

აკაკი წერეთლის სახელმწიფო უნივერსიტეტი

თევდორაძე სერგო

მცენარეული კვების პროდუქტების ხარისხიანი შენახვის  
რეჟიმული პარამეტრების კვლევა

საინჟინრო მეცნიერებების დოქტორის აკადემიური ხარისხის  
მოსაპოვებლად წარმოდგენილი

დისერტაცია

**05.18.12** – კვების წარმოების პროცესები და აპარატები

სემეცნიერო ხელმძღვანელი  
ავთანდილ თვალჭრელიძე  
აკ. წერეთლის სახელმწიფო  
უნივერსიტეტის პროფესორი  
ფიზიკა-მათემატიკის მეცნიერებათა  
დოქტორი

ქუთაისი 2010

## შინაარსი

შესავალი _____	4
თავი 1. საკვები პროდუქტების შენახვა.	
სადისერტაციო კვლევების მიზნები და ამოცანები _____	7
1.1. ზოგიერთი საკვები პროდუქტების შენახვის ხერხები და რეჟიმები _____	7
1.2. შენახვის დროს მიმდინარე ბიოლოგიური და მიკრობიოლოგიური მოვლენები _____	13
1.3. შენახვა რეგულირებად აიროვან გარემოში _____	27
1.4. სადისერტაციო კვლევების მიზნები და ამოცანები _____	35
თავი 2. რეგულირებად აიროვან გარემოში პროდუქტების შენახვის არასტაციონარული პროცესის მათემატიკური მოდელი _____	37
2.1. მოდელის აგების ძირითადი პრინციპები _____	37
2.2. მოდელის ძირითადი განტოლებები _____	40
2.2.1. დამოუკიდებელი და დამოკიდებული ცვლადები. პროდუქტის და აიროვანი გარემოს შემადგენლობის აღწერა _____	40
2.2.2. ბიოქიმიური პროცესის აღწერის განტოლებები _____	44
2.2.3. თბო- და მასაცვლის აღწერის განტოლებები _____	46
2.2.4. უწყვეტობის (მასის შენახვის) განტოლებები _____	50
2.2.5. ენერჯის განტოლებები _____	52
2.2.6. მოძრაობის განტოლებები _____	54
2.2.7. აიროვანი გარემოს მდგომარეობის განტოლებები _____	56
2.3. საწყისი და სასაზღვრო განტოლებები _____	57
2.4. მოდელის განტოლებების სრული სისტემა _____	58
თავი 3. მათემატიკურ მოდელზე გამოთვლითი ექსპერიმენტირება _____	60
3.1. რიცხვითი ალგორითმი და პროგრამა პერსონალური კომპიუტერისათვის	60
3.2. შენახვის პროცესზე შესასვლელთან აიროვანი გარემოს ტემპერატურის გავლენის კვლევა _____	61
3.3. შენახვის პროცესზე ფილტრაციის სიჩქარის გავლენის კვლევა _____	68
3.4. შენახვის პროცესზე პროდუქტის ჩაწყობის სიმჭიდროვის გავლენის კვლევა	77

3.5. შენახვის პროცესზე არხის სიგრძის გავლენის კვლევა _____	82
3.6. შესასვლელთან აიროვანი გარემოს შემადგენლობის შენახვის პროცესზე გავლენის კვლევა _____	86
თავი 4. შენახვის პროცესის ოპტიმიზაცია _____	100
4.1. ოპტიმიზაციური ამოცანის დასმა _____	100
4.2. ალგორითმი ოპტიმიზაციური ამოცანისათვის _____	102
4.3. ოპტიმიზაციური ამოცანის ამოხსნის შედეგები _____	104
ძირითადი დასკვნები _____	107
ლიტერატურა _____	109

## შესავალი

**პრობლემის აქტუალობა.** სოფლის მეურნეობის პროდუქტებით მოსახლეობის სრული და ხარისხიანი მომარაგების ამოცანის გადასაწყვეტად აუცილებელია არა მარტო წარმოების გაზრდა, არამედ შენახვისას დანაკარგების შემცირებაც. საქართველოში სოფლის მოსახლეობამ დააგროვა ხილისა და ბოსტნეულის ხარისხიანი შენახვის განსაზღვრული გამოცდილება, მაგრამ არის პრობლემები (შედარებით დიდი დანაკარგები, ამინდის ცვალებადობასთან დაკავშირებული ხარისხის არასტაბილურობა, შენახვის დიდი ღირებულება, ფიზიკური შრომის დიდი დანახარჯები და ა.შ.), რომელთა გადაწყვეტა მეცნიერულ მიდგომას მოითხოვს.

ხილისა და ბოსტნეულის შენახვისას გადამწყვეტი მნიშვნელობა აქვს შენახვის რეჟიმს. შენახვის რეჟიმის რეგულირება ოპტიმალურ დონეზე და მისი შენარჩუნება ბუნებრივი კლებისა და ლპობით გამოწვეული დანაკარგების შემცირების ძირითადი საშუალებაა. შენახვის რეჟიმი ხასიათდება შემდეგი მახასიათებლებით: ტემპერატურა, ჰაერის ფარდობითი ტენიანობა, ჰაერმიმოცვლა, აირის შემადგენლობა და განათებულობა.

მიუხედავად იმისა, რომ პროდუქტების შენახვის ხარისხზე რეჟიმის სხვადასხვა მაჩვენებლების გავლენა არათანაბარია, ოპტიმალური მაჩვენებლების კვლევა მოითხოვს კომპლექსურ მიდგომას, პროდუქტზე ყველა პარამეტრის ერთდროული ზემოქმედების გათვალისწინებას.

წარმოების დიდი მასშტაბები, პროდუქტების შენახვის მაჩვენებლებზე ხარისხობრივი და რაოდენობრივი პარამეტრებისადმი მუდმივად მზარდი მოთხოვნები გვკარნახობენ არა მარტო ახალი, უფრო სრულყოფილი შენახვის საკნების კონსტრუირების აუცილებლობას, არამედ მათი გაანგარიშების საიმედო მეთოდების შექმნის საჭიროებას. მათემატიკური მოდელირების მეთოდები საშუალებას გვაძლევს სიღრმისეულად შევისწავლოთ პროდუქტის შენახვისას მიმდინარე მექანიკური, მასაცვლითი, თბური და ბიოქიმიური პროცესები; მათი გავლენა შესანახი პროდუქტის ხარისხზე და მეცნიერულად მივუდგეთ ამა თუ იმ პროდუქტის შენახვის ოპტიმალური პირობების განსაზღვრას. ამიტომ, მათემატიკური მოდელირების და ოპტიმიზაციის მეთოდი წარმოადგენს ყველაზე ეფექტურ მიდგომას საკვები პროდუქტების შემნახველი საკნების გაანგარიშება-

დაპროექტებისადმი, რომლის საშუალებით შესაძლებელია გამოვავლინოთ აუცილებელი კანონზომიერებები და გამოვიკვლიოთ კონსტრუქციული და რეჟიმული პარამეტრები კომპიუტერული ტექნიკის საშუალებებით.

**სადისერტაციო კვლევის მიზანს** წარმოადგენს მცენარეული კვების პროდუქტების რეგულირებად აიროვან გარემოში იძულებითი ვენტილაციის პირობებში შენახვის არასტაციონალური მათემატიკური მოდელის შექმნა და მის საფუძველზე შემნახველი საკნის რეგულირებადი რეჟიმული და კონსტრუქციული პარამეტრების რაციონალური მნიშვნელობების განსაზღვრა.

დასახული ამოცანის მისაღწევად აუცილებელია გადავწყვიტოთ შემდეგი ამოცანები:

1. მცენარეული კვების პროდუქტების შენახვის არსებული მეთოდების, კერძოდ, რეგულირებად აიროვან გარემოში შენახვის ანალიზი.
2. მცენარეული კვების პროდუქტების შენახვის მათემატიკური მოდელის დამუშავება.
3. მათემატიკური მოდელის რეალიზაციისათვის რიცხვითი ალგორითმის და ფორტრან–პროგრამის დამუშავება. გამოთვლითი ექსპერიმენტების ჩატარება სხვადასხვა რეჟიმული და კონსტრუქციული პარამეტრების შენახვის პროცესის ხარისხობრივ მაჩვენებლებზე გავლენის დასადგენად.
4. შემნახველი საკნის რაციონალური კონსტრუქციული და რეჟიმული პარამეტრების განსაზღვრა.

**კვლევის მეთოდები და მათი შედეგების სინამდვილის დასაბუთება.** ნაშრომში გამოყენებულია მექანიკის, ტბო და მასაცვლის ამოცანების გადაწყვეტის მათემატიკური მეთოდები: მექანიკის და თბოგადაცემის ზოგადი კანონების და პრინციპების საფუძველზე მოცემულია ამოცანების მათემატიკური დასმა, რომლის ამოხსნისათვის გამოიყენებოდა რიცხვითი მეთოდები კომპიუტერული ტექნიკის გამოყენებით.

ხდებოდა თეორიული კვლევების შედეგების შედარება ცნობილ ექსპერიმენტალურ მონაცემებთან.

**სამეცნიერო სიახლე.** ნაშრომის სამეცნიერო სიახლე განპირობებულია როგორც საბოლოო შედეგებით, ასევე დასმული ამოცანების გადაწყვეტისადმი მიდგომებით:

- პერსონალური კომპიუტერისთვის გამოყენებითი ფორტრან–პროგრამების

პაკეტის სახით პირველად იქნა დამუშავებული და რეალიზებული მცენარეული კვების პროდუქტების შენახვის მათემატიკური მოდელი.

- გამოთვლითი ექსპერიმენტის საფუძველზე გამოკვლეულია შემნახველი საკნის რეჟიმული და კონსტრუქციული პარამეტრების გავლენა მცენარეული პროდუქტების შენახვის მაჩვენებლებზე.
- დამუშავებულია შემნახველი საკნის რაციონალური კონსტრუქციული და რეჟიმული პარამეტრების განსაზღვრის ახალი მეთოდიკა, რომელიც მოიცავს ოპტიმიზაციის ამოცანის დასმას და ამოხსნას, შენახვის პროცესის მათემატიკური მოდელის გამოყენებით.

**პრაქტიკული მნიშვნელობა.** ნაშრომის შედეგების გამოყენება საშუალებას იძლევა მეცნიერული დასაბუთებით მივუდგეთ შემნახველი საკნის რეჟიმული და კონსტრუქციული პარამეტრების შერჩევას, და ვუზრუნველყოთ მცენარეული კვების პროდუქტების შენახვის საუკეთესო მაჩვენებლები.

პროგრამების პაკეტი შეიძლება იყოს გამოყენებული ახალი შემნახველი საკნების დაგეგმარებისას.

**აპრობაცია.** სადისერტაციო სამუშაოს ძირითადი დებულებები მოხსენიებული და გარჩეული იყო:

– ქუთაისის ტექნიკური უნივერსიტეტის კვებისა და ქიმიური წარმოების ტექნოლოგიური აღჭურვილობის კათედრის სამეცნიერო სემინარებზე (2001, 2002, 2003 წწ.);

– რესპუბლიკური სამეცნიერო-პრაქტიკული კონფერენციაზე: „გამოყენებითი ქიმიისა და ტექნოლოგიების თანამედროვე მიღწევები“ (2009 წ.);

– საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენციაზე: „სურსათის უვნებლობის პრობლემები“ (2009 წ.).

– ივ. ჯავახიშვილის სახელობის თბილისის სახელმწიფო უნივერსიტეტის ილია ვეკუას სახელობის გამოყენებითი მათემატიკის სემინარი (2010 წ.)

**ნაშრომის პუბლიკაცია.** დისერტაციის თემაზე გამოქვეყნებულია 6 ნაშრომი.

**დისერტაციის მოცულობა და სტრუქტურა.** დისერტაცია შედგება შესავალისაგან, 4 თავისაგან, ძირითადი დასკვნებისგან და ლიტერატურის ჩამონათვლისგან, რომელიც მოიცავს 114 დასახელებას. ნაშრომი მოიცავს კომპიუტერზე აკრებილი ტექსტის 114 გვერდს და 45 სურათს.

## თავი 1. საკვები პროდუქტების შენახვა.

### სადისერტაციო კვლევების მიზნები და ამოცანები

#### 1.1. ზოგიერთი საკვები პროდუქტების შენახვის ხერხები და რეჟიმები

კვების მრეწველობის დარგთა შორის მნიშვნელოვანი ადგილი უჭირავს კვების პროდუქტების შენახვას, რომელიც საშუალებას გვაძლევს მომხმარებელი მოვამარაგოთ ხარისხიანი პროდუქტებით მთელი წლის განმავლობაში. საქართველო წარმოადგენს ქვეყანას, რომლისთვისაც სოფლის მეურნეობა ყოველთვის იქნება სტრატეგიული დარგი, ამიტომ კვების პროდუქტების ექსპორტზე გატანა და მასთან დაკავშირებული მათი ხანგრძლივი და ხარისხიანი შენახვა ჩვენი ქვეყნისათვის ძალზე მნიშვნელოვანია.

მცენარეული კვების პროდუქტების შენახვას აქვს დამატებითი სირთულეები სხვა პროდუქტებთან შედარებით, რაც გამოწვეულია მთელი რიგი მიზეზებით. პირველ რიგში მცენარეული პროდუქცია წარმოადგენს ცოცხალ ორგანიზმს, რომელიც შენახვის დროს აგრძელებს სიცოცხლეს, და ყველა ფიზიოლოგიური პროცესი მიმდინარეობს მანამ, სანამ მცენარე არ მოკვდება. ასეთი პროცესებია, პირველ რიგში სუნთქვა და წყლის აორთქლება. შენახვის სირთულეს წარმოადგენს ის, რომ სხვადასხვა გზით ეს პროცესები ხელოვნურად უნდა დავაყოვნოთ, რადგან მათ შედეგად ვღებულობთ მასის დანაკარგებს. მეორეს მხრივ ამ პროცესების სრული შეჩერება იწვევს მცენარის სიკვდილს, და მისი კვებითი ღირებულება მკვეთრად მცირდება. ამიტომაც უნდა იყოს შექმნილი ისეთი პირობები (აიროვანი გარემო, ტემპერატურა, წნევა, ტენიანობა, განათებულობა), რომ მცენარემ სიცოცხლისუნარიანობა არ დაკარგოს, მაგრამ ფიზიოლოგიური პროცესები მიმდინარეობდეს დასაშვებად მინიმალური სიჩქარით.

კიდევ ერთ მნიშვნელოვან სირთულეს წარმოადგენს ის, რომ ხილი და ბოსტნეული ძალზე მგრძობიარეა მექანიკური დაზიანებების, მავნებლების და მავნე მიკროორგანიზმების მიმართ. მავნებლებთან და მავნე მიკროორგანიზმებთან ბრძოლა მოითხოვს მაღალ ტემპერატურიან თბურ და ქიმიურ დამუშავებას. მაგრამ ეს ძალზე უარყოფითად მოქმედებს პროდუქციის ხარისხზე.

ხილბოსტნეულის შენახვის თანამედროვე პრაქტიკა და გამოცდილება გვაძლევს

პროდუქციის შენახვის მრავალ მეთოდს, დაწყებული ყველაზე მარტივი მეთოდით, რომელიც არ მოითხოვს მნიშვნელოვან სახსრებს და ფულად დანახარჯებს, დამთავრებული ყველაზე რთულით, რომელიც მოიცავს შენახვის რეჟიმების ავტომატიზირებულ რეგულირებას.

ხილისა და ბოსტნეულის შენახვის ყველაზე მისაღები ხერხის ამორჩევისას ითვალისწინებენ ეკონომიურ ეფექტურობას, შენახვის აუცილებელ ვადებს, მატერიალურ-ტექნიკური ბაზის არსებობას და სხვა. ამა თუ იმ მეთოდის მეცნიერულად დასაბუთებული არჩევანისათვის აუცილებელია თითოეული მათგანის შესაძლებლობების, ძლიერი და სუსტი მხარეების ცოდნა.

ხილისა და ბოსტნეულის შენახვის მეთოდების კლასიფიკაცია შესაძლებელია პროდუქციის განლაგების ხერხის მიხედვით. მაგრამ ამ დროს აუცილებლად უნდა გავითვალისწინოთ შენახვის რეჟიმის რეგულირების ხერხები, რომლებიც შეიძლება შეიცვალონ პროდუქციის განლაგების მიხედვით.

ქვემოთ მოყვანილი (ცხრილი) ხილისა და ბოსტნეულის შენახვის მეთოდების კლასიფიკაცია საშუალებას გვაძლევს განვახორციელოთ კომპლექსური მიდგომა განლაგების და შენახვის რეჟიმის რეგულირების ხერხების გათვალისწინებით.

ცხრილი

განლაგების ხერხები	შენახვის რეჟიმის რეგულირების ხერხი		
	ტემპერატურის	ვენტილაციის	აიროვანი გარემოს
1	2	3	4
უტარო შენახვა			
1. გროვებად ან ტრანშეებში	გაცივების გარეშე	ბუნებრივი	მაგ (CO <sub>2</sub> -ის დაგროვება)
2. გროვებად ან ტრანშეებში	გაცივების გარეშე	აქტიური	ნაგ
3. საცავის გარეშე	»	აქტიური	ნაგ
4. საცავის გარეშე	გაცივებით	»	»
5. სელექციური	გაცივების გარეშე	აქტიური	»
6. სელექციური	გაცივებით	აქტიური	»



1	2	3	4
7. სტელაჟური	გაცივების გარეშე	ბუნებრივი	»
შენახვა ტარაში			
1. კონტეინერული	გაცივების გარეშე	ბუნებრივი	»
2. კონტეინერული	გაცივების გარეშე	აქტიური	»
3. »	»	ზოგადცვლა დი	»
4. »	გაცივებით	ზოგადცვლა დი	»
5. »	გაცივებით	აქტიური	»
6. »	»	ზოგადცვლა დი	რაგ ან ნაგ
7. მცირეგაბარიტიან ხის ტარაში	»	ბუნებრივი	ნაგ
8. მცირეგაბარიტიან ხის ტარაში	გაცივების გარეშე	ზოგადცვლა დი	»
9. »	გაცივებით	ზოგადცვლა დი	»
10. »	»	ზოგადცვლა დი	რაგ
11. რბილ ტარაში	გაცივების გარეშე	ბუნებრივი	ნაგ
12. ქსოვილის ტომრებში	გაცივებით	ზოგადცვლა დი	»
13. პოლიეთილენის ტომრებში	გაცივებით	ზოგადცვლა დი	ნაგ

შენიშვნა: ნაგ – ნორმალური აიროვანი გარემო (21% ჟანგბადი და 0,03% ნახშირორჟანგი); რაგ – რეგულირებადი აიროვანი გარემო; მაგ – მოდიფიცირებული აიროვანი გარემო.

ნაჩვენები მეთოდები შეგვიძლია გამოვიყენოთ ხილისა და ბოსტნეულის სხვადასხვა სახეობის შენახვისას, მაგრამ ერთი სახეობისათვის ყველაზე

ეკონომიურია შენახვის ერთი ფორმა, სხვა სახეობისათვის კი – სხვა. უტარო შენახვა, გაცივებით და გაცივების გარეშე, როგორც წესი გამოიყენება იმ ბოსტნეულისათვის, რომლებსაც აქვს დიდი მექანიკური მდგრადობა და დაბალი ღირებულება (კარტოფილი, ჭარხალი, კომბოსტო, საზამთრო, ნესვი და სხვა), მაგრამ ის მიუღებელია მექანიკურად არამდგრადი ხილისა და ბოსტნეულისათვის. ტარაზე დამატებითი დანახარჯის არქონა ამცირებს პროდუქციის თვითღირებულებას, რაც ძალზე მნიშვნელოვანია იაფფასიანი ბოსტნეულისათვის, რომლის ფასი შენახვისას არ იცვლება, ან იზრდება უმნიშვნელოდ.

პროდუქტის უტარო შენახვის დამახასიათებელ ნიშანს წარმოადგენს მისი შენახვა ან უმარტივესი ხერხებით (გროვეში ან ტრანშეებში), ან არასტაციონალურ საცავებში, სადაც პროდუქცია განთავსებულია სექციებში, სტელაჟებში ან იკავებს საცავის მთელ მოცულობას.

შენახვა ტარაში შეიძლება იყოს გამოყენებული ყველა სახის ხილისთვის და ბოსტნეულისათვის, მაგრამ იაფფასიანი ბოსტნეულისათვის, განსაკუთრებით ხანმოკლე შენახვისას, ტარის ღირებულება, ჩატვირთვა–გადმოტვირთვის სამუშაოებზე დანახარჯები ზრდიან შენახვის ფასს.

შენახვის რეჟიმებს განასხვავებენ სასარგებლო ფართის გამოყენების კოეფიციენტით, პროდუქციის შენახვის კოეფიციენტით, შენახვის რეჟიმების რეგულირების და კონტროლის შესაძლებლობით, ხარისხზე მიმდინარე კონტროლის და ხარისხის გაუარესების შემთხვევაში ოპერატიული რეაგირების საშუალებით.

სასარგებლო ფართი ყველაზე ეფექტურად გამოიყენება პროდუქციის განთავსებისას გროვეებში და ტრანშეებში. ასე, მაგალითად, მოცულობის გამოყენების კოეფიციენტი გროვეებში შენახვისას შეადგენს 0,55–0,6, იმის მიხედვით ვენტილაციის თუ რა ხერხია გამოყენებული.

მაგრამ ტარაში შენახვის რიგი მეთოდებისათვის სასარგებლო ფართის გამოყენების კოეფიციენტი არის უფრო მაღალი, ვიდრე ზოგიერთი უტარო მოდელისათვის. მაგალითად სტელაჟური შენახვის დროს ის იზრდება სასაზღვრო დასაშვები დატვირთვის მაღალი სიმაღლის ხარჯზე, ასეთი კონტეინერული განთავსებისას პროდუქციის სიმაღლე აღწევს 3,5–5 მ, ხოლო ყუთებისათვის – 3,2 მ–დე.

რეჟიმის რეგულირების სხვადასხვა ხერხის გამოყენება გავლენას ახდენს

შენახვის დანახარჯებზე. შენახვის მეთოდები ხელოვნურად გაცივების, აქტიური და ზოგადცვლადი იძულებითი ვენტილაციის, რეგულირებადი აიროვანი გარემოს გამოყენებით მოითხოვენ შენახვაზე დამატებით დანახარჯებს და მიზანშეწონილი არის მხოლოდ იმ შემთხვევაში თუ ეს დანახარჯები ანაზღაურდება დანაკარგების შემცირებით ან შენახვის ვადის გაზრდით. შესაძლებელია აგრეთვე შენახვის ვადის მიხედვით დიფერენცირებული ფასის შემოყვანა, რაც საშუალებას მოგვცემდა დამატებითი დანახარჯები თავიდან ავიცილოთ.

ამასთან ერთად ხილისა და ბოსტნეულის მოკლევადიანი შენახვის რეჟიმის ხელოვნური რეგულირების ხერხების გამოყენება რიგ შემთხვევაში ეკონომიურად მიზანშეწონილი არ არის. მაგალითად, შენახვა საცავებში და მოდიფიცირებული აიროვანი გარემოთი არაა მომგებიანი პროდუქციისათვის, რომლის რეალიზება უნდა მოხდეს პირველი ოთხი თვის განმავლობაში.

ხილბოსტნეულის პროდუქციის შენახვის ეკონომიური ეფექტიანობა განისაზღვრება არა მარტო განლაგების და რეჟიმის რეგულირების ხერხებით, არამედ საცავების ტიპით.

დანიშნულების და განთავსებული პროდუქციის სახეობის მიხედვით გამოყოფენ კარტოფილის, კომბოსტოს, ხახვის, ბოსტნეულისა და ხილის საცავებს. დიდ საცავებში აწყობენ ცალკეულ საკნებს და სექციებს, რომლებშიც იქმნება შენახვის განსხვავებული რეჟიმი და განთავსდება სხვადასხვა დასახელების პროდუქცია. უმეტესად ასეთი კომპლექსები აღჭურვილი არიან ტემპერატურული რეჟიმის რეგულირების საშუალებებით, რომლებიც საშუალებას მოგვცემენ პროდუქციის ყოველი სახეობისათვის შეიქმნას ოპტიმალური რეჟიმი.

დღესდღეობით დამუშავებულია საცავების სახეობების დიდი რაოდენობა, რომლებიც განსხვავდებიან არა მარტო დანიშნულებით და განლაგების ხერხით, არამედ მოცულობითაც: მცირე (25 ტ–მდე), საშუალო მოცულობის (100ტ–მდე), მსხვილი (100ტ–ზე მეტი); სირთულეების რაოდენობით: ერთსართულიანი მიწისზედა და ჩაღრმავებული, ერთსართულიანი სარდაფით და მრავალსართულიანი.

საცავის არჩევა სწარმოებს სხვადასხვა სახის ხილისა და ბოსტნეულისათვის სასაწყობო ფართის მოთხოვნილების, მშენებლობის რაიონის და ადგილმდებარეობის რელიეფის ბუნება–კლიმატური და ჰიდროლოგიური თავისებურებების მიხედვით.

ჩამოთვლილი სახეობებიდან თითოეულს აქვს თავისი ტექნოლოგიური თავისებურებები. მიწისზედა საცავებში უფრო ადვილია განვახორციელოთ სასაქონლო პროდუქციის გადატვირთვა–გადმოტვირთვის სამუშაოების მექანიზაცია, მაგრამ უფრო რთულია დავიცვათ შენახვის სტაბილური რეჟიმი. ზამთრის პერიოდში შესაძლებელია პროდუქციის და კედლების მოყინვა. ამის თავიდან აცილების მიზნით საჭიროა თბოიზოლაციის ფენის გაზრდა რაც აძვირებს მშენებლობას.

ჩაღრმავებულ საცავებში იქმნება და ნარჩუნდება ოპტიმალური ტემპერატურისა და ტენიანბის რეჟიმი თბოიზოლაციის უფრო ნაკლები სისქით, ვიდრე მიწისზედა საცავებში, რადგან მიწას აქვს მცირე თბოგამტარობა. მაგრამ ჩაღრმავებული ან სარდაფიანი საცავების მშენებლობა მოითხოვს უფრო საიმედო ჰიდროიზოლაციას, რათა არ მოხდეს საცავში ნიადაგის, წვიმის ან თოვლის დნობის შედეგად წყლის შეღწევა.

მსხვილი საწარმოები უფრო ეკონომიურია ვიდრე მცირე, რადგან სასარგებლო ფართის ერთეულებზე გაანგარიშებით მშენებლობის დანახარჯები უფრო მცირეა. ამავდროულად დიდი ტევადობის საცავები აუცილებლად უნდა იყვნენ აღჭურვილი რეჟიმის ხელოვნური რეგულირების საშუალებებით (გაცივება, იძულებითი ვენტილაცია). მწარმოებლურ დანახარჯებს ანაზღაურებენ პროდუქციის დანაკარგების შემცირებით.

მრავალსართულიანი საცავები საშუალებას გვაძლევენ გავზარდოთ სასაწყობო მოცულობა, შეზღუდული მიწის რესურსების დროს, მათი მშენებლობა უფრო იაფია, მაგრამ რთულდება ჩატვირთვა–გადმოტვირთვის სამუშაოები, განსაკუთრებით ეს ვლინდება მოკრეფვის სეზონის პიკურ პერიოდში, რადგან მუშაობის ფრონტი არის ძალზე მცირე. გარდა ამისა საჭიროა ამავე–სატრანსპორტო მოწყობილობების დაყენება (ლიფტები, ტრანსპორტიორები და ა.შ.) და მათი გამართული მწყობრი მუშაობა. მრავალსართულიან მიწისზედა საცავებში აუცილებლად უნდა გამოვიყენოთ თბოიზოლაციის დიდი სისქე. როგორც გამოკვლევებმა გვიჩვენეს სართულების რაოდენობა არ ახდენს არსებით გავლენას ტემპერატურულ რეჟიმებზე და პროდუქციის შენახვაზე.

გარდა ზემოდ მოყვანილი კლასიფიკაციისა, რომელსაც საფუძვლად უდევს პროდუქციის განლაგების და შენახვის რეჟიმის რეგულირების ხერხები, არსებობს კიდევ მეთოდების ჯგუფი, რომლებიც ეფუძვნება პროდუქციის ზედაპირის

დამუშავებას დეზინფექციური საშუალებებით, დამცავი აფსკებით, დამცავი ნივთიერებებით.

პროდუქციის დამუშავების მიხედვით შენახვის მეთოდები იყოფა სამ ჯგუფად:

- დეზინფიცირების მეთოდები – დამუშავება გოგირდის ანჰიდრიდით და მისი პრეპარატებით – კალიუმის მეტაბისულფიდი, ფორმალდეჰიდით, ბრომული მეთოდით, ქლორის წყლით და პრეპარატებით, ოზონირება, ულტრაიისფერი სხივებით დამუშავება და ა.შ.;
- ზედაპირის დამცავი აფსკებით დამუშავების მეთოდები – ეს კეთდება წყლის ჭარბი აორთქლების თავიდან აცილების მიზნით, მიკროორგანიზმებით დაზიანების საწინააღმდეგო ან უკეთესი სასაქონლო სახის მისაღებად (ნიორის პარაფინირება, ვაშლისა და წყლის დამუშავება პროტექსანით და შეფერილი ცვილით);
- ზრდის დაყოვნების მეთოდები – ჰიდრელთი და ეტრელით კარტოფილის დამუშავება, მალეინის მჟავის ჰიდრაზიდით კარტოფილის და სტაფილოს დამუშავება, რადურიზაცია –  $\text{Co}^{60}$ -ის სხივებით დამუშავება და სხვა.

## 1.2. შენახვის დროს მიმდინარე ბიოლოგიური და მიკრობიოლოგიური მოვლენები

საქართველოში სოფლის მოსახლეობის მიერ დაგროვილია ხილისა და ბოსტნეულის ხარისხიანი შენახვის გარკვეული გამოცდილება, მაგრამ არსებობს მთელი რიგი პრობლემები (შედარებით დიდი დანაკარგი, ხარისხის არასტაბილურობა, რომელიც დაკავშირებულია გარემოს პირობების, კლიმატის შეცვლასთან და შენახვის ხერხის თავისებურებასთან, შენახვის შედარებით მაღალი ღირებულება, ფიზიკური შრომის დიდი დანახარჯები და ა.შ.). ამ პრობლემების გადაწყვეტა მოითხოვს მეცნიერულ მიდგომას.

ხარისხის არასტაბილურობის მიზეზი შეიძლება იყოს , როგორც კლიმატური პირობები, ასევე შენახვის თავისებურება. ეს უმეტეს შემთხვევაში გამოწვეულია იმით, რომ ფიზიოლოგიური პროცესების სიჩქარე ტემპერატურის გამოყოფით მიმდინარეობს, პროდუქციის თვითგახურება, ხოლო სითბოს ართმევა მასის სიღრმიდან დამატებით დანახარჯებს მოითხოვს.

ამ დანახარჯების შემცირებისათვის საჭიროა მეცნიერული მიდგომა. მოცემულ ნაშრომში მოყვანილია შენახვის სხვადასხვა მეთოდების ზოგადი განხილვა, მათი შედარება და ანალიზი. აგრეთვე შეფასებულია სირთულეები რომლებიც თავს იჩენენ ამა თუ იმ მეთოდით მცენარეული კვების პროდუქტების შენახვისას.

ხილისა და ბოსტნეულის მასის კლებადობის წარმოქმნის მიზეზებს წარმოადგენენ ბუნებრივი პროცესები, რომლებიც ახასიათებს ცოცხალ ორგანიზმს: წყლის აორთქლება და სუნთქვა. რომლის დროსაც იხარჯება წყლის და მშრალი ნივთიერების მარაგი. ამიტომაც ასეთ მოვლენას უწოდებენ ბუნებრივ კლებადობას.

ბუნებრივი კლებადობის ძირითადი ნაწილი (70–90%) მოდის წყლის აორთქლებაზე, ამიტომაც ხილისა და ბოსტნეულის შენახვისას მცირდება წყლის შემადგენლობა და შესაბამისად შედარებით იზრდება მშრალი ნივთიერების შემადგენლობა. მაგრამ განსაზღვრულ პირობებში სუნთქვაზე შეიძლება გაიზარდოს მშრალი ნივთიერების დანახარჯების წილი (50%–მდე და მეტი) ტენიანობის მინიმალური დანახარჯებით.

ფაქტორები, რომლებიც გავლენას ახდენს წყლის აორთქლებისა და სუნთქვის ინტენსიურობაზე, განსაზღვრავენ მასის ბუნებრივი კლებადობის სიდიდეს. მათ ჰყოფენ ბიოლოგიურ, ანუ შიგა ფაქტორებად, და ტექნოლოგიურ, ანუ გარე ფაქტორებად.

ბუნებრივი კლებადობის სიდიდეზე გავლენის მქონე ბიოლოგიურ ფაქტორებს მიაკუთვნებენ ხილისა და ბოსტნეულის სტრუქტურას და ქიმიურ შემადგენლობას, მათ ფიზიოლოგიურ მდგომარეობას, მექანიკური ზეგავლენით, მავნებლებით და ავადმყოფობებით, მიყენებული დაზიანებების არსებობას. ეს ფაქტორები თავის მხრივ განპირობებულია ხილისა და ბოსტნეულის სახეობებისა და ხარისხის თავისებურებებით, მოყვანისა და კრეფვის პირობებით, არასასურველი გარემო პირობებისადმი ბუნებრივი მდგრადობით, მექანიკური დაზიანების შეხორცების უნარის ჩათვლით.

მცენარის სუნთქვის აქტივობა არ არის მუდმივი, ის კანონზომიერად იცვლება ორგანიზმის განვითარებასთან ერთად. გარემოს ცვლადი პირობების შესაბამისად, სუნთქვის ყველაზე მაღალ ენერგიას ფლობენ ახალგაზრდა მცენარეები და ის ქსოვილები, რომლებიც იმყოფებიან აქტიური ზრდის მდგომარეობაში.

სუნთქვის ინტენსიურობაზე გავლენას ახდენს აგრეთვე ხილისა და

ბოსტნეულის ანატომიური და მორფოლოგიური აგებულება. ახალგაზრდა უჯრედები, და აგრეთვე არასრულყოფილად ფორმირებული ქსოვილები, რომლებიც შეიცავენ მიტოქონდრიების დიდ რაოდენობას, გამოირჩევიან უფრო ინტენსიური სუნთქვით. ამიტომ აკრეფვის შემდეგ პირველ პერიოდში სუნთქვის ინტენსიურობა მაქსიმალურად მაღალია პროდუქტებში, რომლის ქსოვილები ბოლომდე არ არის ფორმირებული. შემდგომი შენახვისას ის ნელნელა მცირდება. ეს გამოწვეულია მიტოქონდრიების ნაწილობრივი განადგურებით და ზედაპირული ქსოვილების გასქელებით. ზედაპირული ქსოვილების სტრუქტურის და დამცავი ფენების აგებულების ცვლილება ართულებს ჰაერცვლას, და ამცირებს სუნთქვის ინტენსიურობის და მშრალი ნივთიერების დანაკარგებს.

ხილისა და ბოსტნეულის გადამწიფებისას სუნთქვის ინტენსიურობა მცირდება, რაც დაკავშირებულია სიცოცხლისუნარიანი უჯრედების რაოდენობის შემცირებასთან და მიტოქონდრიების ნაწილის განადგურებასთან.

ხილისა და ბოსტნეულის აგებულება წარმოადგენს მათი სახეობის და ხარისხის ნიშანთვისებას. ნაყოფები, რომლის აგებულების თავისებურებას წარმოადგენს თხელი კანის ქსოვილები, რომლებსაც დიდი რაოდენობის სასუნთქე არხები აქვს, უფრო ინტენსიურად კარგავენ ტენს. მათ რიცხვს მიეკუთვნება მრავალი კენკრა, მწვანელი, ბევრი ბოსტნეული, ბოლქვები.

კანის ქსოვილების მდგომარეობა განისაზღვრება არა მარტო მცენარის სახეობითა და ხარისხით, არამედ მათი მოყვანის პირობებით და სიმწიფის დონით.

ხილი და ბოსტნეული, რომლებიც იზრდებოდნენ ცივი და წვიმიანი ზაფხულის პირობებში, როგორც წესი, ნაკლებად ჩამოყალიბებული არის და მათი კანის ქსოვილები უფრო თხელია. უმეტესწილად ეს დაკავშირებულია მათი სიმწიფის ხარისხთან. ასეთი ნაყოფის დამწიფების პერიოდი ყოვნდება, კანის ქსოვილები არასრულყოფილად არის ფორმირებული. ამას მივყავართ იმასთან, რომ წყლის აორთქლებისაგან მასის დანაკარგები საგრძნობლად იზრდება. აქ თავის გავლენას თამაშობს აგრეთვე კარგი წყალმომარაგების პირობებში გაზრდილი ხილისა და ბოსტნეულის ნაყოფების ქსოვილებში ჭარბი ტენიანობა.

წყლის დანაკარგების სიდიდეზე აგრეთვე დიდ გავლენას ახდენს ხილისა და ბოსტნეულის ქიმიური შემადგენლობა, რომელიც, თავის მხვრივ, დამოკიდებულია წყლის რაოდენობრივ, ხარისხობრივ, ნაყოფის ქსოვილების წყალდამჭერ თვისებებზე.

აორთქლების ინტენსიურობა დამოკიდებულია, პირველ რიგში, წყლის საერთო შემცველობაზე, ამიტომ ხილი და ბოსტნეული შეგვიძლია დავყოთ სამ ჯგუფად:

პირველ ჯგუფს მიეკუთვნება ის ხილი და ბოსტნეული, რომელშიც წყლის შემცველობა აღწევს 90–96%-ს. ასეთია კიტრი, მწვანელი, პარკოსანი და ტომატი, ზოგი კულტურული და ველური კენკრა და ა.შ. ამ ჯგუფისათვის დამახასიათებელია წყლის მაღალი დანაკარგი მასის ამალღებული ბუნებრივი კლებადობა (I ზონისათვის – 1,0–1,8%-ს თვეში).

მეორე ჯგუფის ხილი და ბოსტნეული შეიცავს 80–89% წყალს. ასეთია კომბოსტო, ბოლქვები, ხახვი, ნესვი, საზამთრო, თესლოვანი, კურკოვანი და ციტრუსოვანი ნაყოფები, ყურძენი. წყლის საშუალო შემცველობას შეესაბამება, როგორც წესი წყლის საშუალო დანაკარგი და მასის ზომიერი ბუნებრივი კლებადობა (0,6–1,2).

მესამე ჯგუფი მრავალრიცხოვანია და მოიცავს ხილსა და ბოსტნეულს შედარებით დაბალი წყლის შემცველობით (63–79%), მას მიეკუთვნება კარტოფილი, ნიორი, ზოგიერთი ჯიშის ყურძენი. ამავე ჯგუფში შედის თხილი. მიუხედავად იმისა, რომ მათში წყლის შემცველობა მხოლოდ 10–12%, ცხიმის დიდი შემცველობის გათვალისწინებით წყალი იმყოფება მისგან იზოლირებულ მდგომარეობაში და ცხიმის მასის გაუთვალისწინებლად შეადგენს 75–80%.

მესამე ჯგუფში შემავალი ხილსა და ბოსტნეულს ახასიათებს წყლის და მასის ყველაზე დაბალი დანაკარგი (0,5–0,8%).

ხილისა და ბოსტნეულის მოყვანილი დაყოფა პირობითია, რადგან წყლის დანაკარგის სიდიდე დამოკიდებულია არა მარტო მის საერთო შემცველობაზე, არამედ თავისუფალი წყლის რაოდენობაზე და წყალდამჭერი ნივთიერების არსებობაზე. მიახლოებითი ორიენტაციისათვის შესაძლებელია გამოვიყენოთ ასეთი კლასიფიკაცია, მითუმეტეს თუ გავითვალისწინებთ, რომ წყლის საერთო რაოდენობის დაახლოებით 75–85% მოდის თავისუფალ წყალზე.

სხვადასხვა სახის დაზიანებები გამოწვეული, როგორც მექანიკური ზეგავლენით, ასევე სოფლის მეურნეობის მავნებლებით და ავადმყოფობით, ახდენენ არსებით გავლენას არა მარტო წყლის აორთქლების ინტენსიურობაზე, არამედ სუნთქვისას მშრალი ნივთიერების ხარჯვაზე. ეს გამოწვეულია ორი მიზეზით.

პირველი – მრავალი დაზიანება გულისხმობს ზედაპირული ქსოვილების ერთიანობის დარღვევას, რის შედეგად ძლიერდება წყლის აორთქლება



უჯრედებიდან და რიგ შემთხვევაში შეხორცება იწყება დაზიანებული ზედაპირის გახმობით. ხოლო სუნთქვის ინტენსიურობას ზრდის ჟანგბადის ღია მიმოსვლა დაზიანებულ ქსოვილებში.

მეორე – მცენარის ქსოვილებში, რომლებიც ჭრილობასთან ახლოს იმყოფებიან, იქმნება ნორმალურისაგან განსხვავებული პირობები: ტენიანობის დეფიციტი და ჟანგბადის ჭარბი რაოდენობა, რაც, როგორც ჩანს წარმოადგენს თავისებურ სიგნალს დამცავი რეაქციების ჩართვაზე, რათა დაიწყოს დაზიანებული ზედაპირის შეხორცება და ქსოვილების სტრუქტურის აღდგენა. დამცველი ხასიათის ნივთიერებების სინთეზისათვის აუცილებელია დამატებითი ენერგია, რომელიც გამოიყოფა სუნთქვის პროცესში.

სოფლის მეურნეობის მავნებლებით ან დაავადებებით გამოწვეული დაზიანებები პრინციპულად განსხვავდებიან მექანიკური ზეგავლენით გამოწვეული დაზიანებისაგან, მაგრამ მათ აქვთ ბევრი საერთოც. განსხვავებები მდგომარეობს ძირითადად დაზიანებული ზედაპირის ხასიათში და აგრეთვე მასის ნაწილის დანაკარგში, ცხოველების ან მწერების მიერ შეჭმული ნაწილი პროდუქციის ხარჯზე. მაგრამ დანაკარგების ეს სახეობა არ მიეკუთვნება მასის ბუნებრივ კლებადობას და ეკუთვნის აქტიურ დანაკარგებს.

ტექნოლოგიური ფაქტორები განსაზღვრავენ მასის ბუნებრივი კლებადობის სიდიდეს. მათ რიცხვს მიეკუთვნება შენახვის რეჟიმი და პროდუქციის განლაგება საცავებში. წყლის დანაკარგების სიდიდეზე გავლენას ახდენს ჰაერის ფარდობითი ტენიანობა და ტემპერატურა, რომლებიც განსაზღვრავენ გარემოში ჰაერში წყლის ორთქლის დეფიციტს, ხოლო სუნთქვის ინტენსიურობაზე გავლენას ახდენს ტემპერატურა და აიროვანი გარემოს შემადგენლობა.

ჰაერში ტენის დეფიციტი და წყლის ორთქლის პარციალური წნევების სხვაობა ჰაერში და პროდუქტის ზედაპირზე განაპირობებს ნაყოფიდან აორთქლებული წყლის ართმევის სიჩქარეს. პროდუქტის ზედაპირიდან წყლის ორთქლის მოცილება სტიმულირებას უკეთებს წყლის აორთქლებას ზედაპირის ქსოვილების გავლით.

მასის ბუნებრივი კლებადობის სიდიდეზე გავლენას ახდენს აგრეთვე ჰაერმიმოცვლის ექსპოზიცია. ვენტილირების ხანგრძლივობა დამოკიდებულია შენახვის პერიოდზე. ასე, მაგალითად, ის იზრდება შემოდგომის პერიოდში, ხოლო ზამთარში მცირდება. ვენტილაცია საჭიროა მხოლოდ იმისათვის, რომ დავიცვათ

თანაბარი რეჟიმი, მოვაცილოთ ფიზიოლოგიური სითბო და პროდუქტის ცხოველქმედების პროცესში გამოყოფილი წყლის ორთქლი. ჰაერმიმოცვლის ექსპოზიციის გაზრდამ ამ პერიოდში, განსაკუთრებით მაშინ, როცა ჰაერი მუდმივად შრება, შეიძლება გამოიწვიოს მასის ბუნებრივი კლებადობის გაზრდა და პროდუქტის გაფუჭება.

გაცილებით ნაკლებ გავლენას წყლის დაკარგვის სიდიდეზე ახდენს ჰაერის შემადგენლობა და განათებულობა, მაგრამ სრულად მათი ზემოქმედების გამორიცხვა არ შეიძლება. მრავალი მკვლევარის მიერ მიღებული მონაცემები მოწმობს, რეგულირებადი აირის გარემოში ხილისა და ბოსტნეულის შენახვის დროს წყლის დანაკარგების შემცირებაზე. მკვლევარებმა, თავის მხრივ, აჩვენეს, რომ სინათლე ინტერფერენცირებს სიცოცხლის ყველა პროცესს და აჩქარებს წყლის აორთქლებას.

ხილისა და ბოსტნეულის უმრავლესობისათვის არსებობს პირდაპირი დამოკიდებულება სუნთქვის ინტენსიურობასა და შენახვის ტემპერატურას შორის. ტემპერატურის გაზრდისას იზრდება სუნთქვის და წყლის აორთქლების ინტენსიურობა, რის შედეგად იზრდება მასის ბუნებრივი კლებადობა. გამონაკლისს წარმოადგენს კარტოფილი, რომლის სუნთქვის მინიმალური დონე შეესაბამება 4–5°C-ის ტემპერატურას. ტემპერატურის შემცირება იწვევს სუნთქვის ინტენსიურობის გაზრდას.

გარემოს აიროვანი შემადგენლობა მნიშვნელოვან გავლენას ახდენს სუნთქვის ინტენსიურობაზე. ნახშირორჟანგის აირის კონცენტრაციის გაზრდა და ჟანგბადის კონცენტრაციის შემცირება იწვევს სუნთქვის ინტენსიურობის შემცირებას, რის შედეგადაც მცირდება მშრალი ნივთიერების დანახარჯები სუნთქვაზე და მასის ბუნებრივი კლებადობა. ასე, მაგალითად, მ.ფედოროვის მონაცემებით ჰაერმიმოცვლის ფანჯრის მქონე პოლიეთილენის კონტეინერებში შენახული ვაშლის ბუნებრივი კლებადობა შეადგენს 1,5–3,4%, ხოლო საკონტროლოსი კი – 3,6–7,9%, ე.ი. ნორმალურ აიროვან გარემოში 2,5–ჯერ მეტი.

ე.ი. წყლის აორთქლებით და სუნთქვაზე მშრალი ნივთიერების დანახარჯებით გამოწვეული მასის კლებადობის სიდიდე დამოკიდებულია რიგ ფაქტორზე. დანაკარგების შემცირება შესაძლებელია მხოლოდ კომპლექსური მიდგომის გზით, რომელიც ითვალისწინებს ყველა ზემოდ ჩამოთვლილი ფაქტორის პროდუქტზე ერთდროულ ზეგავლენას შენახვის პერიოდში. დანაკარგების შემცირებისათვის

უმთავრეს ზომებია: შესანახად სოფლის მეურნეობის ჯანსაღი პროდუქტის შემოტანა, შენახვის რეჟიმის ოპტიმალური პარამეტრების შექმნა და შენარჩუნება, შენახვის სტანდარტული ვადების დაცვა პროდუქციის ხარისხობრივი მდგომარეობის და მატერიალურ-ტექნიკური ბაზის გათვალისწინებით.

ხილი და ბოსტნეული კრიტიკული დეფექტებით, რომლებიც მას კვებისათვის უვარგისად აქცევენ, მიეკუთვნება აქტიურ დანაკარგებს. შენახვისას აქტიური დანაკარგების გაჩენის მიზეზად შეიძლება ჩავთვალოთ შემდეგი კრიტიკული ფაქტორები: პროდუქციის ნაწილის მექანიკური დაზიანება ან ნაყოფების ნაწილის დაზიანება მავნებლებით, ცხოველებით, ფრინველებით ან მოკრეფვისას, დაუშვებელი მიკრობიოლოგიური და ფიზიოლოგიური დაავადებები.

ამის გარდა აქტიურ დანაკარგებს მიაკუთვნებენ ხილისა და ბოსტნეულის არაკვებით ნაწილებს (ფესვები, ჩანასახები, ქერქი და ა.შ.), მინერალურ (მიწა, ქვები) და ორგანულ (ფოთლები, ჩალა და ა.შ.) მინარევებს, რომლებსაც პროდუქციას აცილებენ რეალიზაციის წინა დამუშავების დროს.

ხილისა და ბოსტნეულის შენახვის პირობებში გულისხმობენ შენახვის რეჟიმს, საცავში განთავსებას და საწყობების, დანაკარგების და ტარის სანიტარულ-ჰიგიენურ მდგომარეობას.

შენახვის პირობები მიეკუთვნება შენახვის გარე, ანუ ტექნიკურ ფაქტორებს. მიუხედავად იმისა, რომ ბიოლოგიური, ანუ შიგა ფაქტორები ხილისა და ბოსტნეულის შენახვის უნარიანობაზე არსებით გავლენას ახდენს, მათი უარყოფითი გავლენა შეიძლება შევასუსტოთ ან თუნდაც მთლიანად გამოვრიცხოთ, თუ შევქმნით შენახვის ოპტიმალურ პირობებს. ამასთან შეუძლებელია ოპტიმალური პირობების შექმნა თუ ვერ გავითვალისწინებთ პროდუქციის თავისებურებებს.

ხილისა და ბოსტნეულის შენახვის უნარიანობაზე გავლენას ახდენს შენახვის პირობების მთელი კომპლექსი, მაგრამ გადამწყვეტი მნიშვნელობა აქვს შენახვის რეჟიმს. შენახვის რეჟიმის რეგულირება მის ოპტიმალურ დონემდე მიყვანის და შემდგომ ამ დონეზე შენარჩუნებისათვის წარმოადგენს ბუნებრივი კლებადობისა და მასის დანაკარგის შემცირებისათვის ქმედით საშუალებას.

შენახვის რეჟიმი ხასიათდება შემდეგი პარამეტრებით: ტემპერატურა, ჰაერის ფარდობითი ტენიანობა, ჰაერმიმოცვლა, აიროვანი გარემოს შემადგენლობა და განათებულობა. შენახვის დროს სხვადასხვა მაჩვენებლის პროდუქციის ხარისხზე

ზემოქმედების დონე არ არის ერთნაირი.

შენახვის ტემპერატურა ახდენს მნიშვნელოვან გავლენას მასის კლებადობაზე და ლპობისაგან დანაკარგებზე. მაღალი ტემპერატურის დროს შენახვისას იზრდება წყლის აორთქლების და სუნთქვის ინტენსიურობა, აგრეთვე გაძლიერებულად მრავლდებიან მიკროორგანიზმები. მაგრამ ხილისა და ბოსტნეულის შენახვის დროს ტემპერატურის შემცირება უსაზღვროდ არ შეიძლება. ქვედა დონე განსაზღვრულია ტემპერატურებით, რომლებიც იწვევს ნაყოფების გაყინვას ან ფუნქციონალურ მოშლილობას. ხილისა და ბოსტნეულის უმრავლესობის გაყინვის ტემპერატურა მოთავსებულია  $-1$ -დან  $-4^{\circ}\text{C}$ -მდე ფარგლებში, ხოლო ზოგიერთის კი (მაგალითად, სიცივემდეგი ჯიშის ვაშლი)  $-2$ -დან  $-4^{\circ}\text{C}$ -მდე, და მეტიც  $-3$ -დან  $-6^{\circ}\text{C}$ -მდე (ხახვი).

ხილისა და ბოსტნეულის სახეობების უმრავლესობისათვის ოპტიმალური ტემპერატურული რეჟიმი მდებარეობს  $0^{\circ}\text{C}$ -თან ახლოს მდებარე ( $\pm 1^{\circ}\text{C}$ ) ფარგლებში, რადგან ამ დროს ცხოველმოქმედების პროცესები შენელებულად მიმდინარეობს, მაგრამ არ წყდება. მიკროორგანიზმების გამრავლების პროცესი მუხრუჭდება, ამიტომაც მცირდება ნაყოფის დაზიანება.

მაგრამ ზოგიერთი სითბოსმოყვარული ხილისა და ბოსტნეულის სახეობებში და ჯიშებში, რომლებსაც აქვთ უნარი მაღალ ტემპერატურაზე დამწიფდნენ, ტემპერატურის დაცემა იწვევს მოყინვას, რის შედეგაც ისინი კარგავენ მომწიფების უნარს და ლპებიან.

ხილისა და ბოსტნეულის ზოგიერთ სახეობებში და ჯიშებში დაბალ ტემპერატურების დროს შეინიშნება რბილობის გაშავება (ვაშლის ზოგიერთი სითბოსმოყვარული ჯიშები) ან ყავისფერი ლაქები (ციტრუსები).

ოპტიმალური რეჟიმის შექმნა და შენარჩუნება შენახვის მთელი პერიოდის განმავლობაში არ ნიშნავს მის უცვლელობას. ხილისა და ბოსტნეულის მრავალი ჯიშებისათვის აუცილებლად საჭიროა შეიქმნას საფეხურებრივი რეჟიმი. დიფერენცირებული ტემპერატურული რეჟიმი საჭიროა აგრეთვე ხილისა და ბოსტნეულის იმ ჯიშებისათვის, რომლების მოკრეფვის შემდეგ მწიფდებიან მაღალ ტემპერატურაზე (ბანანები, ანანასები, ტომატები და ა.შ.).

შენახვის ოპტიმალური რეჟიმის საერთო მოთხოვნას წარმოადგენს აგრეთვე ტემპერატურის და ჰაერის ფარდობითი ტენიანობის ცვლილება  $5-6\%$ -ით. ტემპერატურის გაზრდისას ფარდობითი ტენიანობა მცირდება, რის შედეგად

იზრდება პროდუქტის მასის დანაკარგი.

ახალი მოკრეფილი პროდუქტების კუთრი სითბოტევადობა არ არის დაკავშირებული მათ სახეობებზე და განისაზღვრება ტენიანობით (W).

ახალი მოკრეფილი ხილის, ბოსტნეულის და კენკრის კიბრი თბოტევადობის განსაზღვრის ფორმულები მოცემულია ცხრილში:

პროდუქტი	W %	c. ჯ/(კგ.კ)
შაქრის ჭარხალი	70-80	$c=1547+26,38W$
ხილი და ბოსტნეული	50-100	$c=1675+25,1W$
ფორთოხალი	-	$c=1256+23,9 W$
ციტრუსები	0-90	$c=1453+25,15W$
გრეიფრუტი	78-88	$c=873+33,8W$

მცენარეული კვების პროდუქტებისათვის  $c=f(T)$  [31, 37, 44, 75] დამოკიდებულებების თეორეული კვლევა, და აგრეთვე ექსპერიმენტული მონაცემები მოწმობენ იმას, რომ მათი კუთრი სითბოტევადობა არამნიშვნელოვნად იზრდება ტემპერატურის ზრდასთან ერთად.

მცენარეული პროდუქტის ნამდვილი სიმკვრივე  $\rho_{\sigma}$  იცვლება  $278\div 293$  კგ/მ<sup>3</sup> ტემპერატურის ინტერვალში და განისაზღვრება ფორმულით [37, 54, 75]:

$$\rho_{\sigma} = \frac{267000}{267 - n} \text{ ან } \rho_{\sigma} = 1000 \div 6,0n$$

სადაც  $n$  – მშრალი ნივთიერების შემცველობა, %.

პროდუქტის საშუალო (ფიზიკური) სიმკვრივე  $\rho_{\Phi}$  (კგ/მ<sup>3</sup>) ნამდვილზე მცირეა და განისაზღვრება როგორც

$$\rho_{\Phi} = \rho_{\sigma} (1 - \epsilon_n)$$

სადაც  $\epsilon_n$  – ფოროვნების ხარისხია.

პროდუქტის დაყრის ხარისხი (კგ/მ<sup>3</sup>) უდრის

$$\rho_{\Phi} = \rho_{\Phi} (1 - \epsilon_{\Phi})$$

სადაც  $\epsilon_{\Phi}$  – შრეების გამჭოლობის ხარისხია.

თბოგამტარობის კოეფიციენტი ხილში, ბოსტნეულში და კენკრაში, რომელთა სიმკვრივე 1000 კგ/მ<sup>3</sup>-ზე მცირეა 10–15%-ანი სიზურტით გამოითვლება ფორმულით

[61, 69, 75]:

$$\lambda = \frac{\rho_a}{\rho_l} (0,047 - 0,004n) + 0,25 \left( 1 - \frac{\rho_a}{\rho_l} \right)$$

ხილის, ბოსტნეულის და კენკრის თბური მახასიათებლები ჰაერის ფარდობით ტენიანობასთან ერთად მნიშვნელოვან როლს ასრულებს შენახვის დროს ხილბოსტნეულის დანაკარგების შემცირებაში. ეს მაჩვენებელი ახასიათებს განსაზღვრულ ტემპერატურაზე ჰაერის მოცულობის ერთეულის გაჯერებისათვის საჭირო ტენიანობის დეფიციტს. ამიტომ ჰაერის ფარდობითი ტენიანობა დიდ გავლენას ახდენს პროდუქციის მასის დანაკარგზე წყლის აორთქლების გამო.

პროდუქტი	n %	$\rho_{\sigma}$ კგ/მ <sup>3</sup>	$\rho_a$ კგ/მ <sup>3</sup>	$\epsilon_n$ %	$\epsilon_c$ %
კომბოსტო	8,5	730	400	43	45
სტაფილო	10	1040	600	42	45
ხახვი	13,4	940	600	36	35
ჭარხალი: ჩვეულებრივი	12,9	1053	600	43	40
შაქრის	22,0	1090	650	40	-
კარტოფილი	20,2	1080	650	40	40
ტომატები	5,3	993	-	-	-
ვაშლი	13,2	879	500	43	-
ყურძენი	16,4	1036	600	42	-
მსხალი	15,3	1009	-	-	-
კომში	14,2	892	-	-	-

პროდუქტი	წყლის შემცველობა W %	სიმკვრივე $\rho$ კგ/მ <sup>3</sup>	თბოგამტარობის კოეფიციენტი A ვტ/(მ.კ.)	ტემპერატურა- გამტარობის კოეფიციენტი $a \cdot 10^8$ მ <sup>2</sup> /წმ
1	2	3	4	5

ვაშლი	86,8	880	0,49	14,6
	84,9	840	0,51	16,0
ვაშლი მწვანე	88,5	790	0,42	14,0
ყურძენი	83,4	1040	0,52	13,1
მარწვი	88,8	900	0,46	13,4
მსხალი	87,4	1010	0,51	13,4
კომში	85,0	825	0,41	13,1
1	2	3	4	5
ფორთოხალი	85,8	890	0,46	13,6
ბანანი	75,7	980	0,48	13,0
ატამი	88,5	930	0,58	16,8
ანანასი	84,9	1010	0,55	14,8
კარტოფილი	75	986	0,58	15,6
ჭარხალი	81,5	-	0,60	13,5
სტაფილო	90	1040	0,60	15,1
ხახვი	87,3	970	0,57	-
ტომატი	94,7	990	0,55	13,9
კიტრი	95,4	950	0,60	15,3
ნესვი	92,4	930	0,57	11,6
კომბოსტო	92	700	0,34	12,2
მწვანე ბარდა	74,4	1062	0,37	9,1

ჰაერის ფარდობითი ტენიანობის შემცირება იწვევს ქსოვილებიდან წყლის გაძლიერებულ ტრანსპირაციას და დაკავშირებულია აორთქლების გამო მასის დანაკარგების გაზრდასთან, დაჭკნობისაგან გარეგნული ხედის გაუარესებასთან და დამჭკნარი ხილისა და ბოსტნეულის დაღვობის ალბათობის გაზრდასთან.

ხილისა და ბოსტნეულის სახეობების უმრავლესობისათვის ოპტიმალურად ითვლება ჰაერის 90–95% ფარდობითი ტენიანობა. გამონაკლისს წარმოადგენს ხილბოსტნეულის მხოლოდ ის ჯიშები, რომლების კანის ქსოვილები და ზედაპირული შრეები საიმედოდ იცავენ ნაყოფის რბილობში მყოფ წყალს

აორთქლებისაგან. ასეთებია: თხილი, ხახვი, რომლებისთვისაც უფრო მისაღებია ჰაერის ფარდობითი ტენიანობა 70–80%.

ჰაერმიმოცვლა წარმოებს ვენტილაციის და ჰაერის ცირკულაციის გზით. ჰაერმიმოცვლის ძირითადი დანიშნულებაა – შენახვის თანაბარი რეჟიმის შექმნა, როგორც პროდუქტისაგან თავისუფალ სივრცეში, აგრეთვე შესანახი პროდუქტის მასაში. ამის გარდა ვენტილირების დროს საცავიდან მოცილდება ხილსა და ბოსტნეულში მიმდინარე ფიზიოლოგიური პროცესების შედეგად გამოყოფილი აიროვანი პროდუქტები (ეთილენი, არომატული ნივთიერებები, ნახშირორჟანგი და ა.შ.), რომელთა დაგროვებამ განსაზღვრულ ფარგლებში შეიძლება გამოიწვიოს ამ პროცესების ნორმალური წარმოების დარღვევა.

ჰაერის მიწოდების ხერხის შესაბამისად განასხვავებენ ბუნებრივ და იძულებით (მექანიკურ) ჰაერმიმოცვლას, ხოლო ჰაერის ნაკადის შესანახი პროდუქციის მასასთან მიმართებაში მიმართულების მიხედვით ვენტილაცია შეიძლება იყოს ზოგადცვლადი და აქტიური.

ზოგადცვლადი ვენტილაციის დროს ჰაერი მიეწოდება უფრო ხშირად ზედა და ქვედა ჰაერგამტარი მილებიდან და პროდუქციის გროვას გვერდს უვლის ისე, რომ მის შიგნით არ შედის, ხოლო აქტიური ვენტილაციისას ჰაერი მიეწოდება პროდუქციაში ქვემოდან, და ამასთან ერთად ის გადის პროდუქციის მთელ მასაში შიგნიდან.

არასაკმარისი ჰაერცვლის დროს საცავებში შესაძლებელია შეიქმნას „მკვდარი“ ზონები, რომლებშიც მკვეთრად იზრდება ტემპერატურა და ტენიანობა, აგრეთვე გამოიწვიოს ნახშირორჟანგის დაგროვება იმ კონცენტრაციებში, რომლებიც აღემატებიან კრიტიკულ ზღვრებს. ამის შედეგად იზრდება ხილისა და ბოსტნეულის აქტიური დანაკარგი ჟანგბადის უკმარისობის გამო. ხოლო აქტიური ვენტილაციის დროს იზრდება ნაყოფების დაჭკნობის ალბათობა.

თანაბარი ტენიან–ტემპერატურული რეჟიმის შექმნა და შენარჩუნება ჰაერმიმოცვლის საშუალებით შესაძლებელია მხოლოდ იმ შემთხვევაში თუ მიწოდებული ჰაერის ტემპერატურა საცავში ჰაერის ტემპერატურისაგან არ იქნება მნიშვნელოვნად განსხვავებული (დაახლოებით 1–2°C), წინააღმდეგ შემთხვევაში ასევე შესაძლებელია წარმოიშვას ტემპერატურათა ვარდნა და ტენის კონდენსირება.

ხილისა და ბოსტნეულის შენახვა რეგულირებად აიროვან გარემოში



შესაძლებლობას გვაძლევს გავახანგრძლივოთ შენახვის ვადა, გავზარდოთ სტანდარტული პროდუქციის გამოსავლიანობა, შევამციროთ დანაკარგები პროდუქტში, როგორც ფიზიოლოგიური პროცესების, აგრეთვე მავნე მიკროორგანიზმების გამრავლების და სიცოცხლისუნარიანობის დაყოვნების გამო.

ნახშირორჟანგის ჭარბი შემცველობის მქონე აიროვან გარემოში ყოვნდება ხილისა და ბოსტნეულის დამწიფების და გადამწიფების პროცესები, რაც აიხსნება ნახშირორჟანგის ზეგავლენით იმ ფერმენტების აქტივობაზე, რომლებიც მონაწილეობენ სუნთქვაში და აგრეთვე ჟანგბადის მონელების პროცესის შენელებით.

ჟანგბადის რაოდენობის შემცირებას აიროვან გარემოში მივყავართ სუნთქვის ინტენსიურობის შემცირებასთან. ჟანგბადის ძალზე დაბალი კონცენტრაციის დროს ჩნდება საშიშროება ხილისა და ბოსტნეულის ქსოვილებში ფიზიოლოგიური მოშლილობის გაჩენისა.

აირების ფიზიკური მახასიათებლები მოყვანილია ცხრილებში (ცხ )

გაზების სიმკვრივები

ნივთიერება	$\rho$ , კგ/მ <sup>3</sup>
ჰაერი	0,08988
ნახშირორჟანგი	1,293
ჟანგბადი	1,429

აირების კუთრი თბოტევადობა ნორმალურ წნევაზე

ტემპერატურა	ჟანგბადი		ნახშირორჟანგი		ჰაერი		წყლის ორთქლი	
	$c_p$	$\frac{c_p}{c_v}$	$c_p$	$\frac{c_p}{c_v}$	$c_p$	$\frac{c_p}{c_v}$	$c_p$	$\frac{c_p}{c_v}$
0	0,9149	1,397	0,8148	1,301	1,006	1,400	-	-
100	0,934	1,385	0,9136	1,260	1,010	1,397	1,103	1,28
200	0,964	1,37	0,9927	1,235	1,027	1,390	1,978	1,3
300	0,995	1,353	1,057	1,217	1,048	1,378	2,01	1,29

600	1,069	1,321	1,192	1,188	1,115	1,345	2,208	1,26
-----	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	------

რეგულირებად აიროვან გარემოში შენახვის თანამედროვე მეთოდები უზრუნველყოფენ ხილისა და ბოსტნეულის უკეთეს შენახვას. მათ საფუძვლად უდევს აქტიური კომპონენტების: ჟანგბადის და ნახშირორჟანგის მქონე აირის ნარევების გამოყენება.

აირების თბოგამტარობის კოეფიციენტი ნორმალურ წნევაზე

ნივთიერება	ტემპერატურა	$\lambda \cdot 10^{-4}$ ვტ/(მკ)
ჰაერი		257
ნახშირორჟანგი	20	262
ჟანგბადი		162

ყველაზე ხშირად იყენებენ სამი ტიპის აირის ნარევებს (%-ში): აქტიური კონდენსატების – 21 (ნორმალური აიროვანი გარემო); აქტიური კონდენსატების – 5–10 (ნომინალური აიროვანი გარემო); ნახშირორჟანგის – 0, ჟანგბადის – 2–3, აზოტის – 97–98 (სუბნომინალური აიროვანი გარემო).

აიროვანი გარემოს ტიპის არჩევაში დიდ როლს აგრეთვე ასრულებს განათებულობა. მწვანე ბოსტნეულში შუქზე ძლიერდება ფოტოსინთეზური პროცესი, რაც იწვევს სუნთქვის და სხვა ფიზიოლოგიური და ბიოქიმიური პროცესების ინტენსიურობის გაზრდას, და თავის მხრივ ბუნებრივი კლებადობის გაზრდას.

პროდუქციის განლაგებაზე ძირითადი მოთხოვნების დაცვა უმეტეს წილად განსაზღვრავს ხილისა და ბოსტნეულის შენახვის შედეგებს და საშუალებას გვაძლევს გავზარდოთ მისი ეფექტურობა. ხოლო მათმა დარღვევამ კი შეიძლება მიგვიყვანოს ხილისა და ბოსტნეულის ნაწილობრივ ან სრულ გაფუჭებამდე, არამწარმოებლური დანახარჯების გაზრდამდე, რომელიც დაკავშირებული არის პროდუქციის საცავში გადაადგილებასთან და მის მოვლასთან.

ხილისა და ბოსტნეულის შესანახად განთავსების დროს აუცილებლად უნდა

იყოს დაცული განლაგებაზე შემდეგი მოთხოვნები:

- სავაჭრო პროდუქციის მაქსიმალურად შენახვის უზრუნველყოფა და დანაკარგების შემცირება;

- საცავის მოცულობის რაციონალური გამოყენება;

- შრომატევად პროცესებში მექანიზაციის მაქსიმალური პირობების შექმნა.

სავაჭრო პროდუქციის მაქსიმალური შენახვის უზრუნველყოფა მჭიდროდ არის დაკავშირებული შენახვისას დანაკარგების შემცირებასთან. ამისათვის შენახვა–განლაგების დროს აუცილებელია გათვალისწინებული იყოს ხილის და ბოსტნეულის ჯიშის თუ სახეობის ბიოლოგიური თავისებურებები, მათი ხარისხი, შენახვის რეჟიმის შექმნის და შენარჩუნების შესაძლებლობები ისე, რომ რეჟიმი ოპტიმალური იყოს შესანახი პროდუქციის ყველა სახეობისათვის მისი ფიზიოლოგიური მდგომარეობის და ზოგიერთი დეფექტების არსებობის გათვალისწინებით.

ერთიანი ტექნოლოგიური პროცესის მნიშვნელოვან ეტაპს, რომელსაც აგრეთვე დიდი მნიშვნელობა აქვს პროდუქტის შენახვისათვის, წარმოადგენს საცავების მომზადება ხილისა და ბოსტნეულის განთავსებისათვის მოსამზადებელი ღონისძიებების გატარება უზრუნველყოფს საცავების სანიტარულ–ჰიგიენურ რეჟიმს შენახვის პერიოდში, რათა გამოვრიცხოთ პროდუქციის დაზიანება მიკროორგანიზმებით და მავნებლებით. ეს მიიღწევა საცავებში და მასში მოთავსებული პროდუქტის პერიოდული დეზინფექციით.

### 1.3. შენახვა რეგულირებად აიროვან გარემოში

მიუხედავად იმისა, რომ რეჟიმის სხვადასხვა მაჩვენებლების გავლენა პროდუქტების შენახვის ხარისხზე არ არის ერთნაირი. ოპტიმალური მაჩვენებლების კვლევა მოითხოვს კომპლექსურ მიდგომას და პროდუქტზე ყველა პარამეტრის ერთდროული ზემოქმედების გათვალისწინებას. მათემატიკური მოდელირების მეთოდები საშუალებას გვაძლევს ღრმად შევისწავლოთ შენახვის დროს მიმდინარე მექანიკური, მასამიმოცვლის, თბური და ბიოქიმიური პროცესები, აგრეთვე გავითვალისწინოთ მათი გავლენა პროდუქტის ხარისხზე შენახვის დროს და

მეცნიერულად მივუდგეთ ამა თუ იმ პროდუქტისათვის შენახვის ოპტიმალური პირობების განსაზღვრას. ქვემოთ მოყვანილია მცენარეული კვების პროდუქტების შენახვის საკმაოდ ზოგადი მათემატიკური მოდელი აქტიური იმულებითი ვენტილაციით.

ხილისა და ბოსტნეულის შენახვა კონტეინერებში უფრო და უფრო დიდ გავრცელებას პოულობს. ამ მეთოდს აქვს მთელი რიგი უპირატესობა: ხილისა და ბოსტნეულის აკრეფვა კონტეინერებში შენახვაზე გადატვირთვის გარეშე ხელს უწყობს სტანდარტული პროდუქციის გამოსავლიანობას, დანაკარგების შემცირებას, ადვილდება ისეთი შრომატევადი სამუშაოების კომპლექსური მექანიზაცია, როგორებიცაა საცავების ჩატვირთვა და გადმოტვირთვა, შენახვაზე მყოფი პროდუქციის ხარისხზე და შენახვის რეჟიმზე მიმდინარე კონტროლი.

შემდგომში ჩავთვალოთ, რომ მასის დანაკარგებზე და პროდუქციის ხარისხზე გავლენის მქონე ძირითად ბიოლოგიურ პროცესს წარმოადგენს სუნთქვა.

მცენარის სუნთვის ინტენსიურობა მუდმივი არ არის, ის კანონზომიერად იცვლება ორგანიზმის განვითარების მცდელობისას, გარემოს ცვლადი პირობების შესაბამისად. სუნთქვის ინტენსიურობა დამოკიდებულია მრავალ ფაქტორზე: მცენარის ასაკი, ტემპერატურა და აიროვანი გარემოს შემადგენლობა საცავის რეზერვუარში, ექსპოზიციის ხანგრძლივობა და ა.შ.

სუნთქვის ყველაზე მაღალ ენერგიას ფლობენ ახალგაზრდა ორგანიზმები და მცენარეების ის ქსოვილები, რომლებიც იმყოფებიან აქტიური ზრდის სტადიაში. ამის გარდა სუნთქვა წარმოადგენს პროცესს, რომლის ინტენსიურობა იზრდება ტემპერატურის გაზრდისას, თუ ეს გაზრდა არ აღწევს იმ ზღვარს, რომლის დროსაც მოცემული ორგანიზმის სიცოცხლე წყდება.

იმისათვის, რომ უკეთესად დავახასიათოთ ტემპერატურის გავლენა სუნთქვის ინტენსიურობაზე შემოგვაქვს სუნთქვის ტემპერატურული კოეფიციენტი  $Q_{10}$ , რომელიც აჩვენებს იმას, თუ რამდენჯერ იზრდება ბიოქიმიური რეაქციის სიჩქარე ტემპერატურის  $10^{\circ}\text{C}$ -ით გაზრდისას.

სუნთქვის ოპტიმალური ტემპერატურის საკითხის ამოხსნისას აუცილებლად უნდა გავითვალისწინოთ ექსპოზიციის ხანგრძლივობა. მაგალითად, შენახვის პირველი ოთხი საათის განმავლობაში სუნთქვის დონე  $45^{\circ}$ -ზე უფრო მაღალია, ვიდრე  $30^{\circ}$ -დან  $35^{\circ}$ -მდე, მაგრამ ხუთსაათიანი ექსპოზიციის შემდეგ ისინი უფრო

სუსტად სუნთქავენ, ვიდრე 25°-იან ტემპერატურაზე. პროდუქტების სუნთქვა 40°C-ზე შენახვის 5 საათის შემდეგ მიმდინარეობს უფრო სუსტად, ვიდრე 35°-ზე, ხოლო 6-7 საათის შემდეგ ის უფრო სუსტია, ვიდრე 30°-ანზე. აქედან გამომდინარე 20-45°-ან ტემპერატურულ ინტერვალში სუნთქვის ოპტიმუმი იქნება მით მეტი, რაც ხანმოკლეა ექსპოზიცია, ხოლო მისი გაგრძელებისას სუნთქვის ინტენსიურობა დაქვეითდება.

სუნთქვის ინტენსიურობა, რომელიც წარმოადგენს ხილისა და ბოსტნეულის სხვადასხვა სახეობის დამწიფების, დაბერების და, საერთოდ, შენახვისათვის ვარგისიანობის ერთ ერთ ობიექტურ მაჩვენებელს, შეიძლება არსებითად შეიცვალოს შენახვის პირობებიდან გამომდინარე.

სუნთქვის ინტენსიურობის მინიმუმამდე შემცირების შესაძლებლობაზე დაფუძნებულია ხილისა და ბოსტნეულის ტრადიციული შენახვა მაცივრებში 0°C-ის ტემპერატურის მიდამოებში. ამ პირობებში არა მარტო ნელდება ნაყოფების დამწიფების და გადამწიფების პროცესი, არამედ კნინდება ფიტოპათოგენური მიკროფლორის სიცოცხლისუნარიანობა. მაგრამ ყველა ხილი ან ბოსტნეული ვერ უძლებს დაბალ ტემპერატურას. ეს, ალბათ, დაკავშირებულია იმასთან, რომ დაბალი ტემპერატურისას ჟანგბადის ჩვეულებრივი 21%-ანი კონცენტრაცია ჭარბი ხდება და იწვევს პოლიფენოლების დაჟანგვის პროცესის აქტივიზაციას. გარეგნულად ეს ვლინდება ნაყოფების რბილობის გამუქებით, რაც მოწმობს ნივთიერებათა ცვლაში ფინქციონალურ მოშლილობას და ფიზიოლოგიური დაავადებების წარმოქმნას.

შენახვის ტემპერატურის დადაბლებით ნივთიერებათა ცვლაში გამოწვეულმა დარღვევებმა შეიძლება, აგრეთვე, გამოიწვიოს ნაყოფებში აცეტალდეჰიდის და სპირტის ჭარბი დაგროვება. ადვილად აქროლადი ეს ნივთიერებები აზიანებენ ხილისა და ბოსტნეულის ქსოვილებს. კვლევებით დადგენილია, რომ ზოგიერთი ხილის ჯიშების (მაგალითად, სიცივემედეგი ვაშლის) შენახვა 4°C-ზე არ იწვევს რბილობის დაზიანებას, მაშინ, როცა 0°C-ზე შენახვის დროს 6 თვის შემდეგ იგივე ჯიშის ნაყოფების 20%-ს რბილობი დაზიანებულია. მათში აცეტალდეჰიდის შემცველობა 4-5-ჯერ მომატებულია ვიდრე პროდუქტის შესანახად ჩაწყობისას მდგომარეობასთან შედარებით.

კვლევებმა და პრაქტიკულმა გამოცდილებამ გვიჩვენა, რომ ხილისა და ბოსტნეულის დაბალ ტემპერატურაზე შენახვა შეცვლილი აიროვანი გარემოს ზეგავლენასთან შეთავსება საშუალებას იძლევა შევამციროთ ან საერთოდ

მოვიშორეთ დაბალტემპერატურიანი შენახვასთან დაკავშირებული ნაკლოვანებები.

დადგენილია, რომ სუნთქვის ინტენსიურობა მცირდება როგორც ჟანგბადის შემცველობის გარკვეულ დონემდე შემცირებისას, ასევე ნახშირორჟანგის კონცენტრაციის გაზრდისას. ნახშირორჟანგის მიერ ხილისა და ბოსტნეულის ცხოველმოქმედების დაკნინება თავს იჩენს აიროვან გარემოში CO<sub>2</sub> შემცველობის 3–10%-მდე მომატებისას, პროდუქციის ჯიშისა და ხარისხის მიხედვით. ჟანგბადის, როგორც სუნთქვის შენელების ფაქტორის გავლენა, ვლინდება მხოლოდ მაშინ, როცა მისი კონცენტრაცია მცირდება 14%-მდე 4–5°C ტემპერატურაზე და 10%-მდე 0°C-თან ახლო ტემპერატურებზე. ჟანგბადის შემდგომი შემცირება 3–2%-მდე იწვევს სუნთქვის ნელნელა შემცირებას ფიზიოლოგიური დარღვევების გარეშე. ხოლო ჟანგბადის 2%-ზე დაბალ კონცენტრაციაზე ხილბოსტნეულის უმრავლეს სახეობებში შეიმჩნევა CO<sub>2</sub>-ის არაკომპენსირებული გამოყოფა, რაც გვიჩვენებს ანაერობული სუნთქვის გაძლიერებას, რის შედეგად მცენარის ქსოვილებში გროვდება ეთილის სპირტი და აცეტალდეჰიდი. ამ ნაერთების ტოქსიკური კონცენტრაციებით გამოწვეულია ქსოვილების ფიზიოლოგიური მაცერაცია. მკვლევარების უმრავლესობის აზრით, შენახვის აიროვან გარემოში ჟანგბადის შემცველობის შემცირება ყველაზე ეფექტურია 2–3%-მდე. ნახშირორჟანგისათვისაც არსებობს კრიტიკული კონცენტრაციები, რომლის გადამეტება იწვევს ნივთიერებათა ცვლაში ფუნქციონალურ მოშლილობას. ჩვეულებრივ მისი შემცველობა არ უნდა აღემატებოდეს 10%-ს.

უმეტეს წილად, ხილისა და ბოსტნეულის სუნთქვა ყოვნადაც აიროვან გარემოში ჟანგბადის კონცენტრაციის შემცირებისას და ნახშირორჟანგის კონცენტრაციის გაზრდისას, ხილისა და ბოსტნეულის ყოველი სახეობისათვის ექსპერიმენტალური გზით დადგენილ ოპტიმალურ დონემდე. ამ შემთხვევაში შენახვის უნარიანობა იზრდება 2–3 ჯერ იგივე ტემპერატურაზე ჩვეულებრივი აიროვანი გარემოს პირობებში შენახვასთან შედარებით.

შენახვის დროს ხილისა და ბოსტნეულის ნივთიერებათა ცვლაში არ არსებობს არც ერთი ბიოქიმიური პროცესი, რომელზეც არ ახდენს გავლენას აიროვანი გარემოს შემადგენლობის ცვლილება. მაგალითად, ჟანგბადის შემცველობის შემცირებისას კნინდება ფარნეზენის და მისი დაჟანგვის პროდუქტების ბიოსინთეზის პროცესი. ნახშირწყალი ფარნეზენი სინთეზირდება ეპიდერმისის ცოცხალ უჯრედებში, და

მისი დაგროვება თან ახლავს ნაყოფის მომწიფებას და დაბერებას. ეს შენაერთი ადვილად ქმნის ჰიდროჟენებს და ზეჟანგებს, რომლებიც იწვევენ ნაყოფების ქერქის გამუქებას. ფარნეზენის ჰიდროჟენები ნაწილობრივ გარდაიქმნება პოლიმერებად და ქმნიან ნაყოფის ზედაპირზე ჰაერგაუმტარ აფსკს. ამის გამო აფსკის ქვეშ იქმნება ანაერობული პირობები და გროვდება ანაერობული ნივთიერებათა ცვლის პროდუქტები – სპირტი და აცეტალდეჰიდი.

ფარნეზენის ჰიდროჟენების დაგროვება მავნებელია ნაყოფისათვის კიდევ იმიტომ, რომ ის ადვილად ჟანგავს პოლიფენოლებს და ასკორბინის მჟავას. პოლიფენოლის შეუღწევადი დაჟანგვის შედეგად უჯრედში გროვდება მათი კონდენსაციის ყავისფერი შეფერილობის ნივთიერებები. ბუნებრივი ანტიოქსიდანტის – ასკორბინის მჟავის გაქრობა აჩქარებს ამ პროცესს.

შენახვის საცავის აიროვან გარემოში ჟანგბადის შემცირებასთან შედარებით CO<sub>2</sub>-ის ამალღებული კონცენტრაციის ზემოქმედებას აქვს თავისი სპეციფიკა და მდგომარეობს, უპირველეს ყოვლისა, ორგანული მჟავების დეკარბოქსილირების პროცესის დამუხრუჭებაში, რაც, თავის მხრივ, ანელებს მცენარის სუნთქვას. ამის გამო ნაყოფებში უკეთესად ინახება ნახშირწყლები, ორგანული მჟავები და სხვა კვებითი ღირებულების მქონე ნივთიერებები. რეგულირებადი აიროვანი გარემოს პირობებში მუხრუჭდება აგრეთვე პოლისაქარიდების ჰიდროლიზი (სახამებლების გაშაქრება, ჰემიციტულოზის ჰიდროლიზი, პროპექტინების გარდაქმნა პექტინებად), რაც ამცირებს ნაყოფის დარბილებას, ხელს უწყობს მისი სტრუქტურული სიმყარის შენარჩუნებას. იგივეზე მეტყველებს ნაყოფის მწვანე შეფერილობის დიდი ხნის განმავლობაში შენარჩუნება, რადგან რეგულირებად აიროვან გარემოში ქლოროფილის დაშლა ყოვნდება. მჟანგავი ფერმენტების პოლიფენოლოქსიდაზის და ასკორბინათოქსიდაზის აქტიურობის შემცირების გამო უკეთესად ინახება ნაყოფების ვიტამინური აქტიობა.

ისმის კითხვა, რატომ, იმ საცავის აიროვან გარემოში, სადაც ვითომ იქმნება პირობები ანაერობული ტიპის სუნთქვისათვის, ნაყოფებში უფრო ნაკლები აცეტალდეჰადა და სპირტი, ვიდრე ჩვეულებრივ აიროვან გარემოში შენახვისას? არსებული თეორია ამას ხსნის შემდეგნაირად. მცენარულ ქსოვილებში, როგორც ჩვეულებრივი შენახვისას, ასევე ჟანგბადის კონცენტრაციის შემცირების შემთხვევაშიც ადგილი აქვს სუნთქვის ორივე ტიპს – ანაერობულსაც და

აერობულსაც. ხოლო რაც შეეხება აცეტალდეჰიდს, მისი წარმოქმნა დამოკიდებულია დეკარბოქსილირების რეაქციაზე, რომელიც ყოვანდებო რეგულირებადი აიროვანი გარემოს პირობებში.

რეგულირებადი აიროვანი გარემოს პირობებში მცირდება სხვა აქროლადი ნაერთების შემცველობა, რომლებიც ჭარბი კონცენტრაციის შემთხვევაში იწვევენ პროდუქტის ხარისხის დაცემას.

სუნთქვა მჭიდროდ არის დაკავშირებული გარემოში ჟანგბადის შემცველობასთან. სუნთქვის პროცესის ნორმალური მსვლელობა უნდა იყოს დაკავშირებული მცენარის ქსოვილებით ჟანგბადის უწყვეტ მოხმარებაზე. ლუი პასტერმა პირველმა აჩვენა, რომ რთული აგებულების მცენარეები არ წყვეტენ CO<sub>2</sub>-ის გამოყოფას მათი უჟანგბადო გარემოში მოთავსების შემდეგაც. მცენარეების სუნთქვას ამ პირობებში თან ახლავს ქსოვილებში სპირტის დაგროვება. თავისუფალი ჟანგბადის არქონისას სუნთქვას, რომელიც წარმოებს ბმული ჟანგბადის ხარჯზე, მიღებულია ვუწოდოთ ინტრამოლეკულარული სუნთქვა. როგორც წესი ასეთი სუნთქვა მიმდინარეობს სპირტული დუდილის განტოლებით:



„სიცოცხლე უჟანგბადოთ“, როგორც უწოდა პასტერმა დუდილს შეიძლება გაგრძელდეს მწვანე მცენარეში მხოლოდ განსაზღვრული დროის პერიოდში, რის შედეგად ის კვდება. უმაღლესი მცენარეების უმრავლესობაში CO<sub>2</sub>-ის გამოყოფის ინტენსიურობა უჟანგბადო გარემოში გაცილებით დაბალია ვიდრე ჟანგბადით ნორმალური უზრუნველყოფის პირობებში. სუნთქვის ინტენსიურობის დასახასიათებლად შემოაქვთ სუნთქვის კოეფიციენტი, რომელიც გამოხატავს სუნთქვისას გამოყოფილი ნახშირორჟანგის მოცულობის ამავედროულად შთანთქმული ჟანგბადის მოცულობასთან შეფარდებას.

სუნთქვის ჯამური ქიმიური განტოლება,



გულისხმობს ამ მოცულობების ტოლობას:  $V_{CO_2} = V_{O_2}$ . კოეფიციენტის ერთის ტოლი სიდიდე გვხდება მხოლოდ პირობების განსაზღვრული შეთანხმების მკაცრი დაცვის დროს. ეს ხორციელდება მხოლოდ მცენარის ქსოვილების ჟანგბადით კარგი უზრუნველყოფით და იმ პირობით, რომ სუბსტრატს წარმოადგენენ ნახშირწყლები,



რომელთა დაჟანგვა ხორციელდება დაშლის საბოლოო პროდუქტებამდე ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ).

ამ პირობების შესრულებისას სუნთქვის კოეფიციენტის სიდიდე შეიძლება გადაიხაროს ერთიდან, როგორც ერთ, ასევე მეორე მხარეს. დუღილი კიდევ გრძელდება ჟანგბადის 5%-ზე დაბალი შემცველობისას და ნახშირორჟანგის გამოყოფა კიდევ აჭარბებს ჟანგბადის შთანთქმას. ჟანგბადის შემცველობა აიროვან გარემოში 5–8%-ზე მეტი ოდენობით, როგორც წესი, სუნთქვის ინტენსიურობაზე არავითარ გავლენას არ ახდენს.

ნახშირორჟანგი წარმოადგენს საბოლოო პროდუქტს, როგორც დუღილისას და აერობული სუნთქვის დროს.  $\text{CO}_2$ -ის საკმაოდ მაღალ კონცენტრირებისას, რომელიც გაცილებით მაღალი არის მცენარეულ ორგანიზმში ჩვეულებრივ არსებულ კონცენტრაციებზე, სუნთქვის პროცესი ჩერდება. ეს გამოწვეულია რამოდენიმე მიზეზით:

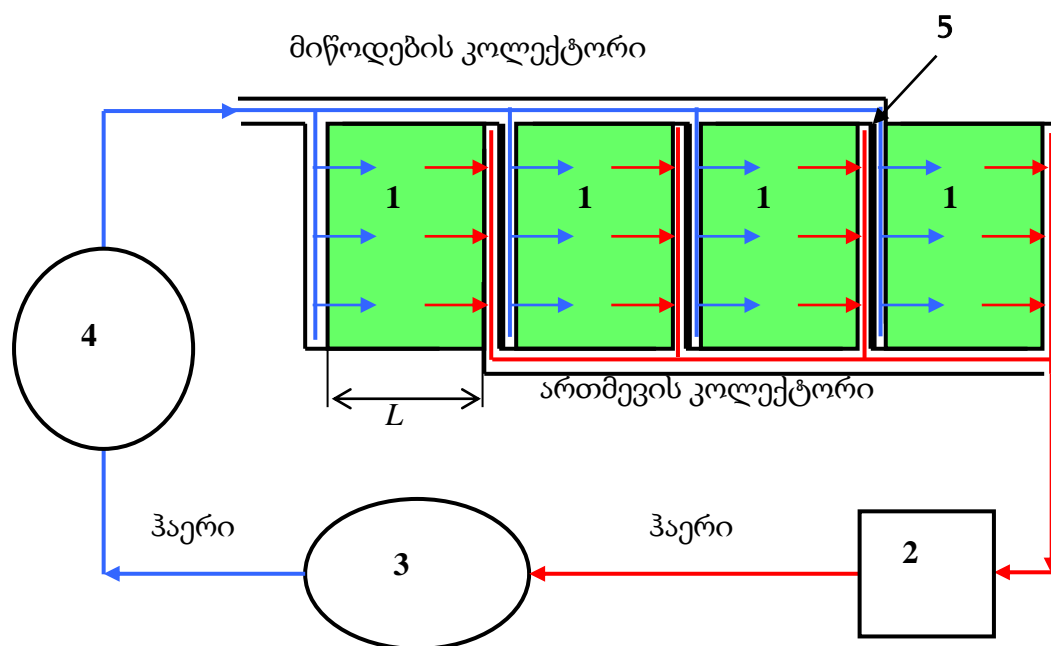
1. ნახშირორჟანგის მაღალმა კონცენტრაციამ შეიძლება მოახდინოს მცენარეულ ორგანიზმზე საერთო ანასთეზიური ეფექტი;
2.  $\text{CO}_2$  ამუხრუჭებს სუნთქვის გამომწვევი ფერმენტების მთელი რიგის აქტივობას;
3. ნახშირორჟანგის ამალელებული შემცველობა იწვევს სასუნთქეების დაკეტვას, რაც ართულებს ჟანგბადის მიწოდებას და ირიბად მოქმედებს სუნთქვის ინტენსიურობაზე.

მზარდ ქსოვილებში წყლის მცირე დეფიციტი ზრდის სუნთქვის ინტენსიურობას. ეს დაკავშირებულია იმასთან, რომ წყლის დეფიციტი და ფოთლის დაჭკნობა აძლიერებს რთული ნახშირწყლების (სახამებლის) უფრო მარტივებად (შაქარი) დაშლის პროცესს. ამასთან ერთად, წყლის დეფიციტის დროს ირღვევა დაჟანგვის და სხვა ფიზიოლოგიური პროცესები. ამ პირობებში სუნთქვა ძირითადად წარმოადგენს მშრალი ნივთიერების უსარგებლო ხარჯვას. ხანგრძლივი დაჭკნობისას მცენარეები ხარჯავენ შაქრებს და სუნთქვის ინტენსიურობა მცირდება.

სხვა კანონზომიერება დამახასიათებელია მცენარეებისათვის, რომლებიც იმყოფებიან დაწყნარებულ მდგომარეობაში. წყლის შემცველობის გაზრდა დაახლოებით 100-ჯერ ზრდის სუნთქვის ინტენსიურობას. მცენარის გადაადგილებისას წყლიდან მარილების ხსნარში სუნთვა ძლიერდება – ეს არის ეგრეთწოდებული მარილიანი სუნთქვა [74, 75, 87].

სუნთქვის ინტენსიურობა ძალზე მჭიდროდ არის დაკავშირებული მცენარის

მინიმალური კვების ელემენტებით უზრუნველყოფასთან. ისეთი ელემენტები, როგორცაა ფოსფორი, გოგირდი, რკინა, მანგანუმი, სპილენძი, ღებულობენ უშუალო მონაწილეობას სუნთქვის პროცესში, ან ამ დროს გარდამავალ პროდუქტებში შესვლით ან სუნთქვის ფაქტორების შემადგენელ ნაწილად ყოფნით. სუნთქვისას გამოიყოფილი ენერგია სრულად არ გამოიყენება სიცოცხლის ფიზიოლოგიურ და ბიოქიმიურ პროცესებში. ამიტომ სუნთქვა წარმოადგენს თვითრეგულირებად პროცესს, ე.ი. ტემპერატურის ვარდნისას იზრდება სუნთქვის ინტენსიურობა, ხოლო ამის შედეგად, თავის მხრივ, გამოიყოფა დამატებითი სითბო. ამაში მდგომარეობს ხილისა და ბოსტნეულის ჰაერით ბუნებრივი ვენტილაციის მქონე მაცივრებში შენახვის უარყოფითი მხარე. ასეთ სისტემებში სითბოს ართმევა წარმოებს მხოლოდ გარე შრეებიდან, პროდუქტის მასის შიგნით კი ტემპერატურა გაცილებით მაღალია და იქ ბიოქიმიური პროცესების შედეგად მიმდინარეობს თვითგახურება. ამიტომაც გაცილებით უფრო მისაღებია გამოვიყენოთ ჰაერის აქტიური იძულებითი ცირკულაცია კონტეინერებში სურ.1.1.-ზე მოცემული სქემით.



სურ.1.1. პროდუქტის შესანახი დანადგარის პრინციპული სქემა

1. რეზერვუარი, რომელშიც მოთავსდება შენახვის ობიექტი;
2. აირის ნარევის შემადგენლობის ანალიზატორი;
3. აირის ნარევის შემადგენლობის და ტემპერატურის რეგულირების კვანძი;
4. კომპრესორი;
5. თბოიზოლირებული კედელი;

ხილბოსტნეულის რეგულირებად აიროვან გარემოში შენახვის მეთოდების დანერგვის საკითხის გადაჭრისას აუცილებლად უნდა იყოს გათვალისწინებული, რომ ხილისა და ბოსტნეულის ზოგიერთი სახეობა ან ჯიში, კარგად ინახება რეგულირებად ან შეცვლილ აიროვან გარემოში, მაგრამ ვერ უძლებენ გარემოს მკვეთრ ცვლილებას საცავიდან მათი გადატანისას იქ სადაც არ არის გაცივება და იძულებითი ვენტილაცია. ამის გამო 2–3 დღე–ღამის განმავლობაში პროდუქცია მთლიანად ნადგურდება ფიზიოლოგიური დაავადებების ან დაჩქარებული დაბერების გამო.

#### 1.4. სადისერტაციო კვლევების მიზნები და ამოცანები

ხილისა და ბოსტნეულის ხარისხიანი შენახვა – მოსახლეობის კვების პროდუქტებით მთელი წლის განმავლობაში მომარაგების პრობლემის გადაწყვეტის ყველაზე ეფექტური და ხშირად ერთადერთი საშუალებაა. ხარისხიანი შენახვის პრობლემის აქტუალურობამ გამოიწვია ის, რომ ამ დარგში დაგროვილია უზარმაზარი პრაქტიკული გამოცდილება. მაგრამ არის ბევრი პრობლემა.

კვების პროდუქტების, უპირველეს ყოვლისა ხილისა და ბოსტნეულის, შენახვის საკითხზე პუბლიკაციების ანალიზმა გვიჩვენა, რომ თანამედროვე მიდგომაზე დაფუძნებული შენახვის რაციონალური რეჟიმების განმსაზღვრელი თეორიული მეთოდების არ არსებობა. პრაქტიკულად არ არსებობს დაგროვილი გამოცდილების განზოგადება და სისტემატიზაცია. შენახვის დროს მიმდინარე ბიოქიმიური და თბოფიზიკური მოვლენების ურთიერთკავშირის სირთულის მიუხედავად მათემატიკური მოდელირების მეთოდები შეიძლება იყოს ობიექტური ინფორმაციის მოპოვების ეფექტური საშუალება, რომლის დახმარებით გავალთ არსებული პრობლემების გადაწყვეტის რაციონალურ გზაზე. თუნდაც უმარტივესი მათემატიკური მოდელების არსებობა გვეხმარება დაგროვებული ემპირიული მასალის განზოგადებაში, მიზანშეწონილად ჩავატაროთ ექსპერიმენტული კვლევა ნამდვილად ახალი და ობიექტური ინფორმაციის მისაღებად.

სადისერტაციო კვლევის მიზანს წარმოადგენს მცენარეული კვების პროდუქტების რეგულირებად აიროვან გარემოში იძულებითი ვენტილაციის პირობებში შენახვის პროცესის არასტაციონალური მათემატიკური მოდელის შექმნა

და მის საფუძველზე რეგულირებადი რეჟიმული და კონსტრუქციული პარამეტრების რაციონალური მნიშვნელობების განსაზღვრა.

დასმული მიზნის მისაღწევად საჭიროა შემდეგი ამოცანების გადაწყვეტა:

1. მცენარეული კვების პროდუქტების შენახვის არსებული მეთოდების, კერძოდ რეგულირებად აიროვან გარემოში შენახვის მეთოდის ანალიზი.
2. მცენარეული კვების პროდუქტების შენახვის პროცესის მათემატიკური მოდელის დამუშავება.
3. მათემატიკური მოდელის რეალიზაციისათვის რიცხვითი მეთოდის და ფორტრან-პროგრამის დამუშავება. გამოთვლითი ექსპერიმენტების ჩატარება შენახვის ხარისხობრივ მაჩვენებლებზე სხვადასხვა რეჟიმული და კონსტრუქციული პარამეტრების გავლენის დადგენა.
4. შემნახველი საკნის რაციონალური კონსტრუქციული და რეჟიმული პარამეტრების განსაზღვრა.

## თავი 2. რეგულირებად აიროვან გარემოში პროდუქტების შენახვის არასტაციონარული პროცესის მათემატიკური მოდელი

### 2.1. მოდელის აგების ძირითადი პრინციპები

ნებისმიერი მათემატიკური მოდელის აგებას იწყებენ მოდელირების ობიექტის ფიზიკური აღწერით. ამ დროს გამოჰყოფენ მოდელირების ობიექტში მიმდინარე იმ „ელემენტარულ“ პროცესებს, რომლებიც უნდა აისახონ მოდელში და ფორმულირდება ძირითადი დაშვებები მათი აღწერისას. „ელემენტარულ“ პროცესში გულისხმობენ მოვლენების განსაზღვრული კლასისთვის მიკუთვნილ ფიზიკო-ქიმიურ პროცესს, მაგალითად, მასაცვლა, სითბოგადაცემა და ა.შ. უნდა ავლნიშნოთ, რომ სახელწოდება „ელემენტარული“ პროცესები სულაც არ აღნიშნავს, რომ მოცემული პროცესები არ არის რთული და აღიწერება მარტივი განტოლებებით. ასე, მაგალითად, მასაცვლა არის მთელი თეორიის საგანი, რომელიც დღემდე არ არის სრულად დასრულებული. ეს სახელწოდება აღნიშნავს, რომ ასეთი პროცესები წარმოადგენენ კვების ტექნოლოგიის გაცილებით უფრო რთული მთელი ფიზიკო-ქიმიური პროცესის შემადგენელ ნაწილებს.

ჩვეულებრივ, კვების ტექნოლოგიის ობიექტების მათემატიკური მოდელირებისას მხედველობაში მიიღება შემდეგი „ელემენტარული“ პროცესები: 1) ფაზების ნაკადების მოძრაობა, რომელსაც თან ახლავს მექანიკური ზემოქმედება (მსხვრევა, დეფორმაცია და ა.შ.); 2) ფაზებს შორის მასაცვლა; 3) სითბოგადაცემა; 4) აგრეგატული მდგომარეობის ცვლილება (აორთქლება, კონდენსაცია, გახსნა და ა.შ.); 5) ქიმიური გარდაქმნები.

„ელემენტარული“ პროცესების მოდელში მათემატიკური აღწერის სისრულე დამოკიდებულია მათ როლზე მთელ ტექნოლოგიურ პროცესში, შესწავლის ხარისხზე, ობიექტში მათი ურთიერთკავშირის დონეზე და მთელი აღწერის

სასურველ სიზუსტეზე. „ელემენტარული“ პროცესების ურთიერთკავშირი შეიძლება იყოს ძალიან რთული. ამიტომ პრაქტიკაში ხშირად უშვებენ სხვადასხვა სახის დაშვებებს კავშირების ხასიათის მიმართ, რაც საშუალებას იძლევა თავი ავარიდოთ მოდელში არასაკმარისად შესწავლილი დამოკიდებულებების შეყვანას და, შესაბამისად, აღწერის მეტისმეტ გართულებას.

მათემატიკური მოდელების აგებისას ფართოდ იყენებენ ბლოკურ პრინციპს, რომლის არსი მდგომარეობს იმაში, რომ მოდელი აიგება განსახილველი პროცესის ამა თუ იმ მხარის ამსახველი ცალკეული ლოგიკურად დასრულებული ბლოკებისაგან. მოდელების აგების ბლოკური პრინციპი საშუალებას იძლევა: ა) დავშალოთ მათემატიკური მოდელის აგების საერთო ამოცანა ცალკეულ ქვეამოცანებად და ამით გავამარტივოთ აგების ამოცანა; ბ) გამოვიყენოთ დამუშავებული ბლოკები სხვა მოდელებში; გ) მოდერნიზირება გავუკეთოთ ცალკეულ ბლოკებს და შევცვალოთ ისინი ახლებით ისე, რომ არ შევცხოთ დანარჩენებს.

მათემატიკური მოდელის ყოველ ბლოკს აქვს მათემატიკური აღწერის დეტალიზაციის სხვადასხვა ხარისხი. მნიშვნელოვანია მხოლოდ, რომ მოდელის ყველა ბლოკის შესაყვანი და გამოსაყვანი ცვლადები იყოს სრულ შესაბამისობაში, რაც უზრუნველყოფს ერთიანობაში პროცესის მოდელის განტოლებათა ჩაკეტილი სისტემის მიღებას

საუკეთესო შემთხვევაში თითოეული ბლოკის მათემატიკური აღწერა უნდა მოიცავდეს იმ განტოლებებს, რომლის პარამეტრებს წარმოადგენენ ნივთიერებების მხოლოდ ფიზიკო-ქიმიური თვისებები. მაგრამ მივიღოთ ცალკეული ბლოკების ასეთი ფუნდამენტალური აღწერა სხვადასხვა მოვლენების არასაკმარისად შესწავლის პირობებში უმრავლეს შემთხვევაში დღესდღეობით არ არის შესაძლებელი. ეს დაკავშირებულია, როგორც წესი, ბლოკის მათემატიკური აღწერის საგრძნობი გართულებით, რაც თავის თავად იწვევს პროცესის მთელი მათემატიკური მოდელის მკვეთრ გართულებას, და ამის გარდა შეიძლება გამოიწვიოს გარკვეული სიძნელებები გამოთვლისას. ამიტომ თითოეული ბლოკის მათემატიკური აღწერისას ბლოკური პრინციპის პრაქტიკული გამოყენების დროს მისი დეტალიზაციის ამა თუ იმ დონეზე საჭიროა გამოვიყენოთ ემპირიული შეფარდებები და დაშვებები.

კვების პროდუქტების შენახვის პროცესს თან ახლავს რთული თბოფიზიკური

და ბიოქიმიური მოვლენები, რომლებიც ხასიათდებიან ორმაგი დეტერმინირებულ-სქოლასტიკური ბუნებით და დაკავშირებულია დროში და სივრცეში ცვლილებებთან. პროცესში მონაწილე ნივთიერებები იმყოფებიან სხვადასხვა აგრეგატულ მდგომარეობაში, შედგებიან სხვადასხვა კომპონენტებისგან. პროცესის მსვლელობისას განსახილველი არის თითოეულ წერტილში წარმოებს მასის, იმპულსის, ენერჯის გადატანა. როგორც ცნობილია [43], მათემატიკური მოდელირების მეთოდს იყენებენ იმ პროცესების თვისებების კვლევისას, რომლებისთვისაც არსებობს საკმარისად ზუსტი მათემატიკური აღწერა. მათემატიკური აღწერის სისრულის დონისაგან დამოკიდებულებაში გამოჰყოფენ ორ სასაზღვრო შემთხვევას: ა) ცნობილია მოდელირებული პროცესის ყველა ძირითადი მხარის აღმწერი განტოლებათა სრული სისტემა, და ამ განტოლებების პარამეტრების ყველა რიცხვითი მნიშვნელობა; ბ) პროცესის სრული მათემატიკური აღწერა არ არის. შენახვის პროცესის მათემატიკური მოდელირების შემთხვევაში შეგვიძლია გამოვიყენოთ ჰეტეროგენული გარემოს მექანიკის კანონები – უწყვეტი გარემოს მექანიკის და თერმოდინამიკის ფუნდამენტალური კანონების გასაშუალებებული შეფარდებები [86], [65]. ამ კანონების განტოლებებში შედის ბევრი პარამეტრი, რომლის რიცხობრივი მნიშვნელობების დადგენა უმრავლეს შემთხვევაში შესაძლებელია მხოლოდ ექსპერიმენტალური გზით. მაგალითისათვის შეიძლება მოვიყვანოთ შემდეგი ფაქტი. ვაშლის შენახვისათვის აიროვანი გარემოს ოპტიმალური შემადგენლობა დამოკიდებულია ვაშლის ჯიშზე ამ ფაქტის მოდელში ასახვის პრაქტიკულად რეალური გზა არის მოდელის განტოლებებში ემპირიული დამოკიდებულებების და კოეფიციენტების შეტანა.

ქვემოთ მოყვანილია აქტიური იძულებითი ვენტილაციის პირობებში მცენარეული წარმოშობის პროდუქტების შენახვის საკმაოდ ზოგადი მათემატიკური მოდელი. ჩავთვალოთ, რომ პროდუქტის ჩაწყობა საკმაოდ მკვრივია იმისათვის, რომ განხორციელდეს აიროვანი გარემოს (ჰაერის) ფილტრირებული მოძრაობა [8].

ამოცანას განვიხილავთ როგორც არასტაციონარულს ერთგანზომილებიანს (ანალოგიური სამგანზომილებიანი განტოლებების ჩაწერა არ წარმოადგენს სირთულეს, მაგრამ სივრცითი შემთხვევის თვითონ პროცესი გაცილებით რთულია). ამიტომ ყველა საძიებელი სიდიდე (კონცენტრაციები, სიმკვრივეები, ტემპერატურები, სიჩქარე და წნევა) წარმოადგენს დროის  $t$  და კოორდინატის  $x$

ფუნქციებს. ელემენტარულ  $dV$  მოცულობაში ფოროვნობის  $\kappa(x)$  კოეფიციენტის შემთხვევაში ფორების მოცულობა იქნება  $\kappa dV$ , ჩონჩხის (პროდუქტის) მოცულობა –  $(1-\kappa)dV$ .

## 2.2. მოდელის ძირითადი განტოლებები

### 2.2.1. დამოუკიდებელი და დამოკიდებული ცვლადები. პროდუქტის და აიროვანი გარემოს შემადგენლობის აღწერა

სუფთა ეწოდება ნივთიერებას რომლის ყველა მოლეკულა ერთნაირია. პროცესში მონაწილეობს სუფთა ნივთიერებების – კომპონენტების ნარევი. პროდუქტი არის ნარევი, რომლის კომპონენტთა შორის არის ბიოქიმიურ რეაქციებში მონაწილე ნივთიერებები და წყალი. აიროვანი გარემო, რომელშიც მოთავსებულია პროდუქტი, აგრეთვე არის სუფთა ნივთიერებების: ჟანგბადის, ნახშირორჟანგის, აზოტის, წყლის ორთქლის და სხვა კომპონენტების ნარევი. ნარევის ერთ–ერთი უმნიშვნელოვანესი მახასიათებელია მისი შემადგენლობა. უმრავლეს შემთხვევაში ნარევის შემადგენლობა განისაზღვრება ნარევი შემავალი ცალკეული კომპონენტების მასური და მოლური წილების მეშვეობით.

განვიხილოთ ნარევი, რომელიც შედგება  $M_1$  კგ პირველი კომპონენტისაგან,  $M_2$  კგ მეორესაგან და ა.შ. ნარევის საერთო მასური რაოდენობა, რომელიც შედგება  $n$  კომპონენტებისაგან, ტოლი იქნება:

$$M = \sum_{i=1}^n M_i \quad (2.2-1)$$

ყოველი კომპონენტის მასური წილი ეწოდება მოცემული კომპონენტის მასის შეფარდებას მთელი ნარევის მასასთან:

$$m_i = \frac{M_i}{M} \quad (2.2-2)$$

ბუნებრივია,

$$\sum_{i=1}^n m_i = 1. \quad (2.2-3)$$

ხშირად ნარევის შემადგენლობის დადგენა უფრო მოსახერხებელია მოლური



წილების მეშვეობით. ყოველი კომპონენტის მოლური წილი ეწოდება მოცემული კომპონენტის მოლების რაოდენობის შეფარდებას მთელი ნარევის მოლების რაოდენობასთან.

დავუშვათ ნარევი შედგება პირველი კომპონენტის  $N_1$  მოლების რაოდენობიდან, მეორე კომპონენტის  $N_2$  მოლების რაოდენობიდან და ა.შ. ნარევის მოლების რაოდენობა ტოლი იქნება:

$$N = \sum_{i=1}^n N_i \quad (2.2-4)$$

ხოლო  $i$ -ური კომპონენტის მოლური წილი

$$n_i = \frac{N_i}{N} \quad (2.2-5)$$

და აქ, ბუნებრივია,

$$\sum_{i=1}^n n_i = 1. \quad (2.2-6)$$

მასურ და მოლურ წილებს შორის არის კავშირი, რომელიც საშუალებას იძლევა აუცილებლობის შემთხვევაში გამოიხატოს ერთი მეორის მეშვეობით. თუ  $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n$ -ით ავლნიშნავთ ნარევის შესაბამისად პირველი, მეორე და ა.შ. კომპონენტების მოლეკულურ მასებს, მაშინ  $i$ -ური კომპონენტის მასური წილი გამოხატული იქნება მოლური წილების მეშვეობით შემდეგნაირად:

$$m_i = \frac{M_i}{\sum_{k=1}^n M_k} = \frac{N_i \mu_i}{\sum_{k=1}^n N_k \mu_k} = \frac{\frac{N_i}{N} \mu_i}{\sum_{k=1}^n \frac{N_k}{N} \mu_k} = \frac{n_i \mu_i}{\sum_{k=1}^n n_k \mu_k} \quad (2.2-7)$$

თუ ცნობილია მოცემულ ნარევაში შემავალი კომპონენტების მასური წილები, გამოსახულებას ნებისმიერი  $i$ -ური კომპონენტის მოლური  $n_i$  წილისათვის, აქვს სახე:

$$n_i = \frac{N_i}{\sum_{k=1}^n N_k} = \frac{\frac{M_i}{\mu_i}}{\sum_{k=1}^n \frac{M_k}{\mu_k}} = \frac{\frac{M_i}{1}}{\sum_{k=1}^n \frac{M_k}{\mu_k}} = \frac{\frac{m_i}{\mu_i}}{\sum_{k=1}^n \frac{m_k}{\mu_k}} \quad (2.2-8)$$

ნარევის კერძო შემთხვევას წარმოადგენს სხვადასხვა აირების ნარევი – აიროვანი ნარევი. ხშირად შესაძლებელია განვიხილოთ ისეთი აიროვანი ნარევი, რომლის თითოეული კომპონენტი შეიძლება განვიხილოთ, როგორც იდეალური

აირი.

იდეალური აიროვანი ნარევის ქცევის განმსაზღვრელ ძირითად კანონს წარმოადგენს დალტონის კანონი: ყოველი ცალკეული აირი იქცევა აიროვან გარემოში ისე, ვითომ ის მარტო იკავებს ნარევის ტემპერატურის პირობებში ნარევის მთელ მოცულობას. ამ წნევას ეწოდება მოცემული აირის პარციალური წნევა. დალტონის კანონი შეიძლება წარმოდგენილი იყოს შემდეგი ფორმულირებით: იდეალურ აიროვან ნარევი შემაჯავალი აირების პარციალური წნევების ჯამი უდრის ნარევის სრულ წნევას:

$$p = \sum_{k=1}^n p_k \quad (2.2-9)$$

თუ იდეალურ-აიროვანი ნარევის კომპონენტი ნარევის ტემპერატურის პირობებში არის არა თავისი პარციალური წნევის ქვეშ, არამედ ნარევის საერთო წნევის ქვეშ, მაშინ ამ შემთხვევაში მისი მოცულობა  $V_i$ -ის სიდიდის ტოლია, რომელსაც ეწოდება  $i$ -ური აირის დაყვანილი მოცულობა. დაყვანილი მოცულობის შეფარდებას ნარევის  $V$  მოცულობასთან ეწოდება მოცემული კომპონენტის მოცულობითი წილი:

$$v_i = \frac{V_i}{V} \quad (2.2-10)$$

დაყვანილი მოცულობა განისაზღვრება ბოილ-მარიოტის კანონით

$$pV_i = p_iV,$$

ამ ტოლობების შეჯამებით და მუდმივი მამრავლების გამოტანით

$$p \sum_{k=1}^n V_k = V \sum_{k=1}^n p_k$$

(2.2-9)-ის გამოყენებით ვღებულობთ

$$V = \sum_{k=1}^n V_k \quad \text{ან} \quad \sum_{k=1}^n v_k = 1 \quad (2.2-11)$$

თუ აიროვანი ნარევი შედგება პირველი კომპონენტების  $N_1$  მოლეზის რაოდენობიდან, მეორე კომპონენტის  $N_2$  მოლეზის რაოდენობიდან და ა.შ., მაშინ  $i$ -ური აირის მოცულობითი წილი უდრის:

$$v_i = \frac{V_i}{V} = \frac{V_i}{\sum_{k=1}^n V_k} = \frac{N_i \mu_i v_i}{\sum_{k=1}^n N_k \mu_k v_k} = \frac{N_i}{\sum_{k=1}^n N_k} = n_i \quad (2.2-12)$$

რადგან აიროვან გარემოში შემავალი, ერთი და იგივე  $p$  წნევამდე და ერთი და იგივე  $T$  ტემპერატურამდე დაყვანილი ყველა აირისათვის მოცულობა ტოლია  $\mu_k v_k = const$ . ასეთი სახით, იდეალურ აიროვანი ნარევისათვის კომპონენტის მოცულობითი წილი უდრის მის მოლურ წილს.

ჩვენ განვასხვავებთ პროცესის 7 მდგენელს (რომლებიც აღინიშნება რიცხვითი ინდექსით).

პროდუქტში:

- გლუკოზა  $C_6H_{12}O_6$  – ინდექსი 2;
- წყალი  $H_2O$  – ინდექსი 3;
- ყველაფერი დანარჩენი – ინდექსი 1.

გამავალ ჰაერში:

- წყლის ორთქლი  $H_2O$  – 4;
- ჟანგბადი  $O_2$  – 5;
- ნახშირბადის ორჟანგი  $CO_2$  – 6;
- ყველა დანარჩენი აირები – 7.

ჩავთვალოთ, რომ ყველა მდგენელის საერთო წნევა არის –  $p(t, x)$ , ჰაერის ტემპერატურა –  $T(t, x)$ , მისი სიჩქარე –  $v(t, x)$ , პროდუქტის ტემპერატურა –  $T'(t, x)$ .

თუ კონტეინერის მოცულობაა  $V$ , ხოლო ჩაწყობილი პროდუქციის ფოროვნებაა  $\kappa$ , მაშინ მოცულობა, რომელსაც იკავებს აიროვანი გარემო იქნება  $\kappa V$ , ხოლო პროდუქტის მოცულობაა –  $(1-\kappa)V$ . პროცესის თითოეული მდგენელისათვის დაყვანილი სიმკვრივე განისაზღვრება, როგორც საერთო მოცულობაში მდგენელის მასის შეფარდება ამ მოცულობის სიდიდესთან:

$$\rho_i = \frac{M_i}{V}, \quad i = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 \quad (2.2-13)$$

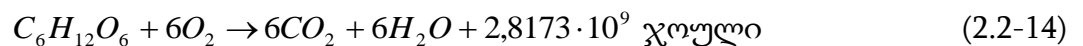
მათემატიკურ მოდელში საძიებელი სიდიდეები იქნება მდგენელების დაყვანილი სიმკვრივეების (7 დამოკიდებული ცვლადი სიდიდე), ტემპერატურების (2 დამოკიდებული ცვლადი სიდიდე), წნევის (1 დამოკიდებული ცვლადი სიდიდე), ფილტრაციის დროის (1 დამოკიდებული ცვლადი სიდიდე) არასტაციონარული ველების (დამოუკიდებელი ცვლადები – დრო  $t$  და სივრცითი კოორდინატა  $x$ ). სულ გვაქვს 11 საძიებელი ფუნქცია. მათი პოვნისათვის საჭიროა შესაბამისად 11

განტოლება.

### 2.2.2. ბიოქიმიური პროცესის აღწერის განტოლებები

სუნთქვა – არის ცოცხალ ორგანიზმში მუდმივად მიმდინარე ფიზიოლოგიური პროცესების ერთობლიობა, რომლის შედეგად ის შთანთქავს გარემოდან ჟანგბადს, ხოლო გამოყოფს ნახშირჟანგს და წყალს. სუნთქვა უზრუნველყოფს აირმიმოცვლას, რომელიც აუცილებელია ნივთიერებათა ცვლაში – ნებისმიერი ცოცხალი ორგანიზმისათვის დამახასიათებელ თვისებაში. სუნთქვას საფუძვლად უდევს ორგანული ნივთიერებების – ნახშირწყლების, ცხიმების და ცილების დაჟანგვის პროცესები. სუნთქვის შედეგად თავისუფლდება ენერგია, რომელიც უზრუნველყოფს ორგანიზმის სიცოხლისუნარიანობას.

მცენარეების სუნთქვა ხორციელდება ძირითადად ნახშირწყლების ხარჯზე. უმარტივესი შაქრის (გლუკოზის) მიხედვით ეს პროცესი შეიძლება გამოვსახოთ შემდეგი განტოლებით:



სხვადასხვა მცენარეს და ერთი და იგივე მცენარის სხვადასხვა ნაწილისაც კი სუნთქვის ინტენსიურობა შეიძლება ჰქონდეთ ძალიან განსხვავებული. ყველაზე ინტენსიურია ეს პროცესი მცენარეების ახალგაზრდა, სწრაფად მზარდ ნაწილებში – ემბრიონალური ქსოვილებით მდიდარი ღეროების და ფესვების ბოლოები, გასაშლელი კვირტები, გაღვივებული მარცვლები. მცენარეების ახალგაზრდა ნაწილების ინტენსიური სუნთქვა იწვევს დღეღამეში ცოცხალი წონის 1%-ის დანაკარგს. მცენარეების სხვა ნაწილებისათვის ეს დანაკარგი, როგორც წესი 10–20–ჯერ ნაკლებია. სუნთქვისას გამოიყოფა სითბოს მნიშვნელოვანი რაოდენობა, მაგრამ ტემპერატურის მომატება თხელფირფიტოვან, ჰაერით განიავებულ ორგანოებში, მაგალითად, ფოთლებში, სრულიად უმნიშვნელოა და შეიძლება დაფიქსირდეს მხოლოდ დიდი ძალისხმევით. მაგრამ, როგორც აჩვენებს ცდები, თბოიზოლირებული კედლების მქონე ჭურჭელში მოთავსებული ფოთლები,

სუნთქვისას გამოთავისუფლებული სითბოს შედეგად ფოთლების ტემპერატურამ შეიძლება მოიმატოს რამოდენიმე ათეული გრადუსით. გარე ტემპერატურის მომატებით სუნთქვა მკვეთრად ძლიერდება, ყოველ  $10^{\circ}$ -ით მომატებაზე 2–3 ჯერ. უფრო მაღალ ტემპერატურებზე გადასვლისას ( $20-25^{\circ}\text{C}$ ) სუნთქვის გაძლიერება წარმოებს უფრო და უფრო ნელა, შემდგომ მისი ინტენსივობა მცირდება და დაახლოებით  $45-50^{\circ}\text{C}$  მიღწევის შემდეგ, უმეტეს შემთხვევაში სუნთქვა წყდება. დაბალი ტემპერატურების დროს სუნთქვა მკვეთრად მცირდება, მაგრამ მცირე დონით შეიძლება შენარჩუნდეს ნულზე დაბალი ტემპერატურის დროსაც. მცენარის სიცვიემდეგ ნაწილებში, მაგალითად, ფოთლოვანი ხეების კვირტებში ან წიწვოვანების წიწვებში, სუნთქვა შეიმჩნევა ძლიერი ყინვების დროსაც.

სუნთქვის ინტენსივობა დამოკიდებულია აგრეთვე პლაზმის გაწყლიანებაზე. ასე, მაგალითად მშრალი მარცვლების სუნთქვა სუსტია, მაგრამ ტენიანობის გაზრდისას მათი სუნთქვის ინტენსივობა სწრაფად იზრდება.

ხილში და ბოსტნეულში ისევე, როგორც სხვა ცოცხალ ქსოვილებში, მიმდინარეობს სუნთქვის პროცესი, რომლის შედეგადაც გამოიყოფა სითბო და იხარჯება მშრალი ნივთიერება. ეს უკანასკნელი წარმოადგენს ამ პროდუქტების შენახვისას ეგრეთ წოდებულ ბუნებრივ კლებას. მცენარეული მასის მცირე თბოგამტარობის გამო გაძლიერებული სუნთქვისას გამოყოფილი დიდი რაოდენობის სითბომ, შეიძლება გამოიწვიოს ტემპერატურის გაზრდა, თვითგახურება, მიკროორგანიზმების გაძლიერებული გამრავლება და ხილისა და ბოსტნეულის დიდი რაოდენობის გაფუჭება.

ხილისა და ბოსტნეულის სუნთქვის ინტენსივობის განმსაზღვრელი მთავარი ფაქტორი არის ტემპერატურა. ტემპერატურის ამაღლებასთან ერთად სუნთქვა მატულობს, შემცირებისას – სუსტდება. ამიტომ ხილისა და ბოსტნეულის შენახვისათვის საუკეთესოა ისეთი პირობები, რომლებიც უზრუნველყოფენ  $0^{\circ}\text{C}$  ახლოს ტემპერატურას. მაგრამ ზოგიერთი პროდუქციისათვის შენახვის ოპტიმალური ტემპერატურა არის  $+3^{\circ}\text{C}$  და  $+7^{\circ}\text{C}$  ინტერვალში (კარტოფილისათვის  $+3^{\circ}\text{C}$ , ხილისათვის, ციტრუსებისათვის  $+5^{\circ}\text{C}$ ).

ტემპერატურასთან ერთად ხილისა და ბოსტნეულის სუნთქვის ინტენსივობის მნიშვნელოვან ფაქტორებს წარმოადგენს ჰაერის ფარდობითი ტენიანობა და მასში ნახშირჟანგის შედგენილობა. ჰაერის ფარდობითი ტენიანობის გარკვეულ სიდიდეზე

მეტად მომატება იწვევს სუნთქვის გაძლიერებას და ხილისა და ბოსტნეულის გაფუჭებას. ჰაერში ნახშირჟანგის შედგენილობის გაზრდა კი, პირიქით, იწვევს სუნთქვის ინტენსივობის შემცირებას და ხელს უწყობს ხილისა და ბოსტნეულის უკეთეს შენახვას. სუნთქვის შესუსტების ხელშემწყობი პირობები აგრეთვე ხელს უწყობენ იმ მიკროორგანიზმების დაკნინებას, რომლებიც იწვევენ ამ პროდუქტების გაფუჭებას.

ხილისა და ბოსტნეულის სუნთქვის ინტენსივობაზე დიდ გავლენას ახდენს აგრეთვე მათი ფიზიოლოგიური მდგომარეობა, განსაკუთრებით სიმწიფის დონე. დაუმწიფებელი ხილის და ბოსტნეულის სუნთქვისას მასში გროვდება ანაერობული სუნთქვის პროდუქტები – ეთილის სპირტი და აცეტალდეჰიდი. პროდუქტის არომატის გაუმჯობესება და შეფერილობის შეცვლა დამწიფების დროს ამ ნივთიერებების დაგროვებასთან მჭიდროდ არის დაკავშირებული.

ჩავთვალოთ რომ ბიოქიმიური პროცესები აღწერება აერობული სუნთქვის (2.2-14) განტოლებით.

თუ ავლნიშნავთ  $i$ -ური მდგენელის მოლურ სიმკვრივეს  $\rho_i''$ -ით (მოლეკულების რიცხვი მოცულობის ერთეულში), მაშინ (2.2-14)-დან ვღებულობთ:

$$\frac{\partial \rho_5''}{\partial t} = 6 \frac{\partial \rho_2''}{\partial t}; \quad \frac{\partial \rho_3''}{\partial t} = -6 \frac{\partial \rho_2''}{\partial t}; \quad \frac{\partial \rho_6''}{\partial t} = -6 \frac{\partial \rho_2''}{\partial t} \quad (2.2-15)$$

$i$ -ური მდგენელის მასურ სიმკვრივესა, მისი მოლური სიმკვრივეს და მოლეკულარულ  $\mu_i$  მასას შორის არსებობს ასეთი დამოკიდებულება:

$$\rho_i = \mu_i \rho_i'' \quad (2.2-16)$$

### 2.2.3. თბო- და მასაცვლის აღწერის განტოლებები

კვების პროდუქტების უმრავლესობა არის დიდი რაოდენობის წყლის შემცველი ტენიანი სხეული. წყალი შედის ცხოველური და მცენარეული ქსოვილების შემადგენლობაში და წარმოადგენს ადამიანის საკვების აუცილებელ შემადგენელ ნაწილს. მაგრამ წყლის ჭარბი რაოდენობა ამცირებს საკვები პროდუქტების კვებით ღირებულებას, მნიშვნელოვნად ამცირებს მათ ტრანსპორტირებას და შეიძლება

გამოიწვიოს პროდუქტების გაფუჭება წყლიან გარემოში სხვადასხვა მიკროორგანიზმების მოქმედების გამო.

ტენიანი მასალის მდგომარეობა განისაზღვრება მისი ტემპერატურით და ტენიანობით. ტენიანი მასალების თვისებები ხასიათდებიან სითბო- და მასაცვლითი მახასიათებლებით.

პ.ა.რეზინდერის მიერ შემოთავაზებული კლასიფიკაციის მიხედვით ტენის მყარ ჩონჩხთან კავშირის ყველა ფორმა იყოფა სამ ჯგუფად:

1) ტენის ქიმიური კავშირი ზუსტ რაოდენობრივ შეფარდებებში. ქიმიურად ბმული წყალი განსაკუთრებით მჭიდროდ არის დაკავშირებული მასალებთან და შეიძლება იყოს მოცილებული მხოლოდ ქიმიური ზემოქმედებით და განსაკუთრებით ინტენსიური თბური დამუშავებით (გამოწრობით).

2) ტენის ფიზიკო-ქიმიური კავშირი სხვადასხვა, სუსტად განსაზღვრული შეფარდებებით.

კავშირის ამ ფორმას შეესაბამება

ა) ადსორბციულად დაკავშირებული ტენი, რომელიც ძალური ველით დაკავებული არის მიცელების – კოლოიდური ნაწილაკების გარე და შიგა ზედაპირზე. მნიშვნელოვანი დისპერსიულობის გამო კოლოიდური სხეულებს აქვთ უზარმაზარი შიგა ზედაპირი, და ამის შედეგად მნიშვნელოვანი თავისუფალი ზედაპირული ენერგია, რომლის ხარჯზე წარმოებს წყლის ადსორბციული დაბმა. სხეულთან მჭიდროდ დაკავშირებული ადსორბციული წყლის მოცილება დაკავშირებულია ენერგიის შესაბამის დანახარჯთან.

ბ) ოსმოსურად დაჭერილი ნესტი, რომელიც არის ჩაკეტილი უჯრედში. ეს ტენი არის თავისუფალი იმ გაგებით, რომ მას შეესაბამება დაკავშირების ძალიან მცირე ენერგია. ოსმოსურად დაკავშირებული ტენი დიფუნდირებს სხეულის შიგნით სითხის სახით უჯრედების კედლებში უჯრედის შიგნით და გარეთ კონცენტრაციების სხვაობის წყალობით.

3) ტენის ფიზიკო-ქიმიური კავშირი განუსაზღვრელი რაოდენობით. ამ კავშირს შეესაბამება მაკრო ( $10^{-7}$ -ზე დიდი რადიუსის) და მიკროკაპილარებში ( $10^{-7}$ -ზე ნაკლები რადიუსის) არსებული ტენი. კაპილარული ტენი წარმოადგენს თავისუფალ ტენს, გადაადგილდება სხეულში სითხის სახით (როგორც წესი სხეულის ცენტრალური შრეებიდან აორთქლების ზონამდე), და აგრეთვე ორთქლის სახით

(აორთქლების ზონიდან გარეთ მშრალი შრის გავლით).

მასალასთან ტენის კავშირზე გადამწყვეტ გავლენას ახდენს მასალის დისპერსულობა და მისი ფიზიკო-ქიმიური თვისებები. რაც მეტია მასალის დისპერსიულობა, მით მეტია მასში მჭიდროდ დაკავშირებული ტენი. ამასთან ფოროვანი მასალებისათვის დიდი მნიშვნელობა აქვს კაპილარების რადიუსის სიდიდესაც. რაც ნაკლებია კაპილარების რადიუსი, მით ნაკლებია ორთქლის წნევა სითხის მენისკზე და მით მეტი ენერგია უნდა დაიხარჯოს კაპილარებიდან წყლის მოცილებაზე.

ტენიანი პროდუქტის ზემოქმედება აიროვან გარემოსთან შეიძლება წარმოებდეს ორი მიმართულებით:

ა) თუ ორთქლის პარციალური წნევა პროდუქტის ზედაპირთან  $p_{pr}$  მეტია აიროვან გარემოში ორთქლის პარციალურ წნევაზე  $p_v$  ( $p_{pr} > p_v$ ), მიმდინარეობს აორთქლების პროცესი;

ბ) თუ  $p_{pr} < p_v$ , პროდუქტი დატენიანდება ირგვლივ აიროვან გარემოდან ორთქლის შთანთქმის ხარჯზე.

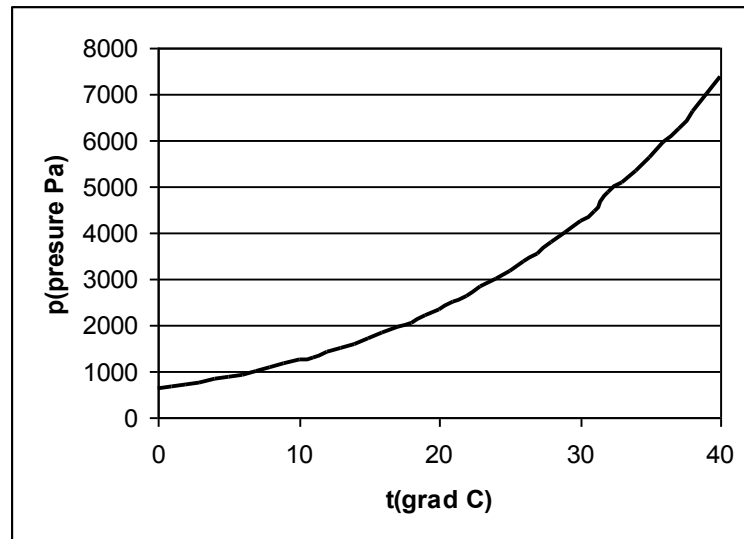
თუ  $p_{pr} = p_v$ , მაშინ ადგილი აქვს დინამიურ წონასწორობას. პროდუქტის დინამიური წონასწორობის მდგომარეობის შესაბამის ტენიანობას ეწოდება წონასწორული ტენიანობა. წონასწორული ტენიანობის სიდიდე დამოკიდებულია აიროვან გარემოში ორთქლის პარციალურ წნევაზე  $p_v$ , ან მის ტენიანობაზე  $\varphi = \frac{p_v}{p_{sv}}$

( $p_{sv}$ –ნაჯერი ორთქლის წნევა მოცემულ ტემპერატურაზე). რადგან წონასწორობის მდგომარეობაში  $p_{pr} = p_v$ , მაშინ აიროვანი გარემოს ტენიანობა ტოლია პროდუქტის ზედაპირთან ორთქლის ფარდობითი დრეკადობის  $\frac{p_{pr}}{p_{sv}}$ .

თუ წონასწორობის მდგომარეობა ტენიან პროდუქტსა და ტენიან აიროვან გარემოს შორის მიღწეულია მასალიდან წყლის აორთქლების შედეგად, მაშინ ჰაერის ტენიანობის პროდუქტის წონასწორული ტენიანობისაგან მასალის და ჰაერის ერთი და იგივე ტემპერატურის დროს დამოკიდებულების დამახასიათებელ მრუდს ეწოდება დესორბციის (გაუწყლოვების) იზოთერმა. თუ ეს მრუდი მიღებულია მასალის დატენიანების შედეგად, მაშინ მას ეწოდება სორბციის იზოთერმა. სორბციის



და დესორბციის იზოთერმები ერთმენეთს არ ემთხვევა და შეიმჩნევა სორბციული ჰისტერეზისი. ჰისტერეზისი მოწმობს იმას, რომ თუ მასალას გაუწყლოვების შემდეგ დავატენიანებთ, იგივე წონასწორული ტენიანობის მისაღებად საჭიროა შევქმნათ აიროვანი გარემოს უფრო მაღალი ტენიანობა. პირველ მიახლოებაში ვარაუდობენ, რომ კაპილარულ-ფოროვანი სხეულების სორბციული ჰესტერეზისის მიზეზს წარმოადგენს მათში ჰაერის არსებობა, რომელიც ხდება სხეულის კაპილარებში კაპილარული ტენის მოცილებისას და ადსორბირდება კაპილარების კედლებზე. შემდგომი დატენიანებისას წარმოებს არასრული დასველება, და იმისათვის, რომ დავძლიოთ ჰაერის წინააღმდეგობა, აუცილებელია ორთქლის პარციალური წნევის, ე.ი. ჰაერის ტენიანობის გაზრდა.



სურ.2.1. დამოკიდებულება ნაჯერი ორთქლის წნევასა  $p_n$ , პა და მის ტემპერატურას  $t^{\circ}\text{C}$  შორის

მათემატიკურ მოდელში წყალი განიხილება ორ ფაზაში (შესაბამისად ორი მდგენელი): სითხე პროდუქტში და ორთქლი გამავალ ჰაერში. პროდუქტიდან დროის ერთეულში ფართობის ერთეულიდან აორთქლებული წყლის რაოდენობა:

$$m = \beta(p_{pr} - \varphi p_{sv}) \quad (2.2-17)$$

სადაც  $\beta$  – წყლის აორთქლების კოეფიციენტი, წმ/მ;  $p_{pr}$  – წყლის ორთქლის წნევა პროდუქტის ზედაპირის ტემპერატურისას, პა;  $\varphi$  – ფარდობითი ტენიანობა,  $p_{sv}$  – აიროვანი გარემოს ტემპერატურის შესაბამისი ნაჯერი წყლის ორთქლის წნევა, პა. შემდგომში ჩვენ გამოვიყენებთ ზედაპირის კოეფიციენტს  $\xi$  – მოცულობის ერთეულზე მოსული აორთქლების ფართობი.

სითბოს გასაშუალებელი ნაკადები მოიცემა შემდეგი სახით

$$\begin{aligned}\vec{q}' &= -\lambda' \vec{\nabla} T' \\ \vec{q}'' &= -\lambda'' \vec{\nabla} T''\end{aligned}\quad (2.2-18)$$

ნაგულისხმებია ის, რომ მყარი ფოროვანი ჩონჩხის  $\lambda'$  და ფორებში აირის  $\lambda''$  თბოგამტარობის ეფექტური კოეფიციენტები დამოკიდებულია არა მარტო ფაზების შესაბამისი მასალების თბოგამტარობის კოეფიციენტებზე, არამედ ნარევის სტრუქტურაზეც.

ფაზებს შორის თბოგადაცემის ინტენსიურობა მოიცემა ნიუტონის კანონის განტოლებით:

$$Q = \alpha(T' - T''), \quad (2.2-19)$$

სადაც  $\alpha$  – პროდუქტსა და აიროვანი გარემოს შორის თბოგადაცემის კოეფიციენტია, რომელიც განისაზღვრება ნარევის სტრუქტურით, ფიზიკური თვისებებით და ფაზების ფარდობითი მოძრაობით.

კოეფიციენტები  $\alpha, \lambda', \lambda''$  მოიცემა ექსპერიმენტების ან დამატებითი თეორიული მონაცემების საფუძველზე.

#### 2.2.4. უწყვეტობის (მასის შენახვის) განტოლებები

როგორც უკვე ავღნიშნეთ, შენახვის ერთ–ერთი ფუნდამენტალური კანონია მასის შენახვის კანონი. მასის ბალანსური შეფარდებები ჩაიწერება ყოველი მდგენელისათვის გარკვეულ ფიქსირებულ სივრცეში,  $dS$  ზედაპირით შემოსაზღვრული უსასრულოდ მცირე  $dV$  მოცულობაში. ამ დროს ითვალისწინებენ მასის მიმოცვლას არა მარტო გარედან (გამოყოფილი მოცულობის მიმართ), არამედ შესაბამისი მიმოცვლა  $dV$  მოცულობის შიგნით. უწყვეტი მოძრაობის არეში ყოველი მდგენელის უწყვეტობის დიფერენციალური განტოლებები გამოხატავენ მასის შენახვის კანონს ( $m$  – მდგენელების რაოდენობა)[65]:

$$\frac{\partial \rho_i}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho_i \vec{v}_i) = \sum_{j=1}^m J_{ji} \quad (j = 1, \dots, m), \quad (2.2-20)$$

სადაც  $J_{ji}$  სიდიდე ახასიათებს ნარევის მოცულობის ერთეულში დროის ერთეულის განმავლობაში მასის გადაცემას  $j$ - ური მდგენელიდან  $i$  – ურ

მდგენელში (ან პირიქით  $i$  – ურიდან  $j$  – ურში; როცა  $J_{ji} < 0$ ). მასის შენახვის კანონიდან გამომდინარე სხვადასხვა ფიზიკო-ქიმიური გარდაქმნების შემთხვევაში გვაქვს:  $J_{ij} = -J_{ji}$  (ფორმალურად,  $J_{ii} = 0$ ).

დავწეროთ განტოლება (2.2–20) შენახვის პროცესის 7 მდგენელისათვის. მშრალი ნივთიერების უძრავი მდგენელისათვის გლუკოზის გარეშე ( $i = 1$ ), გვექნება:

$$\frac{\partial \rho_1}{\partial t} = 0 \quad (2.2-21)$$

იმ დაშვებაში, რომ ბიოქიმიური რეაქციის (2.2–20) სიჩქარე დამოკიდებულია რეაგენტების მოლურ სიმკვრივეზე და პროდუქტის ტემპერატურაზე, გლუკოზისათვის ( $i = 2$ ) გვექნება:

$$\frac{\partial \rho_2}{\partial t} = \mu_2 \frac{\partial \rho_2^\mu}{\partial t} = \mu_2 f(\rho_2^\mu, \rho_5^\mu, T') \quad (2.2-22)$$

პროდუქტში არსებული წყლისათვის ( $i = 3$ ):

$$\frac{\partial \rho_3}{\partial t} = -\xi m - 6 \frac{\mu_3}{\mu_2} \frac{\partial \rho_2}{\partial t} \quad (2.2-23)$$

აქ გამოყენებულია – ზედაპირის კოეფიციენტი  $\xi$  – მოცულობის ერთეულზე მოსული აორთქლების ფართობი, და აგრეთვე დამოკიდებულებები (2.2-15), (2.2-16).

დანარჩენი მდგენელი მიეკუთვნება აიროვან გარემოს და არის მოძრავი. წყლის ორთქლისათვის ( $i = 4$ ):

$$\frac{\partial \rho_4}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_4 v)}{\partial x} = \xi m \quad (2.2-24)$$

გამავალი ჰაერის ჟანგბადისათვის ( $i = 5$ ):

$$\frac{\partial \rho_5}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_5 v)}{\partial x} = 6 \frac{\mu_5}{\mu_2} \frac{\partial \rho_2}{\partial t} \quad (2.2-25)$$

გამავალი ჰაერის ნახშირჟანგისათვის ( $i = 6$ ):

$$\frac{\partial \rho_6}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_6 v)}{\partial x} = -6 \frac{\mu_6}{\mu_2} \frac{\partial \rho_2}{\partial t} \quad (2.2-26)$$

ბოლო ორი დამოკიდებულების ჩასაწერად გამოყენებულია (2.2-15) და (2.2-16).

და ბოლოს გამავალი ჰაერის დანარჩენი აირებისათვის ( $i = 7$ ):

$$\frac{\partial \rho_7}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_7 v)}{\partial x} = 0 \quad (2.2-27)$$

აიროვანი მდგენელების უწყვეტობის განტოლებების მისაღებად გამოყენებულია იზეოტროპული ფოროვანი გარემოს თვისება, რომ კვეთის გამჭოლობა წერტილში არ არის დამოკიდებული კვეთის მიმართულების არჩევაზე და ფოროვნების ტოლია [8].

### 2.2.5. ენერჯიის (ტემპერატურების) განტოლებები

როგორც უკვე ავღნიშნეთ, ჰაერის მოძრაობის სიჩქარე ძალიან მცირეა და შეგვიძლია უგულებელვყოთ პროცესის ყველა მდგენელის კინეტიკურ ენერჯია და იმპულსური ურთიერთქმედება.

ჩავთვალოთ, რომ როგორც პროდუქტის, ასევე აიროვანი გარემოს შინაგანი ენერჯია ადიტიურია მასში შემავალი მდგენელების მასის მიხედვით

$$\begin{aligned} (\rho u)' &= \sum_{i=1}^3 \rho_i u_i \\ (\rho u)'' &= \sum_{i=4}^7 \rho_i u_i \end{aligned} \quad (2.2-28)$$

მდგენელების შინაგან ენერჯიაში ჩვენ ვგულისხმობთ მხოლოდ ატომების მოძრაობის სითბურ ენერჯიას, რომელიც დამოკიდებულია ტემპერატურაზე  $u_i(T)$ . მივიღებთ რა ჰემმარიტად მუდმივი სითბოტევადობის მიახლოებას  $u_i(T)$ –თვის, რომელიც ამართლებს მცირე უწონასწორობის შემთხვევაში,

$$u_i(T) = u_{i0} + c_i(T - T_0) \quad (2.2-29)$$

ამ მიახლოების გარკვეულ დასაბუთებად გამოდგება გამოსაკვლევ პროცესში მდგენელების ტემპერატურების ცვლილების მცირე დიაპაზონი.

ვუშვებთ რა დაშვებას კონდენსირებული (პროდუქტის) და აიროვანი ფაზების საზღვრებში ლოკალური თერმოდინამიკური წონასწორობის შესახებ, შემოვიღოთ ცალკე ფაზების ტემპერატურები – პროდუქტის ტემპერატურა  $T'(t, x)$  და აიროვანი გარემოს ტემპერატურა  $T''(t, x)$ . იმის გარდა, რომ პროცესის ადეკვატური აღწერისას საჭიროა მინიმუმ ორი ტემპერატურის არსებობა, [65]–ში აღინიშნება, რომ ნარევის საერთო ტემპერატურის ცნება ფაზების ტემპერატურების არათანაბრობის დროს არის არაკორექტული, რადგან თითოეული ფაზის ლოკალური წონასწორობის მიუხედავად ნარევი არ არის წონასწორული. ამიტომ შიდა ენერჯიის და ენტროპიის,

როგორც ყველა ნარევისათვის საერთო ტემპერატურის ფუნქციები  $T' \neq T''$ -ს შემთხვევაში კარგავს ფიზიკურ აზრს და იწვევს ნარევის ქცევის ზოგიერთი თავისუფლების ხარისხის იგნორირებას.

პროდუქტის მდგენელებისათვის (კონდენსირებული სითხე ან მყარი სხეული) მივიღებთ

$$u_i(T') = u_{i0}(T_0) + c_i(T' - T_0), \quad i = 1, 2, 3 \quad (2.2-30)$$

აიროვანი გარემოს მდგენელებისათვის

$$u_i(T'') = u_{i0}(T_0) + r_i(T_0) + c_i(T'' - T_0), \quad i = 4, 5, 6, 7 \quad (2.2-31)$$

სადაც  $r_i(T_0)$ - ფაზური გადასვლის სითბო, ჩვენ შემთხვევაში  $3 \rightarrow 4$  გადასვლისას, ე.ი. წყლის აორთქლებისას.

ფაზების ენერჯის განტოლებების შედგენისას აუცილებელია მონაცემები იმის შესახებ, ფაზური გარდაქმნის ან ქიმიური რეაქციის სითბოს რომელი ნაწილი იხარჯება ან შთანთქმება გადასვლაში ან რეაქციაში მონაწილე ცალკეული მდგენელის მიერ. ეს ამოცანა დაკავშირებულია მდგენელებს შორის ფიზიკო-ქიმიური პროცესის ენერგეტიკული ეფექტის გაყოფასთან და ყოველთვის მოითხოვს ამოხსნას დამატებითი მოსაზრებებიდან გამომდინარე ნებისმიერი ორტემპერატურული მოდელისათვის. აირისა და კონდენსირებული ფაზის ნარევისათვის უნდა მივიღოთ, რომ კონდენსირებული ფაზის არსებითად უფრო მაღალი სითბოგამტარობის გამო ფაზური გადასვლის ან ქიმიური რეაქციის სითბოს ხარჯავს ან შთანთქმავს კონდენსირებული ფაზა [65]. ჩვენ შემთხვევაში ჩავთვლით, რომ წყლის აორთქლების სითბოს სრულად ხარჯავს პროდუქტი და სუნთქვის სითბოსაც აგრეთვე სრულად შთანთქმავს პროდუქტი.

მიღებული დებულებების და დაშვებების გათვალისწინებით ენერჯების განტოლებები მიიღებენ სახეს

ჰაერისათვის

$$\frac{\partial(\rho u)''}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u \cdot v)''}{\partial x} = \frac{\partial(pv)}{\partial x} + \lambda'' \frac{\partial^2 T''}{\partial x^2} + \rho g_x v + \xi \alpha (T' - T'') + \xi m (u_{30} + c_3 T') + 6 \frac{\mu_5}{\mu_2} c_5 T'' - 6 \frac{\mu_6}{\mu_2} \frac{\partial \rho_2}{\partial t} c_6 T' \quad (2.2-32)$$

პროდუქტისათვის

$$\frac{\partial(\rho u)'}{\partial t} = \lambda' \frac{\partial^2 T'}{\partial x^2} - \xi \alpha (T' - T'') - \zeta m (u_{30} + c_3 T') + \psi \frac{\partial c_2''}{\partial t} - 6 \frac{\mu_5}{\mu_2} \frac{\partial \rho_2}{\partial t} c_5 T'' + 6 \frac{\mu_6}{\mu_2} \frac{\partial \rho_2}{\partial t} c_6 T' \quad (2.2-33)$$

სადაც  $\rho' = \sum_{i=1}^3 \rho_i$  – პროდუქტის საშუალო სიმკვრივე;

$\rho = \sum_{i=4}^7 \rho_i$  – გამავალი ჰაერის საშუალო სიმკვრივე;

$(\rho u)' = (\sum_{i=1}^3 \rho_i c_i) T'$  – პროდუქტის მასის ერთეულის შინაგანი ენერგია;

$(\rho u)'' = (\sum_{i=4}^7 \rho_i c_i) T''$  – ჰაერის მასის ერთეულის შინაგანი ენერგია,

$\lambda', \lambda''$  – პროდუქტის და ჰაერის თბოგამტარობის კოეფიციენტებია;

$c_i$  – კუთრი მასური თბოტევადობა;

$\alpha$  – პროდუქტსა და ჰაერს შორის თბოგადაცემის კოეფიციენტი.

მიღებული სასაზღვრო ამოცანის რიცხვითი ამონახსნი მიიღება წრფეთა მეთოდით, როდესაც სივრცული კოორდინატის წარმოებულები აპროქსიმირდებიან მათი სასრულ-სხვაობიანი ანალოგებით. ამის შემდეგ ვღებულობთ კოშის ამოცანას ჩვეულებრივ დიფერენციალურ განტოლებათა სისტემისათვის, რომელიც ამოიხსნება რუნგე-კუტას მეთოდით.

## 2.2.6. მოძრაობის განტოლებები

ტრანსპორტირებისას მწვანის აწყობენ მუყაოს კოლოფებში და ტკეპნიან, ამის შედეგად მიიღება მყარი სხეული, რომელშიც არის ჰაერით სავსე ერთმანეთთან დაკავშირებული სიცარიელების (ფორების) სისტემა. წნევათა სხვაობის შემთხვევაში ასეთ ფოროვან გარემოში წარმოიქმნება ფილტრაციული მოძრაობა. ასეთ მაკროსკოპულ მოძრაობაში ვლინდება მთლიანად მოძრაობისათვის დამახასიათებელი და ერთი ან რამოდენიმე არხისათვის არასამართლიანი ჯამური სტატისტიკური კანონზომიერებები. წარმოქმნილი სიტუაცია დამახასიათებელია ერთმანეთთან სუსტად დაკავშირებული ბევრი ელემენტის მქონე სისტემებისათვის. ასეთი სისტემების აღწერა შესაძლებელია, როგორც გარკვეული უწყვეტი გარემო,

რომლის თვისებები არ გამოიხატება უშუალოდ შემადგენელი ელემენტების თვისებების მეშვეობით, არამედ არის გარემოს საკმაოდ დიდი მოცულობის გასაშუალებებული მახასიათებლები [8].

ფილტრაციის თეორიის თვალსაზრისით ფოროვანი გარემოს მყარი ჩონჩხის მნიშვნელობა არის, უპირველეს ყოვლისა, გეომეტრიული: ის შემოსაზღვრავს სივრცის იმ არეს, რომელშიც მოძრაობს გაზი. ფილტრაციის თეორიაში ფოროვანი გარემოს თვისებები აღიწერება გეომეტრიული მახასიათებლების გარკვეული ნაკრებით. ფოროვანი გარემოს აგებულების არაერთგვაროვნების გამო სრულად მისი აღწერა შეუძლებელია პარამეტრების არცერთი სასრული ნაკრებით; მაგრამ, ფილტრაციის თეორიის მიზნებისათვის საკმარისია გასაშუალებებული მახასიათებლების შეზღუდული რაოდენობა.

ფოროვანი გარემოს უმნიშვნელოვანესი მახასიათებელია – მისი ფოროვნება  $\kappa$ , რომელიც უდრის გამოყოფილ ელემენტში ფორების მოცულობის შეფარდებას ელემენტის საერთო მოცულობასთან:

$$\kappa = \frac{V''}{V} \quad (2.2-34)$$

შეფარდება (2.2-34) განსაზღვრავს მოცემული ელემენტის საშუალო ფოროვნებას. ფოროვანი გარემოში რაღაც წერტილის არჩევით და მის ირგვლივ უფრო მცირე მოცულობის ელემენტების გამოყოფით, შეგვიძლია განვსაზღვროთ ლოკალური ფოროვნება, როგორც ფოროვნების საზღვარი მოცულობის მოჭიმვისას.

ფოროვნების გარდა ზოგჯერ შემოაქვთ გამჭოლობის ცნება, რომელიც განისაზღვრება მოცემულ წერტილში გამავალი ყველა კვეთისათვის, როგორც კვეთში ფორების ფართობის შეფარდება კვეთის საერთო ფართობთან. მოცემულ წერტილში გამჭოლობა არ არის დამოკიდებული კვეთის მიმართულების არჩევაზე და ფოროვნების ტოლია [8].

ფილტრაციის თეორიის ძირითადი დამოკიდებულება – ფილტრაციის კანონი – კავშირს ამყარებს ფილტრაციის სიჩქარის ვექტორსა და წნევის იმ ველს შორის, რომელიც იწვევს ფილტრაციულ მოძრაობას. ფილტრაციული მოძრაობისათვის, რომლისთვისაც არსებითი არ არის ინერციის ძალები, სითხის ან აირის ინერციული თვისებების მახასიათებელი სიმკვრივე გამოირიცხება განმსაზღვრელი პარამეტრების რიცხვიდან. თეორეული და ექსპერიმენტალური წინაპირობებიდან მიღებულია

უინერციო ფილტრაციული მოძრაობის განტოლება

$$\vec{v} = -\frac{k}{\mu} \cdot \vec{\nabla} p \quad (2.2-35)$$

ამ შეფარდებას ეწოდება დარსის ფილტრაციის კანონი (იმ ფრანგი მეცნიერის საპატივცემულოდ, რომელმაც გამოიყვანა ის ექსპერიმენტალურად 1856 წელს).

სიდიდეს  $k = \frac{d^2}{f(\kappa)}$  ეწოდება შეღწევადობა. შეღწევადობას აქვს ფართობის

განზომილება; ის არ არის დამოკიდებული სითხისა და აირის თვისებებზე და წარმოადგენს ფოროვანი გარემოს სუფთა გეომეტრიულ მახასიათებელს. დანარჩენი სიდიდეებია:  $\mu$  – სითხის ან აირის სიბლანტე;  $d$  – ფოროვანი არხის საშუალო ზომა.

შეღწევადობის ემპირიული მონაცემების უმრავლესობა ეკუთვნის ქანებს, რომლებისთვის ის გამოისახება საკმაოდ მცირე სიდიდეებით. ასე მსხვილმარცვლიანი ქვიშაქვისთვის შეღწევადობა შეადგენს  $10^{-10} - 10^{-11}$  მ<sup>2</sup>, ხოლო მკვრივი ქვიშაქვისთვის – დაახლოებით  $10^{-12}$  მ<sup>2</sup>. ამის გამო ნავთობის მოპოვების პრაქტიკაში გავრცელება ჰპოვა შეღწევადობის ერთეულმა დარსიმ ( $1 \text{ დ} = 1,02 \cdot 10^{-10} \text{ მ}^2$ ).

ანიზოტროპიული ფოროვანი გარემოსთვის ნებისმიერ ორთოგონალურ დეკარტეს კოორდინატთა სისტემაში ( $x_1, x_2, x_3$ ) დარსის კანონს აქვს სახე:

$$v_i = -\frac{k_{ij}}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x_j} \quad (2.2-36)$$

სადაც ტენზორი  $k_{ij}$  – აგრეთვე დამოკიდებულია ფოროვანი გარემოს მხოლოდ გეომეტრიული მახასიათებლებზე, მის კომპონენტებს აქვთ ფართობის განზომილება და მას ეწოდება შეღწევადობის ტენზორი. შეღწევადობის ტენზორი არის სიმეტრიული  $k_{ij} = k_{ji}$ .

შენახვის პროცესის მათემატიკურ მოდელში აიროვანი გარემოს მოძრაობის გამტოლების სახით გამოიყენება დარსის კანონი:

$$v = -\frac{k}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (2.2-37)$$

სადაც  $k$  – ფოროვანი გარემოს შეღწევადობაა, მ<sup>2</sup>;  $\mu$  – აირის სიბლანტე.

### 2.2.7. აიროვანი გარემოს მდგომარეობის განტოლებები



კლაიპერონის განტოლება იდეალური აირების  $V$  მოცულობის მქონე ნარევის  $i$ -ური კომპონენტისათვის, ჩაიწერება შემდეგი სახით:

$$p_i V = M_i R_i T'' \quad (2.2-38)$$

სადაც  $R_i$  –  $i$ -ური კომპონენტის აიროვანი მუდმივა.

თუ ჩავიწერთ ამ განტოლებებს აიროვანი ნარევის ყველა კომპონენტისათვის და მათი მარჯვენა და მარცხენა მხარეების შეჯამებით მივიღებთ:

$$V \sum_{k=4}^7 p_k = T'' \sum_{k=4}^7 M_k R_k$$

დალტონის კანონის თანახმად  $\sum_{k=4}^7 p_k = p$  მივიღებთ

$$pV = T'' \sum_{k=4}^7 M_k R_k$$

მეორეს მხვრივ საერთოდ იდეალურ-აიროვანი გარემოსათვის კლაიპერონის განტოლება შეგვიძლია ჩავწეროთ შემდეგი სახით:

$$pV = MRT''$$

ბოლო ორი შეფარდებიდან ჩანს, რომ ნარევის აიროვანი მუდმივა უდრის:

$$R = \frac{\sum_{k=4}^7 M_k R_k}{M} = \sum_{k=4}^7 m_k R_k \quad (2.2-39)$$

სისტემის დასკვნითი განტოლებაა აიროვანი გარემოს (იდეალური აირების ნარევის) მდგომარეობის განტოლება:

$$\rho = \frac{p}{RT} \quad (2.2-40)$$

### 2.3. საწყისი და სასაზღვრო განტოლებები

მათემატიკური მოდელის სრული აღწერისათვის აუცილებელია სასაზღვრო და საწყისი პირობების დასმა, მომლებიც განისაზღვრებიან შენახვის რეჟიმების კონკრეტული მაჩვენებლებით.

მათემატიკური მოდელის სრული აღწერისათვის აუცილებელია სასაზღვრო და საწყისი პირობების დასმა, რომლებიც განისაზღვრებიან შენახვის რეჟიმების

კონკრეტული მაჩვენებლებით.

დროის საწყისს მომენტში  $t = 0$  აუცილებელია დავსვათ

ა) პროცესის ყველა მდგენელის დაყვანილი სიმკვრივების განაწილება:

$$\rho_i(0, x) = \rho_{i0}(x), \quad i = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7$$

ტემპერატურების განაწილება

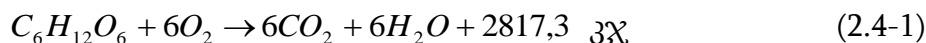
$$T'(0, x) = T'_0(x); \quad T''(0, x) = T''_0(x)$$

ბ) სიმკვრივების განაწილების მაგივრად შეიძლება მივცეთ სრული წნევის განაწილება  $p = p(0, x)$ , პროდუქტის საწყისი მასა და აიროვანი გარემოს შემადგენლობა.

პროდუქტის მდგენელებისათვის უწყვეტობის განტოლებები (2.2-21), (2.2-22), (2.2-23) არ მოიცავენ წარმოებულებს სივრცითი  $x$  კოორდინატის მიხედვით, ამიტომ შესაბამისი მდგენელები ვერ შევლიან სასაზღვრო პირობებში.

#### 2.4. მოდელის განტოლებების სრული სისტემა

აერობული სუნთქვის განტოლება:



უწყვეტობის განტოლება მშრალი ნივთიერების უძრავი მდგენელისათვის გლუკოზის გარეშე ( $i = 1$ ):

$$\frac{\partial \rho_1}{\partial t} = 0 \quad (2.4-2)$$

უწყვეტობის განტოლება გლუკოზისათვის ( $i = 2$ ) გვექნება:

$$\frac{\partial \rho_2}{\partial t} = \mu_2 \frac{\partial \rho_2''}{\partial t} = \mu_2 f(\rho_2'', \rho_5'', T') \quad (2.4-3)$$

უწყვეტობის განტოლება პროდუქტში არსებული წყლისთვის ( $i = 3$ ):

$$\frac{\partial \rho_3}{\partial t} = -\xi m - 6 \frac{\mu_3}{\mu_2} \frac{\partial \rho_2}{\partial t} \quad (2.4-4)$$

უწყვეტობის განტოლება წყლის ორთქლისათვის ( $i = 4$ ):

$$\frac{\partial \rho_4}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_4 v)}{\partial x} = \xi m \quad (2.4-5)$$

უწყვეტობის განტოლება გამავალ ჰაერში მყოფი ჟანგბადისათვის ( $i = 5$ ):

$$\frac{\partial \rho_5}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_5 v)}{\partial x} = 6 \frac{\mu_5}{\mu_2} \frac{\partial \rho_2}{\partial t} \quad (2.4-6)$$

უწყვეტობის განტოლება გამავალ ჰაერში მყოფი ნახშირორჟანგისათვის ( $i = 6$ ):

$$\frac{\partial \rho_6}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_6 v)}{\partial x} = -6 \frac{\mu_6}{\mu_2} \frac{\partial \rho_2}{\partial t} \quad (2.4-7)$$

უწყვეტობის განტოლება ჰაერში მყოფი დარჩენილი აირებისათვის ( $i = 7$ ):

$$\frac{\partial \rho_7}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_7 v)}{\partial x} = 0 \quad (2.4-8)$$

ენერგიის შენახვის განტოლება პროდუქტისათვის:

$$\frac{\partial(\rho u)'}{\partial t} = \lambda' \frac{\partial^2 T'}{\partial x^2} - \xi \alpha (T' - T'') - \xi m (u_{30} + c_3 T') + \psi \frac{\partial c_2''}{\partial t} - 6 \frac{\mu_5}{\mu_2} \frac{\partial \rho_2}{\partial t} c_5 T'' + 6 \frac{\mu_6}{\mu_2} \frac{\partial \rho_2}{\partial t} c_6 T' \quad (2.4-9)$$

ენერგიის შენახვის განტოლება გამავალი ჰაერისათვის:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho u)''}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u \cdot v)''}{\partial x} = \frac{\partial(pv)}{\partial x} + \lambda'' \frac{\partial^2 T''}{\partial x^2} + \rho g_x v + \xi \alpha (T' - T'') + \xi m (u_{30} + c_3 T') + \\ 6 \frac{\mu_5}{\mu_2} c_5 T'' - 6 \frac{\mu_6}{\mu_2} \frac{\partial \rho_2}{\partial t} c_6 T' \end{aligned} \quad (2.4-10)$$

აიროვანი გარემოს მოძრაობის განტოლება

$$v = - \frac{k}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (2.4-11)$$

აიროვანი გარემოს მდგომარეობის განტოლება

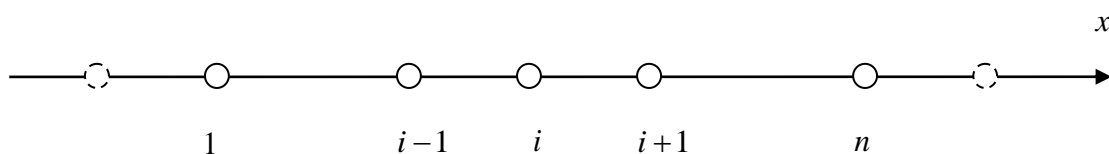
$$\rho = \frac{p}{RT} \quad (2.4-12)$$

### თავი 3. მათემატიკურ მოდელზე გამოთვლითი ექსპერიმენტირება

#### 3.1 რიცხვითი ალგორითმი და პროგრამა პერსონალური კომპიუტერისათვის

მიღებული სასაზღვრო ამოცანის წრფეების მეთოდის საფუძველზე [9,15] მიახლოებითი ამოხსნისათვის დამუშავებული იქნა რიცხვითი ალგორითმი და პროგრამა პერსონალური კომპიუტერისათვის. ამოხსნის სივრცითი არე წარმოდგენილია კვანძების სასრული რაოდენობით (სურ.3.1.1.), დროის არე ამოხსნისას რჩება უწყვეტი. მაგალითად, ორი ცვლადის ერთი  $\rho_2(x,t)$  ფუნქციის მაგივრად გვექნება ერთი ცვლადის  $\rho_{2i}(t), i=1, \dots, n$  ფუნქციების  $n$  რაოდენობა. სივრცითი  $x$  კოორდინატის მიხედვით წარმოებულები იცვლება სასრულ-სხვაობიანი ანალოგებით. მაგალითისათვის დავწეროთ წყლის ორთქლის უწყვეტობის განტოლების (2.2-4)-ის ანალოგი

$$\frac{\partial \rho_{4i}}{\partial t} + \frac{(\rho_4 v)_{i+1} - (\rho_4 v)_{i-1}}{2 \cdot \Delta x} = \xi m_i$$



სურ.3.1.1. გაფართოების სივრცითი არის დისკრეტიზაცია

რათა ჩავწეროთ სასაზღვრო პირობები ამოცანის აიროვანი მდგენელებისათვის, შემოგვაქვს ფიქტიური დამატებითი სასაზღვრო კვანძები (სურ.3.1.1). ამ კვანძებში მოიცემა აიროვანი მდგენელების სასაზღვრო მნიშვნელობები.

გარდაქმნების შედეგად ვღებულობთ კომის ამოცანას არაწრფივი ჩვეულებრივი

დიფერენციალური განტოლებათა სისტემისათვის საკვანძო წერტილებში საპოვნო ფუნქციების მნიშვნელობების მიმართ. კოშის ამოცანა აიხსნება რუნგე-კუტას მეექვსე რიგის მეთოდით სტანდარტული პროგრამის გამოყენებით.

მათემატიკურ მოდელზე გამოთვლითი ექსპერიმენტების ჩასატარებლად დამუშავებული ალგორითმის საფუძველზე დაიწერა ფორტრან-პროგრამა პერსონალური კომპიუტერისათვის. კონკრეტული გაანგარიშებისას კვანძების რაოდენობა შერჩეული იყო  $n \in (10;100)$  დიაპაზონიდან.

### 3.2. შენახვის პროცესზე შესასვლელთან აიროვანი გარემოს

#### ტემპერატურის გავლენის კვლევა

აიროვანი გარემოს ტემპერატურა შესასვლელთან წარმოადგენს ერთ-ერთ მნიშვნელოვან რეგულირებად პარამეტრს, რომელიც გავლენას ახდენს შენახვის პროცესზე. დაბალი ტემპერატურის მქონე აიროვანი გარემო პროდუქტის სიღრმეში შთანთქავს სუნთქვისას გამოყოფილ სითბოს, დაბლა წევს პროდუქტის ტემპერატურას, ამცირებს სუნთქვის ინტენსიურობას. ამავე დროს აირის შესასვლელთან ტემპერატურის დაწვევისას საჭიროა დავაკვირდეთ, რომ ის არ დაიწიოს დასაშვებზე დაბლა. განსაკუთრებით ეს საშიშია საწყის მონაკვეთზე.

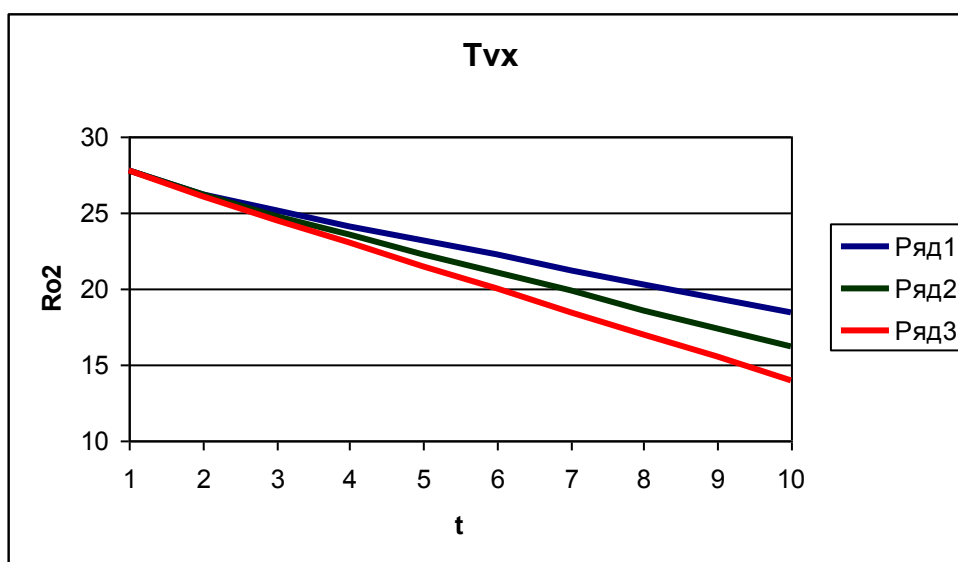
შესასვლელთან აიროვანი გარემოს ტემპერატურა ახდენს რთულ გავლენას შენახვისას მიმდინარე ცალკეულ პროცესებზე, – თბოგადაცემა პროდუქტსა და აირს შორის; პროდუქტში ტენის აორთქლება; პროდუქტის და აიროვანი გარემოს შემადგენლობის ცვლილება, როგორც დროის, აგრეთვე სივრცითი კოორდინატის მიხედვით.

სურ.3.2.1.–ზე ნაჩვენებია პროდუქტში გლუკოზის შემცველობის დროში ცვლილება აიროვანი გარემოს შესასვლელთან სამი სხვადასხვა ტემპერატურისათვის –  $-5^{\circ}\text{C}$ ,  $0^{\circ}\text{C}$  და  $5^{\circ}\text{C}$ . დანარჩენი რეჟიმული პარამეტრების სიდიდეები საბაზისოდ რჩებოდა. შესასვლელთან ტემპერატურის ზრდასთან ერთად შეიმჩნევა გლუკოზის ხარჯვის მომატება. გლუკოზის საწყისი დაყვანილი  $27,78$  კგ/მ<sup>3</sup> სიმკვრისათვის შენახვის 100 საათის შემდეგ გლუკოზის დაყვანილი სიმკვრივე შეადგენდა – როცა აიროვანი გარემოს ტემპერატურა შესასვლელთან იყო  $-5^{\circ}\text{C}$  –  $18$  კგ/მ<sup>3</sup>; როცა  $0^{\circ}\text{C}$  –  $16,5$  კგ/მ<sup>3</sup>; როცა  $5^{\circ}\text{C}$  –  $14$  კგ/მ<sup>3</sup>. უნდა ავლნიშნოთ, რომ გლუკოზის შემცველობის ცვლილების სურათი იცვლებოდა დროში და პრაქტიკულად მეორდებოდა ყველა

წერტილში შენახვის მონაკვეთის მთელ სიგრძეზე.

იგივე არ შეიძლება ითქვას შესასვლელთან აიროვანი გარემოს ხვადასხვა ტემპერატურების დროს პროდუქტში წყლის შემცველობის ცვლილების შესახებ. სურ.3.2.2.–ზე ნაჩვენებია პროდუქტში წყლის დაყვანილი სიმკვრივის დროში ცვლილება შესასვლელთან აიროვანი გარემოს სამი სხვადასხვა ტემპერატურისათვის (ზედა სურათი –  $-5^{\circ}\text{C}$ , შუა სურათი –  $0^{\circ}\text{C}$ , ქვედა სურათი –  $5^{\circ}\text{C}$ ). ოთხი მრუდი სურათებზე შეესაბამება, შენახვის მონაკვეთის სიგრძეზე თანაბრად დანაწილებულ, ოთხ წერტილს. ყველაზე ინტენსიურად პროდუქტში ტენის დანაკარგი მიმდინარეობს საწყისს მონაკვეთზე, აიროვანი გარემოს უფრო დაბალი ტემპერატურის მიუხედავად.

სურ.3.2.3.–ზე ნაჩვენებია აიროვან გარემოში წყლის ორთქლის დაყვანილი სიმკვრივის დროში ცვლილება შესასვლელთან აიროვანი გარემოს სამი სხვადასხვა ტემპერატურისათვის (ზედა სურათი –  $-5^{\circ}\text{C}$ , შუა სურათი –  $0^{\circ}\text{C}$ , ქვედა სურათი –  $5^{\circ}\text{C}$ ). შენახვის პირველი 20 საათის განმავლობაში მიმდინარეობს აიროვან გარემოში წყლის ორთქლის რაოდენობის გაზრდა, შემდეგ კი შემცირება. ამის შემდეგ ორთქლის რაოდენობა სტაბილიზირდება და პრაქტიკულად არ იცვლება. ამავე დროს ორთქლის რაოდენობა გარკვეულ წილად აღემატება ორთქლის რაოდენობას გამავალ ჰაერში. ორთქლის დამყარებული რაოდენობა ნაკლებად არის დამოკიდებული გასასვლელზე აიროვანი გარემოს ტემპერატურაზე. აირის მოძრაობის მიმართულებით ორთქლის რაოდენობა მასში იზრდება. კიდევ ერთხელ ავღნიშნოთ, რომ ოთხი მრუდი სურათებზე შეესაბამება, შენახვის მონაკვეთის სიგრძეზე თანაბრად დანაწილებულ, ოთხ წერტილს (რიგი 1 – არის შესასვლელთან, რიგი 4 – გასასვლელთან).



სურ.3.2.1. გლუკოზის დაყვანილი სიმკვრივის დროში ცვლილება შესასვლელთან აიროვანი გარემოს სამი ტემპერატურისათვის (რიგი 1 -  $-5^{\circ}\text{C}$ ; რიგი 2 -  $0^{\circ}\text{C}$ ; რიგი 3 -  $5^{\circ}\text{C}$ )

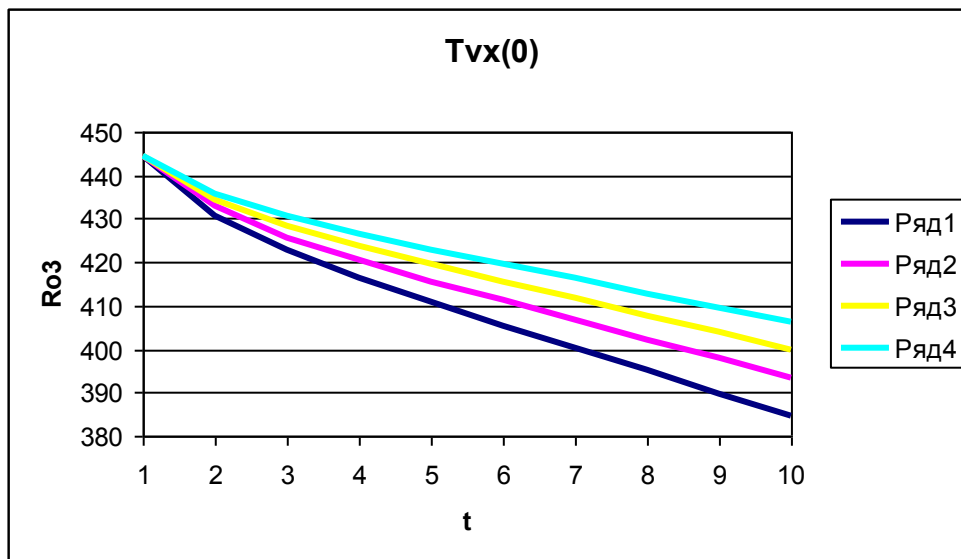
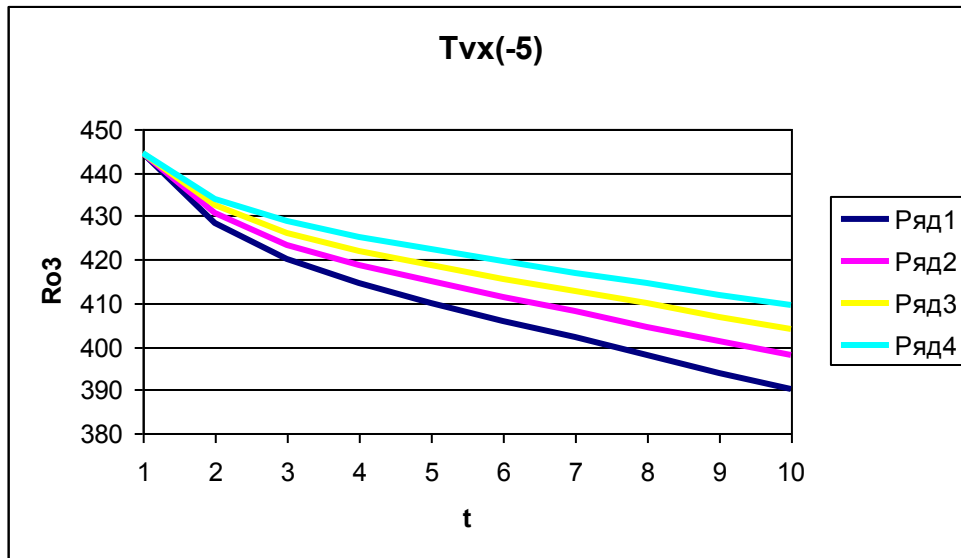
სურ.3.2.4.–დან გამომდინარეობს, რომ ჟანგბადის შემცველობა პრაქტიკულად არ იცვლება, შეიმჩნევა აიროვან გარემოში მისი შემცველობის უმნიშვნელო შემცირება არხის გასწვრივ მოძრაობისას (1 რიგის მრუდიდან 2 რიგის მრუდიდან გადასვლა). შესასვლელთან აიროვანი გარემოს ტემპერატურის ამაღლებისას სუნთქვის ინტენსიურობის გაზრდის ხარჯზე ჟანგბადის შემცველობა გარკვეულ წილად იწევს.

სურ.3.2.5.–ს თანახმად, ჟანგბადისაგან განსხვავებით, აიროვან გარემოში ნახშირბადის ორჟანგის შემცველობა იზრდება არხის გასწვრივ მოძრაობისას (1 რიგის მრუდიდან 2 რიგის მრუდზე გადასვლა). დროთა განმავლობაში ნახშირორჟანგის შემცველობა არხების წერტილებში დამყარდება ერთ სიდიდეზე.

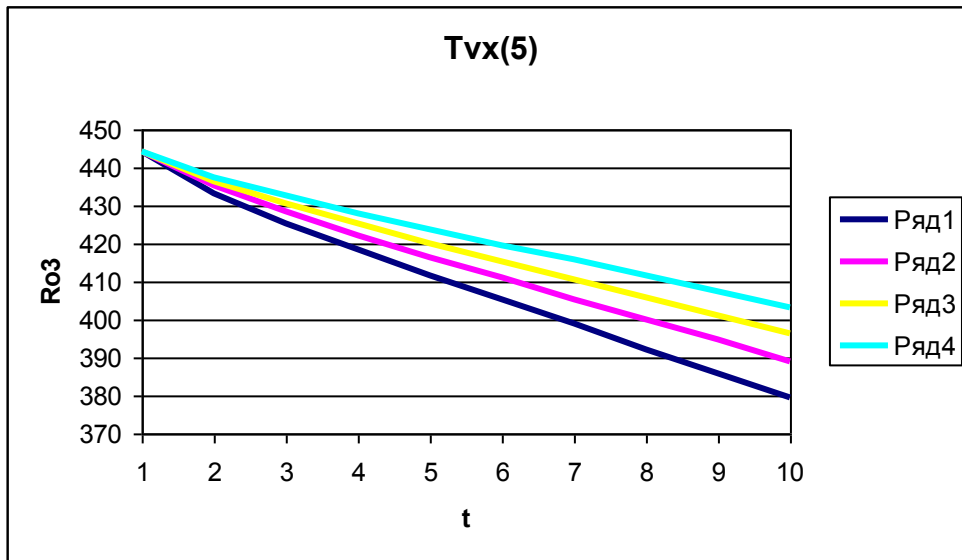
მნიშვნელოვანია თვალყური ვადევნოთ, როგორ იცვლება პროდუქტის ტემპერატურული ველი არხის შესასვლელთან აიროვანი გარემოს ტემპერატურისგან დამოკიდებულებაში. როგორც უკვე ავლინებთ, საწყის პირობებში პროდუქტის ტემპერატურა ყველა წერტილში მიღებულია  $20^{\circ}\text{C}$ -ის ტოლად. უფრო ცივი გამავალი ჰაერით გაცივების ხარჯზე პროდუქტის ტემპერატურა მცირდება და შენახვის 30 საათის შემდეგ სტაბილიზირდება. როგორც ჩანს სურ.3.2.ბ–დან, პროდუქტის დამყარებული ტემპერატურა განისაზღვრება შემავალი ჰაერის ტემპერატურით,

მაგრამ პროდუქტის და გამავალი ჰაერის ტემპერატურებს შორის რჩება გარკვეული სხვაობა. ეს სხვაობა იზრდება შესასვლელთან აიროვანი გარემოს ტემპერატურის გაზრდისას.

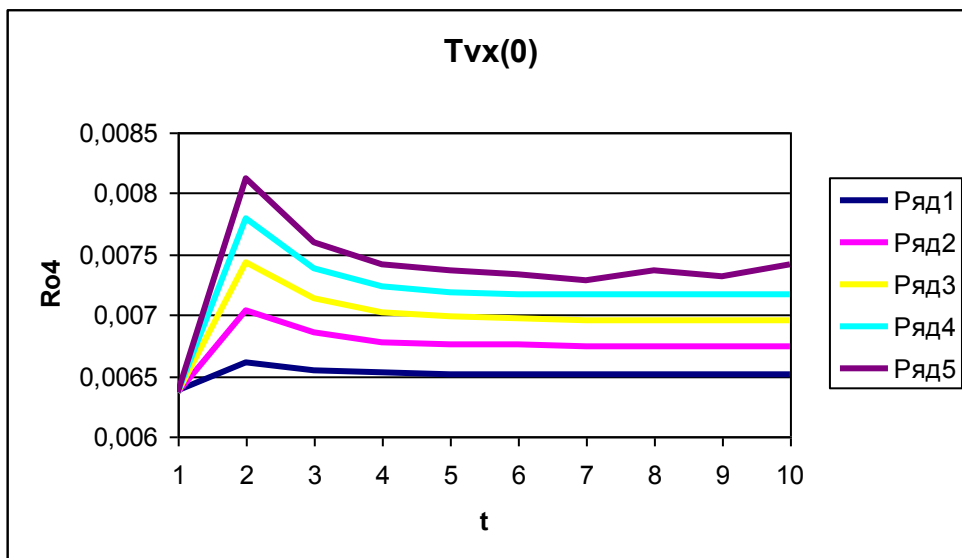
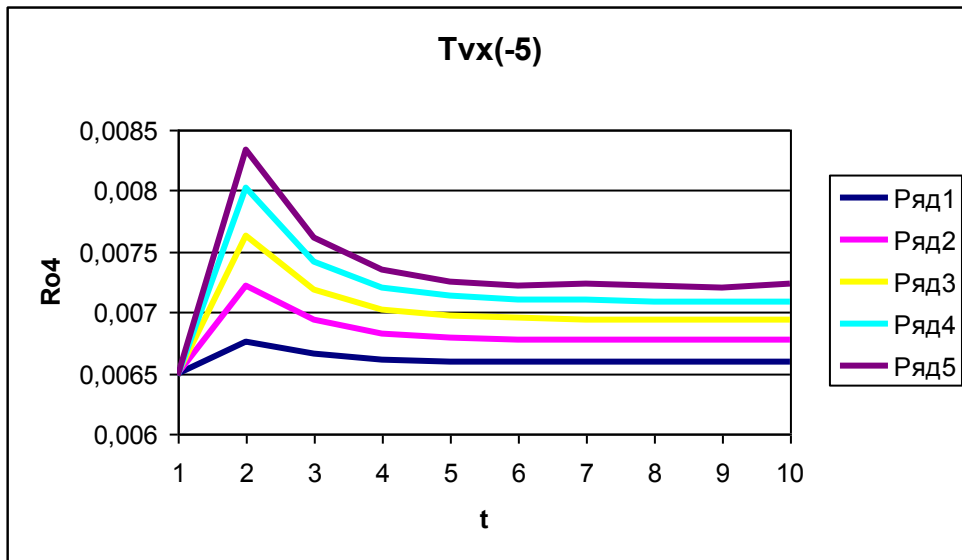
აიროვანი გარემოს ტემპერატურა აგრეთვე სტაბილიზირდება და პრაქტიკულად უტოლდება ტემპერატურას გასასვლელზე (სურ.3.2.7.). ეს მოწმობს იმას, რომ, შერჩეული რეჟიმული პარამეტრების შემთხვევაში აირის ხარჯი საკმაოდ მაღალია იმისათვის, რომ თავისი ტემპერატურის საგრძნობლად გაზრდის გარეშე აართვას პროდუქტს სუნთქვისას გამოყოფილი სითბო.

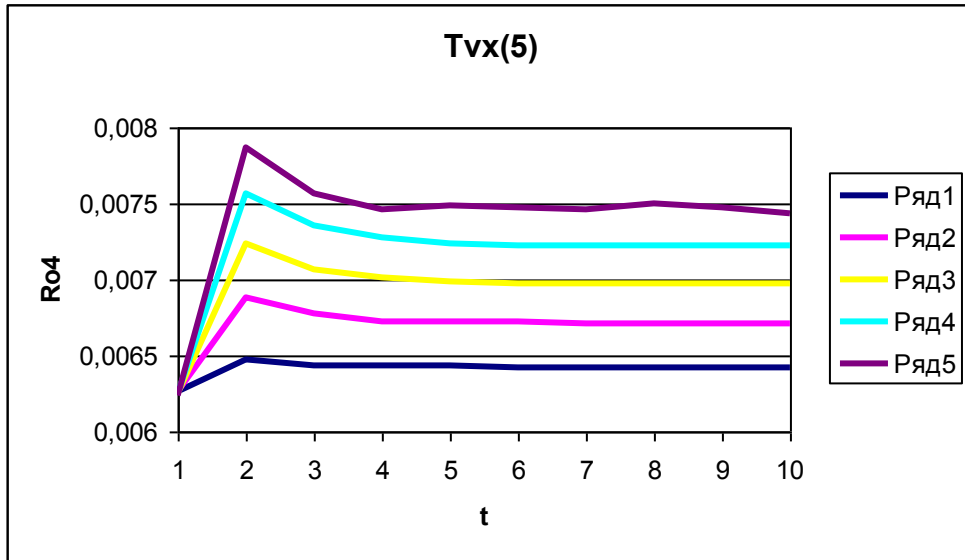




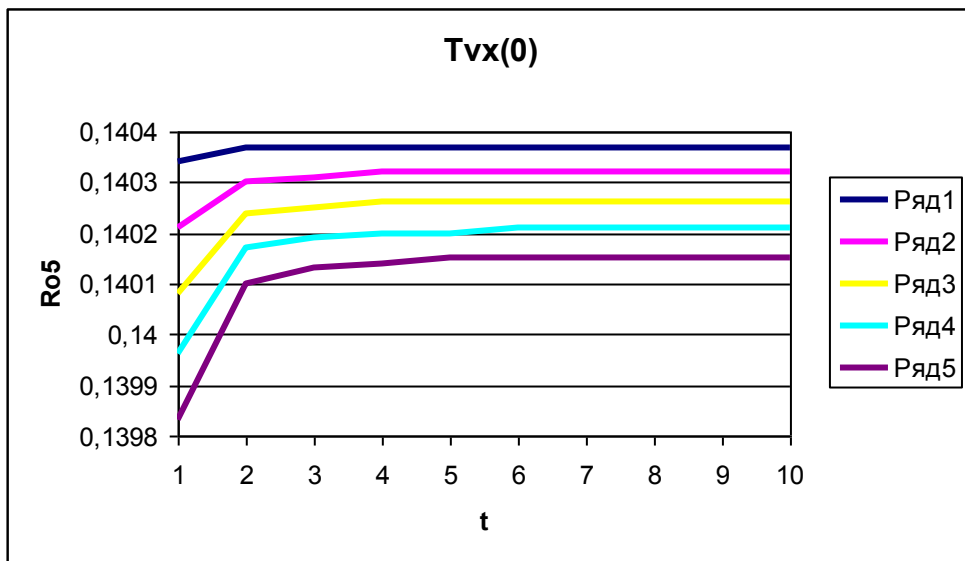
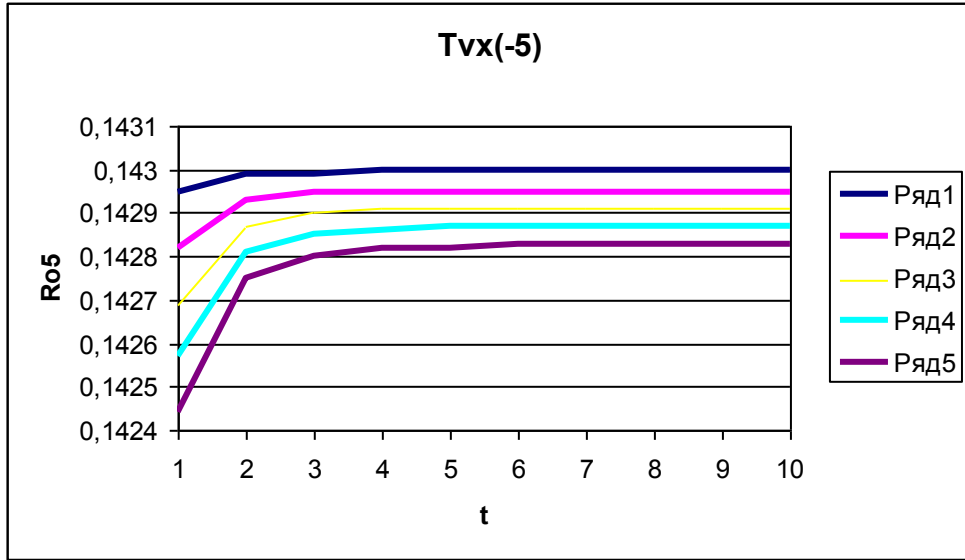


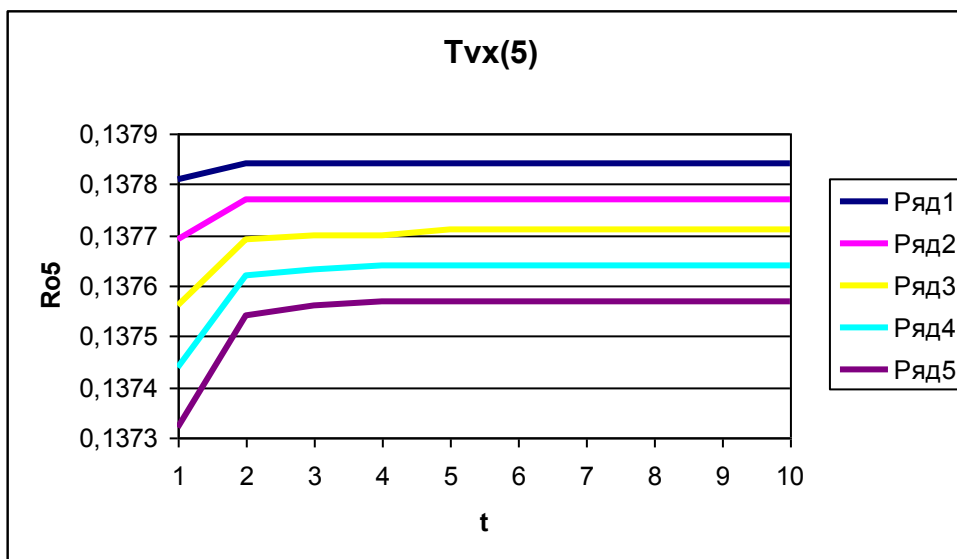
სურ.3.2.2. პროდუქტში წყლის დაყვანილი სიმკვრივის დროში ცვლილება შესასვლელთან აიროვანი გარემოს სამი ტემპერატურისათვის (ზედა სურათი –  $-5^{\circ}\text{C}$ , შუა სურათი –  $0^{\circ}\text{C}$ , ქვედა სურათი –  $5^{\circ}\text{C}$ ).



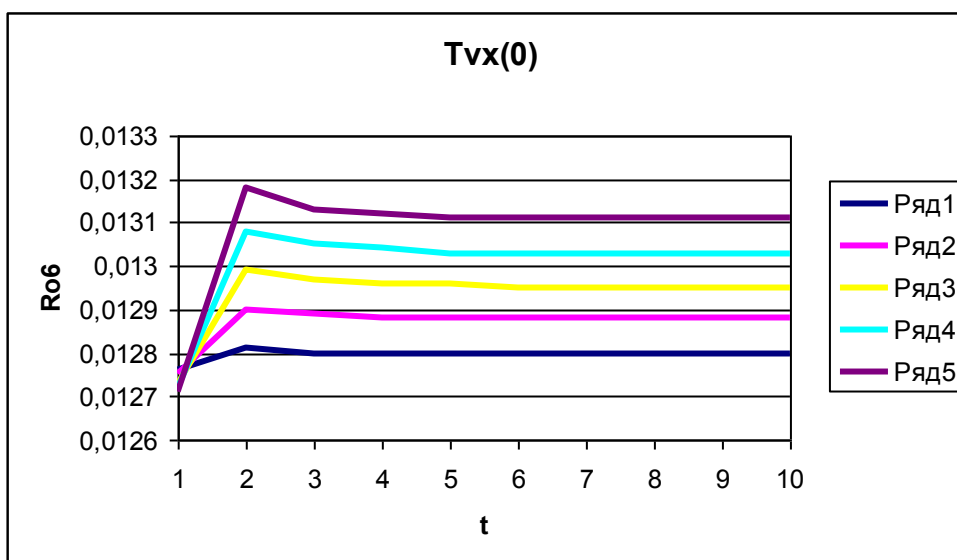
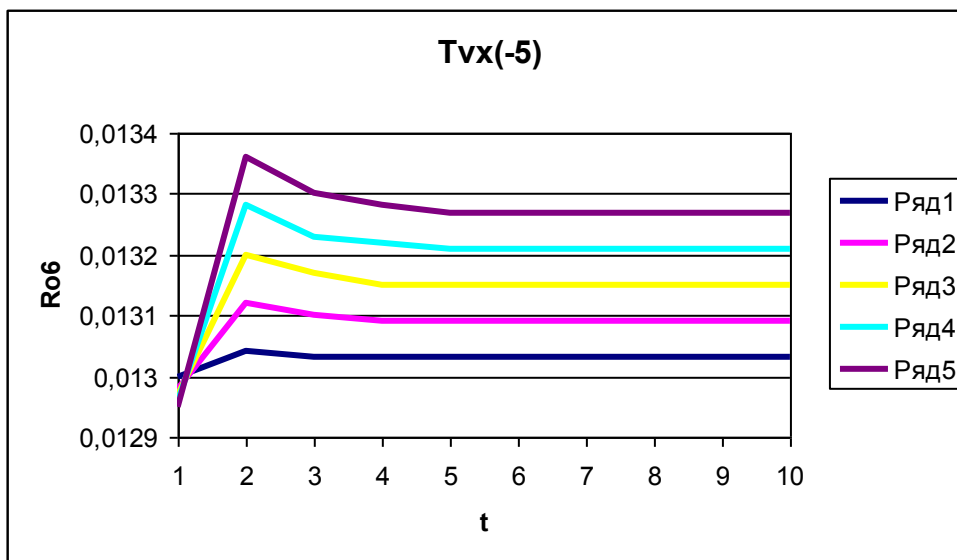


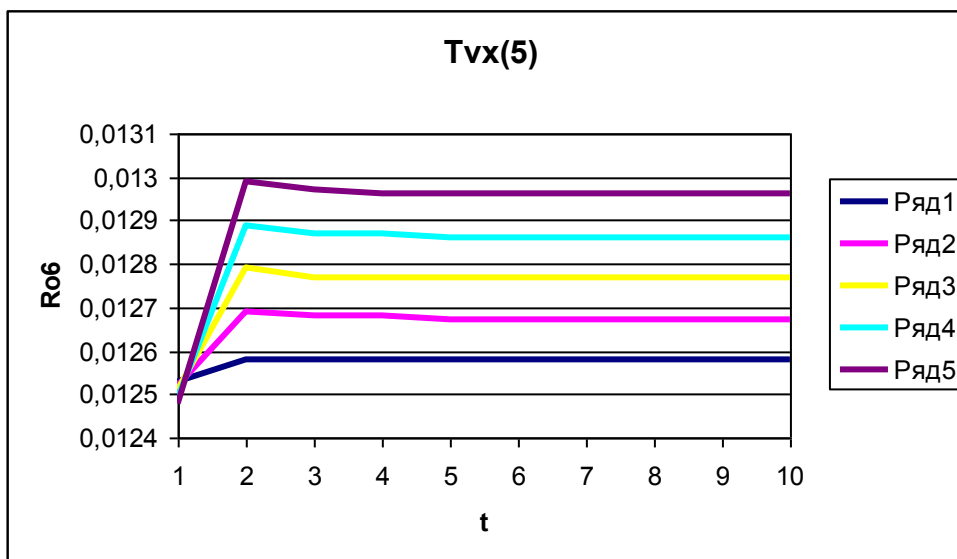
სურ.3.2.3. აიროვან გარემოში წყლის ორთქლის დაყვანილი სიმკვრივის დროში ცვლილება შესასვლელთან აიროვანი გარემოს სამი ტემპერატურისათვის (ზედა სურათი –  $-5^{\circ}\text{C}$ , შუა სურათი –  $0^{\circ}\text{C}$ , ქვედა სურათი –  $5^{\circ}\text{C}$ ).



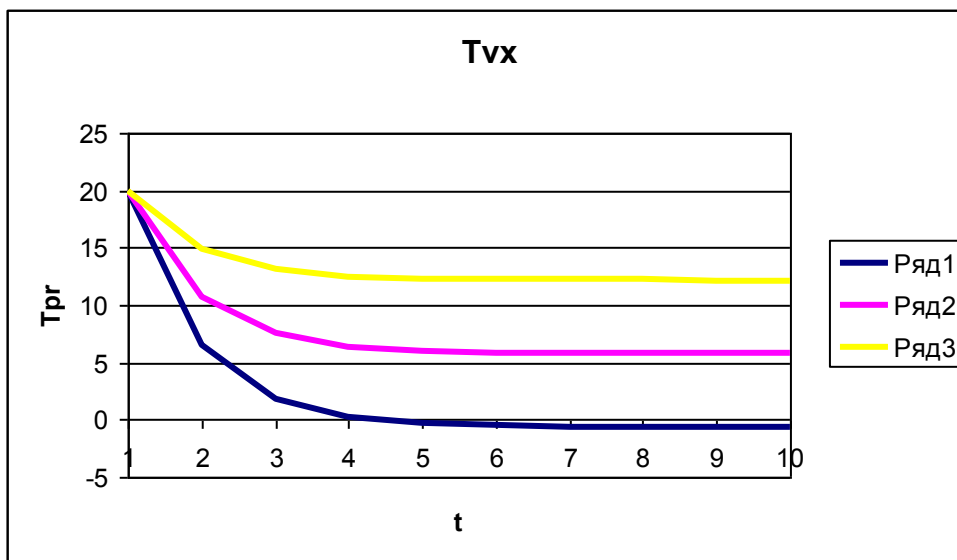


სურ.3.2.4. აიროვან გარემოში ჟანგბადის დაყვანილი სიმკვრივის დროში ცვლილება შესასვლელთან აიროვანი გარემოს სამი ტემპერატურისათვის (ზედა სურათი –  $-5^{\circ}\text{C}$ , შუა სურათი –  $0^{\circ}\text{C}$ , ქვედა სურათი –  $5^{\circ}\text{C}$ ).

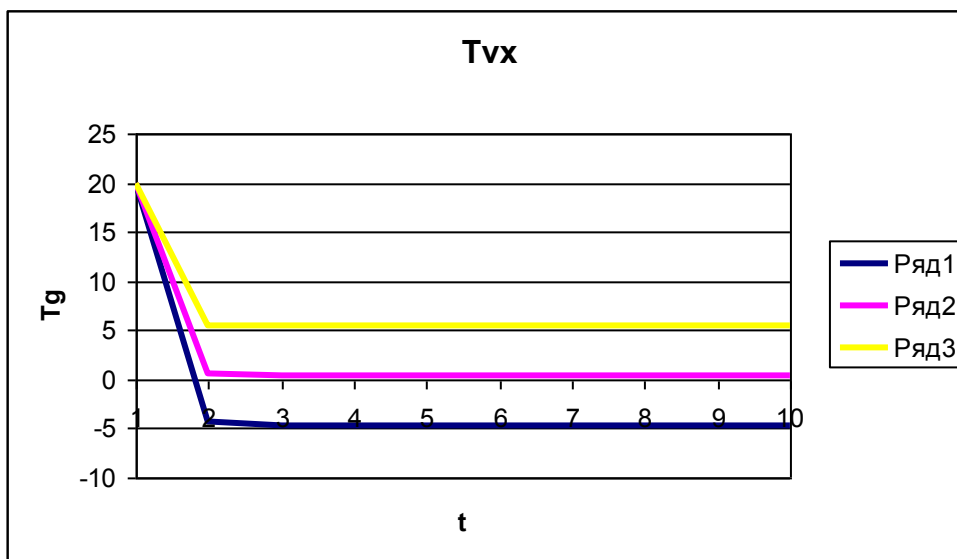




სურ.3.2.5. აიროვან გარემოში ნახშირორჟანგის დაყვანილი სიმკვრივის დროში ცვლილება შესასვლელთან აიროვანი გარემოს სამი ტემპერატურისათვის (ზედა სურათი –  $-5^{\circ}\text{C}$ , შუა სურათი –  $0^{\circ}\text{C}$ , ქვედა სურათი –  $5^{\circ}\text{C}$ ).



სურ.3.2.6. პროდუქტის ტემპერატურის დროში ცვლილება შესასვლელთან აიროვანი გარემოს სამი ტემპერატურისათვის (რიგი 1 –  $-5^{\circ}\text{C}$ ; რიგი 2 –  $0^{\circ}\text{C}$ ; რიგი 3 –  $5^{\circ}\text{C}$ )



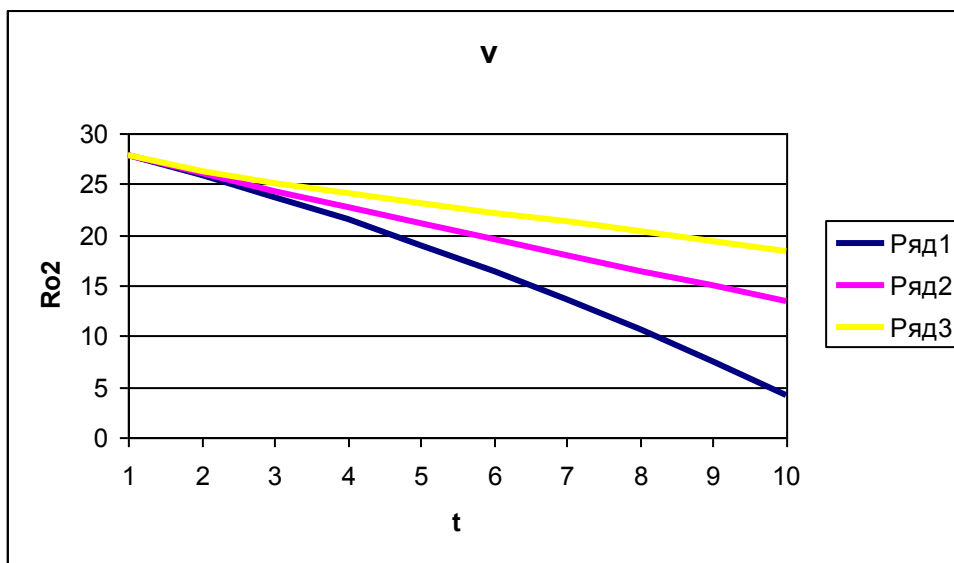
სურ.3.2.7. აიროვანი გარემოს ტემპერატურის დროში ცვლილება შესასვლელთან აიროვანი გარემოს სამი ტემპერატურისათვის (რიგი 1 -  $-5^{\circ}\text{C}$ ; რიგი 2 -  $0^{\circ}\text{C}$ ; რიგი 3 -  $5^{\circ}\text{C}$ )

### 3.3. შენახვის პროცესზე ფილტრაციის სიჩქარის გავლენის კვლევა

დარსის კანონის თანახმად, ფილტრაციის სიჩქარე დამოკიდებულია წნევათა სხვაობაზე, ფოროვანი გარემოს შეღწევადობაზე, აირის სიბლანტეზე. პროდუქტის ფოროვან გარემოში აირის ფილტრაციის საშუალო სიჩქარე დიდ წილად გავლენას ახდენს შენახვის პროცესზე. ფილტრაციის სიჩქარეზე დამოკიდებულებით იცვლება აიროვანი გარემოს უნარი შთანთქოს პროდუქტის სითბოს ესა თუ ის რაოდენობა. შენახვის ზონაში აიროვანი გარემოს მდგენელების ამა თუ იმ რაოდენობის მიწოდება აგრეთვე დამოკიდებულია ფილტრაციის სიჩქარეზე. ფილტრაციის სიჩქარე რაოდენობრივ დამოკიდებულებაში განსაზღვრავს შენახვის ზონიდან აიროვანი გარემოს მდგენელების გაყვანასაც. ეს ყველაფერი მოწმობს იმას, რომ ფილტრაციის სიჩქარე რთულ გავლენას ახდენს შენახვისას მიმდინარე პროცესებზე.

სურ.3.3.1.-ზე ნაჩვენებია პროდუქტში გლუკოზის შემცველობის დროში ცვლილება ფილტრაციის სამი სხვადასხვა სიჩქარისათვის –  $0,00145$  მ/წმ,  $0,00291$  მ/წმ და  $0,0145$  მ/წმ. დანარჩენი რეჟიმული პარამეტრების სიდიდეები საბაზისო დარჩა. ფილტრაციის სიჩქარის გაზრდისას შეიმჩნევა გლუკოზის ხარჯვის შემცირება, რაც, უპირველეს ყოვლისა, გამოწვეულია პროდუქტის საშუალო ტემპერატურის დაწევით. უნდა ავლნიშნოთ, რომ გლუკოზის შემცველობის ცვლილების სურათი დროში

იცვლებოდა და პრაქტიკულად მეორდებოდა ყველა წერტილში შენახვის მონაკვეთის მთელ სიგრძეზე.



სურ.3.3.1. გლუკოზის დაყვანილი სიმკვრივის დროში ცვლილება აირის ფილტრაციის სამი სიჩქარისათვის (რიგი1 - 0,00145 მ/წმ; რიგი 2 – 0,00291 მ/წმ; რიგი 3 – 0,0145 მ/წმ)

ფილტრაციის სიჩქარეების განსახილველ დიაპაზონში გაზრდა დადებითად აისახება პროდუქტში ტენის შენახვაზე. ფილტრაციის 0,00145 მ/წმ სიჩქარისას დროთა განმავლობაში ტენის დანაკარგის ინტენსიურობა იზრდება, შეიმჩნევა არხის სიგრძის გასწვრივ ტენშემცველობის დიდი გრადიენტი. დროში ტენის ყველაზე დიდი დანაკარგი წარმოებს საწყის ზონაში (რიგი 1 ზედა სურათზე 3.3.2.). 10-ჯერ უფრო დიდი სიჩქარისათვის 0,0145 მ/წმ – პროდუქტის ტენშემცველობის ცვლილების სურათი უფრო მდოვრედ ცვალებადია, როგორც დროის, ასევე არხის სიგრძის მიხედვით.

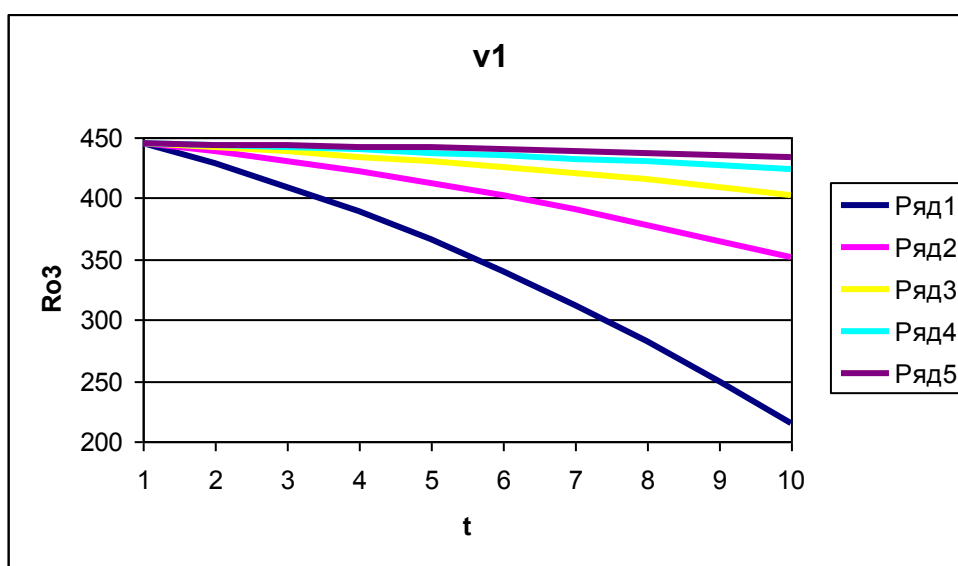
სურ.3.3.3.–ზე ნაჩვენებია წყლის ორთქლის დაყვანილი სიმკვრივის დროში ცვლილება აირის ფილტრაციის სამი სიჩქარისათვის (ზედა სურათი – 0,00145 მ/წმ, შუა სურათი – 0,00291 მ/წმ, ზედა სურათი – 0,0145 მ/წმ). ფილტრაციის 0,00145 მ/წმ სიჩქარისათვის შენახვის დროის მთელი განსახილველი მონაკვეთის (100 საათი) განმავლობაში მიმდინარეობს აიროვან გარემოში წყლის ორთქლის შემცველობის გაზრდა. ფილტრაციის 10-ჯერ უფრო დიდი სიჩქარისათვის – 0,0145 მ/წმ – სურათი სხვანაირია: პირველი 10 საათის განმავლობაში ორთქლის შემცველობა იზრდება, შემდგომ გარკვეულ წილად მცირდება და სტაბილიზირდება დროის მიხედვით. ფილტრაციის სიჩქარის ცვლილების მთელ დიაპაზონში შეიმჩნევა ორთქლის

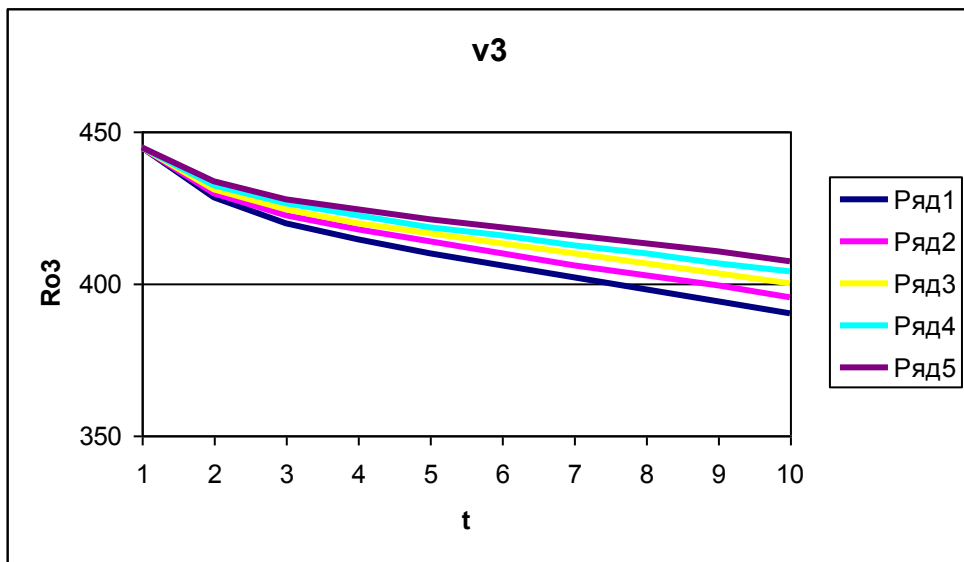
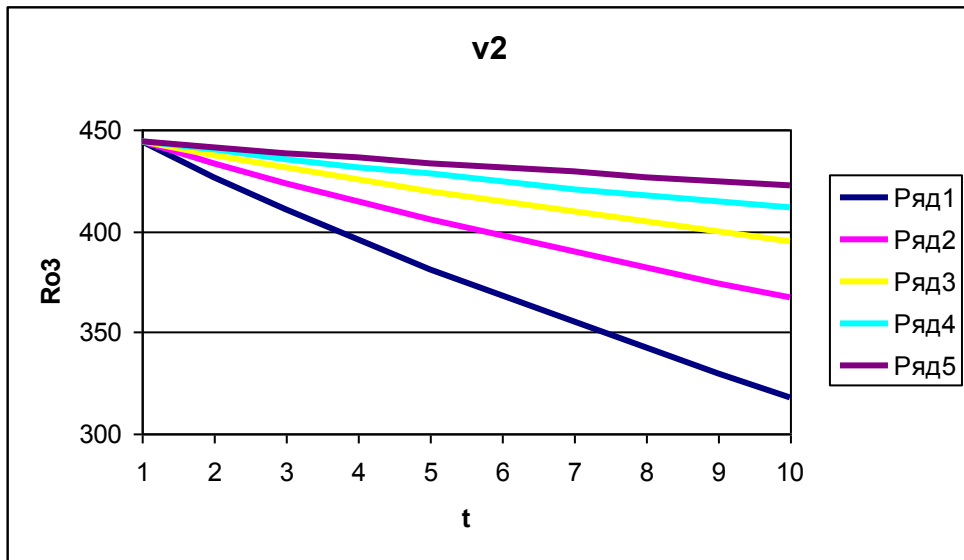
შემცველობის გაზრდა არხის მთელ სიგრძეზე (რიგი 1 – არხის შესასვლელთან, რიგი 5 – გასასვლელში). ამავე დროს ყველა წერტილში ორთქლის რაოდენობა გარკვეულ წილად აჭარბებს ორთქლის რაოდენობას შემავალ ჰაერში.

მათემატიკური მოდელების სურ.3.3.4.–ზე წარმოდგენილი შედეგების ანალიზისას შეგვიძლია ავლნიშნოთ, რომ ფილტრაციის მცირე სიჩქარეების შემთხვევაში ჟანგბადის შემცველობა აიროვან გარემოში მცირდება დროის განმავლობაში – პირველ 10 საათში საკმაოდ სწრაფად, შემდგომში კი უფრო დაბალი სიჩქარით. საწინააღმდეგო სურათი შეიმჩნევა ფილტრაციის დიდი სიჩქარეებისას. აიროვან გარემოში ჟანგბადის შემცველობა იზრდება, ჯერ, პირველი 10 საათის განმავლობაში სწრაფად, ხოლო შემდგომში უფრო ნელა, ხოლო 35 საათის შემდეგ ჟანგბადის შემცველობა არხის წერტილებში არ იცვლება.

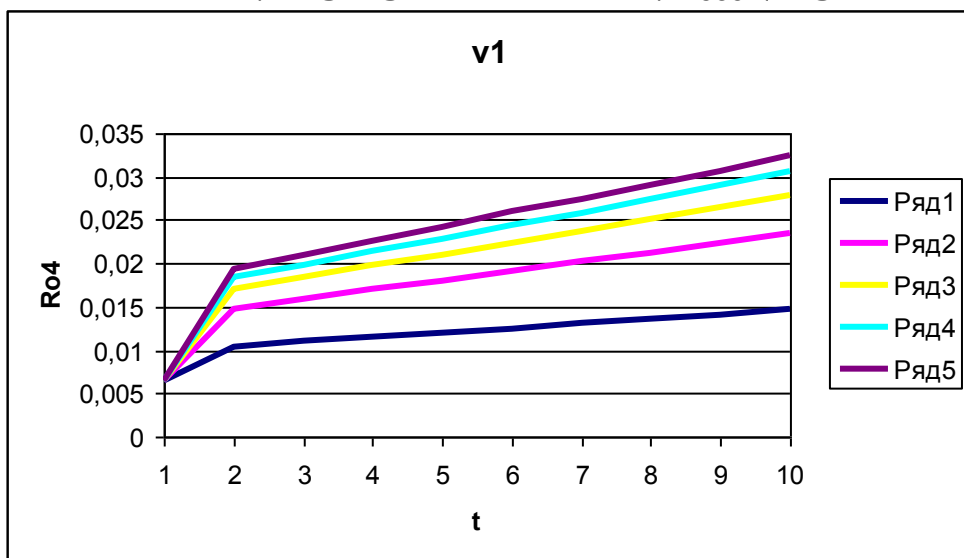
ავლნიშნოთ, რომ ფილტრაციის განსახილველი დიაპაზონის ყველა სიჩქარისათვის ჟანგბადის შემცველობა აიროვან გარემოში მცირდება არხის სიგრძის გავლით (რიგი 1 – არხის შესასვლელთან, რიგი 5 – გასასვლელში).

ფილტრაციის დაბალი სიჩქარეების დროს (ზედა სურათი.3.3.5.) აიროვან გარემოში ნახშირბადის ორჟანგის დაყვანილი სიმკვრივე დროში იზრდება არხის ყველა წერტილში. ფილტრაციის დაბალი სიჩქარეები ხასიათდება აიროვან გარემოში ნახშირბადის ორჟანგის დიდი შემცველობით. ფილტრაციის ყველა სიჩქარისათვის ნახშირორჟანგის შემცველობა იზრდება არხის სიგრძის გასწვრივ (რიგი 1 – არხის შესასვლელში, რიგი 5 – გასასვლელში).

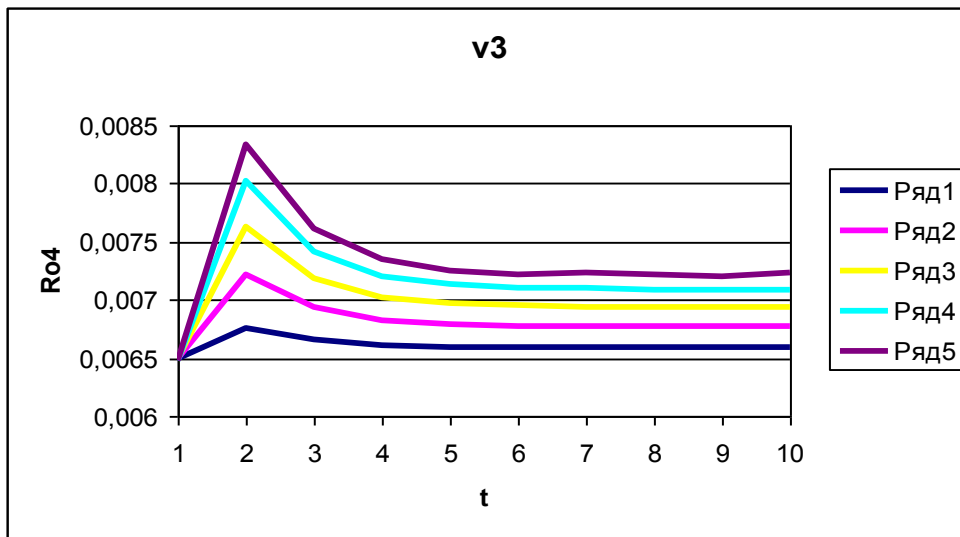
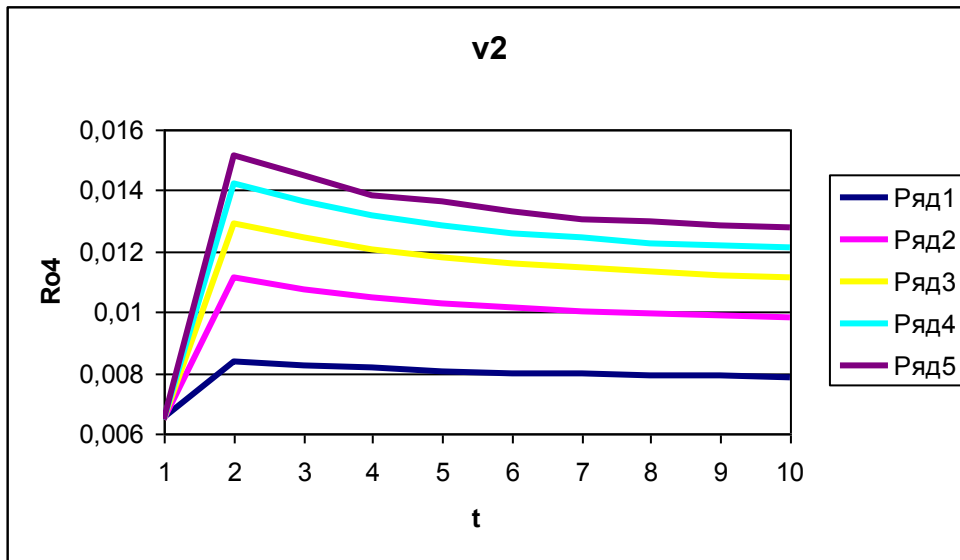




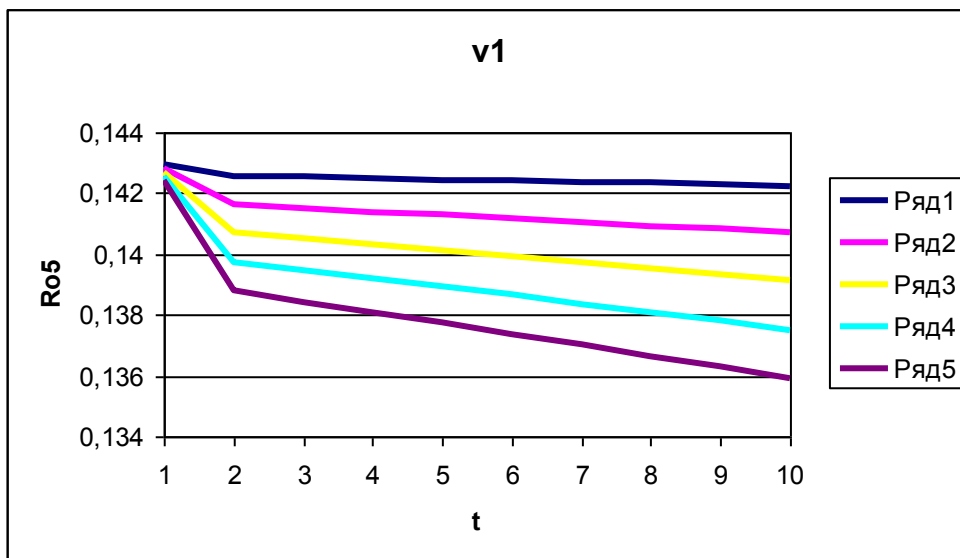
სურ.3.3.2 პროდუქტში წყლის დაყვანილი სიმკვრივის დროში ცვლილება აირის ფილტრაციის სამი სიჩქარისათვის (ზედა სურათი - 0,00145 მ/წმ; შუა სურათი - 0,00291 მ/წმ; ქვედა სურათი - 0,0145 მ/წმ)

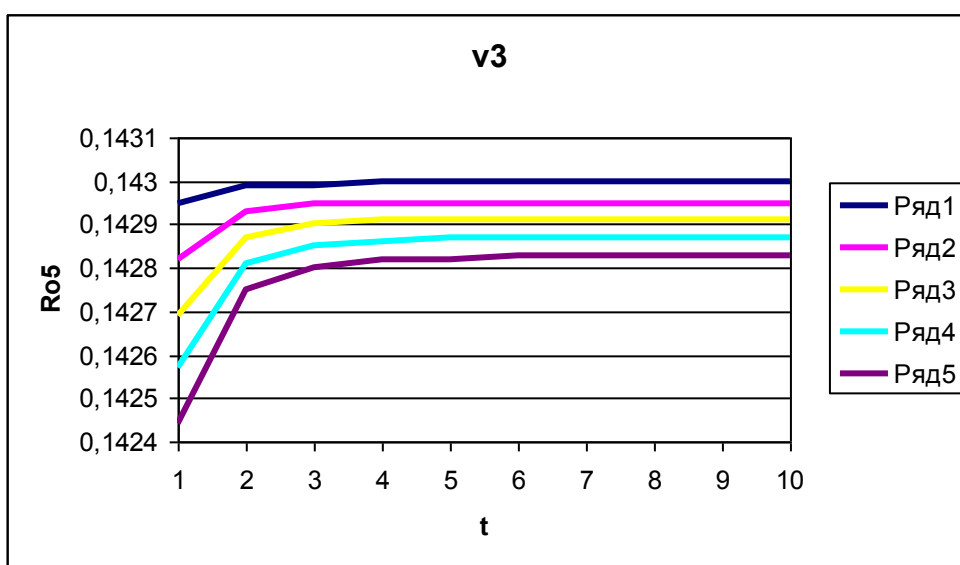
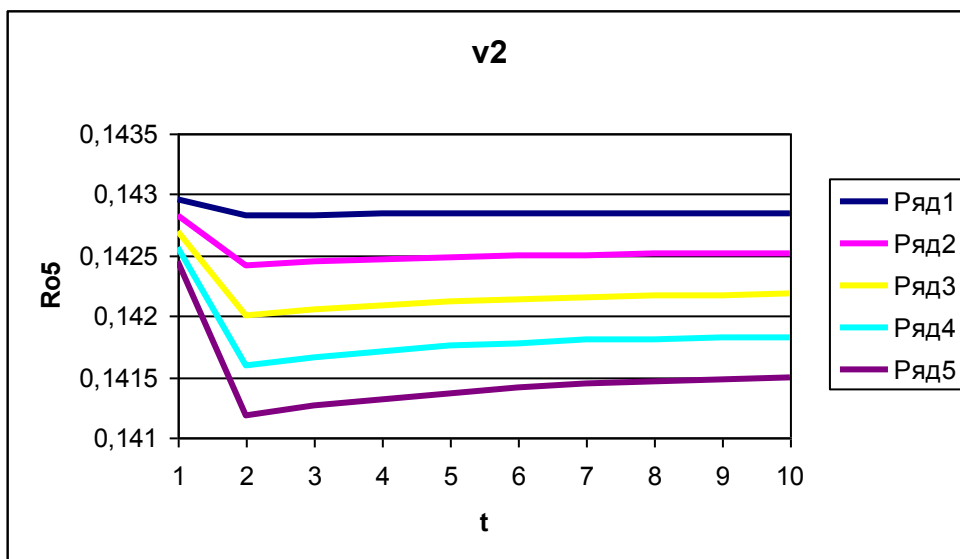




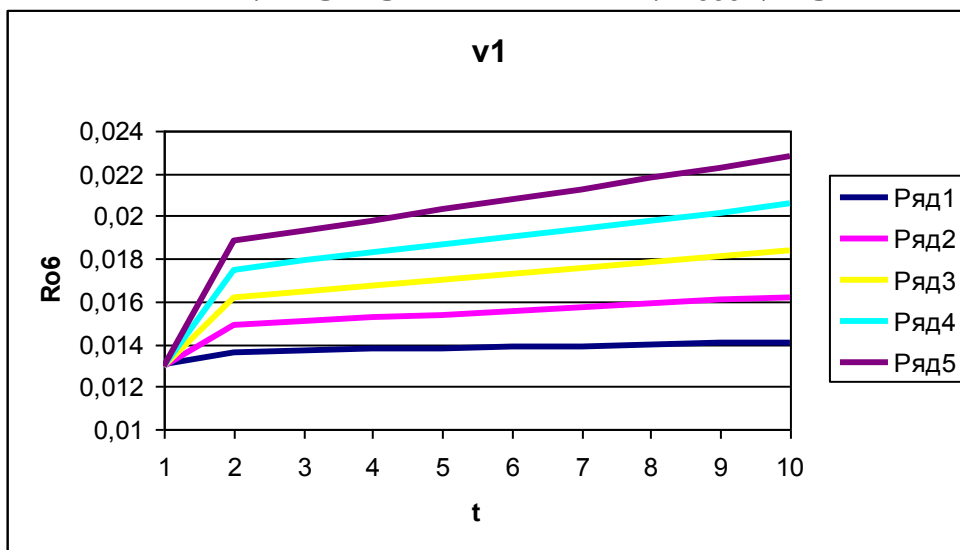


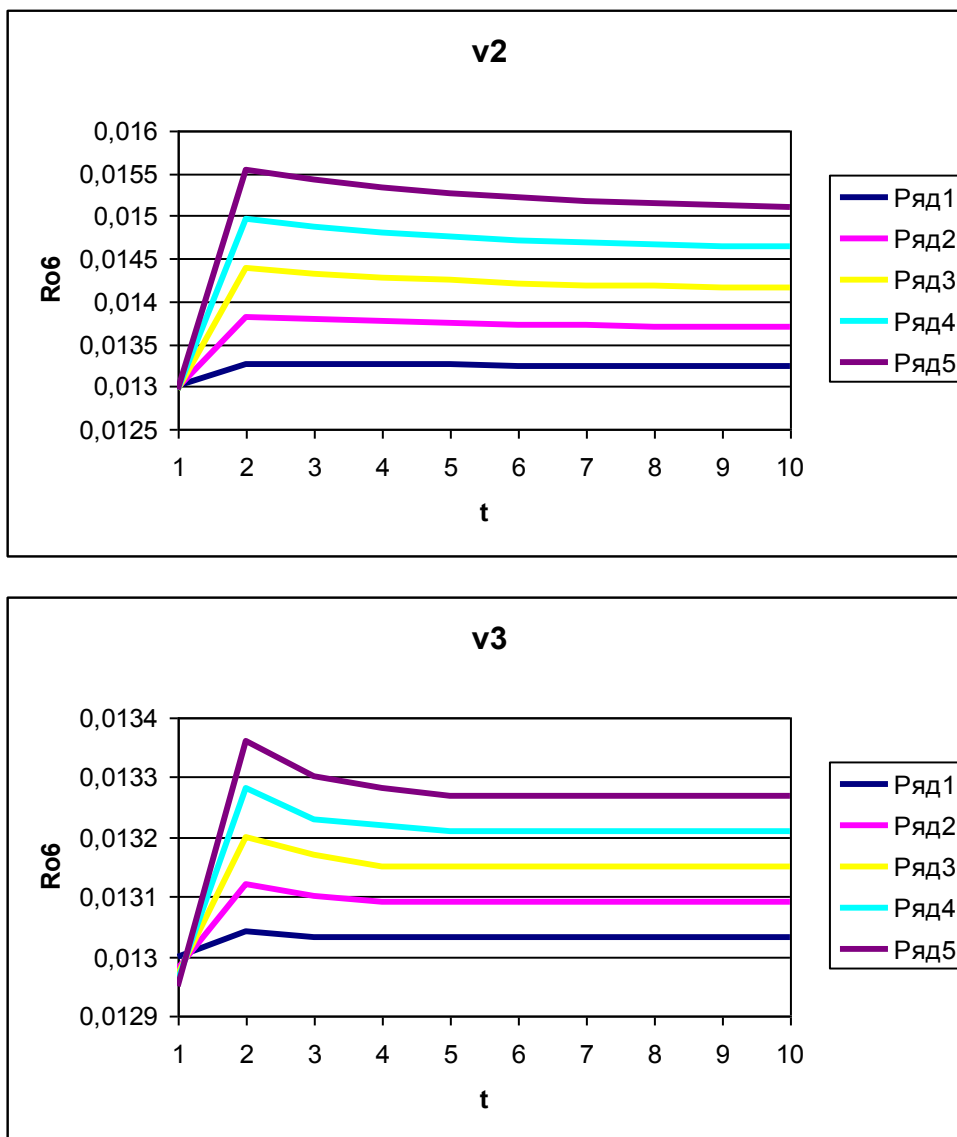
სურ.3.3.3. აიროვან გარემოში წყლის ორთქლის დაყვანილი სიმკვრივის დროში ცვლილება აირის ფილტრაციის სამი სიჩქარისათვის  
(ზედა სურათი - 0,00145 მ/წმ; შუა სურათი - 0,00291 მ/წმ; ქვედა სურათი - 0,0145 მ/წმ)





სურ.3.3.4. აიროვან გარემოში ჟანგბადის დაყვანილი სიმკვრივის დროში ცვლილება აირის ფილტრაციის სამი სიჩქარისათვის (ზედა სურათი - 0,00145 მ/წმ; შუა სურათი - 0,00291 მ/წმ; ქვედა სურათი - 0,0145 მ/წმ)



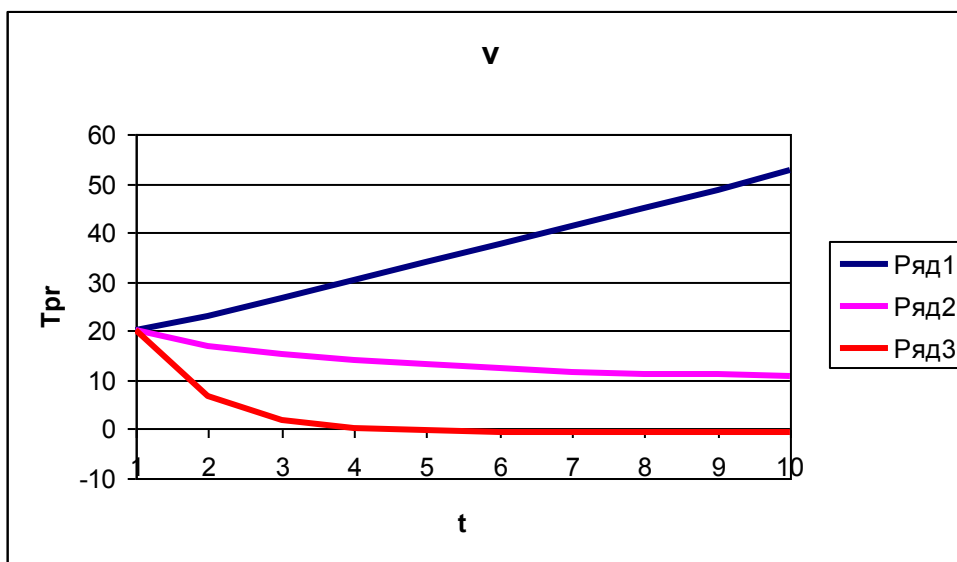


სურ.3.3.5. აიროვან გარემოში ნახშირბადის ორჟანგის დაყვანილი სიმკვრივის დროში ცვლილება აირის ფილტრაციის სამი სიჩქარისათვის (ზედა სურათი - 0,00145 მ/წმ; შუა სურათი - 0,00291 მ/წმ; ქვედა სურათი - 0,0145 მ/წმ)

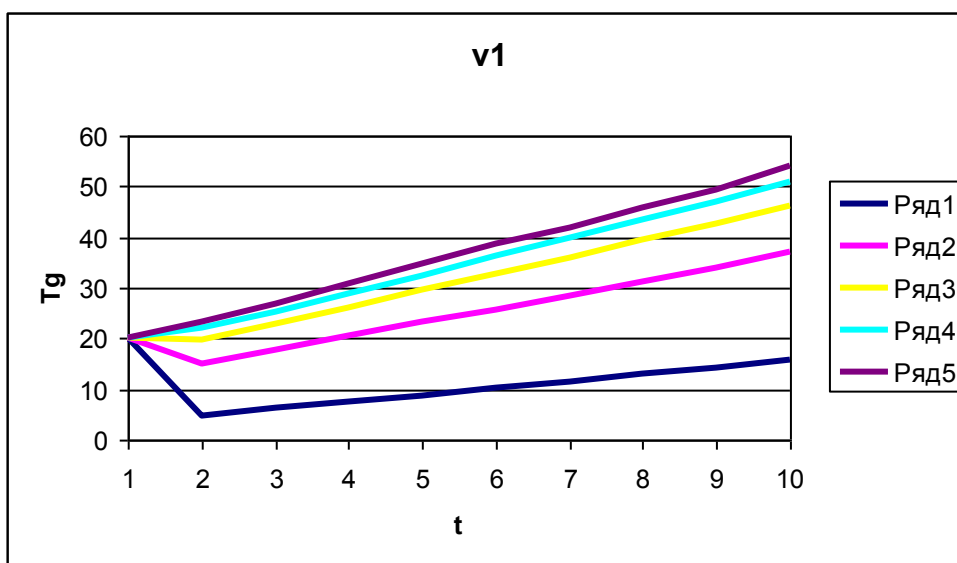
ფილტრაციის სიჩქარის პროდუქტის ტემპერატურულ ველზე გავლენის კვლევის შედეგები (სურ.2ბ) გვიჩვენებენ, რომ ფილტრაციის სიჩქარე 0,00145 მ/წმ საერთოდ უვარგისია პროდუქტის შესანახად. ამ სიჩქარისათვის პროდუქტის ტემპერატურა მუდმივად იზრდება, რადგან პროდუქტში წარმოებს თვითგახურება. მაგრამ ფილტრაციის უკვე 0,00291 მ/წმ სიჩქარისათვის პროდუქტის და აიროვანი გარემოს ტემპერატურა მცირდება (პროდუქტისა და აირის საწყისი ტემპერატურა - 20°C). პროდუქტის ტემპერატურა მყარდება 10°C რიგის სიდიდეზე. ფილტრაციის 0,0145 მ/წმ სიჩქარისას პროდუქტის ტემპერატურა 35 საათის შემდეგ უტოლდება ნულს და შემდგომში არ იცვლება. აიროვანი გარემოს შესაბამისი ტემპერატურა

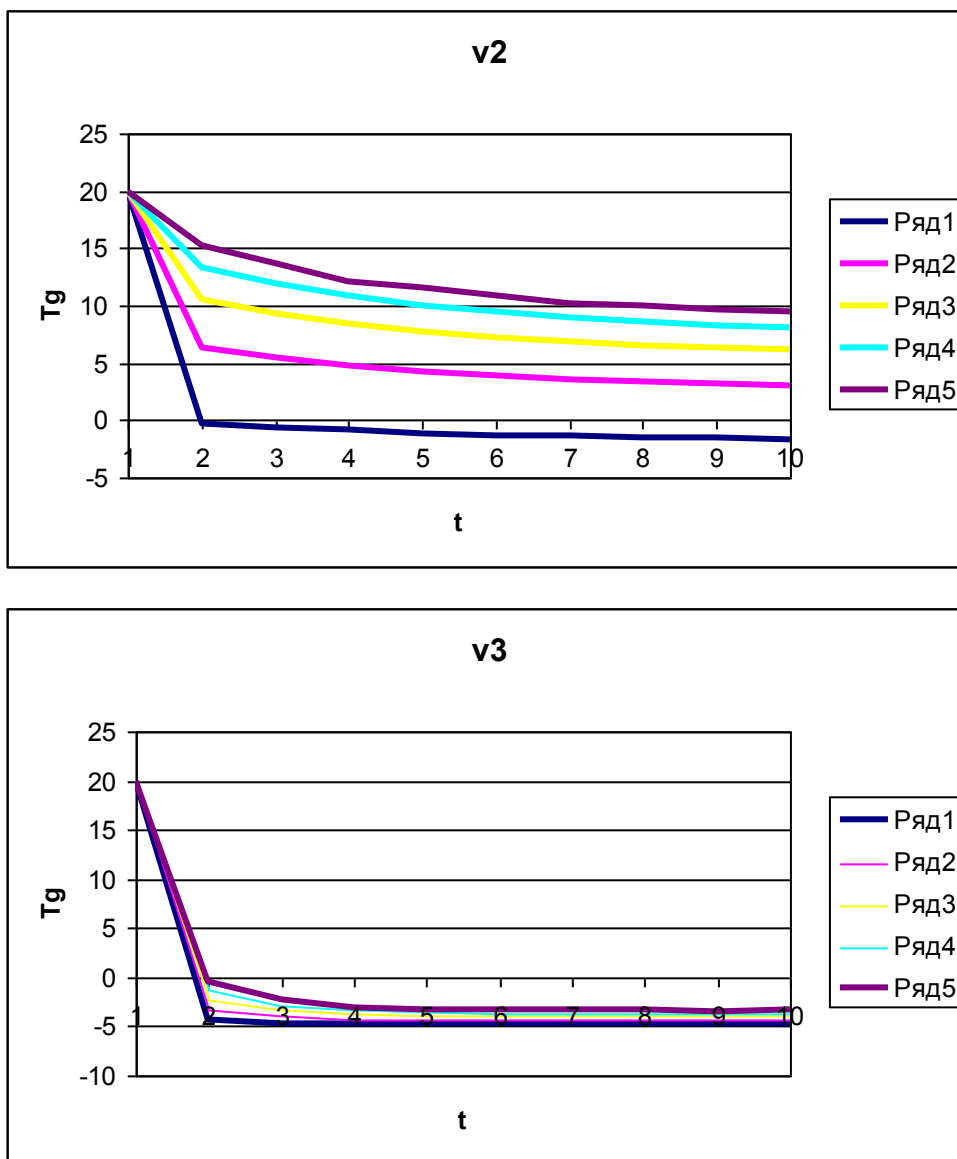
მყარდება  $-5^{\circ}\text{C}$  –თან ახლო ფარგლებში, რაც შეესაბამება აიროვანი გარემოს შესავალ ტემპერატურას.

უნდა ავლნიშნოთ, რომ  $0,0145$  მ/წმ–ის ტოლი ფილტრაციის სიჩქარისას მყარდება სტაციონალური და პრაქტიკულად ერთგვაროვანი ტემპერატურული ველები როგორც პროდუქტში, ასევე აიროვან გარემოში.



სურ.3.3.6. პროდუქტის ტემპერატურის დროში ცვლილება  
ფილტრაციის სამი სიჩქარისათვის  
(რიგ1 -  $0,00145$  მ/წმ; რიგ 2 –  $0,00291$  მ/წმ; რიგ 3 –  $0,0145$  მ/წმ)





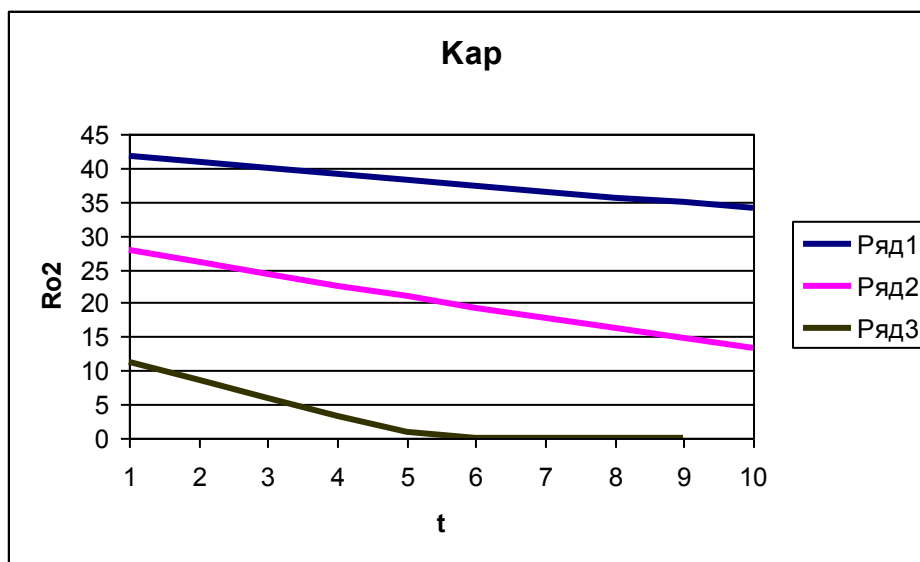
სურ.3.3.7. აიროვანი გარემოს ტემპერატურის დროში ცვლილება  
ფილტრაციის სამი სიჩქარისათვის

(ზედა სურათი - 0,00145 მ/წმ; შუა სურათი - 0,00291 მ/წმ; ქვედა სურათი - 0,0145 მ/წმ)

### 3.4. შენახვის პროცესზე პროდუქტის ჩაწყობის სიმჭიდროვის გავლენის კვლევა

როგორც უკვე ავლინიშნეთ, პროდუქტის ჩაწყობის სიმჭიდროვე ხასიათდება პარამეტრით  $\kappa$ , რომელიც აიროვანი გარემოს მოცულობის არხის სრულ მოცულობასთან შეფარდების ტოლია (ფილტრაციის თეორიაში ეს არის მყარი ჩონჩხის ფოროვენება). აქედან არის სიდიდე  $(1-\kappa)$  - პროდუქტის მოცულობითი წილი საერთო მოცულობაში. გამოთვლით ექსპერიმენტში განიხილებოდა ჩაწყობის სამი სიმჭიდროვე:  $\kappa = 0,25$  (როცა უშუალოდ პროდუქტი იკავებს მთელი მოცულობის 75%);  $\kappa = 0,5$  (როცა უშუალოდ პროდუქტი იკავებს მთელი მოცულობის 50%);  $\kappa = 0,75$  (როცა უშუალოდ პროდუქტი იკავებს მთელი მოცულობის 25%).

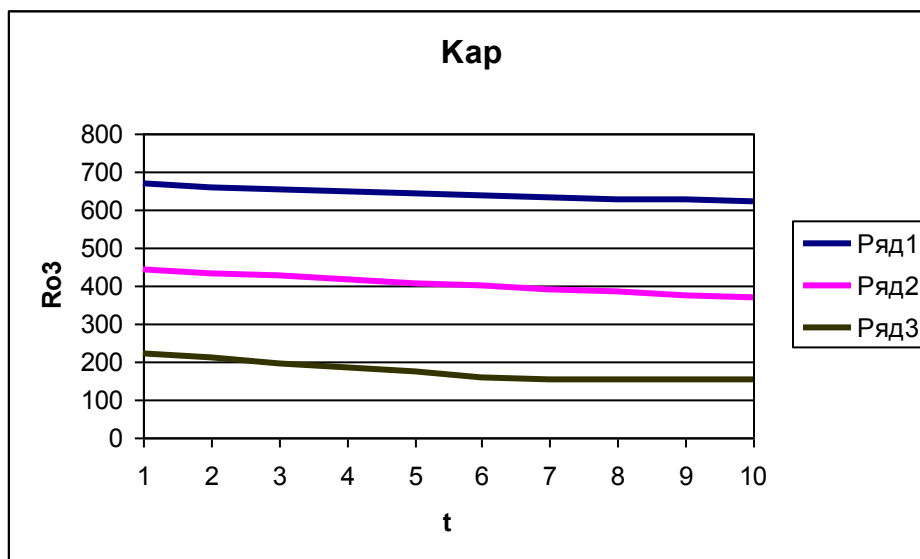
სურ.3.4.1.–ზე ნაჩვენებია პროდუქტში გლუკოზის დაყვანილი სიმკვრივის დროში ცვლილება პროდუქტის ჩაწყობის სამი სხვადასხვა სიმჭიდროვისათვის (რიგი 1 –  $\kappa = 0,25$ ; რიგი 2 –  $\kappa = 0,5$ ; რიგი 3 –  $\kappa = 0,75$ ). როგორც სურათიდან ჩანს,  $\kappa = 0,75$  ჩაწყობისას შენახვის დაწყებიდან დროის  $t = 60$  საათი მომენტისათვის გლუკოზა პროდუქტში აღარ დარჩა.



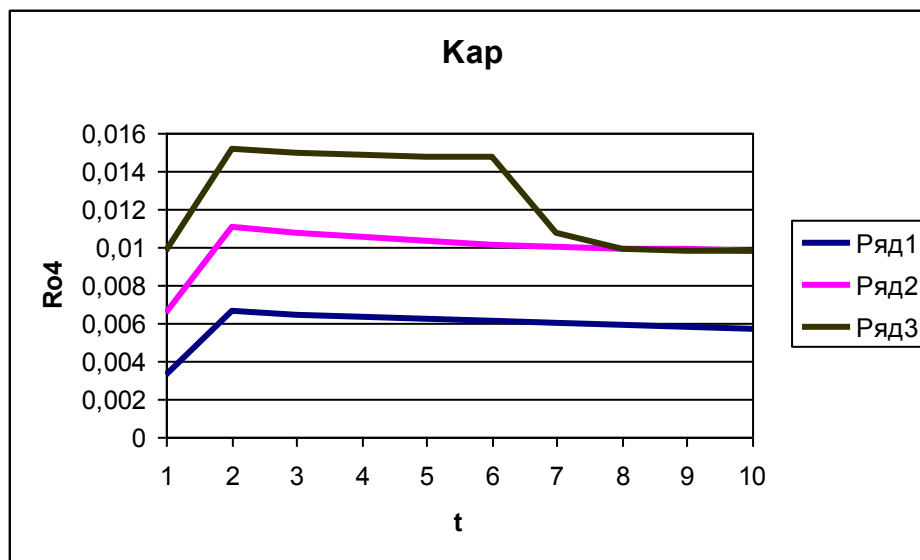
სურ.3.4.1. პროდუქტში გლუკოზის დაყვანილი სიმკვრივის დროში ცვლილება პროდუქტის ჩაწყობის სამი სხვადასხვა სიმჭიდროვისათვის (რიგი 1 –  $\kappa = 0,25$ ; რიგი 2 –  $\kappa = 0,5$ ; რიგი 3 –  $\kappa = 0,75$ ).

პროდუქტში წყლის შემცველობა დროში პრაქტიკულად არ იცვლება, ე.ი. სრულიად განისაზღვრება საწყისი შემცველობით (სურ.3.4.2.)

სურ.3.4.3.–ზე ნაჩვენებია აიროვან გარემოში წყლის ორთქლის დაყვანილი სიმკვრივის დროში ცვლილება პროდუქტის ჩაწყობის სამი სიმჭიდროვისათვის (რიგი 1 – 0,25; რიგი 2 – 0,5; რიგი 3 – 0,75). შენახვის პროცესის დასაწყისში აიროვან გარემოში წყლის ორთქლის შემცველობა იზრდება, ხოლო შემდგომში სტაბილიზირდება შემცველობის შემცირების ძალიან მცირე სიჩქარეზე. რიგი 3–ის შესაბამისი მრუდის ჩავარდნა შეესებამება დროის იმ მომენტს, როცა პროდუქტში არ რჩება გლუკოზა.

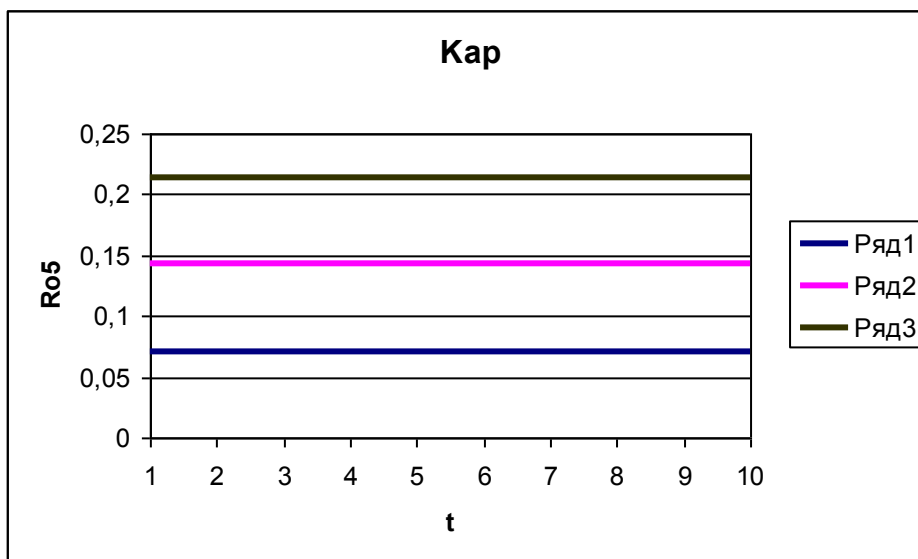


სურ.3.4.2. პროდუქტში წყლის დაყვანილი სიმკვრივის დროში ცვლილება პროდუქტის ჩაწყობის სამი სხვადასხვა სიმჭიდროვისათვის (რიგი 1 – 0,25; რიგი 2 – 0,5; რიგი 3 – 0,75).

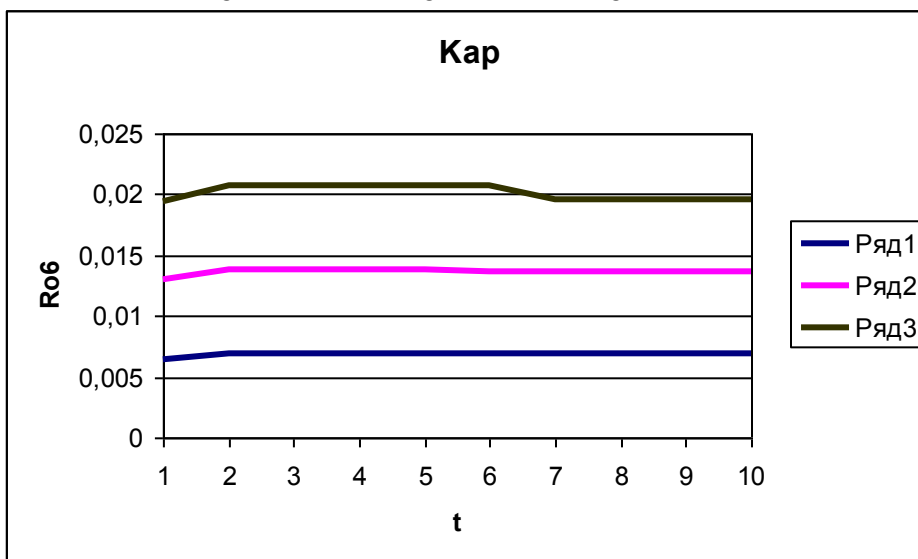


სურ.3.4.3. პროდუქტში წყლის ორთქლის დაყვანილი სიმკვრივის დროში ცვლილება პროდუქტის ჩაწყობის სამი სხვადასხვა სიმჭიდროვისათვის (რიგი 1 – 0,25; რიგი 2 – 0,5; რიგი 3 – 0,75).

ჩაწყობის სიმჭიდროვე არ ახდენს გავლენას აიროვან გარემოში ჟანგბადის შემცველობის დროში ცვლილებაზე (სურ.3.4.4.), რაც საკმაოდ მოულოდნელია. იგივე შეიძლება ვთქვათ აიროვან გარემოში ნახშირბადის ორჟანგის შემცველობის შესახებ (სურ.3.4.5.). სურ.3.4.5.-ის თანახმად დროის მიხედვით პროდუქტის ტემპერატურა მით მეტია, რაც უფრო მჭიდროა ჩაწყობა. პროდუქტის ტემპერატურის მკვეთრი დაცემა ქვედა სურათზე შეესაბამება პროდუქტში გლუკოზის შემცველობის ნულოვან მნიშვნელობას. რიგები სურ.3.4.4. და სურ.3.4.5. – არხის გასწვრივ თანაბრად განლაგებული 5 წერტილის შესაბამისი ტემპერატურების მრუდეებია.

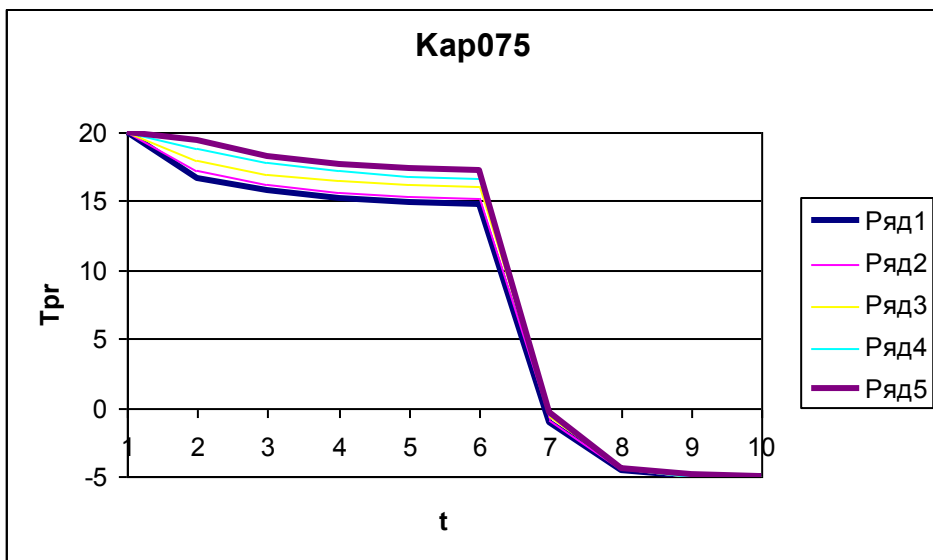
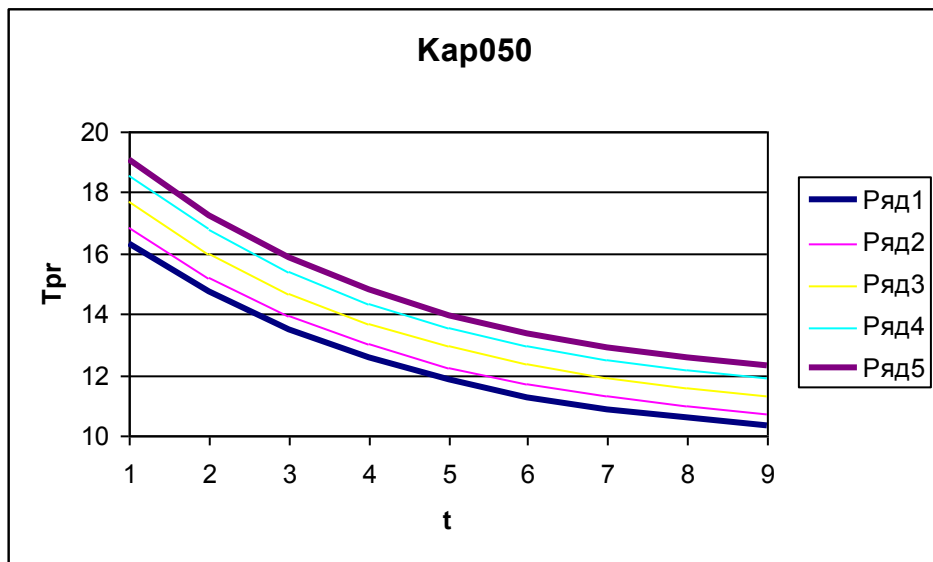
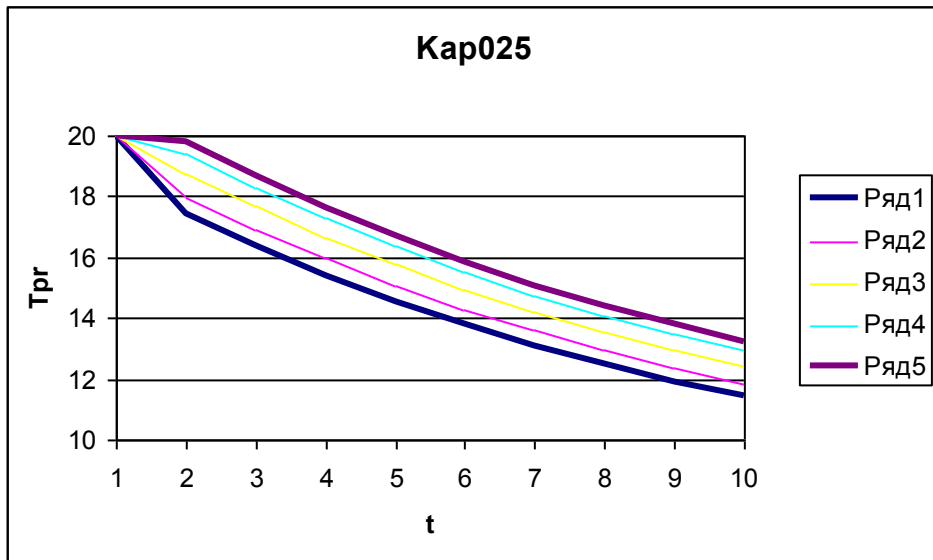


სურ.3.4.4. აიროვან გარემოში ჟანგბადის დაყვანილი სიმკვრივის დროში ცვლილება პროდუქტის ჩაწყობის სამი სხვადასხვა სიმჭიდროვისათვის (რიგი 1 – 0,25; რიგი 2 – 0,5; რიგი 3 – 0,75).

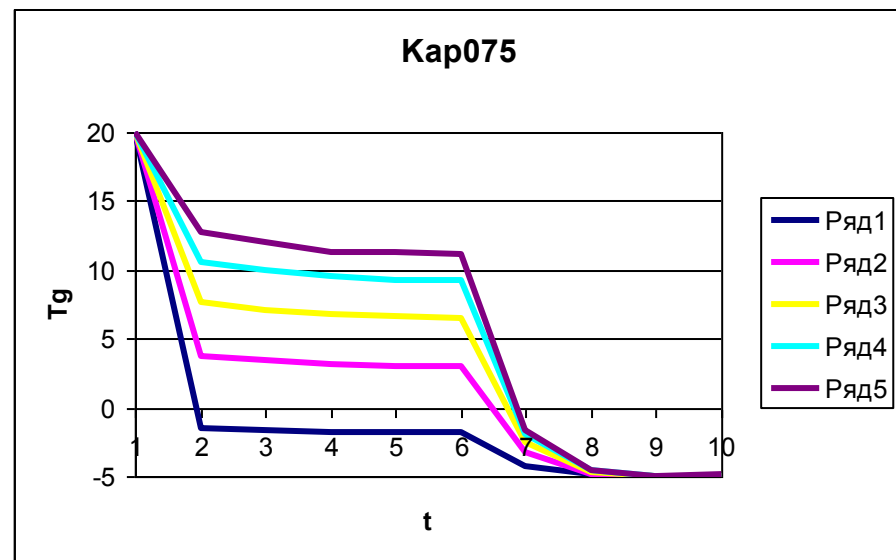
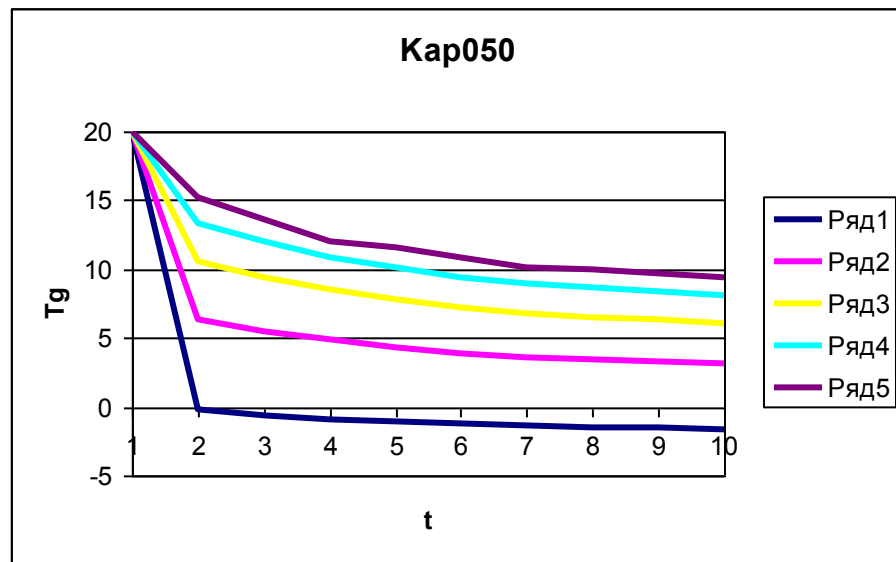
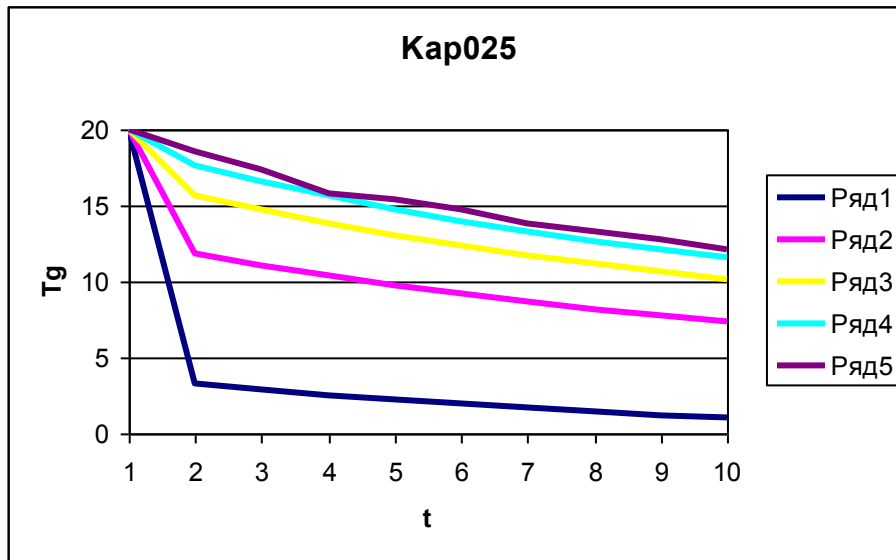


სურ.3.4.5. აიროვან გარემოში ნახშირბადის ორჟანგის დაყვანილი სიმკვრივის დროში ცვლილება პროდუქტის ჩაწყობის სამი სხვადასხვა სიმჭიდროვისათვის (რიგი 1 – 0,25; რიგი 2 – 0,5; რიგი 3 – 0,75).





სურ.3.4.6. პროდუქტის ტემპერატურის დროში ცვლილება პროდუქტის ჩაწყობის სამი სხვადასხვა სიმჭიდროვისათვის (ზედა სურ. – 0,25; შუა სურ. – 0,5; ქვედა სურ. – 0,75).

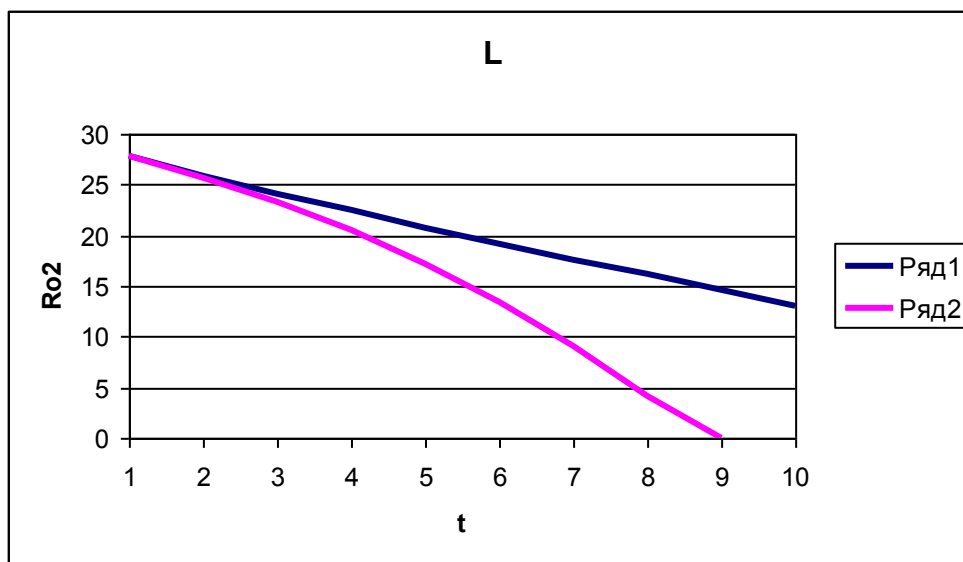


სურ.3.4.7. აიროვანი გარემოს ტემპერატურის დროში ცვლილება პროდუქტის ჩაწყობის სამი სხვადასხვა სიმჭიდროვისათვის (ზედა სურ.– 0,25; შუა სურ. – 0,5; ქვედა სურ. – 0,75).

### 3.5. შენახვის პროცესზე არხის სიგრძის გავლენის კვლევა

რეგულირებად აიროვან გარემოში პროდუქტების შესანახი კონტეინერის შექმნისათვის მნიშვნელოვან კონსტრუქტიულ პარამეტრს წარმოადგენს მონაკვეთი აირის შეყვანის და გამოყვანის ადგილებს შორის, რომელსაც ჩვენ ვუწოდებთ არხის სიგრძე. მათემატიკურ მოდელში ეს არის სივრცითი კოორდინატის მიხედვით ინტეგრირების მონაკვეთის სიგრძე. მათემატიკური მოდელირების მეთოდებით არხის სიგრძის ცვლილებით შეგვიძლია დავადგინოთ, რა მანძილზე ვრცელდება მოცემული პარამეტრების მქონე აიროვანი გარემოს უნარი შეინარჩუნოს შენახვისას პროდუქტის ხარისხი. ჩვენს მიერ შერჩეული იქნა არხის ორი სიგრძე – საბაზისო  $L = 0,1$  მ, რომელიც ედრებოდა ორჯერ უფრო გრძელს.

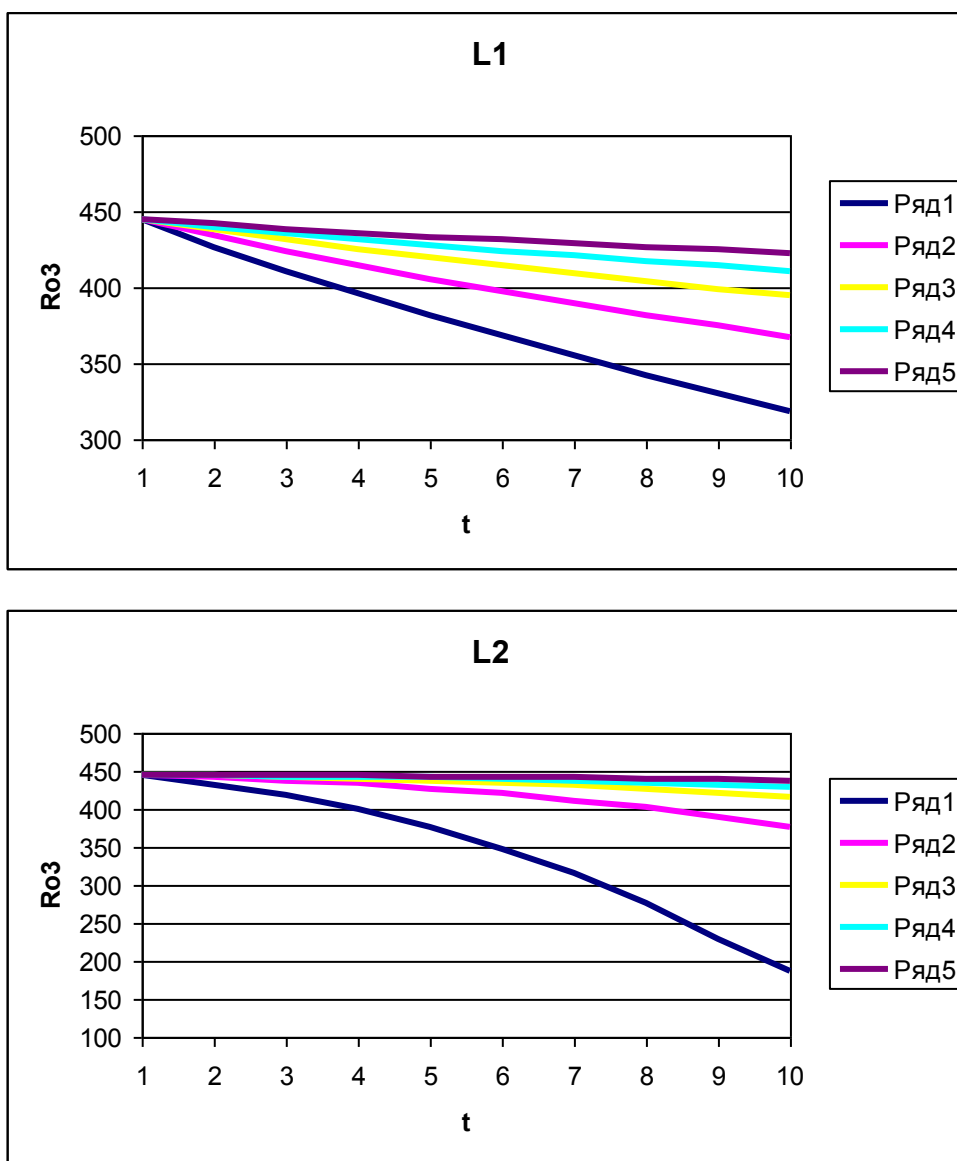
სურ.3.5.1.–ზე ნაჩვენებია გლუკოზის დაყვანილი სიმკვრივის დროში ცვლილება არხის ორი სიგრძისათვის (რიგი 1 – 0,1 მ; რიგი 2 – 0,2 მ). დანარჩენი პარამეტრების სიდიდეები საბაზისო რჩებოდა. როგორც ჩანს, არხის 0,1 მ სიგრძისათვის შენახვის 100 საათის განმავლობაში პროდუქტში გლუკოზის შემცველობა მცირდება ორჯერ, ხოლო 0,2 მ სიგრძისათვის შენახვის 90 საათის შემდეგ გლუკოზა პროდუქტში აღარ რჩება.



სურ.3.5.1. პროდუქტში გლუკოზის დაყვანილი სიმკვრივის დროში ცვლილება არხის ორი სიგრძისათვის (რიგი 1 – 0,1 მ; რიგი 2 – 0,2 მ).

პროდუქტში წყლის შემცველობა აგრეთვე დიდ წილად დამოკიდებულია არხის სიგრძეზე. იმის გარდა, რომ უფრო გრძელი არხისათვის გაცილებით იზრდება

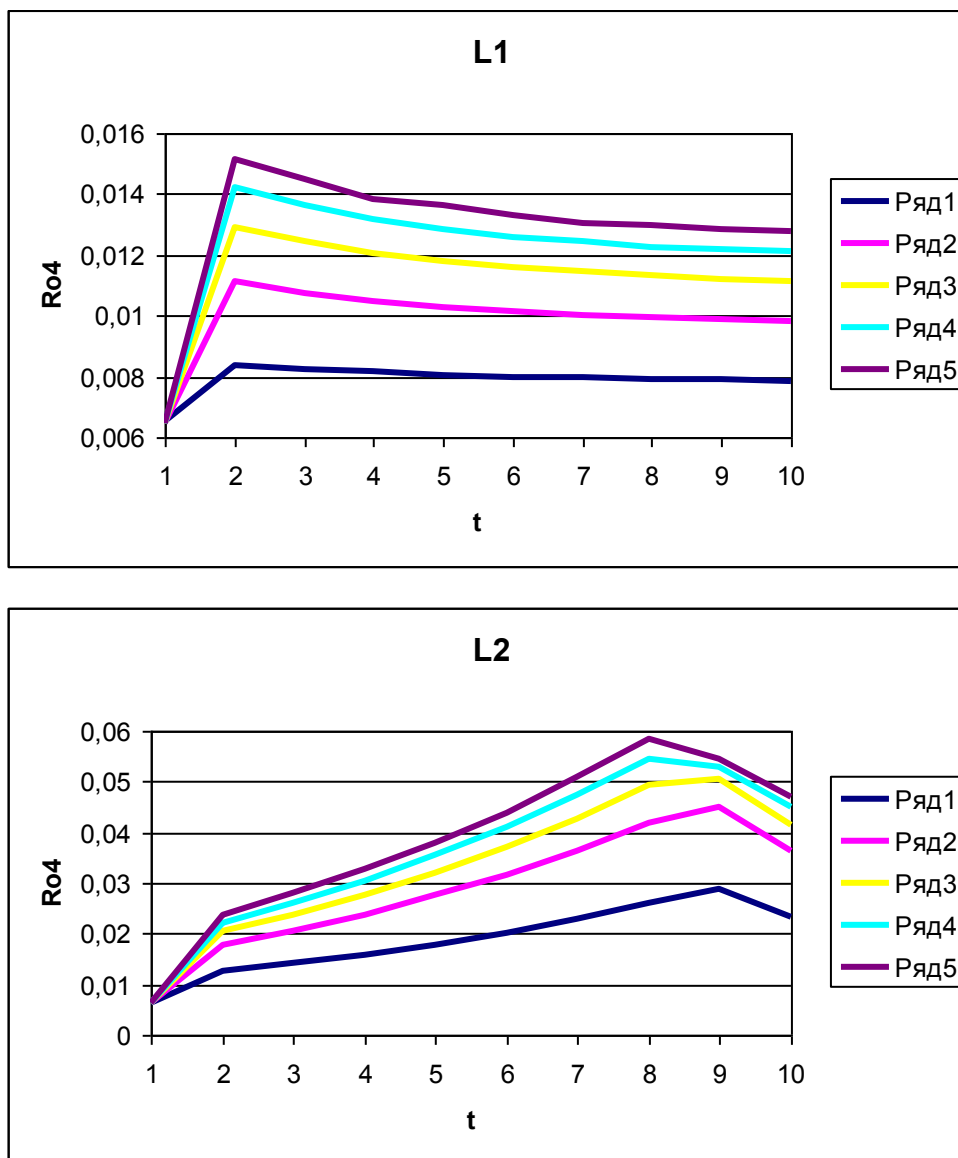
პროდუქტის მიერ წყლის დანაკარგი, უფრო არათანაბარი ხდება არხის გასწვრივ პროდუქტში ტენის შემცველობის ველი (სურ. 3.5.2.). განსაკუთრებით დიდია ტენის დანაკარგი არხის შესასვლელში (სურათებზე რიგი 1).



სურ.3.5.2. პროდუქტში წყლის დაყვანილი სიმკვრივის დროში ცვლილება არხის ორი სიგრძისათვის (ზედა სურათი – 0,1 მ; ქვედა სურათი – 0,2 მ).

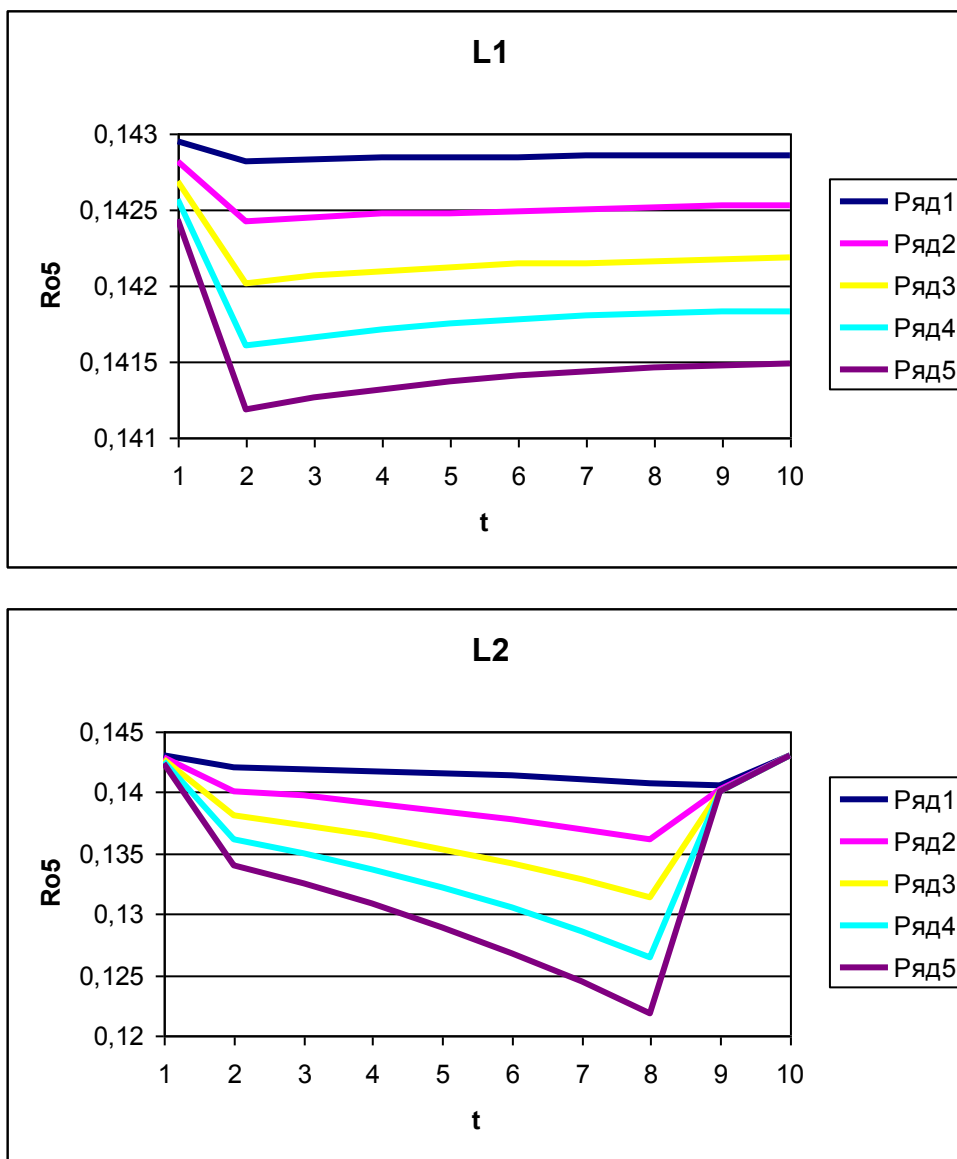
სურ.3.5.3.–ზე ნაჩვენებია აიროვან გარემოში წყლის ორთქლის დაყვანილი სიმკვრივის დროში ცვლილება არხის ორი სიგრძისათვის (ზედა სურათი– 0,1 მ; ქვედა სურათი – 0,2 მ). შენახვის საწყის პერიოდში წყლის ორთქლის შემცველობა გაიზრდება ორივე სიგრძისათვის, მაგრამ შემდეგ მოკლე არხში ორთქლის შემცველობა მცირდება, ხოლო გრძელში კვლავ იზრდება. და მხოლოდ შენახვის 80 საათის შემდეგ გრძელ არხშიც ორთქლის შემცველობა კლებას იწყებს. წყლის

ორთქლის დაყვანილი სიმკვრივე არხის გასწვრივ მცირდება არხის შესასვლელიდან გამოსასვლელამდე.



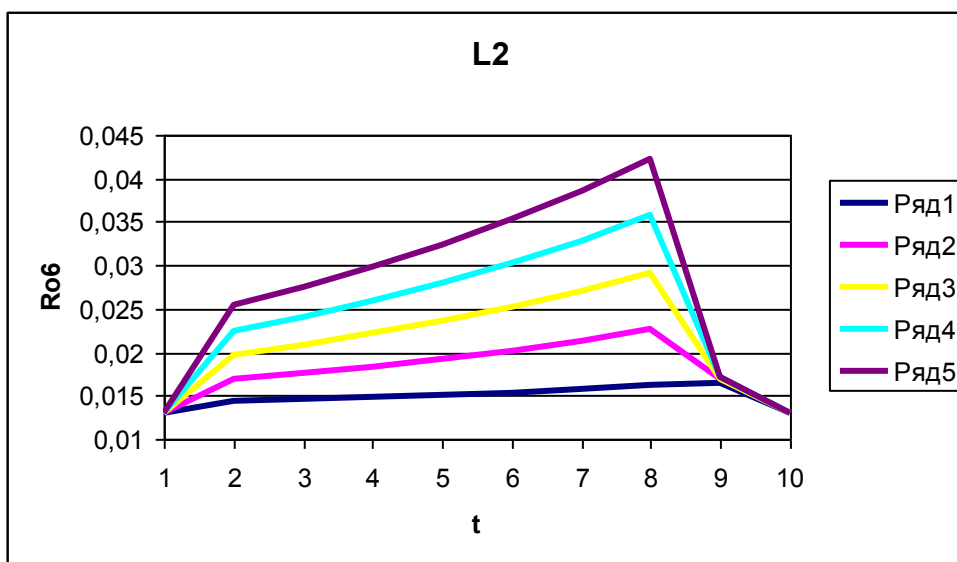
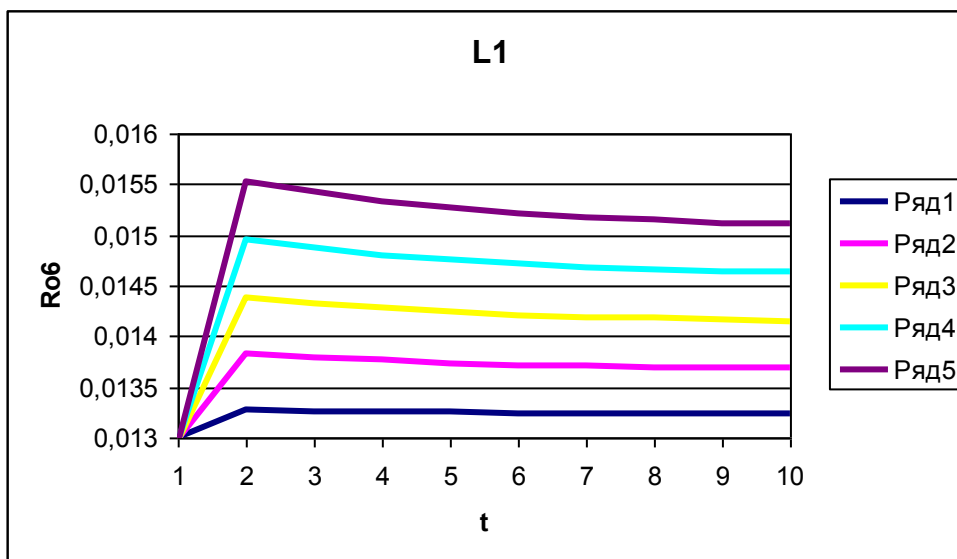
სურ.3.5.3. აიროვან გარემოში წყლის ორთქლის დაყვანილი სიმკვრივის დროში ცვლილება არხის ორი სიგრძისათვის (ზედა სურათი – 0,1 მ; ქვედა სურათი – 0,2 მ).

როგორც ჩანს ზედა 3.5.4. სურათიდან მოკლე არხში ჟანგბადის შემცველობა დროში ჯერ მცირდება, ხოლო შემდეგ პრაქტიკულად სტაბილიზირდება (ადგილი აქვს ჟანგბადის შემცველობის უმნიშვნელო გაზრდას). უფრო გრძელ არხში (ზედა 3.5.4. სურათი) 80 საათამდე შენახვისას შეიმჩნევა ჟანგბადის შემცველობის შემცირება. შემდგომში პროდუქტში გლუკოზის სრულ დახარჯვასთან დაკავშირებით ჟანგბადის შემცველობა იზრდება და ხდება ერთნაირი ყველა წერტილისათვის არხის გასწვრივ.



სურ.3.5.4. აიროვან გარემოში ჟანგბადის დაყვანილი სიმკვრივის დროში ცვლილება არხის ორი სიგრძისათვის (ზედა სურათი– 0,1 მ; ქვედა სურათი – 0,2 მ).

აიროვან გარემოში ნახშირორჟანგის შემცველობის გაზრდა დაკავშირებულია სუნთქვის პროცესთან და ჟანგბადის შემცველობის შესაბამის შემცირებასთან. ამიტომ ნახშირწყლის შემცველობის ცვლილების სურათი (სურ.3.5.5.) ჟანგბადის შემცველობის ცვლილების სურათის (სურ.3.5.4.) საპირისპიროა. გრძელ არხში ნახშირორჟანგის შემცველობის მკვეთრი დაცემა აგრეთვე დაკავშირებულია სუნთქვის შეწყვეტასთან პროდუქტში გლუკოზის არ არსებობის გამო.



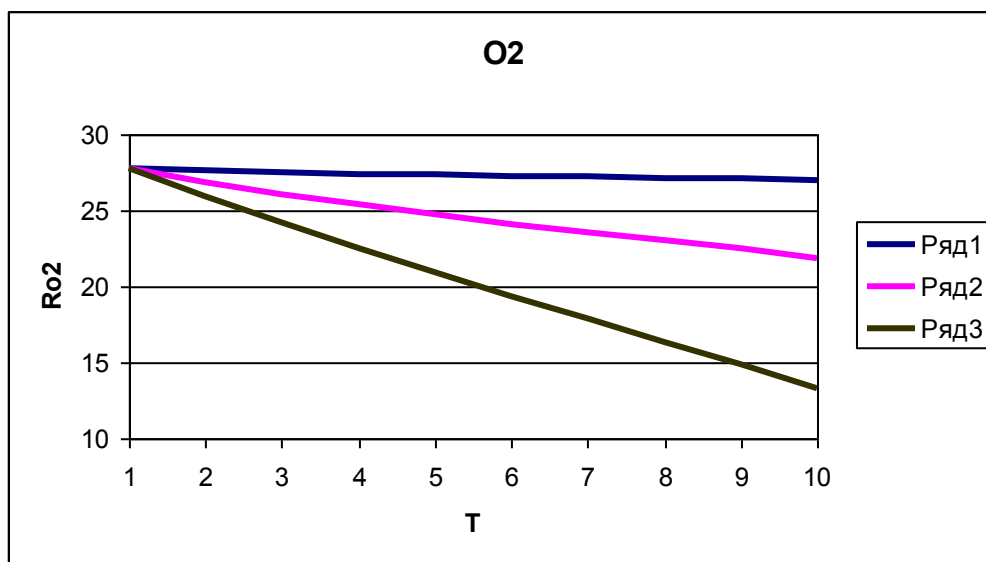
სურ.3.5.5. აიროვან გარემოში ნახშირორჟანგის დაყვანილი სიმკვრივის დროში ცვლილება არხის ორი სიგრძისათვის (ზედა სურათი – 0,1 მ; ქვედა სურათი – 0,2 მ).

### 3.6. შესასვლელთან აიროვანი გარემოს შემადგენლობის შენახვის პროცესზე გავლენის კვლევა

რეგულირებად აიროვან გარემოში შენახვა, უპირველეს ყოვლისა, გულისხმობს, აიროვანი გარემოს შერჩევას ისე, რომ მასში პროდუქტი ინარჩუნებდეს თავის ხარისხობრივ მაჩვენებლებს. ჩვენს მიერ ჩატარდა გამოთვლითი ექსპერიმენტები აირის ცვლადი შემადგენლობით შემნახველი საკნის შესასვლელთან.

სურ 3.6.1.–ზე ნაჩვენებია პროდუქტში გლუკოზის შემცველობის დროში ცვლილება გასასვლელზე ჟანგბადის აიროვან გარემოში სამი სხვადასხვა მასური წილისათვის – 2%, 12% და 22%. ჟანგბადის მასური წილის ცვლილება წარმოებდა

აზოტის მასური წილის ცვლილების ხარჯზე (მდგენელი 7 – დანარჩენი აირები). დანარჩენი რეჟიმული პარამეტრების სიდიდეები რჩებოდა საბაზისოდ. ჟანგბადის შესასვლელთან შემცველობის გაზრდისას შეიმჩნევა გლუკოზის ხარჯის მნიშვნელოვანი გაზრდა. გლუკოზის საწყისი დაყვანილი 27,78 კგ/მ<sup>3</sup> სიმკვრივისათვის, შენახვის 100 საათის შემდეგ გლუკოზის დაყვანილი სიმკვრივე შეადგენდა – ჟანგბადის შესასვლელთან 2%-ანი შემცველობისათვის – 26,5 კგ/მ<sup>3</sup>; 12%-ანისათვის – 22,3 კგ/მ<sup>3</sup>; 22%-ანისათვის – 13,8 კგ/მ<sup>3</sup>. უნდა ავლნიშნოთ, რომ გლუკოზის შემცველობის ცვლილების სურათი დროში იცვლებოდა და პრაქტიკულად მეორდებოდა შენახვის მონაკვეთის მთელ სიგრძეზე.



სურ.3.6.1. პროდუქტში გლუკოზის შემცველობის დროში ცვლილება გასასვლელზე ჟანგბადის აიროვან გარემოში სამი სხვადასხვა მასური წილისათვის (რიგი 1 - 2%, რიგი 2 -12% და რიგი 3 -22%)

შესასვლელთან აიროვან გარემოში ჟანგბადის მასური წილის გაზრდა ზრდის პროდუქტის გაუწყლოვნების სიჩქარეს (სურ.3.6.2). დროში ტენის უდიდესი დანაკარგი წარმოებს საწყის ზონაში (რიგი 1 სურ.3.6.2.–ზე). ჟანგბადის მცირე წილის დროს გარემოში შეიმჩნევა წყლის შემცველობის სტაბილიზაციის ტენდენცია არხის გასწვრივ წყლის კონცენტრაციის მომატებით.

სურ.3.6.3.–ზე ნაჩვენებია აიროვან გარემოში წყლის ორთქლის დაყვანილი სიმკვრივის დროში ცვლილება გასასვლელზე ჟანგბადის აიროვან გარემოში სამი სხვადასხვა მასური წილისათვის (ზედა სურ. – 2%; შუა სურ. – 12%; ქვედა სურ. –



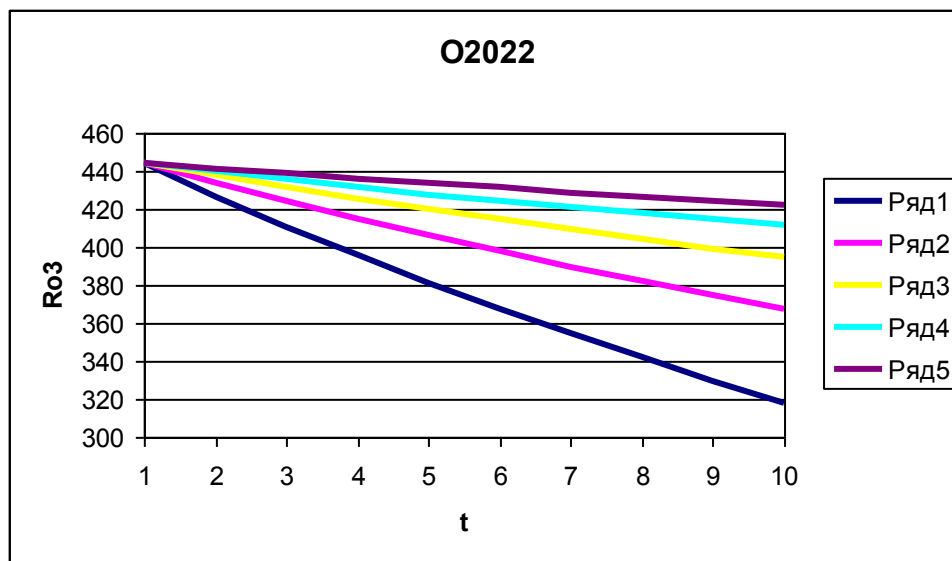
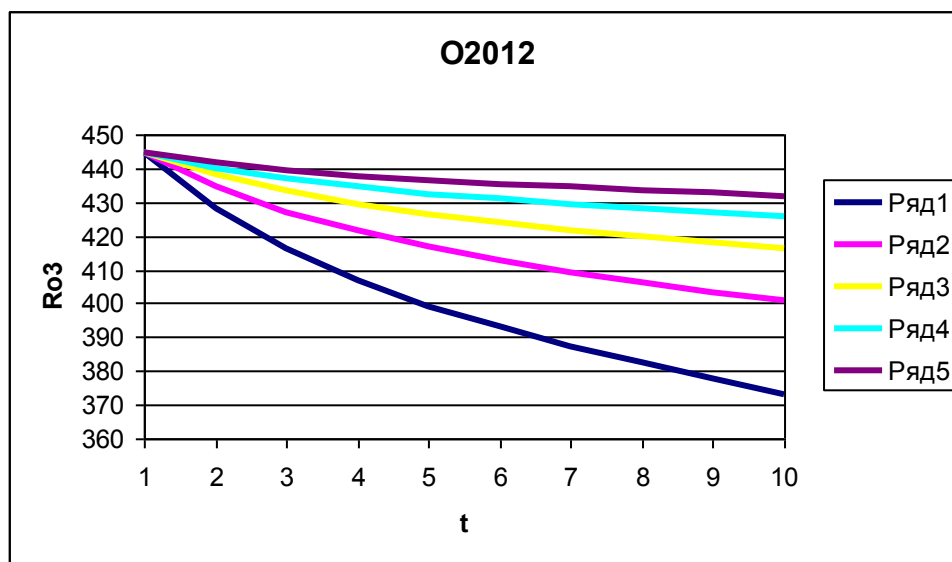
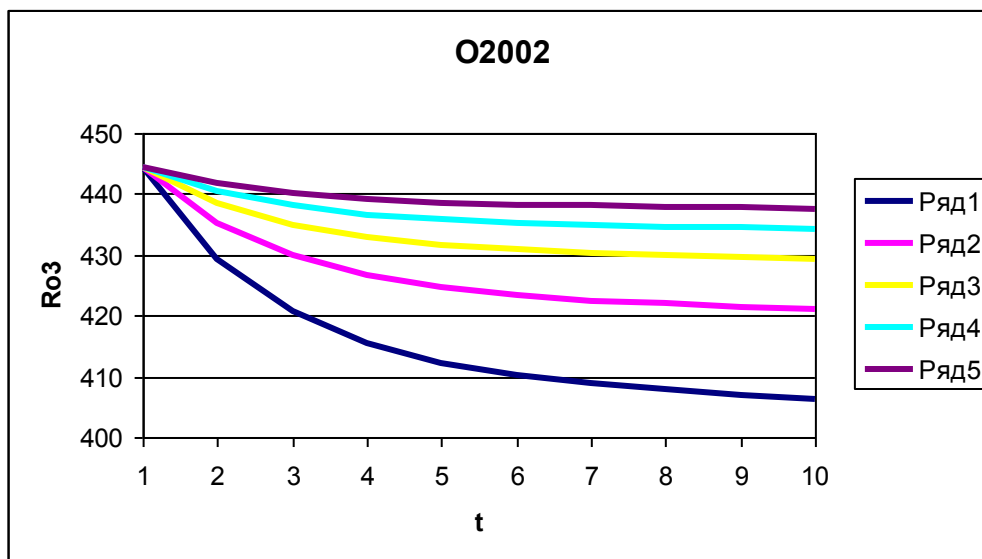
22%). შენახვის საწყის ეტაპზე ჟანგბადის განსახილველი სამი შემცველობისათვის შეიმჩნევა წყლის ორთქლის დაყვანილი სიმკვრივის გაზრდა არხის მთელ სიგრძეზე, ხოლო შემდგომში მდოვრე შემცირება სტაბილიზაციამდე ტენდენციით.

ჟანგბადის შემცველობა აიროვან გარემოში თავიდან მცირდება, შემდგომში კი გარკვეულ წილად იზრდება და სტაბილიზირდება (სურ.3.6.4). არხის დასაწყისში ჟანგბადის დაყვანილი სიმკვრივე ნარჩუნდება შემავალ აირში ჟანგბადის დაყვანილ სიმკვრივესთან ახლო მნიშვნელობაზე. არხის გასწვრივ სუნთქვის ხარჯზე ჟანგბადის სიმკვრივე მცირდება.

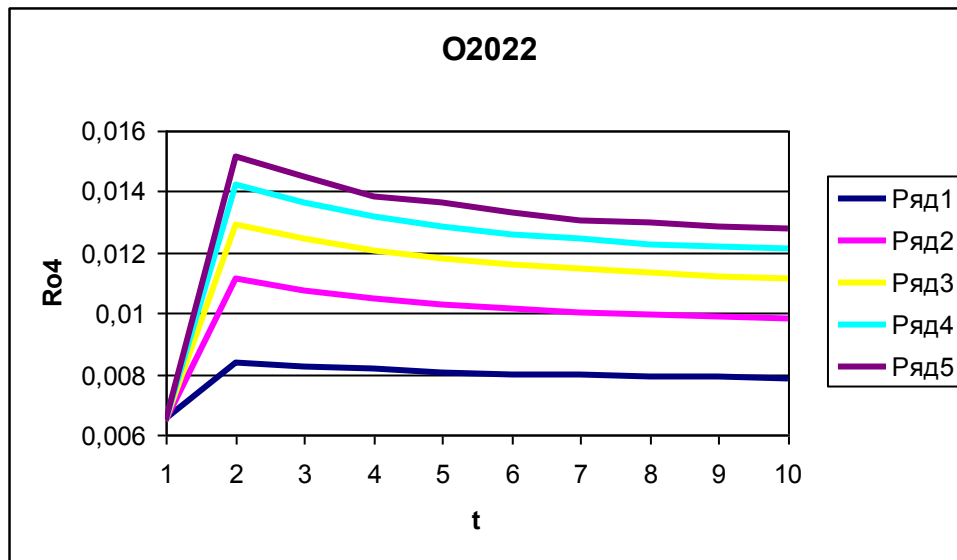
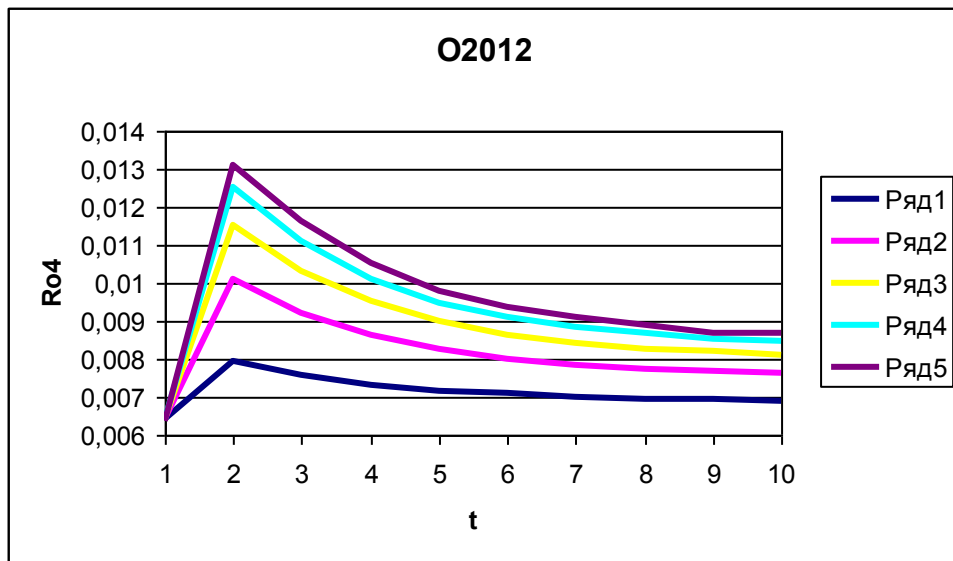
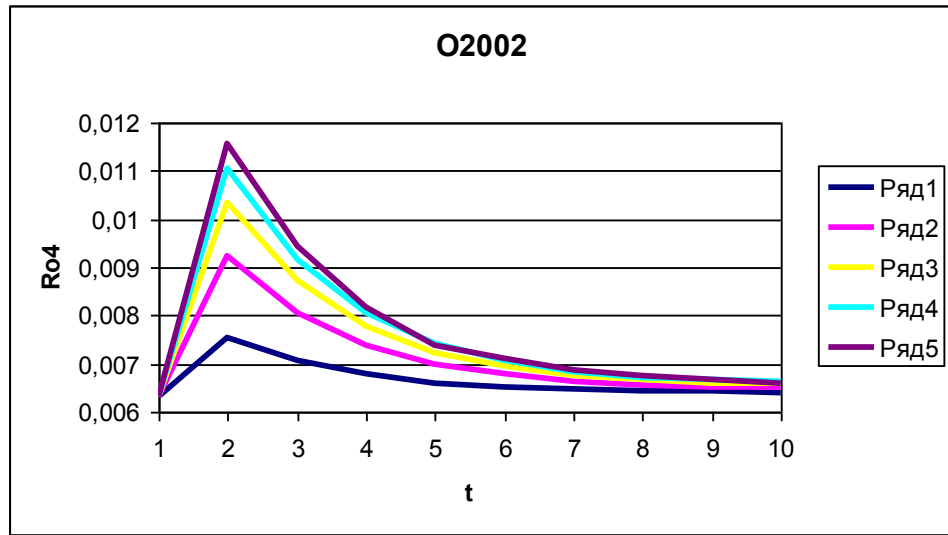
აიროვან გარემოში ნახშირორჟანგის დამატებითი წყარო სუნთქვის პროცესია, რომლის შედეგად შთაინთქმება ჟანგბადი და გამოიყოფა ნახშირწყალი. ამიტომ ნახშირორჟანგის ცვლილების ხარისხობრივი სურათი ჟანგბადის შემცველობის ცვლილების სურათის საპირისპიროა. ნახშირორჟანგის დაყვანილი სიმკვრივე თავიდან იზრდება, შემდგომ კი მდოვრედ შემცირებას იწყებს (სურ.3.6.5).

სურ.3.6.6.–ზე ნაჩვენებია პროდუქტის ტემპერატურის დროში ცვლილება შესასვლელთან ჟანგბადის აიროვან გარემოში სამი სხვადასხვა მასური წილისათვის (ზედა სურ. – 2%; შუა სურ. – 12%; ქვედა სურ. – 22%). პროდუქტის ტემპერატურა მნიშვნელოვან წილად დამოკიდებულია შემავალ აირში ჟანგბადის რაოდენობაზე. ჟანგბადის დიდი რაოდენობა სუნთქვის პროცესს უფრო ინტენსიურს ხდის, რის შედეგად გამოიყოფა სითბოს შესაბამისი რაოდენობა. პროდუქტის ტემპერატურა ნაკლებად იცვლება არხის გასწვრივ.

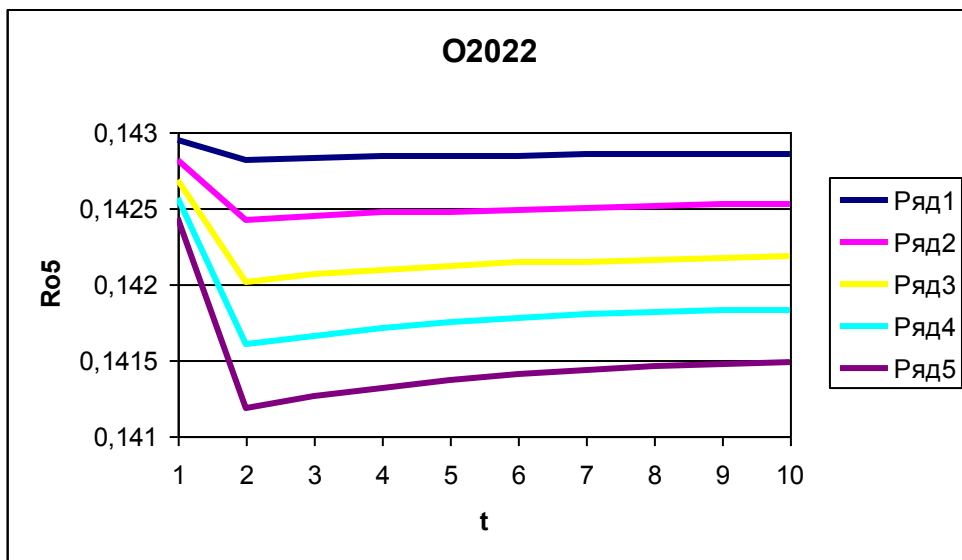
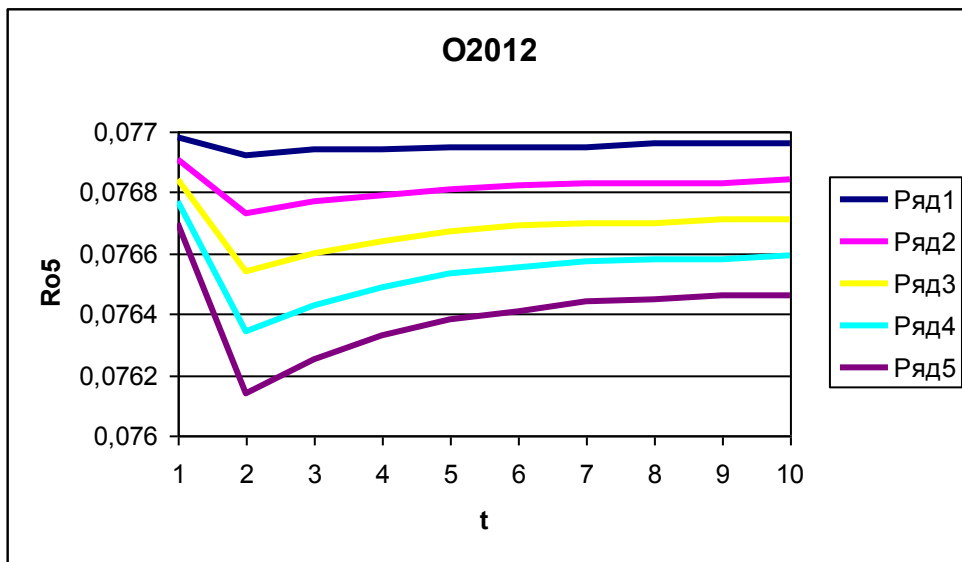
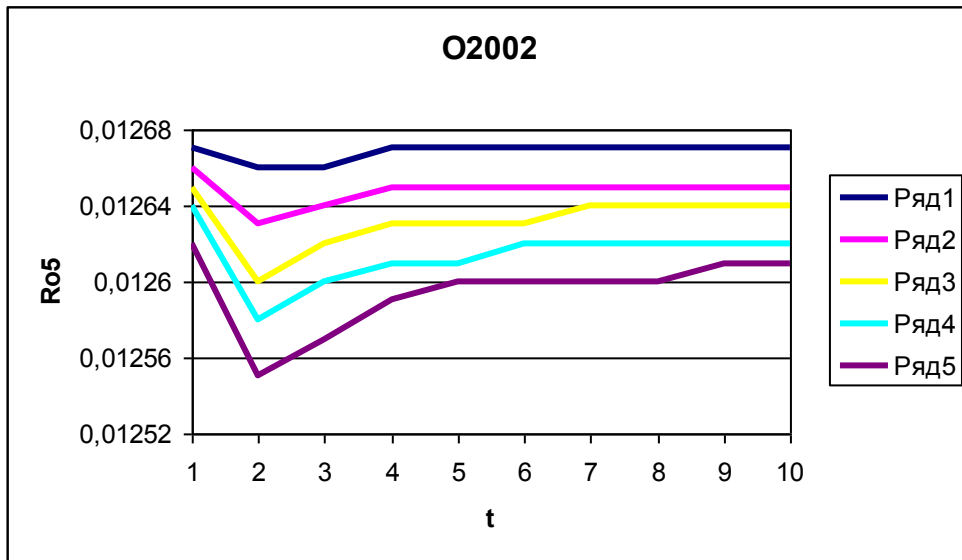
სურ.3.6.7.–ზე ნაჩვენებია აიროვანი გარემოს ტემპერატურის დროში ცვლილება შესასვლელთან ჟანგბადის აიროვან გარემოში სამი სხვადასხვა მასური წილისათვის (ზედა სურ. – 2%; შუა სურ. – 12%; ქვედა სურ. – 22%). გავიხსენოთ, რომ აიროვანი გარემოს საწყისი ტემპერატურა არხში 20°C ტოლია, ხოლო არხში შესასვლელთან აირის ტემპერატურა არის საბაზისო და -5°C ტოლია. არხში აიროვანი გარემოს ტემპერატურა თავიდან შედარებით სწრაფად ეცემა, ხოლო შემდგომში ტემპერატურის დაცემა ნელდება, და ბოლოს აირის ტემპერატურა მუდმივი ხდება. დამყარებული ტემპერატურის სიდიდე დამოკიდებულია აირში ჟანგბადის საწყის შემცველობაზე.



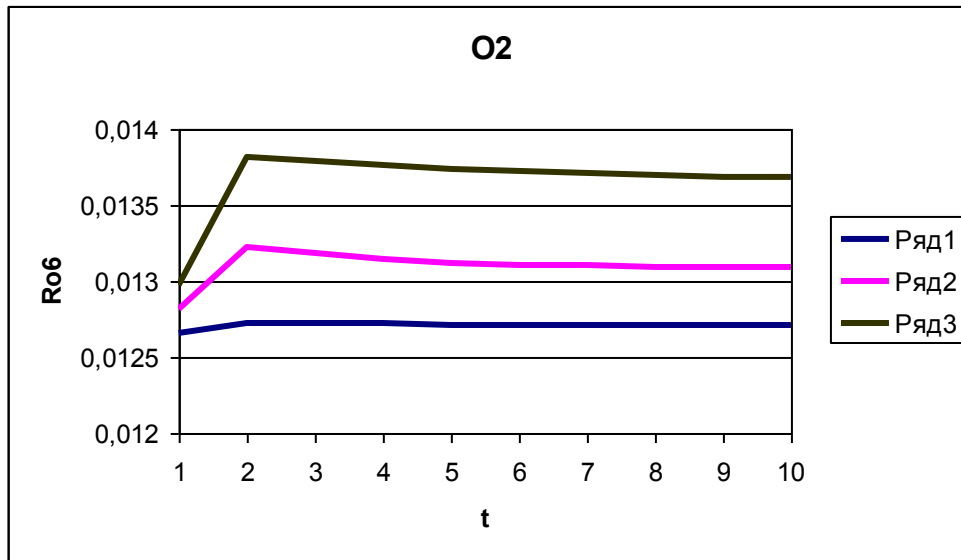
სურ.3.6.2. პროდუქტში წყლის შემცველობის დროში ცვლილება შესასვლელთან ჟანგბადის აიროვან გარემოში სამი სხვადასხვა მასური წილისათვის (ზედა სურ. – 2%; შუა სურ. – 12%; ქვედა სურ. – 22%).



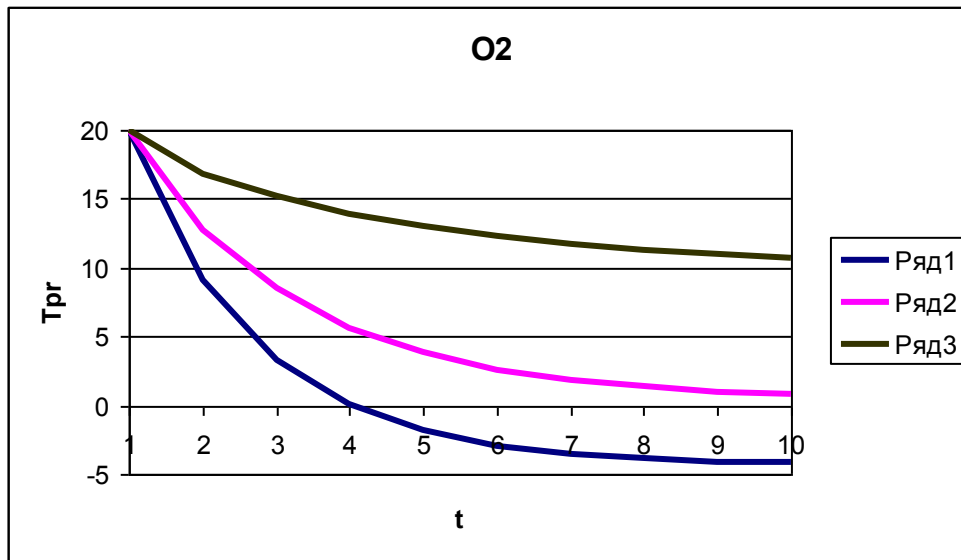
სურ.3.6.3. აიროვან გარემოში წყლის ორთქლის შემცველობის დროში ცვლილება შესასვლელთან ჟანგბადის აიროვან გარემოში სამი სხვადასხვა მასური წილისათვის (ზედა სურ. – 2%; შუა სურ. – 12%; ქვედა სურ. – 22%).



სურ.3.6.4. აიროვან გარემოში ჟანგბადის შემცველობის დროში ცვლილება შესასვლელთან ჟანგბადის აიროვან გარემოში სამი სხვადასხვა მასური წილისათვის (ზედა სურ. – 2%; შუა სურ. – 12%; ქვედა სურ. – 22%).



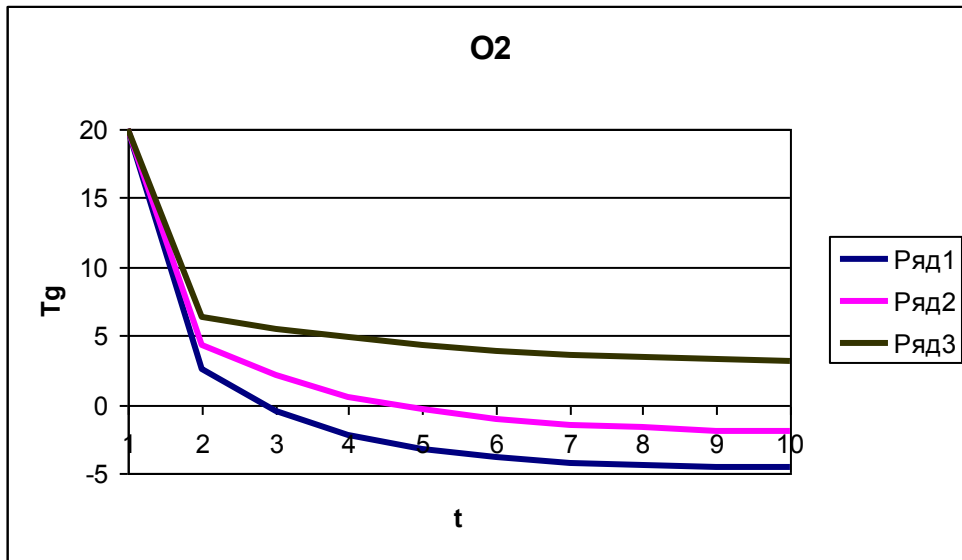
სურ.3.6.5. აიროვან გარემოში ნახშირბადის შემცველობის დროში ცვლილება შესასვლელთან ჟანგბადის აიროვან გარემოში სამი სხვადასხვა მასური წილისათვის (ზედა სურ. – 2%; შუა სურ. – 12%; ქვედა სურ. – 22%).



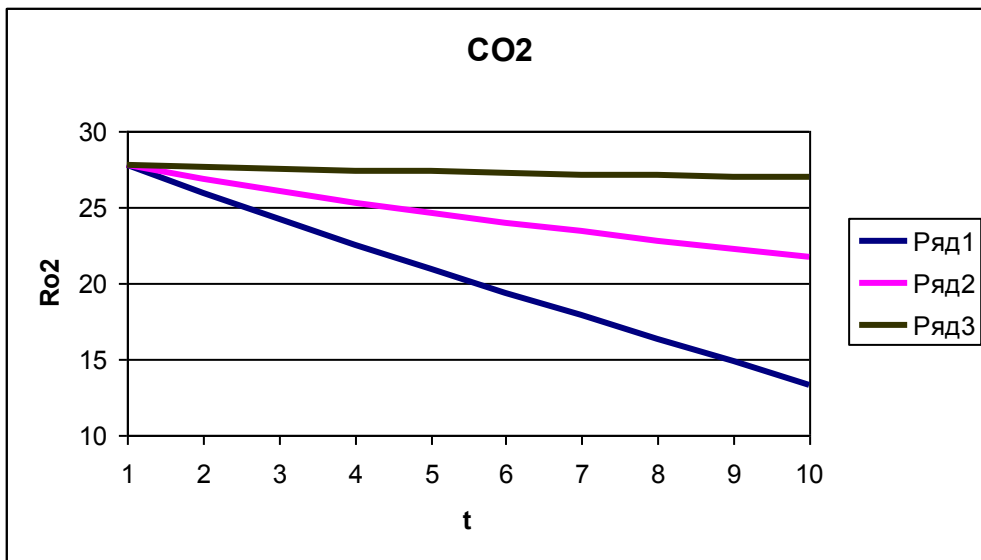
სურ.3.6.6. პროდუქტის ტემპერატურის დროში ცვლილება შესასვლელთან ჟანგბადის აიროვან გარემოში სამი სხვადასხვა მასური წილისათვის (ზედა სურ. – 2%; შუა სურ. – 12%; ქვედა სურ. – 22%).

შემდგომში განიხილებოდა შესასვლელთან აიროვან გარემოში ნახშირორჟანგის შემცველობის გავლენა შენახვის პროცესზე. გამოიყენებოდა შემავალ აიროვან გარემოში ნახშირორჟანგის დაყვანილი სიმკვრივის სამი დონე – 2%, 12% და 22%. ნახშირორჟანგის შემცველობის გაზრდა წარმოებდა ჟანგბადის შესაბამისი წილის შემცირების ხარჯზე (ჟანგბადის წილები – 22%, 12% და 2%). მოდელში ქიმიური პროცესების გამარტივებული აღწერა იწვევს იმას, რომ აზოტის და ნახშირორჟანგის მასურ წილებს შორის შეფარდება გავლენას ახდენს მხოლოდ ერთი აიროვანი

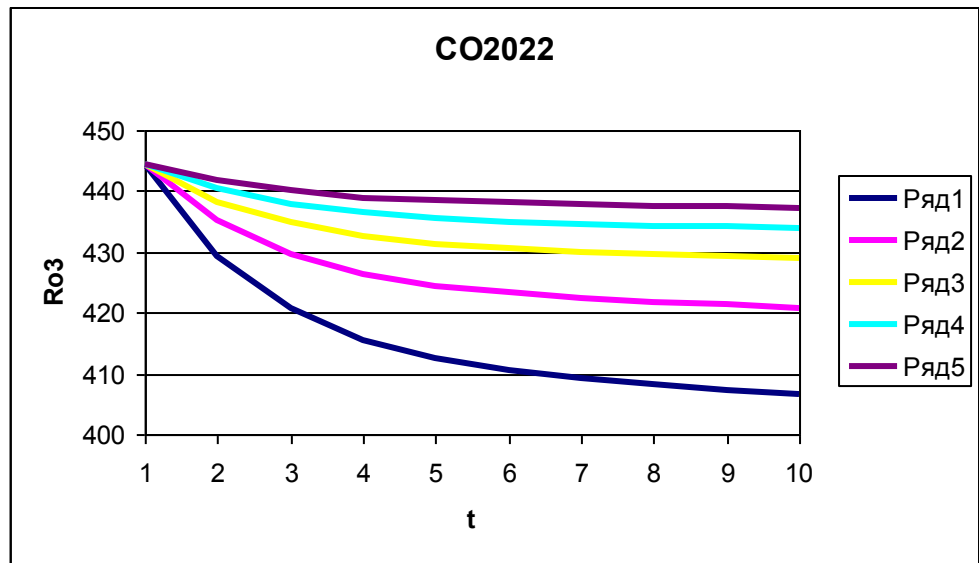
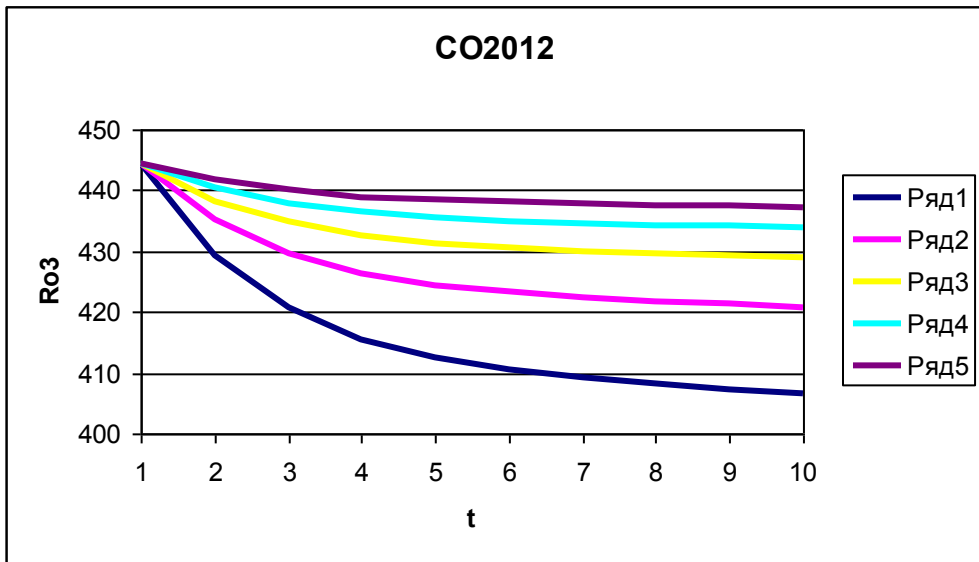
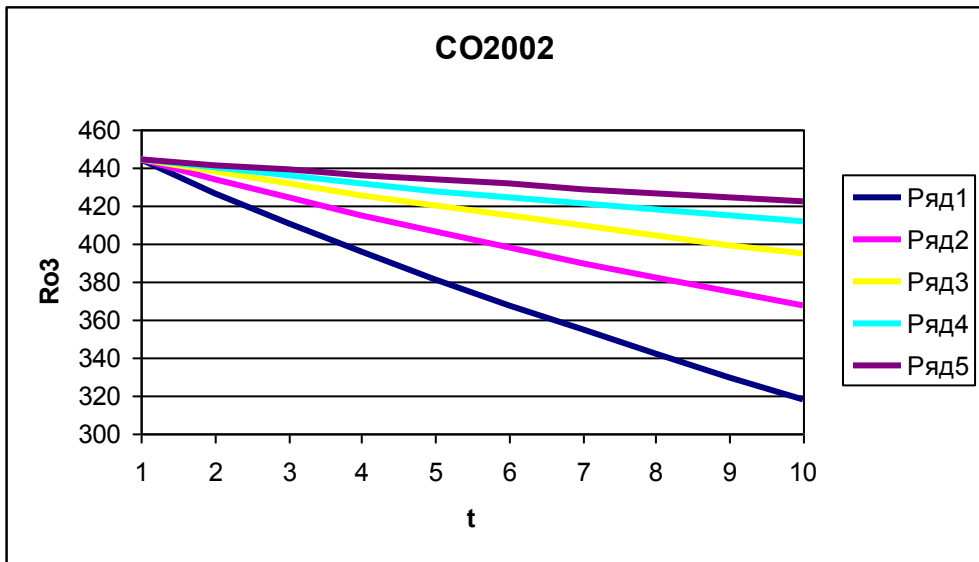
გარემოს თბოფიზიკური მახასიათებლებზე. ამ შეფარდების პროცესის ბიოქიმიაზე გავლენა მოდელში გათვალისწინებული არ არის. ამიტომ შემდეგი, შესასვლელთან აიროვან გარემოში ნახშირორჟანგის რაოდენობის გავლენის ამსახველი, სურათები პრაქტიკულად იმეორებენ შენახვის პროცესის მაჩვენებლებზე ჟანგბადის შემცველობის გავლენის შედეგებს.



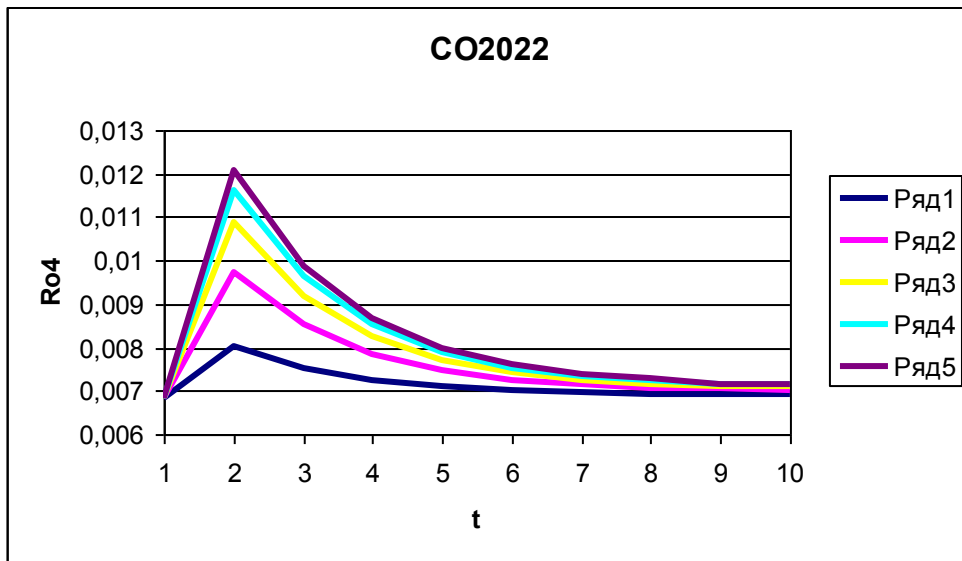
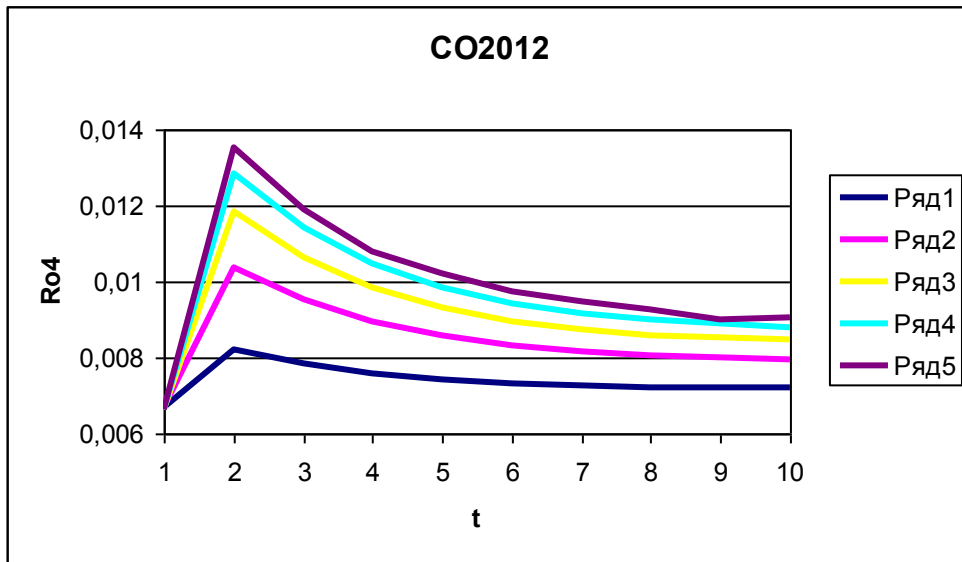
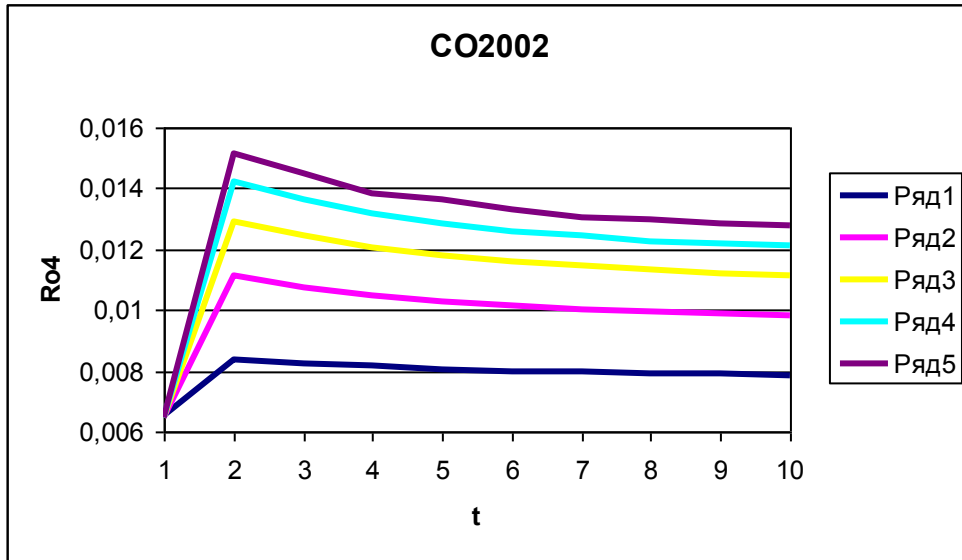
სურ.3.6.7. აიროვანი გარემოს ტემპერატურის დროში ცვლილება შესასვლელთან ჟანგბადის აიროვან გარემოში სამი სხვადასხვა მასური წილისათვის (ზედა სურ. – 2%; შუა სურ. – 12%; ქვედა სურ. – 22%).



სურ.3.6.8. გლუკოზის შემცველობის დროში ცვლილება შესასვლელთან აიროვან გარემოში ნახშირორჟანგის სამი სხვადასხვა მასური წილისათვის (ზედა სურ. – 2%; შუა სურ. – 12%; ქვედა სურ. – 22%).

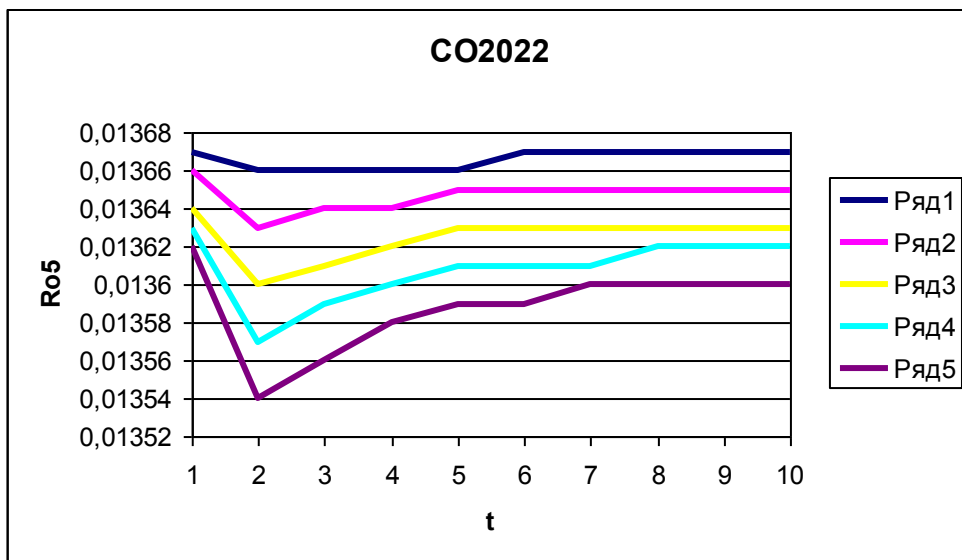
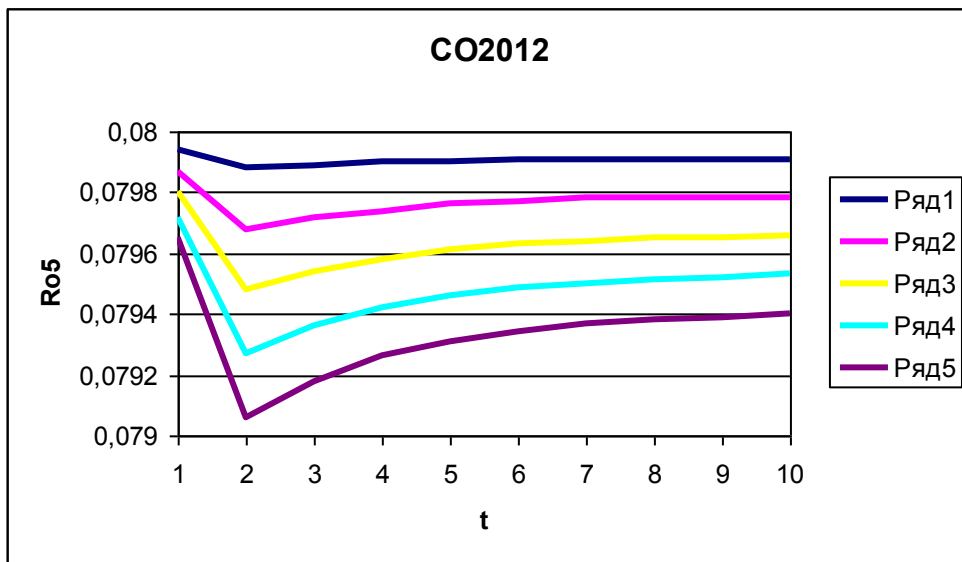
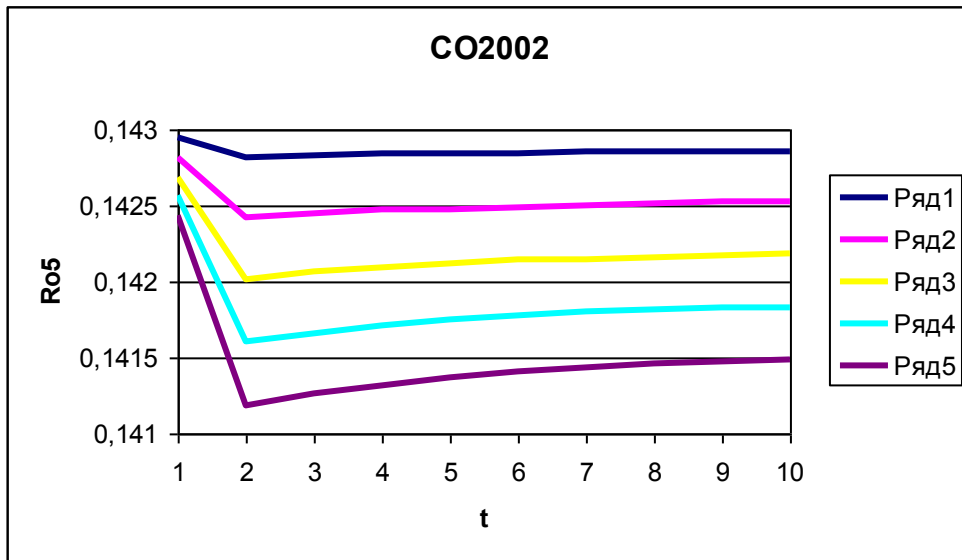


სურ.3.6.9. პროდუქტში წყლის შემცველობის დროში ცვლილება შესასვლელთან აიროვან გარემოში ნახშირორჟანგის სამი სხვადასხვა მასური წილისათვის (ზედა სურ. – 2%; შუა სურ. – 12%; ქვედა სურ. – 22%).

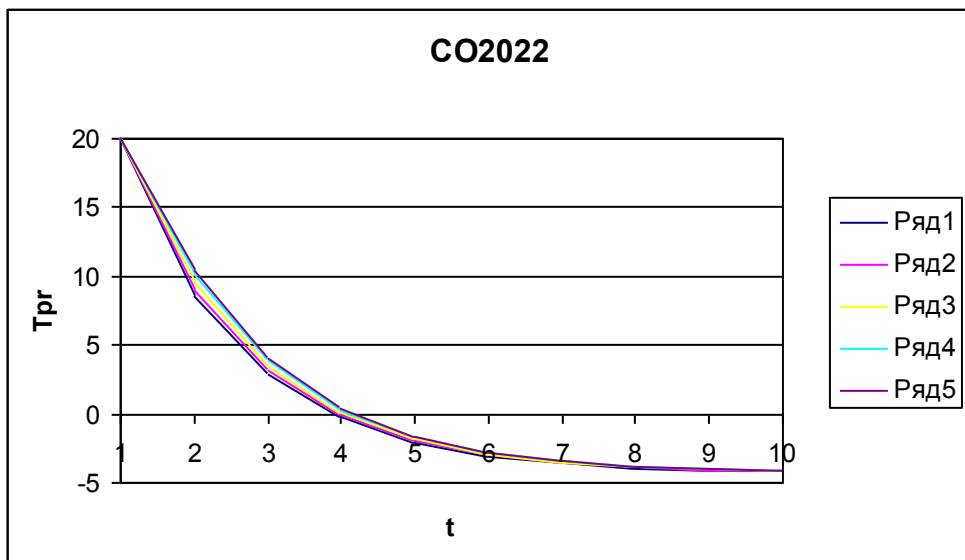
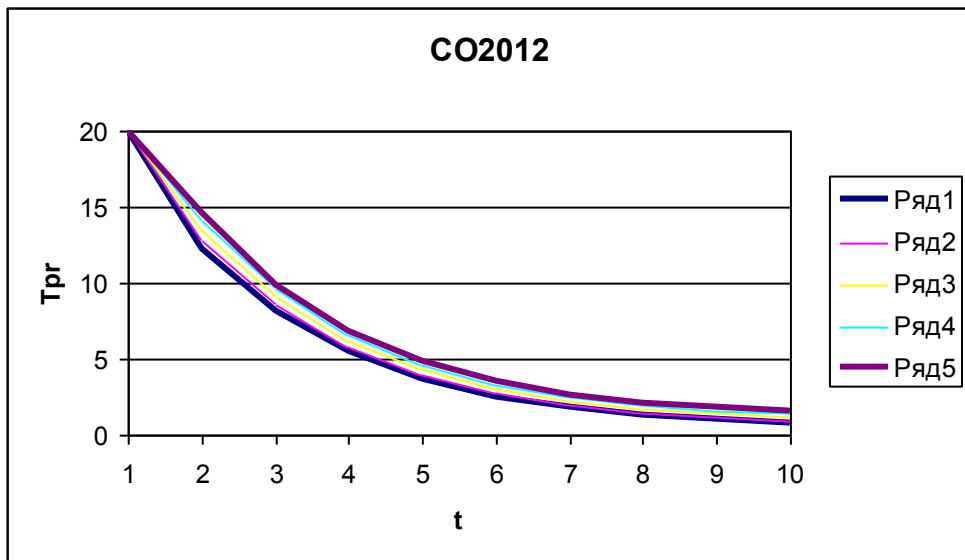
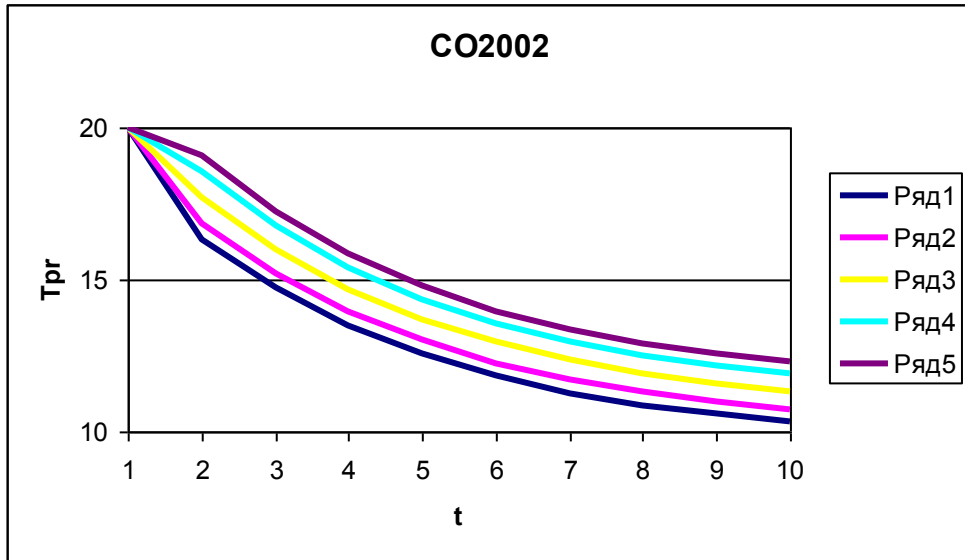


სურ.3.6.10. აიროვან გარემოში წყლის ორთქლის შემცველობის დროში ცვლილება შესასვლელთან აიროვან გარემოში ნახშირორჟანგის სამი სხვადასხვა მასური წილისათვის (ზედა სურ. – 2%; შუა სურ. – 12%; ქვედა სურ. – 22%).

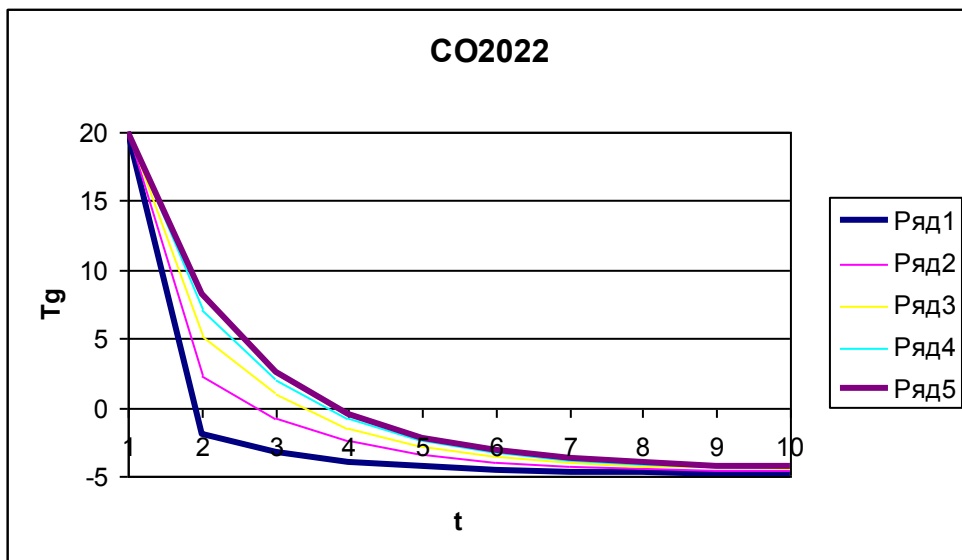
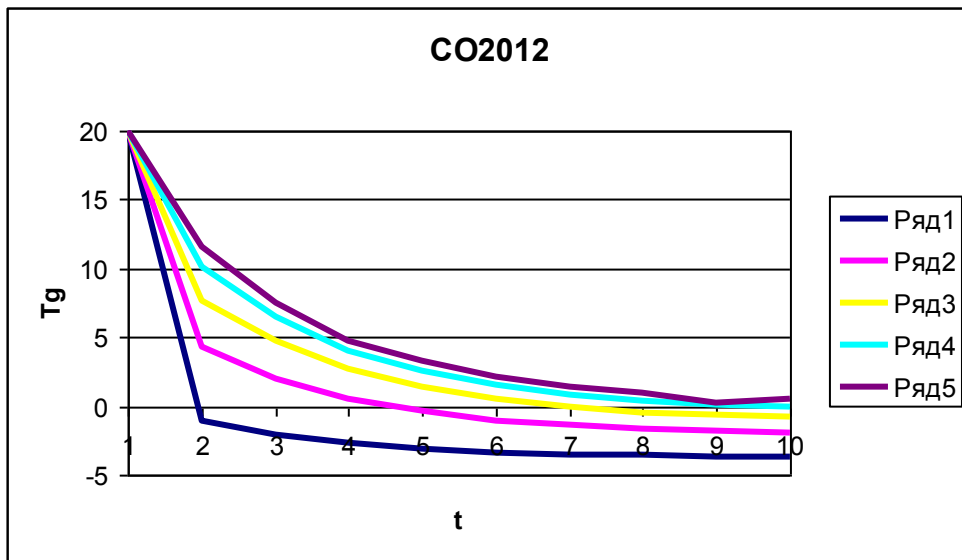
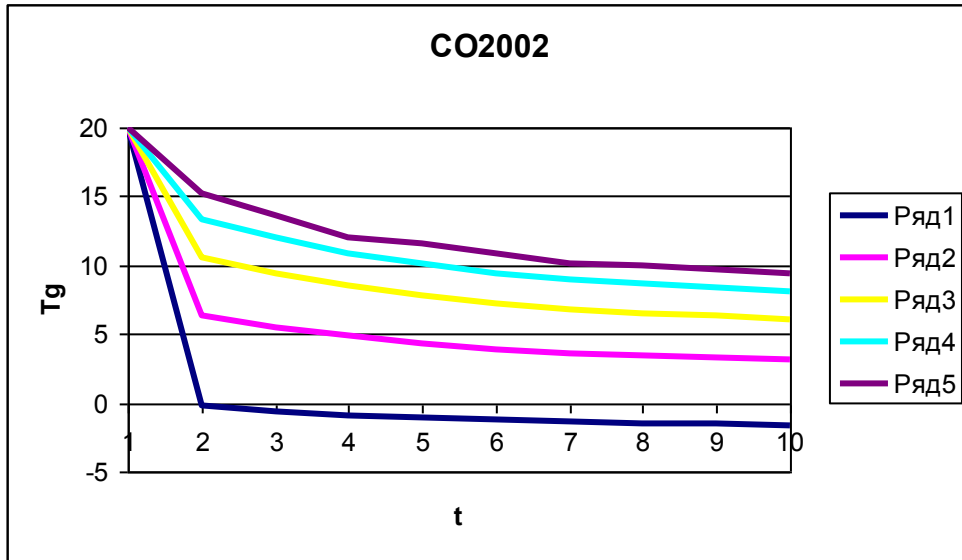




სურ.3.6.11. აიროვან გარემოში ჟანგბადის შემცველობის დროში ცვლილება შესასვლელთან აიროვან გარემოში ნახშირორჟანგის სამი სხვადასხვა მასური წილისათვის (ზედა სურ. – 2%; შუა სურ. – 12%; ქვედა სურ. – 22%).



სურ.3.6.12. პროდუქტის ტემპერატურის დროში ცვლილება შესასვლელთან აიროვან გარემოში ნახშირორჟანგის სამი სხვადასხვა მასური წილისათვის (ზედა სურ. – 2%; შუა სურ. – 12%; ქვედა სურ. – 22%).



სურ.3.6.13. აიროვანი გარემოს ტემპერატურის დროში ცვლილება შესასვლელთან აიროვან გარემოში ნახშირორჟანგის სამი სხვადასხვა მასური წილისათვის (ზედა სურ. – 2%; შუა სურ. – 12%; ქვედა სურ. – 22%).

მიღებული შედეგების საფუძველზე შეგვიძლია დავადგინოთ მცენარეული კვების პროდუქციის შენახვის ოპტიმალური პარამეტრები, გავითვალისწინოთ შესაძლო სირთულეები და თავი ავარიდოთ დანაკარგებს.

## თავი 4. შენახვის პროცესის ოპტიმიზაცია

### 4.1. ოპტიმიზაციური ამოცანის დასმა

როგორც გვიჩვენეს გამოთვლითმა ექსპერიმენტებმა (თავი 3), ძირითადი კონსტრუქციული და რეჟიმული პარამეტრები რთულად და ურთიერთდაკავშირებულად ახდენს გავლენას კვების მცენარეული პროდუქტების შენახვის პროცესის მაჩვენებლებზე. ამ პირობებში შენახვის რაციონალური პარამეტრების განსაზღვრა მათემატიკური მოდელირების შედეგების ზედაპირული ხარისხობრივი ანალიზის საფუძველზე პრაქტიკულად შეუძლებელია. აუცილებელია შესაბამისი ოპტიმიზაციური ამოცანის დასმა და გადაწყვეტა.

თავდაპირველად მოვახდინოთ კვების მცენარეული პროდუქტების შენახვის პროცესის ოპტიმიზაციის ამოცანის ხარისხობრივი დასმა.

შენახვის ოპტიმალურობის ცნებისადმი სხვადასხვა მიდგომის მიხედვით დამახასიათებელ კრიტერიუმად შესაძლებელია სხვადასხვა სიდიდის გამოყენება. დამახასიათებელ კრიტერიუმად გამოვიყენებთ გლუკოზის  $\Delta M_2$  ჯამური დანაკარგების სიდიდეს.

დამახასიათებელი კრიტერიუმის –  $\Delta M_2$  მინიმიზაციას მოვახდენთ დამოუკიდებელი ცვლადების ვარიირებით. დამოუკიდებელი ცვლადები – შენახვის პროცესის ძირითადი რეჟიმული და კონსტრუქციული პარამეტრებია: საკნის შესასვლელთან აიროვანი გარემოს შემადგენლობა (წყლის ორთქლის მასური წილი  $\gamma_{40}$ , ჟანგბადის მასური წილი  $\gamma_{50}$ , ნახშირორჟანგის მასური წილი  $\gamma_{60}$ ), შესასვლელთან აიროვანი გარემოს  $T_0''$  ტემპერატურა, შესასვლელთან აიროვანი გარემოს  $p_0$  წნევა (ეს წნევა, ძირითადად განსაზღვრავს აიროვანი გარემოს პროდუქტში ფილტრაციის საშუალო  $\nu$  სიჩქარეს), პროდუქტის ჩაწყობის საწყისი  $\kappa_0$  სიმჭიდროვე და შემნახველი საკნის  $L$  სიგრძე.

ბუნებრივია განვსაზღვრავთ დამოუკიდებელი პარამეტრების ვარიაციის საზღვრებს. პრაქტიკაში მიღებული მათემატიკური მოდელირების წინასწარი შედეგების, სიდიდეების და კონსტრუქციული საზღვრების გათვალისწინებით განვსაზღვრავთ დამოუკიდებელი ცვლადებისათვის შემდეგ საზღვრებს:

$$\begin{aligned}
0 &\leq \gamma_{40} \leq 0,05 \\
0,01 &\leq \gamma_{50} \leq 0,5 \\
0 &\leq \gamma_{60} \leq 0,5 \\
1,05 \cdot 10^5 &\leq p_0 \leq 2,0 \cdot 10^5 \\
-10^0 C &\leq T_0'' \leq 10^0 C \\
0,5 &\leq \kappa_0 \leq 0,8 \\
0,1M &\leq L \leq 0,5M
\end{aligned} \tag{4.1-1}$$

წრფივი გარდაქმნით დავიყვანთ დამოუკიდებელი ცვლადების ვარიაციების მონაკვეთებს ერთეულოვან მონაკვეთამდე  $[0,1]$ . ნორმირებული დამოუკიდებელი პარამეტრების ვექტორის კომპონენტები დაკავშირებულია შესაბამის ძირითად პარამეტრებთან შემდეგი შეფარდებებით:

$$\begin{aligned}
x_1 &= \frac{\gamma_{40}}{0,05} \\
x_2 &= \frac{\gamma_{50} - 0,01}{0,5 - 0,01} \\
x_3 &= \frac{\gamma_{60}}{0,5} \\
x_4 &= \frac{T_0'' + 10}{10 + 10} \\
x_5 &= \frac{p_0 - 1,05 \cdot 10^5}{2 \cdot 10^5 - 1,05 \cdot 10^5} \\
x_6 &= \frac{\kappa_0 - 0,5}{0,8 - 0,5} \\
x_7 &= \frac{L - 0,1}{0,5 - 0,1}
\end{aligned} \tag{4.1-2}$$

მოვახდინოთ ოპტიმიზაციური ამოცანის მათემატიკური დასმა;

მაქსიმიზაცია

$$-\Delta M_2 = f(\vec{x}) \tag{4.1-3}$$

საზღვრებში

$$0 \leq x_i \leq 1, i = 1, \dots, 7. \tag{4.1-4}$$

ფუნქცია  $f(\vec{x})$  განისაზღვრება რიცხვითი მეთოდით მათემატიკური მოდელის საფუძველზე.

ნორმირებული დამოუკიდებელი პარამეტრებიდან განზომილებებიან დამოუკიდებელ პარამეტრებზე უკუგადასვლა ხორციელდებოდა შემდეგი ფორმულების მეშვეობით:

$$\begin{aligned}
\gamma_{40} &= 0,05 \cdot x_1 \\
\gamma_{50} &= (0,5 - 0,01) \cdot x_2 + 0,01 \\
\gamma_{60} &= 0,5 \cdot x_3 \\
T_0'' &= (10 + 10) \cdot x_4 - 10 \\
p_0 &= (2 \cdot 10^5 - 1,05 \cdot 10^5) \cdot x_5 + 1,05 \cdot 10^5 \\
\kappa_0 &= (0,8 - 0,5) \cdot x_6 + 0,5 \\
L &= (0,5 - 0,1) \cdot x_7 + 0,1
\end{aligned}
\tag{4.1-5}$$

## 4.2 ალგორითმი ოპტიმიზაციური ამოცანისათვის

(4.1-3)-(4.1-4) ოპტიმიზაციური ამოცანა შეიძლება განვიხილოთ როგორც არაწრფივი პროგრამირების ამოცანა, სადაც დადებულია დამოუკიდებელი ცვლადების ვარიანტების საზღვრების შეზღუდვა [42, 65]. ამ ამოცანას გადავწყვიტავთ გრადიენტის პროექციების მეთოდით [8, 14, 65].

გრადიენტის პროექციების მეთოდი ნაბიჯ-ნაბიჯ აგებს პროცესს  $\bar{x}^0, \bar{x}^1, \bar{x}^2, \dots, \bar{x}^i, \bar{x}^{i+1}, \dots$ , რომელიც, როგორც წესი დაიყვანება ოპტიმიზაციური ამოცანის გადაწყვეტამდე. ამ მეთოდის შეყრის მკაცრი დამტკიცება არ არსებობს [45]. იმის გამო, რომ ამოხსნას ვპოულობთ რიცხვითი მეთოდით, შეუძლებელია ზუსტად დავაკმაყოფილოდ სასაზღვრო პირობები. შემოგვაქვს შეზღუდვების შესრულების დასაშვები ცდომილება  $\varepsilon > 0$ , და ამ თვალსაზრისით დასაშვებია ის  $\bar{x}$  წერტილები, რომლებისთვისაც:

$$x_{i \min} - \varepsilon < x_i < x_{i \max} + \varepsilon \tag{4.2-1}$$

უფრო კონკრეტულად რომ ვთქვათ, შეზღუდვას (4.1-4) აქტიურად ჩავთვლით  $\bar{x}$  წერტილში, თუ ერთი  $i$ -თვის მაინც სრულდება პირობა:

$$|x_i - x_{i \min}| < \varepsilon \cup |x_{i \max} - x_i| < \varepsilon \tag{4.2-2}$$

ხოლო თუ სრულდება პირობა

$$x_{i \min} \leq x_i \leq x_{i \max} \tag{4.2-3}$$

მაშინ შეზღუდვა იქნება პასიური. იმ წერტილების სიმრავლის გადაკვეთა, რომლებისთვისაც სრულდება (4.2-2) და (4.2-3) არ არის ცარიელი, მაგრამ ჩვენ გააზრებულად მივდივართ ამაზე, რადგან მეთოდის პრაქტიკული რეალიზაციისას გვექნება მოქმედების განსაზღვრული თავისუფლება. ჩვენი შემთხვევისთვის,

ცხადია,  $x_{i_{\min}} = 0$  და  $x_{i_{\max}} = 1$ .

ვთქვათ, ნაპოვნია  $i$ -ური ბიჯის პირველი მიახლოება –  $\bar{x}^i$ , მაშინ გადავდივართ  $(i+1)$ -ური მიახლოების –  $\bar{x}^{i+1}$  აგებაზე. ავღნიშნოთ, რომ გრადიენტის პროექციების მეთოდი, ყველა იტერაციული მეთოდის მსგავსად, გულისხმობს რაღაც  $\bar{x}^0$  წერტილის – საწყისი მიახლოების არჩევას.  $\bar{x}^0$  წერტილის შერჩევის ზოგადი წესი იტერაციულ მეთოდებში არ არსებობს. იმ შემთხვევაში, როცა გეომეტრიული, ფიზიკური ან სხვა მოსაზრებების გამომდინარე შეიძლება იყოს მიღებული წინასწარი ინფორმაცია მაქსიმუმის წერტილის განლაგების არის შესახებ,  $\bar{x}^0$  საწყის მიახლოებას ირჩევენ ამ არესთან რაც შეიძლება ახლოს. ჩვენ შემთხვევაში  $\bar{x}$ -თვის დასაშვები მნიშვნელობების არე არის 7-განზომილებიანი კუბი (4.1-4), ამიტომ საწყის მიახლოებას ავიღებთ კუბის ცენტრში:

$$x_i^0 = 0,5 \quad (4.2-4)$$

$\bar{x}^i$  წერტილში ვაგებთ (4.1-3) ფუნქციის გრადიენტის ვექტორს:

$$\bar{\nabla}f = \left( \frac{\partial f}{\partial x_1} \quad \frac{\partial f}{\partial x_2} \quad \frac{\partial f}{\partial x_3} \quad \frac{\partial f}{\partial x_4} \quad \frac{\partial f}{\partial x_5} \quad \frac{\partial f}{\partial x_6} \quad \frac{\partial f}{\partial x_7} \right)^T \Big|_{\bar{x}=\bar{x}^i} \quad (4.2-5)$$

ცნობილია, [14, 45, 65], რომ  $f(\bar{x})$  ფუნქციას  $\bar{x}^i$  წერტილში ზრდის უდიდესი სიჩქარე აქვს  $\bar{\nabla}f$  გრადიენტის ვექტორის მიმართულებით (4.2-5). გრადიენტური მეთოდი მდგომარეობს  $\bar{x}^0, \bar{x}^1, \bar{x}^2, \dots, \bar{x}^i, \bar{x}^{i+1}, \dots$  მიმდევრობისათვის შემდეგი წესით:

$$\bar{x}^{i+1} = \bar{x}^i - \alpha_i \cdot \bar{\nabla}f(\bar{x}^i) \quad (4.2-6)$$

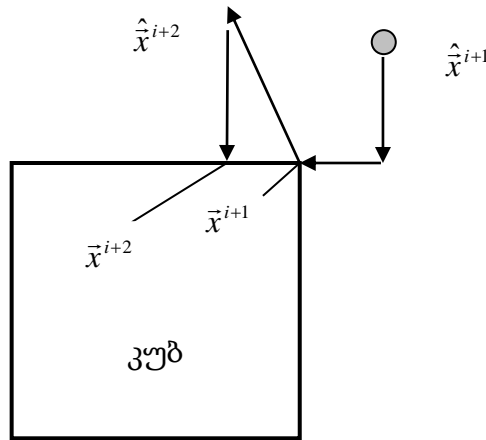
რიცხვს  $\alpha_i$ -ს (4.2-6)-დან ეწოდება გრადიენტური მეთოდის ბიჯი. თუ  $\bar{\nabla}f(\bar{x}^i) \neq 0$ , მაშინ ნაბიჯს ყოველთვის ვირჩევთ ისე, რომ  $f(\bar{x}^{i+1}) > f(\bar{x}^i)$ . არსებობს  $\alpha_i$  სიდიდის შერჩევის სხვადასხვა მეთოდები, რომლებსაც შეესაბამება გრადიენტური მეთოდის სხვადასხვა ვარიანტები [45]. თუ  $\bar{\nabla}f(\bar{x}^i) = 0$ , მაშინ  $\bar{x}^i$  – სტაციონარული წერტილია. ამ შემთხვევაში იტერაციული პროცესი (4.2-6) წყდება, და აუცილებლობის შემთხვევაში  $\bar{x}^i$  წერტილის მიდამოში ტარდება ფუნქციის ქცევის დამატებითი კვლევა, იმის დასადგენად აღწევს თუ არა  $f(\bar{x})$  ფუნქცია ამ წერტილში მინიმუმს. ზოგჯერ დამატებითი კვლევის ჩატარება საჭირო არ არის. მაგალითად, თუ წინასწარ ცნობილია, რომ  $f(\bar{x})$  – ამოზნექილი ფუნქცია არის, სტაციონარულ წერტილში ყოველთვის მიიღწევა მაქსიმუმი [65].



შეიძლება აღმოჩნდეს, რომ  $\bar{x}^{i+1}$  (4.2-6)–დან არ ეკუთვნის (4.2-4)–ს დასაშვები მნიშვნელობების არეს. ამ სირთულის დაშვება შესაძლებელია, თუ (4.2-6)–ის დახმარებით  $\hat{x}^{i+1} = \bar{x}^i - \alpha_i \cdot \bar{\nabla}f(\bar{x}^i)$  წერტილს ყოველი  $i$ –თვის დავაპროექტებთ შესაძლო მნიშვნელობების სიმრავლეზე (ნახ.4.2.1.). შედეგად მივდივართ გრადიენტის პროექციების მეთოდთან [65]:

$$\bar{x}^{i+1} = P(\bar{x}^i - \alpha_i \cdot \bar{\nabla}f(\bar{x}^i)) \tag{4.2-7}$$

სადაც  $P$  – დაპროექციების ოპერატორი.



ნახ.4.2.1. გრადიენტის პროექციების მეთოდით ოპტიმიზაციური ამოცანის ამოხსნა

### 4.3. ოპტიმიზაციური ამოცანის ამოხსნის შედეგები

4.2.–ში აღწერილი ალგორითმის საფუძველზე დამუშავებული იქნა გამოყენებითი პროგრამების პეკეტი, რომელშიც, შემადგენელ ნაწილად, შევიდა პროგრამა, რომელიც ახორციელებს მცენარეული კვების პროდუქტების შენახვის მათემატიკურ მოდელს.

მაგალითისათვის მოვიყვანთ შემდეგი ოპტიმიზაციური ამოცანის ამოხსნა:

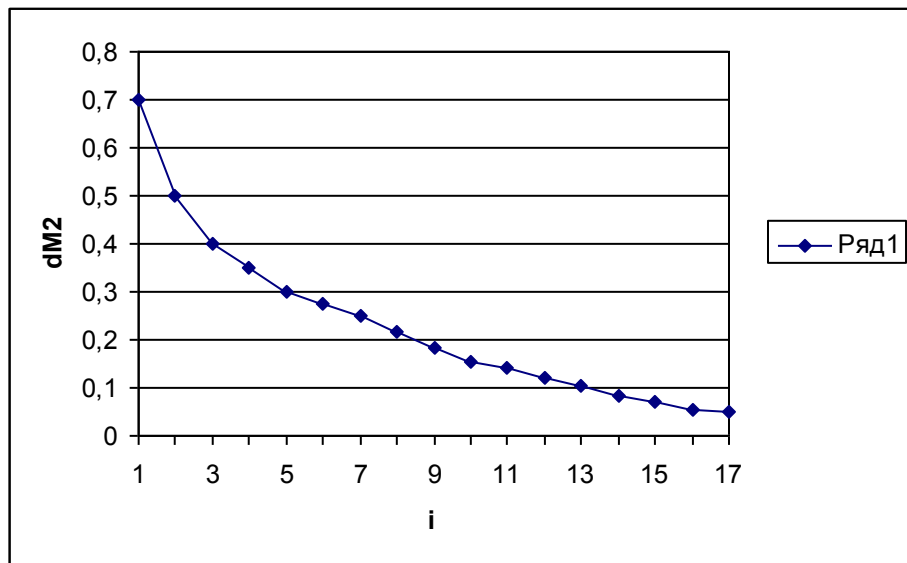
გლუკოზის ფარდობითი დანაკარგების  $\Delta M_2$  მინიმალური სიდიდის უზრუნველყოფელი წყლის ორთქლის  $\gamma_{40}$  მასური წილის, ჟანგბადის  $\gamma_{50}$  მასური წილის, ნახშირორჟანგის  $\gamma_{60}$  მასური წილის, შესასვლელთან აიროვანი გარემოს  $T_0''$  ტემპერატურის, საკნის შესასვლელთან აიროვანი გარემოს  $p_0$  წნევის, პროდუქტის

ჩაწყობის საწყისი  $\kappa_0$  სიმჭიდროვე და შემნახველი საკნის  $L$  სიგრძის მნიშვნელობების განსაზღვრა.

საწყის მიახლოებად აღებულია წერტილი – დასაშვები მნიშვნელობების კუბის ცენტრი (4.2–4), განზომილებიანი სიდიდეებისათვის:

$$\gamma_{40} = 0,0365; \gamma_{50} = 0,01; \gamma_{60} = 0,36; T_0'' = -2^{\circ}C; p_0 = 1,05 \cdot 10^5 \text{ პა}; \kappa_0 = 0,5; L = 0,188 \text{ მ} \quad (4.3-1)$$

სურ.4.3.1.–ზე ნაჩვენებია, როგორ იცვლებოდა იტერაციების მიხედვით პროდუქტის შენახვის დროს საკნის რეჟიმული და კონსტრუქციული პარამეტრების ოპტიმალური მნიშვნელობების პოვნისას.



სურ.4.3.1. გლუკოზის ფარდობითი დანაკარგის ცვლილების სიდიდე იტერაციების პროცესის მსვლელობისას

ოპტიმიზაციური ამოცანის გადაწყვეტის შედეგად მიღებული იქნა კონსტრუქციული და რეჟიმული პარამეტრების შემდეგი ოპტიმალური მნიშვნელობები უგანზომილებო ნორმირებული სიდიდეებისათვის:

$$x_{1opt} = 0,73; x_{2opt} = 0; x_{3opt} = 0,72; x_{4opt} = 0,4; x_{5opt} = 0; x_{6opt} = 0; x_{7opt} = 0,22$$

განზომილებიანი სიდიდეებისათვის:

$$\gamma_{40} = 0,0365; \gamma_{50} = 0,01; \gamma_{60} = 0,36; T_0'' = -2^{\circ}C; p_0 = 1,05 \cdot 10^5 \text{ პა}; \kappa_0 = 0,5; L = 0,188 \text{ მ} \quad (4.3-2)$$

ნახ.4.3.1. თანახმად გლუკოზის ფარდობითი დანაკარგის სიდიდე პარამეტრების საწყისი მნიშვნელობების დროს შეადგენდა 70%, ოპტიმალური მნიშვნელობების დროს ფარდობითი დანაკარგი შეადგენდა 5%. ასე რომ პარამეტრების რაციონალური შერჩევის გამო ფარდობითი დანაკარგის სიდიდე შემცირდა 65%–ით.

უნდა ავლნიშნოთ, რომ ოპტიმიზაციური ამოცანის ამოხსნისას აიროვანი

გარემოს შემავალი ტემპერატურის ოპტიმალური მნიშვნელობა შეადგენდა  $-10^{\circ}\text{C}$  ( $x_4^* = 0$ ). ამასთან გლუკოზის ფარდობითი დანაკარგები შეადგენდა 3%-ზე ნაკლებს. მაგრამ ამ დროს პროდუქტი ცივდებოდა  $-4^{\circ}\text{C}$ -დან  $-7^{\circ}\text{C}$ -მდე. თუ დავსვამთ დამატებით სასაზღვრო პირობას, რომ პროდუქტის ტემპერატურა არ შეიძლება იყოს უარყოფითი, მაშინ პარამეტრების ოპტიმალური სიდიდეები იქნება (5.3-2).

## ძირითადი დასკვნები

სოფლის მეურნეობის პროდუქტებით მოსახლეობის სრული და ხარისხიანი მომარაგების ამოცანის გადასაწყვეტად საჭიროა არა მხოლოდ წარმოების გაზრდა, არამედ შენახვისას დანაკარგების შემცირება. ხილისა და ბოსტნეულის შენახვისას გადამწყვეტი მნიშვნელობა აქვს შენახვის რეჟიმს. შენახვის რეჟიმის ოპტიმალურ დონეზე შენარჩუნებისათვის მისი რეგულირება წარმოადგენს ბუნებრივი კლებადობის და ლპობისაგან დანაკარგების შემცირების ძირითად საშუალებას. იმის მიუხედავად, რომ პროდუქტის შენახვის ხარისხზე რეჟიმის სხვადასხვა მაჩვენებლების გავლენა ერთნაირი არ არის, ოპტიმალური მაჩვენებლების კვლევა მოითხოვს კომპლექსურ მიდგომას, პროდუქტზე ყველა პარამეტრის ერთდროული ზემოქმედების გათვალისწინებას. მათემატიკური მოდელირების მეთოდები საშუალებას იძლევა ღრმად შევისწავლოთ შენახვისას მიმდინარე მექანიკური, მასამიმოცვლის, თბური და ბიოქიმიური პროცესები, მათი გავლენა შესანახი პროდუქტის ხარისხზე და მეცნიერულად მივუდგეთ ამა თუ იმ პროდუქტების შენახვის ოპტიმალური პირობების განსაზღვრას.

დღესდღეობით პრაქტიკულად შეუძლებელია ემპირიულ მასალის გამოყენების გარეშე შევქმნათ საკვები პროდუქტების შენახვის ადექვატური მათემატიკური მოდელი პრაქტიკულ გამოყენებაზე ორიენტირებული ობიექტური ინფორმაციის მისაღებად. იმის მიუხედავად, რომ დაგროვილია საკვები პროდუქტების შენახვის უზარმაზარი პრაქტიკული გამოცდილება, ამ გამოცდილების ანალიზის, განზოგადების და სისტემატიზაციის საკითხები გადაუჭრელი რჩება. მცენარეული საკვები პროდუქტების შენახვის მათემატიკური მოდელის არსებობა მიზანმიმართულს ხდის ექსპერიმენტალური კვლევების ჩატარებას, დაგვეხმარება ამ კვლევების განზოგადებაში და სისტემატიზაციაში.

ეს ყველაფერი განსაზღვრავს დისერტაციაში გადაწყვეტილი ამოცანების აქტუალობას და პრაქტიკულ მნიშვნელობას:

- ჩატარდა მცენარეული კვების პროდუქტების შენახვის არსებული მეთოდების ანალიზი, კერძოდ – შენახვა რეგულირებად აიროვან გარემოში.
- დამუშავებულია მცენარეული კვების პროდუქტების შენახვის არასტაციონალური პროცესის მათემატიკური მოდელი.

- მათემატიკური მოდელის პერსონალურ კომპიუტერზე რეალიზაციისათვის დამუშავებულია რიცხვითი ალგორითმი და ფორტრან–პროგრამა.
- ჩატარებულია გამოთვლითი ექსპერიმენტები შენახვის ხარისხობრივ მაჩვენებლებზე სხვადასხვა რეჟიმული და კონსტრუქციული პარამეტრების გავლენის დასადგენად.
- მოცემულია მცენარეული კვების პროდუქტების იძულებითი ვენტილაციის პირობებში რეგულირებად აიროვან გარემოში შენახვის პროცესის რეჟიმული და კონსტრუქციული პარამეტრების ოპტიმიზაციის ამოცანის დასმა. გრადიენტის პროექციების მეთოდის საფუძველზე შენახვის პროცესის მათემატიკური მოდელის გამოყენებით დამუშავებულია ალგორითმი და ფორტრან–პროგრამა ოპტიმიზაციური ამოცანისათვის.
- დადგენილია შენახვის საკნის რაციონალური რეჟიმული და კონსტრუქციული რაციონალური პარამეტრები, რომლებიც საშუალებას იძლევა შენახვისას მოვახდინოთ მშრალი ნივთიერების დანაკარგის მინიმიზაცია.

## გამოყენებული ლიტერატურა

1. Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика. – М.: Наука, 1969. –824с.
2. Аверкин А.Г. Примеры и задачи по курсу "Кондиционирование воздуха и холодоснабжение". - М.: Издательство АСВ, 2003. - 126 с.
3. Ананьев В.А., Балуева Л.Н., Гальперин А.Д., Городов А.К., Еремин М.Ю., Звягинцева С.М., Мурашко В.П., Седых И.В. Системы вентиляции и кондиционирования. Теория и практика. - М.: Евроклимат, 2001. 416 с. Третье издание.
4. Аношин И.М. Теоретические основы массообменных процессов пищевых производств. – М.; Пищевая промышленность, 1970. – 372с.
5. Баздырев Г.И. Обьедков М.Г. Филатов В.И. Агробиологические основы производства, хранения и переработки продукции растениеводства: Учебное пособие для вузов (под ред. Филатова В.И.) –М.: КолосС; 2004 г., 724 с.
6. Балан Е.Ф., Чумак И.Г., Картофяну В.Г., Иукурвдзе Э.Ж. Биоэнергетические основы холодильной технологии хранения фруктов и овощей. - К.: Техника-Инфо; Одесса: Рефпринтинфо, 2004 г. - 244 с.
7. Баренблатт Г.И., Ентов В.М., Рыжик В.М. Теория нестационарной фильтрации жидкости и газа. М.: Недра, 1972. – с.288.
8. Бахвалов Н. С. Численные методы. –М.: Наука 1973.
9. Богословский В.Н., Кокорин О.Я., Петров Л.В. Кондиционирование воздуха и холодоснабжение. - М.: Стройиздат, 1985. - 367 с., ил.
10. Бояринов А.И., Кафаров В.В. Методы оптимизации в химической технологии. – М.: Химия, 1969. – 355с.
11. Бриг З. С., Копелевич Д. В. и др. ФОРТРАН ЕС ЭВМ, -М.: Статистика. 1978.
12. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. – М.: Наука, 1986. –544с.
13. Бэтчелор Дж. Введение в динамику жидкости. – М.: Мир, 1973.
14. Валишвили Н.В. Методы расчета оболочек вращения на ЭЦВМ.- М.: Машиностроение, 1976г., 278с.
15. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. – М.: Наука, 1972. – 720с.
16. Васильев А. И. Справочник плодоовощника. -М.: Экономика 1964г. 360 с.
17. Васильев Ф.П. Численные методы решения экстремальных задач. – М.: Наука, 1980.
18. Воеводин В.В., Кузнецов Ю.А. Матрицы и вычисления. - М.: Наука, 1984г., 318с.
19. Гальперин Н.И. Основные процессы и аппараты химической технологии. – М.: Химия, 1981. – 812с.

20. Генкел П. А., Кубрешов Л. В. „Ботаника“ –М.: Высшая школа, Уч. пособие для вузов 1978, 580 с. ил.
21. Гиббс Дж.В. Термодинамические работы. – М.-Л.: Гос.изд.техн.-теор.лит.-ры, 1950.
22. Гинзбург И.П. Прикладная гидрогазодинамика. – Л.: Изд-во Ленинградского университета, 1958. – 340с.
23. Гинзбург А. С., Громов М. А., Красовская Г. Н., Теплофизические характеристики пищевых продуктов.-М.: Пищевая промышленность. 1982, 302 с.
24. Голянд М.М., Малеванный Б.Н. Холодильное технологическое оборудование. - М.: Пищевая промышленность, 1977. - 336 с.
25. Горбатюк В.И. Процессы и аппараты пищевых производств. -М.: Колос, 2000. - 335 с., ил.
26. Дейч М.Е., Филлипов Г.А. Газодинамика двухфазных сред. – М.: Энергоиздат, 1981. – 471с.
27. Демьянков Н.В., Маталасов С.Ф. Хладотранспорт. -М.: Издательство "Транспорт", 1969. - 240 с.
28. Даниэль Ф., Ольберти Р. Физическая химия. - М.: Мир, 645с.
29. Джафаров А. Ф., Новые хранения плодов и овощей за рубежом.-М.: Экономика. 1969, 135 с.
30. Дмитриева Г.А. Кузнецов В.В. Физиология растений: Учебник для вузов. –М.: Высшая школа; 2005 г., 736 с.
31. Дубцов Г.Г. Товароведение пищевых продуктов. –М.: Мастерство: Высшая школа, 2001.- 264 с.
32. Еремин Е.М. Основы химической термодинамики. - М.: Высшая школа, 1978. - 391с.
33. Зимняков В.М. Курочкин А.А. Милютин В.А. Сергеев А.Ю. Шабурова Г.В. Практикум по сооружениям и оборудованию для хранения продукции растениеводства и животноводства. –М.: КолосС; 2007 г., 156 с.
34. Калиткин Н. Н. Численные методы. –М.: Наука, 1978.
35. Канторович В.И. Основы автоматизации холодильных установок. -М.: Пищевая промышленность, 1968. - 320 с.
36. Карапетьянц М.Х. Химическая термодинамика. - М.: Химия, 1975. - 583с.
37. Картамышев Н.И. Муха В.Д. Муха Д.В. Технология производства, хранения, переработки продукции растениеводства и основы земледелия: Учебное пособие для вузов. –М.: КолосС; 2007 г., 580 с.
38. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. – М.: Химия, 1973. – 752с.

39. Касаткин А. Г., Количественный анализ. –М. Химия. 1972, 504 с.
40. Кафаров В.В. Методы оптимизации в химической технологии. – М.: Химия, 1969. – 564с.
41. Кафаров В.В. Основы массопередачи. – М.: Высшая школа, 1972. – 494с.
42. Кафаров В.В., Глебов М.Б. Математическое моделирование основных процессов химических производств. – М.: Высшая школа, 1991. –400с.
43. Кириллин В.А., Сычев В.В., Шейндлин А.Е. Техническая термодинамика. – М.: Энергия, 1968. – 472с.
44. Колтунов В. А., Чепурный Н. И. Резервы снижения потерь овощей. -Киев.: Урожай. 1989г. 264с., с илл.
45. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике. - М.: Наука, 1984, 831с.
46. Кочин Н.Е., Кибель И.А., Розе Н.В. Теоретическая гидромеханика. Ч.1. – М.: Физматгиз, 1963. - 584с.
47. Кочин Н.Е., Кибель И.А., Розе Н.В. Теоретическая гидромеханика. Ч.2. – М.: Физматгиз, 1963. - 728с.
48. Кошкин Н. И., Ширкевич М. Г., Справочник по элементарной физике.-М.: Наука, Гл. ред. Физико-математической литературы. 1982, 204 с.
49. Кругляков Г.Н., Круглякова Г.В. Товароведение продовольственных товаров. - Ростов н/Д: издательский центр "МарТ", 1999. - 448 с.
50. Кутателадзе С.С., Стырикович М.А. Гидродинамика газожидкостных систем. – М.: Энергия, 1976. – 296с.
51. Куцакова В.Е., Уварова Н.А., Мурашев С.В., Ишевский А.Л. Примеры и задачи по холодильной технологии пищевых продуктов. -М.: КолосС, 2003. - 240 с.: ил.
52. Ламб Г. Гидродинамика. – М.-Л.: ОГИЗ, 1947. – 929с.
53. Левич В.Г. Физико-химическая гидродинамика. – М.: Физматгиз, 1959.
54. Лойко Р. Э. и др. Хранение и переработка плодов и овощей в колхозах и совхозах. - Минск.: Ураджай. 1987г. 152 с., ил.
55. Лонцин М., Мерсон Р. Основные процессы пищевых производств: Пер. с англ. – М.: Легкая и пищевая промышленность, 1983. –384с.
56. Льюис Г., Рэндал М. Химическая термодинамика. – М.: ОНТИ, 1936.
57. Мааке В., Эккерт Г.-Ю., Кошпен Жан-Луи. ПОЛЬМАНН. Учебник по холодильной технике: Основы-Комплекующие-Расчеты / Пер. с франц. под. ред. д.т.н. В. Б. Сапожникова. Изд-во МГУ 1998, 1142 с., ил.



58. Малахов Н.Н., Плаксин Ю.М., Ларин В.А. Процессы и аппараты пищевых производств. -Орел: Изд. Орловского государственного технического университета, 2001. - 687 с. Рисунков 302, таблиц 24, библиография: 13 названий
59. Мармузова Л.В. Основы микробиологии, санитарии и гигиены в пищевой промышленности. –М.: Академия 2008 г. 160 с.
60. Матюхина З.П. Основы физиологии питания, гигиены и санитарии. - М.: ПрофОбрИздат, 2001. - 184 с.
61. Матюхина З.П., Королькова Э.П. Товароведение пищевых продуктов. - М.: ПрофОбрИздат, 2001.- 320 с., [1] л. цв. ил.
62. Марчук Г.И. Методы вычислительной математики. - М.: Наука, 1977, 456с.
63. Нестеренко А.В. Основы термодинамических расчетов вентиляции и кондиционирования воздуха. - М., изд-во "Высшая школа", 1971. - 460 стр.
64. Нигматулин Р.И. Основы механики гетерогенных сред. – М.: Наука, 1978. – 336с.
65. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. Ч.1. – М.: Наука, 1987. – 464с.
66. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. Ч.2. – М.: Наука, 1987. – 360с.
67. Никифорова Н.С., Голубкина Т.С. Справочник по товароведению продовольственных товаров .- Т. 2 .- М. : Академия, 2008.- 336 с.
68. Николаева М.А. Товароведение плодов и овощей. –М.: экономика 1990г. 388 с
69. Николаева М. А., Хранение плодов и овощей на базах. -М.:Экономика. 1986, 176 с.
70. Николаевский В. Н., Басинов. К. С., Горбунов А. А., Зотов Г. А., Механика насыщенных пористых сред. -М.: Недра. 1970.
71. Ортега Дж., Рейнболдт В. Итерационные методы решения нелинейных систем со многими неизвестными. - М.: Мир, 1975.
72. Плаксин Ю.М., Малахов Н.Н., Ларин В.А. Процессы и аппараты пищевых производств. - М.: КолосС, 2005. - 760 с.: ил.
73. Плис А. И., Сливина Н. А., Лабораторный практикум по высшей математике: Учебное пособие для втузов. -М.: Высш. школа. 1983, 208 с.
74. Полегаев В. И. Хранение плодов и овощей. –Москва: Россельхозиздат 1982г. 254 с. ил.
75. Поморцева Т.И. Технология хранения и переработки плодоовощной продукции. - М.: ИРПО; ПрофОбрИздат, 2001. - 136 с.
76. Построение математических моделей химико-технологических объектов. /Дудников Е.Г., Балакирев В.Е., Кривсунков В.Н., Цирлин А.М./ – Л.: Химия, 1970. – 311с.
77. Пригожин И., Дефеи А. Химическая термодинамика –Новосибирск: 1966, 328. ил.

78. Процессы и аппараты пищевых производств. (В.Н. Стабников, В.Д. Попов, В.М. Лысянский, Ф.А. Редько). – М.: Пищевая промышленность, 1976. – 663с.
79. Реклейтис Г., Рейвиндран А., Рэгсдел К. Оптимизация в технике: В 2-х кн. Пер. с англ. – М.: Мир, 1986. – 1 кн. - 348с., 2 кн. – 320с.
80. Рубин А. Б. Термодинамика биологических процессов. Уч. Пособие –М.: изд. Московского университета. 1976, 240 с. ил.
81. Рубин Б. А. Дыхание и его роль в жизни растений. –М.: изд. Знание, 1953.
82. Рубин Б. А., Метлицкий А. В. Основы хранения овощей и плодов –М.: Экономика. 1982, 380 с. ил.
83. Рыбицкий Н. А., Холмквист А. А. Хранение и переработка плодов и овощей. -Л.: Лениздат 1956г. 140 с.
84. Салтиков А. Н., Макаренко Г. И. Программирование на языке ФОРТРАН. –М.: Наука 1978.
85. Седов Л.И. Механика сплошной среды. Т.1. - М.: Наука, 1973, 536с.
86. Советов Б. Я., Яковлев С. Н., Моделирование систем.-М. 1986
87. Сорокин П. Г. Хранение и переработка плодов и овощей. -М.: Огиз - Сельхозгиз 1947г. 480 с.
88. Соу С.Л. Гидродинамика многофазных систем. – М.: Мир, 1971. – 536с.
89. Сребницкий Б.Н. Примеры расчета систем кондиционирования воздуха - Киев, Будівельник, Киевская книжная типография №6, 1970. - 160 стр.
90. Стромберг А.Г., Семченко Д.П. Физическая химия. - М.: Высшая школа, 1988. - 496с.
91. Тайц Н.Ю., Харченко И.Г., Цыганков Г.Т. Термодинамические основы энерго- и массообмена. – Днепропетровск, 1974.
92. Твалчрелидзе А.К., Сичинава Л.М., Тевдорадзе С.И. К массообменным условиям в системах "жидкость-пар". - Межд. научн.журнал "Интеллектуали", Тбилиси, 2006,№2. - с.79-82.
93. Твалчрелидзе А.К., Сичинава Л.М., Тевдорадзе С.И. Нестационарный процесс ректификации раствора "вода-этанол": вычислительный эксперимент. - Межд. научн.журнал "Интеллектуали", Тбилиси, 2006,№2. - с.60-64.
94. Тихонов А. Н., Самарский Н, К., Уравнения математической физики.-М.: Наука. 1972. -736 с.
95. Уоллис П. Одномерные двухфазные течения. – М.; Мир, 1972. – 440с.
96. Фрекс Р. Математическое моделирование в химической технологии. – М.: Химия, 1971. – 272с.
97. Хаазе Р. Термодинамика необратимых процессов. –М.: Мир 1967.

98. Хазен М. М., Матвеев Г. А., Грицевский М. Е., Казакевич Ф. П., Теплотехника: Учеб. Пособие.-М.: Высш. Школа. 1981 -480 с.
99. Церевитов Ф.И., Химия да товароведение свежих плодов и овощей. –Л.; типография при Сов. Министров СССР. 1949. -612с.
100. Чернавский Д. С. Термодинамика и биология. В сборнике Экспериментальная и теоретическая биофизика. –М.: 1975.
101. Чуклин С.Г., Чумак И.Г. Лабораторный практикум по курсу "Холодильные установки" - М.: Пищевая промышленность, 1974. - 288 с.
102. Шавра В.М. Основы холодильной техники и технологии пищевых отраслей промышленности. - М.: ДеЛи принт, 2002. - 126 с.
103. Шашилова В.П. Хранение и переработка плодов и ягод. –М.: Россельхозиздат 1981г. 56с., ил.
104. Шервуд Т., Пигфорд Р., Уилки Ч. Массопередача. – М.: Мир, 1982.
105. Штокман Е.А., Шилов В.А., Новгородский Е.Е., Саввиди И.И., Скорик Т.А., Пашков В.В. Вентиляция, кондиционирование и очистка воздуха на предприятиях пищевой промышленности. - М.: АСБ (Ассоциация строительных вузов), 2001 г.
106. Эпштейн П.С. Курс термодинамики. Пер. с англ. – М.-Л.: ОГИЗ, 1948. – 420с.
107. Эткинс П. Физическая химия. Т.1. - М.: Мир, 1980. - 580с.
108. Эткинс П. Физическая химия. Т.2. - М.: Мир, 1980. - 584с.
109. Юдаев Б. Н., Техническая термодинамика. Теплопередача.: Учебник для нетэнергетических втузов. –М.: Высш. Школа. 1988. -479 с, ил.
110. Явнель Б. К. Курсовое и дипломное проектирование холодильных установок и систем кондиционирования воздуха. - М.: Агропромиздат, 1989. - 223 с.; ил.
111. Якобсон В.Б. Малые холодильные машины. - М.: изд-во "Пищевая промышленность", 1977. - 368 с., табл. 89, ил. 186
112. Якушина Н. И. „Физиология растений“ –М.: Просвещение 1980, 302 с. ил.
113. თვალჭრელიძე ა., თევდორაძე ს. მცენარეული პროდუქტების შენახვის მათემატიკური მოდელი. საქართველოს მეცნიერებათა ეროვნული აკადემიის ყოველთვიური სამეცნიერო-რეფერირებული ჟურნალი „მეცნიერება და ტექნოლოგიები“, №4–6,.
114. თევდორაძე ს., მცენარეული კვები პროდუქტების შენახვის გამოთვლითი ექსპერიმენტის ჩატარება. საქართველოს მეცნიერებათა ეროვნული აკადემიის ყოველთვიური სამეცნიერო-რეფერირებული ჟურნალი „მეცნიერება და ტექნოლოგიები“, №7–9,თბილისი 2010 წ.