით. წყლის მოლეკულების მეტად ინტენსიური მოძრაობას კი აქვს საპირისპირო მიმართულება. საბოლოოდ საღებავის მოლეკულები თანაბრად ნაწილდება წყლის მთელ მოცულობაში. საღებავის და წყლის მოლეკულები კვლავ აგრძელებენ მოძრაობას, მაგრამ ყველა მიმართულებით მოძრაობა თანაბარია.

დიფუზია არის მოლეკულების მოძრაობა მაღალი კონცენტრაციის არიდან დაბალი კონცენტრაციის არის მიმართულებით. დიფუზია მიმდინარეობს სპონტანურად და არ მოითხოვს ენერჯიას. თუმცა იგი მოითხოვს

კონცენტრაციათა განსხვავებას. ზოგიერთი სუბსტანცია თავისუფლად დიფუნდირებს უჯრედის მემბრანაში. მაგალითად, რესპირატორული აირები – ჟანგბადი და ნახშირორჟანგი, დიფუნდირებს უჯრედის როგორც შიდა ასევე გარე მიმართულებით. როდესაც ჩვენ ჩავისუნთქავთ ჰაერს ფილტვის ალვეოლებში არის ჟანგბადის უფრო დიდი კონცენტრაცია ვიდრე სისხლის კაპილარებში რომლებიც ფარავენ ფილტვებს. დიფუზიის შედეგად ჟანგბადი გადადის ალვეოლებიდან კაპილარებში. წყალი არის კიდევ ერთი მოლეკულა რომელიც ადვილად დიფუნდირებს უჯრედის მემბრანაში და ეს ერთ-ერთი მნიშვნელოვანი ბიოლოგიური ფაქტია.

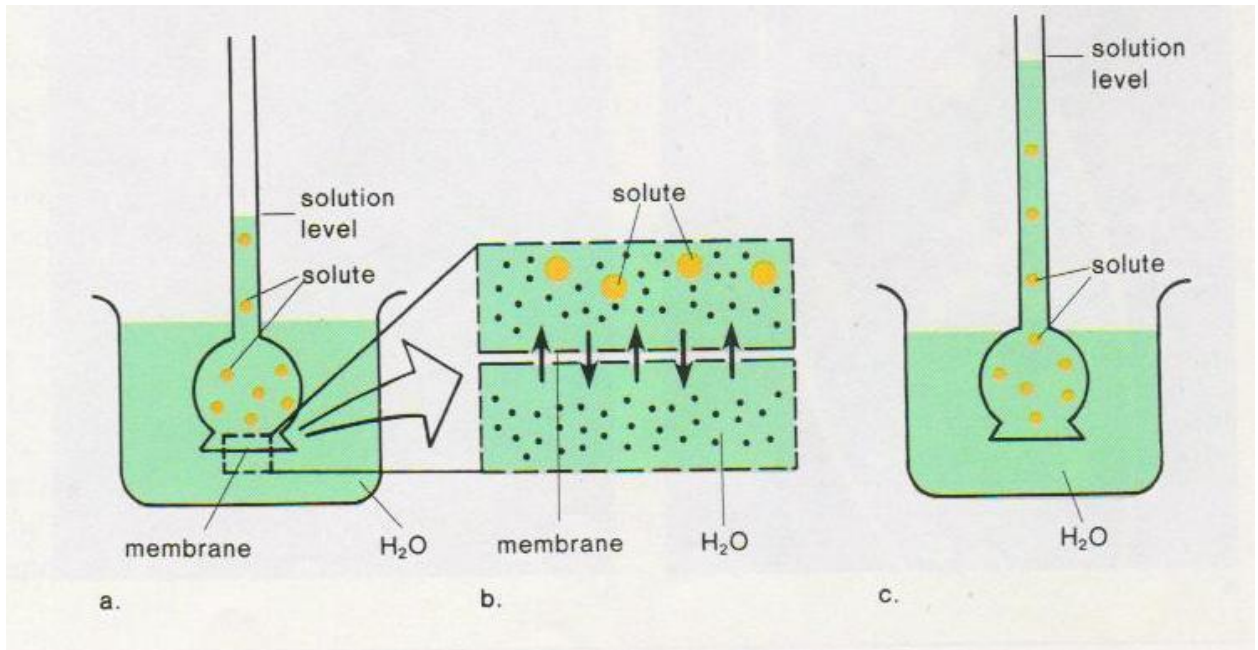
მხოლოდ რამდენიმე ტიპის მცირე ზომის მოლეკულა დიფუნდირებს თავისუფლად მემბრანაში.

ოსმოსი [8,9]. სელექტიურად გამტარ მემბრანაში წყლის დიფუზიას ოსმოსს უწოდებენ. ოსმოსის ილუსტრაციისათვის სინჯარა სელექტიურად გამტარი მემბრანის ფსკერით ჩაშვებულა დისტილირებულ წყალში (სურ.5). სინჯარაში არის ხსნარი რომელიც შეიცავს გახსნილ ნივთიერებასა (მაგალიტად შაქრის მოლეკულებს) და გამხსნელს (წყალს). ცხადია გახსნილი ნივთიერების დაბალი და გამხსნელის (წყლის) მაღალი კონცენტრაცია არის სინჯარის გარე მოცულობაში, ამგვარად წყლის მოლეკულები უფრო ინტენსიურად გადავა სინჯარაში. გახსნილ ნივთიერებას არ შეუძლია გაიაროს მემბრანა, რადგან მემბრანა არ არის განჭოლადი გახსნილი ნივთიერების მიმართ; ყოველივე ამის გამო ხსნარის დონე სინჯარაში იზრდება. ხსნარის საბოლოო დონე გვაძლევს იმფორმაციას, წყლის მოლეკულების მაღალი კონცენტრაციის არიდან დაბალი კონცენტრაციის არეში წყლის გადაღინების შედეგად, ოსმოსური წნევის სიდიდის შესახებ.

პლაზმური მემბრანა არ არის აბსოლტურად გაუმტარი გახსნილი ნივთიერებების მიმართ (შაქრების, მარილების), მაგრამ განსხვავება წყლისა და ამ ნივთიერებების მიმართ გამტარებლობაში იმდენად დიდია, რომ უჯრედები განიცდიან წყლის ოსმოსურ დინებას.

ოსმოსი არის წყლის დიფუზია სელექტიურად გამტარ მემბრანაში. ოსმოსური წნევა იქმნება როდესაც წყლის რაოდენობა იზრდება მემბრანის იმ მხარეს სადაც გვაქვს გახსნილი ნივთიერების მაღალი კონცენტრაცია.

ტონიციტი. უჯრედი შეიძლება მოვათავსოთ იზოტონურ, ჰიპოტონურ ან ჰიპერტონურ ხსნარში (სურ.6). იზოტონურ ხსნარში უჯრედი არც კარგავს და არც იმატებს წყალს, რადგან კონცენტრაცია გახსნილი ნივთიერებებისა და წყლის მოლეკულებისა ერთნაირია პლაზმური მემბრანის ორივე მხარეს. ცხოველური უჯრედები ძირითადად იმყოფებიან იზოტონურ პირობებში. მაგალითად, ადამიანის ქსოვილის სითხე რომელშიც იმყოფება უჯრედი ჩვეულებრივ იზოტონურია უჯრედის მიმართ. ჰიპოტონურ ხსნარში უჯრედში შედის წყალი, რადგან გახსნილი ნივთიერებების კონცენტრაცია უფრო დაბალია და წყლის კონცენტრაცია უფრო მაღალია ვიდრე უჯრედში. მცენარეები და წყალმცენარეები რომლებიც ცხოვრობენ მტკნარ წყლებში იმყოფებიან ჰიპოტონურ პირობებში. ციტოპლაზმა და ცენტრალური ვაკუოლი იწოვს წყალს და პლაზმური მემბრანა აწვება უჯრედის კედელს. წარმოიქმნება წნევა, რომელსაც ტურგორულ წნევას უწოდებენ. მცენარეები რომლებიც დგანან ნიადაგზე დამოკიდებულნი არიან ტურგორულ წნევაზე, რომელიც ეხმარება მცენარეს იყოს გამართულ მდგომარეობაში. ზოგიერთი ორგანიზმები, როგორებიცაა მაგალითად ზღვის თევზი, ცხოვრობენ ჰიპერტონურ გარემოში,



სურათი 5. წყლის ოსმოსური ნაკადი ნახევრადგანჭოლად მემბრანაში [7]

რომელშიც არის გახსნილი ნივთიერებების მაღალი კონცენტრაცია და წყლის დაბალი კონცენტრაცია ვიდრე უჯრედებში. რაიმე დამცავი მექანიზმის გარეშე, უჯრედები დაკარგავენ წყალს და თევზი დაიღუპებოდა დეჰიდრატაციისაგან. თუმცა, ზღვის თევზების ლაყუჩები სისხლს წმენდს მარილებისაგან და იგი ხდება იზოტონური უჯრედების მიმართ. ეს მაგალითები ახდენს ილუსტრაციას, რომ ორგანიზმებს განვითარებული აქვთ მექანიზმები რომლის საშუალებითაც უმკლავდებიან ტონიციტურ გარემოს.

ტრანსპორტი გადამტანების საშუალებით. მიუხედავად იმისა რომ ლიპიდური ბიშრე ზღუდავს უმრავლესი სუბსტანციების ტრანსპორტს, ბიოლოგიურად აქტიური მოლეკულები მაინც შედიან და ტოვებენ უჯრედს საკმაოდ სწრაფად, რადგან მემბრანაში არსებობს ტრანსპორტული სისტემა, რომელიც უზრუნველყოფს დროულ ტრანსპორტირებას. პლაზმურ მემბრანაში არის ტრანსპორტული ცილები, ისინი სპეციფიური არიან და კომბინირებენ მხოლოდ გარკვეული ტიპის მოლეკულასთან, რომლის ტრანსპორტირებასაც შემდგომში ახდენენ მემბრანის გავლით. გადამტანი ცილები იკავშირებენ რა სუბსტრატს განიცდიან კომფორმაციულ ცვლილებებს, რაც ხელს უწყობს ტრანსპორტს. მოლეკულების ტრანსპორტი მიმდინარეობს აგრეთვე არხების საშუალებით რომლებსაც ქმნის ცილები, რომლებიც განჭოლავენ მემბრანის მთელ სისქეს. α-სპირალურ ცილებს შეუძლია დეროსებრი სტრუქტურების ფორმირება [7], რომლებიც მემბრანის ზედაპირის მიმართ პერპენდიკულარულად განლაგებულნი არიან და განჭოლავენ მას. ცილოვანი დეროს ზედაპირის გარეგან მხარეს – ცილის ლიპოფილურ ამინომჟავურ ნაშთებს შეუძლიათ მემბრანის ლიპიდებთან ჰიდროფობული ურთიერთობა, ხოლო ცილების პოლარული ჯგუფები ქმნიან დეროს ცენტრს. ამგვარი ჰიდროფილური მონაკვეთები შეიძლება წარმოვიდგინათ ფორებად, ვინაიდან ჰიდროფილურ ნაწილაკებს შეუძლიათ მემბრანაში გამჭოლი დიფუნდირება.

ამგვარი ფორების სიცოცხლის ხანგრძლივობას განაპირობებენ გარკვეული გარე ფაქტორები. გარე ფაქტორებად შეიძლება ჩაითვალოს როგორც მემბრანების აქტიური ურთიერთქმედება ნივთიერებებთან, რომლებიც მემბრანებში ქმნიან ხანგრძლივ, სტაბილურ მემბრანულ ფორებს [7], აგრეთვე თვით მემბრანების დეფორმაციაც.

აქტიური ტრანსპორტი. აქტიური ტრანსპორტის საშუალებით ხდება მოლეკულების აკუმულირება უჯრედის შიგნით ან გარეთ მიუხედავად კონცენტრაციული გრადიენტის ზრდისა. მაგალითად მცენარის ფესვის უჯრედის პლაზმურ მემბრანას აქვს უნარი შეიწოვოს არაორგანული იონები ნიადაგიდან აქტიური ტრანსპორტის საშუალებით. ზღვის თევზების ლაყუჩებში როგორც უკვე ვთქვით უჯრედებს აქვთ უნარი გამოყონ მარილები.

აქტიური ტრანსპორტის დროს საჭიროა ცილოვანი გადამტანებიც და ენერჯის ხარჯვაც. ამ შემთხვევაში ენერჯის წყარო არის ATF რომელიც იშლება აღნიშნული პროცესის დროს.

ენდოციტოზი და ეგზოციტოზი. ზოგიერთი მოლეკულა საკმაოდ დიდია იმისათვის რომ გაიაროს მემბრანა ტრანსპორტული ცილების საშუალებით; მაგრამ ისინი მაინც ახერხებენ უჯრედში შეღწევას ვეძიკულების ფორმირების საშუალებით, ამ პროცესს ენდოციტოზი ეწოდება.

ენდოციტოზის საპირისპირო პროცესია ეგზოციტოზი. ეგზოციტოზის დროს ვედიკულა, რომელიც შეიცავს სატრანსპორტო ნივთიერებას, უერთდება მემბრანას და უჯრედგარედ დამოდევნის შიგთავსს.

თუ ენდოციტოზის დროს მცირდება მემბრანის ზედაპირის ფართობი ეგზოციტოზის დროს პირიქით იზრდება და ეს ორი პროცესი ერთმანეთს აკომპენსირებს.

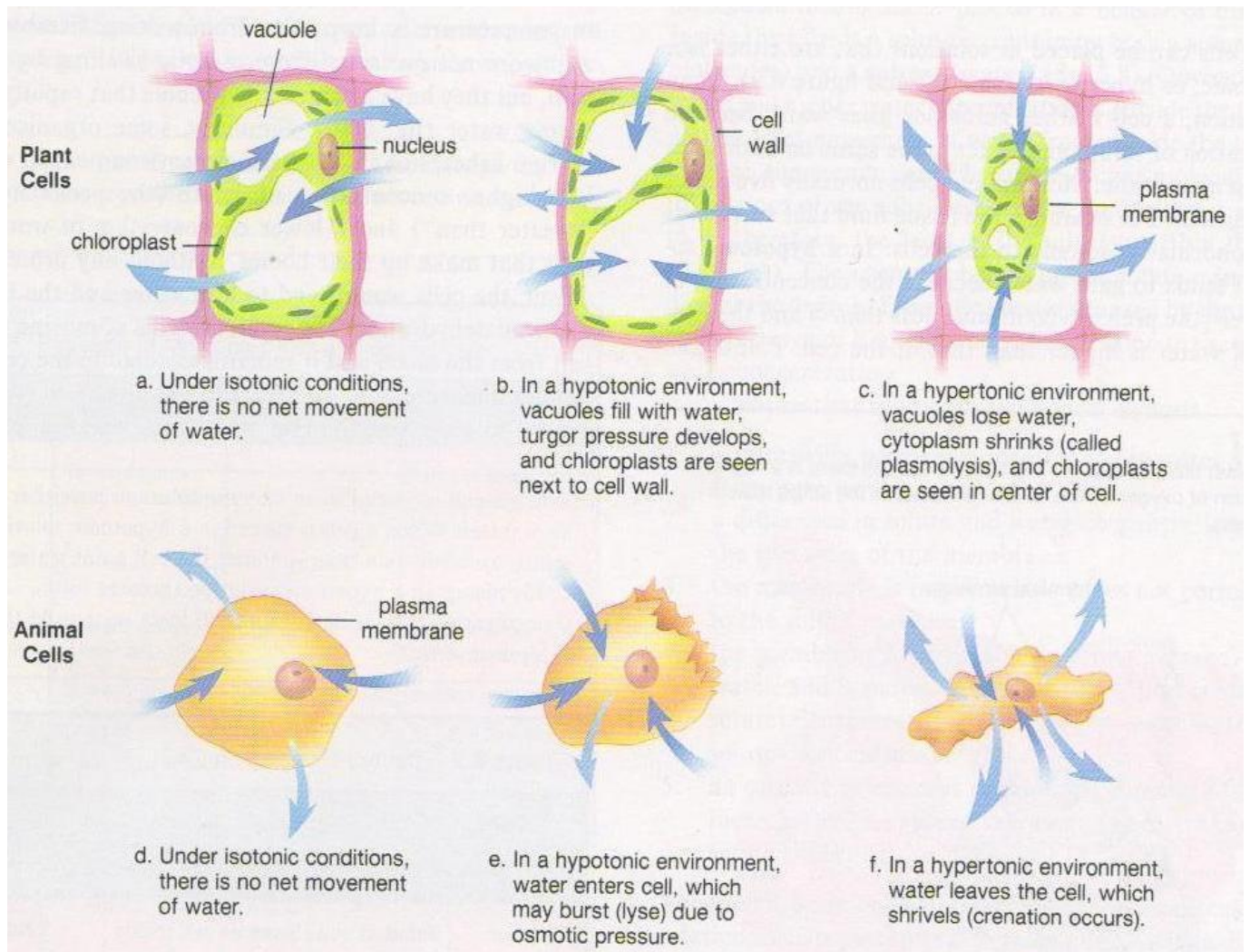
ენდოციტოზში მონაწილეობას იღებს აგრეთვე პლაზმური მემბრანის რეცეპტორული ცილები. ჩვეულებრივ ქოლესტეროლი აღწევს უჯრედში რეცეპტორული ენდოციტოზით. როდესაც ორგანიზმი განიცდის ამ პროცესისათვის საჭირო რეცეპტორების ნაკლებობას, ქოლესტეროლი აკუმულირდება არტერიებში სადაც შემდეგ ფორმირდებიან ტრომბოციტების სახით, რომელიც დაკავშირებულია ჰიპერტონიასა და გულსისძარღვთა დაავადებებთან.

მცენარეული უჯრედის კედელი [3]

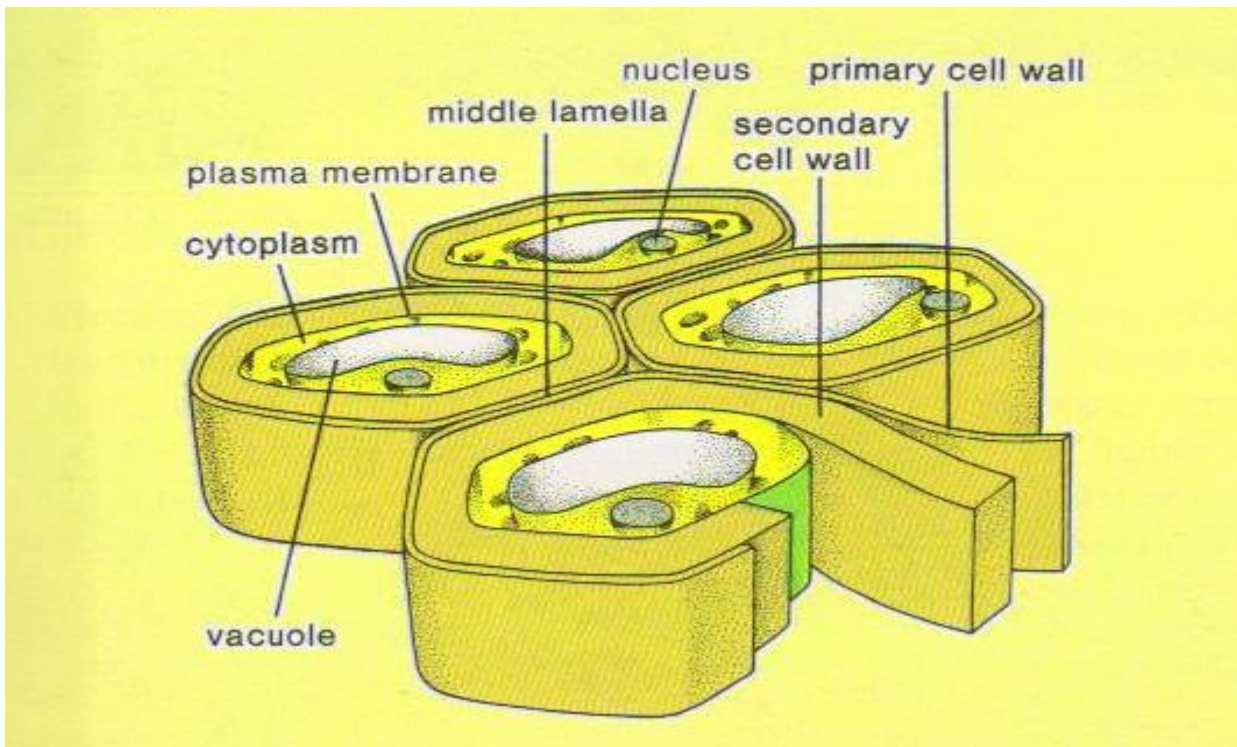
პლაზმური მემბრანა არის უჯრედის ყველაზე გარე ცოცხალი საზღვარი, მაგრამ მრავალ უჯრედს აქვს ფორმირებული მემბრანის გარე დამატებითი კომპონენტი. მაგალითად მცენარეულ უჯრედებს აქვთ უჯრედის კედელი, რომელიც თავისუფლად განჭოლადია წყლისა და მასში გახსნილი ნივთიერებების მიმართ და შესაბამისად ხელს არ უშლის პლაზმური მემბრანის ფუნქციონირებას.

მცენარეული უჯრედი გარდა პლაზმური მემბრანისა შემოსაზღვრულია უჯრედის კედლით (სურ.7) რომელთაც შეიძლება სხვადასხვა სისქე ჰქონდეთ, რაც დამოკიდებულია კედლის ფუნქციაზე. ყველა მცენარეულ უჯრედს აქვს პირველადი კედელი, რომლის მთავარი კომპონენტი არის ცელულოზური პოლიმერი, რომლებიც ქმნიან ძაფისმაგვარ მიკროფიბრილებს. პექტინი, წებოვანი ნივთიერება რომელიც გვხვდება შუა ლამელაში, ერთმანეთს აკრავს მეზობელ უჯრედებს. ხემცენარეების ზოგიერთ უჯრედს აქვს უჯრედის მეორადი კედელი, რომელიც ფორმირდება პირველადი კედლის შიგნით. მეორად კედელს აქვს დამატებითი ფენა ცელულოზური ფიბრილებისა რომელიც გამტკიცებულია ლიგნინით – ნივთიერებით რომელიც ანიჭებს სიმტკიცეს. ასეთი მეორადი კედელი მნიშვნელოვანია ხემცენარეების სტრუქტურაში.

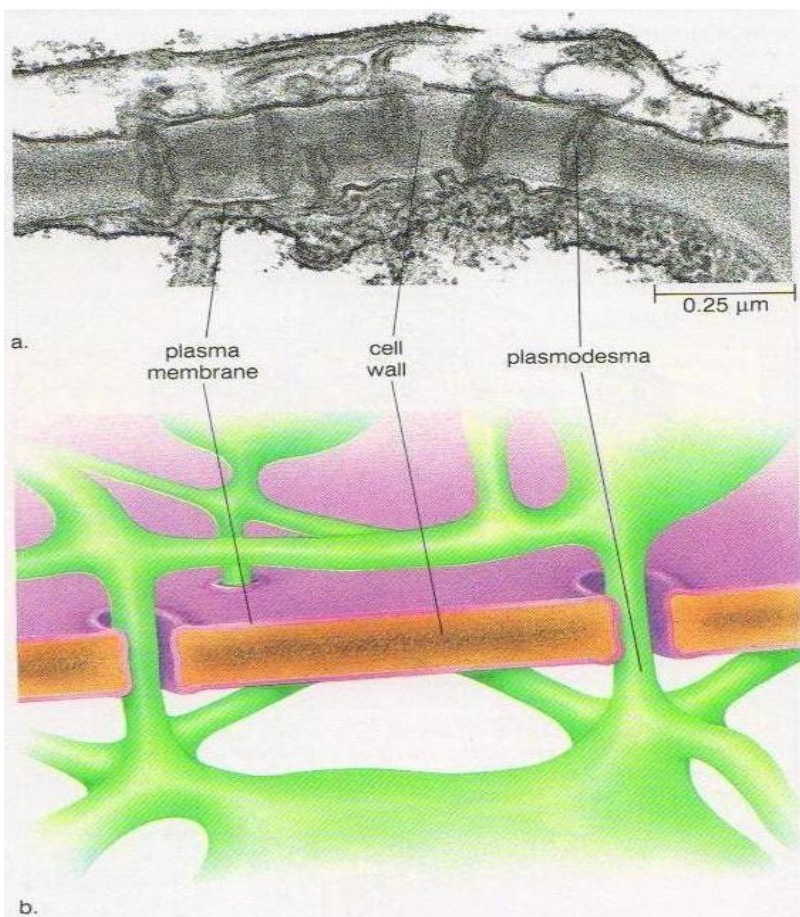
მცენარეულ ქსოვილებში მეზობელი უჯრედების ციტოპლაზმები ერთმანეთთან დაკავშირებულია მრავალი ვიწრო არხებით, რომლებიც განჭოლდებიან უჯრედის კედელს (სურ.8). აღნიშნული არხები უშუალოდ აკავშირებს ერთმანეთთან ციტოპლაზმებს.



სურათი 6. მცენარეული და ცხოველური უჯრედები იზოტონურ, ჰიპოტონურ და ჰიპერტონულ ხსნარებში. [7]



სურათი 7. მცენარეული უჯრედები. [7]



სურათი 8. უჯრედშორისი კავშირები. a - ელექტრონული მიკროსკოპია. b - სქემატური სურათი [7].

14. 0°C ქვემოთ გაცივებისას უჯრედებში მიმდინარე პროცესები [11-45.94]

მცენერებში წყლის კრისტალიზაციის პროცესების კალორიმეტრიული კვლევების დასაწყისი, დაკავშირებულია ტუმანოვისა და კრასავცევის სახელებთან, რომლებმაც 1955 წლიდან დაიწყეს აღნიშნული პროცესების კვლევა მრავალწლიანი მცენარეების ყინვაგამძლეობის პრობლემასთან დაკავშირებით. ნაშრომების ძირითადი შედეგები შეჯამებულია მონოგრაფიაში [114]. მათ ნაშრომებში შესწავლილი იყო მრავალწლიანი მცენარეების მთლიან ღეროებში წყლის კრისტალიზაციის პროცესები და დადგინდა ღეროებში ყინულის წარმოქმნის კანონზომიერებანი და აგრეთვე სიცივის მიმართ წრობის გავლენა ამ პროცესზე. სამწუხაროდ ავტორებს არ ჰქონდათ უჯრედშიდა და -გარე ყინულის წარმოქმნის პროცესების გარჩევის შესაძლებლობა და ამ პროცესების თავისებურებანის შესწავლა მცენარის სხვადასხვა ქსოვილებში.

უჯრედშიდა და -გარე ყინულის წარმოქმნის პროცესების შესახებ მნიშვნელოვანი მასალა შეგროვილია სამიგინის მონოგრაფიაში [101]. უჯრედებში წყლის კრისტალიზაციის პროცესებზე მიკროსკოპიული დაკვირვების შედეგად ავტორი მივიდა იმ დასკვნამდე, რომ ნიმუშის ნელი სიჩქარით გაცივებისას ყინული ძირითადად წარმოიქმნება უჯრედშორისში, ხოლო სწრაფი გაცივებისას ადგილი აქვს ყინულის ფორმირებას უჯრედის შიდა მოცულობაში. ავტორი აღნიშნავს, რომ გაცივების სიჩქარეთა ინტერვალს, რომლის დროსაც ადგილი აქვს უჯრედშიდა ყინულის ფორმირებას, განაპირობებს შესასწავლი მცენარის თავისებურებანი. უჯრედებიდან გადაცივებული წყლის უკუდენის შესაძლებლობა მნიშვნელოვნად განაპირობებს მცენარის დაბალი ტემპერატურისადმი მდგრადობას.

მიმოხილვაში [41] დიდი ყურადღება ეთმობა კალორიმეტრიულ კვლევებს, რომლებშიც დთა (დიფერენციალური თერმული ანალიზი) მრუდებზე დაბალტემპერატურული იზოთერმების გაჩენა დაკავშირებულია მცენარის სიკვდილთან. მცენარის გაყინვის ტემპერატურის შემცირებასა და ყინვაგამძლეობას შორის კავშირი განიხილება მონოგრაფიაში [46] და ნაშრომებში [47-49].

დაბალტემპერატურული ეგზოთერმები განხილული იყო აგრეთვე ნაშრომში [42], რომელშიც ნაჩვენებია, რომ *Hicory*-ის წყლიც გაყინვის პროცესის შესწავლისას, $-42 \div -47^{\circ}\text{C}$ ტემპერატურულ ინტერვალში შეინიშნება მრავალი პიკისაგან შემდგარი ეგზოთერმა. ტემპერატურულ სკალაზე დაბალტემპერატურული ეგზოთერმის განლაგების, გარემო პირობებზე დამოკიდებულება განიხილება ნაშრომში [111]. ნაჩვენებია, რომ ზოგიერთ სახეობის ხემცენარეებში გაზაფხულის დადგომისას დაბალტემპერატურული ეგზოთერმის საწყისი ტემპერატურა იზრდება.

ციტირებული ნაშრომების უმრავლესობაში კვლევები ჩატარებული იყო მცენარეთა მთლიან ღეროებზე. არ მომხდარა მცდელობა ნიმუშების დანაწევრება ცალკეულ ქსოვილებად და ცალკეულ ქსოვილებში წყლის კრისტალიზაციის პროცესების თავისებურებათა შესწავლა.

ამგვარი მცდელობა განხორციელდა ნაშრომში [45], რომელშიც ავტორებმა გადაცივებულ ქსილემაში ჩატარეს წყლის კრისტალიზაციის პროცესის კვლევა

და ნაჩვენები იქნა, რომ ნიმუშის გაცივების პროცესში ყინული უჯრედების შიგნით იქმნება ძირითადად ტემპერატურულ ინტერვალში $-22 \div -45^{\circ}\text{C}$.

არსებულ ლიტერატურაში დიდი ყურადღება ეთმობა ორგანიზმების (როგორც მცენარეული, აგრეთვე ცხოველური წარმოშობის) დაზიანების მექანიზმების გამოკვლევას, მათი 0°C ქვემოთ გაცივებისას. დაზიანების ძირითად მიზეზად ითვლება შიდაუჯრედული ყინულის ფორმირების პროცესი [50], რომლის დროსაც შეინიშნება მემბრანების დაზიანება [51,52]. მემბრანების კრიოდაზიანების მექანიზმებს ეძღვნება ბელოუსის და ბონდარენკოს მონოგრაფია [53].

მრავალწლიანი მცენარეების ერთ-ერთ საინტერესო თვისებად შეიძლება ჩაითვალოს გარემოს პირობებთან მათი შეგუების უნარი. დაბალი ტემპერატურების ზემოქმედების მიმართ (მცენარის წრთობის პროცესი) მცენარეთა ადაპტაციის მექანიზმების შესწავლას მიეძღვნა მრავალი ნაშრომი. ამ პრობლემის ფიზიოლოგიური ასპექტები განიხილება ტუმანოვის მონოგრაფიაში [54], რომელშიც განხილულია ავტორის მიერ 1929 წ.-დან დაწყებული შრომების შედეგები. წიგნში მოყვანილია ძირითადი დებულებები, რომლებზედაც აგებულია მცენარეთა ყინვამედეგობის თანამედროვე მოძღვრება. ავტორი თვლის, რომ დაბალი ტემპერატურების მოქმედებისადმი მცენარეების მედეგობის თვისება არ არის მუდმივი და იცვლება გარემოს პირობების ცვლილებისას. ძირითადი ფაქტორი, რომელიც განაპირობებს მცენარის მედეგობას დაბალი ტემპერატურების ზემოქმედებისადმი არის მისი წრთობის პროცესი, რომლის დროსაც მცენარეებში მიმდინარეობენ გარკვეული ფიზიოლოგიური (შესაძლოა აგრეთვე სტრუქტურული) ცვლილებები, რის შედეგადაც მცენარე იძენს გამძლეობის უნარს მნიშვნელოვნად დაბალი ტემპერატურების მიმართ. ნაშრომში [52] გამოთქმულია ვარაუდი, რომ სიცივის მიმართ წრთობის პროცესი უნდა შეიცავდეს უჯრედებიდან წყლის უკუდენის გაადვილების მექანიზმს. ვარაუდი ეყრდნობა იმ დებულებას, რომ ეს პროცესი აარიდებს მცენარეს უჯრედშიდა ყინულის ფორმირებას, რომელიც უჯრედისათვის ლეტალურია. გაყინვის შედეგად პლაზმოლემის დაზიანების როლი მცენარის დაღუპვის გამოვლინებაში და მისი ცვლილება მცენარის გამოწრთობის პროცესში განიხილება ნაშრომში [51].

ზემოდ აღნიშნულთან დაკავშირებით ნათელი ხდება, რამდენად მნიშვნელოვანია მცენარის გაცივებისას იმ ტემპერატურებზე დაბლა, რომლებზეც მიმდინარეობს კრისტალიზაცია უჯრედშორისში, წყლის უკუდენის მექანიზმების დადგენა. განვიხილოთ ნაშრომები, რომლებშიც მოყვანილია ამგვარი პროცესების თეორიული აღწერა.

ასეთი პირველი მცდელობა მოყვანილია იყო მაზურის ნაშრომში [26], რომელმაც განახორციელა უჯრედებიდან წყლის უკუდენის პროცესის რაოდენობრივი ანალიზი, მათი მუდმივი სიჩქარით გაცივებისას. ავტორმა წყლის არაწონასწორული ნაკადისათვის გამოიყენა შეუქცევადი პროცესების თერმოდინამიკის განტოლებები, მამოძრავებელ ძალად განიხილებოდა მხოლოდ უჯრედშიდა და -გარე ხსნარების ოსმოსური წნევების სხვაობა

$$\frac{dV}{dt} = kA(\pi_{in} - \pi_{ex}) \quad (1)$$

სადაც k არის მემბრონების გამჭოლადობის კოეფიციენტი წყლის მოლეკულებისათვის, ხოლო A – მემბრანის ზედაპირის ფართობია.

ოსმოსური წნევის თერმოდინამიკული განმარტების

$$\pi = -\frac{RT}{\check{v}} \ln \frac{p}{p_0} \quad (2)$$

(სადაც R არის აირის უნივერსალური მუდმივა, T – აბსოლიტური ტემპერატურა, \check{v} – წყლის ფარდობითი მოლური მოცულობა, p და p_0 – ნაჯერი ორთქლის წნევა ხსნარისა და სუფთა წყლის თავზე შესაბამისად) გამოყენებით ავტორმა მიიღო პლაზმატურ მემბრანაში გამავალი წყლის ოსმოსური ნაკადის საერთო გამოსახულება, ყველანაირი მოდელოვანი შეზღუდვების გარეშე

$$\frac{dV}{dt} = \frac{kART}{\check{v}} \ln \frac{P_{ex}}{P_{in}} \quad (3)$$

სადაც P_{ex} და P_{in} – შესაბამისად წყლის უჯრედშიდა და -გარე ხსნარების ნაჯერი ორთქლის წნევებია. მაგრამ, შემდეგ გამოყენებულ იქნა რაულის კანონი იდეალური ხსნარებისათვის, რომელიც აკავშირებს ხსნარის ნაჯერი ორთქლის წნევას გახსნილი ნივთიერების მოლარულ წილთან და კლაუზიუს-კლაპეირონის განტოლება, რომელიც აკავშირებს ხსნარის ნაჯერი ორთქლის წნევას ორთქლის წარმოქმნის კუთრ სითბოსთან. შეფარდების $\frac{P_{ex}}{P_{in}}$ ტემპერატურულ დამოკიდებულებისათვის მიღებულ იქნა გამოსახულება

$$\frac{d(\ln \frac{P_{ex}}{P_{in}})}{dT} = \frac{L_f}{RT^2} - \frac{n_2 \check{v}}{V + n_2 \check{v}} \frac{dV}{dT} \quad (4)$$

სადაც V – უჯრედში წყლის მოცულობა, n_2 – გახსნილი ნივთიერების მოლების რაოდენობა და L_f ყინულის დნობის მოლარული კუთრი სითბო.

მიღებული გამოსახულება გამოსახავს უჯრედშიდა და -გარე ხსნარების ოსმოსური წნევების სხვაობის ტემპერატურულ დამოკიდებულებას.

იმის დაშვებით, რომ მემბრანების განჭოლადობის კოეფიციენტის k ტემპერატურული დამოკიდებულება შეიძლება ჩაიწეროს ექსპონენტის სახით

$$k = k_0 e^{-b(T-T_0)} \quad (5)$$

სადაც $k_0 - k$ -ს მნიშვნელობაა როდესაც $T = T_0$, მაზურმა მიიღო უჯრედის მოცულობის ტემპერატურული დამოკიდებულება, ნიმუშის მუდმივი სიჩქარით $dT/dt = B$ გაცივების შემთხვევაში

$$T e^{b(T_0-T)} \frac{d^2V}{dT^2} - \left\{ (bT + 1) e^{b(T_0-T)} - \frac{kARn_2}{B(V-n_2\check{v})} \frac{T^2}{V} \right\} \frac{dV}{dT} = \frac{L_f A k_0}{B\check{v}} \quad (6)$$

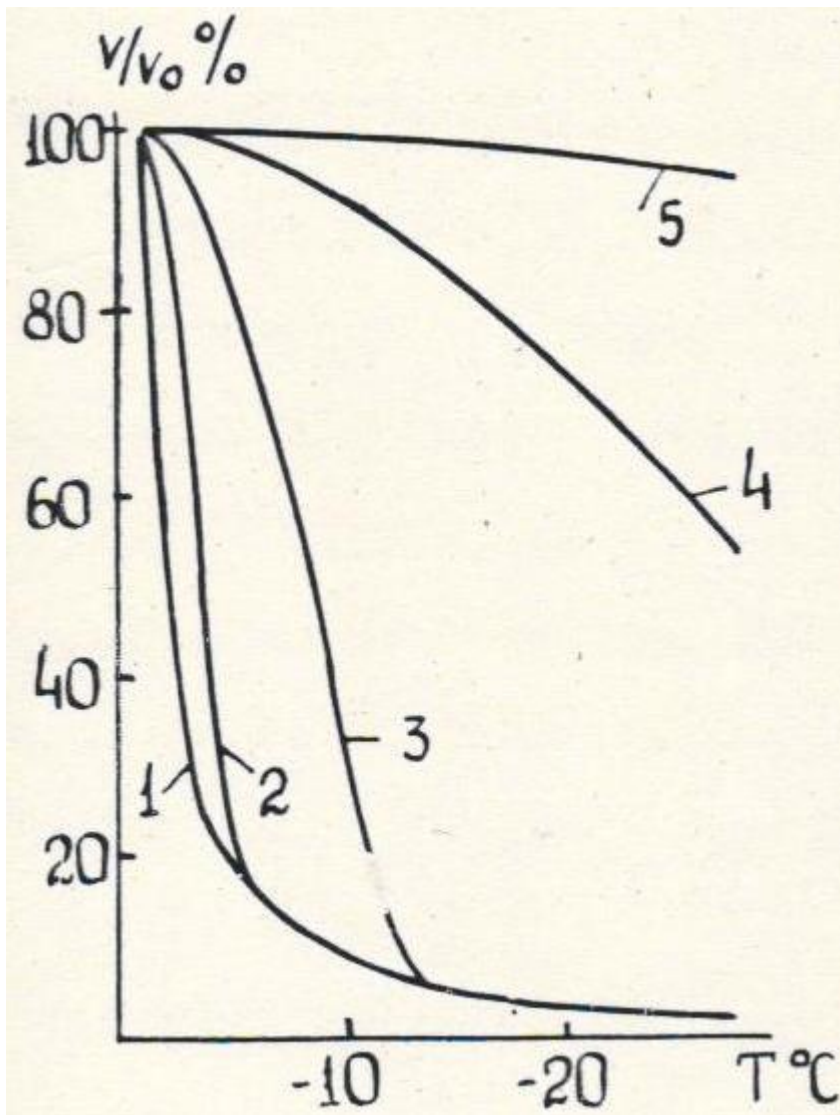
მაზურმა მიიღო (6) განტოლების რიცხვობრივი ამონახსნები მასში შემავალი პარამეტრების სხვსდასხვა მნიშვნელობებისათვის. სურ.9-ზე მოყვანილია მრუდების სერია, რომელიც ასახავს შიდაუჯრედული წყლის ფარდობითი მოცულობის ტემპერატურულ დამოკიდებულებებს 5.84 მკმ დიამეტრის მქონე სფერული უჯრედების გაცივების სხვასასხვა სიჩქარეებისათვის. მოყვანილი დამოკიდებულებები გვიჩვენებენ, რომ გაცივების დაბალი სიჩქარეების შემთხვევაში შეინიშნება უჯრედებიდან წყლის გამოსვლა. გაცივების სიჩქარის მომატება იწვევს შიდაუჯრედული წყლის ძლიერ გადაცივებას. ამასთან შიდაუჯრედული კრისტალიზაციის ალბათობა იზრდება. ეს მონაცემები თვისობრივად ემთხვევა [101] ნაშრომში გაკეთებულ დასკვნებს.

შიდაუჯრედული ხსნარის იდეალობის დაშვების გარდა, განხილულ მოდელში იგულისხმებოდა, რომ: ა) უჯრედიდან წყლის უკუდენის პროცესში, მისი ზედაპირის ფარდობი არ იცვლება, ბ) უჯრედის შიგნით არ არის ტემპერატურული გრადიენტი და გ) გაცივების სიჩქარე მუდმივია.

მაზურის მიერ შემოთავაზებული მოდელი [27] ნაშრომში იყო გარკვეულწილად კორექტირებული. კერძოდ, ავტორმა გაითვალისწინა რა ხსნარის არაიდეალობა, უჯრედიდან წყლის გამოსვლისთანავე მისი ზედაპირის ფართობის ცვლილება და განიხილა თერმოსმოსის პროცესი იმ დაშვებით, რომ მემბრანის საზღვრებზე არსებობს გარკვეული ტემპერატურული გრადიენტი. უნდა აღინიშნოს, რომ თეორიული მოდელი ამ შესწორებისადმი არ აღმოჩნდა მგძნობიარე: სურ.9-ზე მოყვანილი დამოკიდებულებები თვისობრივად არ შეიცვალა.

თერმოსმოსის და ქიმიური პოტენციალის არაერთგვაროვნების გავლენა უჯრედებიდან წყლის უკუდენის პროცესზე ნულ $^{\circ}\text{C}$ -ს ქვევით ტემპერატურებზე განიხილებოდა ნაშრომებში [55,56,57,58], რომლებშიც მიღებულია, განტ.6-ის რამდენადმე ანალოგიური კინეტიკური განტოლებები, რომლებიც სამართლიანია მაღალი კონცენტრაციის მქონე უჯრედული ხსნარებისათვის.

უჯრედშიდა და -გარე ხსნარების არაიდეალობა განხილულია აგრეთვე ნაშრომში [28]. ავტორი უშვებს, რომ მემბრანების გამჭოლადობა ფუნქციონირებს როგორც ტემპერატურისა, აგრეთვე უჯრედგარე ხსნარის ოსმოსური კონცენტრაციისა და განიხილება უჯრედშორისი ხსნარის გავლენის შესაძლებლობა უჯრედიდან წყლის გამოსვლის კინეტიკაზე.



სურათი 9. უჯრედის ფარდობითი მოცულობის ტემპერატურაზე დამოკიდებულების მრუდები მათი სხვადასხვა სიჩქარიტგაციებისას: 1-1, 2-10, 3-100, 4-1000 და 5-10000 K/წთ. [107]

თავის მომდევნო ნაშრომში [59] მაზურმა შეაფასა ყველა ზემოდმოყვანილი დამატებების გავლენა მის მიერ შემოთავაზებულ მოდელზე [26]. მისი აზრით, ძირითადი განუსაზღვრელობა თეორიულ გათვლებში შეაქვს მემრანების წყლის მოლეკულების მიმართ განჭოლადობის კოეფიციენტის k (5) ნულსქვემოთ მნიშვნელობების დასადგენად ტემპერატურული დამოკიდებულების ექსტრაპოლაციას, რადგანაც ამ ტემპერატურებზე არ არსებობენ ამ მნიშვნელოვანი პარამეტრის ექსპერიმენტალური მონაცემები. დაწვრილებით ეს საკითხი განიხილება ნაშრომში [60].

ყურადღება უნდა მიექცეს იმას, რომ ყველა მოყვანილი თეორიული გათვლები ეფუძნებოდა საწყის განტოლებას (1) წყლის ნაკადისათვის, რომლისთვისაც მამოძრავებელ ძალად გვევლინებოდა მხოლოდ უჯრედშიდა და -გარე ხსნარების ოსმოსური წნევების სხვაობა, და არ არის გათვალისწინებული უჯრედული კედლების დეფორმაციის შედეგად შექმნილი ჰიდროსტატიკური წნევა. ამგვარი მოდელი სავსებით მისაღებია ცხოველური წარმოშობის უჯრედებისათვის, რომლებსაც არ გააჩნიათ უჯრედული კედელი, ხოლო შეიძლება მემბრანის დრეკადობის უგულებელყოფა. რაც შეეხება მცენარეულ უჯრედებს, მათში საკმაოდ ხისტი უჯრედული გარსების არსებობას მივყავართ განხილული მოდელიდან მნიშვნელოვან გადახრასთან და განაპირობებს მათში კრისტალიზაციის პროცესის თავისებურებებს.

გასული საუკუნის 80-იან წლებში ჩატარდა კვლევები, რომლის გარკვეულწილად გაგრძელებასაც წარმოადგენს წინამდებარე ნაშრომი. ქვემოთ მოკლედ აღწერილი ჩამოთვლილი აღნიშნული კვლევების შედეგები.

დამუშავებული და კონსტრუირებული იყო ორმაგი სკანირებადი დიფერენციალური მიკროკალორიმეტრი, რომელიც განკუთვნილი იყო ერთდროულად ორი ნიმუშის გასაზომად მკაცრად იდენტურ პირობებში, როგორც გაციების ასევე გახურების რეჟიმში [95].

დადგინდა ვაზის სხვადასხვა ქსოვილში წყლის კრისტალიზაციის პროცესების თავისებურებანი.

ნაჩვენები იყო, რომ:

ა) ნიმუშში წყლის კრისტალიზაციის პროცესი მიმდინარეობს საკმაოდ განიერ ტემპერატურულ ინტერვალში ($-8 - -40$ °C) და ხასიათდება რამოდენიმე, მკაფიოდ გამოკვეთილი სითბოგამოყოფის მაქსიმუმით;

ბ) ზოგიერთი ტიპის ქსოვილში უჯრედშიდა ხსნარების კრისტალიზაციის პროცესი მიმდინარეობს ერთმანეთისაგან დამოუკიდებლად, განსაზღვრულ ტემპერატურულ ინტერვალში.

გ) კრისტალიზაციის პროცესები უჯრედგარე და -შიდა ხსნარებისა გულგულსა და ქსილემაში მიმდინარეობს ერთმანეთისაგან მკაფიოდ გამოყოფილ ტემპერატურულ ინტერვალში. ამ ორ პროცესს შორის მდებარე ტემპერატურულ ინტერვალში ნიმუშში მიმდინარეობს წყლის კრისტალიზაციის დაბალი ინტენსივობის პროცესი [61-67].

დადგენილია, რომ ქსილემის უჯრედებში ადგილი აქვს უჯრედშიდა კრისტალიზაციას, მაშინ როცა გულგულში დაიმზირება წყლის გამოსვლა უჯრედებიდან და მისი კრისტალიზაცია უჯრედშორისში. სითბოგამოყოფის ორ მაქსიმუმს შორის ტემპერატურულ ინტერვალში მიმდინარეობს გარკვეული ოდენობით წყლის გამოსვლა უჯრედებიდან და მისი კრისტალიზაცია უჯრედშორის გარემოში. აღნიშნულ პროცესს ადგილი აქვს როგორც გულგულში ასევე ქსილემაში [70,71].

მიღებული იყო ემპირიული დამოკიდებულება უჯრედშორისი ხსნარის ოსმოსურ წნევისა ტემპერატურაზე. ნაჩვენებია, რომ პირველ მიახლოებაში უჯრედშორისი ხსნარის ოსმოსური წნევის ტემპერატურული დამოკიდებულება და ოსმოსურ წნევათა სხვაობა უჯრედშიდა და -გარე არეებს შორის საკმაოდ კარგი სიზუსტით აპროქსიმირდება წრფით [72].

პოსტულირებულია გულგულის უჯრედის დაბალტემპერატურული პლაზმოლიზის მოვლენა. პლაზმოლიზის პროცესი მიმდინარეობს უჯრედების სხვადასხვა ჯგუფებში ერთმანეთისაგან დამოუკიდებლად და იწყება უჯრედშიდა ხსნარის განსაზღვრული გადაციების დროს. ჩატარდა თეორიული გამოთვლები, რომელიც საშუალებას იძლევა აღიწეროს, ტემპერატურის მყისიერი ცვლილებისას, უჯრედების ცალკეული ჯგუფებიდან წყლის გამოსვლის პროცესის კინეტიკა. [76].

შესწავლილი იყო ქსილემისა და გულგულის უჯრედების სიხისტის თვისებები. გამოანგარიშებული იყო უჯრედის კედლისა და ცელულოზის მიკროფიბრილების სიხისტის პარამეტრები, რომლებიც განაპირობებენ ურთიერთქმედებას პლაზმურ მემბრანასა და უჯრედის კედელს შორის. შემოთავაზებულ იქნა უჯრედის პლაზმოლიზის მექანიზმი, რომელიც დაფუძნებული “იალქნის” ეფექტზე. [75]

ნაჩვენებია იყო, რომ უჯრედის ფარდობითი მოცულობის დროზე დამოკიდებულება, რომელიც რეგისტრირდება ნიმუშის ტემპერატურის ნახტომისებური ცვლილებისას უჯრედშიდა და გარე კრისტალიზაციის პროცესებს შორის მდებარე ტემპერატურულ ინტერვალში, კარგად აღიწერება თეორიული დამოკიდებულებით, რომელიც მიღებულია ნახევარგმტარი ბიოლოგიური მემბრანის გავლით წყლის ნაკადისათვის არაწონასწორული თერმოდინამიკის განტოლების ამოხსნისას. შემოთავაზებული იყო 0°C-ზე ქვევით უჯრედის მემბრანის წყლის მიმართ განტოლადობის კოეფიციენტის ეფექტური მნიშვნელობის განსაზღვრის მეთოდი [69].

შეიქმნა, ქსილემისა და გულგულის უჯრედებიდან წყლის ნაკადის მათემატიკური მოდელი, ტემპერატურის თანაბარი შემცირებისას (განიხილებოდა ტემპერატურული ინტერვალის უჯრედშიდა და -გარე ხსნარების კრისტალიზაციის პროცესებს შორის). წონასწორული თეორიული დამოკიდებულების შედარებამ ექსპერიმენტალურთან, რომელიც მიღებულია ბმრ მეთოდისა და დიფერენციალური მიკროკალორიმეტრიის გამოყენებით, აჩვენა მათი კარგი შესაბამისობა.

მიღებული იყო გამოსახულება, რომელიც საშუალებას იძლევა განისაზღვროს უჯრედის ფარდობითი მოცულობის ტემპერატურაზე დამოკიდებულება მიკროკალორიმეტრიული ექსპერიმენტიდან, ნიმუშის მუდმივი სიჩქარით გაციების პირობებში. გაკეთდა დასკვნა, რომ ნახევრადგანტოლადი ბიოლოგიური მემბრანის გავლით წყლის ნაკადისათვის არაწონასწორული

თერმოდინამიკის განტოლება საკმაოდ კარგად აღწერს რეალურ პროცესებს, რომლებიც მიმდინარეობს მცენარეებში მათი გაციებისას [75].

შემუშავებული იყო თეორიული მოდელი, რომელიც საშუალებას იძლევა შევაფასოთ პლაზმური მემბრანის დეფორმაციის გავლენა მათ გამტარებლობაზე წყლის მიმართ. ნაჩვენებია იყო, რომ უჯრედის მემბრანის წყლის მოლეკულების მიმართ განჭოლადობის კოეფიციენტის მნიშვნელობის შესწორება შეიძლება არსებითი იყოს, თუკი წნევათა სხვაობა მემბრანის სხვადასხვა მხარეს არის გარკვეულ მნიშვნელობაზე მეტი [71].

შესწავლილია მცენარის დაბალი ტემპერატურების მიმართ ადაპტაციის გავლენა ვაზის სხვადასხვა ქსოვილის უჯრედშიდა ხსნარის კრისტალიზაციის პროცესების თავისებურებებზე. ნაჩვენებია, რომ გარემოს ტემპერატურის კლებასთან ერთად ყველა ქსოვილის უჯრედშიდა ხსნარი, გარდა გულგულისა, კრისტალიზდება უფრო დაბალ ტემპერატურებზე.

შემოთავაზებულია ქსილემის უჯრედშიდა კრისტალიზაციის მექანიზმი, რომელიც დაფუძნებულია უჯრედშორისი ყინულის ფრონტის გავრცელებაზე მემბრანის ფორმების საშუალებით. ამ წარმოდგენის საფუძველზე წარმოიშვა ჰიპოთეზა შესაბამისი ქსოვილის “წრთობის” მექანიზმზე, რომელიც მდგომარეობს იმაში, რომ გარემოში ტემპერატურის შემცირებისას მიმდინარეობს ცვლილებები უჯრედის მემბრანაში – ფორმის ზომები მცირდება და ყინულის ფრონტის გავრცელებას სჭირდება მეტი გადაციება [77].

ნაჩვენებია იყო, რომ დაბალი ტემპერატურების მიმართ მცენარის ადაპტაციის პროცესში ხდება გულგულის უჯრედის პლაზმური მემბრანის გამტკიცება, რის შედეგადაც დაბალტემპერატურული პლაზმოლიზი დროს მემბრანა არ ზიანდება და უჯრედი ინარჩუნებს ოსმოსური სისტემის თვისებას, რაც აუცილებელია მათი ცხოველქმედებისთვის [76].

§1.5. შიდაუჯრედული ყინულის ფორმირების მექანიზმები. ზოგადი ცნობები კრისტალების წარმოქმნის თეორიიდან

არსებობს სამი ალტერნატიული მექანიზმი, რომელთა მიხედვით შეიძლება განხორციელდეს შიდაუჯრედული ხსნარის კრისტალიზაცია. მათ შორის პირველი ეფუძნება ქსოვილის გაცივებისას, უჯრედშორისში ყინულის წარმოქმნის გამო, წყლის უკუდენას უჯრედებიდან და მის კრისტალიზაციას უჯრედშორისში. დანარჩენი ორივე მექანიზმი დაკავშირებულია უჯრედის შიგნით ყინულის წარმოქმნასთან. ამგვარი პროცესი შეიძლება მიმდინარეობდეს ორი გზით: 1. თითოეულ გადაცივებულ უჯრედში მყარი ფაზის მდგრადი ჩანასახის შექმნა და 2. უჯრედებში უჯრედშორისი ყინულის ფრონტის შეღწევა მემბრანული ფორმების გავლით. გადაცივებულ სითხეში მყარი ფაზის მდგრადი ჩანასახის შექმნის პროცესთან დაკავშირებულია როგორც შიდაუჯრედულის, აგრეთვე უჯრედშორისის ხსნარის კრისტალიზაცია.

მყარი ფაზის მდგრადი ჩანასახის შექმნის თეორია დაფუძნებულია გიბსის შეხედულებებზე [95,96], რომელთა მიხედვით იზოლირებული სისტემა მდგრადია

იმ შემთხვევაში, თუ კი სისტემის ენერჯის მუდმივობისას, სისტემის მდგომარეობის უსასრულო მცირე შეცვლისას, მისი ენტროპია უცვლელი რჩება, ან მცირდება. თუ სისტემის მდგომარეობის სასრული ცვლილებისას ენტროპია იზრდება, ამბობენ, რომ იგი იმყოფება მეტასტაბილურ მდგომარეობაში, რომელიც განიმარტება, როგორც სისტემის ფარდობითად მდგრადი მდგომარეობა, რომელსაც არ შეესაბამება თავისუფალი ენერჯის მინიმალურ მნიშვნელობას. გადაცივებული წყალიც ამ მდგომარეობის შესაბამისია.

თუ ნივთიერება მეტასტაბილურ მდგომარეობაში იმყოფება, იგი ადრე თუ გვიან ამ მდგომარეობიდან გადავა სხვა – მდგრად მდგომარეობაში. ახალი ფაზის მდგრადი ჩანასახის შექმნის სტადიის გარდა, სისტემის მეტასტაბილურიდან სტაბილურ მდგომარეობაში გადასვლის პროცესი მიმდინარეობს მისი თავისუფალი ენერჯის შემცირებით და პროცესი თვითმიმდინარეა. ყოველი მეტასტაბილური ფაზისათვის არსებობს რომელიმე მინიმალური ზომა, რისი ტოლიც უნდა იყოს ფლუქტუაციის შედეგად მასში წარმოქმნილი ახალი ფაზის დაჯგუფება, იმისათვის, რომ ეს ფაზა უფრო მდგრადი იყოს მანამდე არსებულზე (პირველად ფაზაზე). ახალი ფაზის ჩანასახის უფრო მცირე ზომებისას მეტასტაბილური ფაზა რჩება წონასწორული და ჩანასახი ქრება. ამ მინიმალური ზომის მქონე ჩანასახები – მდგრადად ითვლებიან.

იმის გათვალისწინებით, რომ კრიტიკული ზომის ჩანასახის წარმოქმნის პროცესს ახლავს თავისუფალი ენერჯის ზრდა [123], იგი არ არის თვითმიმდინარე, ამისათვის უნდა დაიხარჯოს გარკვეული მუშაობა. გადაცივებული სითხის მოცულობაში წონასწორული სფერული ჩანასახის იზოთერმული შექცევადი შექმნისათვის, საჭირო მუშაობა, გიბსის [96] თანახმად, უდრის მისი თავისუფალი ზედაპირული ენერჯის მესამედს

$$A = \frac{1}{3}S\sigma = \frac{4}{3}\pi r^2\sigma \quad (7)$$

სადაც S – ჩანასახის ზედაპირის ფართობია, σ - მისი კუთრი ზედაპირული ენერჯია.

რეალურ გადაცივებულ ნაღობში ყოველთვის არსებობს მყარი ჩანარები მინარევების სახით. ამასთან მყარი ფაზის მდგრადი ჩანასახის შექმნა ყოველთვის ხდება მყარი კედლის ზედაპირზე.

თუ აღვნიშნავთ:

Γ - ჩანასახის სიმრუდის რადიუსი (ნახ.10) (რომელიც წონასწორობაში იმყოფება სითხესთან)

σ_1 - სითხისა ჩანასახის საზღვარზე კუთრი ზედაპირული ენერჯია (ჩკზე)

σ_2 – ზედაპირისა და ჩანასახის საზღვარზე კუთრი ზედაპირული ენერჯია (ჩკზე)

σ_3 - სითხისა და ზედაპირის საზღვარზე (ჩკზე)

ჩანასახის წონასწორობის პირობა შეიძლება ჩაიწეროს:

$$\sigma_2 - \sigma_3 = \sigma_1 \cos\Theta \quad (8)$$

სადაც Θ არის კიდური კუთხე, შექმნილი ჩანასახის ზედაპირსა და კედელს შორის.

ამ შემთხვევისათვის (7)-ის თანახმად, მყარ კედელზე წონასწორული ჩანასახის შესაქმნელად საჭირო მუშაობა გამოისახება:

$$A = \frac{1}{3}(S_1\sigma_1 - S_2\sigma_2 + S_3\sigma_3) \quad (9)$$

ანუ, თუ ზედაპირის ფართობებს S_i გამოვხატოთ r და Θ -თი, და გავითვალისწინებთ (8)-ს მივიღებთ:

$$A = \frac{1}{3}\pi r^2 \sigma_1 [2(1 - \cos\Theta) - \sin^2\Theta \cos\Theta]. \quad (10)$$

თუ ჩანასახი იქმნება სითხის მოცულობაში და არა კედელზე, ანუ $\Theta = 180^\circ$ პირობაში, რაც აღნიშნავს სრულ შეუსაბამობას მყარი ზედაპირის თვისებების ახალი ფაზის კრისტალურ მესერთან, (10)-დან მივიღებთ გამოსახულებას რომელიც არის (7)-ის ანალოგიური.

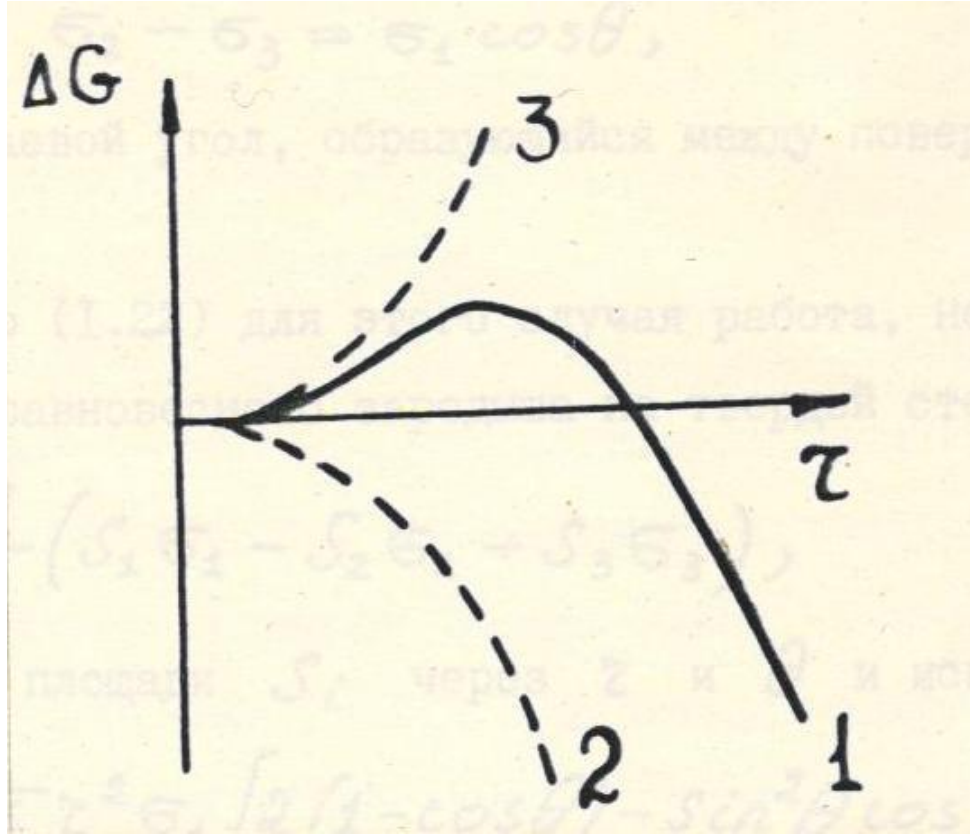
ზემოაღნიშნულიდან განომდინარებს, რომ გადაცივებულ ნაღვლში რაიმე მყარი კედლის არსებობა აადვილებს ახალი ფაზის მდგრადი ჩანასახის შექმნას.

გადაცივებულ სითხეში მყარი ფაზის მდგრადი ჩანასახის შექმნის ალბათობა [95-98]-ის მიხედვით პროპორციულია $\exp(-A/kT)$, სადაც k - ბოლცმანის მუდმივაა, T - აბსოლუტური ტემპერატურა. მუშაობა A განპირობებულია გადაცივების სიდიდით ($A \sim 1/\Delta T^2$), რაც მეტია გადაცივება, მით ნაკლები მუშაობის შესრულებაა საჭირო მყარი ფაზის მდგრადი ჩანასახის შესაქმნელად [96-98].

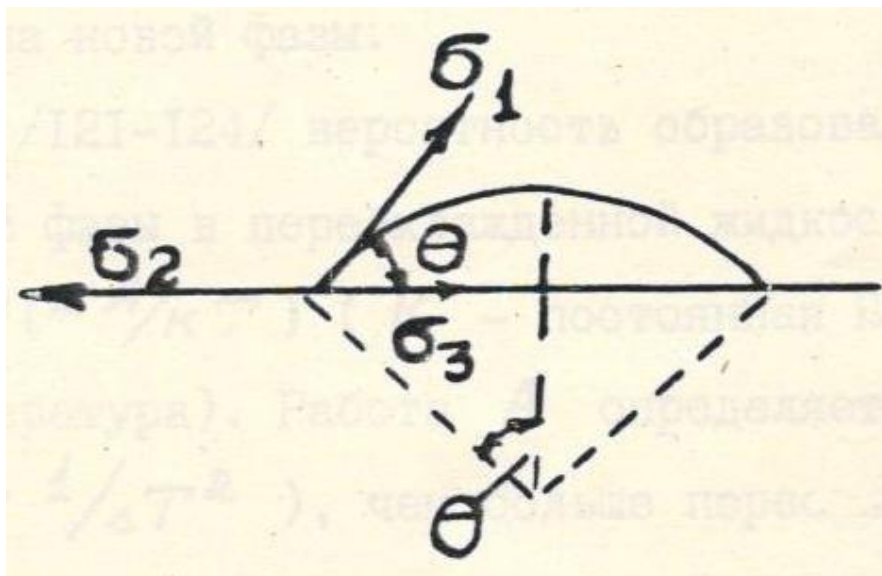
ზემოაღნიშნულიდან განომდინარებს, რომ გადაცივების გაზრდით, მცენარეულ და ცხოველურ ქსოვილებში იზრდება ყინულის მდგრადი ჩანასახის შექმნის ალბათობა, იზრდება აგრეთვე შიდაუჯრედული კრისტალიზაციის ალბათობაც. თავისთავად ცხადია, რომ უჯრედში ყინულის ჩანასახი უნდა შეიქმნას არა შიდაუჯრედული ხსნარის მოცულობაში, არამედ რომელიმე ზედაპირზე (შესაძლოა მემბრანისა), რომლის თვისებებიც განაპირობებენ გადაცივების სიდიდეს.

შიდაუჯრედული ყინულის შექმნის სხვა ალტერნატიული მექანიზმია – უჯრედშორისი ყინულის ფრონტის შეღწევა პლაზმატური მემბრანის ფორების გავლით. ამგვარი მექანიზმი წარმოდგენილია მაზურის ნაშრომში [99], რომელშიც ავტორი ეყრდნობა რა გიბსის წარმოდგენებს და უშვებს, რომ მემბრანებში არსებობენ წყლით შევსებული არხები, განიხილავს არხში ყინულის შექმნას, თუ კი იგი უჯრედშორის სივრცეში არსებობს. არხში ორი ფაზის წონასწორობის პირობას მაზური (8)-ის ანალოგიურად წერს. შემდეგ განიხილავს მყარი ფაზის მოცულობოდან არხში გადასვლისას, მოლარული

თავისუფალი ენერჯის ცვლილებას და კლაპეირონ-კლაუზიუსის განტოლების ინტეგრალური ფორმის გამოყენებით, იმ დაშვებით, რომ წყლის ფაზური



სურათი 10. ჩანასახის შექმნის (1), მისი მოცულობითი (2) და ზედაპირული (3), გიბსის თავისუფალი ენერჯის დამოკიდებულება ჩანასახის რადიუსზე. [107]



სურათი 11. მყარი ფაზის ჩანასახი ზედაპირზე. [107]

გადასვლის მოღარული სითბო არ არის ტემპერატურის ფუნქცია, ავტორმა მიიღო გამოსახულება, რომელიც არხში წყლის გადაცივების სიდიდეს უკავშირებს მის კრიტიკულ ზომას, რომლის დროს არხში შესაძლოა ყინულის გაერცვლება

$$T_{დნ} - T_{გადაც} = \frac{2\bar{U}T_{dn}\sigma_1\cos\Theta}{aL} \quad (11)$$

სადაც \bar{U} წყლის კუთრი მოღარული მოცულობა, σ_1 - ყინულის კუთრი ზედაპირული ენერგია წყლის საზღვარზე და L -ყინულის დნობის მოღარული სითბო.

მაზურის მსჯელობა საშუალებას გვაძლევს გავიგოთ კავშირი გადაცივებასა და უჯრედშიდა ყინულის ფორმირებას შორის. ამავე დროს ეს არ გამორიცხავს შესაძლებლობას თვით უჯრედებში ყინულის ჩანასახის შექმნის ალბათურ პროცესს. ცხადია, რომ ყოველივე კონკრეტულ შემთხვევაში ამ ალტერნატიულ მექანიზმს შორის ასარჩევად აუცილებელია დამატებითი ინფორმაცია.

ზემოთ მოყვანილი მექანიზმის განხილვისას, სამიგინმა [100] გამოიტანა დასკვნა, რომ ამგვარი მექანიზმი არ შეიძლება იყოს რეალიზებული, ვინაიდან პლაზმატური მემბრანებისათვის მიღებულ [99] არხების ზომებისათვის გამოყენებულ გათვლებში (3-8 Å) საჭიროა ძალიან დიდი გადაცივება, როდესაც ყინულის განჭოლვა პროტოპლასტში შეიმჩნევა უკვე -2 -10°C .

სავარაუდოდ ეს შეფასება მეტად კატეგორიულია შემდეგი მოსაზრებების გამო:

1. პლაზმატურ მემბრანებში არხების ჩანასახის კრიტიკული ზომების განსაზღვრაში დიდ როლს თამაშობს მისი ზედაპირის თვისება, რომელსაც ასახავს Θ - კიღური კუთხე. იმ პირობით, თუ $\Theta=90^{\circ}$ წონასწორული ჩანასახის სიმრუდის რადიუსი გამოდის უსასრულო დიდი. ეს ნიშნავს, რომ უჯრედშიდის ყინულის ფრონტის განჭოლვა არხში შეიძლება მოხდეს მეტნაკლებად მცირე გადაცივებისას და უკვე აღარ არის განპირობებული პლაზმატურ მემბრანაში წყლის არხის ზომებით.

2. თუ წარდგენილი მოდელი მიუღებელია იმ უჯრედებისათვის, რომელშიც პროტოპლასტში ყინულის განჭოლვა შეიმჩნევა უკვე -2°C , იგი შეიძლება იყოს სამართლიანი სხვა ტიპის უჯრედებისათვის, რომლებსათვისაც შეიმჩნევა მნიშვნელოვანი (-40°C –მდე) გადაცივება. შეუძლებელია იმედი ვიქონიოთ, რომ სხვადასხვა ტიპის უჯრედებში ყინულის შექმნის პროცესი მიმდინარეობს ერთი ტიპის მექანიზმით.

§1.6. დაბალტემპერატურული სკანირებადი დიფერენციალური მიკროკალორიმეტრია [102-108]

დიდი ხნის წინ არსებული დიფერენციალური თერმული ანალიზის მეთოდისგან განსხვავებით, დიფერენციალური სკანირებადი მიკროკალორიმეტრიის მეთოდი საშუალებას გვაძლევს განისაზღვროს (გარკვეული სიზუსტით) ნიმუშში მიმდინარე ენდო- და ეგზოთერმული პროცესებისას ნიმუშის სითბოტევადობის ცვლილება. მეთოდის არსი მდგომარეობს ნიმუშში გაცივებისას და გათბობისას მცირე სითბური ეფექტების გაზომვებში. ამოცანა დაიყვანება, ნივთიერების მცირე რაოდენობისას, სითბური ეფექტების რეგისტრაციაზე, რომლებიც საკვლევ ნიმუშებში გარკვეულ ტემპერატურულ ინტერვალში ფაზური ან კონფორმაციული ცვლილებებისას ხორციელდება. ნივთიერების მცირე რაოდენობა ნაკარნახებია ტემპერატურის უწყვეტი ცვლილებების შედეგად, ნიმუშში ტემპერატურული გრადიენტების შესამცირებლად.

მეთოდის პრინციპი მდგომარეობს, ეტალონსა და ნიმუშს შორის, მათი ერთდროული და უწყვეტი გათბობის ან გაცივების რეჟიმში, ტემპერატურათა სხვაობის (ΔT) გაზომვაში. ამ დროს რეგისტრირებული ტემპერატურული დამოკიდებულება ($\Delta T=f(T)$) ასახავს ნიმუშის ენტალპიის ცვლილებას. მაგრამ, გაცივებით მოსახერხებელია ინფორმაცია საკვლევ ნიმუშის სითბოტევადობის ცვლილების ტემპერატურაზე დამოკიდებულების სახით, რომელიც შეიძლება მივიღოთ რეგისტრირებული მრუდის დიფერენცირებით. ამ საკითხის ექსპერიმენტალური გადაწყვეტა შესაძლებელია ეტალონსა და ნიმუშს შორის უარყოფითი უკუკავშირის განხორციელებით. როგორც ქვემოთ იქნება ნაჩვენები, ამ დროს სითბოტევადობების სხვაობა პროპორციულია ან ეტალონსა და ნიმუშს შორის ტემპერატურათა სხვაობისა, ან სიმძლავრის, რომელიც საჭიროა ტემპერატურათა ამ სხვაობის კომპენსაციისათვის.

უკუკავშირი, ხორციელდება ეტალონსა და ნიმუშს შორის ტემპერატურათა სხვაობის ნულამდე დაყვანით, კალორიმეტრის ამპულაზე არსებული გამათბობელი ელემენტების ელექტრული სიმძლავრეების ცვლილებით. ამ დროს რეგისტრირებული, ეტალონსა და ნიმუშის გამათბობელ ელემენტებში გამოიყოფილი სიმძლავრეების სხვაობა, წარმოადგენს ნიმუშში მიმდინარე პროცესების სითბური ეფექტების საზომს.

უკუკავშირის განხორციელების სხვა მეთოდი მდგომარეობს ეტალონსა და ნიმუშს შორის თბოგაცვლის შექმნით. ამ შემთხვევაში ნიმუშში წარმოქმნილი სითბური ეფექტი, ნაწილობრივ იქნება კომპენსირებული ეტალონიდან ნიმუშისაკენ მიმართული სითბოს ნაკადით ენდოთერმული პროცესის შემთხვევაში და ნიმუშიდან ეტალონამდე – ეგზოთერმული პროცესის შემთხვევაში. ქვემოთ ნაჩვენები იქნება, რომ ამ დროს ტემპერატურათა სხვაობა, რეგისტრირებული ეტალონსა და ნიმუშს შორის, არის მათ შორის სითბოტევადობათა სხვაობის პროპორციული.

ამოცანების სპეციფიკა კალორიმეტრიულ სისტემისადმი მოითხოვს განსაკუთრებულ მოთხოვნილებას, რომელიც მდგომარეობს იმაში, რომ აუცილებელია საშუალება იყოს იმისა, რომ ნიმუშის გაზომვების ჩატარდეს როგორც გათბობის, აგრეთვე გაცივების რეჟიმებში. გაცივების რეჟიმში გაზომვების ჩატარება გულისხმობს თბოგაცვლას კალორიმეტრიულ უჯრედსა და გარემოს შორის და ცხადია, რომ თბოგაცვლა უნდა იყოს მკაცრად კონტროლირებადი.

C სითბოტევადობის მქონე კალორიმეტრიული უჯრედი მოვათავსოთ ვაკუუმურ თერმოსტადში და ისინი შევაერთოთ თბოგამტარი ელემენტით **ა**

სითბოგამტარებლობით (სურ.12). თვალი ვადევნოთ უჯრედის ტემპერატურის ცვლილებას, იმ პირობით, რომ თერმოსტატის ტემპერატურა იცვლება წრფივად

$$T' = T_0 + \beta t \quad (12)$$

სადაც $\beta = dT'/dt$ თერმოსტატის ტემპერატურის ცვლილების სიჩქარე,

T_0 – თერმოსტატის საწყისი ტემპერატურა, t - დრო.

ამოცანის განხილვის დროს გამოყენებულია შემდეგი დაშვებები:

1. სითბოგამტარი ელემენტის სითბოტევადობა უგულებელმყოფილია, რადგან გაცილებით მცირეა კალორიმეტრიული უჯრედის სითბოტევადობასთან შედარებით, რაც ნიშნავს, რომ თერმოსტატსა და კალორიმეტრულ უჯრედს შორის თბოგაცვლის განტოლების დაწერისას, შეგვიძლია მხედველობაში არ მივიღოთ სითბოს ის რაოდენობა, რომელიც საჭიროა სითბოგამტარი ელემენტის ტემპერატურის ცვლილებისათვის.
2. კალორიმეტრიული უჯრედი განვიხილოთ როგორც იდეალური სითბოგამტარი. ანუ, ჩავთვალოთ, რომ უჯრედში დამყარებული ტემპერატურული გრადიენტი უჯრედის შიგნით გაცილებით ნაკლებია, ვიდრე ტემპერატურული გრადიენტი თერმოსტატსა და უჯრედს შორის, ან მუდმივი გრადიენტის დამყარების დრო პირველ შემთხვევაში გაცილებით მცირეა, ვიდრე მეორეში.
3. უჯრედსა და თერმოსტატს შორის გამოსხივებით სითბოცვლა შეგვიძლია უგულებელმყოფოთ.
4. ჩავთვალოთ, რომ შესასწავლი ნიმუშის სითბოტევადობა გაცილებით მცირეა კალორიმეტრიულ უჯრედის სითბოტევადობაზე.

ზემოდაღნიშნულისაგან გამომდინარე და (12) პირობის გათვალისწინებით, შეგვიძლია კალორიმეტრიულ უჯრედსა და თერმოსტატს შორის სითბოს გაცვლის განტოლება ჩავწეროთ შემდეგი სახით

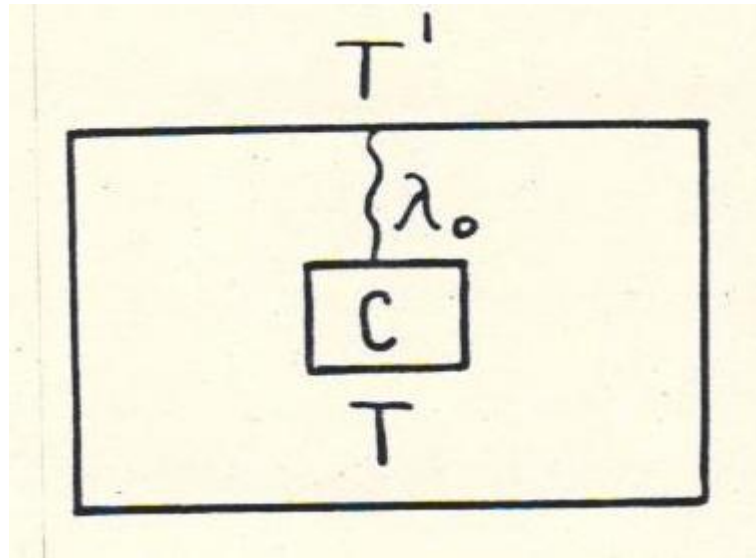
$$C dT/dt = \lambda_0 (T_0 + \beta t - T) \quad (13)$$

გადავიწეროთ (13) შემდეგი სახით:

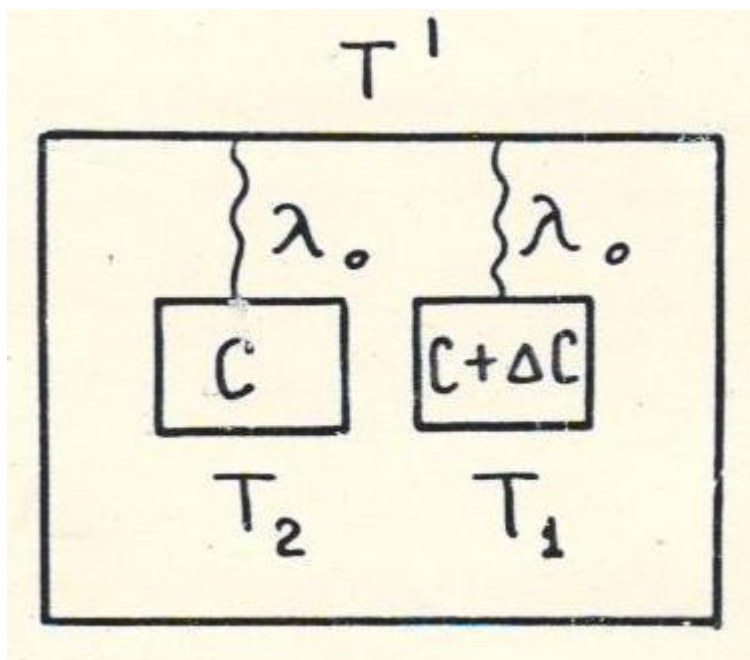
$$dT/dt + \lambda_0/C * T = \lambda_0 (T_0 + \beta t)/ C \quad (14)$$

ვხედავთ, რომ ეს არაერთგვაროვანი დიფერენციალური განტოლებაა, ანუ თუ მოვახდენთ ინტეგრირებას $0-t$ ფარგლებში და თუ მივიღებთ მხედველობაში, რომ როცა $t=0$ $T = T_0$, მივიღებთ კალორიმეტრიული უჯრედის ტემპერატურის დროზე დამოკიდებულებას

$$T = T_0 + \beta t - \beta C / \lambda_0 [1 - \exp(-\lambda_0 / C * t)] \quad (15)$$



სურათი 12. კალორიმეტრის მოდელი ერთი ამპულით. C – ამპულის სითბოტევადობა, λ_0 – სითბოგამტარი ელემენტის სითბოგამტარებლობა, T – ამპულის ტემპერატურა, T' – თერმოსტატის ტემპერატურა. [107]



სურათი 13. კალორიმეტრის მოდელი ორი ამპულით. ΔC – ნიმუშის სითბოტევადობა. [107]

განხილული სისტემისათვის ძირითადი პარამეტრია დროითი მუდმივა $\tau = C/\lambda_0$, რომელიც განსაზღვრავს სითბოგამტარში სტაციონარული ნაკადის დასამყარებლად საჭირო დროს. როდესაც $t \geq 5\tau$, მაშინ შეიძლება ჩავთვალოთ, რომ

$$T = T_0 + \beta t - \beta C/\lambda_0 \quad (16)$$

ამგვარად ჩანს, რომ თუ შევქმნით თერმოსტატს, რომლის ტემპერატურის რეგულირებას შევძლებთ წრფივად, შეგვიძლია კალორიმეტრიული უჯრედის ტემპერატურის ცვლილების რეჟიმის მკაცრად დაცული პროგრამირება.

ახლა თერმოსტატში მოვათავსოთ ორი, იდენტური კალორიმეტრიული უჯრედი (სურ.13), და ორივე შევაერთოდ თერმოსტატთან ერთნაერი λ_0 სითბოგამტარებლობის მქონე ელემენტებით, ხოლო ერთერთი უჯრედი შევაავსოთ ΔC სითბოტევადობის მქონე ნიმუშით. ამ შემთხვევაში ორივე უჯრედისათვის შეგვიძლია (13) ტიპის განტოლების დაწერა, რომელთა ამოხსნა მიიღებს შემდეგ სახეს

$$T_1 = T_0 + \beta t - \beta(C + \Delta C)/\lambda_0 [1 - \exp(-\lambda_0/(C + \Delta C) * t)] \quad (17)$$

$$T_2 = T_0 + \beta t - \beta C/\lambda_0 [1 - \exp(-\lambda_0/C * t)] \quad (18)$$

სურ.14-ზე მოყვანილია ტემპერატურების დროზე დამოკიდებულება: თერმოსტატის (ა), ნიმუშიანი კალორიმეტრიული უჯრედის (ბ) და ეტალონური უჯრედისა (გ). სისტემის კალიბრებისათვის $\Delta t \geq 5\tau$ დროის შემდეგ, ნიმუშიან კალორიმეტრიულ უჯრედში, მასზე განლაგებულ სითბურ ელემენტის მეშვეობით, შეგვყავს მუდმივი, ზუსტად განსაზღვრული სიმძლავრე W . ამ შემთხვევაში უჯრედის ტემპერატურის ცვლილების კანონი აღიწერება ფორმულით

$$(C + \Delta C) * dT_1/dt' = \lambda_0 (T'_0 + \beta t' - T_1) + W \quad (19)$$

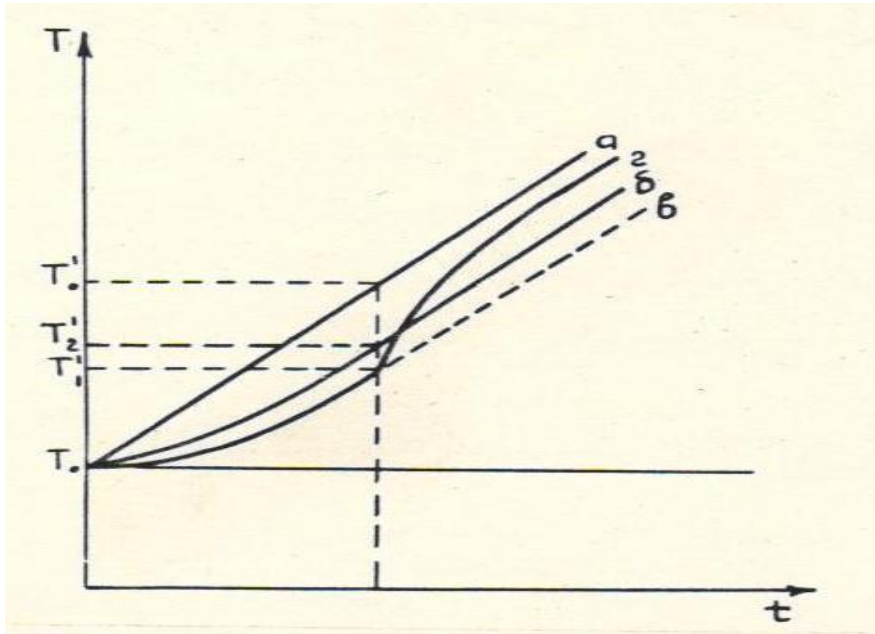
სადაც $T'_0 = T_0 + \beta \Delta t$

მხედველობაში თუ მივიღებთ, რომ როდესაც $t' = 0$ $T_1 = T_1' = T'_0 - \beta(C + \Delta C)/\lambda_0$ მაშინ მივიღებთ

$$T_1 = T'_0 + \beta t' - \beta(C + \Delta C)/\lambda_0 + W/\lambda_0 [1 - \exp(-\lambda_0/(C + \Delta C) * t')] \quad (20)$$

სურ.14-ზე ამ დამოკიდებულებას ასახავს მრუდი (რ).

გამოსახულებები (17), (18), (20) და სურ.14-ზე მოყვანილი მრუდები, გვაძლევენ კალორიმეტრიული უჯრედების ტემპერატურის დროზე დამოკიდებულებას და გვიჩვენებენ, რომ სითბური ელემენტების სითბოგამტარებლობის λ_0 ერთი და იგივე მნიშვნელობისათვის, $\Delta t \geq 5\tau$ დროის შემდეგ, ტემპერატურის ცვლილების მოცემულ სინქარისათვის, თერმოსტატსა და კალორიმეტრიულ უჯრედებს შორის ტემპერატურათა სხვაობა განპირობებულია მათი სითბოტევადობით.



სურათი 14. თერმოსტატის (a), ნიმუშიანი ამპულის (ბ), ეტალონური ამპულის (ვ) და ნიმუშიანი ამპულის, რომელსაც მიეწოდება სიმძლავრე W (რ), ტემპერატურის დამოკიდებულება დროზე. [107]

სურათი 15. ამპულებს შორის ტემპერატურათა სხვაობის დროზე დამოკიდებულება [107]

როგორც ზემოთ იყო აღნიშნული, მოცემულ ექსპერიმენტში იზომება ტემპერატურათა სხვაობა კალორიმეტრიულ უჯრედებს შორის. მიღებული გამოსახულებები საშუალებას გვაძლევს კალორიმეტრიულ უჯრედებს შორის ტემპერატურათა სხვაობა გამოისახოს დროის ფუნქციის სახით. ნიმუშიანი უჯრედის დროითი მუდმივა $\tau_1 = (C + \Delta C) / \lambda_0$ ცოტაოდენ მეტია, ვიდრე ეტალონური უჯრედის დროითი მუდმივა $\tau_2 = C / \lambda_0$. ადვილი შესამჩნევია, რომ უჯრედებს შორის მუდმივი ტემპერატურათა სხვაობის დასამყარებლად საჭირო დრო განპირობებულია τ_1 მნიშვნელობით, რადგან $\Delta C \ll C$ პირობის თანახმად, $\tau_1 - \tau_2$ სხვაობის უგულველყოფა შეიძლება. აქედან გამომდინარე, კალორიმეტრიულ უჯრედებს შორის ტემპერატურათა სხვაობის დროითი დამოკიდებულებისათვის მივიღებთ (სურ.15)

$$\Delta T = - \beta / \lambda_0 * \Delta C [1 - \exp(-\lambda_0 / (C + \Delta C) * t)] \quad (21)$$

ან $t \gg \tau$ პირობისათვის

$$\Delta T_{max} = - \beta / \lambda_0 * \Delta C \quad (22)$$

ეს უკანასკნელი გამოსახულება გვიჩვენებს, რომ გარდამავალი პროცესების დამთავრების შემდეგ, კალორიმეტრიულ უჯრედებს შორის რეგისტრირებული ტემპერატურათა სხვაობა ნიმუშის სითბოტევადობის პროპორციულია. ჩანს, რომ რაც ნაკლებია λ_0 მნიშვნელობა, მით მეტია რეგისტრირებული სიდიდე, ანუ მით უფრო მკძნობიარეა კალორიმეტრი. მაგრამ ამავდროულად იზრდება სისტემის დროითი მუდმივა და ამის შედეგად, როგორც ქვემოთ იქნება ნახვენები, მცირდება მისი გარჩევითობის უნარი.

ნიმუშის სითბოტევადობის გამოსათვლელად აუცილებელია ვიქონიოთ ზუსტი მნიშვნელობა λ_0 -სა გაზომვის მთელ ტემპერატურულ ინტერვალში. ეს მიიღწევა ზემოდ მოყვანილი სისტემის კალიბრებით. (20)-დან (17)-ის გამოკლებით მივიღებთ უჯრედებს შორის ტემპერატურათა სხვაობის დროითი დამოკიდებულებას, რომელიც წარმოიქმნება უჯრედში W სიმძლავრის შეყვანისას (სურ.15)

$$\Delta T = W / \lambda_0 [1 - \exp(-\lambda_0 / (C + \Delta C) * t)] \quad (23)$$

ან $t \gg \tau$ პირობისათვის

$$\Delta T_{max} = W / \lambda_0 \quad (24)$$

(24)-ის გათვალისწინებით, მივიღებთ შემდეგ გამოსახულებას ნიმუშის სითბოტევადობისათვის

$$\Delta C = - \frac{\Delta W \Delta T_{max}}{\beta \Delta T_{max}} \quad (25)$$

საჭიროა გვახსოვდეს, რომ ფორმულის გამოყენება შესაძლებელია მხოლოდ გარდამავალი პროცესების დამთავრების შემდეგ ($t \gg \tau$) და იმ შემთხვევაში, თუ $\Delta C \neq f(T)$. თუ ნიმუშის სითბოტევადობა დამოკიდებულია ტემპერატურაზე, ან ნიმუშში მიმდინარეობს სითბოს გამოყოფის ან შთანთქმის პროცესები, ΔC -ს გამოსათვლელად საჭიროა შესწორების შეყვანა, რომელიც ითვალისწინებს კალორიმეტრის დროით მუდმივას. შეცდომა ΔC -ს

განსაზღვრაში მით მეტია, რაც მეტია τ -ს მნიშვნელობა. აქედან გამომდინარეობს, რომ პროცესების შესწავლისას, რომლებსაც ნიმუშის ტემპერატურის ცვლილებისას თან ახლავს სითბოს შთანთქვა ან გამოყოფა, რეალურთან მაქსიმალურად მიახლოებულ სურათის ამსახველ მრუდების მისაღებად, აუცილებელი პირობაა კალორიმეტრის დროითი მუდმივას მინიმალური მნიშვნელობა. ქვემოთ ნაჩვენები იქნება სისტემის დროითი მუდმივას კორექციის შესაძლებლობა ელექტრონული სისტემის მეშვეობით. დამოკიდებულებები (21) და (23) მიღებული იქნა იმ პირობით, რომ კალორიმეტრიულ უჯრედებს შორის სითბოს მიმოცვლა არ ხდება. თუკი ამჟღავნებს შორის ადგილი აქვს სითბოს მიმოცვლას, ნიმუშში შექმნილი სითბური ეფექტის ნაწილობრივი კომპენსაცია ხდება სითბოს გადაცემით უჯრედიდან თერმოსტატში ექსოთერმულ ეფექტისას და თერმოსტატიდან უჯრედში – ენდოთერმულ ეფექტის შემთხვევაში.

იმის გამო, რომ კალორიმეტრიულ უჯრედებში ტემპერატურათა სხვაობის რეგისტრაციისათვის, როგორც წესი, გამოიყენება თერმობატარები, რომელთაც ხშირ შემთხვევაში გააჩნიათ მნიშვნელოვანი სითბოგამტარებლობა – სითბოგამტარებლობის განტოლების დაწერისას ეს გარემოება უნდა იყოს გათვალისწინებული.

თუ განხილულ სისტემაში (სურ.13) კალორიმეტრიული უჯრედებს შევავრთებთ სითბოგამტარი ელემენტით (λ გამტარებლობით), მივადებთ სურ.16-ზე მოცემულ სისტემას. ამ შემთხვევაში სითბოგამტარებლობის განტოლების დაწერისას (13) განტოლებას უნდა მიუმატოთ უჯრედებს შორის სითბოს მიმოცვლის ამსახველი წევრი, რომელიც დამოკიდებულია მათ შორის ტემპერატურათა სხვაობაზე. შედეგად მივიღებთ არაერთგვაროვან დიფერენციალური განტოლებების სისტემას, რომელთა ამოხსნა ზოგადი სახით საკმაოდ რთულია. მიუხედავად ამისა ამოცანის ამოხსნა შესაძლებელია, თუ განვიხილავთ (19)-ის ანალოგიურ შემთხვევას, ანუ ერთ უჯრედში კალიბრებული სიმძლავრის W შეყვანისას, დავაკვირდებით უჯრედებს შორის ტემპერატურათა სხვაობის ცვლილებას.

ორივე კალორიმეტრიული უჯრედისათვის ჩამოვწეროთ სითბოგადაცემის განტოლებები

$$CdT_1/dt = \lambda_0 (T_0 + \beta t - T_1) - \lambda (T_1 - T_2) + W \quad (26)$$

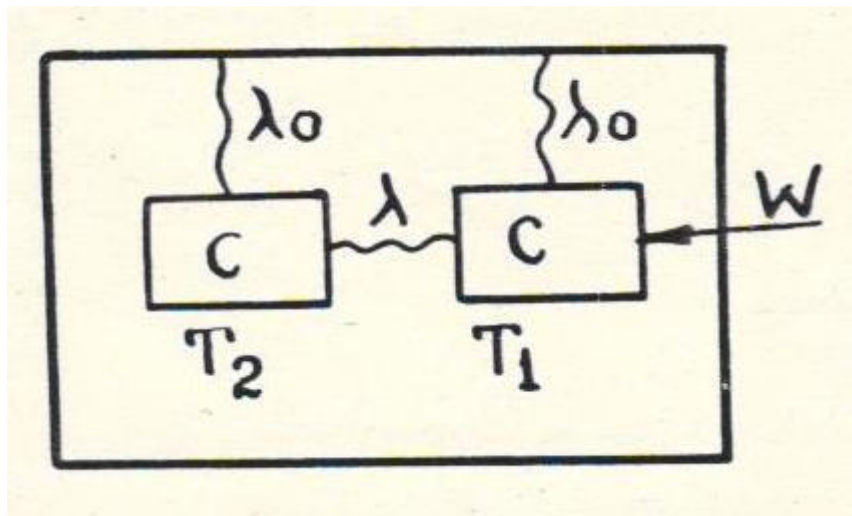
$$CdT_2/dt = \lambda_0 (T_0 + \beta t - T_2) + \lambda (T_1 - T_2) \quad (27)$$

სადაც $T_1 - T_2 = \delta T$ უჯრედების ტემპერატურათა სხვაობაა, გამოწვეული ერთ-ერთ უჯრედში W კალიბრებული სიმძლავრის შეყვანისას. (26), (27) განტოლებებიდან შეიძლება მივიღოთ განტოლება δT -ს მიმართ:

$$Cd(\delta T)/dt = W - (2\lambda + \lambda_0) \delta T \quad (28)$$

რომელიც წარმოადგენს (13) ტიპის არაერთგვაროვან დიფერენციალურ განტოლებას, რომლის ამოხსნას აქვს შემდეგი სახე სახეს

$$\delta T = W / (2\lambda + \lambda_0) [1 - \exp(-(2\lambda + \lambda_0) / C * t)] \quad (29)$$



სურათი 16. კალორიმეტრის მოდელი, სადაც გათვალისწინებულია ამპულებს შორის სითბოს მიმოცვლა ტერმოელემენტით სითბოგამტარებლობით λ . [107]

(29) და (23) განტოლებების შედარება გვიჩვენებს, რომ უჯრედებს შორის სითბოგადაცემის არსებობა გვაძლევს იგივე შედეგს, რაც შეესაბამება კალორიმეტრიულ უჯრედსა და თერმოსტატს შორის სითბოგამტარი ელემენტის სითბოგამტარებლობის გაზრდას 2λ სიდიდით და პრაქტიკულად არ მოქმედებს ამოცანის ზოგად ამოხსნაზე.

ფორმულებიდან (23) და (29) ჩანს, რომ კალორიმეტრიულ უჯრედებს შორის ტემპერატურათა სხვაობა პროპორციულია ნიმუშში გამოყოფილი სიმძლავრისა, ამავედროულად, რეგისტრაციის სისტემისათვის სულ ერთია, უჯრედში სიმძლავრე მიეწოდება გამათბობელი ელემენტით, თუ გამოიყოფა ნიმუშში მიმდინარე რაიმე პროცესების შედეგად. უნდა აღინიშნოს, რომ ნიმუშში ენდოთერმული პროცესებისას რეგისტრირებადი ტემპერატურათა სხვაობა მხოლოდ ნიშანს შეიცვლის. ამგვარად, თუ კი W-ს მნიშვნელობა იცვლება დროში, რეგისტრირებადი სიდიდე მას გაყვება, ოღონდ, კალორიმეტრის დროითი მუდმივათი განპირობებული, გარკვეული დაყოვნებით.

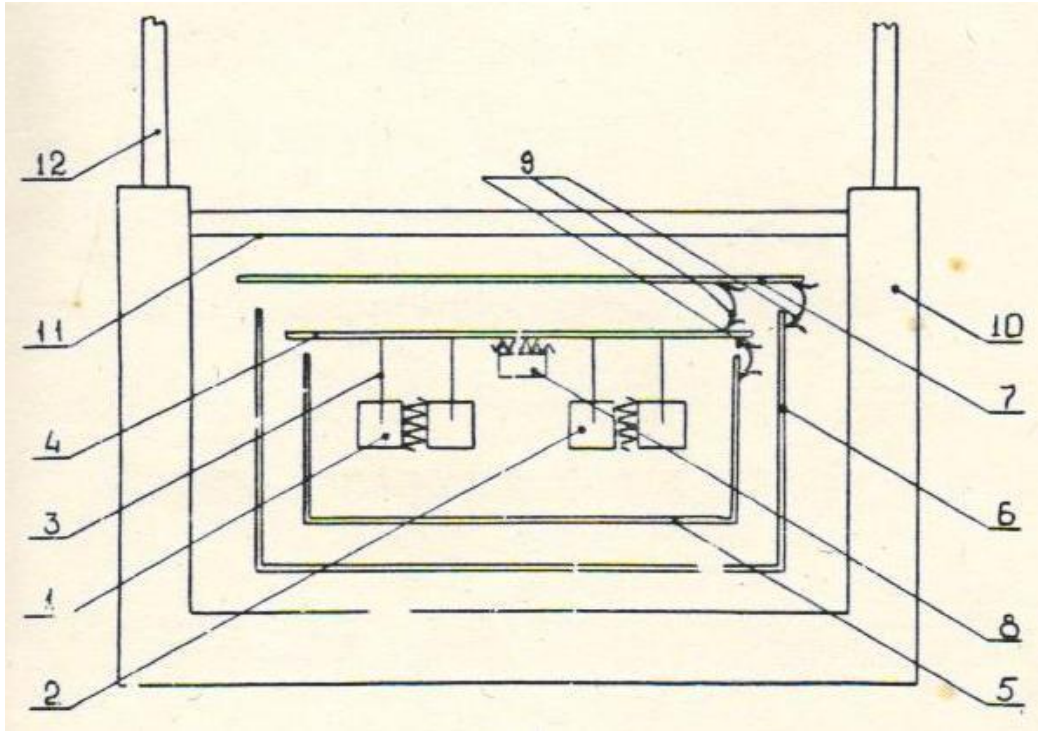
ორარხიანი სკანირებადი დიფერენციალური მიკროკალორიმეტრი [107]

წინამდებარე პარაგრაფში განხილულია კალორიმეტრის ის მოდელი, რომლის საშუალებითაც განხორციელებულია შრომა, რომლის გარკვეულწილად გაგრძელებასც წარმოადგენს წინამდებარე კვლევა

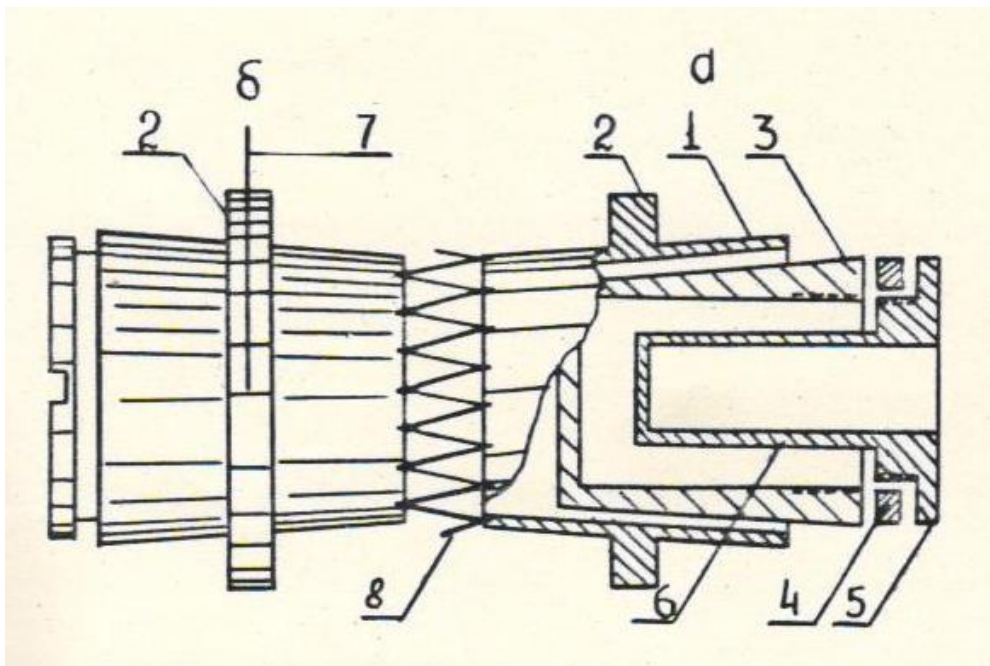
სურათ 17-ზე ნაჩვენებია ორარხიანი სკანირებადი დიფერენციალური მიკროკალორიმეტრის სქემატური სურათი. ორი ორმაგი კალორიმეტრიული ამპულა 1 და 2 ჩამოკიდებულია სპილენძის სითბური ეკრანების სისტემის შიგნით. ამპულები დაკავშირებულია ეკრანთან 4 სითბოგამტარი ელემენტით 3, 4 და 5 ეკრანი ქმნის თერმოსტატის პირველ საფეხურს, ხოლო 5 და 6 – მეორე საფეხურს. ყოველი ეკრანი სრულადაა დაფარული მანგანინის გამახურებლით, რომელიც მჭიდროდაა დახვეული ეკრანების ზედაპირზე ბიფილარულად და მიწებებულია წებოთი ბფ-2.

ინერტული ამპულა 8 გამოიყენება თერმოსტატის ტემპერატურის ცვლილების რეჟიმების პროგრამირებისათვის. თერმოელემენტები 9 ზომავენ ტემპერატურათა სხვაობას თერმოსტატის ეკრანებს შორის, რომლებიც იმყოფებიან აზოტის კრიოსტატში 10. კალორიმეტრი და კრიოსტატი ჩაშვებულია ვაკუუმურ სისტემაში, რომელშიც ჰაერის წნევა არ აღემატება 10^{-5} ტორს. 12 მილების საშუალებით ხდება კრიოსტატის შევსება თხევადი აზოტით. მასიური სპილენძის ეკრანი 11, რომელსაც კარგი სითბური კონტაქტი აქვს კრიოსტატთან, ხელს უწყობს ეკრანების გარშემო ერთგვაროვანი ტემპერატურული ველის შექმნას.

თერმოსტატის პირველ და მეორე საფეხურს შორის ნარჩუნდება მუდმივი ტემპერატურული გრადიენტი. ამასთან მეორე საფეხურის (გარე ეკრანის) ტემპერატურა დაბალია. თითოეული ეკრანის ტემპერატურა რეგულირდება. ეკრანებს შორის ტემპერატურული გრადიენტი საშუალებას იძლევა განხორციელდეს თერმოსტატის პირველი ეკრანის პროგრამული გაცემა, და მაშასადამე თვით კალორიმეტრიული ამპულებისა. 5 ეკრანის ტემპერატურა მიყვება 4 ეკრანის ტემპერატურას, ხოლო 6 ეკრანისა კი – 7 ეკრანის ტემპერატურას. ამგვარად ორმაგი კალორიმეტრიული ამპულები 1 და 2



სურათი 17. ორარხიანი დიფერენციალური სკანირებადი მიკროკალორიმეტრის სქემატური სურათი (აღნიშვნები განმარტებულია ტექსტში). [107]



სურათი 18. ორმაგი კალორიმეტრიული ამპულა (აღნიშვნები განმარტებულია ტექსტში). [107]

მოთავსებულია თერმოსტატის შიგნით, რომლის ტემპერატურაც იცვლება შემდეგი კანონით:

$$T = T_0 + \frac{\lambda}{C} \frac{\varepsilon'}{dT^n} \quad (30)$$

სადაც: T – თერმოსტატის საწყისი ტემპერატურაა, T_0 – ტემპერატურა საწყის მომენტში, λ – სითბოგამტარებლობა, C – ამპულის სითბოტევადობა, ε' – შიდა ეკრანსა 4 და ინერტულ ამპულას 8 შორის ტემპერატურათა სხვაობის გამზომ თერმობატარეაზე პოტენციალთა სხვაობაა, u – ერთი თერმოწყვილის თერმო ე.მ.დ. ერთეულოვანი ტემპერატურული გრადიენტის დროს, ხოლო n არის თერმოწყვილების რაოდენობა.

აქედან გამომდინარე ორმაგი კალორიმეტრიული ამპულების ტემპერატურის დროზე დამოკიდებულება განისაზღვრება ფორმულით:

$$T = T_0 + \beta t - \beta C / \lambda_0 [1 - \exp(-\lambda_0 / C * t)] \quad (31)$$

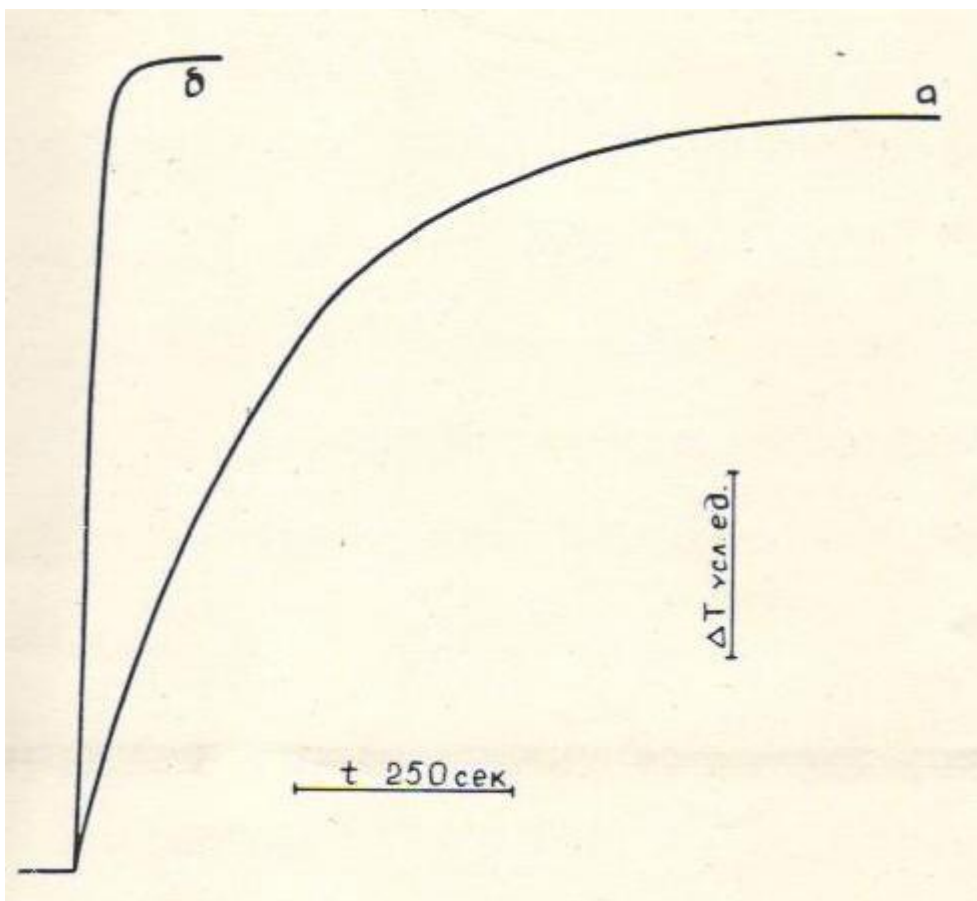
გათვალისწინებულია გაზომვების ჩატარება იზოთერმულ რეჟიმშიც. ამ მიზნით ეკრან 4-ზე მიმაგრებული პლატინის თერმომეტრი. აღნიშნულ თერმომეტრის საშუალებით რეგულირების სისტემა უზრუნველყოფს იზოთერმული რეჟიმის დამყარებას წინასწარ განსაზღვრულ ტემპერატურაზე.

ძირითადი ელემენტი სკანირებადი დიფერენციალური კალორიმეტრისა (ისევე როგორც ყველა კალორიმეტრის) არის კალორიმეტრიული ამპულები, რომლის სქემატური გამოსახულებაც ნაჩვენებია სურათ 18-ზე.

ამპულა შედგება სამი ძირითადი სპილენძის ნაწილისაგან: დამჭერი 1 წრიული რგოლით 2, ნიმუშის ამპულა 3 და სახურავი 5 ცილინდრული შვერილით 6.

ნიმუშსა და ტემპერატურის დეტექტორს შორის ტემპერატურული გრადიენტის შესამცირებლად ამპულის ცალკეულ ელემენტსა და აგრეთვე ნიმუშსა და ამპულას შორის უნდა იყოს მაქსიმალურად კარგი სითბური კონტაქტი. ამ მიზნით დამჭერის შიდა და ნიმუშის ამპულის გარე ზედაპირს აქვს წაკვეთილი კონუსის ფორმა. ნიმუში მოთავსებულია ხუფის შვერილის ქვეშ და ხუფის მიჭერის შედეგად ნიმუშსა და უჯრედს შორის მყარდება კარგი სითბური კონტაქტი. ნიმუშსა და ამპულას შორის სითბური კონტაქტის კიდევ უფრო გასაუმჯობესებლად ამპულა შეიძლება გაივსოს ჰელიუმის აირით. ამპულასა და ხუფს შორის მოთავსებულია ტეფლონის წრიული შუასადები, რომელიც უზრუნველყოფს ამპულის ჰერმეტიულობას. ნიმუშსა და ტემპერატურის დეტექტორს შორის ტემპერატურის გრადიენტის კონტროლი ხორციელდება სპილენძისა და კონსტანტანის თერმოწყვილით, რომლის ერთი ბოლო თავსდება უშუალოდ ნიმუშში ხოლო მეორე მიკრულია დამჭერზე ტემპერატურათა სხვაობის დეტექტორის მახლობლად. 10 K/სთ სიჩქარის დროს აღნიშნული გრადიენტი არ აღემატება 0.05 K-ს.

სითბოს ნაკადი (ან ცივი ნაკადი) ამჟღავნებს მიეწოდება სპილენძის სითბოგამტარი ღეროებით 3 (სურათი 17), რომელიც ერთმანეთთან აკავშირებს ამჟღავნებსა და ეკრანს. აღნიშნული სითბოგამტარი ღეროები უნდა იყოს მაქსიმალურად იდენტური, რათა თითოეულ ამჟღავნებზე სითბური ნაკადი იყოს



სურათი 19. ამჟღავნებს შორის ტემპერატურათა სხვაობის დროზე დამოკიდებულების მიკროკალორიმეტრიული ჩანაწერი. (a) კალორიმეტრი ელექტრული უკუკავშირის გარეშე; (ბ) კალორიმეტრი ელექტრული უკუკავშირით. [107]

ერთნაირი. ამჟღადის გარშემო არსებული სპილენძის რგოლი 2 უზრუნველყოფს ტემპერატურული გრადიენტების შემცირებას.

ა და ბ დამჭერებზე (სურათი 18) განლაგებულია თერმობატარეა 8, რომელიც შედგება თანმიმდევრულად შეერთებული ქრომელ-კონსტანტანის 120 წყვილისაგან. აღნიშნული თერმობატარეა წარმოადგენს ნიმუშსა და ეტალონს შორის ტემპერატურის გრადიენტის გამზომს.

დამჭერზე არის აგრეთვე ორი გამახურებელი ელემენტი, რომელიც მჭიდროდ ფარავს მის მთელ ზედაპირს ბიფილარული ხვიებით. გამახურებელი დამზადებულია 50 მკმ დიამეტრის მანგანინის იზოლორებული მავთულისაგან. ერთი გამახურებელი გათვანისწინებულია ნიმუშში წარმოქმნილი სითბური ეფექტების კომპენსაციისათვის, ხოლო მეორე – სისტემის კალიბრებისათვის.

ტემპერატურის გასაზომად გამოყენებულია პლატინის თერმომეტრი, წინააღობით: 20 ომი, რომელიც წარმოადგენს 900°C-ზე გამომწობილ პლატინის 50μm დიამეტრის მქონე მავთულს, რომელიც უშუალოდ დახვეულია დამჭერის ზედაპირზე.

კალორიმეტრის მახასიათებელი პარამეტრების განსაზღვრისათვის ხდება მისი კალიბრება გამახურებელი ელემენტის საშუალებით, ნიმუშის ამჟღადში ეტალონური იმპულსური სიმძლავრის შეყვანით. სურათ 19-ზე მოყვანილია კალიბრების დროს მიღებული ეტალონური სიმძლავრის შესაბამისი ჩანაწერი. Y-ღერძზე გადაზომილია კალორიმეტრიულ ამჟღადებს შორის ტემპერატურათა სხვაობის პროპორციული სიდიდე. ΔT-ს დროზე დამოკიდებულება შეიძლება განისაზღვროს (23) ფორმულით. იგი გადავწეროთ შემდეგი სახით:

$$\delta T_{\max} - \delta T = \delta T_{\max} e^{-\frac{\lambda_0}{c + \Delta c} t} \quad (32)$$

დამოკიდებულებები

$$\delta T_{\max} - \delta T = f(t) \quad (33)$$

და მისი ლოგარითმი

$$\ln(\delta T_{\max} - \delta T) = \psi(t), \quad (34)$$

რომლებიც მოყვანილია სურათ 20-ზე გვიჩვენებს, რომ ΔT(t)-ს ექსპერიმენტალური დამოკიდებულება ძალიან კარგად აღიწერება გამოსახულებით (23), რაც მოწმობს მოყვანილი გათვლების სისწორეს. ორარხიანი კალორიმეტრის დროითი მუდმივა, განსაზღვრული

(34) დამოკიდებულების დახრით, აღმოჩნდა 220 წამი. ასეთი სისტემის გარჩევითობის უნარი საკმაოდ დაბალია, ასეთი დიდი დროითი მუდმივის გამო. სურათ 21-ზე ნაჩვენებია, რომ თუ კალორიმეტრის ამპულაში შევიყვანთ ეტალონური სიმძლავრის 25 წამიან იმპულსს, რეგისტრირებული სიგნალი ΔT აღწევს მხოლოდ $0.13 \Delta T_{\max}$ მნიშვნელობას.

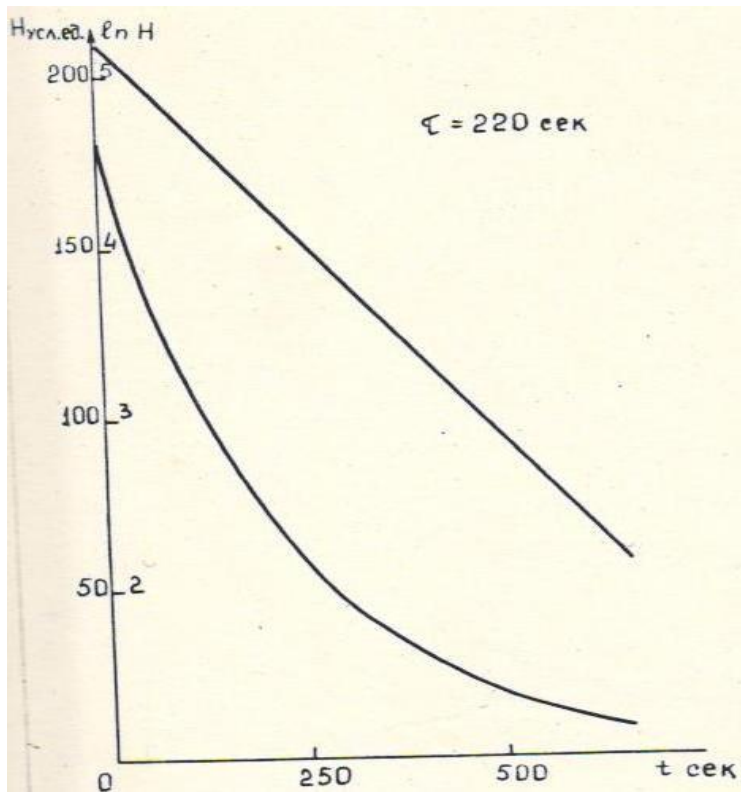
სრულიად განსხვავებული სურათი მიიღება, როდესაც გამოყენებულია ელექტრული უკუკავშირი ან კალორიმეტრის დროითი მუდმივის კორექცია. ორივე შემთხვევაში კალორიმეტრის დროითი მუდმივა ერთნაირია. სურათ 19-ზე მოყვანილია დამოკიდებულება $\Delta T(t)$, რომელიც დაიმზირება სისტემის კალიბრებისას. მრუდის დამუშავება გვიჩვენებს, რომ ამ შემთხვევაში კალორიმეტრის დროითი მუდმივა შეადგენს 13.5 წამს (სურათი 22), რაც გაცილებით ნაკლებია ვიდრე პირველ შემთხვევაში. კალორიმეტრის დროითი მუდმივას შემცირებით მნიშვნელოვნად იზრდება გარჩევითობა. 23-ე სურათზე ნაჩვენებია მრუდი გვიჩვენებს, რომ ამ შემთხვევაში კალორიმეტრიულ ამპულაში სიმძლავრის 25 წამიანი იმპულსის შეყვანისას რეგისტრირებული სიგნალი ΔT აღწევს უკვე $0.81 \Delta T_{\max}$ მნიშვნელობას.

19 და 20 სურათებზე მოყვანილი მრუდები გვიჩვენებს, რომ $\Delta T(t)$ დამოკიდებულება ორარხიანი კალორიმეტრის ამპულისათვის სითბური უკუკავშირით საკმაოდ ზუსტად აღიწერება ერთი ექსპონენტით. დროითი მუდმივები დამოკიდებულებებისა, რომლებიც მოყვანილია სურათ 19-ზე და 21-ზე, განისაზღვრება კალორიმეტრული ამპულის შიგნით სითბოს გადანაწილებით. დროითი მუდმივები, განსაზღვრული სითბური ნაკადებით ამპულათა შორის და თვით ამპულის შიგნით, იკრიბება და შედეგად ორმაგი ამპულებისთვის ვლელობთ დამოკიდებულებას $\Delta T(t)$, რომელიც აღიწერება ერთი ექსპონენტით. აქედან გამომდინარეობს, რომ დიფერენციალურ რგოლოს რომ არ ჰქონოდა დიდი მგრძობიარობა ხმაურის მიმართ, შესაძლებელი იქნებოდა სისტემის შექმნა, რომელშიც ნიმუშის სითბოტევადობის პროპორციული რეგისტრირებული სიდიდე და კალორიმეტრის დროითი მუდმივები გავლენას ვერ მოახდენენ გაზომვის შედეგზე.

ეს ძალიან მნიშვნელოვანი შედეგია, იქმნება შესაძლებლობა ნიმუშის ჭეშმარიტი სითბოტევადობის განსაზღვრისა ტემპერატურის თანაბარი ცვლილების რეჟიმში, საკვლევი ნივთიერების უმნიშვნელო ხარჯით. თუმცა, აუცილებელია გვახსოვდეს, რომ განხილულ შემთხვევაში როდესაც საუბარია თერმოდინამიკურ წონასწორობაზე არ არის გათვალისწინებული ის, რომ დროითი მუდმივების კორექციის დროს რელაქსაციური პროცესები, რომლებიც მიმდინარეობს ნიმუშის შიგნით მისი ტემპერატურის ცვლილებისას, არ არის გათვალისწინებული.

კალორიმეტრის მგრძობიარობა განისაზღვრება გამოსახულებით

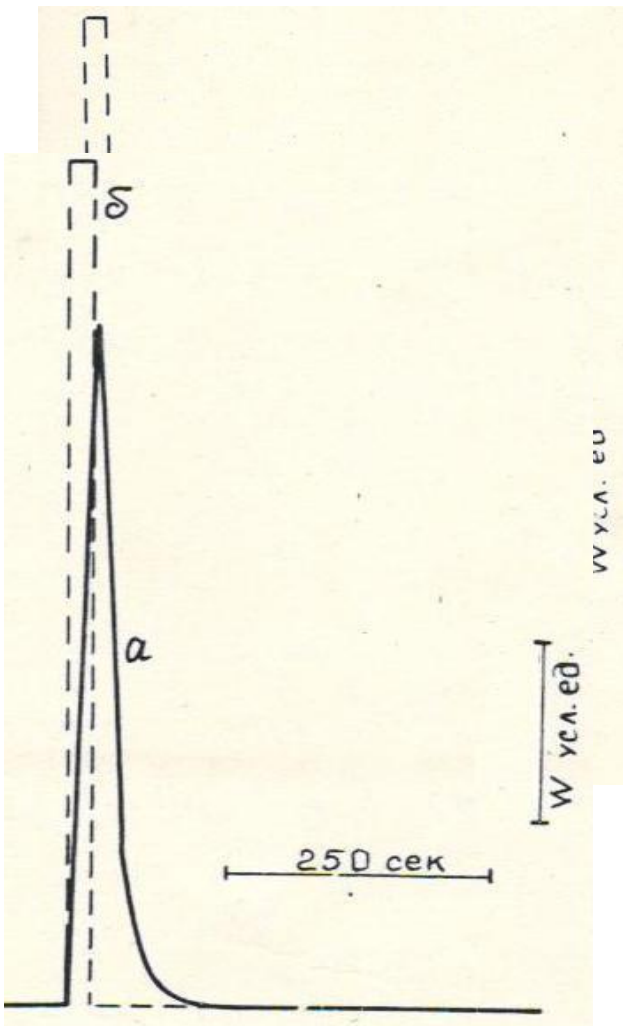
$$\Delta T_{\max} = \frac{W}{\lambda_0} \quad (35)$$



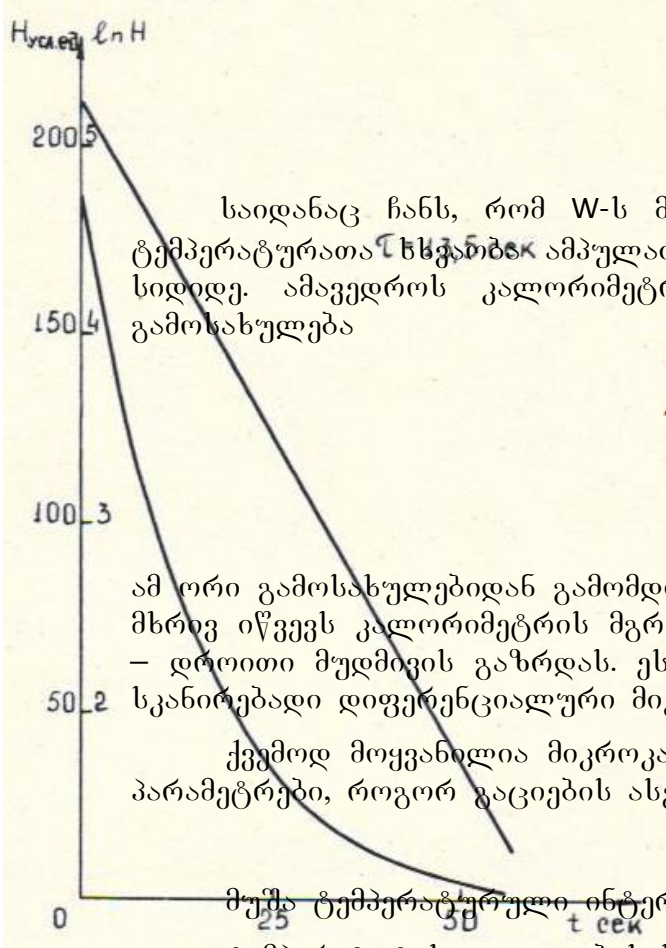
სურათი 20. დროითი გამოკიდებულება სიდიდისა $H = \delta T_{max} - \delta T$ და მისი ლოგარითმი (კალორიმეტრი სითბური უკუკავშირით). [107]

სურათი 21. $\Delta T(t)$ დამოკიდებულება (ა), რეგისტრირებული ამპულაში 25 წამის ხამგრძლივობის სიმძლავრის (ბ) იმპულსის მიწოდებისას. (კალორიმეტრი სითბური უკუკავშირით). [107]

სურათი 22. დროითი გამოკიდებულება სიდიდისა $H = \delta w_{max} - \delta w$ და მისი ლოგარითმი (კალორიმეტრი ელექტრული უკუკავშირით). [107]



სურათი 23. $\Delta w(t)$ დამოკიდებულება (a), რეგისტრირებული ამპულაში 25 წამის სამგრძლივობის სიმძლავრის (b) იმპულსის მიწოდებისას. (კალორიმეტრი ელექტრული უკუკავშირით). [107]



საიდანაც ჩანს, რომ W -ს მოცემული მნიშვნელობისათვის წარმოქმნილი ტემპერატურათა $T_{სგანობა}$ ამჟღავნებს შორის მითუფრო დიდია რაც მცირეა λ_0 სიდიდე. ამავდროს კალორიმეტრის დროითი მუდმივასთვის სამართლიანია გამოსახულება

$$\tau = \frac{c}{\lambda_0} \quad (36)$$

ამ ორი გამოსახულებიდან გამომდინარეობს, რომ λ_0 პარამეტრის გაზრდა ერთის მხრივ იწვევს კალორიმეტრის მგრძობიარობის გაზრდას, ხოლო მეორეს მხრივ – დროითი მუდმივის გაზრდას. ეს ფაქტი აუცილებლად გასათვალისწინებელია სკანირებადი დიფერენციალური მიკროკალორიმეტრის კონსტრუირების დროს.

ქვემოთ მოყვანილია მიკროკალორიმეტრის აღწერილი მოდელის ძირითადი პარამეტრები, როგორ გაციების ასევე გახურების რეჟიმში მუშაობის დროს:

მუშა ტემპერატურული ინტერვალი	-100 – +150 °C
ტემპერატურის ცვლილების სიჩქარე	0 – 30 K/სთ
მგრძობიარობა	10 ⁻⁶ ვატი
დროით მუდმივა:	
ა) სითბური უკუკავშირის დროს	220 წმ
ბ) ელექტონული უკუკავშირის დროს	13.5 წმ
გ) დროითი მუდმივის კორექციის შემთხვევაში	13.5 წმ
აბსოლუტური ტემპერატურის განსაზღვრის სიზუსტე	0.1 K
ნიმუშა და ტემპერატურის დეტექტორს შორის	
ტემპერატურის გრადიენტი 10 K/სთ სიჩქარის დროს	0.5 K
ნიმუშის ამჟღავნების მოცულობა	0.03 – 0.3 სმ ³

II თავი

კვლევის მეთოდი და საკვლევი ობიექტი

§2.1. საკვლევი ნიმუშები

კვლევის ობიექტს წარმოადგენს ერთწლოვანი მცენარის – მრავალძარღვას ფესვები. ექსპერიმენტები ტარდებოდა ფესვის სხვადასხვა უბანსა და ფესვის თმებზე. თუმცა ჩვენს მიზანს არ წარმოადგენს ამ კონკრეტულ მცენარეულ სისტემაში კრისტალიზაციისა და დნობის პროცესების შესწავლა, არამედ ამ პროცესების შესწავლა ზოგადად მცენარეულ ქსოვილებში და ეს ნიმუში აღებულია როგორც მოდელური სისტემა. გარდა იმისა, რომ ნიმუშად ვიღებდით ფესვის სხვადასხვა კომპონენტს, რომლებიც ერთმანეთისაგან განსხვავდებიან სტრუქტურითა და შემადგენელი ქსოვილების განსხვავებული თანაფარდობებით, ისინი განსხვავდებოდნენ გაზომვის წინა ისტორიითაც, ესენია: 1. ნორმალურ კლიმატურ პირობებში მყოფი მრავალძარღვას ინტაქტური ფესვიდან აღებული ნიმუში, 2. გვაველიან პერიოდში აღებული, 3. ჰიდროპონული სისტემა (აქაც არის ორი განსხვავებული ნიმუში: ერთი რომელიც განვითარდა მას შემდეგ რაც მცენარე გადატანილ იქნა ჰიდროპონულ გარემოში და მეორე, ნიმუში რომელიც აღებულია იმ ფესვიდან რომელიც განვითარდა ნიადაგში და შემდეგ მოხვდა ჰიდროპონულ გარემოში), 4. ხდებოდა ნიმუშების ხელოვნურად ნაწილობრივ გაშრობა, რათა მიგვეღო ნიმუშები სხვადასხვა სასურველი წყლის შემცველობით, ასეთი ნიმუშები იზომებოდა დაყოვნების გარეშე ან გარკვეული პერიოდით დაყოვნების შემდეგ რათა გაშრობის შედეგად ძლიერ არაწონასწორულ მდგომარეობაში მყოფი სისტემა გადასულიყო წონასწორულთან ახლოს მდებარე მდგომარეობებში (რამდენად ახლოს იქნება სისტემა წონასწორულ მდგომარეობასთან დამოკიდებულია დაყოვნების ხანგრძლივობაზე, სრული წონასწორული მდგომარეობა მყარდება დაახლოებით 10 საათის შემდეგ, ეს დროც დამოკიდებულია ნიმუშზე (ასაკზე, გამომშრობის დონეზე და აგრეთვე იმაზე თუ ფესვის რომელი უბნიდან არის აღებული ნიმუში).

მშრალი მასის დადგენის მეთოდით განისაზღვრა ნორმალურ კლიმატურ პირობებში მყოფი მრავალძარღვას ინტაქტური ფესვისა და ჰიდროპონული სისტემის ფესვის წყლის შემცველობა. ნიმუშის საწყისი მასის განსაზღვრა ხდებოდა ანალიტიკური სასწორის საშუალებით, რომლის ცდომილება არის 0.2 მგ, ნიმუშების საწყისი მასა იცვლებოდა 5 – 15 მგ ინტერვალში, ანუ საწყისი მასის განსაზღვრის პროცენტული ცდომილება იცვლებოდა 4 – 1.3 % ინტერვალში. მშრალი მასის მისაღებად ნიმუში თავსდებოდა თერმოსტატში 105 °C –ზე 2 საათის განმავლობაში, მშრალი მასის განსაზღვრა ხდებოდა დაყოვნების გარეშე რათა თავიდან აგვერიდებინა ჰაერიდან გამომშრალ ნიმუშზე ტენის ადსორცია. ნიმუშის საწყისი მასისაგან განსხვავებით მშრალი მასის განსაზღვრის პროცენტული ცდომილება ცხადია მეტია რადგან მშრალი წონები მცირეა (0.5 – 2 მგ). ნიმუშის წყლის შემცველობა ანუ წყლის პროცენტული რაოდენობა განისაზღვრებოდა ფორმულით:

$$C_w = \frac{M_w}{M_s} 100 \quad (37)$$

სადაც C_w არის ნიმუშში არსებული წყლის პროცენტული ოდენობა, M_w ნიმუშში არსებული წყლის მასა, ხოლო M_s – ნიმუშის მასა. აღნიშნული მეთოდით წყლის შემცველობა ნორმალურ კლიმატურ პირობებში მყოფი მრავალძარღვას ინტაქტური ფესვისათვისათვის მივიღეთ საშუალოდ 80%, ხოლო ჰიდროპონული სისტემის ფესვისთვის – 85 %.

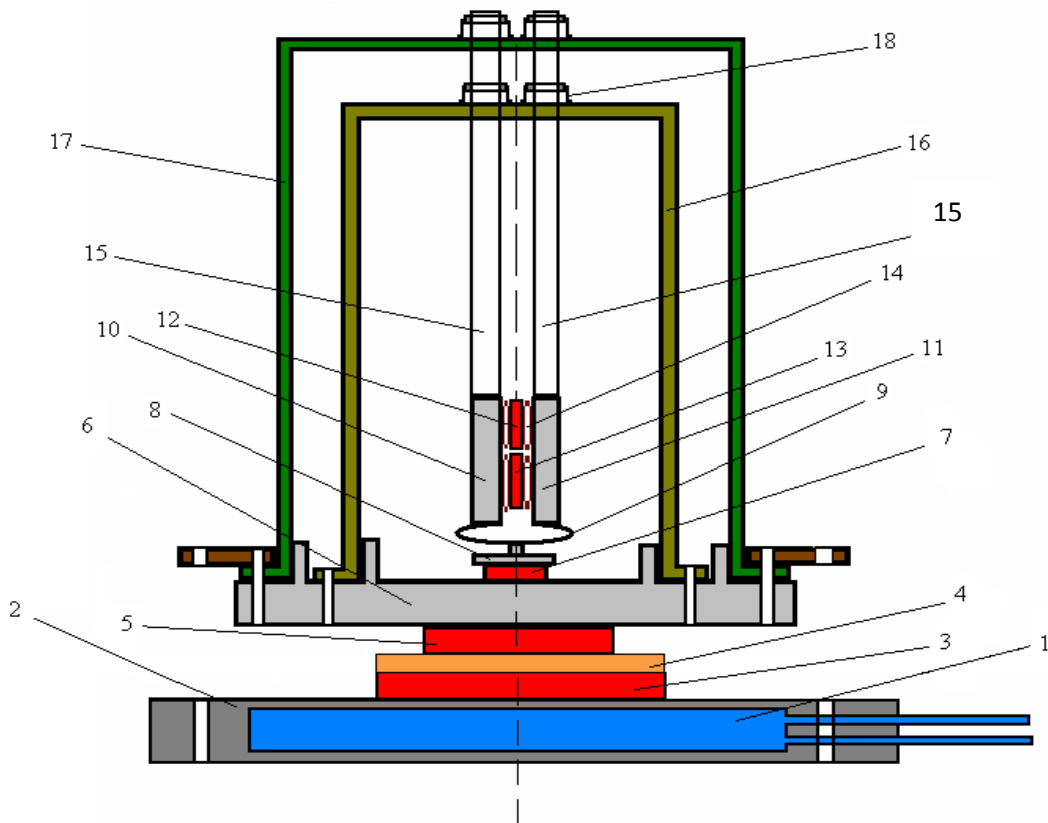
გაშრობის მეთოდით სასურველი წყლის პროცენტული შემცველობის მისაღებად ნიმუში იჭრებოდა გრძივად ორ ნაწილად. ნიმუშის გაჭრა საჭირო გახდა რადგან ფესვის გარეთა ლატერალული ქსოვილი ხელს უშლის ფესვში არსებული წყლის აორთქლებას და საკმაოდ კარგად იცავს ფესვს ტენის კარგვისაგან. აორთქლების ინტენსივობის გასაზრდელად გამოყენებულ იქნა აგრეთვე ჰაერის თბილი ნაკადი (ნაკადის ტემპერატურა – 30 °C). ნიმუშის გრძივად გაჭრისა და ჰაერის თბილი ნაკადის გამოყენების გარეშეც ცხადია მოხდება წყლის აორთქლება ფესვის ოთახის პირობებში ექსპოზიციის დროს, მაგრამ ხშირ შემთხვევებში ექსპერიმენტებისათვის საჭირო იყო ნიმუშები, რომლებიც ძლიერ არაწონასწორულ მდგომარეობაშია ტენის დაკარგვის შედეგად და არაწონასწორული მდგომარეობა მით უფრო დიდია რაც უფრო მცირე დროში ხდება ტენის დაკარგვა, რადგან ნიმუშიდან წყლის აორთქლების პარალელურად მიმდინარეობს პროცესი, რომელსაც სისტემა მიყავს წონასწორული მდგომარეობისაკენ. აღნიშნული პროცესი არის ნიმუშში აღძრული წყლის ნაკადები, რომლის მამოძრავებელი ძალა არის ფესვიდან წყლის აორთქლების შედეგად მიღებული ოსმოსურ წნევათა გრადიენტები.

თუ ცნობილია ნიმუშის საწყისი მასა და აგრეთვე მასში არსებული წყლის პროცენტული რაოდენობა, შესაძლებელია ნიმუშის მიღება სასურველი სწლის შემცველობით. ამისათვის გრძივად გაჭრილი ნიმუში უნდა მოთავსდეს სასწორზე ჰაერის თბილი ნაკადის ქვეშ და უნდა დაყოვნდეს ასეთ პირობებში მანამ სანამ მისი მასა არ შემცირდება

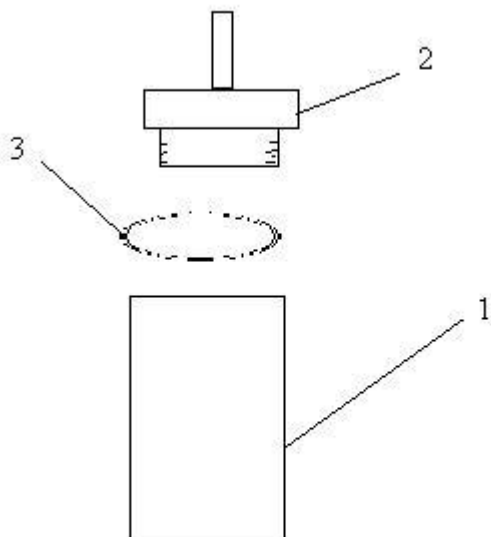
$$M_2 = \frac{100 - C_1}{100 - C_2} M_1 \quad (38)$$

მნიშვნელობამდე, სადაც M_2 არის ნიმუშის საბოლოო მასა, C_1 – ნიმუშში წყლის საწყისი პროცენტული რაოდენობა, C_2 – წყლის საბოლოო პროცენტული ოდენობა ანუ წინასწარ განსაზღვრული სასურველი წყლის შემცველობა, M_1 კი ნიმუშის საწყისი მასა. როდესაც ნიმუშის მასა შემცირდება M_2 მნიშვნელობამდე ნიმუში თავსდება ჰერმეტიკულ ამპულაში.

§2.2 დაბალტემპერატურული დიფერენციალური სკანირებადი რევერსიული მიკროკალორიმეტრი [109, 112]



სურათი 24. დაბალტემპერატურული დიფერენციალური სკანირებადი რევერსიული მიკროკალორიმეტრის სქემატური სურათი (აღნიშვნები განმარტებულია ტექსტში).



სურათი 25. კალორიმეტრიული ამპულა (აღნიშვნები განმარტებულია ტექსტში).

რამდენიმე წლის წინ ანრლონიკაშვილის ფიზიკის ინსტიტუტის ბიოლოგიური სისტემების ფიზიკის განყოფილებაში, წინამდებარე ნაშრობში განხილული პრობლემის გადასაჭრელად, შეიქმნა დაბალტემპერატურული დიფერენციალური სკანირებადი რევერსიული მიკროკალორიმეტრი. აღნიშნული კალორიმეტრი არის პრინციპულად განსხვავებული აქამდე არსებული მოდელებისაგან და ძირითადი განსხვავება გამოიხატება იმაში, რომ კალორიმეტრიული სისტემის გაციება ხდება არა თხევადი აზოტის საშუალებით არამედ ე.წ. "პელტიეს ეფექტის" გამოყენებით. აღნიშნული ეფექტის გამოყენება საშუალებას გვაძლევს შევქმნათ გაცილებით კომპაქტური, ექსპლუატაციისათვის მოსახერხებელი და მნიშვნელოვნად ეკონომიური მოდელი. განსახილველი კალორიმეტრიული მოდელი სქემატურად ნაჩვენებია სურათ 24-ზე. ნებისმიერი კალორიმეტრის ერთ-ერთი ყველაზე მთავარი კომპონენტი არის კალორიმეტრიული ამპულა, რომელშიც თავსდება საკვლევი ობიექტი. მოცემულ შემსვევაში კალორიმეტრიული ამპულა არ არის სტაციონარული, ნიმუშის კალორიმეტრში მოსათავსებლად საჭიროა ნიმუში მოთავსდეს ჯერ ამპულაში, ხოლო შემდეგ ამპულა თავსდება ამპულის კონტეინერში. ჰერმეტიკული ამპულა დამზადებულია სპილენძის მასალისაგან. სპილენძის უპირატესობა განპირობებულია მისი კარგი სითბოგამტარებლობით და მცირე სითბოტევადობით, რაც საბოლოო ჯამში ამცირებს სისტემის დროით მუდმივას და ზრდის კალორიმეტრის მგრძობიარობას, და გარჩევითობას. ამპულა შედგება სამი დეტალისაგან (სურ.25) ცილინდრული ფორმის ჭიქისაგან 1, ხუფისა 2 და ტეფლონის შუასადებისაგან 3, რომელიც უზრუნველყოფს ჰერმეტიკულობას. სტაციონარული კონტეინერი (სურ. 24-ზე 10 და 11), რომელშიც თავსდება ამპულა, ასევე სპილენძისაგანაა დამზადებული, რომლის შიდა ზედაპირი იმეორებს ამპულის გარე ზედაპირის ფორმასა და ზომებს, რათა მათ შორის იყოს კარგი და სტაბილური სითბური კონტაქტი. კონტეინერებს შორის მოთავსებულია ორი იდენტური "პელტიეს" ელემენტი, რომლებიც ერთმანეთისაგან არ განსხვავდებიან მაგრამ აქვთ განსხვავებული ფუნქციონალური დატვირთვა: ერთ-ერთის საშუალებით იზომება სხვაობა კონტეინერების ტემპერატურებს შორის, ხოლო მეორე უზრუნველყოფს აღნიშნული ტემპერატურული გრადიენტის კომპენსაციას, რაც ხორციელდება ელემენტში განსაზღვრული მიმართულებისა და მნიშვნელობის დენის გატარებით, რაც იწვევს ელემენტის ერთ-ერთი ზედაპირის გახურებას და ამავდროულად მეორის გაციებას. კონტეინერსა და "პელტიეს" ელემენტს შორის სასურველია კარგი სითბური კონტაქტი. იგი განხორციელებულია სითბური ხიდაკის საშუალებით 14, რომელიც წარმოადგენს სპილენძის მავთულის ხვიებს. ასეთ ხიდაკს კარგი სითბოგამტარებლობის გარდა აქვს დრეკადობის უნარიც, რაც მოცემულ კონსტრუქციაში საჭიროა, რათა თავიდან ავიცილოთ ხისტი და დაბალი სიმტკიცის ნახევარგამტარი ელემენტის (12, 13) დაზიანება. როგორც უკვე აღნიშნეთ სისტემის გაციება და გათბობა ხდება "პელტიეს" ნახევარგამტარული თერმოელემენტების საშუალებით. უშუალოდ კონტეინერებისა (10, 11) და ამპულების გაციება-გახურება ხორციელდება შედარებით მცირე ზომისა და შესაბამისად მცირე სიმძლავრის "პელტიეს" ელემენტის (7) საშუალებით. ამ ელემენტის სიცივის (სითბოს) წარმადობა უნდა იყოს ისეთი, რომ უზრუნველყოს მხოლოდ 10გრ მასის სპილენძის (კონტეინერები და ამპულები) ტემპერატურის ცვლილების განსაზღვრული სიჩქარე (სკანირების

სინქარე < 70K/სთ). 7 ელემენტის მიერ პროდუცირებული სიცივე (სითბო) პრაქტიკულად არ იხარჯება კონტეინერებზე გარედან შემოსული სითბური ნაკადების კომპენსაციაზე რადგან აღნიშნული ნაკადები თითქმის ნოლამდეა დაყვანილი 6-ე, 16-ე, 17-ე სითბური ეკრანების საშუალებით. ყოველივე ზემოდტქმულის გათვალისწინებით შეიძლება ითქვას, რომ 7 "პელტიეს" ელემენტის სიცივის (სითბოს) წარმადობა უნდა იყოს სულ რაღაც 1 ვტ-ის რიგის. უფრო მაღალი სიმძლავრის სითბური ელემენტის გამოყენების არანაირი საჭიროება არ არსებობს და ხელის შემშლელიც კია, რადგან "პელტიეს" ეფექტს ყოველთვის თან ახლავს ჯოჯოხეთის ფუჭი ეფექტიც, რომელიც ართულებს მთელი კალორიმეტრიული სისტემის გაციებას და ფუჭი ჯოჯოხეთის ეფექტი მით მეტია რაც უფრო მძლავრია "პელტიეს" ელემენტი.

კალორიმეტრის სკანირების სინქარე იმართება აგრეთვე 7 თერმო ელემენტით. აღნიშნულ ელემენტში გადის ელექტრული დენი, რომელიც გარკვეული კანონზომიერებით იცვლება კალორიმეტრის ტემპერატურის მიხედვით, რათა ელემენტის ზედაპირზე სიცივის (სითბოს) წარმადობა იყოს ისეთი რომ უზრუნველყოს კონტეინერების (შიდა კალორიმეტრიული სისტემის) ტემპერატურის ცვლილების მუდმივი სინქარე (სასურველი მნიშვნელობის). 7 თერმოელემენტში გამავალი დენის ტემპერატურაზე დამოკიდებულების კანონზომიერებაში გათვალისწინებულია ტემპერატურის ცვლილების დროს თერმოელემენტის ეფექტურობის ცვლილება და აგრეთვე კონტეინერებზე მცირე გარე სითბური ნაკადების ცვლილებაც.

7 თერმოელემენტის ზედაპირიდან კონტეინერებზე სითბური ნაკადის (ცივი ან თბილი ნაკადი) მიწოდება ხდება სპილენძის 8 და 9 სითბოგამტარი ელემენტების გავლით. 9-ე სითბოგამტარი ელემენტის ზუსტად შუა ნაწილს, 8-ე ელემენტის გავლით, მიეწოდება სითბური ნაკადი, რომელიც იყოფა ორ ნაწილად და მიეწოდება კონტეინერებს. იმისათვის რომ აღნიშნული ორი ნაკადი იყოს ერთნაირი საჭიროა 9 ელემენტი იყოს მაქსიმალურად სიმეტრიული (9-ე ელემენტის ორივე ნაწილს უნდა ჰქონდეს ერთნაირი სითბოგამტარებლობა).

შიდა კალორიმეტრიული სისტემა (ამპულები) მოთავსებულია ორმაგ სითბურ ეკრანში 16, 17, 6, რომელთა ტემპერატურა, სკანირების დროს, მიყვება კალორიმეტრიული ამპულების ტემპერატურას 0.01 °C სიზუსტით და შესაბამისად უზრუნველყოფენ შიდა კალორიმეტრიული სისტემის ადიაბატურობას. აღნიშნული სითბური ეკრანების თერმორეგულირება ხორციელდება 4, 3 "პელტიეს" მძლავრი ნახევარგამტარული ელემენტების საშუალებით. აღნიშნული ელემენტების სიცივის წარმოების სიმძლავრე განსაზღვრავს დაბალტემპერატურული კალორიმეტრის სამუშაო ინტერვალს. წარმოდგენილი კალორიმეტრიული სისტემა მუშაობს -60°C-მდე, ამ ტემპერატურაზე მიმდევრობით დაკავშირებული 3 და 4 ელემენტის მიერ სიცივის წარმადობა აღწევს მაქსიმუმს და იგი ტოლია -60°C -ზე ოთახიდან სითბოს ნაკადისა და კალორიმეტრის მოცემული სინქარით გაციებისათვის მოთხოვნილი სიმძლავრეების ჯამისა.

5 და 3 თერმოელემენტებს შორის მოთავსებულია 3 მმ სისქის სპილენძის ფირფიტა რომელიც იმეორებს დიდი თერმოელემენტის ფორმას. სპილენძის აღნიშნული დეტალი ხელს უწყობს 5 თერმოელემენტის ცხელ ზედაპირზე გამოყოფილი სითბოს მოხსნას 3 თერმოელემენტის მიერ. 3 ნახევარგამტარული თერმოელემენტი იმყოფება კარგ სითბურ კონტაქტში გამაციებელ აბაზანასთან, რომელშიც გაედინება წყალი.

6 მმ დიამეტრისა და 0.2 მმ კედლის სისქის უჟანგავი ფოლადის მილები 15 ასრულებენ ამპულის კონტეინერების ფიქსატორის როლს და ამავედროულად აადვილებს ამპულის მოთავსებას კონტეინერში. რადგან სასურველია ამპულების მაქსიმალური სითბური იზოლირება გარემოსაგან, არჩეულ იქნა დაბალი სითბოგამტარობის მასალისაგან (უჟანგავი ფოლადი) დამზადებული თხელკედლიანი (0.2 მმ) მილი. 15 უჟანგავი ფოლადის მილებსა და 16, 17 სითბურ ეკრანებს შორის კარგი სითბური კონტაქტის განსახორციელებლად გამოყენებულია სპილენძის სითბოგამტარი ხიდაკი. აღნიშნული სითბური ხიდაკი მირჩილულია როგორც ეკრანთან ასევე უჟანგავი ფოლადის მილთან. 15 უჟანგავი ფოლადის მილებში თავსდება საცობი, რომელიც ხელს უშლის მილში ჰაერის კონვექციას.

ოთახიდან კალორიმეტრულ სისტემაზე სითბური ნაკადების შესამცირებლად მთელი სისტემა იზოლირებულია 100 მმ სისქის პენოპლასტით. სისტემის კარგი სითბური იზოლირება ხელს უწყობს კალორიმეტრის სამუშაო ინინტერვალის გაზრდას და აგრეთვე ამცირებს ბაზისური ხაზის ხმაურს და აუმჯობესებს ბაზისის გამეორებადობას. კალორიმეტრიული სისტემა პენოპლასტის თბოიზოლაციით მოთავსებულია გარე ჰერმეტიკ კორპუსში, რომელშიც გაციება-გახურების პროცესში ჰაერი შედის (გადის) ადსორბენტით (სილიკაგელი) სავსე ბალონის გავლით, რათა თავიდან ავიცილოთ ტენის დაგროვება კორპუსის შიდა მოცულობაში.

ქვემოთ მოყვანილია კალორიმეტრის ძირითადი პარამეტრები.

1. ხმაური - $10\mu W$.
2. ბაზისური ხაზის განმეორებადობა $50\mu W$.
3. ამპულის მოცულობა - 25 და $100\mu l$.
4. ტემპერატურის ცვლილების სიჩქარე 70, 60, 40, 25, 15 ი 10 K/სთ ტემპერატურის როგორც მატების, აგრეთვე კლების რეჟიმში.
5. ნიმუშის ტემპერატურის გაზომვის სიზუსტე 0.1 K.
6. ნიმუშში ტემპერატურის გრადიენტი 70 K/სთ სკანირების სიჩქარეზე არ აღემატება 0.1 K.
7. დროითი მუდმივა – 15 წ.
8. კალორიმეტრი განკუთვნილია როგორც მყარი, აგრეთვე თხევადი ნიმუშების გასაზომად.

შექმნილია on line რეჟიმში კალორიმეტრის მუშაობისათვის და მიღებული სითბოს შთანთქმის და სითბოს გამოყოფის მრუდების პირველადი დამუშავების პროგრამები. გაზომვის პროცესში ხდება მრუდების რეგისტრაცია $V(t)$ და $V(u)$ კოორდინატებში, სადაც V - ეტალონურ და გამზომ ამპულებს შორის ტემპერატურათა სხვაობის მარეგულირებულ ელემენტზე მოღებულ უკუკავშირის ძაბვა, t - დრო და u - ნიმუშის ტემპერატურის გადამწოდის ჩვენება. პირველადი დამუშავება შეიცავს შემდეგ საფეხურებს:

1. $V(u)$ დამოკიდებულებიდან $V(T)$ დამოკიდებულებაზე გადასვლა, სადაც T - ნიმუშის ტემპერატურაა.

2. კალორიმეტრის კალიბრება $-V(t)$ და $V(T)$ დამოკიდებულებებიდან $W(t)$ და $W(T)$ დამოკიდებულებებზე გადასვლა, სადაც W -სიმძლავრეა, რომელიც საჭიროა, საკვლევი ნიმუშში, მისი გაცივების ან გათბობის პროცესში წყლის ფაზური გადასვლისას გამოყოფილი (ან შთანთქმული) სითბოს კომპენსაციისათვის. ეს სიდიდე პროპორციულია ნიმუშის სითბოტევადობის ცვლილების მნიშვნელობისა. პროპორციულობის კოეფიციენტია ტემპერატურის ცვლილების სიჩქარე.
3. მრუდების ნორმირება კალორიმეტრის ტემპერატურის ცვლილების სიჩქარის გათვალისწინებით და $\Delta C_p(T)$ დამოკიდებულებაზე გადასვლა, სადაც ΔC_p - მუდმივი წნევის პირობებში ნიმუშის სითბოტევადობის ცვლილებაა.
4. რეგისტრირებული მრუდის ბაზისური ხაზის დადგენა, წყალი - ყინული (ან ყინული - წყალი) ფაზური გადასვლისას ახალი ფაზის წარმოქმნის პროცესში ნიმუშის სითბოტევადობის ცვლილების გათვალისწინებით. ამასთან ერთად უნდა იყოს გათვალისწინებული ის, რომ სისტემის სითბოტევადობის ცვლილება პროპორციულია ტემპერატურის ცვლილებისას წარმოქმნილი ახალი ფაზის რაოდენობისა, რომელიც მოცემულ ტემპერატურულ ინტერვალში რეგისტრირებული მრუდის ფართობით გამოითვლება.
5. რეგისტრირებული მრუდიდან ცალკეული მონაკვეთების გამოყოფა.

ფაზური გადასვლის ფარული სითბო, მიღებული ბაზისური ხაზის მიმართ, $W(t)$ დამოკიდებულების ინტეგრირებით მიიღება, პროგრამა Origin 6.0-ის გამოყენებით.

§2.3. ექსპერიმენტალური მრუდების დამუშავება

ექსპერიმენტალური მრუდების რეგისტრაცია და ვიზუალიზაცია ხდება კომპიუტერში აცგ-ს გავლით. კალორიმეტრიდან კომპიუტერს მუდმივად მიეწოდება ინფორმაცია 1 ჰერცის სიხშირით ნიმუშის ტემპერატურისა და ნიმუშის ამჟღის მაკომპენსირებული სიმძლავრის პროპორციული სიდიდისა. პირველადი ექსპერიმენტალური მრუდი ნაჩვენებია სურათ 26-ზე. ორდინატთა ღერძზე გადაზომილია მარეგულირებელი სიმძლავრის პროპორციული სიდიდე (მარეგულირებელი სიმძლავრე ანუ სიმძლავრე, რომელიც უნდა მიეწოდოს ნიმუშის ამჟღას რათა შენარჩუნდეს მუდმივი ნულოვანი ტემპერატურული გრადიენტი კალორიმეტრულ ამჟღებს შორის სკანირების რეჟიმში მუშაობის დროს, აღნიშნული მარეგულირებელი სიმძლავრე ცხადია შეიძლება იყოს როგორც დადებითი ასევე უარყოფითი მნიშვნელობის). აბსცისათა ღერძზე გადაზომილია ნიმუშის ტემპერატურა $^{\circ}\text{C}$ -ში. ნიმუშის ტემპერატურა დროში იცვლება წრფივად კარგი სიზუსტით (0.1%). მარეგულირებელი სიმძლავრის მნიშვნელობას ძირითადად განსაზღვრავს ნიმუშისა და ეტალონური ამჟღების სითბოტევადობათა სხვაობა და ნიმუშში მიმდინარე პროცესების შედეგად გამოყოფილი ან შთანთქმული სიმძლავრე. ვინაიდან სპილენძის სითბოტევადობა სამუშაო ტემპერატურულ ინტერვალში პრაქტიკულად არ იცვლება და ვინაიდან ორივე ამჟღა თავიანთი კონტენერებითურთ დამზადებულია სპილენძისაგან, საკმარის კარგი მიახლოებით შეიძლება ჩავთვალოთ, რომ მარეგულირებელი სიმძლავრის ცვლილება განპირობებულია მხოლოდ ნიმუშის სითბოტევადობის

ცვლილებითა და ნიმუშში მიმდინარე პროცესების შედეგად პროდუცირებული სითბური ეფექტებით. აქვე უნდა ითქვას, რომ ექსპერიმენტალურ ჩანაწერში გარკვეული წვლილი შეაქვს დრეკადი დეფორმაციების შედეგად წარმოქმნილ სითბურ ეფექტებს და აგრეთვე დიფერენციალურ ამპულაზე არათანაბარ და ცვლად გარე სითბურ ნაკადებს. მარეგულირებელი სიმძლავრის დონის ცვლილებას იწვევს აგრეთვე განსხვავება ამპულების მასებს შორის და აგრეთვე 9 სითბოგამტარ ელემენტში გამავალი სითბური ნაკადების ასიმეტრია. აქ ჩამოთვლილი ფაქტორების შედეგად გამოწვეული ხელისშემშლელი ეფექტების მოსახსნელად გამოიყენება ბაზისური მრუდის გამოკლების ხერხი, რომელიც შემდეგში მდგომარეობს: ექსპერიმენტალური მრუდი იწერება ნიმუშის გარეშე (ცარიელი ამპულით), რომელშიც ასახულია ყველა ზემოდ ჩამოთვლილი ფაქტორით გამოწვეული ეფექტი. ამის შემდეგ მარეგულირებელი სიმძლავრის რეგისტრაცია ხდება უკვე ნიმუშით სასვე ამპულით, რომელშიც ასახულია ბაზისური მრუდში არსებული ყველა "მაგნე" სითბური ეფექტი და ამავდროულად ნიმუშის სითბოტევადობა და ნიმუშში მიმდინარე პროცესების შედეგად მიღებული სითბური ეფექტები. ცხადია თუ უკანასკნელ ექსპერიმენტალურ მრუდს გამოვაკლებთ ბაზისურ მრუდს, მიღებული მრუდი ასახავს მხოლოდ ნიმუშთან დაკავშირებულ პროცესებსა და უშუალოდ ნიმუშის სითბოტევადობას.

იმისათვის, რომ ორდინატთა ღერძზე გადაზომილი მარეგულირებელი სიმძლავრის პროპორციული სიდიდიდან გადავიდეთ უშუალოდ მარეგულირებელი სიმძლავრის მნიშვნელობაზე საჭიროა სისტემის კალიბრება, რომელიც ხორციელდება სპეციალურად კალიბრებისათვის განკუთვნილ გამახურებელში წინასწარ ცნობილი სიმძლავრის შეყვანით. ამგვარად კალიბრების საშუალებით ვიღებთ კოეფიციენტს რომელსაც გადაჰყავს პირველადი მრუდის ორდინატთა ღერძზე გადაზომილი სიდიდე მარეგულირებელ სიმძლავრეში.

ლაბორატორიაში შექმნილია პროგრამული პაკეტი რომლის საშუალებითაც ხორციელდება როგორც ინფორმაციის გადაცემა კალორიმეტრსა და კომპიუტერს შორის ასევე მიღებული ექსპერიმენტალური მრუდების დამუშავება.

აღნიშნული პროგრამული პაკეტის საშუალებით დგინდება ფაზური გადასვლის პროცესში ნიმუშის სითბოტევადობის ცვლილების აღმწერი მრუდი. სადაც გამოყენებულია დაშვება, რომ ნიმუშის სითბოტევადობის ცვლილება პროპორციულია ახალი ფაზის რაოდენობისა. ჩვენს შემთხვევაში ფაზურ გადასვლაში იგულისხმება მცენარეულ ქსოვილში არსებული წყალხსნარის ფაზური გადასვლები – კრისტალიზაცია და დნობა, რადგან აღნიშნული პროცესების სითბური ეფექტები არის გაცილებით დიდი ვიდრე ნიმუშში მიმდინარე ყველა დანარჩენი სხვა შესაძლო პროცესებისა. თუკი მარეგულირებელი სიმძლავრის ტემპერატურაზე დამოკიდებულების მრუდს გამოვაკლებთ ნიმუშის სითბოტევადობის ცვლილების აღმწერ მრუდს მიღებული სხვაობა ასახავს მხოლოდ წყლის ფაზური გადასვლის შედეგად წარმოქმნილი სითბური ეფექტის სიმძლავრის ტემპერატურაზე დამოკიდებულებას. ხოლო აღნიშნული მრუდის ქვეშ მოთავსებული ფართობის საშუალებით შესაძლებელია განისაზღვროს გაციების ან გახურების დროს წყლის ფაზური გადასვლის შედეგად გამოყოფილი ან შთანთქმული მთელი სითბო. ამისათვის საჭიროა აღნიშნული ფართობი გამრავლდეს სკანირების სიჩქარეზე ვინაიდან წყლის ფაზური გადასვლის ენტალპია არ არის მუდმივი სიდიდე და იგი დამოკიდებულია გადასვლის ტემპერატურაზე წყლის რაოდენობის

დასათვლელად, რომელმაც განიცადა ფაზური გადასვლა, შემუშავებულია მეთოდი რომელიც მოყვანილია 3.7 პარაგრაფში, რომლის საშუალებითაც შესაძლებელია, როგორც მთელი ფორმაცვლილი წყლის მასის გამოთვლა ასევე ახალი ფაზის წარმოქმნის ინტენსივობის ტემპერატურაზე დამოკიდებულების დადგენა.

აღნიშნული პროგრამული პაკეტის საშუალებით შესაძლებელია აგრეთვე ექსპერიმენტალური მრუდიდან ცალკეული პიკების გამოყოფა და შემდგომი დამუშავება. შესაძლებელია აგრეთვე ექსპერიმენტალურ მრუდზე არსებული დეფექტების მოხსნა. სრული ენტალპიისა და სითბოტევადობის ნახტომის გამოთვლა.

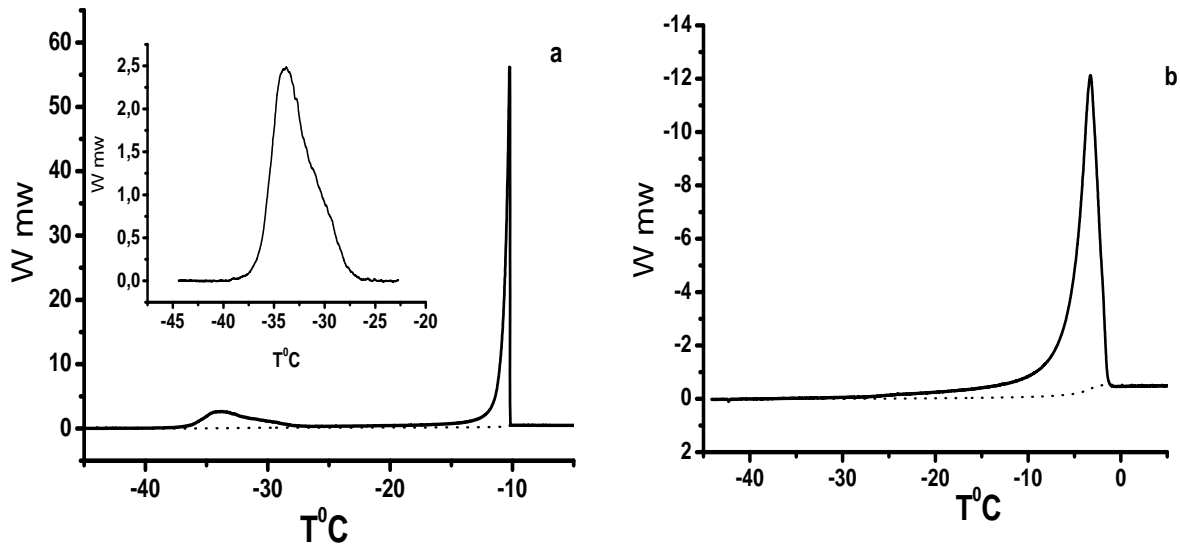
III თავი. შედეგები და განხილვა

§3.1. ნიმუშში არსებული წყლის კრისტალიზაციისა და ყინულის დნობის პროცესების ამსახველი კალორიმეტრიული მრუდების ზოგადი აღწერა [109, 110, 111]

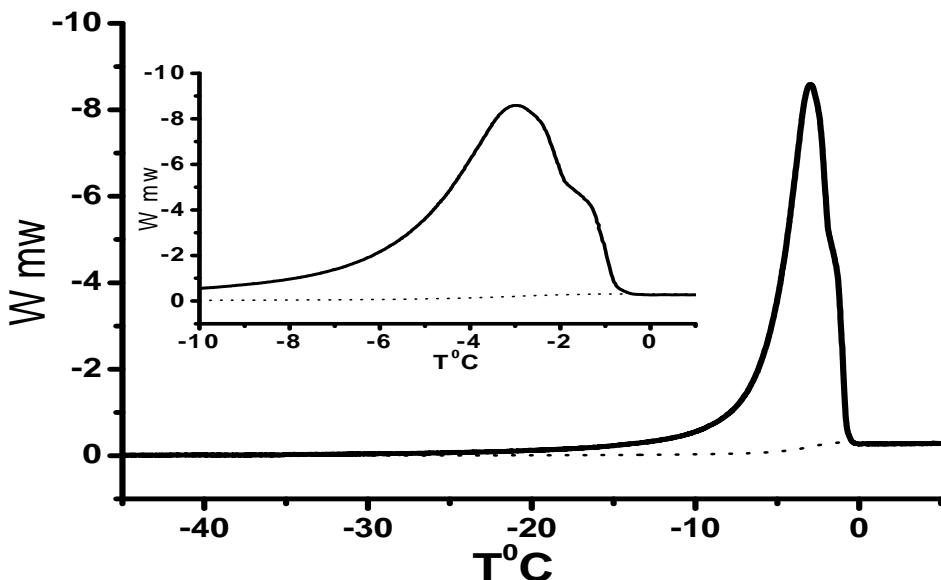
წინამდებარე ნაშრომის I თავში აღწერილი იყო ბიოლოგიურ სისტემებში წყლის გადაციების პრობლემები და ძირითადად ეხებოდა მცენარეების დაბალი ტემპერატურებისადმი ადაპტაციის მექანიზმების შესწავლას. ქვემოთ მოყვანილი შედეგები წარმოადგენს ამ სამუშაოების გაგრძელებას და მიძღვნილია ერთწლიან მცენარეთა ფესვებში წყლის კრისტალიზაციისა და ყინულის დნობის პროცესების თავისებურებათა შესწავლისადმი. პირველ თავში მოყვანილ სამუშაოებში, რომლებშიც განხილულია მცენარეთა ქსოვილებში წყლის გადაციების პრობლემები, საკვლევ ობიექტს წარმოადგენდა მრავალწლიან მცენარეთა ცალკეული ქსოვილები. ეს სისტემები გაცილებით უფრო მარტივია ვიდრე ფესვები, რომლებშიც თავმოყრილია სხვადასხვა ტიპის უჯრედები, მერისტემული უჯრედების ჩათვლით. ამდენად, ასეთ სისტემებზე მიღებული შედეგების ინტერპრეტაცია გაცილებით რთულია. მიუხედავად ამისა წინამდებარე სამუშაოში მოყვანილი შედეგები გარკვეული მოსაზრებების გამოთქმის საშუალებას იძლევა. საკვლევ ობიექტად არჩეულ იქნა მრავალძარღვას ფესვები, თუმცა ჩვენს მიზანს არ წარმოადგენს ამ კონკრეტულ მცენარეულ სისტემაში კრისტალიზაციისა და დნობის პროცესების შესწავლა, არამედ ამ პროცესების შესწავლა ზოგადად ქსოვილებში და ეს ნიმუში აღებულია როგორც მოდელური სისტემა.

სურათ 26ა-ზე ნაჩვენებია ნორმალურ კლიმატურ პირობებში მყოფი მრავალძარღვას ინტაქტურ ფესვზე ჩატარებული კალორიმეტრიული ექსპერიმენტის შედეგად მიღებული მრუდი, რომელზეც ასახულია ნიმუშში არსებული წყლის კრისტალიზაციის პროცესი. აღნიშნული მრუდიდან დგინდება, რომ ამგვარ ნიმუშში წყლის კრისტალიზაცია ინტენსიურად იწყება -10°C -ზე. მყისიერი კრისტალიზაციის პროცესის შემდეგ სითბოს გამოყოფის ინტენსიობა კლებულობს, მაგრამ დაბალი ინტენსიობის კრისტალიზაციის პროცესი მაინც გრძელდება -27°C -მდე. -27°C - -40°C ტემპერატურულ ინტერვალში კვლავ იზრდება პროცესის ინტენსიობა და გვაქვს კიდევ ერთი ინტენსიური ეგზოთერმა (სურათი 26ა და მისი ჩანართი), რომელიც შედეგადად ორი, შესაძლოა სამი პიკისაგან. რაც

შეესება დნობის მრუდს, მასზე მივიღეთ ერთი მაქსიმუმი -3°C -ზე (სურათი 26ბ), თუმცა იყო ისეთი ექსპერიმენტები სადაც ძირითადი პიკის მარჯვენა ფერდზე ჩანს მცირე ზომის მხარი (სურათი 27) (ანუ შესაძლოა ყინულის დნობის შესაბამის მრუდზე რეალურად გვქონდეს ორი ერთმანეთთან ახლოსმდებარე ან ერთადმდებარე პიკი).



სურათი 26. ნორმალურ კლიმატურ პირობებში აღებულ მრავალძარღვას ინტაქტურ ფეხვში წყლის კრისტალიზაციისა (a) და ყინულის დნობის (b) პროცესების მიკროკალორიმეტრული ჩანაწერები. ნიმუშის მასა – 19.8მგ, წყლის შემცველობა – 82.3%, სკანირების სიჩქარე $60^{\circ}\text{C}/\text{სთ}$. სურ.1ა-ს ჩანართზე ნაჩვენებია დაბალტემპერატურული ეგზოტერმა განსხვავებულ მასშტაბში.



სურათი 27. ნორმალურ კლიმატურ პირობებში აღებულ მრავალძარღვას ინტაქტურ ფეხვში, დანოვანს, დნობის პროცესის მიკროკალორიმეტრული ჩანაწერები. ნიმუშის

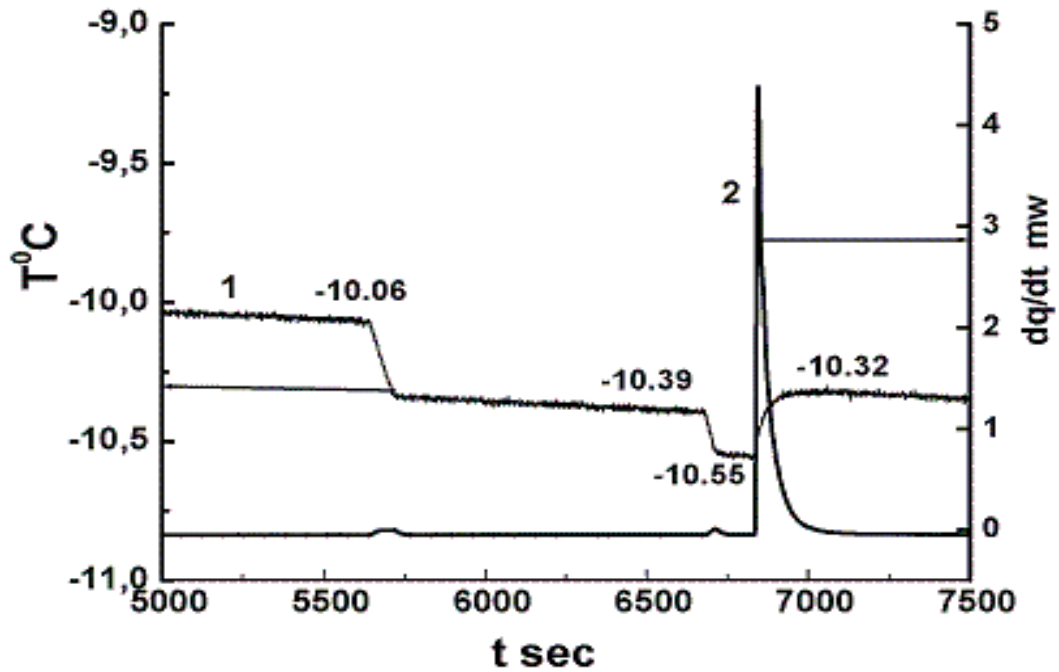
§3.2 ყინულის მდგრადი ჩანასახის წარმოქმნის ალბათობა, როგორც ტემპერატურისა და დროის ფუნქცია [111]

ცნობილია რომ წყლის კრისტალიზაცია იწყება, როდესაც მყარი ფაზის ჩანასახი მიაღწევს კრიტიკულ ზომას (როდესაც წარმოიქმნება მყარი ფაზის მდგრადი ჩანასახი). მოცემული წყალხსნარისთვის მდგრადი ჩანასახის შექმნის ალბათობა დამოკიდებულია წყალხსნარის ტემპერატურაზე და ამ ტემპერატურაზე ნიმუშის დაყოვნების დროზე. იმის დასადგენად თუ რამდენად არის დამოკიდებული მდგრადი ჩანასახის შექმნა დროზე, ექსპერიმენტი ჩატარებულ იქნა ძალიან დაბალ სიჩქარეებზე (0.1°C საათში) (სურ.28), თუმცა კრისტალიზაციის პროცესი არ დაიწყო მანამ სანამ ნიმუშის ტემპერატურა არ გახდა კვლავ -10°C , ანუ მოცემული ნიმუშისთვის დროის მცირე ერთეულებში (1წმ; 1წთ; 1სთ) მდგრადი ჩანასახის წარმოქმნის ალბათობა ამ ტემპერატურაზე მკვეთრად იზრდება 0-თან ახლოს მდებარე მნიშვნელობიდან 1-თან ახლოს მდებარე მნიშვნელობამდე (სურათი 29a). აქედან გამომდინარე შეიძლება ითქვას რომ ტემპერატურა, რომელზეც იწყება კრისტალიზაციის პროცესი, მოცემული ნიმუშის მახასიათებელი ტემპერატურაა. იგი არაა დამოკიდებული გაციების სიჩქარეზე და კრისტალიზაციის პროცესი არ იწყება მანამ სანამ ტემპერატურა არ მიაღწევს მახასიათებელ მნიშვნელობას. მაგრამ თუ დროის ერთეულად ავიღებთ არა წამს ან საათს არამედ უფრო დიდ დროის ერთეულს, ეს ტემპერატურა აღარ იქნება მახასიათებელი მოცემული ნიმუშისათვის და კრისტალიზაციის დასაწყისი მნიშვნელოვნად იქნება დამოკიდებული ნიმუშის გაციების სიჩქარეზე. მაგრამ ჩვენ არ ვიცით რომელია ეს “დიდი” დროის ერთეული, რომლისთვისაც დროის ამ შუალედში მდგრადი ჩანასახის წარმოქმნის ალბათობის დამოკიდებულებას ტემპერატურაზე ექნება შემდეგი სახე (სურათი 29b). ეს შეიძლება იყოს კვირა, წელიწადი ან კიდევ გაცილებით დიდი დროის ერთეული.

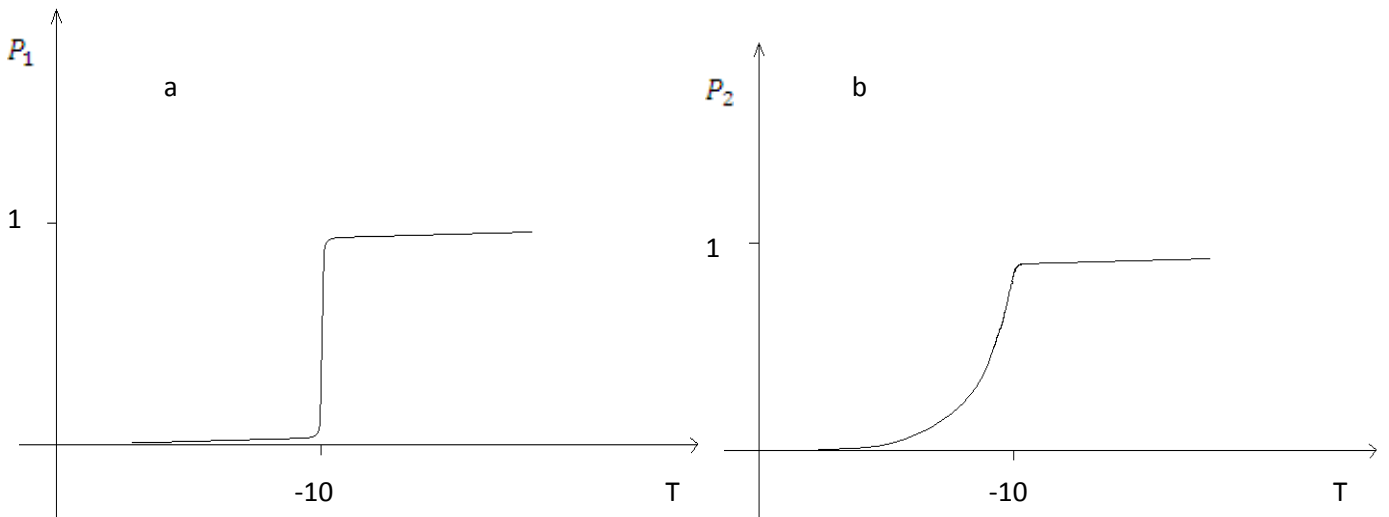
§3.3. ნიმუშის გაციების პროცესში სხვადასხვა ეტაპზე გაყინული წყლის იდენტიფიკაცია და კრისტალიზაციის პირველ ეტაპზე მიმდინარე პროცესების სცენარი

კრისტალიზაციის მრუდიდან (სურათი 26a) შეიძლება ვივარაუდოთ, რომ პირველად ხდება უჯრედშორისი წყლის კრისტალიზაცია, რადგან მხოლოდ მოცულობით წყალს თუ შეუძლია მოგვცეს მსგავსი მყისიერი პროცესი. ამ ძალზედ ინტენსიურ სითბოს გამოყოფის პროცესს მოჰყვება კრისტალიზაციის პროცესი, რომელიც თანდათან მცირდება. კრისტალიზაციის ეს პიკი არ შეიძლება მთლიანად ეკუთვნოდეს უჯრედშორისს, რადგან აღნიშნული პიკის ფართობი არის მთლიანი ფართობის 90%, მაშინ როცა უჯრედშორისი წყლის

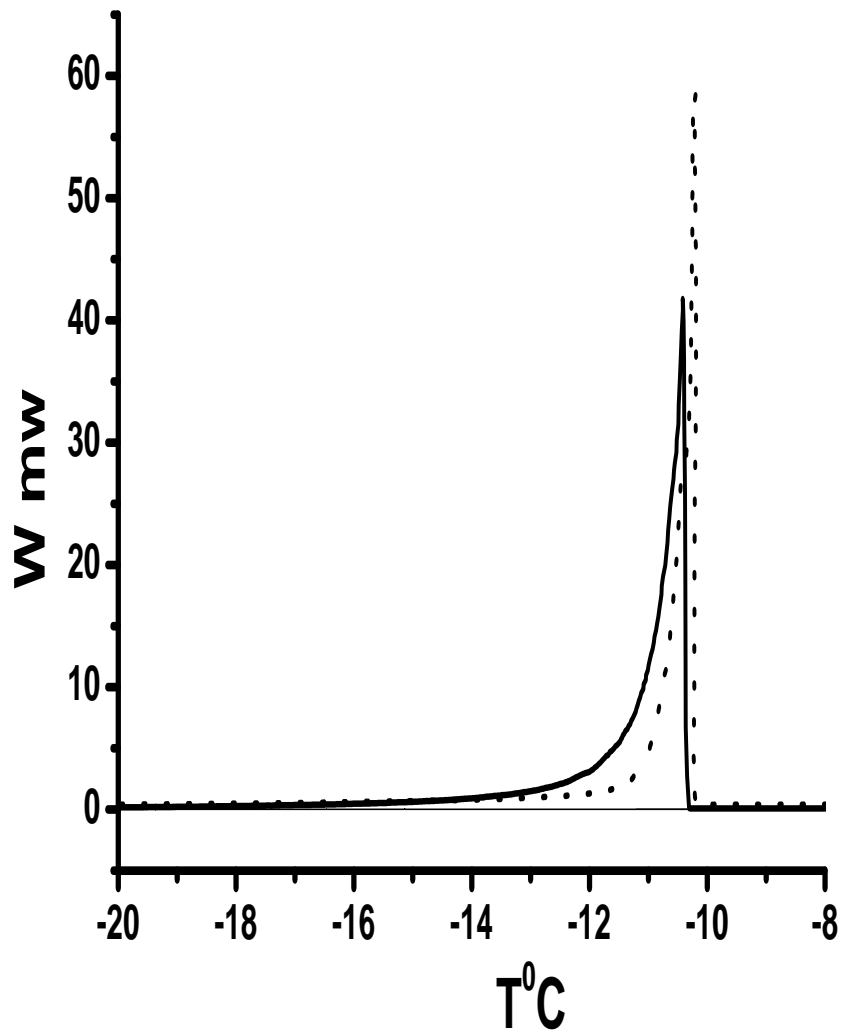
წილი ქსოვილში ბევრად ნაკლებია, ანუ ამ ტემპერატურულ ინტერვალში ხდება უჯრედშიდა წყლის კრისტალიზაცია. მას შემდეგ რაც იყინება უჯრედშორისი,



სურათი 28. ტემპერატურისა (1) და სითბოს გამოყოფის სიმძლავრის (2) დროზე დამოკიდებულება ნიმუშის თანაბარი სიჩქარით გაციებისას (0.013K/სთ). ნიმუშის წყლის შემცველობა 80.5%.



სურათი 29. ნიმუშში მდგრადი ჩანასახის წარმოქმნის ალბათობის



სურათი 30. უწყვეტი სახით ნაჩვენებია ნორმალურ კლიმატურ პირობებში აღებული მრავალძარღვას ინტაქტურ ფესვში წყლის პირველადი კრისტალიზაციის პროცესების მიკროკალორიმეტრული ჩანაწერი, ხოლო წყვეტილი სახით – მეორადი. ნიმუშის მასა – 12.7გ, წყლის შემცველობა – 79.3%, სკანირების სიჩქარე 60°C/სთ.

იქმნება დიდი ოსმოსური გრადიენტი უჯრედშიდა და უჯრედგარე არეებს შორის, რადგან ყინულის ნაჯერი ორთქლის წნევა მოცემულ ტემპერატურაზე ნაკლებია უჯრედში არსებული წყალხსნარის ნაჯერი ორთქლის წნევაზე. შესაბამისად აღიძვრება წყლის ნაკადი უჯრედიდან უჯრედშორისში, სადაც შემდგომ მიმდინარეობს ტრანსპორტირებული წყლის კრისტალიზაცია. ლოგიკურად იბადება კითხვა ხომ შეიძლება პროცესი (კრისტალიზაციის) მიმდინარეობდეს უჯრედის შიგნით. მაგრამ ამ ვერსიას გამორიცხავს მეორადი კრისტალიზაციის მრუდის ფორმა რომელიც ნაჩვენებია სურათი 30-ზე (წვეტილი მრუდი).

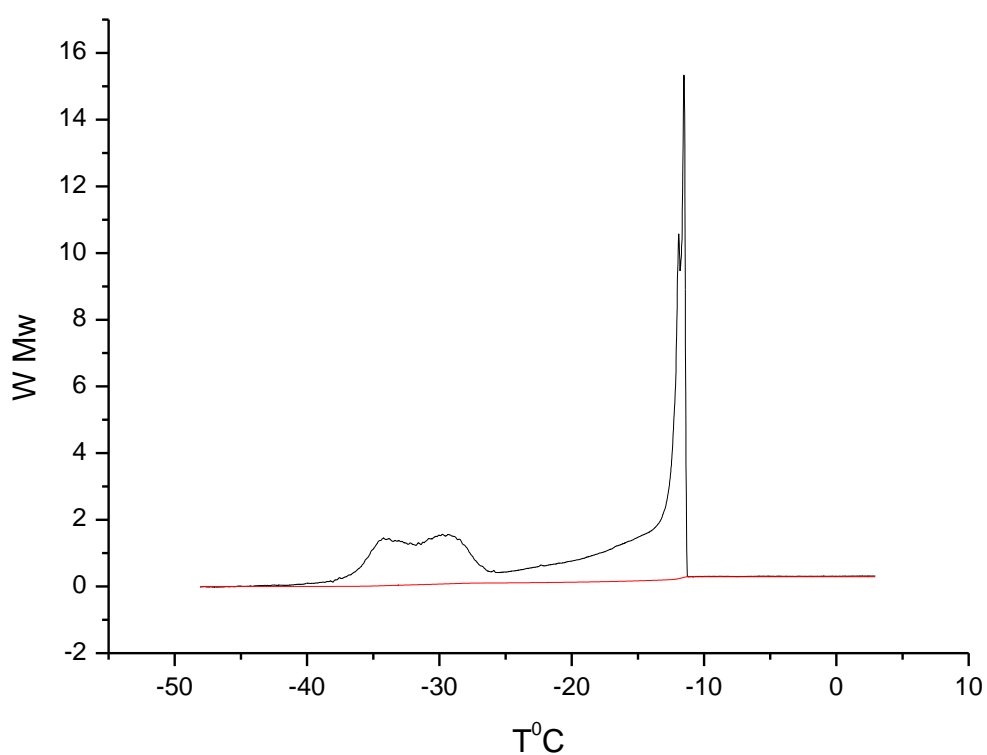
აღნიშნულ სურათზე ჩანს, რომ მეორადი კრისტალიზაციის დასაწყისი კიდევუფრო ინტენსიურია ვიდრე პირველადისა (ანუ პირველი კრისტალიზაციის შედეგად გაიზარდა მოცულობითი წყლის ოდენობა) და მარცხენა ფერდი უფრო ციცაბოა და პიკის სიგანე ნაკლებია. ანუ უფრო მაღე მოხდა უჯრედული წყლის გაყინვა ეს გაუგებარი იქნება იმ შემთხვევაში უჯრედების შიგნით რომ მიმდინარეობდეს კრისტალიზაციის პროცესი, იქნებოდა ეს ყინულის ფრონტის გაგრძელება უჯრედის შიგნით თუ მითუმეტეს მასში მდგრადი ჩანასახის შექმნა და ინდივიდუალური კრისტალიზაცია. რადგან არცერთი ეს პროცესი არაა დამოკიდებული ნიმუშის წინა ისტორიაზე. რჩება ერთადერთი ვარიანტი: უჯრედიდან წყლის გამოსვლა და მისი კრისტალიზაცია უჯრედშორისში, ამ ვარაუდს არ გამორიცხავს ექსპერიმენტალური მონაცემები და მეტიც მის სასარგებლოდაც კი მეტყველებს: თუკი უჯრედიდან წყალი გამოვიდა ცხადია პირველადი კრისტალიზაცია უფრო ინტენსიური უნდა იყოს და იმ შემთხვევაშიც კი თუ ყინულის დნობის შემდეგ წყლის გარკვეული ნაწილი კვლავ დაბრუნდა უჯრედში (ისევ ოსმოსური გრადიენტის გამო), მეორადი კრისტალიზაციის დროს პლაზმოლიზი უფრო გაიოლებული იქნება და ნაკადიც შესაბამისად უფრო ინტენსიური იქნება.

§3.4. ყინულის დნობის პროცესის ამსახველი ურთიერთგადაფარული კალორიმეტრიული პიკების იდენტიფიკაცია და კრისტალიზაციისა და დნობის მაქსიმუმებს შორის ურთიერთშესაბამისობის დადგენა.

[110]

რაც შეეხება კრისტალიზაციის პროცესს, რომელსაც ინტენსივობის მაქსიმუმი -35°C -ზე აქვს, შედგება ორი (შესაძლოა სამი) პიკისაგან რომელთაც გაუსის განაწილების მზგავსი ფორმა აქვთ. ამ ტემპერატურულ ინტერვალში მინიმუმ ორი პიკის არსებობა ეჭვგარეშეა – ნათლად ჩანს კალორიმეტრიული ჩანაწერებიდან (სურათი 31), ხოლო რაც შეეხება სამი პიკის არსებობას ეს ვარაუდი გაჩნდა რადგან მიღებული ეგზოთერმა ყველაზე კარგად იშლება სამ (და არა ორ) გაუსის მრუდად.

საინტერესოა იმის გარკვევა მცენარეულ ქსოვილში არსებული რომელი წყალი იყინება ამ ტემპერატურულ უბანში. ამ საკითხის გაგრძელებამდე განვიხილოთ დნობის მრუდი, სადაც ხშირად ჩანს გარკვეული გამრუდებები, რომელიც ზემოდ უკვე ვახსენეთ, რაც გვაფიქრებინებს რომ ენდოთერმა ორი პიკისაგან შედგება.

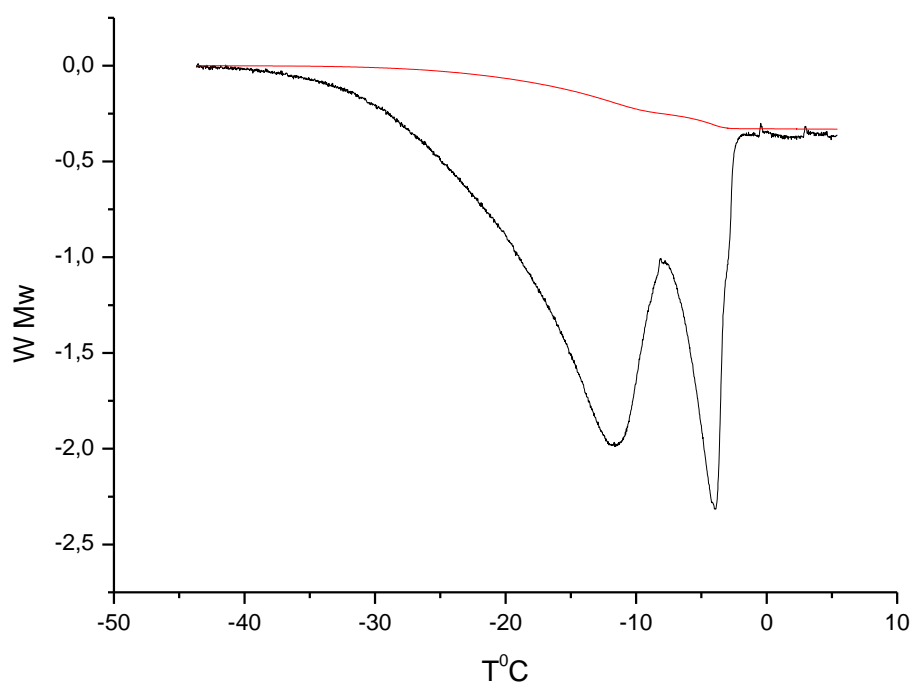


სურათი 31. ნორმალურ კლიმატურ პირობებში აღებული მრავალდარღვას ინტაქტურ ფესვში წყლის კრისტალიზაციის პროცესის მიკროკალორიმეტრული ჩანაწერი. ნიმუშის მასა – 15.3მგ, წყლის შემცველობა – 68%, სკანირების სიჩქარე 60°C/სთ.

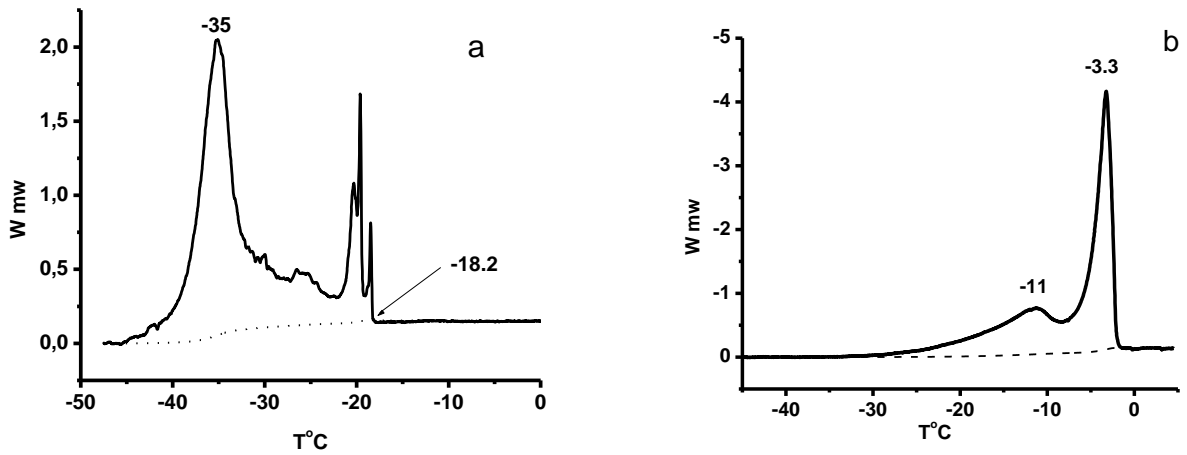
დნობის მაქსიმუმის მდებარეობა ტემპერატურულ ღერძზე დამოკიდებულია წყალხსნარში გახსნილ ნივთიერებებზე (ძირითადად ოსმოსურად აქტიურ ნივთიერებებზე) და მათ კონცენტრაციებზე. ერთადერთი გზა ტემპერატურულ ღერძზე ამ ორი პიკის (თუ ის მართლაც არსებობს) დაშორებისა არის მათი შესაბამისი წყალხსნარების ოსმოსური კონცენტრაციების შეცვლა. თუკი დნობის ორი პიკი ერთიდაიმავე ტემპერატურაზე მდებარეობს ან ერთმანეთთან ახლოს მდებარეა ეს იმას ნიშნავს, რომ მათი შესაბამისი წყალხსნარების ოსმოსური კონცენტრაციები ერთმანეთს ემთხვევა ან მცირედით განსხვავდებიან ერთმანეთისაგან. პიკების განსაცალკევებლად, ანუ წყალხსნარის ორ ფრაქციას შორის ოსმოსური გრადიენტის მისაღებად მივმართეთ შემდეგ ხერხს: მცენრის გრძივად გაჭრილი ფესვიდან ამოვაშრეთ წყლის გარკვეული ნაწილი (ნიმუშში წყლის შემცველობა ნაწილობრივ ამოშრობის შემდეგ დარჩა 50%) (იხილეთ პარაგრაფი 2.1), რადგან ვვარაუდობდით რომ შესაძლებელი იყო წყლის აორთქლება ორი სხვადასხვა ფრაქციიდან მომხდარიყო არათანაბრად (არაპროპორციულად) რაც გამოიწვევდა ოსმოსური გრადიენტის მიღებას (ან გაზრდას). აღნიშნული ნიმუშში ყინულის დნობის მრუდზე მართლაც მივიღეთ ორი ერთმანეთისაგან მკვეთრად გამოყოფილი პიკი -11.8°C -ზე და -4.5°C -ზე (სურათი 32).

ნაწილობრივ ამომშრალ ნიმუშებში როგორც უკვე ვთქვით ვღებულობთ ორ ენდოთერმას დნობის მრუდზე, ორი ეგზოთერმა გვაქვს აგრეთვე კრისტალიზაციის დროსაც (სურათი 33), საინტერესოა არსებობს თუ არა რაიმე ურთიერთშესაბამისობა მათ შორის. ამის დასადგენად ჩავატარეთ ექსპერიმენტების ციკლი კვლავ ხელოვნურად გამომშრალ ნიმუშზე (წყლის შემცველობა 48%): პირველი ციკლის დროს ნიმუში გავაცივეთ ოთახის ტემპერატურიდან -50°C -მდე და შემდეგ კვლავ გავათბეთ ოთახის ტემპერატურამდე (სურათი 33), ამ ციკლის დროს დადგინდა კრისტალიზაციისა და დნობის პიკების მდებარეობა ტემპერატურულ ღერძზე ($T_{\text{კ}1}=-18.2$, $T_{\text{კ}2}=-35$, $T_{\text{დ}1}=-3.3$ $T_{\text{დ}2}=-11$). მეორე ციკლის დროს ნიმუში გავაცივეთ მხოლოდ -26°C -მდე რათა გაყინულიყო წყლის მხოლოდ პირველი ფრაქცია, ხოლო მეორე ფრაქცია დარჩენილიყო თხევად მდგომარეობაში. ასეთ შემთხვევაში დნობის მრუდზე მიღებული ენდოთერმული პროცესი იქნება პირველი ფრაქციის წყლის წონასწორული ფაზური გადასვლის ამსახველი (გამოჩნდება მხოლოდ ის სითბური ეფექტი რომელსაც იწვევს პირველი ფრაქციის ყინულის დნობა). დნობის მრუდზე გამოჩნდა დაბალტემპერატურული პიკი და მცირე ზომის პიკი -3.4°C -ზე (სურათი 34). ამ ექსპერიმენტალური მრუდებიდან დგინდება, რომ მაღალტემპერატურულ კრისტალიზაციის პიკს (წყლის პირველი ფრაქციის კრისტალიზაციას) შეესაბამება დაბალტემპერატურული დნობის პიკი (პირველი ფრაქციის ყინული დნება დაბალ ტემპერატურაზე).

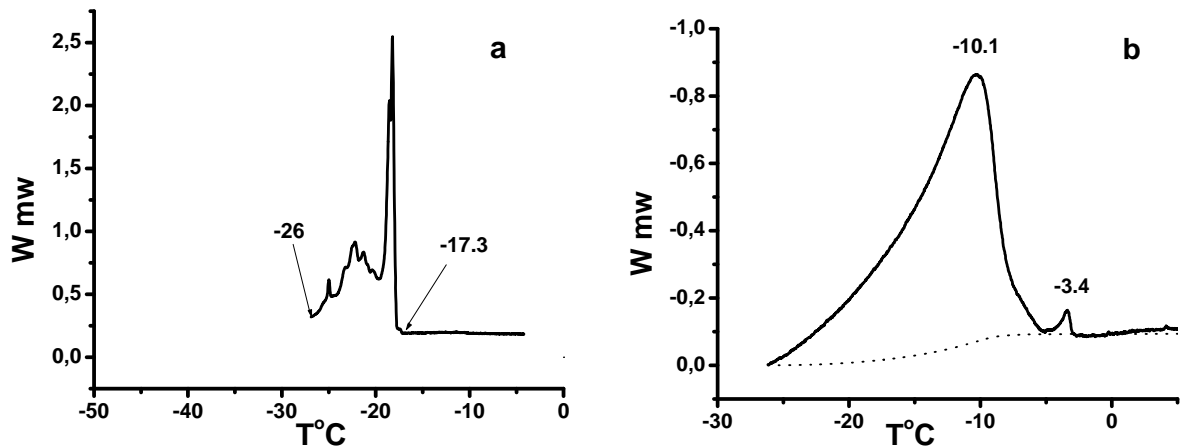
რაც შეეხება მცირე ზომის ენდოთერმას, რომელიც -3.4°C -ზე მდებარეობს, სავარაუდოდ ეკუთვნის წყლის მეორე ფრაქციას და დნობაზე გამოჩნდა რადგან -26°C -ზე უკვე დაწყებული იყო დაბალტემპერატურული კრისტალიზაციის პროცესი.



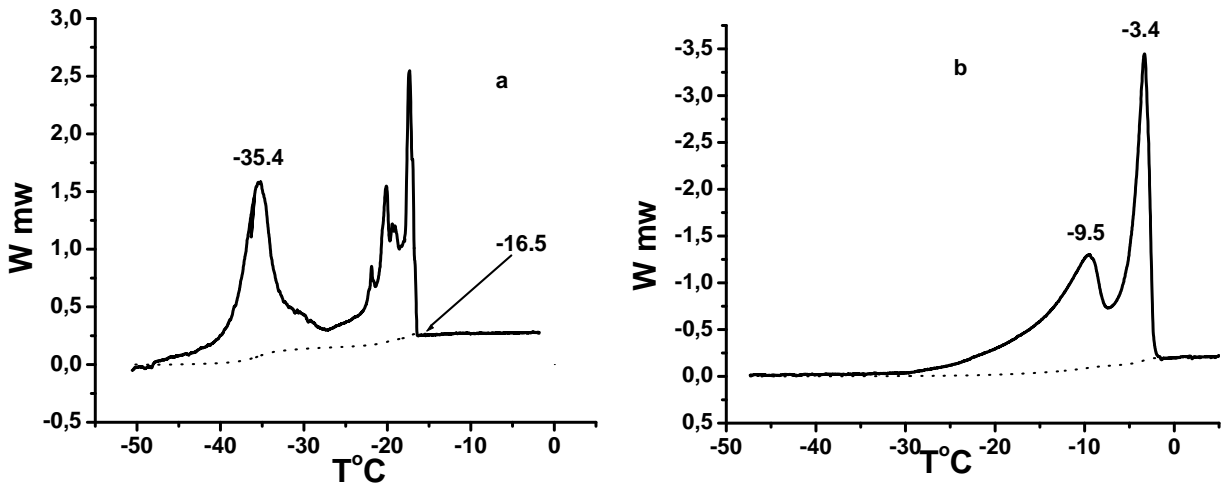
სურათი 32. ხელოვნურად ნაწილობრივ გამომშრალ მრავალძარღვას ფესვში ყინულის დნობის პროცესების მიკროკალორიმეტრული ჩანაწერი. ნიმუშის მასა – 18.1 მგ, წყლის შემცველობა – 49%, სკანირების სიჩქარე 60°C/სთ.



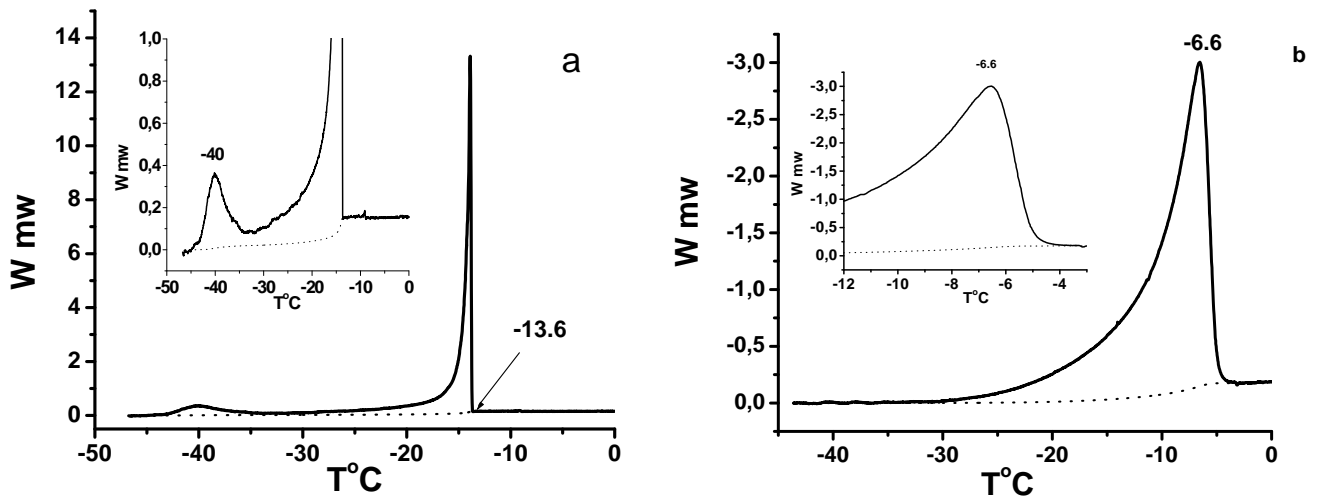
სურათი 33. ხელოფნურად ნაწილობრივ გამომშრალ მრავალძარღვას ფესვში წყლის კრისტალიზაციისა (a) და ყინულის დნობის (b) პროცესების მიკროკალორიმეტრული ჩანაწერები (კრისტალიზაციისა და დნობის პირველი ციკლი). ნიმუშის მასა – 19.5 მგ, წყლის შემცველობა – 48%, სკანირების სიჩქარე 60°C/სთ.



სურათი 34. ხელოფნურად ნაწილობრივ გამომშრალ მრავალძარღვას ფესვში წყლის კრისტალიზაციისა (a) და ყინულის დნობის (b) პროცესების მიკროკალორიმეტრული ჩანაწერები (კრისტალიზაციისა და დნობის მეორე ციკლი). ნიმუში გაცივდა მხოლოდ -26°C-დე. ნიმუშის მასა – 19.5 მგ, წყლის შემცველობა – 48%, სკანირების სიჩქარე 60°C/სთ.



სურათი 35. ხელოვნურად ნაწილობრივ გამომშრალ მრავალძარღვას ფეხვში წყლის კრისტალიზაციისა (a) და ყინულის დნობის (b) პროცესების მიკროკალორიმეტრული ჩანაწერები (კრისტალიზაციისა და დნობის მესამე ციკლი). ნიმუშის მასა – 19.5 მგ, წყლის შემცველობა – 48%, სკანირების სიჩქარე 60°C/სთ.



სურათი 36. ხელოვნურად ნაწილობრივ გამომშრალ მრავალძარღვას ფეხვში წყლის კრისტალიზაციისა (a) და ყინულის დნობის (b) პროცესების მიკროკალორიმეტრული ჩანაწერები (კრისტალიზაციისა და დნობის მეოთხე ციკლი, რომელიც ჩატარდა ნიმუშის აღებიდან მეორე დღეს და სისტემა იმყოფებოდა წონასწორულ მდგომარეობაში). ნიმუშის მასა – 19.5 მგ, წყლის შემცველობა – 48%, სკანირების სიჩქარე 60°C/სთ. ჩანარტებზე ნაჩვენებია აღნიშნული პროცესები განსხვავებული მასშტაბით.

§3.5. წყლის კრისტალიზაციის დაბალტემპერატურული პროცესი. [109, 110]

ყოველივე ზემოდთქმულიდან ცალსახად დგინდება, რომ დაბალტემპერატურული კრისტალიზაციის პროცესი მინდინარეობს დანარჩენი ხსნარისაგან სივრცულად იზოლირებულ მოცულობაში, რადგან აღნიშნული პროცესის დროს წარმოქმნილი ყინული დნება დამოუკიდებლად. რადგან ქსოვილში ხსნარის სივრცულ იზოლაციაზე საუბარი უპირველეს ყოვლისა შეიძლება ვივარაუდოთ, რომ ეს არის უჯრედშიდა წყალი, რომელიც გამოყოფილია დანარჩენი წყლისაგან პლაზმური მემბრანით, ანუ სავარაუდოდ - $-27 - -40^{\circ}\text{C}$ ტემპერატურულ ინტერვალში მდებარე ეგზოთერმა უნდა ასახავდეს უჯრედული წყლის კრისტალიზაციის პროცესს. ამ ვერსიის სასარგებლოდ მეტყველებს ის ფაქტიც, რომ აღნიშნულ დაბალტემპერატურულ ეგზოთერმას აქვს გაუსის მრუდის ფორმა, უფრო სწორედ შედგება ორი, შესაძლოა სამი გაუსის მრუდისაგან. ნიმუშში არის საკმაოდ დიდი რაოდენობა უჯრედებისა (მეტი ვიდრე 10^6) იმისთვის რომ სამართლიანი იყოს სტატისტიკური ფიზიკის კანონები. ცხადია არ შეიძლება უჯრედები იდენტური იყოს, ისინი განსხვავდებიან ერთმანეთისაგან გარკვეული პარამეტრებით (იმ პარამეტრებითაც რომლებიც განსაზღვრავენ გადაციების სიდიდეს), რომლებიც შეიძლება ხასიათდებიან გაუსის განაწილებით, შესაბამისად ლოგიკურია გაუსის მრუდის ფორმის ეგზოთერმების მიღება. რაც შეეხება იმ ფაქტს, რომ დაბალტემპერატურული ეგზოთერმა შედგება ორი შესაძლოა სამი მაქსიმუმისაგან შესაძლოა აისხნას იმით, რომ ნიმუშში გვაქვს ორი (ან სამი) ჯგუფი უჯრედებისა რომლებშიც წყალი განიცდის მნიშვნელოვან გადაციებას. ნიმუშის ხელოვნურად ნაწილობრივ ამოშრობის დროს, რომელზეც ზემოდ იყო საუბარი და რომელიც აგრეთვე აღწერილია პარაგრაფში 2.1, ცხადია ორთქლდება არაუჯრედული წყალი, ხოლო უჯრედშიდა თავდაპირველად არ განიცდის არანაირ ცვლილებებს. ამგვარი ნიმუშების კვლევამ გვიჩვენა, რომ ნიმუშში არსებული წყლის კრისტალიზაციის პროცესის ამსახველ კალორიმეტრიულ მრუდზე მნიშვნელოვნად შეიცვალა პირველი პიკი, მაშინ როცა პრაქტიკულად უცვლელი დარჩა დაბალტემპერატურული ეგზოთერმა (სურ. 33ა). არ იცვლება აგრეთვე დაბალტემპერატურული ეგზოთერმის შესაბამისი დნობის პიკის მდებარეობა ტემპერატურულ დერძზე. ეს ფაქტიც მიუთითებს, რომ $-27 - -40^{\circ}\text{C}$ ტემპერატურულ ინტერვალში მდებარე ეგზოთერმა ასახავს უჯრედშიდა ხსნარის კრისტალიზაციის პროცესს. თუმცა უნდა ითქვას, რომ ეს ვერ იქნება ნიმუშში არსებული მთელი შიდაუჯრედული წყალი, რადგან მეორე ფრაქციის წყლის ოდენობა მხოლოდ 10%-ია, მაშინ როცა უჯრედული წყლის წილი ნიმუშში გაცილებით მეტია. აქ შეიძლება განვიხილოთ ორი ვარიანტი: 1. მას შემდეგ რაც იყინება წყალი უჯრედშორისში და შედეგად წარმოიქმნება ოსმოსური გრადიენტი უჯრედ - შიდა და - გარე არეებს შორის, შიდაუჯრედული წყალი იწყებს დინებას უჯრედშორისში და $-27 - -40^{\circ}\text{C}$ ტემპერატურულ ინტერვალში იყინება ის შიდაუჯრედული წყალი, რომელიც ჯერ კიდევ დარჩა უჯრედში. ანუ დაბალტემპერატურული ეგზოთერმა ასახავს უჯრედებში ნარჩენი წყლის კრისტალიზაციის პროცესს; 2. დაბალტემპერატურულ არეში მიმდინარეობს მხოლოდ გარკვეული ტიპის უჯრედების უჯრედშიდა წყლის კრისტალიზაცია.

§3.6. ოსმოსური წნევები უჯრედშიდა და -გარე მოცულობებში. [110]

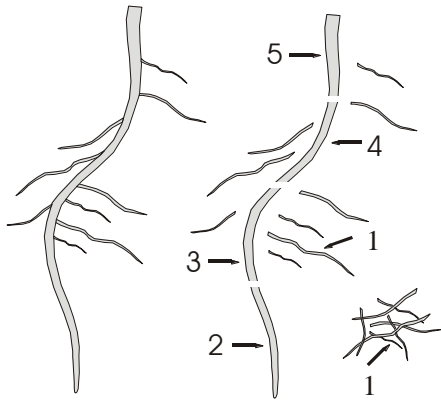
ექსპერიმენტების სერია ჩატარდა ფესვის სხვადასხვა უბანზე. შერჩეულ იქნა ფესვის 5 განსხვავებული ნაწილი, როგორც ეს ნაჩვენებია სურათ 37-ზე. 1-ლი ნიმუში არის ფესვის თმები; 2-ე – ფესვის წვერო; ხოლო 3-ე, 4-ე და 5-ე შესაბამისად მომდევნო უბნები ფესვის დასაწყისამდე. თითოეული ამ ნიმუშისთვის ქსოვილში არსებული წყალხსნარის კრისტალიზაციისა და შემდგომში ცინულის დნობის კალორიმეტრიული კვლევის შედეგები გარკვეულწილად განსხვავდებიან ერთმანეთისაგან და იყო მცდელობა დადგენილიყო გარკვეული კანონზომიერება ექსპერიმენტალური მონაცემებიდან განსაზღვრულ პარამეტრებზე დაყრდნობით. თითოეული ზემოდ აღწერილი ნიმუშისთვის განსხვავებული შედეგების მიღება არც არის გასაკვირი, რადგან ფესვის სხვადასხვა უბანს აქვს განსხვავებული ფუნქციონალური დატვირთვა და განსხვავებულია აგრეთვე მათი აგებულება. საინტერესოა ფესვის გასწვრივ ოსმოსური წნევების გრადიენტების დადგენა, ფესვის ერთ-ერთ მთავარ ფუნქციასთან დაკავშირებით – მცენარეს მიაწოდოს წყალი ნიადაგიდან მასში გახსნილ ნივთიერებებთან ერთად. ნიმუშში არსებული ხსნარის წონასწორული ფაზური გადასვლის ტემპერატურა, როგორც უკვე ზემოდ აღვნიშნეთ, დამოკიდებულია ხსნარში არსებულ ოსმოსურად აქტიურ ნივთიერებებზე და მათ კონცენტრაციებზე. ოსმოსურად აქტიურ ნივთიერებებზე და მათ კონცენტრაციებზეა დამოკიდებული აგრეთვე ხსნარის ოსმოსური წნევა. აქედან გამომდინარე არსებობს კორელაცია ნიმუშში არსებული წყალხსნარის წონასწორული ფაზური გადასვლის ტემპერატურასა და მის ოსმოსურ წნევას შორის. განვიხილოთ რა რაოდენობრივი კორელაციაა ამ ორ პარამეტრს შორის.

ხსნარების ოსმოსური წნევა შეიძლება გამოთვლილ იქნას ცნობილი დამოკიდებულებიდან [97]

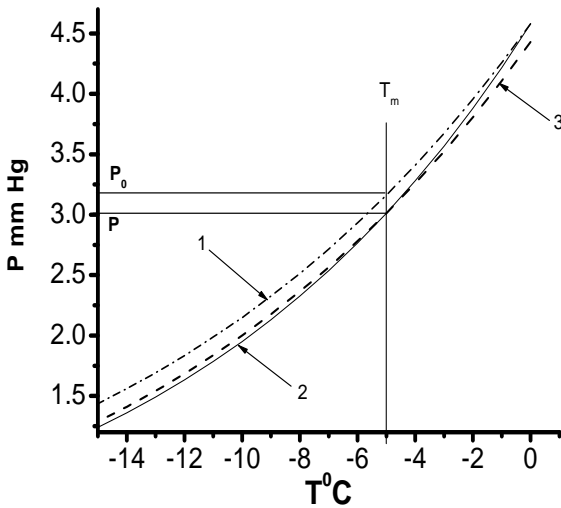
$$\pi = -(RT/v)\ln(P_0/P) \quad (39)$$

სადაც $R = 82.056$ სმ³ ატ/კმოლ – უნივერსალური აირის მუდმივა, $v = 18$ სმ³/მოლ – წყლის კუთრი მოლარული მოცულობა, T - აბსოლუტური ტემპერატურა, P და P_0 - წყლის ნაჯერი ორთქლის წნევები შესაბამისად ხსნარისა და სუფთა წყლის თავზე. მოცემულ ერთეულებში ოსმოსური წნევის მნიშვნელობებს ვიღებთ ატმოსფეროებში. ნახ. 38-ზე მოყვანილია ნაჯერი ორთქლის წნევების ტემპერატურული დამოკიდებულება [17] გადაცივებული წყლის (1), ცინულის (2) და T_m ტემპერატურაზე ფაზური გადასვლის მქონე ხსნარის (3) თავზე. მრუდების (2) და (3) გადაკვეთა T_m ტემპერატურაზე P და P_0 მნიშვნელობების მიღების საშუალებას გვაძლევს და შესაბამისად T_m ტემპერატურაზე ფაზური გადასვლის მქონე ხსნარის ოსმოსური წნევების გამოანგარიშების საშუალებას.

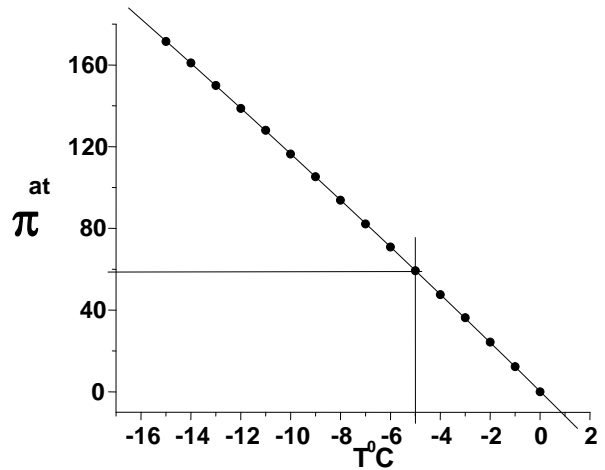
ნახ. 39-ზე მოყვანილია წყლის ხსნარების ოსმოსური წნევის დამოკიდებულება წონასწორული ფაზური გადასვლის ტემპერატურაზე, რომელთა ფაზური გადასვლის ტემპერატურა მდებარეობს 0-სა და -15°C ტემპერატურულ ინტერვალში. წერტილები დასმულია ცხრილებიდან აღებული მონაცემების საფუძველზე [17], ხოლო წირი მიღებულია მეორე ხარისხის პოლინომით ამ წერტილების აპროქსიმაციით. აქედან გამომდინარე მოცემული



სურათი 37. მრავალძარღვას ფესვის სქემატური სურათი. ციფრებით გადანომრილია ფესვის თმები და ფესვის სხვადასხვა უბანი, რომლებისთვისაც დადგენილია მათში არსებული წყლის ოქმოსური წნევები.



სურათი 38. ტემპერატურული დამოკიდებულება ნაჯერი ორთქლის წნევისა [17]: 1 – გადაციებული წყლის თავზე; 2 – ყინულის თავზე და 3 – წყალხსნარის თავზე, რომლისთვისაც წონასწორული ფაზური გადასვლის ტემპერატურა არის T_m .



სურათი 39. წყალხსნარის ოსმოსური წნევის დამოკიდებულება წონასწორული ფაზური გადასვლის ტემპერატურაზე.

ცხრილი 1

ნიმუშის ნომერი	1	2	3	4	5
წყლის ფრაქციების თანაფარდობა $\pm 0,003$	0.185	0.048	0.042	0.036	0.035
სითბოს შთანთქმის ძირითადი მაქსიმუმის ტემპერატურა $^{\circ}\text{C} \pm 0,1$	-3,6	-3,3	-2,8	-2,7	-2,7
ოსმოსური წნევა (ატმ)	42.8	39.2	33.4	32.2	32.2
სითბოს გამოყოფის დაბალტემპერატურული მაქსიმუმის მანსიათებელი ტემპერატურა $^{\circ}\text{C} \pm 0,5$	-31,5	-31,4	-31,6	-30,9	-32

ტემპერატურული ინტერვალისათვის მივიღეთ სავსებით მოსახერხებელი გამოსახულება ოსმოსური წნევის დამოკიდებულებისა საკვლევი ხსნარის ფაზური გადასვლის ტემპერატურაზე

$$\pi = -12.02 T - 0.039 T^2 \quad (40)$$

სადაც T ცელსიუსის გრადუსებში გამოსახული წონასწორული ფაზური გადასვლის ტემპერატურაა. აქედან გამომდინარე, რთულ ბიოლოგიურ სისტემებში წყლის ფაზური გადასვლების პროცესების შესწავლით და ყინულის დნობის ტემპერატურების გამოვლენით, ჩვენ შეგვიძლია საკვლევ ნიმუშების როგორც სხვადასხვა უბნის ასევე შიდაუჯრედული და უჯრედშორისი ხსნარების ოსმოსური წნევის მნიშვნელობების შესახებ ინფორმაციის მიღება.

ცხრილი 1-ში მოყვანილია ფესვის სხვადასხვა უბნის (სურ. 37) კალორიმეტრიული კვლევების შედეგად მიღებული პარამეტრები, მათ შორის ოსმოსური წნევების მნიშვნელობები ფესვის ცალკეული უბნისათვის. როგორც ვხედავთ ფესვის გასწვრივ მართლაც არსებობს ოსმოსურ წნევათა გრადიენტი (რაზედაც საუბარი იყო პარაგრაფის დასაწყისში), მაგრამ აღნიშნული გრადიენტი ისეთია, რომ იგი ვერ უზრუნველყოფს მცენარის ფესვში წყლის აღმავალ ნაკადს. აქედან გამომდინარე შეიზლება გაკეთდეს დასკვნა, რომ მცენარის წყლითა და მასში გახსნილი მინერალებით მომარაგების მექანიზმი არ უნდა იყოს დაკავშირებული ოსმოსურ ძალებთან.

დავუბრუნდეთ ექსპერიმენტების ციკლს, რომელიც განხილული იყო პარაგრაფ 3.4-ში (სურ. 33 – 36). ნიმუშის ყოველი მომდევნო გაცივება-გათბობის ციკლის მონაცემები გვიჩვენებს, რომ წინამორბედი ციკლის დამთავრებასთან ერთად წყლის გარკვეული ნაწილი გაედინა უჯრედებიდან უჯრედშორის მონაცვლობაში. ამას მოწმობს უჯრედშორის სივრცეში კრისტალიზებადი წყლის რაოდენობის მატება და მისი ფაზური გადასვლის ტემპერატურის გაზრდა. ამასთან ერთად შიდაუჯრედული ყინულის დნობის ტემპერატურაც მცირდება. შიდაუჯრედული და უჯრედშორისი ხსნარების ფაზური გადასვლის ტემპერატურების ცვლილება წარმოადგენს უჯრედებიდან წყლის უკუქცევის შედეგს, რის გამოც შიდაუჯრედულ ხსნარში ოსმოსურად აქტიური ნივთიერებების კონცენტრაცია იზრდება და უჯრედშორისი ხსნარის განზავება ხდება.

გაცივება-გათბობის ბოლო ციკლი (სურ. 36) ჩატარდა 15 საათის შემდეგ. ამ პერიოდის განმავლობაში ნიმუში მოთავსებული იყო კალორიმეტრში ოთახის ტემპერატურაზე. იგულისხმებოდა, რომ ამ დროის განმავლობაში ნიმუში წონასწორულ მდგომარეობაში უნდა მოსულიყო: ნიმუშის სხვადასხვა ნაწილებში ოსმოსური წნევები უნდა გაწონასწორებულიყო. ნახ. 36-ზე მოყვანილია ამ ციკლის შედეგები, რომლებიც ადასტურებენ გამოთქმულ ვარაუდს. მნიშვნელოვნად შემცირდა შიდაუჯრედული ხსნარის წილი (წინა ციკლის 38.4%-დან 6%-მდე), რომელიც განიცდის მნიშვნელოვან გადაცივებას. მისი გადაცივების მახასიათებელი ტემპერატურა მცირდება -40°C -მდე. ნიმუშში წარმოქმნილი ყინულის დნობის პროცესი მიმდინარეობს ერთ სტადიად სითბოს შთანთქმის მაქსიმუმით $-6,6^{\circ}\text{C}$ – ზე (იხ. ჩანართი ნახ. 36 b - ზე), რასაც შეიძლება ადგილი ჰქონდეს მხოლოდ იმ შემთხვევაში, თუ კი უჯრედშორისი და შიდაუჯრედული ხსნარებს აქვთ ოსმოსური წნევის ერთნაერი მნიშვნელობები, რომლითაც ხსნარის ფაზური გადასვლის $-6,6^{\circ}\text{C}$ ტემპერატურისათვის ფორმულა 40-ის თანახმად შეადგენს 81 ატ. განხილული პროცესების პარამეტრები შეჯამებულია ცხრილში 2.

ცხრილი: 2

№ ნიმუშის გაცივება- გათბობიცი ციკლისა	T_{sc1} °C	T_{sc2} °C	T_{eq1} °C	T_{eq2} მგ	m_1^{**} მგ	m_2^{**} მგ	π_1 ატ	π_2 ატ	δT_1 °C	δT_2 °C
0*	-10,1	-35	~ -1	-3	5,61	1,04	35,9	12		
1	-18.2	-35,2	-11	-3.3	1.2	1.5	137	40	7,2	31,9
2	-17.3	-	-10.1	-3.4	-	-	122	41	7,2	
3	-16.5	-35.4	-9.5	-3.4	1.34	1.4	118	41	7	32
4	-13.6	-40	-6.6	-6.6	2.34	0.35	81	81	7	33,4

δT_1 – უჯრედშორისი ხსნარის გადაცივება - °C.

T_{sc1} – უჯრედშორისი ხსნარის კრისტალიზაციის დასაწყისის ტემპერატურა - °C.

T_{sc2} – შიდაუჯრედული ხსნარის კრისტალიზაციის მახასიათებელი ტემპერატურა - °C.

T_{eq1} – უჯრედშორისი ხსნარის ფაზური გადასვლის ტემპერატურა - °C.

T_{eq2} – შიდაუჯრედული ხსნარის ფაზური გადასვლის ტემპერატურა - °C.

m_1 – გამოყინული უჯრედშორისი წყლის მასა - მგ.

m_2 – გამოყინული შიდაუჯრედული უჯრედშორისი წყლის მასა - მგ.

π_1 – უჯრედშორისი ხსნარის ოსმოსური წნევა –ატ.

π_2 – შიდაუჯრედული ხსნარის ოსმოსური წნევა –ატ.

δT_2 – შიდაუჯრედული ხსნარის გადაცივება - °C.

* ნორმალურ კლიმატურ პირობებში აღებულ მრავალძარღვას ინტაქტურ ფესვში წყლის კრისტალიზაციისა და ყინულის დნობის პროცესების ამსახველი პარამეტრები.

** m_1 და m_2 პარამეტრები გამოანგარიშებულია წყლის კრისტალიზაციის ამსახველი მრუდებიდან, წყალი-ყინული ფაზური გადასვლის ენტალპიის ტემპერატურაზე დამოკიდებულების გათვალისწინებით.

მოყვანილი შედეგებიდან გამომდინარეობს, რომ ხელოვნურად ნაწილობრივ გამომშრალი ფესვის უჯრედები იმყოფებიან ჰიპერტონიურ გარემოცვაში. დაისმის კითხვა: ხომ არ არის ეს ნიმუშიდან წყლის აორთქლების შედეგი, ვინაიდან ცხადია, რომ ნიმუშის გამოშრობის პროცესში წყალი პირველ რიგში აორთქლდება უჯრედშორის სივრციდან და მასში მით უფრო გაიზრდება ოსმოსურად აქტიური ნივთიერებების კონცენტრაცია. მაგრამ, რომ დაუბრუნდეთ სურ. 27 და აზრობრივად დაეშალოთ ყინულის დნობის მრუდი (იხ. ჩანართი ნახ.27 b), შევამჩნევთ, რომ ფაზური გადასვლის ~ -1 °C ტემპერატურის მქონე ხსნარის წილი დანარჩენი ხსნარის, რომლის ფაზური გადასვლის ტემპერატურაა

-3 °C, მხოლოდ მცირე ნაწილს შეადგენს. ხოლო მოცემული ნიმუშისათვის შიდაუჯრედული წყლის წილი, კრისტალიზაციის მრუდიდან გამომდინარეობს, შეადგენს მხოლოდ 15%-ს ნიმუშში გაყინული მთელი წყლისა. მაშასადამე, საკმარისი რწმუნების ხარისხით, ჩვენ შეგვიძლია დაშვება, რომ ზემოდ აღწერილ მდგომარეობაში შენახული მცენარის ფესვებში, უჯრედები ჰიპერტონური ხსნარით გარშემორტყულნი არიან.

§3.7. წყლის ფაზური გადასვლის დროს ახალი ფაზის წარმოქმნის იმტენსივობის განსაზღვრა

კრისტალიზაციისას გამოყოფილი და აგრეთვე დნობისას შთანთქმული სითბოს მიხედვით შეიძლება შესაბამისად კრისტალიზებული და გამდნარი წყლის მასების გამოთვლა (ცხდია ეს მასები ერთნაირი უნდა იყოს). თუმცა ამ დროს გასათვალისწინებელია ის ფაქტი, რომ ფაზური გადასვლის დროს გამოყოფილი ან შთანთქმული სითბოს ოდენობა დამოკიდებულია ტემპერატურაზე. თუკი სიმძლავრის ტემპერატურაზე დამოკიდებულების მრუდს გავყოფთ ენტალპიის ტემპერატურაზე დამოკიდებულების მრუდზე მივიგებთ ახალ მრუდს, რომელიც გვიჩვენებს წყლის კრისტალიზაციის (დნობის) ინტენსივობას და თუ მოვახდენთ ამ მრუდის ინტეგრებას მივიღებთ კრისტალიზებული (ან გამდნარი) წყლის მასას. ამ ოპერაციას ვაკეთებთ პროგრამა “ექსელში”. ექსელის პროგრამაში სპეციალურად განთავსებულ ველში შეგვაქვს სკანირებადი ექსპერიმენტის დროს მიღებული მონაცემები (დრო, ტემპერატურა, სიმძლავრე, ბაზისური ხაზი) და გვაძლევს წყლის მთლიან ოდენობას მილიგრამებში. შეგვიძლია აგრეთვე გავიგოთ ნიმუშში არსებული წყლის მთელი მასა მშრალი წონით და შესაბამისად ბმული წყლის რაოდენობაც.

სურათ 31-ზე მოყვანილია კალორიმეტრიული მრუდი, რომელიც ასახავს ნიმუშის მოცემული მუდმივი სიჩქარით გაციების პროცესში ნიმუშში არსებული წყლის კრისტალიზაციის შედეგად გამოყოფილი სითბოს სიმძლავრეს. ორდინატთა ღერძზე გადაზომილია ნიმუშის ტემპერატურა °C-ში, ხოლო აბსცისათა ღერძზე – წყლის კრისტალიზაციის შედეგად გამოყოფილი სიმძლავრე მილივატებში. ჩვენ შეგვიძლია ავაგოთ სიმძლავრის დროზე დამოკიდებულების მრუდი, რადგან რეგისტრაციის დროს ხდება როგორც ტემპერატურის ასევე დროის რედისტრაცია. თუმცა იმ შემთხვევაში თუკი კალორიმეტრიული ექსპერიმენტის დროს არ ხდება დროის რეგისტრაცია შესაძლებელია განვსაზღვროთ სიმძლავრის დროზე დამოკიდებულების მრუდი სკანირების სიჩქარის გამოყენებით. ამისათვის სიმძლავრის ტემპერატურაზე დამოკიდებულების მრუდი უნდა გავყოთ სკანირების სიჩქარეზე, შედეგად მივიღებთ. $W=f(t)$ ფუნქციის შესაბამის მრუდსა და ორდინატთა ღერძს შორის მოთავსებული ფართობი ასახავს წყლის კრისტალიზაციის შედეგად ნიმუშში გამოყოფილ სითბოს ოდენობას ($Q=\int Wdt$). თუმცა უფრო მეტად საინტერესოა არა კრისტალიზაციის დროს გამოყოფილი სითბოს რაოდენობა არამედ კრისტალიზებული წყლის რაოდენობა. ამისათვის უნდა ვიცოდეთ წყლის კრისტალიზაციის კუთრი სითბოს მნიშვნელობა, რომელიც არარის მუდმივი

სიდიდე და დამოკიდებულია ფაზური გადასვლის ტემპერატურაზე. ამ დამოკიდებულებას აქვს შემდეგი სახე:

$$\Delta H = 332 + 1.63T - 0.034T^2 \quad (41)$$

სადაც T არის ფაზური გადასვლის ტემპერატურა.

ექსპერიმენტის ჩატარების პროცესში პარალელურად ხდება მონაცემების შენახვა ცხრილების სახით (ცხრილი 3) და ვიზუალიზაცია გრაფიკის სახით (სურათი 40).

მონაცემთა პირველადი ცხრილის დამუშავების შედეგად მიიღება ახალი ცხრილი (ცხრილი 4), რომელიც სამი სვეტისგან შედგება: დროის სვეტი, ტემპერატურის სვეტი და ნიმუშის ტემპერატურის მუდმივი სიჩქარით ცვლილების პროცესში მასში არსებული წყლის ფაზური გადასვლის შედეგად გამოყოფილი ან შთანთქმული სითბური ენერჯიის სიმძლავრის სვეტი. ამ ცხრილის საფუძველზე შეიძლება ავარგოთ სიმძლავრის ტემპერატურაზე ან დროზე დამოკიდებულების მრუდი. სიმძლავრის დროზე დამოკიდებულების მრუდის ინტეგრირება მოგვცემს სითბური ენერჯიის სრულ ოდენობას რომელიც გამოიყოფა ნიმუშში არსებული წყლის კრისტალიზაციის პროცესში (ან რომელიც შთანთქმება გაყინული წყლის დნობის დროს). გარდა ამისა მრუდის ფორმა გვიჩვენებს აღნიშნული სითბური ენერჯიის ხასიათს. ზემოდაღნიშნული მონაცემებიდან, წყლის ფაზური გადასვლის ენტალპიის გათვალისწინებით, შესაძლებელია გამოთვლილ იქნას ნიმუშში კრისტალიზებული ან გამდნარი წყლის რაოდენობა. ცნობილია, რომ სუფთა წყლისთვის წონასწორული ფაზური გადასვლის კუთრი ენტალპია არის $\Delta H = 332$ ჯოული/გრამი. თუ ფაზური გადასვლის დროს მიღებული სითბური ენერჯიის რაოდენობას გავყოთ ΔH -ზე მივიღებთ წყლის რაოდენობას, რომელმაც განიცადა ფაზური გადასვლა. თუმცა წყლის რაოდენობის დათვლის აღნიშნული მეთოდი არ არის ზუსტი და გვაძლევს გარკვეულ ცდომილებას, ეს ცდომილება მით მეტია რაც უფრო დაბალ ტემპერატურებზე მიმდინარეობს წყლის კრისტალიზაცია ან დნობა. აღნიშნული ცდომილება გამოწვეულია იმით, რომ წყლის კუთრი ენტალპია არაა მუდმივი სიდიდე და იგი დამოკიდებულია ფაზური გადასვლის ტემპერატურაზე (ფორმულა 41)

რადგანაც ჩვენს შემთხვევაში, როგორც ნიმუშში არსებული წყლის კრისტალიზაციის, აგრეთვე ყინულის დნობის პროცესი მიმდინარეობს არა ერთ ტემპერატურაზე, არამედ საკმაოდ განიერ ტემპერატურულ ინტერვალში (20 – 30 K), ამიტომ საჭიროა დათვლილ იქნას კრისტალიზებული (ან გამდნარი) წყლის რაოდენობები ვიწრო ტემპერატურულ ინტერვალებში, შესაბამისი კუთრი ენტალპიებს გათვალისწინებით და შემდეგ მოხდეს მათი აჯამვა. ასეთი ოპერაციის ჩატარება ადვილად შესაძლებელია საოფისე პროგრამა “Microsoft Excel”-ის გამოყენებით. ამისათვის საჭიროა დამუშავებული მონაცემთა ცხრილის (ცხრილი 3) სამივე სვეტი (დრო, ტემპერატურა, სიმძლავრე) გადავიტანოთ “Microsoft Excel”-ის სამუშაო გვერდზე პირველ სამ სვეტში, ხოლო მეოთხე სვეტის პირველ უჯრაში ჩაიწერება შემდეგი ფორმულა:

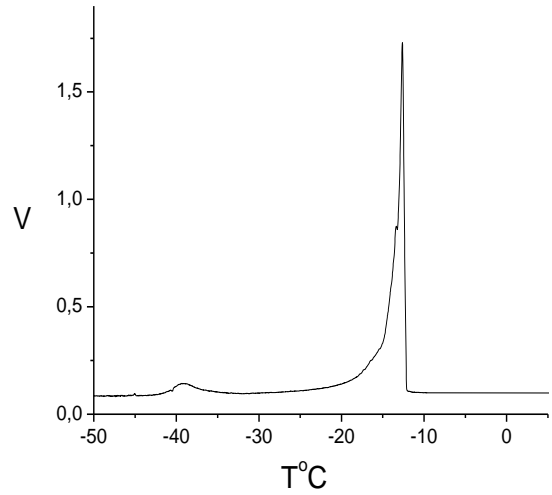
$$C1 / (332 + 1.63 * B1 - 0.034 * B1^2)$$

სადაც $C1$ არის W_1 ანუ $t=1$ მ მომენტში დროის ერთეულში გამოყოფილი (ან შთანთქმული) სითბოს რაოდენობა, $B1$ კი ნიმუშის ტემპერატურა ასევე $t=1$ მ მომენტში. პროგრამა “Excel” საშუალებას გვაძლევს მოვახდინოთ ამ ფორმულის

განზოგადება მეოთხე სვეთის თითოეული უჯრისათვის, შედეგად Dn უჯრედში ფორმულას ექნება შემდეგი სახე:

ცხრილი 3

t(წმ)	T(°C)	V(ვოლტი)
1.00	11.60278	0.24506
2.00	11.58142	0.24506
3.00	11.56616	0.24506
4.00	11.54480	0.24506
5.00	11.52344	0.24506
6.00	11.51123	0.24567
7.00	11.48376	0.24567
8.00	11.46851	0.24506



-
-
-

სურათი 40. ექსპერიმენტალური მრუდის თავდაპირველი სახე

ცხრილი 4

დრო (წმ)	ტემპერატურა (°C)	გამოყოფილი სიმძლავრე (მილივატი)
1	T ₁	W ₁
2	T ₂	W ₂
3	T ₃	W ₃
•	•	•
•	•	•
•	•	•

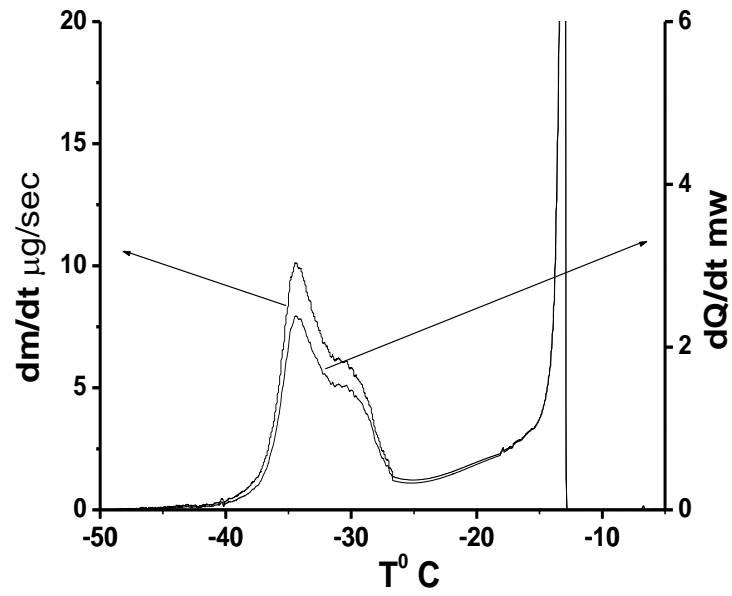
$$C_n / (332 + 1.63 * B_n - 0.034 * B_n^2) \quad (42)$$

განვიხილოთ რას წარმოადგენს (42) გამოსახულება. C_n არის $t=n$ მომენტში დროის ერთეულში გამოყოფილი (შთანთქმული) სითბოს რაოდენობა ანუ სიმძლავრე. თუ ამ სიდიდეს გავყოფთ $332 + 1.63 * B_n - 0.034 * B_n^2$ გამოსახულებაზე ანუ T_n ტემპერატურის შესაბამის კუთრ ენტალპიაზე (ΔH_n) მივიღებთ $t=n$ მომენტში დროის ერთეულში წარმოქმნილი წყლის ახალი ფაზის ოდენობას ანუ ახალი ფაზის წარმოქმნის ინტენსივობას მილიგრამ/წამ ერთეულებში.

შესაძლებელია აიგოს dm/dt -ს როგორც დროზე, ასევე ტემპერატურაზე დამოკიდებულების მრუდები, ხოლო მათი ინტეგრირება კი მოგვცემს იმ წყლის მთლიან მასას, რომელმაც განიცადა ფაზური გადასვლა. სურათ 41-ზე ნაჩვენებია ნიმუშში არსებული წყლის კრისტალიზაციის პროცესში როგორც გამოყოფილი სითბური ენერჯიის სიმძლავრის (dQ/dt) ასევე წყლის კრისტალიზაციის ინტენსივობის (dm/dt) ტემპერატურაზე დამოკიდებულების მრუდები. ამ სურათიდან ჩანს, რომ რაც უფრო დაბალია ფაზური გადასვლის ტემპერატურა მით მეტ ეფექტს იძლევა ენტალპიის ტემპერატურაზე დამოკიდებულების გათვალისწინება.

დრო (წმ)	ტემპერატურა (°C)	გამყოფილი სიმძლავრე (მილივატი)	წყლის კრისტალიზაციის ინტენსივობა (მილიგრამი/წამი)
1	T_1	W_1	$W_1 / (332 + 1.63 * T_1 - 0.034 * T_1^2)$
2	T_2	W_2	$W_2 / (332 + 1.63 * T_2 - 0.034 * T_2^2)$
3	T_3	W_3	$W_3 / (332 + 1.63 * T_3 - 0.034 * T_3^2)$
.	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.

ცხრილი 5

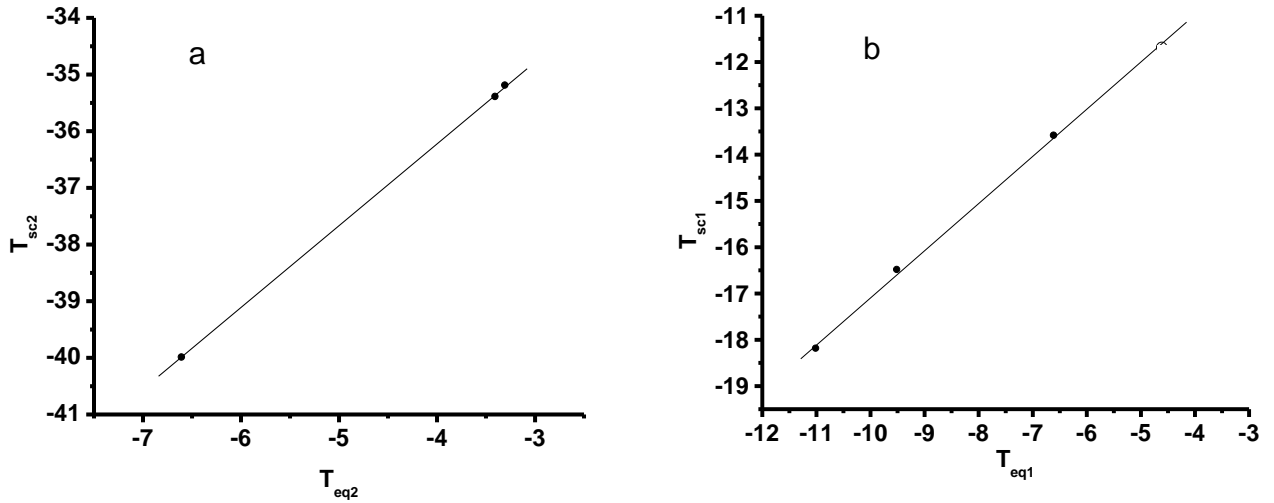


სურათი 41. ნაჩვენებია სიმძლავრის ტემპერატურაზე დამოკიდებულებისა და ახალი ფაზის მასის ცვლილების სიჩქარის ტემპერატურაზე დამოკიდებულების ამსახველი მრუდები.

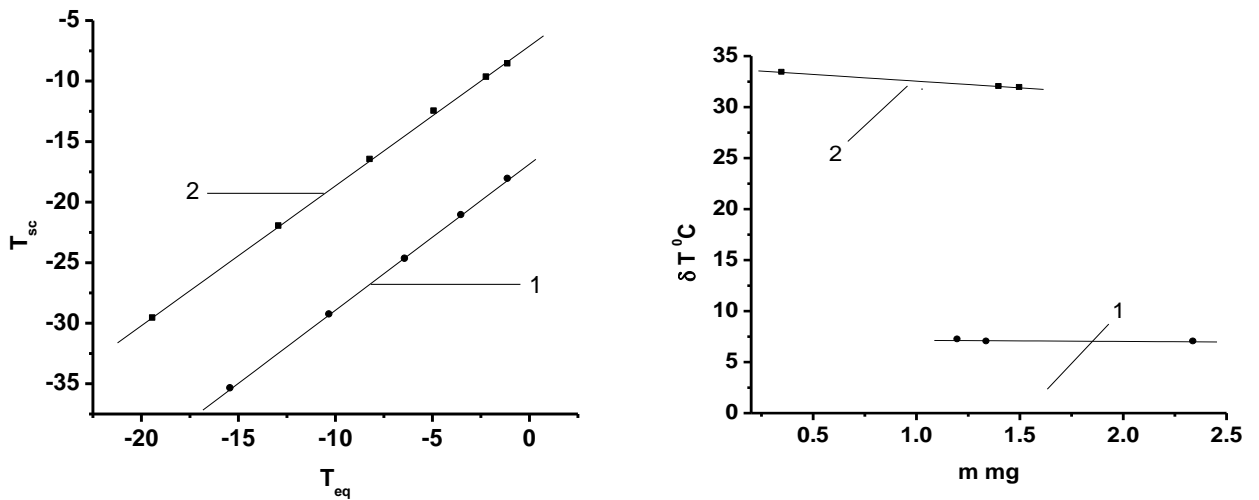
§3.8. კორელაციები წყლის გადაციების ტემპერატურას, წონასწორული ფაზური გადასვლის ტემპერატურას, გადაციებასა და ქსოვილის წყლის შემცველობას შორის [111]

ზემოთ განხილული იყო მიკროკალორიმეტრიული ექსპერიმენტების ციკლი ნაწილობრივ გამომშრალ ნიმუშზე (სურათები: 32 – 36). ჩატარებულ იქნა კიდევ რამოდენიმე ანალოგიური ციკლური ექსპერიმენტი მსგავსი ნიმუშებისათვის. ნიმუში, როგორც უკვე აღვნიშნეთ, იმყოფება მკვეთრად არაწონასწორულ მდგომარეობაში, რადგან მომზადების დროს აორთქლება ძირითადად ხდება უჯრედშორისიდან და შედეგად უჯრედშორისში იზრდება ოსმოსური წნევა. ექსპერიმენტის ყოველ მომდევნო ციკლზე იცვლება წყლის რაოდენობების თანაფარდობა უჯრედშიდა და უჯრედგარე ფრაქციებს შორის, რადგან ოსმოსური წნევის ასეთი დიდი გრადიენტის გამო ადგილი აქვს შიდაუჯრედული წყლის გადინებას უჯრედშორისში. სურათებიდან (32 – 36) აგრეთვე ჩანს, რომ ყოველ მომდევნო ციკლში იცვლება ნიმუშის მახასიათებელი ტემპერატურები (უჯრედშორისი წყლის კრისტალიზაციის დასაწყისის ტემპერატურა, დაბალტემპერატურული კრისტალიზაციის პიკის მაქსიმუმის ტემპერატურა და დნობის მრუდზე ყინულის I და II ფრაქციის დნობის მაქსიმუმების მდებარეობა ტემპერატურულ დერძზე). როგორც ჩანს აღნიშნული ტემპერატურები დამოკიდებულია უჯრედშორისში და უჯრედებში წყლის შემცველობებზეც. აღნიშნული ცდებიდან ვლინდება საკვლევი სისტემის საინტერესო თავისებურება. თუ განვიხილავთ ცალკე I და ცალკე II ფრაქციის წყლის კრისტალიზაციისა და ყინულის დნობის მახასიათებელ ტემპერატურებს ექსპერიმენტის თითოეულ ციკლზე, სადაც ყოველ მომდევნო ციკლზე იცვლება წყლის შემცველობები, აღმოვაჩინოთ, რომ წყლის თითოეული ფრაქციისთვის გადაციების ტემპერატურასა და წონასწორული ფაზური გადასვლის ტემპერატურებს შორის არის მკვეთრი წრფივი კორელაცია (სურათები: 42 a და 42 b). აღნიშნული წრფივი დამოკიდებულება უფრო ნათლად ჩანს წყლის პირველი ფრაქციისათვის, რადგან ყოველ მომდევნო ციკლზე ამ ფრაქციის წყლის მახასიათებელი ტემპერატურები მკვეთრად იცვლება და შესაბამისად ექსპერიმენტალური წერტილებიც საკმაოდ დაშორებულია ტემპერატურულ დერძებზე. რაც შეეხება შიდაუჯრედულს წყალს, მისი შესაბამისი მახასიათებელი ტემპერატურები მცირედით იცვლება I, II და III ციკლზე, ხოლო ბოლო ციკლზე, რომელზეც ნიმუში უკვე წონასწორულ მდგომარეობაშია აღნიშნული მახასიათებელი ტემპერატურები მკვეთრად იცვლება. შედეგად სურათ 42 b -ზე საწყისი ექსპერიმენტალური წერტილები ერთმანეთთან ახლოს მდებარეობს და მნიშვნელოვნად დაშორებულია მხოლოდ ერთი, ბოლო (წონასწორული) ექსპერიმენტალური წერტილი. ექსპერიმენტალური წერტილების სიმცირის და მათი აღწერილი განლაგების გამო უჯრედშიდა წყლის გადაციებასა და დნობის ტემპერატურას შორის მკვეთრად გამოხატულ წრფივ კორელაციაზე საუბარი ძნელია, უჯრედშორისი წყლისგან განსხვავებით. სურათ 42a-ზე ჩანს კიდევ ერთი საინტერესო ფაქტი: წრფის დახრა ძალიან ახლოსარის 1-თან (1.001), რაც იმას ნიშნავს, რომ გადაციება (სხვაობა უჯრედშორისში არსებული წყლის კრისტალიზაციის დასაწყისისა და წონასწორული ფაზური გადასვლის ტემპერატურებისა) მოცემული ნიმუშისათვის მუდმივია და არ არის დამოკიდებული უჯრედშორისში წყლის შემცველობაზე. თუ ავაგებთ გადაციების წყლის შემცველობაზე დამოკიდებულების მრუდს (სურათი 44, მრუდი

1) მივიღებთ ჰორიზონტალურ წრფეს $\Delta T = 7.2^{\circ}\text{C}$. რაც შეეხება შიდაუჯრედლ წყალს, მისთვის კრისტალიზაციის ტემპერატურის წონასწორული



სურ 42 შიდაუჯრედული ხსნარის გადაციების მახასიატებელი ტემპერატურის (ა) და უჯრედშორისი ხსნარის კრისტალიზაციის პროცესის დასაწყისის ტემპერატურის (ბ) დამოკიდებულება შესაბამისი ხსნარის ფაზური გადასვლის ტემპერატურაზე. წერტილები – ექსპერიმენტალური მონაცემები, წრფე – წრფივი აპროქსიმაცია.



სურ. 43 გადაციების ტემპერატურის დამოკიდებულება ფაზური გადასვლის ტემპერატურაზე $\text{NaCl} - \text{H}_2\text{O}$ -ის ბინარული სისტემებისათვის. ხსნარი კონტაქტში იყო 1 – წებო $\text{B}\Phi\text{-2}$ -ის პოლიმერიზებულ ზედაპირთან, 2 – შუშასთან.

სურ. 44 უჯრედგარე (1) და შიდაუჯრედული (2) ხსნარების გადაციების დამოკიდებულება ნიმუშის შესაბამის არეებში წყლის შემცველობებზე.

ფაზური გადასვლის ტემპერატურაზე დამოკიდებულების მრუდის (სურათი 44, მრუდი 2) დახრა 1-საგან განსხვავებულია ($A=1.4$). შესაბამისად უჯრედშიდა წყლის გადაციება არაა მუდმივი სიდიდით მოცემული ნიმუშისთვის და იგი დამოკიდებულია უჯრედებში წყლის შემცველობაზე. მაგრამ ამ დამოკიდებულების რაოდენობრივი და თუნდაც ხასიათის განსაზღვრა მოყვანილი ექსპერიმენტალური მონაცემების სიმცირის გამო შეუძლებელია.

როგორც ზემოთ აღინიშნა, ნიმუშის გაცივება-გათბობა ციკლის შემდეგ, ოსმოსური წნევების გრადიენტისა და უჯრედული მემბრანების ნახევრადგამჭოლადი თვისებების გამო, სუფთა წყლის ნაწილი გაედინება უჯრედებიდან უჯრედშორის სივრცეში. ამით ოსმოსურად აქტიური ნივთიერებების კონცენტრაცია უჯრედების შიგნით უფრო იზრდება, ხოლო უჯრედშორისი ხსნარი განზავდება. მაშასადამე, ხსნარის გადაცივების ტემპერატურა (ისევე, როგორც მისი ფაზური გადასვლის ტემპერატურა) დამოკიდებულია ოსმოსურად აქტიური ნივთიერების კონცენტრაციაზე.

სურათ 42-ზე მოყვანილი დამოკიდებულებების ანალიზური დამოკიდებულება მივიღეთ ბინარული სისტემისათვის $\text{NaCl} - \text{H}_2\text{O}$ ევტექტიკურ კონცენტრაციამდე (სურ. 43). დამოკიდებულება (1) იმ შემთხვევას შეესაბამება, როდესაც გასაზომი ხსნარები იყო მოთავსებული პოლიმერიზირებული 5Ф-2 ("Алексинский ХК", Россия) -ის ფენით დაფარულ სპილენძის უჯრედში, ხოლო (2) დამოკიდებულება მიღებულია ხსნარების მოთავსებით შუშის აპულარში. გადაცივებულ სითხეში მყარი ფაზის მდგრადი ჩანასახის წარმოქმნა ცალსახად დაკავშირებულია საკვლევე სისტემაში მყარი მინარევების ან ზედაპირების არსებობასთან, რომლებიც ადვილდებიან კრიტიკული ზომების ჩანასახის შექმნას. გადაცივების სიდიდით განისაზღვრება მყარი ფაზის მსგავსებით კრისტალური სტრუქტურის ზედაპირთან. ჩვენ შემთხვევაში ეს ზედაპირი წარმოადგენდა მოცულობის კედელს, რომელშიც საკვლევი ხსნარი იყო მოთავსებული. მოცემული დამოკიდებულებების დახრის სიდიდით განსხვავდება ერთისაგან (1.2 და 1.15 პირველ და მეორე დამოკიდებულებებისათვის შესაბამისად). მრავალძარღვას ფესვებისათვის აღინიშნება რამდენადმე განსხვავებული სურათი. შიდაუჯრედული ხსნარისათვის მრუდის დახრა შეადგენს 1.4-ს, როცა უჯრედშორისი ხსნარისათვის ეს სიდიდე უდრის 1.03. სურ. 44-ზე მოყვანილ დამოკიდებულებები ადგენენ კავშირს უჯრედშორისი (1) და შიდაუჯრედული (2) ხსნარების გადაცივებასა ($|T_{sc}| - |T_{eq}|$) და ნიმუშის შესაბამის არეებში არსებული წყლის რაოდენობასთან და გვიჩვენებენ, რომ შიდაუჯრედული ხსნარის გადაცივებასა მნიშვნელოვნად დამოკიდებულია ამ არეში არსებული წყლის რაოდენობაზე, როცა უჯრედშორისი ხსნარებისათვის ამგვარი დამოკიდებულება პრაქტიკულად არ შეიმჩნევა. მაშასადამე მოყვანილი მრუდების დახრა ავლენს გადაცივების დამოკიდებულების ხარისხს ოსმოსურად აქტიური ნივთიერებების კონცენტრაციაზე. ქვემოთ ჩვენ შევეცდებით, გადაცივებულ ხსნარებში ჩანასახის წარმოქმნის ფიზიკაში საკმაოდ კარგად ცნობილ მონაცემებზე დაყრდნობით შემჩნეულ მოვლენას მოუძებნოთ ახსნა.

გადაცივებულ ხსნარებში მყარი ფაზის მდგრადი ჩანასახის წარმოქმნის პირობას წარმოადგენს მოცულობითი ენერჯის მისი ზედაპირულ ენერჯიაზე ჭარბობა [113].

$$|4/3\pi r^3 \Delta G_v| > |4\pi r^2 \gamma|$$

სადაც r – მდგრადი სფერული ჩანასახის რადიუსია, ΔG_v – წყლის სითხიდან მყარ ფაზაში გადატანის მოცულობითი თავისუფალი ენერჯიაა და ν – დაჭიმულობა თხევადი და მყარი ფაზების საზღვარზე. როდესაც მყარი ფაზის ჩანასახი რომელიმე ზედაპირზე იქმნება, მაშინ ν -ს სიდიდე შეიცვლება

$$\nu_1 = \nu [2(1 - \cos\theta) - \sin^2\theta \cos\theta],$$

სადაც θ – ჩანასახის ზედაპირსა და იმ ზედაპირზე წარმოქმნილი ჩანასახის ზედაპირს შორის კიდური კუთხე. θ –ს სიდიდე დამოკიდებულია მყარი ფაზის კრისტალურ სტრუქტურის ზედაპირთან მსგავსებაზე. მაშასადამე სხვადასხვა ზედაპირებისათვის სხვადასხვა გადაცივება შეიძლება აიხსნას მათი სხვადასხვა მსგავსებით ყინულის კრისტალურ მესერთან. რაც შეეხება ხსნარში NaCl –ის კონცენტრაციის ზრდასთან გადამეტცივების სიდიდის მატებას (ერთისგან განსხვავებული მრუდების დახრა), ეს დაკავშირებულია ზედაპირული დაჭიმულობის ზრდასთან ხსნარში NaCl –ის კონცენტრაციის მატებისას.

რამდენადმე განსხვავებული სურათი, მიღებული წყლის გადანაწილებისას შიდაუჯრედული და უჯრედშორის არეებს შორის ნიმუშის გაცივება-გათბობის რამოდენიმე ციკლის პროცესში, აღინიშნება მრავალძარღვას ფესვების შემთხვევაში. ჯერ ერთი შიდაუჯრედული ხსნარის გადაცივება გაცილებით მეტია, ვიდრე უჯრედშორისი ხსნარისა, რაც უჯრედში და უჯრედშორისი ზედაპირების თვისებების შესაძლო განსხვავებებით შეიძლება აიხსნას, ვინაიდან ამ ზედაპირებზე გადაცივებულ ხსნარებში წარმოიქმნება ყინულის მდგრადი ჩანასახი. ყველაზე უფრო სავარაუდოა, რომ ამგვარი ზედაპირების როლში შესაძლოა გამოვლინდეს უჯრედის მემბრანული სტრუქტურები ანდა უჯრედის მოცულობაში ადგილი აქვს ჰომოგენურ ნუკლეაციას; შესაძლოა ამით აიხსნება შიდაუჯრედული ხსნარის გადამეტცივების სიდიდე. ყველაზე სავარაუდოა, რომ უჯრედშორის სივრცეში ყინულის მდგრადი ჩანასახი წარმოიქმნება უჯრედის ცელულოზურ კედლებზე და საფესვით სავარაუდოა, რომ მათთვის ν_1 –ს მნიშვნელობა გაცილებით ნაკლებია, ვიდრე მემბრანული სტრუქტურებისათვის. მეორეც, შიდაუჯრედული ხსნარისათვის $T_{sc}(T_{eq})$ დამოკიდებულებების დახრა უდრის 14, საიდანაც გამომდინარეობს, რომ უჯრედებში წყლის შემცველობის შემცირებით შიდაუჯრედული ხსნარის გადაცივება იზრდება (სურ. 44 (2)). ეს შეიძლება ოსმოსურად აქტიური ნივთიერებების კონცენტრაციის ზრდით იყოს გამოწვეული და შედეგად ამისა ზედაპირული დაჭიმულობის ν გაზრდა. უჯრედშორისი ხსნარისათვის $T_{sc}(T_{eq})$ დამოკიდებულებების დახრა ახლოა ერთთან (1.03): უჯრედშორისი ხსნარის გადაცივება მცირედაა დამოკიდებული ამ არეში ნიმუშის წყლის შემცველობაზე (სურ. 44 (1)). იმის გათვალისწინებით, რომ უჯრედშორისი ხსნარის ოსმოსური წნევის სიდიდე საკმაოდ მაღალია, ეს ნიშნავს, რომ ხსნარი შეიცავს ოსმოსურად აქტიურ ნივთიერებების შედარებით დიდ რაოდენობას.

რადგანაც ექსპერიმენტალური წერტილების სიმცირის გამო სისტემის ესა თუ ის განსაზღვრული კანონზომიერება გარკვეულწილად ეჭვის ქვეშ დგას და ზოგიერთი კანონზომიერების დადგენა კი საერთოდ ვერ მოხერხდა, განსხვავებული წყლის შემცველობის ნიმუშებზე ჩატარდა ექსპერიმენტები საკმაოდ დიდი რაოდენობით (40-45 ექსპერიმენტი), რომელიც მიეძღვნა ამავე პარაგრაფში უკვე აღწერილი კანონზომიერების უფრო ზუსტ განსაზღვრას.

ექსპერიმენტების ციკლი ზემოდ მოყვანილი ცდებისაგან განსხვავებით ტარდებოდა სხვადასხვა ნიმუშებზე. მივიღეთ საკმაო რაოდენობის ექსპერიმენტალური წერტილები, თუმცა უნდა ითქვას, რომ პარაგრაფის დასაწყისში მოყვანილ ექსპერიმენტებს გარკვეული უპირატესობა ჰქონდათ: ნიმუში იყო ერთი და იგივე და ცდიდან ცდამდე იცვლებოდა მხოლოდ თანაფარდობა წყლის ფრაქციებს შორის.

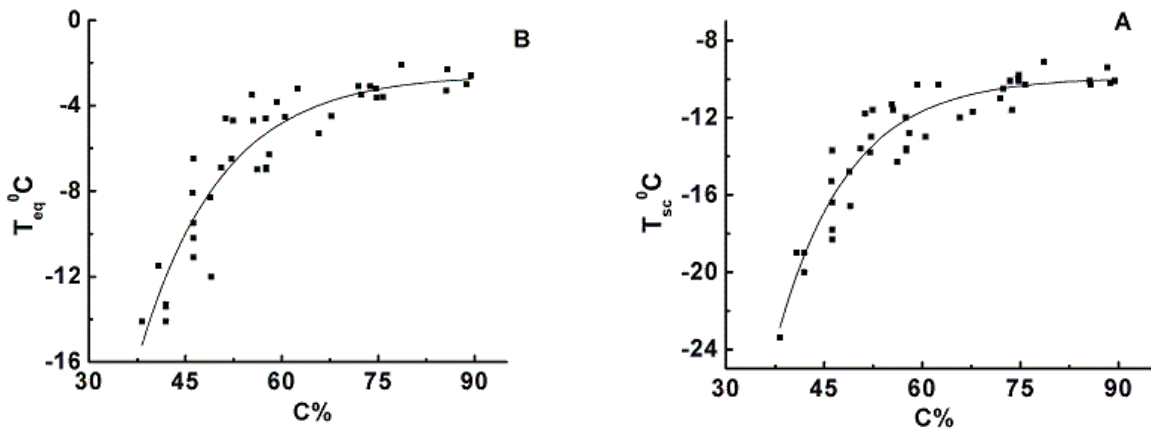
ცხრილი 6-ში მოყვანილია 45 სხვადასხვა ნიმუშის მიკროკალორიმენტული ექსპერიმენტებიდან მიღებული შედეგები. სურათ 45-ზე ნახვენებია პირველი ფრაქციის წყლის კრისტალიზაციის დასაწყისისა (ა) და წონასწორული ფაზური გადასვლის ტემპერატურის (ბ) ნიმუშის წყლის შემცველობაზე დამოკიდებულების მრუდები, მიღებული ცხრილში მოყვანილი მონაცემების საფუძველზე. ორივე შემთხვევაში ექსპერიმენტალური წერტილების განაწილება საკმაოდ კარგად აღიწერება ექსპონენტით. წერტილების გარკვეული გაბნევა მისაღებია რთული საკვლევი სისტემისთვის, მითუმეტეს თუ გავითვალისწინებთ, რომ ექსპერიმენტები ტარდებოდა ნიმუშებზე რომლებიც განსხვავებულ მდგომარეობებში იმყოფებოდნენ. ესენია ნიმუშები, რომლებიც იზომებოდა დაყოვნების გარეშე მას შემდეგ რაც ხდებოდა გარკვეული წყლის ოდენობის აორთქლება და იმყოფებოდნენ აშკარად არაწონასწორულ მდგომარეობაში; კრისტალიზა-დნობის განსხვავებული ციკლები; და ბოლოს ნიმუშები, რომლებიც ყოვნდებოდნენ ჰერმეტიკულ ამპულაში 24 საათით რათა სისტემა მოსულიყო წონასწორობაში.

სურათ 46-ზე მოყვანილია დამოკიდებულებები უჯრედშორისი წყლის კრისტალიზაციის დასაწყისის ტემპერატურასა და ყინულის დნობის ტემპერატურებს შორის (ა) და გადაციებასა და ნიმუშის წყლის შემცველობას შორის (ბ).

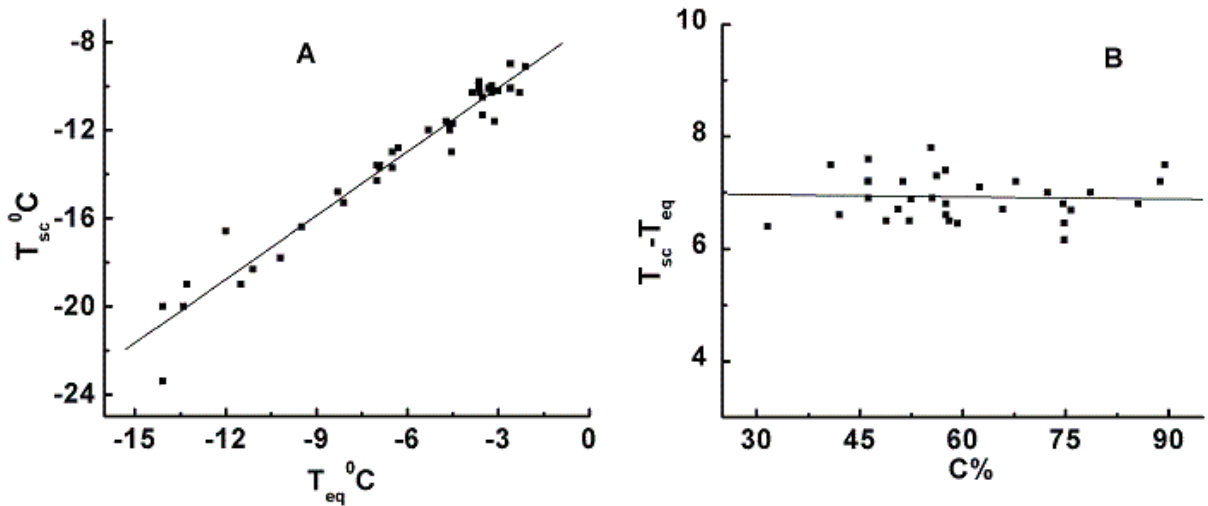
როგორც სურათი 46(ა)-დან ვხედავთ პირველი ფრაქციის წყლის ამ ორ მახასიათებელ ტემპერატურას შორის კვლავ წრფივი დამოკიდებულებაა და წრფის დახრა კვლავ ერთის ტოლია ისევე როგორც ზემოდ განხილული ციკლური ექსპერიმენტისათვის.

ზემოდ მოყვანილი მსჯელობა ეხებოდა წყლის პირველ ფრაქციას (უჯრედშორისი წყალი). რაც შეეხება წყლის შიდაუჯრედულ ფრაქციას, მათთვის მსგავსი ანალიზის ჩატარება ბევრად რთულია. მიზეზი ორია: 1) უმეტეს შემთხვევაში არ შეგვიძლია განვსაზღვროთ შიდაუჯრედული წყლის წონასწორული ფაზური გადასვლის ტემპერატურა, რადგან აღნიშნული წყლის ფრაქციის შესაბამისი დნობის პიკი ხშირად გადაფარულია უფრო დიდი (5-ჯერ – 20-ჯერ დიდი) ზომის დნობის მაქსიმუმით, რომელიც შეესაბამება წყლის უჯრედშორის ფრაქციას, ამიტომ რთულია ზუსტად განისაზღვროს შიდაუჯრედული ყინულის დნობის მაქსიმუმის მდებარეობა (წონასწორული ფაზური გადასვლის ტემპერატურა) ტემპერატურულ ღერძზე. აღნიშნული პარამეტრის საკმარისი სიზუსტით განსაზღვრა შესაძლებელია მხოლოდ იმ შემთხვევაში როცა დნობის ორი პიკი ერთმანეთისაგან საკმაოდ დაშორებულია ტემპერატურულ ღერძზე (2-3 °C); 2) რთულია აგრეთვე იმ უჯრედების წყლის შემცველობის დადგენა, რომლებიც განიცდიან მნიშვნელოვან გადაციებას. შესაძლებელია განისაზღვროს წყლის მეორე ფრაქციის რაოდენობა, რომელიც განიცდის ფაზურ გადასვლას, მაგრამ არ ვიცით ნიმუშის ამ ნაწილის მშრალი წონა – რა ოდენობითაა აღნიშნული უჯრედები ამა თუ იმ ნიმუშში. მიუხედავად ამ სირთულეებისა იყო მცდელობა უჯრედშორისი წყლის ანალოგიური ანალიზი

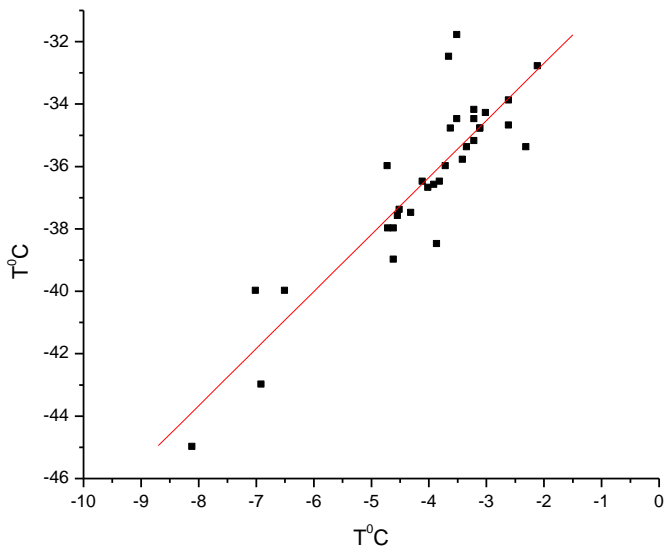
ph0	13,1	3,3	9,8	74,8	@	@	@	@	#VALUE!	#VALUE!	#VALUE!	#####	#####	-9,8	-3,64	@	@
ph0(2)	13,1	3,3	9,8	75	8,12	8,16	1,87	1,87	22,973	0,6229	0,6198	0,1427	0,1427	-10,1	-3,64	@	-32,5
ph1	7,6	4,5	3,1	40,8	2,08	1,9	@	@	#VALUE!	0,27368	0,25	#####	#####	-19	-11,5	-3,9	-36,6
ph2	12,8	3,1	9,7	75,8	@	@	@	@	#VALUE!	#VALUE!	#####	#####	#####	-10,3	-3,61	@	@
ph2(2)	12,8	3,1	9,7	76	7,39	8,23	1,09	1,09	13,9565	0,5773	0,643	0,0852	0,0852	-10,3	-3,61	@	-34,8
ph3	10	5,8	4,2	42	@	@	@	@	#VALUE!	#VALUE!	#####	#####	#####	-20	-14,1	-3,4	@
ph3(2)	10	5,8	4,2	42	@	@	@	@	#VALUE!	#####	#####	#####	#####	-20	-13,4	@	@
ph3(3)	10	5,8	4,2	42	2,21	2,51	@	@	#VALUE!	0,221	0,251	#####	#####	-19	-13,3	@	@
ph4(st)	11,1	1,3	9,8	88,3	8,5	@	0,14	0,14	#VALUE!	0,76577	#####	0,0126	0,0126	-9,4	@	@	-34,7
ph5	6,6	2,8	3,8	57,6	@	@	@	@	#VALUE!	#VALUE!	#####	#####	#####	-13,6	-7	@	@
ph5(2)	6,6	2,8	3,8	58	2,96	2,43	0,54	0,54	20,0371	0,4485	0,3682	0,0818	0,0818	-13,7	-6,9	-4,3	-37,5
ph6	11,8	1,7	10,1	85,6	7,81	8,19	0,99	0,99	12,375	0,66186	0,6941	0,0839	0,0839	-10,1	-3,3		-34,5
ph7	10,4	5,3	5,1	49	3,33	3,05	@	@	#VALUE!	0,32019	0,2933	#####	#####	-16,6	-12	-3,8	-36,5
ph8	13,6	6,5	7,1	52,2	4,93	4,81	2,18	2,18	44,76386	0,3625	0,3537	0,1603	0,1603	-13	-6,5	-4	-36,7
ph9	12,9	6,6	6,3	48,8	3,89	3,71	1,55	1,55	40,78947	0,30155	0,2876	0,1202	0,1202	-14,8	-8,3	-4,1	-36,5
ph10	11,7	4	7,7	65,8	6,72	5,88	2,82	2,82	44,7619	0,57436	0,5026	0,241	0,241	-12	-5,3	-3,4	-35,8
ph11	9	2,9	6,1	67,8	4,96	4,84	1,47	1,47	30	0,55111	0,5378	0,1633	0,1633	-11,7	-4,5	@	-37,4
ph12	11,2	4,7	6,5	58	5,18	4,51	1,9	1,9	39,21569	0,4625	0,4027	0,1696	0,1696	-12,8	-6,3	-3,7	-36
ph13	8,7	4,3	4,4	50,6	2,91	3,11	0,66	0,66	21,92691	0,33448	0,3575	0,0759	0,0759	-13,6	-6,9	@	-43
ph14	7,5	3,6	3,9	52	3,11	@	1,15	1,15	#VALUE!	0,41467	#####	0,1533	0,1533	-13,8	@	@	-36
ph15	6,5	3,5	3	46,2	1,98	1,77	0,14	0,14	7,466667	0,30462	0,2723	0,0215	0,0215	-15,3	-8,1	-4	-45



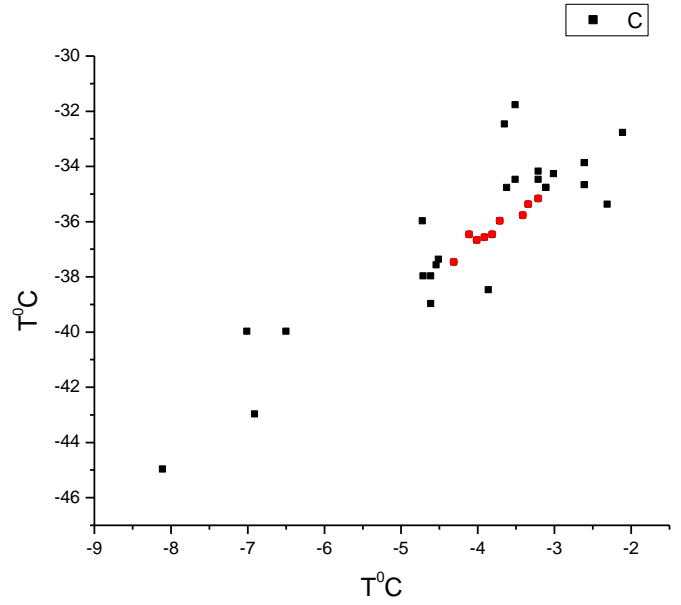
სურათი 45. უჯრედშორისი ხსნარის გადაციების ტემპერატურის (A) და ყინულის დნობის ტემპერატურის (B) დამოკიდებულება ნიმუშის წყლის შემცველობაზე. აპროქსიმაცია ექსპონენტითი $y=y_0+A_1e^{-x/C}$, სადაც $y_0=-9.8^{\circ}\text{C}$ (A)-თვის და $y_0=-2.5^{\circ}\text{C}$ (B)-თვის.



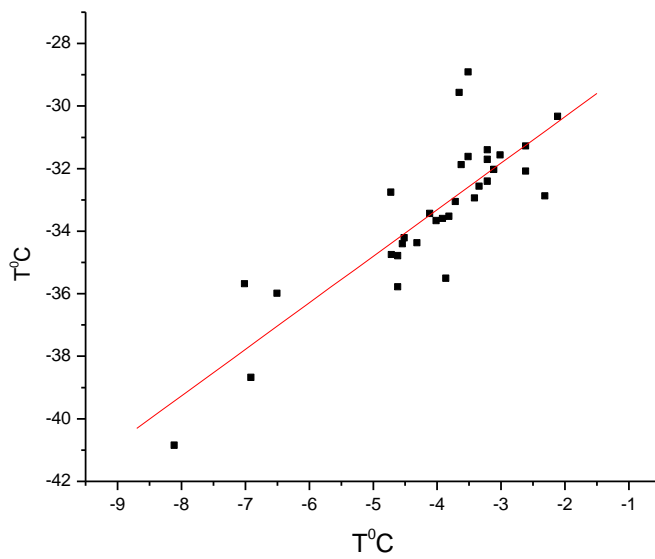
სურათი 46. უჯრედშორისი ხსნარის გადაციების ტემპერატურის დამოკიდებულება წარმოქმნილი ყინულის დნობის ტემპერატურაზე (A) და უჯრედშორისი ხსნარის გადაციების დამოკიდებულება ნიმუშის წყლის შემცველობაზე (B).



სურათი 47. შიდაუჯრედული წყლის კრისტალიზაციის ტემპერატურის წონასწორული ფაზური გადასვლის ტემპერატურაზე დამოკიდებულება



სურათი 48. შიდაუჯრედული წყლის კრისტალიზაციის ტემპერატურის წონასწორული ფაზური გადასვლის ტემპერატურაზე დამოკიდებულება. წითლად შეფერილია ის ექსპერიმენტალური წერტილები რომელთა კოორდინატების დადგენა შესაძლებელი იყო დიდი სიზუსტით.



სურათი 49. შიდაუჯრედული წყლის გადაციების დამოკიდებულება წონასწორული ფაზური გადასვლის ტემპერატურაზე.

ჩატარებულიყო წყლის მეორე ფრაქციისთვისაც, თუმცა წინასწარ ცხადი იყო რომ მიღებული შედეგების საიმედოობა არ იქნებოდა ხარისხიანი არც სანდოობის და არც რაოდენობრივი თვალსაზრისით.

განხილულ იქნა ურთიერთდამოკიდებულება დაბალტემპერატურული კრისტალიზაციის პროცესის შესაბამისი პიკის მაქსიმუმის ტემპერატურასა ($T_{კრ}$) და შესაბამისი წყლის ფრაქციის წონასწორული ფაზური გადასვლის ტემპერატურას ($T_{ღნ}$) შორის. $T_{კრ}$ -ს განსაზღვრა მარტივია ექსპერიმენტალური მრუდებიდან, ხოლო $T_{ღნ}$ განსაზღვრა, როგორც უკვე აღვნიშნეთ, ხშირ შემთხვევაში რთულია. იმ შემთხვევებში, როდესაც პრობლემური იყო $T_{ღნ}$ განსაზღვრა, ანუ დნობის მრუდზე ორი პიკი იმდენად ახლოს იყო ერთმანეთთან ტემპერატურულ ღერძზე, რომ ცალკეული მაქსიმუმის იდენტიფიცირება შეუძლებელი იყო, ჩავთვალეთ რომ $T_{ღნ}$ ემთხვევა პირველი ფრაქციის წყლის ფაზური გადასვლის ტემპერატურას. ამ დაშვების უფლება არსებობს თუკი აღნიშნული იქნება ამ დაშვების ცდომილების შესახებ ($2-3^{\circ}\text{C}$). განხილულ ორ პარამეტრს შორის დამოკიდებულება მოყვანილია სურათ44-ზე. დამოკიდებულებას, როგორც სურათიდან ვხედავთ, გარკვეული მიახლოებით აქვს წრფივი ხასიათი, მაგრამ ექსპერიმენტალური წერტილების გაბნევა საკმაოდ დიდია, ეს რატომ უნდა მოსალოდნელი იყო პირველ რიგში $T_{ღნ}$ პარამეტრის განსაზღვრის დიდი ცდომილების გამო ($\approx 2^{\circ}\text{C}$). სურათ45-ზე წითლად არის შეფერილი ის წერტილები, რომლებისთვისაც $T_{ღნ}$ პარამეტრის განსაზღვრა საკმაოდ სიზუსტით იყო შესაძლებელი, რადგან მკვეთრად იყო გამოყოფილი წყლის მეორე ფრაქციის დნობის პიკი. როგორც სურათი45-დან ჩანს აღნიშნული წერტილებიც წრფეზეა განლაგებული და აპროქსიმაციით მიღებული წრფის დახრაც ანალოგიურია. რაც შეეხება გაბნევას – იგი გაცილებით მცირეა, რაც მოსალოდნელი იყო რადგან $T_{ღნ}$ პარამეტრის

განსაზღვრა ამ წერტილებისთვის შესაძლებელია საკმაოდ კარგი სიზუსტით.

აპროქსიმაციით მიღებული წრფის დახრა არის 1.83, რაც მნიშვნელოვნად განსხვავდება უჯრედშორისისთვის მიღებული ანალოგიური პარამეტრისაგან (წრფის დახრა – 1.01). რაც შეეხება გადაციებას ცხადია აღარ იქნება მუდმივი სიდიდე, რადგან გადაციება მუდმივია მხოლოდ იმ შემთხვევაში, როდესაც $T_{კრ}$ -ის $T_{ღნ}$ -ზე დამოკიდებულების მრუდის დახრა 1-ის ტოლია. სურათ46-ზე ნაჩვენებია გადაციების დამოკიდებულება დნობის ტემპერატურაზე.

დასკვნები

1. შექმნილია დაბალტემპერატურული დიფერენციალური სკანირებადი მიკროკალორიმეტრის ახალი ლაბორატორიული მოდელი, რომელიც ძირითადად განკუთვნილია ბიოლოგიურ ობიექტებში წყლის კრისტალიზაციისა და ყინულის დნობის პროცესების რეგისტრაციისათვის. აღნიშნული კალორიმეტრიული მოდელის მუშაობა დაფუძნებულია ნახევარგამტარული თერმოელემენტების მუშაობის პრინციპზე (პელტიეს ეფექტზე), რაც საშუალებას იძლევა უზრუნველყოს ნიმუშის გაციება -60°C -მდე (სამუშაო ინტერვალი – ოთახის ტემპერატურიდან -60°C -მდე). აღნიშნული მოდელის საშუალებით შესაძლებელია გაზომვების ჩატარება სკანირების რამოდენიმე განსხვავებული მუდმივი სიჩქარით – როგორც გაციების ასევე გახურების რეჟიმში და აგრეთვე იზოთერმულ რეჟიმში. კალორიმეტრი დაკავშირებულია კომპიუტერთან ანალოგურ-ციფრული და ციფრულ-ანალოგური გარდამქმნელის საშუალებით. კალორიმეტრიდან მიღებული ინფორმაციის რეგისტრაცია და შენახვა ხდება ცხრილების სახით და აგრეთვე ხორციელდება სკანირების პროცესში ნიმუშში მიმდინარე პროცესების შედეგად გამოყოფილი ან შთანთქმული სითბური ენერჯის სიმძლავრის ტემპერატურაზე (ან დროზე) დამოკიდებულების ვიზუალიზაცია.

2. შესწავლილია ერთწლიანი მცენარის ფესვებში წყლის კრისტალიზაციისა და ყინულის დნობის პროცესების თავისებურებანი. ნაჩვენებია, რომ:

ა. ნიმუშში არსებული წყლის კრისტალიზაციის დასაწყისის შესაბამისი ტემპერატურა მოცემული ნიმუშისათვისაა მახასიატებელი სიდიდე, იგი არაა დამოკიდებული გაციების სიჩქარეზე და დამოკიდებულია მხოლოდ ნიმუშის მდგომარეობაზე. აღნიშნული პარამეტრი, მიუხედავად იმისა თუ რა პირობებში იქნება იგი მიღებული, გვაძლევს გარკვეულ ინფორმაციას საკვლევი ობიექტის მდგომარეობაზე.

ბ. ქსოვილის როგორც შიდაუჯრედული, ასევე უჯრედშორისში მოთავსებული წყალი განიცდის დიდ გადაციებას. განსაკუთრებით ღრმა გადაციება (-32°C -მდე) დაიშორება წყლის შედარებით მცირე ფრაქციისათვის. დადგინდა, რომ ნიმუშში არსებული წყლის კრისტალიზაციის პროცესის ამსახველ კალორიმეტრიულ მრუდზე არსებული საწყისი ეგზოთერმა (ტემპერატურული ინტერვალი: $-10 - -25^{\circ}\text{C}$) შეესაბამება უჯრედშორისში არსებული წყლის კრისტალიზაციის პროცესს, ხოლო დაბალტემპერატურული ეგზოთერმა (ტემპერატურული ინტერვალი: $-25 - -40^{\circ}\text{C}$) შეესაბამება შიდაუჯრედული წყლის კრისტალიზაციის პროცესს, ე.ი. წყლის ის ფრაქცია რომელიც განიცდის ღრმა გადაციებას (-32°C -მდე) წარმოადგენს შიდაუჯრედულ წყალს.

გ. წყლის კრისტალიზაციის პროცესის ამსახველ კალორიმეტრიულ მრუდზე არსებულ ორ ეგზოთერმულ პიკს შორის მდებარე ტემპერატურულ ინტერვალში მიმდინარეობს შიდაუჯრედული წყლის გამოსვლა უჯრედებიდან და მისი კრისტალიზაცია უჯრედშორისში. აღნიშნული პროცესი გამოწვეულია უჯრედშორისში ყინულის შექმნის შედეგად უჯრედშიდა და –გარე არეებს შორის ოსმოსური წნევის გრადიენტის წარმოქმნით.

დ. ნიმუშში ყინულის დნობის ტემპერატურა განპირობებულია შესაბამის სხნარებში ოსმოსურად აქტიური ნივთიერებების კონცენტრაციით. ამასთან, მიუხედავად იმისა, რომ შიდაუჯრედული წყალი მნიშვნელოვნად მეტ გადაციებას განიცდის, შიდაუჯრედული ყინული დნება უფრო მაღალ ტემპერატურაზე, ვიდრე უჯრედშორისში შექმნილი ყინული. ეს შედეგი დამზერილი იქნა ნაწილობრივ გამომშრალი ნიმუშების შესწავლისას.

ე. ფესვის სხვადასხვა უბანზე ჩატარებული ექსპერიმენტების შედეგად დადგინდა, რომ ფესვის გასწვრივ ოსმოსურ წნევათა გრადიენტს არ აქვს ისეთი მიმართულება, რომელიც ფესვის სისტემაში განაპირობებდა წყლის აღმავალ ნაკადს. აღნიშნული შედეგის გამო შეიძლება ვივარაუდოთ, რომ ფესვთა სისტემაში წყლის გადაადგილების მექანიზმი არ უნდა იყოს დაკავშირებული ოსმოსურ წნევებთან.

ვ. დადგინდა, რომ არსებობს კორელაცია ნიმუშში არსებული წყლის კრისტალიზაციის დასაწყისის ტემპერატურასა და ნიმუშის წყლის შემცველობას შორის – დამოკიდებულებას აქვს ექსპონენციალური სახე. აგრეთვე ექსპონენციალური დამოკიდებულებაა წონასწორული ფაზური დაგასვლის ტემპერატურასა და ნიმუშის წყლის შემცველობას შორის. დადგენილია დამოკიდებულების პარამეტრები.

ზ. გადაციება როგორც უჯრედშორისი ასევე შიდაუჯრედული წყლისა მუდმივი სიდიდეა მიუხედავად იმისა, რომ შეიძლება იცვლებოდეს გადაციების ტემპერატურა და იგი ტოლია 7K-სა უჯრედშორისისათვის, ხოლო შიდაუჯრედულისთვის – 32K-ის.

3. შექმნილია ალგორითმი რომლის საშუალებითაც შესაძლებელია ნიმუშში მიმდინარე პროცესების შედეგად გამოყოფილი ან შთანთქმული სითბური ენერგიის სიმძლავრის ტემპერატურაზე (ან დროზე) დამოკიდებულებიდან გადასვლა ახალი ფაზის წარმოქმნის ტემპერატურაზე (ან დროზე) დამოკიდებულებაზე და შესაბამისად კრისტალიზებული ან გამდნარი წყლის რაოდენობის დადგენა კარგი სიზუსტით.

ავტორი დიდ მადლობას უხდის სამეცნიერო ხელმძღვანელს ფიზ. მათ. მეცნიერებათა დოქტორ ბატონ ნუგზარ ბაქრაძეს სამუშაოს მუდმივი ხელმძღვანელობისა და ყურადღებისათვის; პროგრამის ხელმძღვანელს ფიზ. მათ. მეცნიერებათა დოქტორ ბატონ თამაზ მძინარისვილს ყურადღებისათვის; ელ. ანდრონიკაშვილის სახელობის ფიზიკის ინსტიტუტის თანამშრომლებს ფიზ. მათ. მეცნიერებათა დოქტორ ბატონ ევგენი კიზირიას, ფიზ. მათ. მეცნიერებათა კანდიდატ ბატონ ვიქტორ სოხაძეს, ბიოლოგიის მეცნიერებათა კანდიდატ ქალბატონ მარინა აბულაძეს, სასარგებლო რჩევებისა და დისკუსიებისათვის. პროგრამისტ ქალბატონ ეთერი ვარდიძეს პროგრამული უზრუნველყოფის შექმნისათვის.

ციტირებული ლიტერატურა

1. Mader S. Biology, Wm. C. Brown Publishers. Plant structure. 1990. 444-459.
2. Слейчер Р. Водный режим растений. Мир, Москва, 1970, 360 стр.
3. Васильев А. Воронин Н. Еленевский А. Серебрякова Т. Анатомия и морфология растений М. Просвещение 1978 480 стр.
4. 68
5. Sjostrand E. Ultrastructure and function of cellular membrans. In Ultrastructure in biological systems. The membranes (Dalton and Haugenau eds.), Acad Press, N.Y. 1968. 151-210.
6. Singer S. Nicolson G. The fluid mosaic model of the structure of cell membrane. Science. 1972, 175, 720-731.
7. Mader S. Biology, Wm. C. Brown Publishers. Membrane structure and function. 1990. 76-92.
8. Ray P. On theory of osmotic water moment. Plant Physiol. 1960, 35, 783-788.
9. Anderson J. Malone D. Mechanism of osmotic flow in porous membranes. Biophys. J. 1974, 14, 957-961.
10. Laidler K., Shuler K. The kinetics of membrane processes. 1. The mechanism and the kinetic laws for diffusion through membranes. J.Chem.Phys. 1949, **17**, 851-855.
11. Kedem O., Katchalsky A., Thermodynamic analysis of the permeability of biological membranes to nonelectrolytes. BBA, 1958, **27**, 229-241.
12. Katchalsky A., Kedem O., Thermodynamics of flow processes in biological systems. Biophys.J., 1962, **2**, p.53-78.
13. Kedem O., Katchalsky A., Physical interpretation of the phenomenological coefficients of membrane permeability. J.Gen.Physiol. 1961, **45**, 143-179.
14. Dainty J., Water relations of plant cells. Adv.Bot.Res. 1963, **1**, 279-326.
15. Dainty J., Ginzburg B., Irreversible thermodynamics and frictional model of membrane processes with particular reference to the cell membrane. J.Theor.Biol..1963, **5**, 256-265.
16. Dainty J., Ginzburg B., The reflection coefficient of plant cell membranes for certain solutes. BBA, 1964, **79**, 129-137.
17. Glinka Z., Reinold L., Reversible changes in the hydraulic permeability of plant cell membranes. Plant Physiol., 1964, 39, 1043-105-.
18. Glinka Z., Reinold L., Abscisic acid raises the permeability of plant cells to water. Plant Physiol., 1971, 48, 103-105.
19. Glinka Z., Reinold L., Induced changes in permeability of plant cell membranes to water. Plant Physiol., 1972, 49, 692-696.
20. Steudle E., Zimmerman U. determination of hydraulic conductivity and reflection coefficients in *Nitella exilis* by means of direct cell – turgor pressure measurements. BBA, 1974, 332, 339-412.
21. Zimmerman U., Steudle E. Physical aspects of water relations of plant cells. Adv.Bot.Res. 1978, 6, 45-117.

22. Wolfe J., Steponkus P., Tenzion in the plasma membrane during osmotic concentration. *CryoLetters*, 1983, 4, 315-322.
23. Zimmerman U. Husken D. Theoretical and experimental exclusion of errors in the determination of the determination of the elasticity and water transport parameters of plant cells by the pressure probe technique. *Plant Physiol.* 1979, 64, 18-24.
24. Price H. Thompson T. Properties of liquid bilayer membranes separating two aqueous phases: temperature dependence of water permeability. *JMB*, 1969, 41, 443-457.
25. Philip J. Plant water relations: some physical aspects. *An.Rev.Plant Physiol.* 1966, 17, 245-268.
26. Mazur P. Kinetics of water loss from cells at subzero temperatures and the likelihood of intracellular freezing. *J. Gen. Physiol.* 1963, 47, 347-369.
27. Mansoori J. Kinetics of water loss from cells at subzero temperatures. *Cryobiology.* 1975, 12, 34-45.
28. Silveres O. Gravalho E. Toscano W. Huggins C. The thermodynamics of water transport from biological cells during freezing. *J. Heat Transfer*, 1975, 97, 582-588.
29. Mazur P. *Cryobiology: The freezing of biological systems.* Science, 1970, 168, 939-948.
30. Toscano W., Gravalho E. Silveres O. Silvers O. The thermodynamics of intracellular ice nucleation in the freezing of erythrocytes. *J. Heat Transfer*, 1975, 97, 326-332.
31. Levin R. Water permeability of yeast cells at subzero temperatures. *J. Membr. Biol.* 1979, 46, 191-214.
32. Meryman H. Modified model for mechanism of freezing injury in erythrocytes. *Nature*, 1968, 218, 333-336.
33. Diller K. Gravalho E. Higgins C. Intracellular freezing in biomaterials. *Cryobiology*, 1972, 9, 429-444.
34. Schwartz G. Diller K. Osmotic response of individual cells during freezing. 1. Experimental volume measurements. *Cryobiology*, 1982, 20, 61-77.
35. Schwartz G. Diller K. Osmotic response of individual cells during freezing. 2. Membrane permeability analysis. *Cryobiology*, 1982, 20, 542-552.
36. Diller K. Lynch M. An irreversible thermodynamic analysis of cell freezing in the presence membrane permeable additives. 1. Numerical model and transient cell volume data. *CryoLetters* 1983,4, 2950308.
37. Красавцев О. Разнополов О. Хвалин Н. Отток воды из переохлажденных зимних бутонов. *Физиол. Растений.* 1983, 30, 1025-1031.
38. Красавцев О. Хвалин Н. Незамерзающая вода в закаленных побегах зимних злаков. *Физиол. Растений.* 1982, 29, 437-446 1025-1031.
39. Gusta L. Burke M. Kapoor A. Determination of unfrozen water in winter cereals at subfreezing temperatures. *Plant Physiol.* 1975, 56, 707-714.
40. Weizer C. Cold resistance and injury in woody plants. *Science*, 1970, 169, 1269-1293.
41. Burke M. Gusta L. Quamme H. Weizer C. Li P. Freezing injury in plants. *Ann. Rev. Plant Physiol.* 1976, 27, 507-528.
42. George M. Burke M. Cold hardiness and deep supercooling in xylem of shagbark hickory. *Plant Physiol.* 1977, 59, 319-325.
43. Quamme H. Weizer C. Stushnoff C. The mechanisms of freezing injury in xylem of winter twigs. *Plant Physiol.* 1973, 51, 428-434
44. Stout G. Steponkus P. Cotts R. Quantitative study of the importance of water permeability in plant cold hardiness. *Plant Physiol.* 1977, 60, 374-368.
45. Hong S. Sucoff E. Units of deep supercooling water in woody Xylem. *Plant Physiol.* 1980, 66, 40-45.
46. Levett J. Responses of plants environmental stress. N.Y., Acad. Press, 1972, 697 p.

47. George M., Burke M. Pellet H. Jonson A. Low temperature exotherms and woody plant distribution. *Hortscience*, 1974, 9, 519-522.
48. Quamme H. Stushnoff C. Weiser C. The relationship of exotherms to cold injury in apple stem tissues. *J.Am.Soc. Hort Sci.* 1972, 97, 608-613.
49. Quamme H. Weiser C. Stushnoff C. The mechanism of freeze injury in xylem of winter apple twigs. *Plant Physiol.* 1973, 51, 273-277.
50. Кейку С. Ивайя М. низкотемпературную экзотерму ксилемы вечнозеленных и листопадных широколиственных древесных пород Японии в связи с их морозостойкостью и ареалом распространения. В сб. *Холодостойкость растений*, М. Колос 1983, 318 стр.
51. Левитт Дж. Повреждения и выживание после замораживания и связь с другими повреждающими воздействиями. В сб. *Холодостойкость растений*, М. Колос 1983, 318 стр.
52. Степонкус П. Вист С. Изменения плазмалеммы в результате закаливания и замораживания. В сб. *Холодостойкость растений*, М. Колос 1983, 318 стр.
53. Папта Дж. Ли П. Свойства клеточных мембран в связи с их повреждением при замораживании. В сб. *Холодостойкость растений*, М. Колос 1983, 318 стр.
54. Белоус А. Бондаренко В. Структурные изменения биологических мембран при охлаждении. Киев, Наукова Думка, 1982, 255 ст.
55. Еуманов И. Физиология закаливания и морозостойкости растений. М. Наука, 1972, 190 ст.
56. Pushkar N. Utkin Y. Gordienko N. Osmotic lysis as a damaging factor during low temperature preservation of cell suspension. *Cryobiology.* 1980, 17, 403-409.
57. Schwartz G. Diller K. Osmotic response of individual cells during freezing *Cryobiology.* 1982, 20, 61-77.
58. Пушкарь Н. Иткин Ю. Гордиенко Е. Бронштейн В. Причины и механизмы температурного шока у ДАН СССР 1975, 221, 1461-1464.
59. Pushkar N. Utkin Y. Bronstein V. Gordienko N. Ko Min Y. On the problem of dehydration and intracellular crystallization during freezing of cell suspensions. *Cryobiology.* 1976, 213, 147-152.
60. Mazur P. The role of intracellular freezing in the death of cells cooled at supraoptimal rates. *Cryobiology.* 1977, 14, 251-272.
61. Levin R. Gravalho E. Huggins C. A membrane model describing the effect of temperature on the water conductivity of erythrocyte membranes at subzero temperatures. *Cryobiology.* 1976, 13, 415-429.
62. Н. Бакрадзе, К. Моиссрапишвили, Л. Кешелашвили. "О процессе кристаллизации воды в растительных тканях" Тез. VIII Всесоюзной конференции по калориметрии и химической термодинамике, Иваново, ст. 428 (1979).
63. Н. Бакрадзе, К. Моиссрапишвили, Л. Кешелашвили. "Кристаллизация воды в растительных объектах". *Биофизика*, 25, ст. 54-48 (1980).
64. Н. Бакрадзе, Ю. Балла, И. Метревели, Ю. Шариманов. "Ориентационная зависимость линии протонного резонанса в капиллярах стебля растения". *Биофизика*, 25, ст. 356-357 (1980).
65. Н. Бакрадзе, К. Моиссрапишвили, Л. Кешелашвили. "О процессе кристаллизации воды в тканях растений". *Биофизика*, 26, ст. 119-123 (1981).
66. Н. Бакрадзе, Ю. Балла, И. Метревели, Ю. Шариманов. "О возможном механизме процесса кристаллизации воды в тканях растений". *Биофизика*, 26, ст. 719-723, (1981).
67. N. Bakradze, K. Moistsrapishvili, L. Keshelashvili. "Microcalorimetric investigation of crystallization process and successive melting of water". *International symposium on biocalorimetry*, Tbilisi, p.67 (1981).

68. N. Bakradze, K. Moistsrapishvili, L. Keshelashvili. "Effect of plant hardening on the crystallization process of intracellular water". International symposium on biocalorimetry, Tbilisi, p.68 (1981).
69. Н. Бакрадзе, К. Моисцрапишвили, Л. Кешелашвили. "Влияние "закалки" растения на кристаллизацию внутриклеточной воды в тканях". Биофизика, 27, ст. 736-737, (1982)
70. Н. Бакрадзе, Ю. Балла, "О кристаллизации внутриклеточной воды в тканях растений", Биофизика, 28, ст. 119-121 (1983).
71. Н. Бакрадзе, К. Моисцрапишвили, Л. Кешелашвили. "О процессе кристаллизации внутриклеточной воды в тканях виноградной лозы при замораживании". Биофизика, 28, ст. 888-890 (1983).
72. Н. Бакрадзе, Ю. Балла, И. Метревели, Ю. Шариманов. "Модельное описание процесса выхода воды из клеток растений при их охлаждении". Биофизика, 29, ст. 105-108 (1984).
73. Н. Бакрадзе, Л. Кешелашвили, К. Моисцрапишвили, Э. Намчевадзе. "Температурная зависимость осмотического давления внутриклеточной и межклеточной среды в растительных тканях". Биофизика, 29, ст. 143-146 (1984).
74. Н. Бакрадзе, Л. Кешелашвили, К. Моисцрапишвили, Э. Намчевадзе. "Упругие свойства растительных клеток". Биофизика, 29, ст. 670-675. (1984).
75. Ю. Балла, Н. Бакрадзе, Ю. Шариманов. "Эффективная водопроницаемость комплекса мембранных структур растительных клеток при субнулевых температурах". Биофизика, 29, ст. 864-867 (1984).
76. Н. Бакрадзе, И. Метревели, Л. Кешелашвили, К. Моисцрапишвили. "Термодинамика процессов протекающих в тканях растений при их охлаждении", Биофизика, 29, ст. 1036-1040. (1984).
77. Н. Бакрадзе, Л. Кешелашвили, К. Моисцрапишвили. "Особенности низкотемпературного плазмолиза клеток "закланных" растений". Биофизика, 30, ст. 482-486, (1985).
78. Н. Бакрадзе, Л. Кешелашвили, К. Моисцрапишвили. "О возможном механизме влияния "закалки" растения на процесс кристаллизации воды в ксилеме, Биофизика, 30, ст. 666-670 (1985).
79. И. Метревели, Н. Бакрадзе. "Влияние деформации клеточной стенки на движение воды через мембраны клеток растений". Биофизика, 30, ст. 694-697. (1985).
80. Ю. Балла, Н. Бакрадзе, Ю. Шариманов. "Выявление двух состояний воды в тканях растений методом протонной магнитной релаксации". Биофизика, 30, ст. 476-781 (1985).
81. Н. Бакрадзе, Л. Кешелашвили, И. Метревели. "Термодинамика процессов протекающих в растениях при их охлаждении". Биофизика, 31, ст. 115-118. (1986).
82. N. Bakradze, L. Keshelashvili, Sc. Peikrshvili. "Crystallization process dynamics of the intracellular solution in plant tissues wuth different water content of samples". Studia Biophysica, 1990, **136**, 241-246
83. Fiorino P. Mancuso S. Differential thermal analysis, supercooling and cell viability in organs of *Olea europaea* at subzero temperatures. Adv. Hort. Sci., 2000, **14**, 23 – 27.
84. Rajashekar C. Burke M. Freezing Characteristics of Rigid Plant Tissues. Plant Physiol. 1 996. **11 1** : 597-603.
85. Malone S. and Ashworth E. Freezing Stress Response in Woody Tissues Observed Using Low-Temperature Scanning Electron Microscopy an Freeze Substitution Techniques. Plant Physiol. 1991. **95**, 871-881
86. Wilson P. Arthur J. and A. D. J. Haymet. Ice Premelting during Differential Scanning Calorimetry. Biophysical Journal 1999, **77**, 2850–2855.
87. D Irimia D. Karlsson and J. Kinetics of Intracellular Ice Formation in One-Dimensional Arrays of Interacting Biological Cells. Biophysical Journal, 2005, **88**, 647–660
88. Pearce R. Plant Freezing and Damage. Annals of Botany 2001, **87**: 417-424,

89. Michael Wisniewski¹ and D. Michael Glenn Use of a Hydrophobic Particle Film as a Barrier to Extrinsic Ice Nucleation in Tomato Plants J. Amer. Soc. Hort. Sci. 2002, **127(3)**, 358–364.
90. Block W. Water or ice? – the challenge for invertebrate cold survival. Science Progress. 2003, **86**, 77-101.
91. Worland M. Block W. Desiccation at sub-zero temperatures in polar terrestrial arthropods. J. of Insect Physiology, 2003, **49**, 193-203.
92. Block W. Interactions of water, ice nucleators and desiccation in invertebrate cold survival. Eur. J. Entomol. 2002, **99**, 259-266.
93. Ashworth E. The formation and distribution of ice within forsythia flower buds. Plant Physiol. 1990. **92**, 718-725.
94. Wilson P. Arthur J. Haymet A. Ice premelting during differential scanning calorimetry. Biophysical Journal, **77**, 1999, 2850-2855.
95. Де Гроот С. Мазур П. Неравновесная термодинамика. М. Мир, 1964, 456 стр.
96. Кузнецов В. Кристаллы и кристаллизация. М., Гос.изд. техничеко-теоретической лит. 1954, 411 ст.
97. Ландау Л. Лифшиц Е. Статистическая физика. М. Л. гл. редакция техничеко-теоретической лит. 1938, 227 ст.
98. Пушкарь Н. Белоус А. Иткин Ю. Вишневикий В. Розанов Л. Низкотемпературная кристаллизация в биологических системах. Киевю Наукова думка 1977, 240 ст.
99. Chernov A. Crystallization. Ann.Rev.Material Sci. 1974, 3, 397-454.
100. Mazur P. Physikal and chemical basis of injury in sigle-celled microorganisms subjected to freezing and thawing. in: Cryobiology (meryman ed.) London N.Y. acad. press, 1986, 213-215.
101. Самыгин Г. Причины вымерзания растенийю Мю Наука, 1982, 190 ст.
102. Н. Бакрадзе, Д. Монаселидзе “Прецезенный Дифференциальный Микрокалориметр”. Измерительная техника, 2, ст.58-60 (1971).
103. Д. Монаселидзе, Н. Бакрадзе. “Адиабатный Дифференциальный Микрокалориметр”. Сб. Конформационные изменения биополимеров в растворах. Изд-во «Наука», М. ст. 196-199 (1973).
104. Н. Бакрадзе, Т. Вадосанидзе. “Некоторые вопросы теории метода сканирующей дифференциальной микрокалориметрии”. Мат. VI всесоюзной конференции по калориметрии, Тбилиси, Мецниереба, ст. 575-579 (1973).
105. Н. Бакрадзе, Е. Кизирия. “О разрешающей способности сканирующего дифференциального микрокалориметра” Сб. Конформационные изменения биополимеров в растворах. Тбилиси, Мецниереба, ст.150 (1980).
106. Н. Бакрадзе, Е. Кизирия. “Расчет температурного градиента в ячейке сканирующего дифференциального микрокалориметра”. Сб. Конформационные изменения биополимеров в растворах. Тбилиси, Мецниереба, ст.149 (1980).
107. Бакрадзе Н. Дифференциальная микрокалориметрия и еукцдинамические свойства сиситем растительных клеток при температурах ниже 0⁰С. Диссертация на соискание ученой степени доктора физ.-мат. наук. Тбилиси 1985, 303 ст.

- 108.N. Bakradze, J. Monaselidze, K. Moistsrapashvili, L. Keshelashvili. Institute of Physics, Georgian Academy of Sciences, "Differential Microcalorimeter". USSR Patent No 1005550. November 16, priority 1978 (In Russian).
- 109.N. Bakradze, E. Kiziria, V. Sokhadze, Sh. Gogichaishvili, and E. Vardidze. NEW CALORIMETRIC SYSTEM AND SOME RESULTS OF WATER PHASE TRANSITION RESEARCH IN PLANT ROOTS. *CryoLetters* 28(2), 119-128 (2007).
110. N. Bakradze, E. Kiziria, V. Sokhadze, and Sh. Gogichaishvili. THE PECULIARITIES OF WATER CRYSTALLIZATION AND ICE MELTING PROCESSES IN THE ROOTS OF ONE-YEAR PLANTS (*Plantago major L.*). *CryoLetters* 29(3), 217-228 (2008).
111. Sh. Gogichaishvili, V. Sokhadze, E. Kiziria and N. Bakradze. Supercooled water in the roots of annual plants. *Journal of Biological Physics and Chemistry* 8 (2008) 79–83. *Received* 10 September 2008; *accepted* 30 September 2008.
112. ნ. ბაქრაძე, ე. კიზირია, ვ. სოხაძე, შ. გოგიჩაიშვილი. დაბალტემპერატურული დიფერენციალური სკანირებადი კალორიმეტრი. პატენტი. სამრეწველო საკუთრების ოფიციალური ბიულეტენი 5(273), 10475 A. გვ.17.
113. Water, a Comprehensive Treatise, v.7 (1982) Water and Aqueous Solutions at Subzero Temperatures, (ed) F Franks, Plenum Press, New York.
114. Красавцев О.А. калориметрия растений при температурах ниже нуля. М., Наука, 1972, 117 С.