

მერაბ თავართქილაძე

თბოგადაცემის პროცესის მათემატიკური აღწერა,
მოდელირება და მართვა თბოენერგეტიკულ დანადგარებში

წარმოდგენილია დოქტორის აკადემიური ხარისხის
მოსაპოვებლად

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი
თბილისი, 0175, საქართველო
დეკემბერი, 2008 წელი

საავტორო უფლება © 2008 წელი

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

ინფორმატიკისა და მართვის სისტემების ფაკულტეტი

ჩვენ, ქვემოთ ხელისმომწერნი ვადასტურებთ, რომ გავცდებით მერაბ თავართქილაძის მიერ შესრულებულ სადისერტაციო ნაშრომს დასახელებით: **თბოგადაცემის პროცესის მათემატიკური აღწერა, მოდელირება და მართვა თბოენერგეტიკულ დანადგარებში** და ვაძლევთ რეკომენდაციას საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ინფორმატიკისა და მართვის სისტემების ფაკულტეტის სადისერტაციო საბჭოში მის განხილვას დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად.

ნოემბერი

ხელმძღვანელი:	_____	/ნ. ჯიბლაძე/
რეცენზენტი:	_____	/კ. კამკამიძე/
რეცენზენტი:	_____	/გ. არაბიძე/

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

2008 წ.

ავტორი: თავართქილაძე მერაბი

დასახელება: თბოგადაცემის პროცესის მათემატიკური აღწერა,
მოდელირება და მართვა თბოენერგეტიკულ დანადგარებში

ფაკულტეტი : ინფორმატიკისა და მართვის სისტემების
ფაკულტეტი

ხარისხი: დოქტორი

სხდომა ჩატარდა:

ინდივიდუალური პიროვნებების ან ინსტიტუტების მიერ
ზემომოყვანილი დასახელების დისერტაციის გაცნობის მიზნით მოთხოვნის
შემთხვევაში მისი არაკომერციული მიზნებით კოპირებისა და გავრცელების
უფლება მინიჭებული აქვს საქართველოს ტექნიკურ უნივერსიტეტს.

ავტორის ხელმოწერა

ავტორი ინარჩუნებს დანარჩენ საგამომცემლო უფლებებს და არც
მთლიანი ნაშრომის და არც მისი ცალკეული კომპონენტების გადაბეჭდვა ან
სხვა რაიმე მეთოდით რეპროდუქცია დაუშვებელია ავტორის წერილობითი
ნებართვის გარეშე.

ავტორი ირწმუნება, რომ ნაშრომში გამოყენებული საავტორო
უფლებებით დაცული მასალებზე მიღებულია შესაბამისი ნებართვა (გარდა
ის მცირე ზომის ციტატებისა, რომლებიც მოითხოვენ მხოლოდ სპეციფიურ
მიმართებას ლიტერატურის ციტირებაში, როგორც ეს მიღებულია
სამეცნიერო ნაშრომების შესრულებისას) და ყველა მათგანზე იღებს
პასუხისმგებლობას.

რეზიუმე

სადისერტაციო ნაშრომში განხილულია თბოენერგეტიკულ დანადგარებში მოძრავ თბოგადამტან ნაკადებს შორის თბოგადაცემის პროცესის ადეკვატური მათემატიკური სასაზღვრო ამოცანის ჩამოყალიბება და მისი ანალიზური ამოხსნები სტაციონარული და არასტაციონარული პირობებისათვის. სასაზღვრო ამოცანის ჩამოყალიბების ძირითადი კონცეფცია ეფუძვნება ფურიე-კირხჰოფის დიფერენციალური განტოლების ჩაწერას სისტემის სახით, როგორც მაღალი, ასევე დაბალი ტემპერატურული პოტენციალისათვის მოძრავ თბოგადამტან ფაზებს შორის. დიფერენციალურ განტოლებათა სისტემა ფაზათა გამყოფ საზღვარზე დაკავშირებულია ნიუტონის თბური ნაკადის განტოლებით და გრინ-ოსტროგრადსკის ფორმულით. შემოთავაზებული სასაზღვრო ამოცანების ანალიზური ამოხსნების შედეგად მიღებულია კინეტიკური ფორმულები: წინაღდენითი და თანმხვედრი ნაკადებისათვის, აგრეთვე ფაზათა დუდილისა და კონდენსაციის პირობებში მომუშავე თბოდანადგარებისათვის. მიღებული კინეტიკური ფორმულების საფუძველზე დამუშავებულია სპეციალური მათემატიკური და პროგრამული უზრუნველყოფა. პროგრამული პაკეტი ითვალისწინებს თბოენერგეტიკულ დანადგარებში მოძრავ თბოგადამტან ფაზათა ნაკადების ტემპერატურების მნიშვნელობების ცვლილებას დროში და დანადგარის სიგრძის ან სიმაღლის მიხედვით. მიღებული ინფორმაციის საფუძველზე მანქანური პროგრამა უზრუნველყოფს თბოგადაცემის პროცესის ანალიზს, იდენტიფიკაციას, პროგნოზირებას და მართვას. მიღებული ანალიზური ამოხსნების საფუძველზე დამუშავებულია თბოენერგეტიკულ დანადგარებში მოძრავ თბოგადამტან ნაკადებს შორის თბოგადაცემის პროცესის მათემატიკური მოდელირების, იდენტიფიკაციის, ანალიზის და მართვის ახალი მეთოდები. მიღებული ანალიზური ამოხსნები განზოგადებულია მასაგადაცემის პროცესების ანალიზისა და

იდენტიფიკაციისათვის. სადისერტაციო ნაშრომში განხილულია, აგრეთვე, მართვის არაწრფივი სტატიკური და ასტატიკური ობიექტების დინამიკური მახასიათებლების მათემატიკური აღწერა ბერნულის არაწრფივი დიფერენციალური განტოლების გამოყენებით. აღნიშნული კლასის ობიექტებისათვის ჩამოყალიბებულია შესაბამისი სასაზღვრო ამოცანები. სასაზღვრო ამოცანების ანალიზური ამოხსნების საფუძველზე დამუშავებულია მართვის არაწრფივი სტატიკური და ასტატიკური ობიექტების დინამიკური მახასიათებლების მოდელირების, ანალიზისა და იდენტიფიკაციის მეთოდика. ანალიზური ამოხსნების საფუძველზე დამუშავებულია სპეციალური პროგრამული უზრუნველყოფა. იგი მომხმარებელს აძლევს საშუალებას დროის სასურველი მასშტაბით განახორციელოს მართვის ობიექტის (სისტემის) დინამიკური მახასიათებლების მოდელირება. გარდა ამისა, პროგრამული უზრუნველყოფა საშუალებას იძლევა განისაზღვროს დინამიკური მახასიათებლების ექსტრემალური (მაღალი რიგის წარმოებულები) ფუნქციის მაქსიმალური და მინიმალური მნიშვნელობები და შესაბამისი დროითი პერიოდების ხანგრძლივობა (დაგვიანების დრო, დროის მუდმივა, გარდამავალი რეჟიმის ზრდადი და კლებადი პერიოდები). მოდელირების, ანალიზისა და იდენტიფიკაციის შემოთავაზებული თეორიული მეთოდი გაცილებით ეფექტურია და ზუსტი, ვიდრე ექსპერიმენტალური გზით მიღებული დინამიკური მახასიათებლების გრაფიკული დიფერენცირების მეთოდика. მიღებული დინამიკური მახასიათებლების მიღებული თეორიული ფორმულები იზომორფულობის პრინციპის საფუძველზე განზოგადებულია და გამოყენებულია, როგორც მართვის არაწრფივი სისტემების მოდელირების, იდენტიფიკაციისა და ანალიზის მიზნით, ასევე ქიმიური რეაქციის კინეტიკის და ფაზური გარდაქმნის პროცესების მოდელირების, იდენტიფიკაციის, ანალიზისა და მართვის მიზნით. დამუშავებული სპეციალური პროგრამული პაკეტი საშუალებას აძლევს ოპერატორს მათემატიკური მოდელირების და იდენტიფიკაციის შედეგები

წარმოადგინოს შესაბამისი ცხრილებისა და გრაფიკების სახით. განხილული თბო-მასაგადაცემის პროცესების და მართვის არაწრფივი სისტემების მათემატიკური აღწერის, მოდელირების და იდენტიფიკაციის შემოთავაზებული მეთოდები პრინციპულად განსხვავდება არსებული ცნობილი მეთოდებისაგან.

Abstract

In the presented thesis it is considered the formulation of adequate mathematical boundary problem and its analytical solutions for the heat-exchange processes between heat carrying currents, for stationary and non stationary conditions. The main concept of the formulation of the boundary problem is based on writing of Fourier-Kirchhoff differential equation in a form of system with high and low temperature potentials between moving heat-transferring phases. The system of the differential equations on a phase boundary is related by Newton's heat current equation and Green-Ostograds's formulae. As a result of the boundary problems' analytical solutions it is obtained kinetic formulae: for opposite moving and co-moving currents, also for heat-devices working in a phase boiling and condensation conditions. On the basis of obtained equations it is developed special mathematical software. The programm package takes into account the change of temperature with respect of time and dependence on device's length and height of heat transferring phase currents in the heat-energetic devices. On a bases of obtained information the software insures the analysis of heat-transferring process, the identification, prediction and control. With analytical solutions it is obtained new methods of the mathematical modeling, identification, analysis and control of the heat exchange between moving heat-transferring currents. The analytical solutions are generalized for analysis and identification of the mass-transferring processes. In the dissertation also considered the mathematical description of of the dynamical characteristics of the non-linear statistical and nonstatistical objects with the use of Bernuli's non linear differential equation. Also methods for analysis and identification is developed for the above mentioned objects. Also the corresponding software programs are elaborated. This allows the user to perform modeling of the system's dynamical characteristics in a reasonably short period of time. Besides this, the programm allows to determine maximal and minimal values of the dynamical characteristic extremal functions

and duration of the corresponding time. The suggested theoretical method for modeling, analysis and identification is much more efficient and precise than the method of graphical elaboration of the experimental data of dynamical characteristics. The theoretical formulae for dynamical characteristics are generalized and applied for the control of non linear system modeling, identification and analysis, as well as for modeling and identification of the chemical reaction's kinetics and phase transition process. The software enables the operator to present all results by corresponding tables and plots. Considered and suggested methods of mass-transition process and mathematical description of non linear systems drastically differ from existing known methods.

შინაარსი

შესავალი	15
1. ლიტერატურის მიმოხილვა	21
2. შედეგები და მათი განსჯა	24
2.1. თბოგადაცემის პროცესის მათემატიკური აღწერა მოძრავ ორფაზიან თბოგადამტან ნაკადებს შორის.....	25
2.1.1. ზოგადი სასაზღვრო ამოცანის ჩამოყალიბება.	25
2.1.2. სასაზღვრო ამოცანების ანალიზური ამოხსნა სტაციონარული პროცესისათვის	31
2.1.3. სასაზღვრო ამოცანის ანალიზური ამოხსნა არასტაციონარული პროცესისათვის	34
2.1.4. თბოგადაცემის პროცესის ანალიზური ამოხსნების განზოგადება	36
2.1.5. თბოგადაცემის პროცესის მოდელირება და იდენტიფიკაცია.	37
2.2. მართვის არაწრფივი სისტემების დინამიკური მახასიათებლების მათემატიკური აღწერა და მოდელირება.....	44
2.2.1. მათემატიკური ამოცანის ჩამოყალიბება.	44
2.2.2. მათემატიკური ამოცანის ანალიზური ამოხსნა.....	49
2.2.3. არაწრფივი სტატიკური სისტემების დინამიკური ესტრემალური მახასიათებლები	52
2.2.4. მიღებული ანალიზური ამოხსნების განზოგადება	62
2.2.5. არაწრფივი დინამიკური სისტემების მათემატიკური მოდელირება	64
2.2.6. არაწრფივი დინამიკური სისტემების იდენტიფიკაცია	71
2.2.7. ქიმიური რეაქციების კინეტიკის იდენტიფიკაცია.....	80
2.2.8. ფაზური გარდაქმნის პროცესების იდენტიფიკაცია	85
2.3. დანართი.....	90
2.3.1. თბოგადაცემის პროცესის სასაზღვრო ამოცანის ანალიზური ამოხსნა მოძრავ ორფაზიან ნაკადებს შორის სტაციონარული პირობისათვის.	90
2.3.2. თბოგადაცემის პროცესის სასაზღვრო ამოცანის ანალიზური ამოხსნა მოძრავ ორფაზიან ნაკადებს შორის არასტაციონარული პირობისათვის.	93

2.3.3.	თბოგადაცემის პროცესის მატემატიკური მოდელირება შესრულებული საოფისე პროგრამა Excel-ში	96
2.3.4.	სტატიკური არაწრფივი დინამიკური სისტემის სასაზღვრო ამოცანის ამოხსნა.....	97
2.3.5.	ბრძმედის ღუმელის გაზომვის წერტილების განლაგების სქემა 98	
2.3.6.	Расчет и моделирование тепловых процессов разделения стабильных изотопов. Гос. фонд алгоритмов и программ (Рег. № Госфап 50900000870; 1990г. ИВЦКП. Груз. НПО ВТИ).....	99
2.3.7.	Расчет и моделирование массообменных процессов разделения стабильных изотопов. Гос. фонд алгоритмов и программ (Рег. № Госфап 50900000871; 1990г. ИВЦКП. Груз. НПО ВТИ).....	100
	დასკვნა	101
	გამოყენებული ლიტერატურა	105

ცხრილების ნუსხა

ცხრილი 1 ექსტრემალური მახასიათებლების ამოხსნის შედეგები	56
ცხრილი 2 სტატიკური მართვის ობიექტის დინამიკური მახასიათებლების ექსტრემალური მნიშვნელობების და შესაბამისი დროითი პერიოდების საანგარიშო ფორმულები $m=3$ ფაქტორისათვის.....	58
ცხრილი 3 ექსტრემალური მახასიათებლების ამოხსნის შედეგები	60
ცხრილი 4 ქიმიური რეაქციების ექსტრემალური მახასიათებლები	81
ცხრილი 5 საშრობი მასის ტენიანობის ცვლილების ექსპერიმენტული და თეორიული მნიშვნელობები.....	89

ნახაზების ნუსხა

ნახ. 1 მილოვანი თბოდანადგარი x, y, z კოორდინატთა სისტემაში	26
ნახ. 2 ორფაზიან მოძრავ თბოგადამტან ნაკადებს შორის ტემპერატურების ცვლილების მახასიათებელი კინეტიკური მრუდები თბოენერგეტიკულ დანადგარებში წინაღდენითი ნაკადების შემთხვევაში.	41
ნახ. 3 ორფაზიან მოძრავ თბოგადამტან ნაკადებს შორის ტემპერატურების ცვლილების მახასიათებელი კინეტიკური მრუდები თბოენერგეტიკულ დანადგარებში პირდაპირდენითი ნაკადების შემთხვევაში.	42
ნახ. 4 "იდეალური გამოძევების" (ი.გ.) მოდელის ჰიდროდინამიკური ნაკადების სტრუქტურის განაწილების ფუნქცია.....	47
ნახ. 5 "იდეალური შერევის" (ი.შ.) მოდელის ჰიდროდინამიკური ნაკადების სტრუქტურის განაწილების ფუნქცია.....	47
ნახ. 6 "რეალური შერევის" (რ.შ.) მოდელის ჰიდროდინამიკური ნაკადების სტრუქტურის განაწილების ფუნქცია.....	48
ნახ. 7 სხვადასხვა ტიპის მართვის სისტემებში შემფოთების შედეგად ტემპერატურის ცვლილების დინამიკური და ექსტრემალური მახასიათებლები. ასტატიკური სისტემები (a,b,c), სტატიკური სისტემები (d,e,f). დინამიკური მახასიათებლები შეესაბამება m ფაქტორის სხვადასხვა მნიშვნელობებს: $m=1(a,d)$, $m=2(b,e)$ და $m=3(e,f)$	65
ნახ. 8 კინეტიკური ექსტრემალური მახასიათებლები $m=3$. წარმოქმნილი სტრუქტურის განვითარების ალბათობა (1), სიჩქარე (2), მაღალი რიგის წარმოებულები (3-5).	66
ნახ. 9 დინამიკური სისტემის ექსტრემალური მახასიათებლები (ა) და გარდამავალი რეჟიმის ზღვრული ციკლის პორტრეტები (ბ). დინამიკური მახასიათებლები შეესაბამება სტატიკურ არაწრფივ დინამიკურ სისტემებს, როდესაც პროცესის ინტენსივობის ფაქტორი $m=3$ და გარდამავალი რეჟიმის სიჩქარის კონსტანტა $K=4 \cdot 10^{-4} 1/\text{წმ}$	69
ნახ. 10 არაწრფივი სტატიკური მართვის ობიექტის დინამიკური მახასიათებლების აპროქსიმაციის გრაფიკული მეთოდი ელემენტურ რგოლებში. 1-რეალური არაწრფივი სტატიკური მართვის ობიექტის დინამიკური მახასიათებელი; 2-სუფთა დაგვიანების რგოლი; 3-პირველი რიგის რგოლი.[61]	72
ნახ. 11 არაწრფივი სტატიკური მართვის ობიექტის დინამიკური მახასიათებლების აპროქსიმაციის გრაფიკული მეთოდი [61]	72
ნახ. 12 ბრძმედის ღუმელის დინამიკური მახასიათებლების მრუდები.....	74

ნახ. 13 მათემატიკური მოდელირების გზით აგებული დინამიკური მახასიათებლები. გარდამავალი პროცესის სიჩქარის კონსტანტა $K=0,2367$ 1/წმ.....	76
ნახ. 14. მათემატიკური მოდელირების გზით აგებული დინამიკური მახასიათებლები. გარდამავალი პროცესის სიჩქარის კონსტანტა $K=0,074$ 1/წმ.	77
ნახ. 15 მათემატიკური მოდელირების გზით აგებული დინამიკური მახასიათებლები. გარდამავალი პროცესის სიჩქარის კონსტანტა $K=0,047$ 1/წმ.	78
ნახ. 16 მათემატიკური მოდელირების გზით აგებული დინამიკური მახასიათებლები. გარდამავალი პროცესის სიჩქარის კონსტანტა $K=0,0375$ 1/წმ.....	79
ნახ. 17 იშკავას ექსპერიმენტული მონაცემები [76]. HCl წარმოქმნის (1) და სიჩქარის (2) კინეტიკური მრუდები აგებული (2-74), (2-25) ფორმულებით.....	81
ნახ. 18 კინეტიკური ექსტრემალური მახასიათებლები $m=3$. წარმოქმნილი სტრუქტურის განვითარების ალბათობა (1), სიჩქარე (2), მაღალი რიგის წარმოებულები (3-5).	81
ნახ. 19 წყალბადის წვის პროცესის კინეტიკური (A_1, A_2) და ექსტრემალური (B_1, B_2) მრუდები. ნახ. 4	83
ნახ. 20 კინეტიკური ექსტრემალური მახასიათებლები $m=3$. წარმოქმნილი სტრუქტურის განვითარების ალბათობა (1), სიჩქარე (2), მაღალი რიგის წარმოებულები (3-5).	84
ნახ. 21 სხვადასხვა გეომეტრიული ფორმის მიცელისებრი მასის შრობის პროცესის კინეტიკა. (+) ექსპერიმენტული მონაცემები [59]; მუქი ხაზი თეორიული მრუდები აგებული (2-92) ფორმულის მიხედვით: 1- K_1 , 2 – K_2 , 3 - K_3	88
ნახ. 22 შრობის სიჩქარის თეორიული კინეტიკური მრუდები $F(t)$ ფუნქციის დამახასიათებელი მაქსიმალური მნიშვნელობით, რომლებიც განსაზღვრავს შრობის პროცესის ზრდად და კლებადი სიჩქარის პერიოდებს სხვადასხვა გეომეტრიული ფორმის მიცელისებური მასისათვის: 1 – S_1 , 2 – S_2 , 3 – S_3	88
ნახ. 23 შრობის პროცესის სიჩქარის თეორიული კინეტიკური მრუდები სხვადასხვა გეომეტრიული ფორმის საშრობი მასალებისათვის ($m=1$, $m=2$, $m=3$).....	88

მადლიერება

მსურს მადლიერება მივუძღვნა ჩემს ხემძღვანელს: პროფესორ ბატონ ნოდარ ჯიბლაძეს . ასევე რობოტოტექნიკისა და მართვის სისტემების მიმართულების პროფესორ-მასწავლებლების მთელ შემადგებლობას მხარდაჭერისა და ხელშეწყობისათვის. ასევე მსურს მადლობა გადავუხადო ჩემს მშობლებს და მეგობრებს მხარდაჭერისათვის.

შესავალი

მეცნიერული სიახლე. თბოენერგეტიკულ დანადგარებში მოძრავ ორფაზიან თბოგადამტან ნაკადებს შორის თბოგადაცემის პროცესის ჩამოყალიბებული ადეკვატური სასაზღვრო ამოცანები და მათი ანალიზური ამოხსნები წარმოადგენს ახალ მეცნიერულ მიმართულებას სითბო-და მასაგადაცემის პროცესების კვლევის დარგში. მათემატიკური სასაზღვრო ამოცანის ჩამოყალიბების ძირითადი კონცეფცია ეფუძნება ფურიე-კირხჰოფის დიფერენციალური განტოლების ჩაწერას სისტემის სახით, როგორც მაღალი, ასევე დაბალი ტემპერატურული პოტენციალისათვის მოძრავ თბოგატამტან ფაზებს შორის. მიღებული დიფერენციალურ განტოლებათა სისტემა ფაზათა გამყოფ საზღვარზე დაკავშირებულია ნიუტონის თბური ნაკადის განტოლებით და გრინ-ოსტროგრადსკის ფორმულით. ამ ახლებურმა მიდგომამ განაპირობა ჩამოყალიბებული მათემატიკური სასაზღვრო ამოცანების ანალიზური ამოხსნების განხორციელება სტაციონარული და არასტაციონარული პირობებისათვის. ამოხსნების შედეგად მიღებულია კინეტიკური ფორმულები: წინაღდენითი და თანმხვედრი ნაკადებისათვის, აგრეთვე, ფაზათა დუღილისა და კონდენსაციის პირობებში მომუშავე თბოდანადგარებისათვის.

მეცნიერულ სიახლეს წარმოადგენს, აგრეთვე, მართვის სისტემის გარდამავალი პროცესის დინამიკური მახასიათებლების მათემატიკური აღწერა ბერნულის არაწრფივი დიფერენციალური განტოლების ანალიზური ამოხსნების გამოყენებით.

მიღებული თბოგადაცემის თეორიული კინეტიკური ფორმულები და მართვის ობიექტების (თბოდანადგარების) ასევე ანალიზური დინამიკური მახასიათებლები შინაარსობრივად დაკავშირებულია ერთმანეთთან. ეს კავშირი დამყარებულია თბოგადაცემის პროცესის სიჩქარის კონსტანტის მიხედვით, რომელიც იმავდროულად განსაზღვრავს თბოდანადგარის (მართვის ობიექტის) გარდამავალი რეჟიმის სიჩქარის კონსტანტის რიცხვით მნიშვნელობას. აღნიშნული კავშირი თბოგადაცემის პროცესის კინეტიკურ

და დინამიკურ მახასიათებლებს შორის საშუალებას იძლევა ახლებურად მივუდგეთ თბოენერგეტიკული დანადგარების მართვისა და ავტომატური რეგულირების სისტემების გაწყობის მეთოდებს. მიღებული თეორიული კინეტიკური და დინამიკური მახასიათებლების საანგარიშო ფორმულები საგრძნობლად გააუმჯობესებს მართვის ობიექტების დინამიკური მახასიათებლების პარამეტრების განსაზღვრის სიზუსტეს. ექსპერიმენტული კვლევის მეთოდების გამოყენებასთან შედარებით. მიღებული კინეტიკური და დინამიკური ფორმულების მიხედვით დამუშავებულია თბოენერგეტიკულ დანადგარებში მიმდინარე თბოგადაცემის პროცესების, მოდელირებისა და მართვის ახალი მეთოდები პირდაპირი და შებრუნებული მათემატიკური ამოცანების ამოხსნის გზით შესაბამისი სპეციალური პროგრამული უზრუნველყოფით ეგმ-ის გამოყენებით.

პრობლემის აქტუალობა. თბოენერგეტიკულ დანადგარებში თბოგადაცემის პროცესების მათემატიკური აღწერა, მოდელირება და მართვა წარმოადგენს აქტუალურ პრობლემას მიუხედავად გარკვეული მიღწევებისა მეცნიერებისა და ტექნიკის ამ დარგში. აქტუალურია, აგრეთვე, თბოენერგეტიკულ დანადგარებში თბოგადაცემის პროცესების შემდგომი ინტენსიფიკაციის, ტექნოლოგიური რეჟიმების ოპტიმიზაციის და საექსპლუატაციო პერიოდის მდგრადობის გაზრდის საკითხების გადაჭრა. ამ საკითხების გადაწყვეტისათვის დიდი მნიშვნელობა აქვს მოძრავ ორფაზიან თბოგადამტან ნაკადებს შორის თბოგადაცემის პროცესის ადეკვატურ მათემატიკურ აღწერას და მის საფუძველზე მოდელირებისა და მართვის ახალი მეთოდების დამუშავებას. ასევე აქტუალურია მართვის სისტემის გარდამავალი პროცესის დინამიკური მახასიათებლების ანალიზური კვლევა. აღნიშნული პრობლემები განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია ახალი ტექნიკის ისეთი დარგებისათვის, როგორიცაა ატომური ენერგეტიკა და კოსმიური ტექნიკა.

კვლევის მიზანი: თბოენერგეტიკულ დანადგარებში მოძრავ ორფაზიან თბოგადამტან ნაკადებს შორის თბოგადაცემის პროცესების ადეკვატური მათემატიკური აღწერისათვის შესაბამისი სასაზღვრო ამოცანების ჩამოყალიბება და მათი ანალიზური ამოხსნა; მართვის სისტემის გარდამავალი პროცესის დინამიკური მახასიათებლების ანალიზური კვლევა და მათემატიკური აღწერა. მიღებული ანალიზური ამოხსნების, კერძოდ, კინეტიკური ფორმულების და დინამიკური მახასიათებლების საფუძველზე თბოენერგეტიკულ დანადგარებში თბური პროცესების მათემატიკური მოდელირება, იდენტიფიკაცია და მართვა სპეციალური პროგრამული უზრუნველყოფით ეგმ-ის გამოყენებით.

კვლევის მეთოდები. ძირითადი შედეგები მიღებულია:

ა) მათემატიკური და სისტემური ანალიზის შედეგად შესაბამისი მათემატიკური სასაზღვრო ამოცანების ჩამოყალიბებით და ანალიზური ამოხსნების მიხედვით; ბ) მათემატიკური მოდელირებისა და იდენტიფიკაციის მეთოდების დამუშავებით, აგრეთვე, კომპიუტერული პროგრამული უზრუნველყოფით.

თეორიული და პრაქტიკული მნიშვნელობა. მოძრავ ორფაზიან თბოგადამტან ნაკადებს შორის თბოგადაცემის პროცესების შემოთავაზებული მათემატიკური აღწერა, ფურიე-კირხჰოფის განტოლებათა სისტემით, და მართვის ობიექტების (თბოენერგეტიკული დანადგარების) გარდამავალი პროცესების დინამიკური ექსტრემალური მახასიათებლების ანალიზური კვლევის დამუშავებული მეთოდი, ბერნულის არაწრფივი დიფერენციალური განტოლებების ამოხსნის გამოყენებით, შესაძლებელია გახდეს ერთ-ერთი პრიორიტეტული მნიშვნელობის მიმართულებად თბო- და მასაგადაცემის ქიმიური და ფაზური გარდაქმნების პროცესების თეორიული და ექსპერიმენტული კვლევის დარგში.

ნაშრომში მიღებული თეორიული თბოგადაცემის პროცესების კინეტიკური ფორმულების და დინამიკური ექსტრემალური

მახასიათებლების საფუძველზე დამუშავებულია თბოენერგეტიკულ დანადგარებში მიმდინარე თბოგადაცემის პროცესების მათემატიკური მოდელირების, ანალიზის, იდენტიფიკაციის, პროგნოზირების და მართვის ახალი მეთოდები. ამ მეთოდებს აქვს თეორიული და პრაქტიკული მნიშვნელობა. აღნიშნული მეთოდები შესაბამისი მათემატიკური და პროგრამული უზრუნველყოფით, მიზნათ ისახავს თბოგადაცემის პროცესების შესაბამისი პარამეტრების, კოეფიციენტების და მახასიათებლების განსაზღვრას, როგორცაა:

- ტემპერატურის მნიშვნელობების განაწილება კოორდინატებისა და დროის მიხედვით თბოენერგეტიკული დანადგარების მოძრავ ორფაზიან თბოგადამტან ნაკადებში;
- კინეტიკური და დინამიკური ექსტრემალური მახასიათებლების რიცხვითი მნიშვნელობები, კერძოდ, თბოგადაცემის კოეფიციენტი, თბოგადაცემის სიჩქარის კონსტანტა, თბოგადაცემის ინტენსივობის კრიტერიუმი, მართვის ობიექტის მდგრადობის კრიტერიუმი, შეშფოთებით გამოწვეული გარდამავალი პროცესის დაგვიანების დრო და მართვის პროცესის ექსტრემალური პერიოდები;
- საშუალო ინტეგრალური ტემპერატურული სხვაობა თბოგადამტან ნაკადებს შორის, ნაცვლად საშუალო ლოგარითმული ტემპერატურული სხვაობისა;
- თბოგადამტან ნაკადთა რაოდენობრივი ხარჯი და მათი შეფარდების მნიშვნელობა (ფაზათა შეფარდების კოეფიციენტი), რომელიც უზრუნველყოფს დავალებულ ტემპერატურულ რეჟიმს თბოენერგეტიკულ დანადგარში წინაღუდენითი, თანმხვედრი ნაკადებისათვის და სხვა კერძო პირობებისათვის.

ჩამოყალიბებული სასაზღვრო ამოცანები და ანალიზური ამოხსნები განზოგადებულია და გამოყენებულია მასაგადაცემის, შრობის პროცესების და ქიმიური ჯაჭვური რეაქციების მოდელირებისა და მართვის მეთოდების დამუშავებისათვის.

აპრობაცია. სადისერტაციო ნაშრომის ძირითადი შედეგები მოხსენებულია: საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის პროფესორ-მასწავლებელთა სამეცნიერო-ტექნიკურ კონფერენციაზე, 16-19 ნოემბერი, 1993წ.;

რესპუბლიკურ სამეცნიერო-ტექნიკურ კონფერენციაზე «გამოყენებითი პროგრამული ტექნოლოგიები.» SofTEC'99 თბილისი, 22-23 ივნისი, 1999წ.;

საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენციაზე "ინფორმაციული ტექნოლოგიები მართვაში" ITC'07 თბილისი, 10-12 ოქტომბერი 2007წ.;

საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენციაზე "ინფორმაციული ტექნოლოგიები მართვაში" ITC'08 თბილისი, 26-28 ივნისი 2008 წ

დამუშავებულია რამდენიმე გამოყენებითი პროგრამული საშუალება, რომლებიც რეგისტრირებულია ალგორითმებისა და პროგრამების სახელმწიფო ფონდში (რეგ. ნომერი 5090000870 და 5090000871) და დანერგილია სტაბილური იზოტოპების სამეცნიერო-საკვლევო ინსტიტუტში (ქ.თბილისი) და გამოყენებულია საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის სასწავლო პროცესში.

პუბლიკაცია. დისერტაციის შედეგები გამოქვეყნებულია ათ სამეცნიერო შრომაში:

1. Гугушвили А.Ш., Наддаф Хасан, Таварткиладзе М.Я., Музашвили З.А. Хаос в энергетических системах. Сообщения АН Грузии, 145, №1, 1990 с.97-100.
2. Таварткиладзе Я. Н., Таварткиладзе М. Я. Теоретические основы проектирования непрерывно-действующих кристаллизаторов. Тезисы докладов научно-технической. конференции профессорско-преподавательского состава Груз. тех. университета. 16-19 ноября 1993. с.64. Тбилиси.
3. თავართქილაძე მ., ჯიბლაძე ნ. არაწრფივი მართვის სისტემების დინამიკური მახასიათებლების მათემატიკური აღწერა. "ენერგია", სამეცნიერო -ტექნიკური ჟურნალი, თბილისი. № 3(39).2006. გვ.61-64.
4. თავართქილაძე მ. სითბოგადაცემის პროცესის მათემატიკური აღწერა ორფაზიან მოძრავ თბოგადამტან ნაკადებს შორის. "ენერგია". სამეცნიერო-ტექნიკური ჟურნალი თბილისი. №3(39).2006. გვ. 65-72.

5. Таварткиладзе Я.Н., Таварткиладзе М.Я. Алтернативный метод математического описания кинетики цепных реакций. .Химический журнал Грузии,6(3),с.298-303 (2006).

6. ერისთავი მ., თავართქილაძე მ., გოგიბერიძე ა., სეთურიძე პ. შრობის პროცესის კინეტიკის იდენტიფიკაციის მეთოდика. საქართველოს მეცნიერებათა აკადემიის მაცნე. ქიმიის სერია. ტომი 32, №3 -4. თბილისი. 2006. გვ.329-332.

7. Таварткиладзе М., Джибладзе Н., Таварткиладзе Я. Математическое описание и моделирование динамических характеристик теплоэнергетических установок. Сборник докладов международной научной конференции «Информационные технологии в управлении». ». ИТС'07. 10.10. 2007-12.10. I том. Тбилиси. с.139-142.

8. Таварткиладзе М.,Таварткиладзе Я. Математическое описание, моделирование и управление процессом теплообмена в теплоэнергетических установках. Сборник докладов международной научной конференции «Информационные технологии в управлении». ИТС'07. 10.10. 2007-12.10. II том. Тбилиси. с.376-82

9. Таварткиладзе М.Я., Математическое моделирование и идентификация кинетики процесса сушки. . Сборник докладов международной научной конференции «Информационные технологии 2008». 27-28. 06. 2008. Тбилиси. т.1. с.76-82

10. ბერეჟიანი მ., თავართქილაძე მ., ბერეჟიანი ა. თბოცვლის პროცესების კომპიუტერული მოდელირება. საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენცია.”ინფორმაციული ტექნოლოგიები 2008”..მოხსენებათა კრებული.ტომი II. თბილისი 2008.გვ. 145-148.

1. ლიტერატურის მიმოხილვა

თბოენერგეტიკულ დანადგარებში მიმდინარე თბოგადაცემის პროცესების ადეკვატური მათემატიკური აღწერა, მოდელირება და ავტომატური მართვის სისტემის დამუშავება ურთიერთდაკავშირებული პრობლემებია. ამ პრობლემების გადაჭრაზე დამოკიდებული არსებულ თბოენერგეტიკულ დანადგარებში თბოგადაცემის პროცესის ტექნოლოგიური რეჟიმების ოპტიმალური მართვა, საექსპლუატაციო პერიოდის რესურსისა და მდგრადობის გაზრდა. აღნიშნული პრობლემების გადაჭრას ასევე დიდი მნიშვნელობა აქვს ახალი მაღალეფექტური თბოენერგეტიკული დანადგარების შექმნაში [1-20]. მიუხედავად გარკვეული მიღწევებისა მეცნიერებისა და ტექნიკის ამ დარგში კვლავ აქტუალურია, თბოენერგეტიკული დანადგარების შემდგომი მოდერნიზაცია, მართვის სისტემების ოპტიმიზაცია და თბოგადაცემის პროცესების ინტენსიფიკაცია [21-30]. ამ საკითხების გადაწყვეტისათვის დიდი მნიშვნელობა აქვს მოძრავ ორფაზიან თბოგადამტან ნაკადებს შორის თბოგადაცემის პროცესის ადეკვატური მათემატიკური ამოცანის ჩამოყალიბებას და მის ანალიზურ ამოხსნებს. მიღებული ანალიზური ამოხსნების საფუძველზე დამუშავებულია მათემატიკური მოდელირების, იდენტიფიკაციის და მართვის ახალი მეთოდები. ასევე აქტუალურია მართვის სისტემის გარდამავალი რეჟიმების, დინამიკური მახასიათებლების ექსპერიმენტული და ანალიზური კვლევების ახალი მეთოდების დამუშავება. ხაზგასმით უნდა აღინიშნოს გარკვეული ჩამორჩენა თბოგადაცემის პროცესების მათემატიკური ანალიზური კვლევის დარგში, კერძოდ, მოძრავ ორფაზიან თბოგადამტან ნაკადებს შორის ადეკვატური სასაზღვრო ამოცანების ჩამოყალიბებისა და მისი ანალიზური ამოხსნების დამუშავების საკითხში. მიუხედავად აღნიშნული საკითხის დიდი პრაქტიკული მნიშვნელობისა. მოძრავ თბოგადამტან ნაკადებს შორის თბოგადაცემის პროცესის მეცნიერული კვლევებისადმი მიძღვნილ ბოლო ათი წლის პერიოდში გამოქვეყნებულ სტატიებში და მონოგრაფიებში

განხილულია მხოლოდ თბოგადაცემის პროცესის მიმდინარეობა ერთფაზიან მოძრავ ნაკადში [31-38]. აქვე უნდა აღინიშნოს თბოგადაცემის პროცესების კვლევისა და გაანგარიშების ალტერნატიული რიცხვითი მეთოდების (სხვაობითი, სასრულო-ელემენტური, ბადური მეთოდი და სხვ.) ნაკლოვანებების შესახებ. ამ დარგში მომუშავე უმეტესი სპეციალისტებისა და მეცნიერების აზრით რიცხვითი მეთოდები შეიცავს გადამეტებულ ცდომილებებს, ე.წ. "სუფთა დიფუზიურ" ცდომილებებს აქედან გამომდინარე, აღნიშნული მეთოდების გამოყენება ისეთი მგძნობიარე პროცესებისათვის, როგორიცაა თბური პროცესები, ჩვენი აზრით, არ არის მიზანშეწონილი. რიცხვითი მეთოდების გამოყენებით დიფერენციალური განტოლებების ამოხსნების მიღებული შედეგები არა საკმარისი სიზუსტით ასახავს რეალური პროცესის ძირითადი პარამეტრების ფაქტიურ მნიშვნელობებს [39-44]. აქედან გამომდინარე, თბოგადაცემის პროცესების მათემატიკური აღწერისათვის მიზანშეწონილია ჩამოყალიბდეს ადეკვატური მათემატიკური სასაზღვრო ამოცანები და დამუშავდეს მათი ანალიზური ამოხსნები. ამ თვალსაზრისით, მოძრავ ორფაზიან თბოგადამტან ნაკადებს შორის თბოგადაცემის პროცესების ადეკვატური მათემატიკური ამოცანის ჩამოყალიბების და მისი ანალიზური ამოხსნების საფუძველზე შესაძლებელია გადაწყვეტილ იქნეს აქტუალური პრობლემების მნიშვნელოვანი საკითხების ფართო სპექტრი. კერძოდ, სხვადასხვა ტიპის და დანიშნულების თბოენერგეტიკული დანადგარებისათვის, გაანგარიშების, მოდელირების, დაპროექტებისა და მართვის საკითხები. აღნიშნული საკითხების გადაჭრის მიზნით სადისერტაციო ნაშრომში ჩამოყალიბებულია შესაბამისი მათემატიკური სასაზღვრო ამოცანები. ამ ამოცანების ანალიზური ამოხსნების საფუძველზე დამუშავებულია თბოენერგეტიკული დანადგარების, არაწრფივი სისტემებისა და პროცესების მოდელირების, იდენტიფიკაციის, ანალიზისა და მართვის ახალი მეთოდები. [45-54]. მიღებული თეორიული შედეგების ანალიზის,

იდენტიფიკაციის და შეფასების მიზნით გამოყენებულია მეცნიერთა
ექსპერიმენტული კვლევითი შედეგები [56-80].

2. შედეგები და მათი განსჯა

პირველ თავში ლიტერატურული მიმოხილვის შედეგად დახასიათებულია თბოენერგეტიკულ დანადგარებში მიმდინარე თბური პროცესების მათემატიკური აღწერის, მოდელირების და მართვის პრობლემები. აღნიშნულია მეცნიერების დიდი ღვაწლი მაღალეფექტური თბოენერგეტიკული დანადგარების შექმნაში. ამასთან, ხაზგასმულია ჩამორჩენა თბოგადაცემის პროცესების ანალიზური კვლევის დარგში, კერძოდ, ორფაზიან მოძრავ თბოგადამტან ნაკადებს შორის ადეკვატური სასაზღვრო ამოცანების ჩამოყალიბებისა და მისი ანალიზური ამოხსნების დამუშავების საკითხში. აღნიშნულია ამ საკითხის დიდი პრაქტიკული მნიშვნელობა თბური პროცესების ინტენსიფიკაციისა და ოპტიმალური ტემპერატურული რეჟიმების მართვის ამოცანების გადაწყვეტისათვის. ხაზგასმით აღნიშნულია, რომ ორფაზიან მოძრავ თბოგადამტან ნაკადებს შორის თბოგადაცემის პროცესის მეცნიერული კვლევებისადმი მიძღვნილ გამოქვეყნებულ სტატიებში განხილულია მხოლოდ თბოგადაცემის პროცესის მიმდინარეობა ერთფაზიან მოძრავ ნაკადში. ორფაზიან მოძრავ თბოგადამტან ნაკადებს შორის თბური პროცესების ადეკვატური მათემატიკური ამოცანის ჩამოყალიბების და მისი ანალიზური ამოხსნების საფუძველზე შესაძლებელია გადაწყვეტილ იქნეს სხვადასხვა ტიპის და დანიშნულების თბოენერგეტიკული დანადგარებისათვის, კვლევის ყველა ძირითად ეტაპზე, გაანგარიშების, მოდელირების, დაპროექტებისა და მართვის საკითხები. აღნიშნული საკითხების გადაჭრის მიზნით სადისერტაციო ნაშრომში ჩამოყალიბებულია შესაბამისი მათემატიკური სასაზღვრო ამოცანები. მიღებულია ამ ამოცანების ანალიზური ამოხსნები და მათი გამოყენებით დამუშავებულია მათემატიკური მოდელირების, იდენტიფიკაციის, ანალიზისა და მართვის მეთოდები.

2.1. თბოგადაცემის პროცესის მათემატიკური აღწერა მოძრავ ორფაზიან თბოგადამტან ნაკადებს შორის

2.1.1. ზოგადი სასაზღვრო ამოცანის ჩამოყალიბება.

ადეკვატური სასაზღვრო ამოცანის ჩამოყალიბების ძირითადი კონცეფცია, თბოგადაცემის პროცესის მათემატიკური აღწერის მიზნით მოძრავ ორფაზიან თბოგადამტან ნაკადებს შორის, ემყარება კონვექციური თბოგადაცემის ფურიე-კირხჰოფის დიფერენციალურ განტოლებათა სისტემის გამოყენებას, როგორც მაღალი (m), ასევე დაბალი (s) ტემპერატურული პოტენციალებისათვის ($t_m > t_s$):

Equation Chapter 1 Section 1

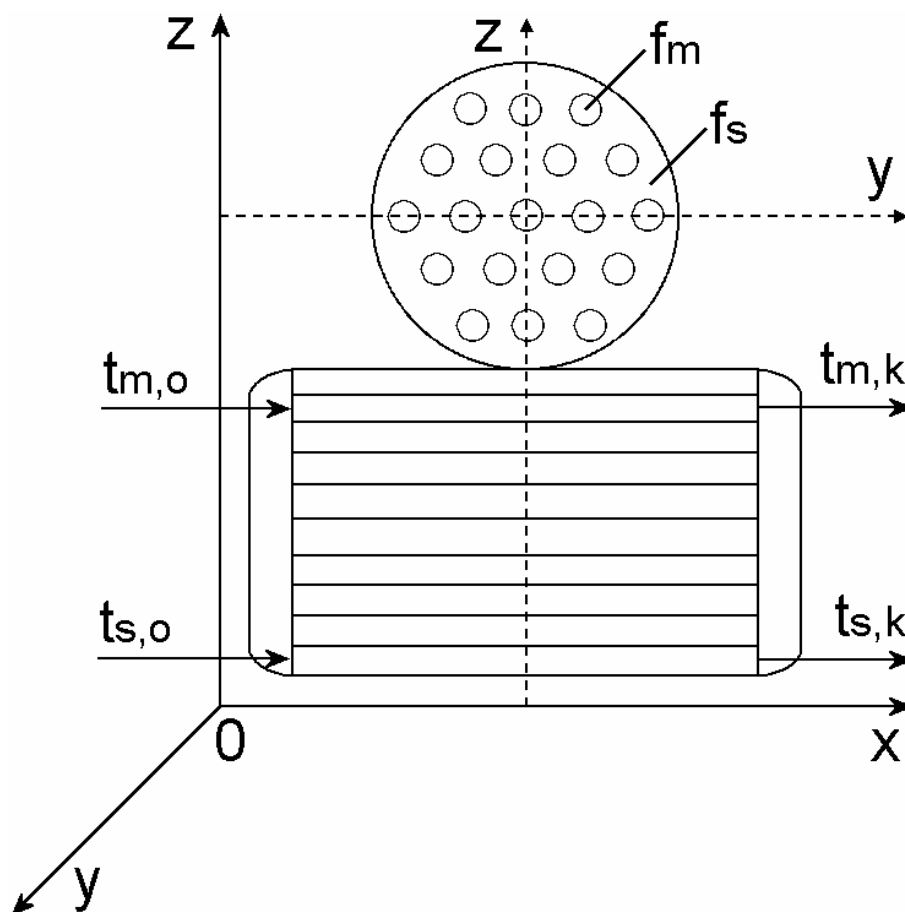
$$-m \text{ ფაზისთვის} \quad \frac{\partial t_m}{\partial \tau} = a_m^2 \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right)_m - \left(v_x \frac{\partial t}{\partial x} + v_y \frac{\partial t}{\partial y} + v_z \frac{\partial t}{\partial z} \right)_m; \quad (1-1)$$

$$-s \text{ ფაზისთვის} \quad \frac{\partial t_s}{\partial \tau} = a_s^2 \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right)_s - \left(v_x \frac{\partial t}{\partial x} + v_y \frac{\partial t}{\partial y} + v_z \frac{\partial t}{\partial z} \right)_s. \quad (1-2)$$

სისტემა (1-1)-(1-2) დაკავშირებულია სასაზღვრო პირობით ფაზათა გამყოფ ზედაპირზე (f_m, f_s).

$$\lambda_m \left(\frac{\partial t_m}{\partial n} \right)_{f_m} = -\lambda_s \left(\frac{\partial t_s}{\partial n} \right)_{f_s}; \quad (1-3) \quad a^2 = \frac{\lambda_i}{c_i \cdot \rho_i}; \quad i = m, s \quad (1-4)$$

სადაც λ , C , ρ - შესაბამისად ფაზათა თბოგამტარობის კოეფიციენტი, თბოტევადობა და სიმკვრივეა.



ნახ. 1 მილოვანი თბოგადამცემი x, y, z კოორდინატთა სისტემაში

ზოგადი სასაზღვრო ამოცანის ჩამოყალიბებისა და მის საფუძველზე ანალიზური კვლევის ობიექტად ამორჩეულია მილოვანი თბოგადამცემი (ნახ. 1.), რომელიც მოთავსებულია კოორდინატთა x, y, z სისტემაში. თბოგადამტანი ნაკადების მოძრაობა მილოვან თბომცვლეულში მიმართულია უპირატესად x ღერძის გასწვრივ. თბოგადამცემის გეომეტრიული ზომებია: სიგრძე (h), დიამეტრი (D), ზედაპირი (F). თბოგადამტან ფაზათა ნაკადების საშუალო სიჩქარე y და z ღერძების მიმართულებით თბოგადამცემის მილაკებში და მილაკთშორისო სივრცეში მიღებულია ნულის ტოლად ($v_y = 0, v_z = 0$). ტემპერატურების მნიშვნელობები m და s ფაზებში თბოგადამცემის YOZ კვეთში გასაშუალებულია და წარმოდგენილია შემდეგი ფორმულით:

$$\bar{t}_i = \frac{1}{f_i} \iint_{f_i} t_i dy \cdot dz; \quad i = m, s \quad (1-5)$$

სადაც f_i არის YOZ სიბრტყეში m და s ფაზების თბოგადამტანი ნაკადების Li კონტურით შემოსაზღვრული ფართი.

შემდგომში $\bar{t}_i$ -ს საშუალო მნიშვნელობა იგულისხმება შტრიხის გარეშე. თუ მხედველობაში მივიღებთ, რომ უწყვეტ მოქმედების თბოგადამცემ დანადგარებში კონვექციით გადატანილი თბური ენერგია x ღერძის გასწვრივ გაცილებით მეტია, ვიდრე მოლეკულური დიფუზიით, შეგვიძლია მოვიღოთ სამართლიანად შემდეგი უტოლობა:

$$a^2_i \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} \ll (v_x)_i \frac{\partial t}{\partial x}. \quad (1-6)$$

რადგანაც τ და x სიდიდეები არ არის დამოკიდებული y და z -ზე, ამიტომ (1-1) და (1-2) სისტემა (1-5), (1-6)-ის გათვალისწინებით შეიძლება წარმოვადგინოთ შემდეგი სახით:

$$-m \text{ ფაზისთვის} \quad \frac{\partial t_m}{\partial \tau} = \frac{a^2_m}{f_m} \iint_{f_m} \left(\frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right)_m dy \cdot dz - (v_x)_m \frac{\partial t_m}{\partial x}; \quad (1-7)$$

$$-s \text{ ფაზისათვის} \quad \frac{\partial t_s}{\partial \tau} = \frac{a^2_s}{f_s} \iint_{f_s} \left(\frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right)_s dy \cdot dz - (v_x)_s \frac{\partial t_s}{\partial x}. \quad (1-8)$$

$t_m(y|z)$, $t_s(y|z)$ ფუნქციები შემოსაზღვრულია დანადგარის გარსაცმის და მილაკების ზედაპირით. აქედან გამომდინარე, ტემპერატურის ცვლილებები YOZ კვეთში შეგვიძლია განვიხილოთ ფაზათა თბოგადამტანი ნაკადების შემოსაზღვრულ L პერიმეტრზე გრინ-ოსტროგრადსკის ფორმულის გამოყენებით:

$$\iint_{ji} \left(\frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right)_i dy \cdot dz = \int_{Li} \frac{\partial t}{\partial n} dL_i. \quad (1-9)$$

გრინ-ოსტროგრადსკის (1-9) ფორმულის გათვალისწინებით (1-7) და (1-8) სისტემა შეიძლება წარმოვადგინოთ შემდეგი სახით:

$$-m \text{ ფაზისთვის} \quad \frac{\partial t_m}{\partial \tau} = \frac{a_m^2}{f_m} \int_{L_m} \frac{\partial t_m}{\partial n} dL_m - v_m \frac{\partial t_m}{\partial x}; \quad (1-10)$$

$$-s \text{ ფაზისთვის} \quad \frac{\partial t_s}{\partial \tau} = \frac{a_s^2}{f_s} \int_{L_s} \frac{\partial t_s}{\partial n} dL_s - v_s \frac{\partial t_s}{\partial x}. \quad (1-11)$$

სადაც L_m, L_s არის m და s ფაზების YOZ კვეთის ფართის შემომსაზღვრელი კონტურები. თუ მხედველობაში მივიღებთ, რომ სითბოს ნაკადი შემოსაზღვრულია აპარატის გარსაცმის ზედაპირით (F_A) და დანაკარგები გარემოში ნულის ტოლია, მაშინ სამართლიანია შემდეგი ტოლობები:

$$\left(\frac{\partial t}{\partial n} \right)_{F_A} = 0, \quad (1-12) \quad \int_{L_m} \frac{\partial t_s}{\partial n} dL_m = - \int_{L_s} \frac{\partial t_s}{\partial n} dL_s. \quad (1-13)$$

სითბოს ნაკადი ფაზათა გამყოფ ზედაპირზე, გამოწვეული საშუალო ტემპერატურული სხვაობით თბოგადამტან ნაკადებს შორის, შეიძლება განისაზღვროს ნიუტონის ფორმულით, რომელიც წარმოდგენილია შემდეგი სახით:

$$\lambda_m \left(\frac{\partial t_m}{\partial n} \right)_{L_m} = -\alpha (\bar{t}_m - \bar{t}_s), \quad (1-14)$$

სადაც α წარმოადგენს თბოგაცემის კოეფიციენტს თბოგამტან ნაკადებს შორის; $\bar{t}_s$ და $\bar{t}_m$ არის ტემპერატურათა საშუალო მნიშვნელობები m და s

ფაზების YOZ კვითში. (1-10), (1-11) განტოლებათა სისტემაში გრადიენტის მნიშვნელობები $\left(\frac{\partial t}{\partial n}\right)$ შევცვალოთ საშუალო ტემპერატურათა სხვაობით ნიუტონის ფორმულის ჩვენული ინტერპრეტაციით (იგულისხმება ტემპერატურათა საშუალო მნიშვნელობა m და s ფაზებში) (1-14)-ის მიხედვით და გავითვალისწინოთ ფორმულა (1-13), მივიღებთ:

$$-m \text{ ფაზისთვის} \quad \frac{\partial t_m}{\partial \tau} = -\frac{a_m^2}{f_m} \alpha \frac{L_m}{\lambda_m} (\bar{t}_m - \bar{t}_s) - v_m \frac{\partial t_m}{\partial x}; \quad (1-15)$$

$$-s \text{ ფაზისთვის} \quad \frac{\partial t_s}{\partial \tau} = -\frac{a_s^2}{f_s} \alpha \frac{L_s}{\lambda_s} (\bar{t}_m - \bar{t}_s) - v_s \frac{\partial t_s}{\partial x}. \quad (1-16)$$

წარმოდგენილ სისტემაში (1-15), (1-16) a_m^2 , a_s^2 მნიშვნელობების (1-4) გათვალისწინებით და გარკვეული აღნიშვნების შემოღებით შეგვიძლია დავწეროთ:

$$-m \text{ ფაზისთვის} \quad \frac{\partial t_m}{\partial \tau} = -K_m (t_m - t_s) - v_m \frac{\partial t_m}{\partial x}; \quad (1-17)$$

$$-s \text{ ფაზისთვის} \quad \frac{\partial t_s}{\partial \tau} = -K_s (t_m - t_s) - v_s \frac{\partial t_s}{\partial x}, \quad (1-18)$$

სადაც

$$K_m = \alpha \frac{1}{C_m \cdot \rho_m} \cdot \frac{L_m}{f_m}, \quad (1-19) \quad K_s = \alpha \frac{1}{C_s \cdot \rho_s} \cdot \frac{L_s}{f_s}. \quad (1-20)$$

სითბოგაცემის კოეფიციენტი (α) (1-14) განტოლებაში თავისი შინაარსით ასახავს სითბოგადაცემის კოეფიციენტს (K).

(1-17), (1-18) სისტემის ამოხსნისათვის მიღებულია შემდეგი საწყისი და სასაზღვრო პირობები:

საწყისი პირობები

$$t_m \big|_{\tau=0} = f_m(x), \quad (1-21) \quad t_s \big|_{\tau=0} = f_s(x). \quad (1-22)$$

სასაზღვრო პირობები

$$t_m \Big|_{x=0} = t_{m,o} + |\delta t_m|, \quad (1-23)$$

$$t_m \Big|_{x=h} = t_{s,o} + |\delta t_s|, \quad (1-24)$$

ჩამოყალიბებული სასაზღვრო ამოცანა (1-17)-(1-24) ახასიათებს ტემპერატურის ცვლილებას არასტაციონარულ პირობებისათვის მოძრავ ორფაზიან თბოგადამტან ნაკადებს შორის დროში (τ) და (x) ღერძის გასწვრივ. როგორც ვხედავთ, ფურიე-კირხჰოფის დიფერენციალური განტოლებათა სისტემა (1-1)-(1-2) ლოგიკური გამარტივებების შედეგად დაყვანილია სასაზღვრო ამოცანამდე, რომლის ანალიზურ ამოხსნას აქვს როგორც თეორიული, ასევე პრაქტიკული მნიშვნელობა. ლოგიკური გამარტივებები მიღებულია თბური პროცესის ფიზიკური არსიდან გამომდინარე და განხორციელებულია მათემატიკური სიმკაცრით. განმარტებას მოითხოვს მხოლოდ ნიუტონის (1-14) განტოლებაში ფაზათა გამყოფ ზედაპირზე (t_m)_წ ტემპერატურის მნიშვნელობის შეცვლა საშუალო ტემპერატურის t_m მნიშვნელობით, რომელიც რეალურად ექვემდებარება გაზომვას და კონტროლს თბოგადამტან ნაკადების ბირთვში. ნაკადების ბირთვში m და s ფაზების ტემპერატურათა პოტენციალი გრინ-ოსტროგრადცკის ფორმულით დახასიათებულია ნაკადების ბირთვის შემომსაზღვრელ კონტურზე. ამ ახლებურმა მიდგომამ რადიკალურად გადაჭრა მათემატიკური სიძნელებები და უზრუნველყო აქტუალური სასაზღვრო ამოცანების ჩამოყალიბება. ტემპერატურის საშუალო მნიშვნელობებით ოპერირება ყოველმხრივ გამართლებულია. მხედველობაში უნდა მივიღოთ, რომ თბოენერგეტიკულ დანადგარებში და ნებისმიერი კონსტრუქციის თბომცვლელებში იზომება ტემპერატურების მნიშვნელობები არა ფაზათა გამყოფ ზედაპირზე, არამედ თვით თბოგამტანი ფაზების ნაკადის მასის ბირთვში. ტემპერატურათა საშუალო მნიშვნელობების შემოტანა თეორიულ ფორმულებში უზრუნველყოფს სრულ ადეკვატურ შესაბამისობას ექსპერიმენტულად გაზომილ და თეორიული ფორმულებით გაანგარიშებულ სიდიდეებს შორის.

2.1.2. სასაზღვრო ამოცანების ანლიზური ამოხსნა სტაციონარული პროცესისათვის

სტაციონარული პროცესის შემთხვევაში დიფერენციალურ განტოლებათა სისტემა (1-17), (1-18) მიიღებს შემდეგ სახეს:

$$\begin{array}{ll} \text{--m ფაზისთვის} & \text{--s ფაზისთვის} \\ \frac{dt_m}{dx} = -K_m(t_m - t_s); & \frac{dt_s}{dx} = -K_s(t_m - t_s). \end{array} \quad \begin{array}{l} (1-25) \\ (1-26) \end{array}$$

(1-25), (1-26) სისტემის ამოხსნისათვის წინააღმდეგობითი ნაკადისათვის საკმარისია შემდეგი სასაზღვრო პირობები:

$$t_m \Big|_{x=0} = t_{m,0}, \quad (1-27) \quad t_s \Big|_{x=h} = t_{s,0}. \quad (1-28)$$

წინააღმდეგობითი ნაკადისათვის სასაზღვრო ამოცანას სტაციონარული პირობისათვის აქვს შემდეგი ამოხსნა:

$$\text{--m ფაზისთვის} \quad t_m = \frac{t_{m,0} [P \cdot \exp(\lambda) - 1] + t_{s,0} \cdot P [\exp(\lambda_K) - \exp(\lambda)]}{P \cdot \exp(\lambda_K) - 1}; \quad (1-29)$$

$$\text{--s ფაზისთვის} \quad t_s = \frac{t_{m,0} [\exp(\lambda) - 1] + t_{s,0} [P \cdot \exp(\lambda_K) - \exp(\lambda)]}{P \cdot \exp(\lambda_K) - 1}. \quad (1-30)$$

პირდაპირდენითი (თანმხვედრი) ნაკადისათვის სასაზღვრო ამოცანის ამოხსნისათვის საკმარისია შემდეგი პირობები:

$$t_m \Big|_{x=0} = t_{m,0}, \quad (1-31) \quad t_s \Big|_{x=0} = t_{s,0}. \quad (1-32)$$

პირდაპირდენითი ნაკადისათვის სასაზღვრო ამოცანას სტაციონარული პირობისათვის აქვს შემდეგი ამოხსნა:

$$-m \text{ ფაზისთვის} \quad t_m = \frac{t_{m,0} [\exp(\lambda_1) + P] + t_{s,0} \cdot P [\exp(\lambda_1) - 1]}{(P + 1) \exp(\lambda_1)}; \quad (1-33)$$

$$-s \text{ ფაზისთვის} \quad t_s = \frac{t_{m,0} [\exp(\lambda_1) - 1] + t_{s,0} [P \cdot \exp(\lambda_1) + 1]}{(P + 1) \exp(\lambda_1)}. \quad (1-34)$$

ნაკადი მუდმივი ტემპერატურის მნიშვნელობით m ფაზაში $t_m = t_{m,o} = \text{const}$

$$-s \text{ ფაზისთვის} \quad t_s = \frac{t_{m,0} [\exp(\lambda_s) - 1] + t_{s,0}}{\exp(\lambda_s)}. \quad (1-35)$$

ნაკადი მუდმივი ტემპერატურის მნიშვნელობით s ფაზაში $t_s = t_{s,o} = \text{const}$

$$-m \text{ ფაზისთვის} \quad t_m = \frac{t_{m,0} + t_{s,0} \cdot [\exp(\lambda_m) - 1]}{\exp(\lambda_m)}; \quad (1-36)$$

სადაც

$$\lambda = (K_1 - K_2)(h - x); \quad (1-37) \quad \lambda_K = (K_1 - K_2) \cdot h; \quad (1-38)$$

$$\lambda_1 = (K_1 + K_2)x; \quad (1-39) \quad P = \frac{K_2}{K_1}; \quad (1-40)$$

$$K_1 = K_m \cdot \frac{1}{v_m}; \quad (1-41) \quad K_2 = K_s \cdot \frac{1}{v_s}; \quad (1-42)$$

$$K_m = \frac{1}{\rho_m \cdot c_m} \alpha \frac{L_m}{F_m}; \quad (1-43) \quad K_s = \frac{1}{\rho_s \cdot c_s} \alpha \frac{L_m}{F_s}. \quad (1-44)$$

$$\lambda_m = K_m x; \quad (1-45) \quad \lambda_s = K_s x; \quad (1-46)$$

თბოგაცემის კოეფიციენტი α ფიზიკური შინაარსით თბოგადაცემის K კოეფიციენტის ეკვივალენტურია, რადგანაც (1-3), (1-5) და (1-14) პირობების თანახმად მასში ასახულია და გაერთიანებულია თბოგამტარელობის კოეფიციენტის (λ_m, λ_s) წვლილი და ფაზათა გამყოფი ზედაპირის წინაღობა თბური ნაკადის ნორმალის გასწვრივ (1-14) ტემპერატურათა საშუალო

მნიშვნელობებით m და s ფაზებში. მიღებული კინეტიკური ფორმულების სტრუქტურაში მოცემულია მოძრავ ორფაზიან თბოგადამტან ნაკადებს შორის თბოგადაცემის პროცესის ძირითადი პარამეტრები და აქედან გამომდინარე, თბოგადაცემის კოეფიციენტების რიცხვითი მნიშვნელობების განსაზღვრა შემოთავაზებულია ძირითადი კინეტიკური ფორმულების მიხედვით. კინეტიკური ფორმულების (1-29), (1-30) და (1-33)-(1-36) გარკვეული გარდაქმნების შედეგად მიღებულია თბოგადაცემის კოეფიციენტების ($K=\alpha$) შემდეგი საანგარიშო ფორმულები:

$$\begin{array}{l} \text{წინაღდენითი} \\ \text{ნაკადისათვის} \end{array} \quad K = \frac{G_m \cdot C_m}{F} \cdot \frac{P}{P-1} \ln \frac{P(t_{m,0} - t_{s,0}) - (t_{m,o} - t_{m,k})}{t_{m,k} - t_{s,0}}; \quad (1-47)$$

$$\begin{array}{l} \text{პირდაპირდენითი} \\ \text{ნაკადისათვის} \end{array} \quad K = \frac{G_m \cdot C_m}{G} \cdot \frac{P}{P+1} \ln \frac{P(t_{m,0} - t_{s,0})}{P(t_{m,K} - t_{s,0}) - (t_{m,0} - t_{m,K})}. \quad (1-48)$$

$$t_s = \text{const} \quad K = \frac{G_m \cdot C_m}{F} \cdot \ln \frac{t_{m,0} - t_{s,0}}{t_{m,k} - t_{s,0}}; \quad (1-49)$$

$$t_m = \text{const} \quad K = \frac{G_m \cdot C_m}{F} \cdot \frac{1}{P} \ln \frac{t_{m,0} - t_{s,0}}{t_{m,o} - t_{m,k}}; \quad (1-50)$$

კინეტიკური ფორმულების (1-29), (1-30) და (1-33)-(1-36) სათანადო გარდაქმნების შედეგად მიღებულია ტემპერატურათა საშუალო ინტეგრალური სხვაობის საანგარიშო ფორმულები:

$$\text{წინაღდენითი ნაკადისათვის} \quad \Delta t = \frac{\exp(\lambda_K) - 1}{[P \cdot \exp(\lambda_K) - 1] \cdot \lambda_K}; \quad (1-51)$$

$$\begin{array}{l} \text{პირდაპირდენითი} \\ \text{ნაკადისათვის} \end{array} \quad \Delta t = (t_{m,0} - t_{s,0}) \frac{\exp(\lambda_1) - 1}{\lambda_1 \exp(\lambda_1)}. \quad (1-52)$$

$$\text{სადაც} \quad \lambda_k = K_m / v_m (P-1) \quad (1-53) \quad \lambda_1 = K_2 x \quad (1-54)$$

თბოგადაცემის პროცესის იდენტიფიკაციისა და მართვის ამოცანა ითვალისწინებს აგრეთვე ახალი კრიტერიუმის განსაზღვრას თბური პროცესის ინტენსიურობის შეფასებისათვის. კინეტიკური ფორმულების (1-29), (1-30); (1-33)-(1-36) ექსპონენტების ხარისხის მაჩვენებლების (λ_K, λ_1) რიცხვითი მნიშვნელობები განაპირობებენ თბოგადაცემის პროცესის

ინტენსიურობას, როგორც წინააღმდეგობით, ასევე პირდაპირდენით ნაკადების შემთხვევაში. (1-36)-ის და (1-37)-ის გამოსახულებების გარდაქმნის შედეგად ვღებულობთ თბოგადაცემის პროცესის ინტენსიურობის კრიტერიუმს (I).

$$\begin{array}{l} \text{წინააღმდეგობით} \\ \text{ნაკადისათვის} \end{array} \quad I = K_1 \left(1 - \frac{K_2}{K_1}\right) = K_m \left(1 - \frac{1}{P}\right) \frac{h}{v_m}. \quad (1-55)$$

$$\begin{array}{l} \text{პირდაპირდენით} \\ \text{ნაკადისათვის} \end{array} \quad I = K_1 \left(1 + \frac{K_2}{K_1}\right) = K_m \left(1 + \frac{1}{P}\right) \frac{h}{v_m}. \quad (1-56)$$

ფაზათა ნაკადების რაოდენობების შეფარდების კოეფიციენტი პარამეტრული იდენტიფიკაციის შემთხვევაში მიზანშეწონილია განისაზღვროს შესაბამისი თბური ბალანსის განტოლებიდან. წინააღმდეგობით და პირდაპირდენით ფაზათა ნაკადების შეფარდების კოეფიციენტი P_t უდრის:

$$P_t = \frac{t_{m,o} - t_{m,k}}{t_{m,k} - t_{s,o}}. \quad (1-57)$$

მუდმივი ტემპერატურის ნაკადისათვის m ფაზაში ($t_m = const$).

$$P_t = \frac{t_{m,o}}{t_{m,k} - t_{s,o}}. \quad (1-58)$$

თბოგადაცემის პროცესის ფუნდამენტური კვლევისათვის დიდი მნიშვნელობა აქვს სასაზღვრო ამოცანის ანალიზურ ამოხსნებს, როგორც სტაციონარული ასევე არა სტაციონარული პირობებისათვის. სასაზღვრო ამოცანის ანალიზური ამოხსნები სტაციონარული პროცესისათვის იხილეთ დანართი 2.1.

2.1.3. სასაზღვრო ამოცანის ანალიზური ამოხსნა არასტაციონარული პროცესისათვის

არასტაციონარული პროცესის სასაზღვრო ამოცანის (1-17)-(1-24) ამოხსნის შედეგი წარმოდგენილია შემდეგი სახით:

$$\begin{matrix} -m \\ \text{ფაზისთვის} \end{matrix} \quad t_m(\tau_1 x) = t_m(x) + K_m \frac{\delta t_m - \delta t_s}{K_m + K_s} \exp[-(K_m + K_s)] - \frac{K_m \delta t_s + K_s \delta t_m}{K_m + K_s} \quad (1-59)$$

$$\begin{matrix} -s \\ \text{ფაზისთვის} \end{matrix} \quad t_s(\tau_1 x) = t_s(x) + K_s \frac{\delta t_m - \delta t_s}{K_m + K_s} \exp[-(K_m + K_s)] - \frac{K_m \delta t_s + K_s \delta t_m}{K_m + K_s} \quad (1-60)$$

სადაც $t_m(x)$ და $t_s(x)$ მნიშვნელობები განისაზღვრება სტაციონარული სასაზღვრო ამოცანების ამოხსნების მიხედვით: წინააღმდეგობით ნაკადისათვის (1-29), (1-30) და პირდაპირდენით ნაკადისათვის (1-33), (1-34) ფორმულების შესაბამისად. სტაციონარული რეჟიმის შემთხვევაში შეშფოთების მნიშვნელობები $\delta t_m, \delta t_s$ შეიძლება მივიჩნიოთ ნულის ტოლად და თბოგადაცემის პროცესის ანალიზისათვის ვისარგებლოთ (1-29), (1-30) ან (1-33), (1-34) კინეტიკური ფორმულებით. არა სტაციონარული პროცესის ანალიზური ამოხსნა იხილეთ დანართი 3.2.

მიღებული თეორიული ფორმულების მიხედვით ჩამოყალიბებულია ტიპური მათემატიკური მოდელები, რომელთა საფუძველზე განხორციელებულია თბოენერგეტიკულ დანადგარებში მიმდინარე თბოგადაცემის პროცესების პარამეტრული და სტრუქტურული იდენტიფიკაცია. იდენტიფიკაციის შედეგად მიღებული პარამეტრების რიცხვითი მნიშვნელობების მიხედვით შესაძლებელია თეორიული (დავალებული) და ფაქტიური პარამეტრების, მახასიათებლების, კოეფიციენტების მნიშვნელობების შედარება და შეფასება. მაგალითად, თბოგადაცემის კოეფიციენტის, თბოგადაცემის სიჩქარის კონსტანტის, ფაზათა რაოდენობის შეფარდების კოეფიციენტის, თბური და ჰიდროდინამიკური კრიტერიუმების და, ბოლოს, ტემპერატურების განაწილების მნიშვნელობების შეფასება დროში და დანადგარის ნებისმიერ კვეთში. ყველა ამ პარამეტრის გაანგარიშება და ანალიზი დროის რეალურ მასშტაბში კომპიუტერული ტექნიკის გამოყენებით საშუალებას იძლევა ვმართოთ თბოგადაცემის პროცესები დავალებული რეჟიმის ფარგლებში. ზემოთ ჩამოთვლილი პარამეტრების ცვლილებების დიაგნოსტიკა, პროგნოზირება და სტაბილიზაცია მიზნად ისახავს თბოენერგეტიკულ დანადგარების საექსპლუატაციო რესურსის, მდგრადობისა და მათი

ტექნიკურ-ეკონომიკური მაჩვენებლების გაზრდას ნახ. 2-3-ზე წარმოდგენილია თბოგადაცემის პროცესის კომპიუტერული ექსპერიმენტის ამონაბეჭდი ორფაზიან მოძრავ თბოგადამტან ნაკადებს შორის ტემპერატურების ცვლილების დამახასიათებელი კინეტიკური მრუდები თბოენერგეტიკულ დანადგარებში, რომლებშიც განხორციელებულია წინაღდენითი და პირდაპირდენითი ნაკადები. პროგრამული უზრუნველყოფა შესრულებულია C დაპროგრამების ენაზე.

მიღებული კინეტიკური ფორმულების (1-35) და (1-36) შესაბამისად შესაძლებელია განხორციელდეს თბოგადაცემის პროცესების შემდეგი კერძო შემთხვევები:

ა) როდესაც მაღალი პონენციალის m ფაზის ნაჯერი ორთქლი კონდენსაციის პირობებშია მილთაშორისო სივრცეში ($t_m = t_{m,o} = const$), კინეტიკური ფორმულის (1-35) შესაბამისად;

ბ) როდესაც დაბალი პოტენციალის s ფაზაში მილთაშორისო სივრცეში ($t_s = t_{s,0} = const$). კინეტიკური ფორმულის (1-36) შესაბამისად;

თბოგადაცემის პროცესების განხილული ძირითადი ტიპური ნაკადების მოდელები-თეორიული კინეტიკური ფორმულები მიზანშეწონილია გამოყენებული იქნეს ავტომატურ მართვის სისტემაში (ამს), როგორც მიმდინარე თბოგადაცემის პროცესის მათემატიკური მოდელი(მმ). მმ-ს ჩართვა ამს-ში, როგორც ცნობილია, გააუმჯობესებს პროცესის რეგულირების ხარისხს და ოპერატორს მისცემს საშუალებას შეაფასოს თბომცვლეულში ტემპერატურების განაწილება ფაზათა ნაკადებში დანადგარის სიგრძის (სიმაღლის) მიხედვით დროის ნებისმიერ მომენტში.

2.1.4. თბოგადაცემის პროცესის ანალიზური ამოხსნების განზოგადება

ორფაზიან მოძრავ თბოგადამტან ნაკადებს შორის თბოგადაცემის პროცესის მათემატიკური აღწერის მეთოდი და მიღებული ანალიზური ამოხსნები შეიძლება განვაზოგადოთ და გამოვიყენოთ მასაგადაცემის პროცესების მოდელირებისა და მართვისათვის. ამ მიზნით ფურიე-

კირხჰოფის დიფერენციალურ განტოლებათა სისტემაში საჭიროა შევცვალოთ: ტემპერატურების (t) მნიშვნელობები-კონცენტრაციებით (C), ტემპერატურაგამტარობის კოეფიციენტები (a^2) - დიფუზიის კოეფიციენტებით (D), თბოგაცემის კოეფიციენტი (α) - მასაგაცემის კოეფიციენტით (β). მასაგაცემის პროცესების საანგარიშო კინეტიკური ფორმულები მიიღებს შემდეგ სახეს:

წინაღდენითი ნაკადის

m ფაზისათვის
$$C_m = \frac{C_{m,0} [P \cdot \exp(\lambda) - 1] + C_{s,0} \cdot P [\exp(\lambda_K) - \exp(\lambda)]}{P \cdot \exp(\lambda_K) - 1}; \quad (1-61)$$

s ფაზისათვის
$$C_s = \frac{C_{m,0} [\exp(\lambda) - 1] + C_{s,0} [P \cdot \exp(\lambda_K) - \exp(\lambda)]}{P \cdot \exp(\lambda_K) - 1}; \quad (1-62)$$

პირდაპირი ნაკადის

m ფაზისათვის
$$C_m = \frac{C_{m,0} [\exp(\lambda_1) + P] + C_{s,0} \cdot P [\exp(\lambda_1) - 1]}{(P + 1) \exp(\lambda_1)}; \quad (1-63)$$

s ფაზისათვის
$$C_m = \frac{C_{m,0} [\exp(\lambda_1) + P] + C_{s,0} \cdot P [\exp(\lambda_1) - 1]}{(P + 1) \exp(\lambda_1)}; \quad (1-64)$$

$\lambda = (K_1 - K_2)(h - x); \quad (1-65) \quad \lambda_K = (K_1 - K_2) \cdot h; \quad (1-66)$

$\lambda_1 = (K_1 + K_2)x; \quad (1-67) \quad P = \frac{K_2}{K_1}; \quad (1-68)$

$K_1 = K_m \cdot \frac{1}{v_m}; \quad (1-69) \quad K_m = \beta \frac{L_m}{f_m}. \quad (1-70)$

მიღებული კინეტიკური ფორმულები (1-61)-(1-70) შეიძლება წარმატებით გამოვიყენოთ მასაგადაცემის პროცესების მათემატიკური მოდელირებისა და იდენტიფიკაციის მიზნით. მასაგადაცემის პროცესის მოდელირების განზოგადებული ამოცანის კომპიუტერული ამოხსნის ნიმუში წარმოდგენილია ნახ. 2 და ნახ. 3-ზე. მასაგადაცემის მოდელირების შემთხვევაში პარამეტრები უნდა შეიცვალოს შესაბამისი სიდიდეებით, როგორც ეს აღნიშნული იყო ზემოთ.

2.1.5. თბოგადაცემის პროცესის მოდელირება და იდენტიფიკაცია.

ანალიზური კვლევის შედეგად მიღებული თეორიული ფორმულებისა და ცნობილი განტოლებების საფუძველზე დამუშავებულია შესაბამისი მათემატიკური და პროგრამული უზრუნველყოფა ეგმ-ისათვის. პროგრამული პაკეტი ითვალისწინებს იდენტიფიკაციის, მოდელირების და

მართვის საკითხების გადაჭრას. დამუშავებული მათემატიკური და პროგრამული უზრუნველყოფა (მპუ) შეიძლება გამოყენებული იქნეს თბური პროცესების სხვადასხვა შინაარსის ავტომატიზებული სისტემების განხორციელების დროს, იგულისხმება ინფორმაციული სისტემა, ტექნოლოგიური პროცესების მართვის სისტემა. დამუშავებული მპუ-ს გამოყენებით შეიძლება განვახორციელოთ აგრეთვე სპეციალური სასწავლო ტრენაჟორული სისტემა თბოენერგეტიკული დანადგარების თბოგადაცემის პროცესების მოდელირების, იდენტიფიკაციისა და მართვის ამოცანების შესწავლის მიზნით. ეს პროგრამები დიდ დახმარებას გაუწევს ოპერატორებსა და მომსახურე პერსონალს.

პროგრამა ითვალისწინებს მოძრავი ორფაზიანი თბოგადამტანი ნაკადების აგრეგატულ მდგომარეობას და მიმართულებას თბოენერგეტიკულ დანადგარებში. ამისათვის საკმარისია, დიალოგიური რეჟიმის დასაწყისში, ეგმ-ის ელექტრონულ ცხრილში შეყვანილი იქნეს შესაბამისი ინფორმაცია ფაზათა მდგომარეობის შესახებ (p_i , C_i , λ_i) და თბომცვლელის კონსტრუქციული მონაცემები (D , H , $n...$) პირდაპირი და შებრუნებული ამოცანების ამოხსნის შედეგად დამუშავებული მათემატიკური და პროგრამული უზრუნველყოფა მინიმალური საწყისი ინფორმაციის საფუძველზე საშუალებას იძლევა გავიანგარიშოთ თბოგადაცემის კოეფიციენტის (K), თბოგადაცემის სიჩქარის კონსტანტის (K_m), თბოგადაცემის ინტენსივობის კრიტერიუმის (I), ფაზათა რაოდენობის შეფარდების კოეფიციენტის (P), თბური და ჰიდროდინამიკური კრიტერიუმების (Re , Nu , Ee , Fu , Γ) რიცხვითი მნიშვნელობები. აგრეთვე ტემპერატურების $t_m(x)$, $t_s(x)$ განაწილება m და s ფაზებში და თბური პროცესისათვის სხვა მახასიათებელი პარამეტრები.

პროგრამის დიალოგიური რეჟიმი მომხმარებელს საშუალებას აძლევს განახორციელოს მიზანდასახული გამოთვლითი ექსპერიმენტი თბოგადაცემის პროცესების ანალიზის, მოდელირების, იდენტიფიკაციის, დაპროექტების და მართვის მიზნით. თბური პროცესების მათემატიკური

მოდელირების შედეგად მიღებული გამოთვლითი ინფორმაცია მიეწოდება ოპერატორს კინეტიკური მრუდების სახით ტემპერატურების განაწილების შესახებ და ცხრილის სახით გაანგარიშებული პარამეტრების რიცხვითი მნიშვნელობებით. დამუშავებული მათემატიკური და პროგრამული უზრუნველყოფა დანერგილია სტაბილური იზოტოპების სამეცნიერო-საკვლევო ინსტიტუტში (ქ.თბილისი), გამოყენებულია საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის სასწავლო პროცესში. და რეგისტრირებულია ალგორითმებისა და პროგრამების სახელმწიფო ფონდში (რეგ. ნომერი 5090000870 და 5090000871) იხილეთ დანართი 3.3, 3.6 და 3.7.

ნახ. 2 და ნახ. 3-ზე წარმოდგენილია მანქანური ამონაბეჭდის ნიმუში. ნახაზებზე წარმოდგენილია თბოგადაცემის პროცესის შედეგად მოძრავ ორფაზიან თბოგადამტან ნაკადებს შორის თბოდანადგარის სიგრძის (სიმაღლის) გასწვრივ ტემპერატურის ცვლილების კინეტიკური მრუდები წინაღდგენითი (ნახ. 2) და პირდაპირდგენითი (ნახ. 3) ნაკადების შემთხვევაში, როდესაც თბომცვლელ დანადგარში განხორციელებულია წინაღდგენითი ან თანმხვედრი ნაკადების რეჟიმი. თბოგადაცემის პროცესის მოდელირების შედეგად მიღებული ტემპერატურების ცვლილების კინეტიკური მრუდები შეესაბამება იმ ექსპერიმენტულ მონაცემებს, რომლის იდენტიფიკაცია არის განხორციელებული თბოდანადგარში.

თბოგადაცემის პროცესის იდენტიფიკაციის მეთოდის ითვალისწინებს პირდაპირი და შებრუნებული ამოცანის გადაწყვეტას. პირდაპირი ამოცანის მოდელირების შემთხვევაში ოპერატორმა საჭიროა შეიყვანოს გამომთვლელ მანქანაში: ტემპერატურების საწყისი მნიშვნელობები $t_{m,o}, t_{s,o}$, ფაზათა რაოდენობების მნიშვნელობები G_m, G_s ან ფაზათა მოცულობითი ხარჯის მნიშვნელობები V_m, V_s და ფაზათა შესაბამისი სიმკვრივის მნიშვნელობები ρ_m, ρ_s . ამ მონაცემების მიხედვით შესაბამისი პროგრამული უზრუნველყოფის საფუძველზე გამოითვლება ფაზათა შეფარდების კოეფიციენტი $P = G_s / G_m = V_s \rho_s / V_m \rho_m$.

მათემატიკური მოდელირების შედეგად შეიძლება გამოვიანგარიშოთ აგრეთვე (1-55), (1-56) ფორმულების გამოყენებით. ფაზათა შეფარდების კოეფიციენტი P , ფაზათა საწყისი და საბოლოო ტემპერატურების მიხედვით. (1-47)-(1-50) ფორმულების გამოყენებით ოპერატორს შეუძლია განსაზღვროს თბოგადაცემის კოეფიციენტის K -ს მნიშვნელობა, (1-51)-(1-52) ფორმულებით ფაზათა ნაკადების საშუალო ინტეგრალური ტემპერატურათა სხვაობა Δt , (1-51)-(1-52) ფორმულებით თბოგადაცემის ინტენსივობის ახალი მახასიათებელი კრიტერიუმი I . თბოდანადგარის ძირითადი თბოტექნიკური მახასიათებლების კერძოდ, დანადგარის თბოგადაცემის ზედაპირი S , სიგრძე ან სიმაღლე H , მილაკების რაოდენობა n და დიამეტრი d .

პროგრამული პაკეტი თეორიული ფორმულების (1-29)-(1-46) გამოყენებით საზღვრავს და უზრუნველყოფს ტემპერატურების ცვლილებას თბოდანადგარის სიგრძის ან სიმაღლის მიხედვით და აგებს შესაბამისს კინეტიკურ მრუდებს. პირდაპირი ამოცანის მოდელირება საშუალებას გვაძლევს მოვახდინოთ სწრაფი პროგნოზირება თუ რა ტემპერატურების მნიშვნელობები ჩამოყალიბდება თბოდანადგარის გამოსასვლელზე და ეს გაანგარიშებული მნიშვნელობები შევადაროთ დავალებულ რეჟიმს. თუ განთანხმება დავალებულ და გაანგარიშებულ რეჟიმებს შორის მინიმალურია და დასაშვებია. ამ შემთხვევაში იდენტიფიკაციის ამოცანა შესრულებულია. თუ განთანხმების სიდიდე დასაშვებ ფარგლებს გასცილდა ამ შემთხვევაში ოპერატორს შეუძლია შეცვალოს ფაზათა შეფარდების კოეფიციენტის P -ს მნიშვნელობა ან დააზუსტოს თბოგადაცემის კოეფიციენტის K -ს რიცხვითი მნიშვნელობა (1-47)-(1-50) ფორმულების გამოყენებით. თბოგადაცემის კოეფიციენტის K -ს რიცხვითი მნიშვნელობის დაზუსტება კი შებრუნებული ამოცანის მოდელირების მეთოდს მიეკუთვნება.

წინაღდენითი ნაკადი

პარამეტრების საწყისი მნიშვნელობების კრებითი ცხრილი

$P_m=980.00$ $c_m=4190$ $r_m=3.50E-04$ $V_m=3.45E-04$ $G_m=0.34$
 $p_s=1.29$ $c_s=1010$ $r_s=1.00E-07$ $V_s=1.56$ $G_s=2.02$
 $U_{m0}=90$ $U_{mk}=60$ $U_{s0}=20$ $U_{sk}=40$

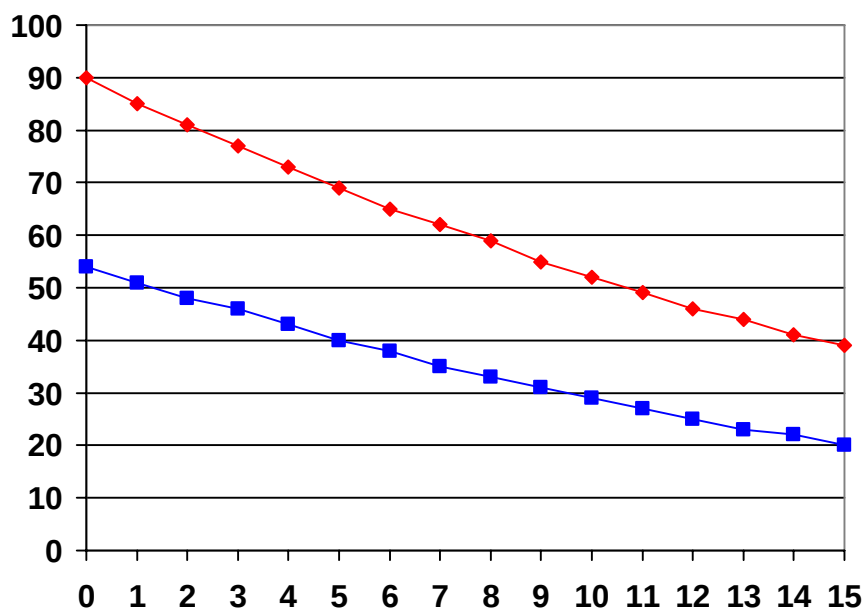
დანადგარის კონსტრუქციული მონაცემებთან კრებითი ცხრილი

$D_m=2.50E-02$ $F_m=3.40E-04$ $L_m=7.85E-02$ $H=15$ $n=62$ $F=25$ $X=0.67$ $dh=1.00$

განგარიშებული პარამეტრების კრებითი ცხრილი

$P=1.5$ $P_g=1.4$ $K=38$ $K_m=2.13E-03$ $V_m=1.13E-02$ $\alpha=1.63E-07$
 $dU=45$ $Q=4.08E+04$ $F_g=24$ $dF=0.99$ $dF\%=4$ $t_{mk}=39$ $t_{sk}=54$

X	Tm (x)	Ts (x)
0.00E+00	9.00E+01	5.40E+01
1.00E+00	8.50E+01	5.10E+01
2.00E+00	8.10E+01	4.80E+01
3.00E+00	7.70E+01	4.60E+01
4.00E+00	7.30E+01	4.30E+01
5.00E+00	6.90E+01	4.00E+01
6.00E+00	6.50E+01	3.80E+01
7.00E+00	6.20E+01	3.50E+01
8.00E+00	5.90E+01	3.30E+01
9.00E+00	5.50E+01	3.10E+01
1.00E+01	5.20E+01	2.90E+01
1.10E+01	4.90E+01	2.70E+01
1.20E+01	4.60E+01	2.50E+01
1.30E+01	4.40E+01	2.30E+01
1.40E+01	4.10E+01	2.20E+01
1.50E+01	3.90E+01	2.00E+01



ნახ. 2 ორფაზიან მოძრავ თბოგადამტან ნაკადებს შორის ტემპერატურების ცვლილების მახასიათებელი კინეტიკური მრუდები თბოენერგეტიკულ დანადგარებში წინაღდენითი ნაკადების შემთხვევაში.

პირდაპირდენითი ნაკადი

პარამეტრების საწყისი მნიშვნელობების კრებითი ცხრილი

Pm=980.00 Cm=4190 rm=3.50E-04 Vm=3.45E-04 Gm=0.34
 ps=1.29 cs=1010 rs=1.00E-07 Vs=1.56 Gs=2.02
 Umo=90 Umk=60 Uso=20 Usk=40

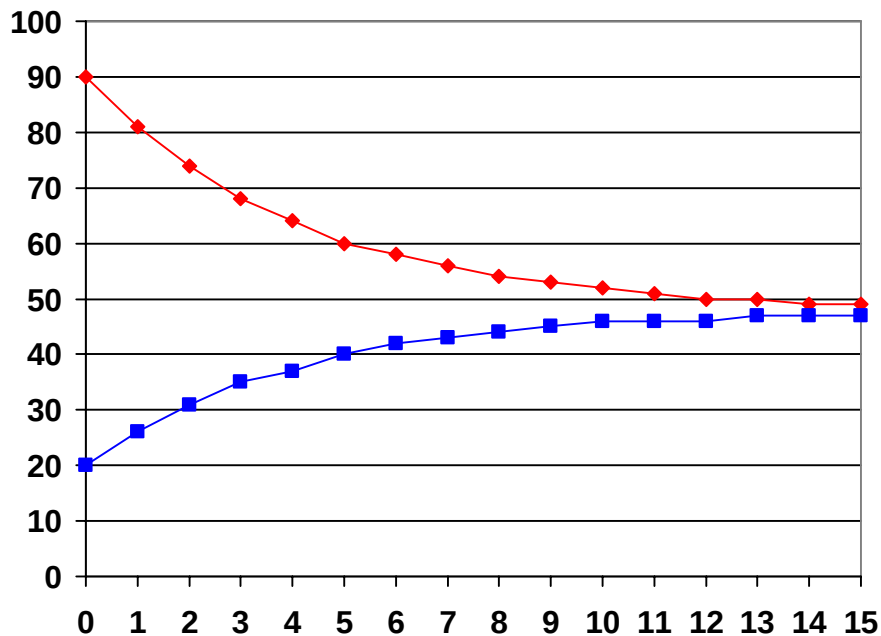
დანადგარის კონსტრუქციული მონაცემებთან კრებითი ცხრილი

Dm=2.50E-02 Fm=3.40E-04 Lm=7.85E-02 h=15 n=62 F=25 X=0.67 dh=1.00

განგარიშებული პარამეტრების კრებითი ცხრილი

P=1.5 Pg=1.4 K=43 Km=2.13E-03 Vm=1.14E-02 α=1.63E-07
 dU=40 Q=4.08E+04 Fg=24 dF=1.13 dF%=5 t_{mk}=49 t_{sk}=47

X	Tm (x)	Ts (x)
0.00E+00	9.00E+01	2.00E+01
1.00E+00	8.10E+01	2.60E+01
2.00E+00	7.40E+01	3.10E+01
3.00E+00	6.80E+01	3.50E+01
4.00E+00	6.40E+01	3.70E+01
5.00E+00	6.00E+01	4.00E+01
6.00E+00	5.80E+01	4.20E+01
7.00E+00	5.60E+01	4.30E+01
8.00E+00	5.40E+01	4.40E+01
9.00E+00	5.30E+01	4.50E+01
1.00E+01	5.20E+01	4.60E+01
1.10E+01	5.10E+01	4.60E+01
1.20E+01	5.00E+01	4.60E+01
1.30E+01	5.00E+01	4.70E+01
1.40E+01	4.90E+01	4.70E+01
1.50E+01	4.90E+01	4.70E+01



ნახ. 3 ორფაზიან მოძრავ თბოგადამტან ნაკადებს შორის ტემპერატურების ცვლილების მახასიათებელი კინეტიკური მრუდები თბოენერგეტიკულ დანადგარებში პირდაპირდენითი ნაკადების შემთხვევაში.

შებრუნებული ამოცანის მოდელირების შემთხვევაში, ოპერატორს შესაძლებლობა აქვს გაიანგარიშოს, როგორც თბოგადაცემის კოეფიციენტი K , ასევე თბოგადაცემის სიჩქარის კონსტანტა (K_m), თბოგადაცემის ინტენსივობის კრიტერიუმი (I), შესაბამისი თეორიული ფორმულების (1-43), (1-44) და (1-53), (1-54) მიხედვით. მიღებული ინფორმაციის საფუძველზე ოპერატორს ეძლევა საშუალება აღნიშნული კოეფიციენტების რიცხვითი მნიშვნელობების ანალიზის შედეგად დაადგინოს თბოენერგეტიკული დანადგარის საექსპლუატაციო რესურსი. მიმდინარე პროცესის შეფასებისათვის ოპერატორს შეუძლია გამოიყენოს აგრეთვე ჰიდროდინამიკური კრიტერიუმების (Re , Nu , Ee , Fu , Γ) რიცხვითი მნიშვნელობები.

ანალიზის შედეგად ოპერატორი იღებს შესაბამის გადაწყვეტილებას. თბოგადაცემის პროცესის ანალიზის, იდენტიფიკაციისა და მოდელირების განხილული მეთოდიკა შეიძლება გამოვიყენოთ მასაგადაცემის პროცესებისათვის და შესაბამისი აპარატებისათვის (1-61)-(1-70) ფორმულების მიხედვით. მათემატიკური ანალიზური კვლევის შედეგად მიღებული ფორმულების და მართვის ობიექტის დინამიკური და ექსტრემალური მახასიათებლების საფუძველზე დამუშავებულია თბოენერგეტიკულ დანადგარებში ორფაზიან მოძრავ თბოგადამტან ნაკადებს შორის სითბოგადაცემის პროცესის მათემატიკური მოდელირების, ანალიზის, იდენტიფიკაციის, პროგნოზირებისა და მართვის ახალი მეთოდები.

კომპიუტერული ამონაბეჭდის ფრაგმენტი (ნახ. 2 და ნახ. 3) იძლევა გარკვეულ წარმოდგენას და ინფორმაციას დამუშავებული მათემატიკური და პროგრამული უზრუნველყოფის შესაძლებლობის შესახებ. პირდაპირი და შებრუნებული მათემატიკური ამოცანების ამოხსნის ალგორითმი ოპერატორს აძლევს საშუალებას განახორციელოს თბოენერგეტიკულ დანადგარებში მიმდინარე თბური პროცესების მათემატიკური მოდელირებისა და მართვის ამოცანები, რომლებიც დამახასიათებელია

ავტომატიზებული სისტემებისათვის. დამუშავებული მათემატიკური და პროგრამული უზრუნველყოფა თანამედროვე კომპიუტერული ტექნიკის გამოყენებით საშუალებას იძლევა თბური პროცესების მათემატიკური მოდელირებისა და მართვის ავტომატიზებული სისტემები გახადოს მოქნილი და ცვალებადი სტრუქტურის კონკრეტული ამოცანების შესაბამისად. სადისერტაციო ნაშრომში განხილული თბური პროცესების გაანგარიშების, იდენტიფიკაციის, მოდელირებისა და მართვის შემოთავაზებული მეთოდები დანერგილია მრეწველობის სხვადასხვა სფეროში იხილეთ დანართი 2.6. და 2.7. დამუშავებული მათემატიკური და პროგრამული უზრუნველყოფა რეგისტრირებულია ალგორითმებისა და პროგრამების სახელმწიფო ფონდში.(იხ. დანართი 3.6, 3.7)

დისერტაციის დანართ 3.3-ში წარმოდგენილია კომპიუტერული მოდელირების მათემატიკური და პროგრამული უზრუნველყოფა Excel-ის პროგრამით.

2.2. მართვის არაწრფივი სისტემების დინამიკური მახასიათებლების მათემატიკური აღწერა და მოდელირება

2.2.1. მათემატიკური ამოცანის ჩამოყალიბება.

თბოენერგეტიკული დანადგარები მართვის თვალსაზრისით წარმოადგენს რთულ ინერციულ არაწრფივ დინამიკურ სისტემას. აღნიშნული კლასის სისტემების დინამიკური მახასიათებლების (გარდამავალი რეჟიმების) მათემატიკური აღწერისათვის გამოყენებულია ბერნულის არაწრფივი დიფერენციალური განტოლება[63, 64]:

$$A(x)\frac{dy}{dx} + B(x)y = C(x)y^n; \quad n < 1. \quad (2-1)$$

(2-1) განტოლების საფუძველზე განხორციელებულია არაწრფივი დინამიკური სისტემის ანალიზი, პირველ რიგში თბოენერგეტიკული

დანადგარის მაგალითზე. y -ფუნქცია წარმოდგენილია ტემპერატურის (t) სახით, რომელიც იცვლება დროში ($x \equiv \tau$) თბოენერგეტიკულ დანადგარის გამოსასვლელზე ან მის ნებისმიერ კვეთში, სადაც მიზანშეწონილია ტემპერატურის მნიშვნელობის რეგულირება ან მართვა დავალებულ დონეზე. ჩვენ შემთხვევისათვის განტოლება (2-1) წარმოდგენილია შემდეგი სახით:

$$A(\tau) \frac{dt}{d\tau} = C(\tau)t^n - B(\tau)t; \quad (2-2) \quad \text{ან} \quad \frac{dt}{d\tau} = K_1 \cdot t^n - K_2 \cdot t; \quad (2-3)$$

სადაც

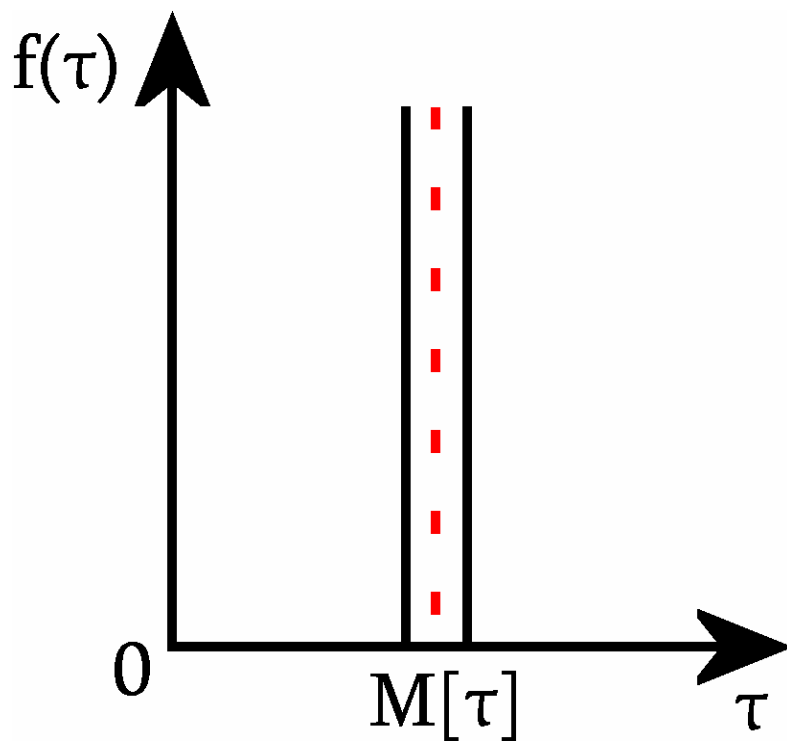
$$K_1 = \frac{C(\tau)}{A(\tau)}; \quad (2-4) \quad K_2 = \frac{B(\tau)}{A(\tau)}. \quad (2-5)$$

განტოლება (2-3) აღწერს ტემპერატურის ცვლილებას დროში არაწრფივ დინამიკურ სისტემაში. კოეფიციენტები K_1 და K_2 თავისი ფიზიკური არსით და განზომილებით $[1/\text{წმ}]$ შეესაბამება დინამიკურ არაწრფივ სისტემებში მიმდინარე პროცესების სიჩქარის კონსტანტას. ჩვენ შემთხვევაში მოძრავ ორფაზიან თბოგადამტან ნაკადებს შორის თბოგადაცემის პროცესის სიჩქარის კონსტანტას. იმ შემთხვევაში, როდესაც (2-3) განტოლების წევრი $K_2 \cdot t = 0$, არაწრფივი დიფერენციალური განტოლება (2-3) იღებს შემდეგ სახეს:

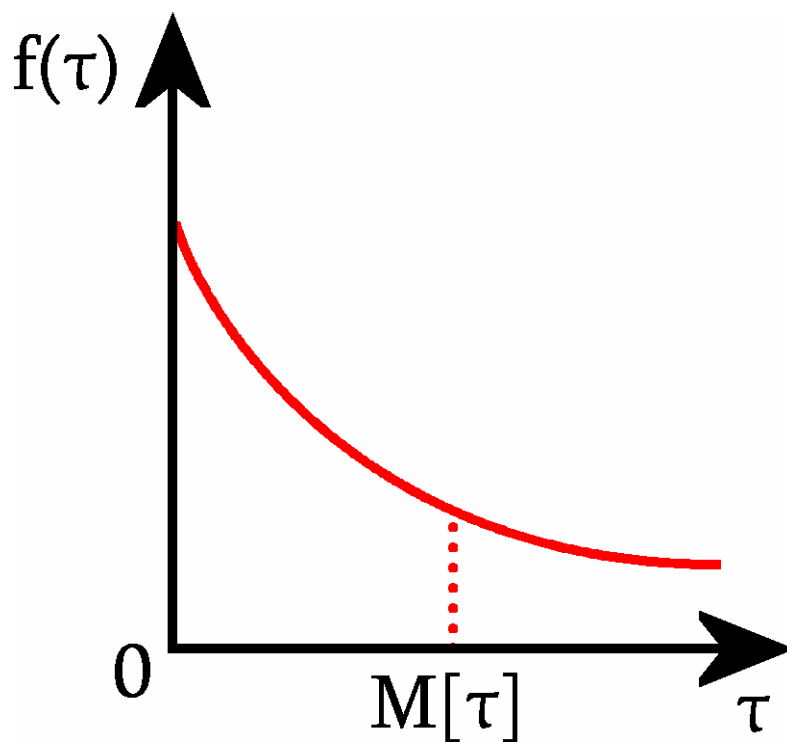
$$\frac{dt}{d\tau} = K_1 \cdot t^n. \quad (2-6)$$

(2-6) განტოლება აღწერს დინამიკური სისტემების გარკვეულ კლასს, ე.წ. ასტატიკურ ობიექტებს. ამ კლასის დინამიკური სისტემებისათვის დამახასიათებელია სარეგულირებელი პარამეტრის-ტემპერატურის სწრაფი ზრდა შემფოთების შემთხვევაში და მისი მისწრაფება უსასრულობისკენ. ამის მკაფიო მაგალითებია პროცესები, რომლებიც დაკავშირებულია აფეთქებებთან და თერმო-ბირთვულ რეაქციებთან. განტოლება (2-3) და (2-

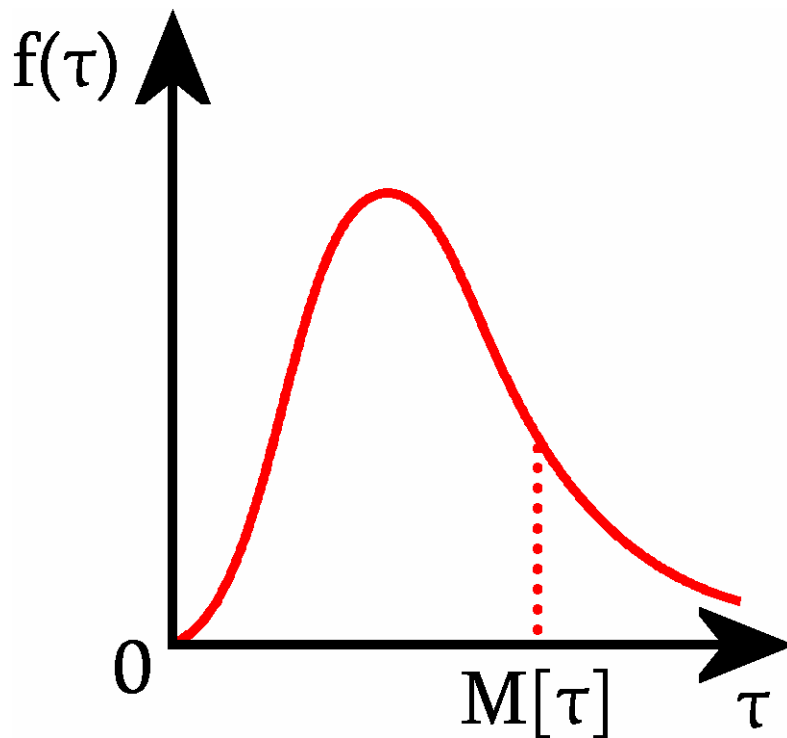
6)-ის არაწრფივობის განმსაზღვრელი სიდიდე „n“ მიუთითებს დინამიკური სისტემის ინერციულობაზე და მასში მიმდინარე კონკრეტული პროცესის დამახასიათებელი პარამეტრის (ტემპერატურის) განვითარების ინტენსიურობაზე. ჩვენ შემთხვევაში „n“-ის რიცხვითი მნიშვნელობა განაპირობებს და ახასიათებს ტემპერატურის ცვლილებას- ტემპერატურის ზრდის სიჩქარეს, მის ინტენსიურობას დროში. (2-3) განტოლების სტრუქტურა ასახავს რთულ არაწრფივ დინამიკურ სისტემებს, როგორცაა თბოენერგეტიკული დანადგარები და სხვა ინერციული სისტემები. აღნიშნულ დანადგარებში მიმდინარე ტექნოლოგიური პროცესების კვლევისა და ანალიზის საფუძველზე შეიძლება დავასკვნათ, რომ დანადგარის ინერციულობა, მისი არაწრფივობა დამოკიდებულია ჰიდროდინამიკური ნაკადების სტრუქტურაზე, რომელიც განხორციელებულია ამა თუ იმ კონსტრუქციის დანადგარში. ჰიდროდინამიკური ნაკადების სტრუქტურის განაწილების ფუნქცია გარკვეული სიზუსტით განსაზღვრავს ტექნოლოგიური დანადგარის დინამიკურ თვისებებს. ამ თვალსაზრისით საგულისხმოა მხედველობაში მიღებულ იქნეს ტექნოლოგიური დანადგარების კლასიფიკაცია ჰიდროდინამიკური ნაკადების სტრუქტურის მიხედვით. კერძოდ, მათი წარმოდგენა „იდეალური შერევის“ (ი.შ.), „იდეალური გამოძევების“ (ი.გ.) და „რეალური შერევის“ (რ.შ.) მოდელების შესაბამისად [45,46]. მათემატიკურად დამტკიცებულია, რომ ი.შ მოდელის შემთხვევაში პარამეტრი $n=0$. ი.გ. მოდელის შემთხვევაში $n=1/2$ რ.შ. მოდელებისათვის $n=2/3$ [51] ნახ. 4 – ნახ. 6 წარმოდგენილია ჰიდროდინამიკური ნაკადების სტრუქტურის ძირითადი მოდელების განაწილების ფუნქციების დინამიკური მახასიათებლები, რომლებიც მიღებულია ინდიკატორული მეთოდით [45].



ნახ. 4 "იდეალური გამოძევების" (ი.გ.) მოდელის ჰიდროდინამიკური ნაკადების სტრუქტურის განაწილების ფუნქცია



ნახ. 5 "იდეალური შერევის" (ი.შ.) მოდელის ჰიდროდინამიკური ნაკადების სტრუქტურის განაწილების ფუნქცია.



ნახ. 6 "რეალური შერევის" (რ.შ.) მოდელის ჰიდროდინამიკური ნაკადების სტრუქტურის განაწილების ფუნქცია

ნახ. 4 - ნახ. 6 წარმოდგენილია ჰიდროდინამიკური ნაკადების სრუქტურის ძირითადი მოდელების დამახასიათებელი განაწილების ფუნქციები - დინამიკური მახასიათებლები, კერძოდ: ა) "იდეალური" გამოტუმბვის მოდელი (ნახ. 4); ბ) "იდეალური" შერევის მოდელი (ნახ. 5); გ) "რეალური" შერევის მოდელი (ნახ. 6). შეიძლება განხორციელდეს ბერნულის დიფერენციალური განტოლების ამოხსნის შედეგად თუ გავითვალისწინებთ ჰიდროდინამიკის ნაკადების სტრუქტურის კლასიფიკაციის ძირითადი მოდელების n ფაქტორის დადგენილ რიცხვით მნიშვნელობებს, კერძოდ "იდეალურ გამოძევების" მოდელისათვის $n=0$; "იდეალურ შერევის" მოდელისათვის $n=1/2$; "რეალური შერევის" მოდელისათვის $n=2/3$.

ექსპერიმენტული განაწილების ფუნქციის სპეციალური მათემატიკური დამუშავებისათვის საჭიროა განისაზღვროს დანადგარის ძირითადი სტატისტიკური მახასიათებლები. კერძოდ, მათემატიკური ლოდინი $M[\tau]$, დისპერსია $D[\tau]$ და საჭიროების შემთხვევაში სხვა

სტატისტიკური მახასიათებლები. მათემატიკური ლოდინის მნიშვნელობის დადგენა საშუალებას იძლევა განისაზღვროს პროცესის მიმდინარეობის ხანგრძლივობა მართვის ობიექტში (თბოგადამცემ დანადგარში). ჩვენ შემთხვევაში, ამ მონაცემის მიხედვით ტემპერატურული რაჟიმის მნიშვნელობების მათემატიკური მოდელირების დროს თბოგადამცემ დანადგარებში ოპერატორს საშუალება ეძლევა ზუსტად განსაზღვროს ტემპერატურების მნიშვნელობები თბოდანადგარის გამოსასვლელზე m და s ფაზებში. (იხ. დისერტაციის 2.15. ნაწილი, ნახ. 2 და ნახ. 3).

აღნიშნული ამოცანების გადაჭრის მიზნით ქვემოთ განხილულია ბერნულის დიფერენციალური განტოლების ამოხსნები და მათი გამოყენება არაწრფივი სტატიკური და ასტატიკური დინამიკური სისტემის მათემატიკური მოდელირების, იდენტიფიკაციის, ანალიზისა და სინთეზის ამოცანების გადაჭრისათვის.

2.2.2. მათემატიკური ამოცანის ანალიზური ამოხსნა

(2-3) და (2-6) განტოლებების საფუძველზე სასაზღვრო ამოცანების ჩამოყალიბებისა და ანალიზური ამოხსნებისათვის მიღებულია შემდეგი პირობები:

ასტატიკური დინამიკური სისტემისათვის სასაზღვრო ამოცანას აქვს შემდეგი სახე:

$$\frac{dt}{d\tau} = K_1 \cdot t^n; \quad (2-7) \quad t|_{\tau=0} = t_0. \quad (2-8)$$

ჩამოყალიბებულ სასაზღვრო ამოცანას (2-7), (2-8)-ს აქვს შემდეგი ამოხსნები:

-იდეალურ შერევის მოდელის შემთხვევაში $n=0$

$$t = t_0 + K_1 \tau. \quad (2-9)$$

-იდეალური გამოდევნის მოდელის შემთხვევაში $n=1/2$

$$t = \left(t_0^{1/2} + \frac{1}{2} K_1 \tau \right)^2. \quad (2-10)$$

-რეალური შერევის მოდელის შემთხვევაში $n=2/3$

$$t = \left(t_0^{1/3} + \frac{1}{3} K_1 \tau \right)^3. \quad (2-11)$$

ზოგადად ასტატისკური არაწრფივი დინამიკური სისტემისათვის გარდამავალი პროცესების განვითარების მათემატიკური მოდელი გამოისახება შემდეგი ფორმულით:

$$\omega(\tau) = \left(\omega_0^{1/m} + \frac{K}{m} \tau \right)^m \quad (2-12)$$

სადაც: $\omega(\tau)$ -არის სარეგულირო პარამეტრის განვითარების ალბათობა დროში, რომელიც ტემპერატურის ცვლილების შემთხვევაში შეიძლება გამოისახოს შემდეგი თანაფარდობით . $\omega(\tau) = t / t_{\max}$.

სტატისკური დინამიკური სისტემებისათვის სასაზღვრო ამოცანას აქვს შემდეგი სახე:

$$\frac{dt}{d\tau} = K_1 \cdot t^n - K_2 \cdot t; \quad (2-13)$$

$$t|_{\tau=0} = t_0; \quad (2-14) \quad t|_{\tau \rightarrow \infty} = t_{\max}. \quad (2-15)$$

ჩამოყალიბებულ სასაზღვრო ამოცანას (2-12)-(2-14) აქვს შემდეგი ამოხსნა:

$$t = \frac{k_1}{k_2} \cdot t_{\max} \left[l - b \exp\left(-\frac{K_1}{m} \tau\right) \right]^m, \quad (2-16)$$

სადაც

$$b = 1 - (t_0 / t_{\max})^{1/m}, \quad (2-17) \quad m = \frac{1}{1-n}. \quad (2-18)$$

t , t_0 , $t_{\max}$ -მიმდინარე, საწყისი და მაქსიმალური ტემპერატურის მნიშვნელობებია შესაბამისად. სასაზღვრო ამოცანის (2-13)-(2-15) ანალიზური ამოხსნა მოცემულია დანართ 3.4-ში.

მიღებული ამოხსნები, რომლებიც წარმოდგენილია წრფივი, მაჩვენებლიანი და ექსპონენციალური ფუნქციებით, გვაძლევს ინფორმაციას ტემპერატურის ცვლილების შესახებ დროში გამოწვეულს „შეშფოთების“ შედეგად სხვადასხვა ტიპის დინამიკურ სისტემაში. მიღებული თეორიული ფორმულების (2-9), (2-10), (2-12), (2-16) გამოყენებით შესაძლებელია მათემატიკური მოდელირების გზით მოვახდინოთ მართვის ობიექტის გარდამავალი პროცესების განვითარების პროგნოზირება და შესაბამისი ანალიზის შედეგად განვახორციელოთ ტექნოლოგიური პროცესის ოპტიმალური მართვა.

ზოგადად სტატიკური არაწრფივი დინამიკური სისტემისათვის გარდამავალი პროცესების განვითარების მათემატიკური მოდელი გამოისახება შემდეგი ფორმულით:

$$\omega(\tau) = \left[1 - b \exp\left(-\frac{K}{m}\tau\right) \right]^m \quad (2-19)$$

სტატიკური არაწრფივი დინამიკური სისტემისათვის ”უარყოფითი შეშფოთების” შემთხვევაში გარდამავალი პროცესების განვითარების მათემატიკური მოდელი წარმოდგენილია შემდეგი ფორმულით:

$$W(\tau) = 1 - \left[1 - b \exp\left(-\frac{K}{m}\tau\right) \right]^m \quad (2-20)$$

სტატიკური არაწრფივი დინამიკური სისტემის გარდამავალი რეჟიმის სიჩქარის განსაზღვრის მათემატიკური მოდელი:

$$\frac{d\omega}{d\tau} = \frac{Kb}{m} \exp\left(-\frac{K}{m}\tau\right) \left[1 - b \exp\left(-\frac{K}{m}\tau\right) \right]^{m-1} \quad (2-21)$$

ფუნქცია $\omega(\tau)$ ზოგადად ახასიათებს სარეგულირო სიდიდის ცვლილებას (განვითარებას) მართვის სისტემაში. როგორც ზემოთ იყო აღნიშნული ფუნქცია $\omega(\tau) = t/t_{\max}$ შეიძლება წარმოვადგინოთ ტემპერატურათა მნიშვნელობების შეფარდებით, ქიმიური რეაქციების და ფაზათა გარდაქმნის პროცესებისათვის კონცენტრაციათა შეფარდებით $c/c_{\max}$ ან წნევათა შეფარდებით $p/p_{\max}$. შრობის პროცესის იდენტიფიკაციის შემთხვევაში, რომელიც ასევე მიეკუთვნება ფაზათა გარდაქმნის პროცესების კლასს, ფუნქცია $\omega(\tau)$ გამოისახება საშრობი მასალის ტენზომცველობათა შეფარდებით $w/w_{\max}$. ფორმულები (2-18)-(2-21) გამოყენებული იქნება ჩამოთვლილი პროცესების კინეტიკისა და დინამიკის იდენტიფიკაციისა და ანალიზის მიზნით.

არაწრფივი სტატიკური სისტემების დინამიკური ექსტრემალური მახასიათებლების მოდელირების, ანალიზისა და სინთეზის მიზნით მიზანშეწონილია (2-19) ფორმულის მიხედვით ჩამოვაცალიბოთ n რიგის წარმოებულების განტოლებები $m=1,2,3$. ფაქტორებისათვის.

2.2.3. არაწრფივი სტატიკური სისტემების დინამიკური ექსტრემალური მახასიათებლები

სტატიკური არაწრფივი დინამიკური სისტემების ექსტრემალური მახასიათებლების საანგარიშო ფორმულების მისაღებად (2-20) ფორმულის საფუძველზე ჩამოვაცალიბებულია n რიგის წარმოებულების ზოგადი განტოლებები $m=3,2,1$ ფაქტორისათვის.

$m=3$ ფაქტორისათვის ჩამოვაცალიბებულ n რიგის წარმოებულების ზოგად განტოლებას აქვს შემდეგი სახე:

$$\omega^n = C(-1)^{n+1} 3b \left(\frac{K}{3}\right)^n \exp\left(-\frac{K\tau}{3}\right) \left[1 - 2^n b \exp\left(-\frac{K\tau}{3}\right) + 3^{n-1} b^2 \exp\left(-\frac{2K\tau}{3}\right) \right] \quad (2-22)$$

$m=2$ ფაქტორისათვის ჩამოყალიბებულ n რიგის წარმოებულების ზოგად განტოლებას აქვს შემდეგი სახე:

$$\omega^n = C(-1)^{n+1} 2b \left(\frac{K}{2}\right)^n \exp\left(-\frac{K\tau}{2}\right) \left[1 - 2^{n-1} b \exp\left(-\frac{K\tau}{2}\right)\right] \quad (2-23)$$

$m=1$ ფაქტორისათვის ჩამოყალიბებულ n რიგის წარმოებულების ზოგად განტოლებას აქვს შემდეგი სახე:

$$\omega^n = C(-1)^{n+1} b(K)^n \exp(-K\tau) \quad (2-24)$$

n რიგის წარმოებულების საფუძველზე მიღებული ფორმულების გამოყენებით დამუშავებულია არაწრფივი სტატიკური სისტემების დინამიკური ექსტრემალური მახასიათებლების მოდელირების, ანალიზისა და სინთეზის ახალი მეთოდები.

(2.22) განტოლების მიხედვით $m=3$ ფაქტორისათვის წარმოვადგინოთ $n=1$ - დან $n=6$ -ის ჩათვლით წარმოებულების საანგარიშო განტოლებები.

პირველი რიგის წარმოებული $n=1$

$$\omega^I = C(-1)^2 3b \left(\frac{K}{3}\right) \exp\left(-\frac{K\tau}{3}\right) \left[1 - 2b \exp\left(-\frac{K\tau}{3}\right) + 1b^2 \exp\left(-\frac{2K\tau}{3}\right)\right] \quad (2-25)$$

მეორე რიგის წარმოებული $n=2$

$$\omega^{II} = C(-1)^3 3b \left(\frac{K}{3}\right)^2 \exp\left(-\frac{K\tau}{3}\right) \left[1 - 2^2 b \exp\left(-\frac{K\tau}{3}\right) + 3b^2 \exp\left(-\frac{2K\tau}{3}\right)\right] \quad (2-26)$$

მესამე რიგის წარმოებული $n=3$

$$\omega^{III} = C(-1)^4 3b \left(\frac{K}{3}\right)^3 \exp\left(-\frac{K\tau}{3}\right) \left[1 - 2^3 b \exp\left(-\frac{K\tau}{3}\right) + 3^2 b^2 \exp\left(-\frac{2K\tau}{3}\right)\right] \quad (2-27)$$

მეოთხე რიგის წარმოებული $n=4$

$$\omega^{IV} = C(-1)^5 3b \left(\frac{K}{3}\right)^4 \exp\left(-\frac{K\tau}{3}\right) \left[1 - 2^4 b \exp\left(-\frac{K\tau}{3}\right) + 3^3 b^2 \exp\left(-\frac{2K\tau}{3}\right) \right] \quad (2-28)$$

მეხუთე რიგის წარმოებული $n=5$

$$\omega^V = C(-1)^6 3b \left(\frac{K}{3}\right)^5 \exp\left(-\frac{K\tau}{3}\right) \left[1 - 2^5 b \exp\left(-\frac{K\tau}{3}\right) + 3^4 b^2 \exp\left(-\frac{2K\tau}{3}\right) \right] \quad (2-29)$$

მეექვსე რიგის წარმოებული $n=6$

$$\omega^{VI} = C(-1)^7 3b \left(\frac{K}{3}\right)^6 \exp\left(-\frac{K\tau}{3}\right) \left[1 - 2^6 b \exp\left(-\frac{K\tau}{3}\right) + 3^5 b^2 \exp\left(-\frac{2K\tau}{3}\right) \right] \quad (2-30)$$

ფუნქციის წარმოებულების ექსტრემალური (მაქსიმუმების, მინიმუმების) მნიშვნელობების და შესაბამისი დროითი პერიოდების ხანგრძლივობის განსაზღვრისათვის შემოვიღოთ აღნიშვნა $y = b \exp\left(-\frac{K\tau}{3}\right)$. ექსტრემალური მნიშვნელობების განსაზღვრისათვის წარმოებულები (2.25-2.30) გავუტოლოთ ნულს, მივიღებთ:

პირველი რიგის წარმოებულისათვის $n=1$

$$\begin{aligned} \omega^I &= CKy_1[1 - 2y_1 + by_1^2] \text{ ვინაიდან } CKy_1 \neq 0 \text{ შეგვიძლია მივიღოთ, რომ} \\ [by_1^2 - 2y_1 + 1] &= 0 \end{aligned} \quad (2-31)$$

მეორე რიგის წარმოებულისათვის $n=2$

$$\omega^{II} = C \frac{K^2}{3} y_2 [1 - 4y_2 + by_2^2] \text{ ვინაიდან } C \frac{K^2}{3} y_2 \neq 0 \text{ შეგვიძლია მივიღოთ,}$$

რომ

$$[by_2^2 - 4y_2 + 1] = 0 \quad (2-32)$$

მესამე რიგის წარმოებულისათვის $n=3$

$$\omega^{iii} = C \frac{K^3}{9} y_3 [1 - 8y_3 + 9by_3^2]. \text{ ვინაიდან } C \frac{K^3}{9} y_3 \neq 0 \quad \text{შეგვიძლია}$$

მივიღოთ, რომ

$$[9by_3^2 - 8y_3 + 1] = 0 \quad (2-33)$$

მეოთხე რიგის წარმოებულისათვის $n=4$

$$\omega^{iv} = C \frac{K^4}{27} y_4 [1 - 16y_4 + 27by_4^2]. \text{ ვინაიდან } C \frac{K^4}{27} y_4 \neq 0, \text{ მივიღოთ, რომ}$$

$$[27by_4^2 - 16y_4 + 1] = 0 \quad (2-34)$$

მეხუთე რიგის წარმოებულისათვის $n=5$

$$\omega^v = C \frac{K^5}{81} y_5 [1 - 32y_5 + 81by_5^2]. \text{ ვინაიდან } C \frac{K^5}{81} y_5 \neq 0, \text{ მივიღოთ, რომ}$$

$$[81by_5^2 - 32y_5 + 1] = 0 \quad (2-35)$$

მექვსე რიგის წარმოებულისათვის $n=6$

$$\omega^{vi} = C \frac{K^6}{243} y_6 [1 - 64y_6 + 243by_6^2]. \text{ ვინაიდან } C \frac{K^6}{243} y_6 \neq 0, \text{ მივიღოთ, რომ}$$

$$[243by_6^2 - 64y_6 + 1] = 0 \quad (2-36)$$

მხედველობაში მივიღოთ, რომ $\omega(\tau)$ ფუნქციის პირველი წარმოებული აღწევს თავის მაქსიმალურ მნიშვნელობას მაშინ, როდესაც ფუნქციის $\omega(\tau)$ მეორე წარმოებული უდრის ნულს. მეორე წარმოებულის ექსტრემალური მნიშვნელობები შეიძლება განისაზღვროს მესამე წარმოებულის დახმარებით. მესამე წარმოებულის ექსტრემალური

მნიშვნელობები შეიძლება განისაზღვროს მეოთხე წარმოებულის დახმარებით და ა.შ. აღნიშნული მეთოდის გამოყენებულია ფუნქციის წარმოებულების ექსტრემალური მნიშვნელობების დადგენის მიზნით.

(2.31-2.36) წარმოებულებები წარმოადგენს კვადრატულ განტოლებებს. ჩავწეროთ ეს განტოლებები ზოგადი სახით:

$$Ay^2 - By + C = 0 \quad (2-37)$$

(2-37) კვადრატულ განტოლების ამოხსნას აქვს შემდეგი სახე:

$$y = \frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \quad (2-38)$$

(2.29-2.34) განტოლების ამოხსნის შედეგები წარმოდგენილია ცხრილი 1-ში.

ცხრილი 1 ექსტრემალური მახასიათებლების ამოხსნის შედეგები

m=3	y_1	y_2	y_3	y_4	y_5	y_6
y(+)	1	1	0.7377	0.5214	0.3608	0.2467
y(-)	1	1/3	0.1511	0.071	0.0342	0.01667

y(+) და y(-) რიცხვით მნიშვნელობები ჩავსვათ ჩვენს მიერ შემოტანილ აღნიშვნაში:

$$y = b \exp\left(-\frac{K\tau}{3}\right) \quad (2-39)$$

ამ შემთხვევაში ჩვენ შეიძლება განვსაზღვროთ შესაბამისი დროითი პერიოდები, რომლის დროს ფუნქციის წარმოებულების მნიშვნელობები აღწევენ ექსტრემალურ მნიშვნელობებს. მაგალითად y_2 -ის მნიშვნელობები 1 და 1/3 შევიტანოთ (2.37), რომელიც განსაზღვრულია τ -ს მიმართ:

$$\tau = \frac{3}{K} \ln \frac{b}{y} \quad (2-40)$$

(2-38) ფორმულაში y_2 -ის მნიშვნელობების ჩასმით, მივიღებთ: $y(+)$ -ისათვის $\tau(+)=0$; $y(-)$ -ისათვის $\tau(-)=3,2958 K^{-1}$. ჩვენ გამოთვლებში კოეფიციენტი $b=1$.

$$\tau(+)=\frac{3}{K}\ln\frac{1}{1}=0 \quad (2-41)$$

$$\tau(-)=\frac{3}{K}\ln\frac{1}{1/3}=3K^{-1}\ln 3=3K^{-1}1,0986=3,2958K^{-1} \quad (2-42)$$

ასეთივე მეთოდით y_3, y_4, y_5, y_6 მნიშვნელობებისათვის განსაზღვრულია დროითი პერიოდები $n=3, n=4, n=5, n=6$ წარმოებულებისათვის.

მესამე რიგის წარმოებულისათვის ($n=3$)

$$\tau(+)=0.912K^{-1} \quad (2-43) \quad \tau(-)=5.669K^{-1} \quad (2-44)$$

მეოთხე რიგის წარმოებულისათვის ($n=4$)

$$\tau(+)=1.9532K^{-1} \quad (2-45) \quad \tau(-)=7.9952K^{-1} \quad (2-46)$$

მეხუთე რიგის წარმოებულისათვის ($n=5$)

$$\tau(+)=3.058K^{-1} \quad (2-47) \quad \tau(-)=10.126K^{-1} \quad (2-48)$$

მექვსე რიგის წარმოებულისათვის ($n=6$)

$$\tau(+)=4.1987K^{-1} \quad (2-49) \quad \tau(-)=12.282K^{-1} \quad (2-50)$$

ჩამოყალიბებული წარმოებულების ექსტრემალური -მაქსიმუმების და მინიმუმების მნიშვნელობების საანგარიშო ფორმულების მიღებისათვის $\tau(+)$, $\tau(-)$ ყველა რიგის მნიშვნელობები უნდა შევიტანოტ შესაბამისი რიგის წარმოებულების განტოლებებში. მაგალითად: პირველი რიგის წარმოებულის მაქსიმუმი ($\omega_{\max}^I$), როგორც ეს ნათლად ჩანს ნახ. 7, ნახ. 8-ზე, მიიღწევა, როდესაც მეორე რიგის წარმოებული $\omega^{II}=0$. ეს პირობა დროის კოორდინატზე გადაკვეთის წერტილით განისაზღვრება. მათემატიკურად ამისათვის მეორე რიგის წარმოებულის განტოლება უნდა გავუტოლოთ ნულს ($\omega^{II}=0$) და მისი ამოხსნის მნიშვნელობა $1/3$ შევიტანოთ პირველი რიგის წარმოებულის განტოლებაში, მივიღებთ:

$$\omega_{\max}^1 = CKy_1[1 - 2y_1 + by_1^2] = 1K \frac{1}{3}[1 - 2\frac{1}{3} + 1(\frac{1}{3})^2] = 0.148K \quad (2-51)$$

ანალოგიური ლოგიკის საფუძველზე მიღებულია მეორე, მესამე, მეოთხე და მეხუთე რიგის წარმოებულების მაქსიმალური და მინიმალური მნიშვნელობების საანგარიშო ფორმულები.

სტატიკური მართვის ობიექტის დინამიკური მახასიათებლების ექსტრემალური მნიშვნელობების და შესაბამისი დროითი პერიოდების საანგარიშო ფორმულები $m=3$ ფაქტორისათვის მოცემულია ცხრილი 2-ში.

ცხრილი 2 სტატიკური მართვის ობიექტის დინამიკური მახასიათებლების ექსტრემალური მნიშვნელობების და შესაბამისი დროითი პერიოდების საანგარიშო ფორმულები $m=3$ ფაქტორისათვის

$\Omega'_{\max,=}$	$\omega''_{\max=}$	$\omega''_{\min=}$	$\omega'''_{\max=}$	$\omega'''_{\min=}$	$\omega^{IV}_{\max=}$	$\omega^{IV}_{\min=}$
0,148 K	0,078K ²	-0,023K ²	0,0037K ³	-0,0302K ³	0,0167K ⁴	-0,0006K ⁴
t=	t=	t=	t=	t=	T=	t=
3,295K ⁻¹	0,912K ⁻¹	5,669K ⁻¹	7,995K ⁻¹	1,953K ⁻¹	3,058K ⁻¹	10,126K ⁻¹

ნახ. 8-ზე წარმოდგენილია ფუნქციის $\omega(\tau)$ ექსტრემალური მნიშვნელობები $m=3$ ფაქტორისათვის, როდესაც $K = 0,5 * 10^{-4} 1/\text{წმ}$.

$m=2$ ფაქტორის არაწრფივი სტატიკური სისტემების დინამიკური ექსტრემალური მახასიათებლების მოდელირების n რიგის წარმოებულის განტოლება:

$$\omega^n = C(-1)^{n+1} 2b\left(\frac{K}{2}\right)^n \exp\left(-\frac{K\tau}{2}\right) \left[1 - 2^{n-1} b \exp\left(-\frac{K\tau}{2}\right) \right] \quad (2-52)$$

(2-52) განტოლების მიხედვით წარმოვადგინოთ $n=1$ დან $n=6$ -ის ჩათვლით წარმოებულების საანგარიშო განტოლებები.

პირველი რიგის წარმოებულის $n=1$

$$\omega^I = C(-1)^2 2b\left(\frac{K}{2}\right)^1 \exp\left(-\frac{K\tau}{2}\right) \left[1 - b \exp\left(-\frac{K\tau}{2}\right) \right] \quad (2-53)$$

მეორე რიგის წარმოებული $n=2$

$$\omega'' = C(-1)^3 2b \left(\frac{K^2}{4}\right) \exp\left(-\frac{K\tau}{2}\right) \left[1 - 2b \exp\left(-\frac{K\tau}{2}\right)\right] \quad (2-54)$$

მესამე რიგის წარმოებული $n=3$

$$\omega''' = C(-1)^4 2b \left(\frac{K^3}{8}\right) \exp\left(-\frac{K\tau}{2}\right) \left[1 - 4b \exp\left(-\frac{K\tau}{2}\right)\right] \quad (2-55)$$

მეოთხე რიგის წარმოებული $n=4$

$$\omega^{IV} = C(-1)^5 2b \left(\frac{K^4}{16}\right) \exp\left(-\frac{K\tau}{2}\right) \left[1 - 8b \exp\left(-\frac{K\tau}{2}\right)\right] \quad (2-56)$$

მეხუთე რიგის წარმოებული $n=5$

$$\omega^V = C(-1)^6 2b \left(\frac{K^5}{32}\right) \exp\left(-\frac{K\tau}{2}\right) \left[1 - 16b \exp\left(-\frac{K\tau}{2}\right)\right] \quad (2-57)$$

მეექვსე რიგის წარმოებული $n=6$

$$\omega^{VI} = C(-1)^7 2b \left(\frac{K^6}{64}\right) \exp\left(-\frac{K\tau}{2}\right) \left[1 - 32b \exp\left(-\frac{K\tau}{2}\right)\right] \quad (2-58)$$

$m=2$ ფაქტორის ფუნქციის n რიგის წარმოებულების ექსტრემალური (მაქსიმუმების, მინიმუმების) მნიშვნელობების და შესაბამისი დროითი პერიოდების ხანგრძლივობის განსაზღვრისათვის შემოვიღოთ აღნიშვნა $y = b \exp\left(-\frac{K\tau}{2}\right)$. ექსტრემალური მნიშვნელობების განსაზღვრისათვის

წარმოებულები (2-53)-(2-58) გავუტოლოთ ნულს, მივიღებთ:

პირველი რიგის წარმოებულისათვის $n=1$

$\omega^1 = CKy_1[1 - 2y_1]$ ვინაიდან $CKy_1 \neq 0$ შეგვიძლია მივიღოთ, რომ

$$[1 - y_1] = 0 \quad (2-59)$$

მეორე რიგის წარმოებულისათვის $n=2$

$$\omega'' = C \frac{K^2}{2} y_2 [1 - 2y_2]. \text{ იწინააღმდეგება } C \frac{K^2}{2} y_2 \neq 0 \text{ შეგვიძლია მივიღოთ, რომ}$$

$$[1 - 2y_2] = 0 \quad (2-60)$$

მესამე რიგის წარმოებულისათვის $n=3$

$$\omega''' = C \frac{K^3}{4} y_3 [1 - 4y_3]. \text{ ვინაიდან } C \frac{K^3}{4} y_3 \neq 0 \text{ შეგვიძლია მივიღოთ, რომ}$$

$$[1 - 4y_3] = 0 \quad (2-61)$$

მეოთხე რიგის წარმოებულისათვის $n=4$

$$\omega^{IV} = -C \frac{K^4}{8} y_4 [1 - 8y_4]. \text{ ვინაიდან } C \frac{K^4}{8} y_4 \neq 0, \text{ მივიღოთ, რომ}$$

$$[1 - 8y_4] = 0 \quad (2-62)$$

მეხუთე რიგის წარმოებულისათვის $n=5$

$$\omega^V = C \frac{K^5}{16} y_5 [1 - 16y_5]. \text{ ვინაიდან } C \frac{K^5}{16} y_5 \neq 0, \text{ მივიღოთ, რომ}$$

$$[1 - 16y_5] = 0 \quad (2-63)$$

მექვსე რიგის წარმოებულისათვის $n=6$

$$\omega^VI = -C \frac{K^6}{32} y_6 [1 - 32y_6]. \text{ ვინაიდან } C \frac{K^6}{32} y_6 \neq 0, \text{ მივიღოთ, რომ}$$

$$[1 - 32y_6] = 0 \quad (2-64)$$

(2-59)-(2-64) განტოლების ამოხსნის შედეგები წარმოდგენილია ცხრილ 3-ში

ცხრილი 3 ექსტრემალური მახასიათებლების ამოხსნის შედეგები

m=2	y_1	y_2	y_3	y_4	y_5	y_6
$y(+)$	1	1/2	1/4	1/8	1/16	1/32
$\tau (+)$	0	1/3	0.1511	0.071	0.0342	0.01667

$y(+)$ და $y(-)$ რიცხვით მნიშვნელობები ჩავსვით ჩვენს მიერ შემოტანილ აღნიშვნაში:

$$y = b \exp\left(-\frac{K\tau}{2}\right) \quad (2-65)$$

ამ შემთხვევაში ჩვენ შეიძლება განვსაძღვროთ შესაბამისი დროითი პერიოდები, რომლის დროს ფუნქციის წარმოებულების მნიშვნელობები აღწევენ ექსტრემალურ მნიშვნელობებს. მაგალითად y_2 -ის მნიშვნელობები 1 და 1/3 შევიტანოთ (2-65)-ში, რომელიც განსაზღვრულია τ მიმართ:

$$\tau = \frac{3}{K} \ln \frac{b}{y} \quad (2-66)$$

$m=1$ ფაქტორის არაწრფივი სტატიკური სისტემების დინამიკური ექსტრემალური მახასიათებლების მოდელირების n რიგის წარმოებულის განტოლება:

$$\omega^n = C(-1)^{n+1} b(K)^n \exp(-K\tau) \quad (2-67)$$

$m=1$ ფაქტორის ფუნქციის n რიგის წარმოებულების მოდელირებისათვის შემოვიღოთ აღნიშვნა $y = b \exp(-K\tau)$. მიღებული აღნიშვნის მიხედვით (2-67) განტოლების $n=1$ -დან $n=6$ -ის ჩათვლით წარმოებულების საანგარიშო ფორმულები მიიღებს შემდეგ სახეს:

$$\omega^I = CKy; \quad (2-68) \quad \omega^{II} = -CK^2y; \quad (2-69) \quad \omega^{III} = CK^3y \quad (2-70)$$

$$\omega^{IV} = -CK^4y \quad (2-71) \quad \omega^V = CK^5 \quad (2-72) \quad \omega^{VI} = -CK^6y. \quad (2-73)$$

მიღებული ექსტრემალური ფუნქციური და დროითი დინამიკური მახასიათებლების მიხედვით შესაძლებელია არაწრფივი სტატიკური სისტემების ანალიზის, იდენტიფიკაციის და მართვის ახალი მეთოდების სინთეზი. (2-25)-(2-30) კონკრეტულ მაგალითებზე განხილულია აღნიშნული ექსტრემალური მახასიათებლების პრაქტიკული გამოყენება. დამუშავებულია არაწრფივი სტატიკური სისტემების კინეტიკური და დინამიკური მახასიათებლების "შეშფოთების" რეაქციის სიჩქარის კონსტანტის განსაზღვრის ახალი მეთოდი.

2.2.4. მიღებული ანალიზური ამოხსნების განზოგადება

ბერნულის არაწრფივი დიფერენციალური განტოლების კერძო ამოხსნების ანალიზისა და შესწავლის შედეგად დადგენილია, რომ დინამიკური სისტემა თავისი შინაარსით და სტრუქტურით, შემფოთების ტალღის გავრცელების კანონზომიერებით დროში და სივრცეში, ავლენს ანალოგიურ თვისებებს როგორც ფაზური გარდაქმნების გარკვეული კლასის პროცესები. ამ თვალსაზრისით მიღებული კინეტიკური ფორმულები და დინამიკური ექსტრემალური მახასიათებლები, იზომორფულობის პრინციპიდან გამომდინარე, გამოყენებულია ქიმიური რეაქციების და ფაზური გარდაქმნის პროცესების ანალიზისა და იდენტიფიკაციის მიზნით. კერძოდ განხილულია ქიმიური რეაქციის რამოდენიმე მაგალითი და ფაზური გარდაქმნის პროცესი შრობისა და აორთქლების მაგალითზე. აღნიშნული პროცესების იდენტიფიკაციისათვის, მიღებულ თეორიულ ფორმულების განზოგადების შემთხვევაში, საჭიროა დინამიკური მახასიათებლების ძირითადი პარამეტრი - ტემპერატურა შეიცვალოს აღნიშნული პროცესების მახასიათებელი სიდიდეებით, შესაბამისად- კონცენტრაციით (C), მასით (G) ან ტენიანობით (w).

ქიმიური რეაქციების და ფაზური გარდაქმნის პროცესების იდენტიფიკაციის მიზნით მიღებული კინეტიკური ფორმულები შეიძლება წარმოდგენილი იქნეს შემდეგი სახით.

ქიმიური რეაქციის შედეგად მიზანდასახული პროდუქტის განვითარების კინეტიკა დახასიათებული კონცენტრაციის ცვლილებით დროში (2-19) ფორმულის მიხედვით:

$$C(\tau) = C_{\max} \left[1 - b \exp \left(-\frac{K}{m} \tau \right) \right]^m. \quad (2-74)$$

სადაც $C(\tau)$, $C_{\max}$ არის რეაქციის შედეგად წარმოქმნილი პროდუქტის მიმდინარე კონცენტრაცია და კინეტიკურ სისტემაში ამ პროდუქტის მაქსიმალური კონცენტრაციის მიღწევის შესაძლებლობა; K -ქიმიური

რეაქციის სიჩქარის კონსტანტა; m -რეაქციის ინტენსივობის ფაქტორი; b -კოეფიციენტი.

ქიმიური რეაქციის შედეგად საწყისი ნივთიერების გარდაქმნის ხარისხი შეიძლება დავახასიათოთ (2-20) ფორმულის ანალოგიურად შემდეგი ფორმულით:

$$W(\tau) = 1 - \left[1 - b \exp\left(-\frac{K}{m} \tau\right) \right]^m \quad (2-75)$$

სადაც $W(\tau) = C_A(\tau) / C_A^0$; $-A$ ნივთიერების საწყისი (C_A^0) და მიმდინარე $C_A(\tau)$ -კონცენტრაციები; K -რეაქციის სიჩქარის კონსტანტა ($1/\tau_m$); m -რეაქციის ინტენსივობის ფაქტორი. –

ფაზური გარდაქმნის პროცესების იდენტიფიკაციის დროს, მაგალითად შრობის პროცესის შემთხვევაში, ფორმულა (2-75) შეიძლება გამოვიყენოთ საშრობი მასალის ტენშემცველობის $W(\tau)$ ცვლილების დასახასიათებლად დროში. K კოეფიციენტი ამ შემთხვევაში ახასიათებს შრობის პროცესის სიჩქარის კონსტანტას, ხოლო m -შრობის პროცესის ინტენსივობის ფაქტორს, რომელიც დამოკიდებულია საშრობი მასალის გეომეტრიულ ფორმაზე.

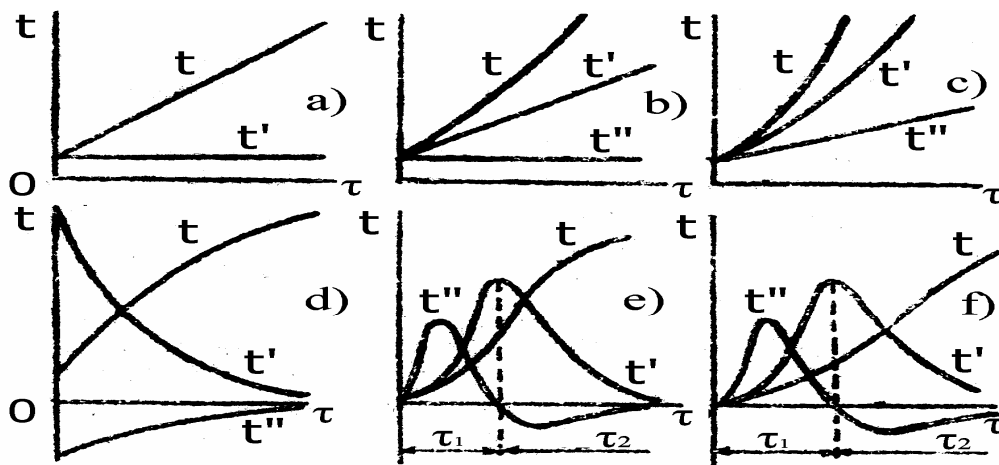
ფორმულა (2-74) შეიძლება გამოყენებული იქნეს საშრობი მასალიდან აორთქლებული სითხის (წყლის) პროცენტული რაოდენობის დასახასიათებლად.

აღნიშნული კლასის პროცესების მათემატიკური მოდელირების, იდენტიფიკაციის, ანალიზის და მართვის საკითხები განხილულია 2.2.7 და 2.2.8. პარაგრაფებში. კერძოდ ცნობილი ექსპერიმენტული მონაცემების მიხედვით გაანგარიშებულია K კონსტანტის რიცხვითი მნიშვნელობები, დადგენილია ინტენსივობის m ფაქტორის რიცხვითი მნიშვნელობები. განხილული პროცესებისათვის აგებულია შესაბამისი კინეტიკური მრუდები და ექსტრემალური მახასიათებლები.

2.2.5. არაწრფივი დინამიკური სისტემების მათემატიკური მოდელირება

ანალიზური კვლევის შედეგად მიღებული თეორიული ფორმულების საფუძველზე დამუშავებულია შესაბამისი მათემატიკური და პროგრამული უზრუნველყოფა ეგმ-ისათვის. პროგრამული პაკეტი ითვალისწინებს იდენტიფიკაციის, მოდელირების და მართვის საკითხების გადაჭრას. დამუშავებული მათემატიკური და პროგრამული უზრუნველყოფა (მპუ) შეიძლება გამოყენებული იქნეს მართვის არაწრფივი სტატიკური და ასტატიკური დინამიკურ სისტემების (ობიექტების) დინამიკური მახასიათებლების იდენტიფიკაციის, მოდელირების და ანალიზის ამოცანების გადასაწყვეტად. დამუშავებული (მპუ) გამოყენებულია აგრეთვე ფაზური გარდაქმნების გარკვეული კლასის პროცესების, ქიმიური რეაქციების და ზოგადად ევოლუციური პროცესების ანალიზისა და იდენტიფიკაციის მიზნით. კერძოდ განხილულია ჯაჭვური რეაქციის რამოდენიმე მაგალითი და შრობის პროცესი. მიღებულ თეორიულ ფორმულების განზოგადების შემთხვევაში დინამიკური მახასიათებლების ძირითადი პარამეტრი - ტემპერატურა შეიცვლილია აღნიშნული პროცესების მახასიათებელი სიდიდეებით, შესაბამისად- კონცენტრაციით, მასით ან ტენიანობით.

არაწრფივი დინამიკური სისტემების ექსტრემალური მახასიათებლების მათემატიკური მოდელირებისა და მართვისათვის გამოყენებულია ანალიზური ამოხსნები (2-9), (2-10), (2-11), (2-16), (2-19) და მათი პირველი და მაღალი რიგის წარმოებულები. ნახ. 7-ზე t, τ კოორდინატებში წარმოდგენილია სხვადასხვა ტიპის არაწრფივ დინამიკურ სისტემებში ძირითადი დამახასიათებელი პარამეტრის ტემპერატურის, (კონცენტრაციის, მასის ან ტენიანობის) ცვლილების კანონზომიერება შემფოთების შედეგად.



ნახ. 7 სხვადასხვა ტიპის მართვის სისტემებში შემფოთების შედეგად ტემპერატურის ცვლილების დინამიკური და ექსტრემალური მახასიათებლები. ასტატიკური სისტემები (a,b,c), სტატიკური სისტემები (d,e,f). დინამიკური მახასიათებლები შეესაბამება m ფაქტორის სხვადასხვა მნიშვნელობებს: $m=1$ (a,d), $m=2$ (b,e) და $m=3$ (e,f)

მაგალითად "შემოსაზღვრულ" მოცულობაში, ერთგანზომილებიანი სივრცითი სიმეტრიის მქონე სტრუქტურების ($m=1$) განვითარებისათვის დამახასიათებელია ექსპონენციალური ფუნქციონალური დამოკიდებულება ინდუქციური პერიოდის გარეშე, რომლის მაქსიმალური სიჩქარე აღინიშნება პროცესის დასაწყისშივე, $t=0$ (ნახ. 7d). ორ და სამგანზომილებიან სივრცითი სიმეტრიის მქონე განვითარებადი ობიექტებისათვის (სტრუქტურებისათვის) $m=2,3$, დამახასიათებელია $\mathcal{F}$ -ის ფორმის ფუნქციისათვის, შესაბამისი ინდუქციური პერიოდებით, წარმოებულების ω', ω'' ზრდადი და კლებადი სიჩქარეებით, დამახასიათებელი მაქსიმუმებით და მინიმუმებით, როდესაც $T > 0$ (ნახ. 7 e, f).

მათემატიკური და პროგრამული უზრუნველყოფა ითვალისწინებს პირდაპირი და შებრუნებული მათემატიკური ამოცანების მანქანურ ამოხსნებს. თბოგადაცემის პროცესის სიჩქარის კონსტანტის რიცხვითი მნიშვნელობის მიხედვით თეორიული ფორმულების (2-9), (2-10), (2-11), (2-16) საფუძველზე შესაძლებელია განისაზღვროს მართვის ობიექტის გარდამავალი რეჟიმის დინამიკური და ექსტრემალური მახასიათებლები.

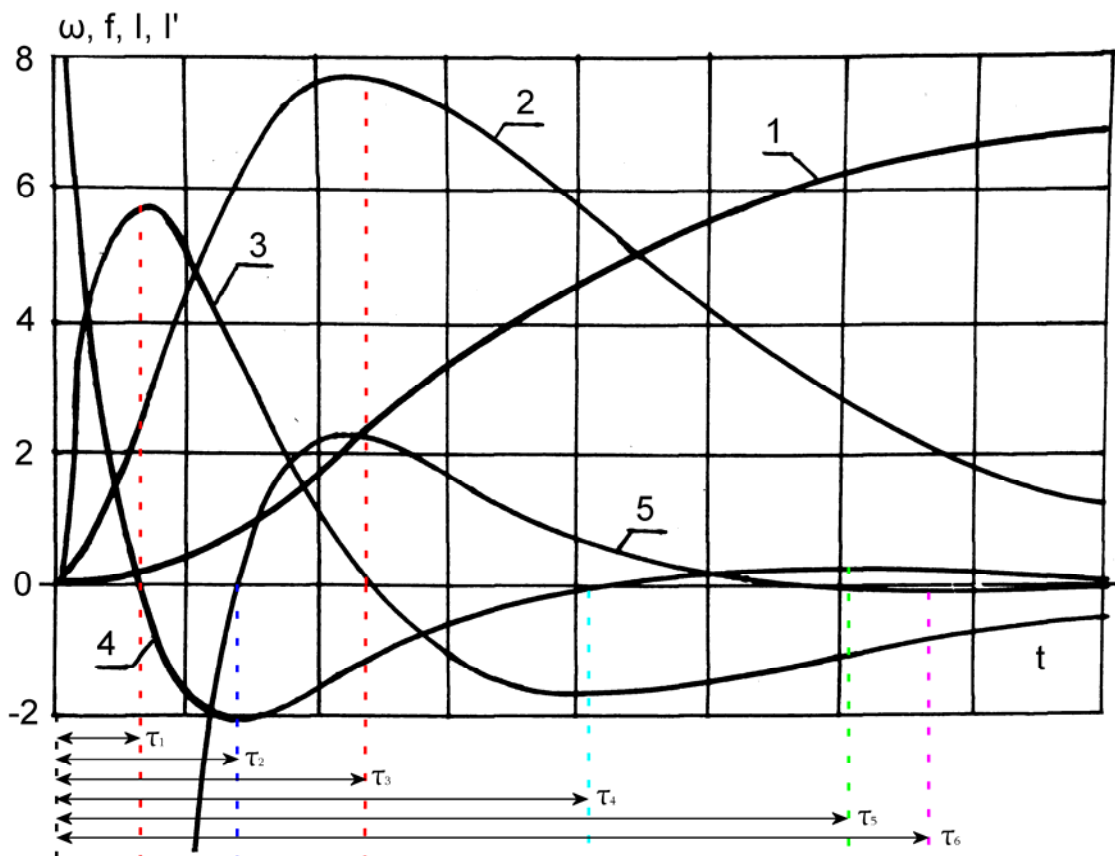
შეშვოთების შედეგად. ფორმულა (2-16)-ში ექსპონენტის ხარისხის მაჩვენებელი $y=K_1\tau/m$ (უგანზომილებო სიდიდე) მიუთითებს მართვის სისტემაში სარეგულირებელი პარამეტრის მოსალოდნელ გადახრას წონასწორული მდგომარეობიდან. y -ის რიცხვითი მნიშვნელობები გამოყენებულია მართვის ობიექტის მდგომარეობის შეფასების ერთ-ერთ კრიტერიუმად.

$$t = \frac{k_1}{k_2} \cdot t_{\max} \left[l - b \exp\left(-\frac{K_1}{m} \tau\right) \right]^m, \quad (2-76)$$

$$\text{სადაც } b = 1 - (t_0 / t_{\max})^{1/m}, \quad (2-77) \quad m = \frac{1}{1-n}. \quad (2-78)$$

სადაც t , t_0 , $t_{\max}$ -მიმდინარე, საწყისი და მაქსიმალური ტემპერატურის მნიშვნელობებია, შესაბამისად.

ფორმულა - (2-76)-ის ანალიზური ამოხსნა მოცემულია დანართ 3.4-ში.



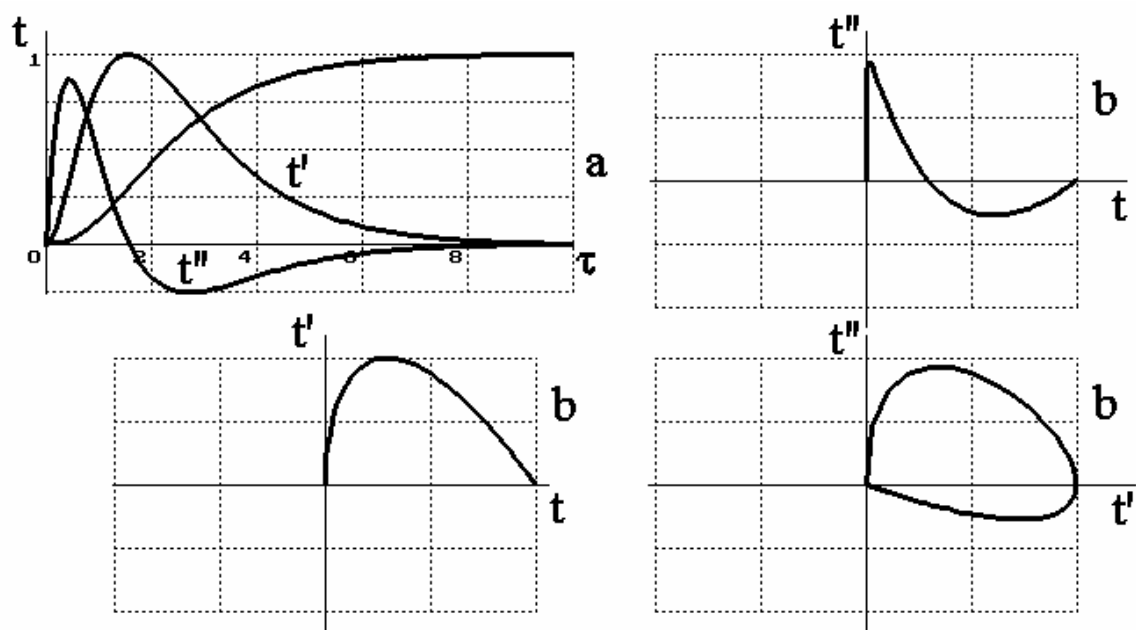
ნახ. 8 კინეტიკური ექსტრემალური მახასიათებლები $m=3$. წარმოქმნილი სტრუქტურის განვითარების ალბათობა (1), სიჩქარე (2), მაღალი რიგის წარმოებულები (3-5).

ნახ. 8-ზე წარმოდგენილია არაწრფივი სტატისტიკური სისტემების დინამიკური ექსტრემალური მახასიათებლების დამახასიათებელი $n = 1, 2, 3, 4, 5$ რიგის წარმოებულები $m=3$ ფაქტორისათვის. ნახ. 8-ზე წარმოდგენილი ექსტრემალური მახასიათებლები შეიცავს საგულისხმო ინფორმაციას, რომლის რაციონალური გამოყენება საშუალებას მოგვცემს გადავწყვიტოთ არაწრფივი დინამიკური სისტემების ანალიზისა და სინთეზის აქტუალური საკითხები. უპირველეს ყოვლისა უნდა აღინიშნოს, რომ დინამიკური მახასიათებლების ე.წ. "გაქანების მრუდის" აპროქსიმაციის გრაფიკული მეთოდი შეიცვლება ახალი ანალიზური მეთოდით მიღებული თეორიული ფორმულების გამოყენებით. თეორიული ფორმულების მიხედვით განისაზღვრება არა მარტო დაგვიანების დრო და დროის მუდმივა არამედ დინამიკური მახასიათებლის განვითარების სიჩქარის ზრდადი და კლებადი პერიოდების ხანგრძლივობა. აღნიშნული ინფორმაციის საფუძველზე შესაძლებელი გახდება ავტომატური მართვის სისტემაში ჩართული რეგულატორების პარამეტრების ოპტიმიზაცია. ფაზური გარდაქმნის კლასის პროსესების ანალიზისა და იდენტიფიკაციის შემთხვევაში შესაძლებელია განისაზღვროს შემდეგი მახასიათებელი პერიოდები: ფაზის ლაგტაციის პერიოდის დრო (დაგვიანების დროის ექვივალენტური), ფაზის ე.წ. ექსპონენციალური პერიოდი, ფაზის განვითარები ე.წ. ღრმა დამუხრუჭების პერიოდი, და როგორც ზემოთ ავღნიშნეთ ახალი ფაზის (სტრუქტურის) ზრდადი და კლებადი პერიოდების ხანგრძლივობა.

ნახ. 9-ზე წარმოდგენილია სტატისტიკური ობიექტის დინამიკური და ექსტრემალური მახასიათებლები და ზღვრული ციკლის პორტრეტები. დინამიკური მახასიათებლები აგებულია შემდეგი პირობებისათვის $K_1=K_2=4 \cdot 10^{-4}/\text{წმ}$, $m=3$. ექსტრემალური პერიოდების ხანგრძლივობის განსაზღვრა, მიღებული თეორიული ფორმულის (2-16)-ის გამოყენებით, საშუალებას გვაძლევს დროის რეალურ მასშტაბში გავაანალიზოთ გარდამავალი პროცესი და მოვახდინოთ მისი განვითარების პროგნოზირება

და ოპტიმალური მართვა. მე-2 ცხრილში მოცემულია დინამიკური მახასიათებლების ექსტრემალური პერიოდების საანგარიშო ფორმულები, რომელთა გამოყენებით დიდი სიზუსტით შესაძლებელია განვსაზღვროთ დაგვიანების დრო (τ), დროის მუდმივა (T), გარდამავალი პროცესის ზრდადი და კლებადი სიჩქარის პერიოდები. აღნიშნული პერიოდების მნიშვნელობების საფუძველზე შესაძლებელია დამუშავდეს რეგულატორის გაწყობის ოპტიმალური პარამეტრების განსაზღვრის მეთოდიკა. ამ მონაცემების მიხედვით შესაძლებელია ავტომატური მართვის ოპტიმალური რეჟიმების სინთეზი. დინამიკური გარდამავალი პროცესის შემოთავაზებული ანალიზის თეორიული მეთოდი გაცილებით ეფექტურია, ვიდრე ცნობილი ექსპერიმენტული გზით მიღებული დინამიკური მახასიათებლების გრაფიკული მრუდების დიფერენცირება.

ω ფუნქციის პირველი და მაღალი რიგის წარმოებულების საანგარიშო ფორმულები მიღებულია (2-16) ფორმულის დიფერენცირების და მათემატიკური ანალიზის შედეგად. საანგარიშო ფორმულებში $\omega = t / t_{\max}$, $K = K_1 / K_2$, $m = 3$. მიღებული აღნიშვნების მიხედვით არაწრფივი დინამიკური სისტემის ანალიზურ ამოხსნები ასტატიკური სისტემებისათვის წარმოდგენილია (2-12) ფორმულით. სტატიკური სისტემებისათვის (2-19) ფორმულით. ინფორმაცია, რომელიც აკუმულირებულია თეორიულ ფორმულებში და წარმოდგენილია კინეტიკური და დინამიკური ფუნქციებისა და მათი წარმოებულების სახით, აქვთ როგორც თეორიული ასევე პრაქტიკული მნიშვნელობა პროცესის ანალიზის, იდენტიფიკაციისა და მართვის თვალსაზრისით.



ნახ. 9 დინამიკური სისტემის ექსტრემალური მახასიათებლები (ა) და გარდამავალი რეჟიმის ზღვრული ციკლის პორტრეტები (ბ). დინამიკური მახასიათებლები შეესაბამება სტატიკურ არაწრფივ დინამიკურ სისტემებს, როდესაც პროცესის ინტენსივობის ფაქტორი $m=3$ და გარდამავალი რეჟიმის სიჩქარის კონსტანტა $K=4 \cdot 10^{-4} 1/\text{წმ}$.

კინეტიკური და დინამიკური მახასიათებლების ანალიზისა და იდენტიფიკაციის შედეგად მკვლევარს ეძლევა საშუალება, ექსპერიმენტული კინეტიკური მრუდების ფორმისა და კანონზომიერების მიხედვით, ამოირჩიოს ფორმულის სტრუქტურა და წინასწარ განსაზღვროს კინეტიკური ფორმულის ინტენსივობის ფაქტორის m -ის რიცხვითი მნიშვნელობები ე.წ. "რეაქციის რიგი". შემოთავაზებული ანალიზის მეთოდი აადვილებს მათემატიკური მოდელის ამორჩევას. რაც შეეხება ევოლუციური განვითარების სიჩქარის კონსტანტის K -ს განსაზღვრის მეთოდს, იგი პრინციპულად განსხვავდება არსებული ექსპერიმენტული კინეტიკური მრუდების გრაფიკული დიფერენცირების მეთოდისაგან. ახალი მეთოდი ითვალისწინებს K -ს გაანგარიშებას განხილული კონკრეტული პროცესის შესაბამისი კინეტიკური ფორმულების (2-12), (2-19) და (2-20) მიხედვით. იგულისხმება, რომ (2-12), (2-19) და (2-20) ფორმულები გადაწყვეტილია K კონსტანტის მიმართ. საგულისხმოა აღინიშნოს, რომ ექსპერიმენტული კინეტიკური მრუდის კანონზომიერებისა და ფორმის მიხედვით ჩვენთვის

წინასწარ ცნობილია პროცესის ინტენსივობის ფაქტორის m -ს რიცხვითი მნიშვნელობა. თუ ექსპერიმენტული კინეტიკური მრუდი არ ხასიათდება დაგვიანების (ლაქტაციის პერიოდით) და ემორჩილება "სუფთა" ექსპონენციალურ კანონზომიერებას, ამ შემთხვევაში ინტენსივობის ფაქტორი m -ს რიცხვითი მნიშვნელობა $m=1$. იმ შემთხვევაში, თუ ექსპერიმენტული კინეტიკური მრუდი ხასიათდება დაგვიანების (ლაქტაციის პერიოდით) და აქვს გამოკვეთილი S -სებრი ფორმა ინტენსივობის ფაქტორი m -ს რიცხვითი მნიშვნელობა $m=2$ ან 3 . წინასწარი კვლევის შედეგად დადგენილია, რომ თბოენერგეტიკული დანადგარების მოცულობისა და გაბარიტების გამო "შეშფოთების" ტალღის გავრცელების ინერციულობა განაპირობებს ინტენსივობის ფაქტორი m -ს რიცხვითი მნიშვნელობას $m=3$. მართვის ობიექტების დინამიკური მახასიათებლების ანალიზისა და იდენტიფიკაციის შემოთავაზებული მეთოდის მიხედვით K -ს გაანგარიშებისათვის საკმარისია მხოლოდ ერთი ექსპერიმენტული მნიშვნელობა დინამიკური მახასიათებლის დამახასიათებელი წერტილისა (სარეგულირებო პარამეტრისა-ტემპერატურისა (t_e) ან კონცენტრაციისა (C_e) გაზომილი შესაბამის დროის (τ) მონაკვეთში. მაგალითად წარმოქმნილი სტრუქტურის განვითარების და საწყისი ნივთიერების გარდაქმნის ალბათობის სიჩქარის კონსტანტა (K) "შემოსაზღვრული" სივრცისათვის უდრის:

წარმოქმნილი სტრუქტურის განვითარებისათვის (2-74) და საწყისი ნივთიერების გარდაქმნისათვის (2-75):

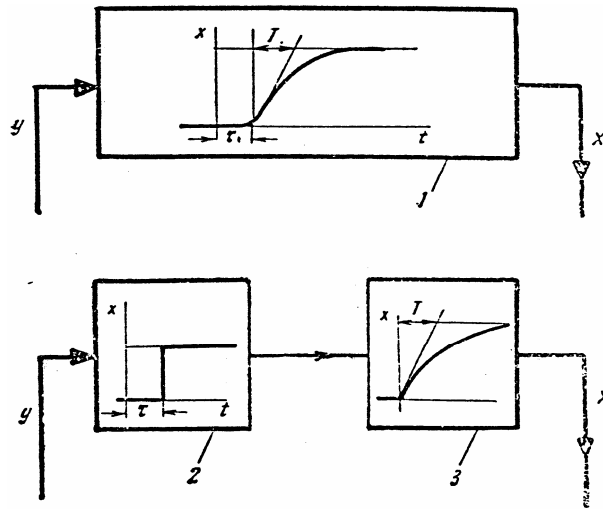
$$K = \frac{m}{t_e} \ln \frac{1}{1 - \omega(t)_e^{1/m}}; \quad (2-79) \quad K = \frac{m}{t_e} \ln \frac{1}{1 - [1 - w(t)_e]^{1/m}}; \quad (2-80)$$

სადაც $\omega(t)_e = C_e / C_{\max}$, $w(t)_e = C_e / C_{\max}$ - შესაბამისად წარმოქმნილი სტრუქტურის განვითარების და საწყისი ნივთიერების გარდაქმნის ალბათობები.

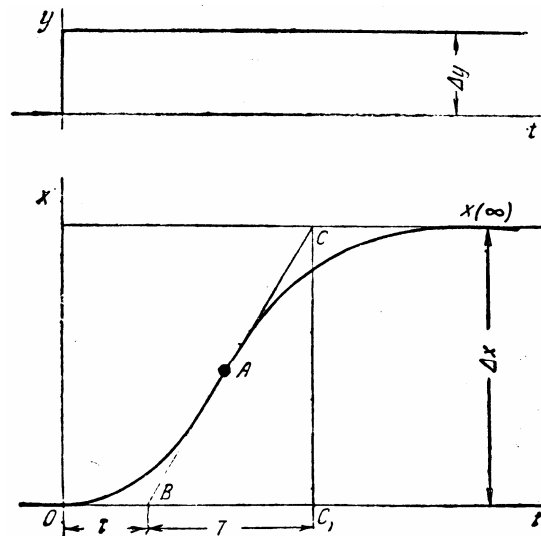
2.2.6. არაწრფივი დინამიკური სისტემების იდენტიფიკაცია

მართვის ობიექტის დინამიკური მახასიათებლების მიღება დაკავშირებულია დიდ სიძნელეებთან. უპირველეს ყოვლისა უნდა აღინიშნოს, რომ ექსპლუატაციაში მყოფი მართვის ობიექტი, ჩვენ შემთხვევაში თბოდანადგარი, გადაყვანილი უნდა იქნეს განსაკუთრებულ ექსპერიმენტისათვის სასურველ - სტაბილურ რეჟიმში. განსაზღვრული უნდა იყვეს შემფოთების სიდიდე, დრო და გარდამავალი რეჟიმის ხანგრძლივობა. დინამიკური მახასიათებლების მიღების ექსპერიმენტული მეთოდი მოითხოვს დიდ მატერიალურ დანახარჯებს და დროს. ექსპერიმენტული გზით მიღებული დინამიკური მახასიათებლების (მრუდების) გრაფიკული აპროქსიმაცია აუცილებელია განხორციელდეს დიდი სიზუსტით. გარდამავალი პროცესის მახასიათებელი მრუდის გრაფიკული დამუშავება და ანალიზი მოითხოვს შესაბამის მეთოდებს და ექსპერიმენტატორის გარკვევულ გამოცდილებას. დინამიკური მახასიათებლების ანალიზის შედეგად დგინდება შემდეგი პარამეტრები: დაგვიანების დრო (τ), დროის მუდმივა (T), მართვის ობიექტის გადაცემის კოეფიციენტი (k). ნახ. 10-ზე წარმოდგენილია არაწრფივი სტატიკური მართვის ობიექტის დინამიკური მახასიათებლების აპროქსიმაციის გრაფიკული მეთოდი.

თბოენერგეტიკული დანადგარები, როგორც ზემოთ იყო აღნიშნული მიეკუთვნება სტატიკური მართვის ობიექტების კლასს დამახასიათებელი დაგვიანების დინამიკური მახასიათებელით, რომლის ინტენსივობის ფაქტორი $m=3$. ნახ. 11-ზე წარმოდგენილია სტატიკური ობიექტის დინამიკური მახასიათებლის პარამეტრების განსაზღვრა გაქანების მრუდის მიხედვით.



ნახ. 10 არაწრფივი სტატიკური მართვის ობიექტის დინამიკური მახასიათებლების აპროქსიმაციის გრაფიკული მეთოდი ელემენტურ რგოლებში. 1-რეალური არაწრფივი სტატიკური მართვის ობიექტის დინამიკური მახასიათებელი; 2-სუფთა დაგვიანების რგოლი; 3-პირველი რიგის რგოლი.[61]



ნახ. 11 არაწრფივი სტატიკური მართვის ობიექტის დინამიკური მახასიათებლების აპროქსიმაციის გრაფიკული მეთოდი [61]

ქვემოთ განხილულია სტატიკური ობიექტის დინამიკური მახასიათებლების ძირითადი პარამეტრების განსაზღვრის არსებული გრაფიკული და ჩვენს მიერ შემოთავაზებული მეთოდები. ნახ. 12-ზე წარმოდგენილია საწარმოო ასტატიკური ობიექტის გაქანების დამახასიათებელი მრუდები. გარდამავალი რეჟიმის (გაქანების) მრუდის მიხედვით განსაზღვრულია შემდეგი პარამეტრები, რომლებიც ახასიათებს

მართვის ობიექტის დინამიკურ თვისებებს. $\tau, T, \tau/T$. ნახ. 12-ზე წარმოდგენილია ბრძმედის ღუმელიდან. მიღებული ექცერიმენტული დინამიკური მახასიათებლები "გაქანების" მრუდები [61]

წარმოდგენილი ექცერიმენტული დინამიკური მახასიათებლების გრაფიკული ანალიზის შედეგები მოყვანილია კოპელოვიჩის წიგნის ცხრილ №11-ში, გვ.184-187. ბრძმედის ღუმელის დინამიკური მახასიათებლები რეგულირების სისტემების მიხედვით ხასიათდება შემდეგი პარამეტრებით [61].

რეგულირების სისტემა 1 - წნევის ცვლილება კალაშნიკზე:

$$\tau=3\text{წმ}, T=32\text{წმ}. \tau/T=0,09$$

რეგულირების სისტემა 2 - შებერვის ტემპერატურა:

$$\tau=20\text{წმ}, T=80\text{წმ}. \tau/T=0,25$$

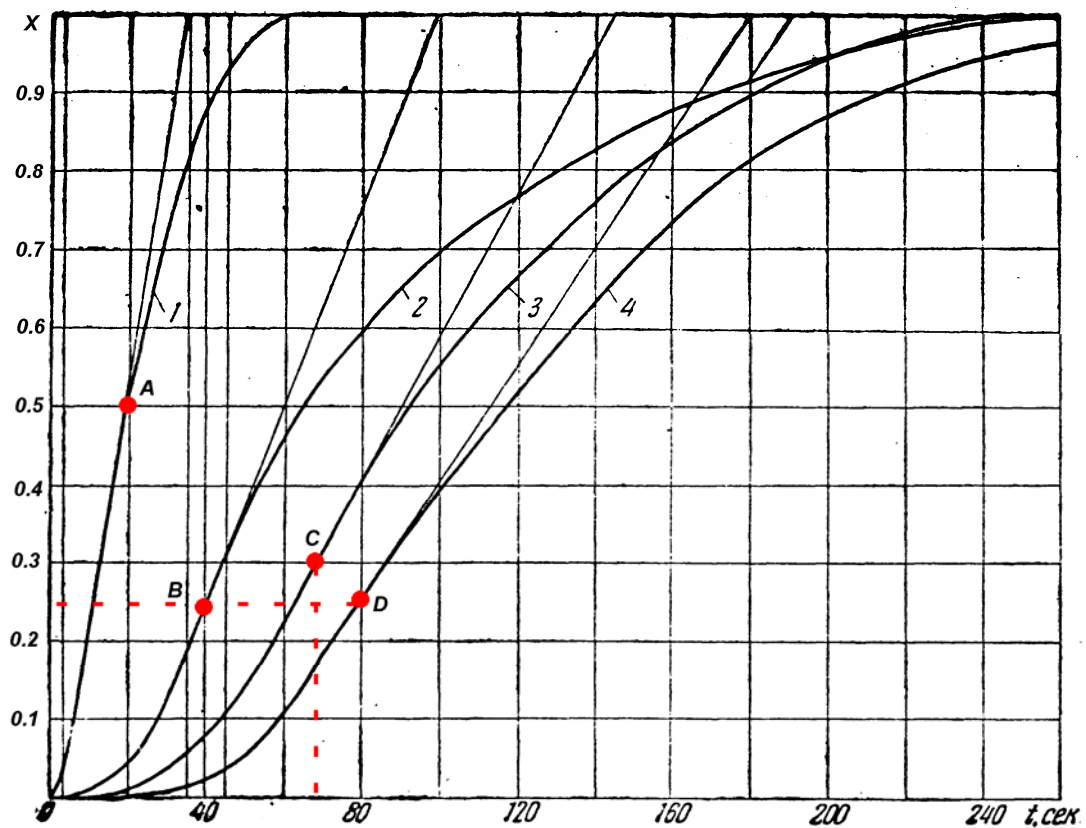
რეგულირების სისტემა 3 - აირის გამაცხელებელის კუბოლის ტემპერატურა:

$$\tau=18\text{წმ}, T=88\text{წმ}. \tau/T=0,2$$

რეგულირების სისტემა 4 - ტენიანი აირის შებერვის ტემპერატურა:

$$\tau=45\text{წმ}, T=135\text{წმ}. \tau/T=0,33$$

წარმოდგენილი დინამიკური მახასიათებლების გრაფიკული ანალიზი შესრულებულია ცნობილი მეთოდის მიხედვით [61]. მაგალითად, გრაფიკული ანალიზის შედეგად რეგულირების სისტემა 1-ზე მიღებული პარამეტრების ($\tau=3\text{წმ}, T=32\text{წმ}, \tau/T=0,09$) გამოყენებით სრულდება ავტომატური რეგულირების სისტემა 1-ში ჩართული რეგულატორის რეგულირების კანონების შერჩევა და საჭირო პარამეტრების გაწყობა.



ნახ. 12 ბრძმედის ღუმელის დინამიკური მახასიათებლების მრუდები.

1- წნევის ცვლილება კალაშნიკზე; 2- შებერვის ტემპერატურა;
3. აირის გამაცხელებელის კუპოლის ტემპერატურა; 4. ტენიანი აირის
შებერვის ტემპერატურა. ნახ. აღებულია კოპელევიჩის წიგნიდან[61].

ბრძმედის ღუმელის პრინციპიული სქემა, გაზომვის წერტილების განლაგება და დინამიკური მახასიათებლები რეგულირების სისტემების მიხედვით მოყვანილია დანართ 3.5-ში.

დინამიკური მახასიათებლების ანალიზის შემოთავაზებულ თეორიულ მეთოდისათვის საკმარისია ექსპერიმენტალურ მრუდზე მოინიშნოს დამახასიათებელი წერტილი და განისაზღვროს კოორდინატების (x, τ) რიცხვითი მნიშვნელობები. ნახ. 12-ზე. A, B, C, D დამახასიათებელი წერტილებისათვის განსაზღვრულია 1,2,3,4-ის რეგულირების სისტემებისათვის (x, τ) კოორდინატების რიცხვითი მნიშვნელობები.

რეგულირების სისტემა-1. $x = 0,5; \tau = 20$ წმ.

რეგულირების სისტემა-2. $x = 0,25; \tau = 40$ წმ.

რეგულირების სისტემა-3. $x = 0,3; \tau = 70$ წმ.

რეგულირების სისტემა-4. $x = 0,25; \tau = 80$ წმ.

მართვის ობიექტის ექსპერმენტალური დინამიკური მახასიათებლების იდენტიფიკაციისათვის (x, τ) კოორდინატების რიცხვითი მნიშვნელობებით (2-79) ფორმულის მიხედვით რეგულირების თვითნებური 1-4 სისტემისათვის უნდა განისაზღვროს გარდამავალი პროცესის სიჩქარის კონსტანტა K -ს რიცხვითი მნიშვნელობები.

$$K = \frac{m}{\tau_e} \ln \frac{1}{1 - \omega(\tau)_e^{1/m}}; \quad (2-81) \quad \text{სადაც } \omega(\tau)_e = t_e / t_{\max},$$

გარდამავალი პროცესის სიჩქარის კონსტანტა K -ს რიცხვითი მნიშვნელობები 1-4 რეგულირების სისტემისათვის (x, τ) კოორდინატების შესაბამისად, უდრის

$$K_1 = \frac{m}{t_e} \ln \frac{1}{1 - \omega(t)_e^{1/m}} = \frac{3}{20} \ln \frac{1}{1 - 0.5^{1/3}} = 0.2367 \text{ 1/წმ}; \quad (2-82)$$

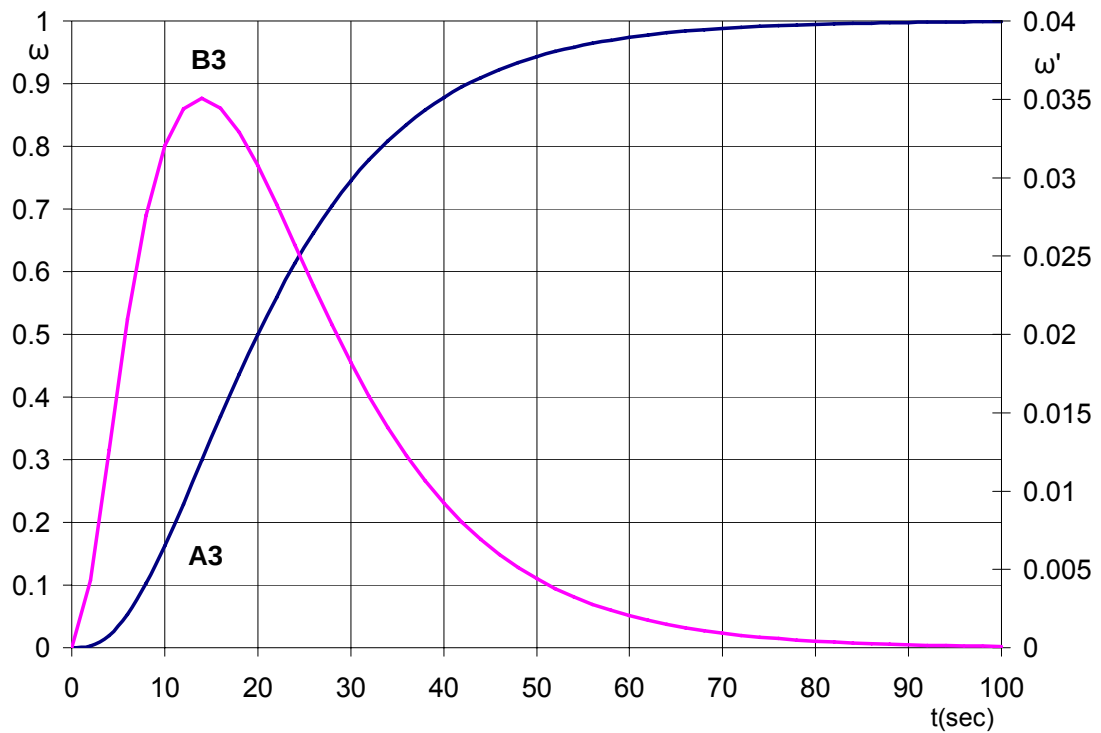
$$K_2 = \frac{m}{t_e} \ln \frac{1}{1 - \omega(t)_e^{1/m}} = \frac{3}{40} \ln \frac{1}{1 - 0.25^{1/3}} = 0.074 \text{ 1/წმ}; \quad (2-83)$$

$$K_3 = \frac{m}{t_e} \ln \frac{1}{1 - \omega(t)_e^{1/m}} = \frac{3}{70} \ln \frac{1}{1 - 0.3^{1/3}} = 0.047 \text{ 1/წმ}; \quad (2-84)$$

$$K_4 = \frac{m}{t_e} \ln \frac{1}{1 - \omega(t)_e^{1/m}} = \frac{3}{20} \ln \frac{1}{1 - 0.5^{1/3}} = 0.0375 \text{ 1/წმ}; \quad (2-85)$$

მიღებული K კონსტანტის რიცხვითი მნიშვნელობების მიხედვით (2-76) ფორმულის მათემატიკური მოდელირების გზით 1-4 რეგულირების სისტემისათვის აგებულია შესაბამისი დინამიკური მახასიათებლები. იხილეთ ნახ. 13 - ნახ. 16-ზე წარმოდგენილი დინამიკური მახასიათებლების ძირითადი პარამეტრები $\tau, T, \tau/T$ შეიძლება განისაზღვროს, როგორც ცნობილი გრაფიკული ანალიზის მეთოდით ასევე შემოთავაზებული მეთოდით მე-2 ცხრილში მოყვანილი თეორიული ფორმულების მიხედვით.

სისტემა 1

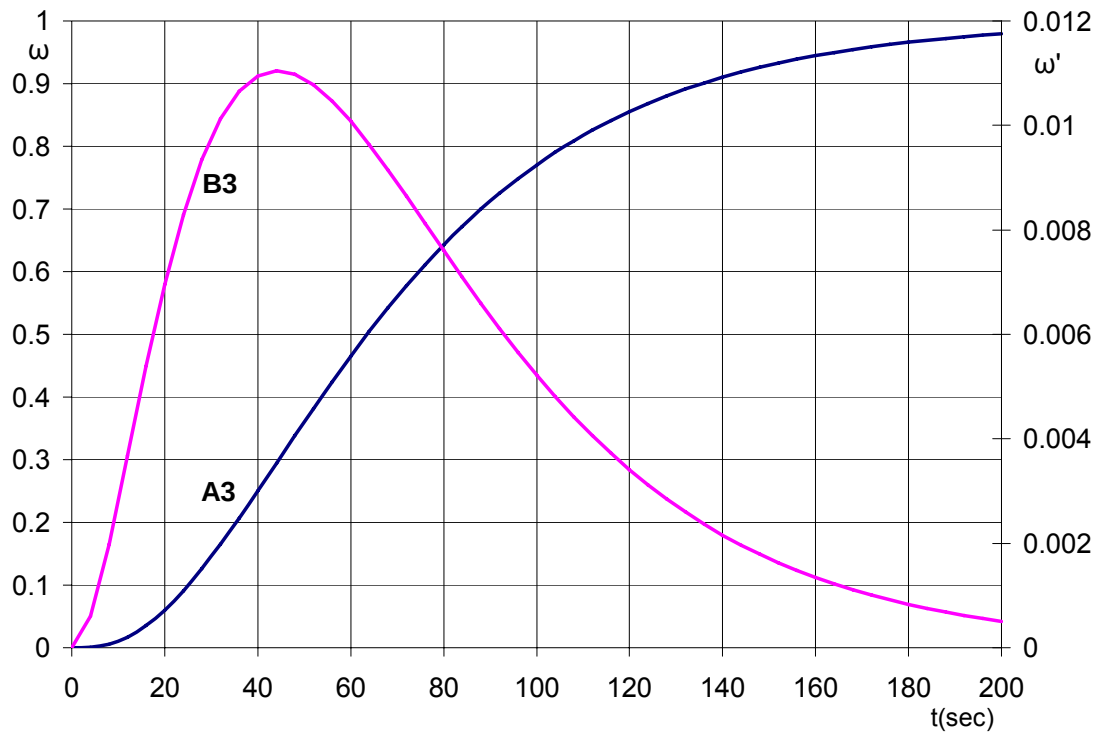


ნახ. 13 მათემატიკური მოდელირების გზით აგებული დინამიკური მახასიათებლები. გარდამავალი პროცესის სიჩქარის კონსტანტა $K=0,2367$ 1/წმ.

A3--გარდამავალი პროცესის "გაქანების" მრუდი. **B3**--გარდამავალი პროცესის "გაქანების" მრუდის წარმოებული.
დინამიკური მახასიათებლების ცვლილების რიცხვითი მნიშვნელობები დროში.

T	A3	B3
0	0	0
10	0.162591	0.032035
20	0.5	0.03077
30	0.744412	0.018222
40	0.877678	0.009237
50	0.943122	0.004402
60	0.973891	0.002042
70	0.988084	0.000937
80	0.994576	0.000427
90	0.997534	0.000194
100	0.998879	8.84E-05

სისტემა 2

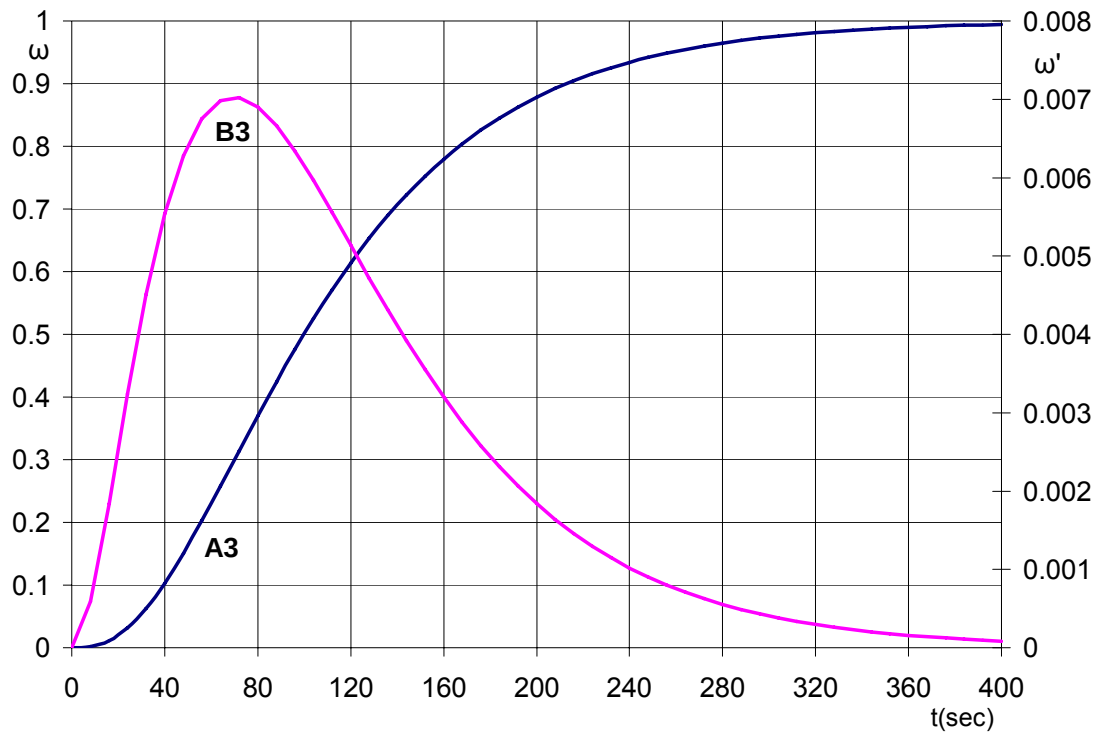


ნახ. 14. მათემატიკური მოდელირების გზით აგებული დინამიკური მახასიათებლები. გარდამავალი პროცესის სიჩქარის კონსტანტა $K=0,074 \text{ 1/წმ}$.

A3--გარდამავალი პროცესის "გაქანების" მრუდი. **B3**--გარდამავალი პროცესის "გაქანების" მრუდის წარმოებული.
დინამიკური მახასიათებლების ცვლილების რიცხვითი მნიშვნელობები დროში.

T	A3	B3
0	0	0
20	0.060094	0.006959
40	0.25	0.010949
60	0.465307	0.010078
80	0.642894	0.007605
100	0.770351	0.005219
120	0.855564	0.003405
140	0.910353	0.002159
160	0.944799	0.001346
180	0.966172	0.000831
200	0.97933	0.00051

სისტემა 3

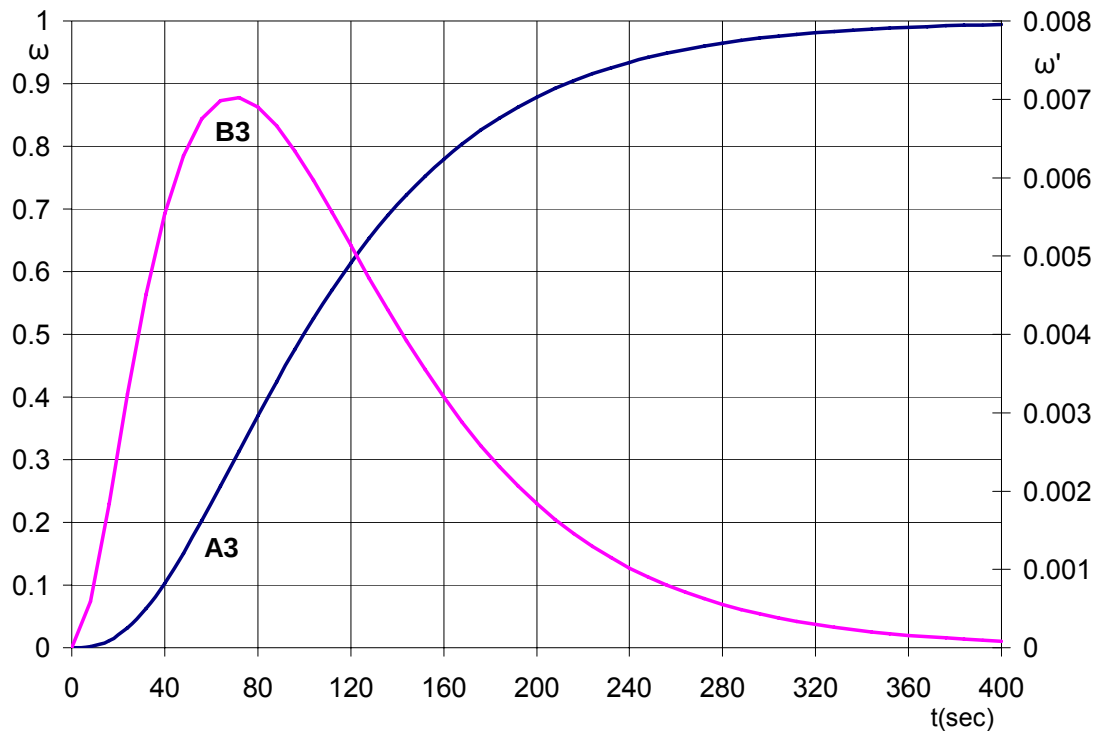


ნახ. 15 მათემატიკური მოდელირების გზით აგებული დინამიკური მახასიათებლები. გარდამავალი პროცესის სიჩქარის კონსტანტა $K=0,047$ 1/წმ.

A3--გარდამავალი პროცესის "გაქანების" მრუდი. **B3**--გარდამავალი პროცესის "გაქანების" მრუდის წარმოებული.
დინამიკური მახასიათებლების ცვლილების რიცხვითი მნიშვნელობები დროში.

T	A3	B3
0	0	0
40	0.103003087	0.005537846
80	0.369811545	0.006897932
120	0.614287968	0.0051397
160	0.779586876	0.003200545
200	0.878361219	0.001841002
240	0.934071996	0.001018944
280	0.964603257	0.000553036
320	0.981089944	0.000297133
360	0.989924247	0.000158795
400	0.994638883	8.46262E-05

სისტემა 4



ნახ. 16 მათემატიკური მოდელირების გზით აგებული დინამიკური მახასიათებლები. გარდამავალი პროცესის სიჩქარის კონსტანტა $K=0,0375$ 1/წმ.

A3--გარდამავალი პროცესის "გაქანების" მრუდი. **B3**--გარდამავალი პროცესის "გაქანების" მრუდის წარმოებული. დინამიკური მახასიათებლების ცვლილების რიცხვითი მნიშვნელობები დროში.

t	A3	B3
0	0	0
40	0.060094092	0.00347931
80	0.25	0.005474645
120	0.465307395	0.005039027
160	0.64289382	0.003802509
200	0.770350682	0.002609518
240	0.855564379	0.001702396
280	0.91035323	0.001079335
320	0.944799224	0.000673028
360	0.966172124	0.00041556
400	0.979329791	0.000255079

2.2.7. ქიმიური რეაქციების კინეტიკის იდენტიფიკაცია

კინეტიკური ფორმულების სტრუქტურული და პარამეტრული იდენტიფიკაციის მეთოდიკა განხილულია წყალბადისა და ქლორის ნარევის რეაქციის მიხედვით, რომელიც ითვლება კლასიკურ მაგალითად ჯაჭვური რეაქციის თეორიის განვითარებაში [65-80]. ფოტოქიმიური რეაქციის $H_2 + Cl_2 = 2HCl$ ექსპერიმენტული მონაცემები აღებულია იშკავას შრომიდან [76], ა. სემიონოვის კომენტარებით [71]. იშკავას ექსპერიმენტული მონაცემები და საიდენტიფიკაციო კინეტიკური მრუდები (ნახ. 17-ზე) აგებული თეორიული ფორმულების (2-74) და (2-81) მიხედვით. ინტენსივობის ფაქტორი $m=1$, რადგანაც რეაქციის სიჩქარის მაქსიმუმი დაფიქსირებულია $t=0$ დროს. რეაქციის სიჩქარის კონსტანტა K გაანგარიშებულია ფორმულა (2-81)-ის მიხედვით, როდესაც $t=30/60$ წმ. ამ მომენტისათვის HCl წარმოქმნის ალბათობა დაფიქსირებულია $\omega = 0,95$, ანუ განათების $1/2$ წმ. გასვლის შეწყვეტის შემდეგ. იშკავა [76] ხაზგასმით აღნიშნავს, რომ 1 წმ გასვლის შემდეგ HCl წარმოქმნის ალბათობა $\omega = 1$, წარმოქმნის სიჩქარის ალბათობა კი $d\omega/dt = 0$ აღნიშნული მონაცემების მიხედვით რეაქციის სიჩქარის კონსტანტა K უდრის:

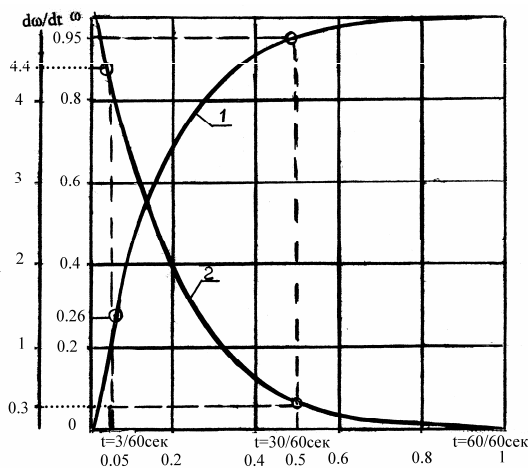
$$K = \frac{m}{t} \ln \frac{1}{1-\omega^{1/m}} = \frac{1}{30/60} \ln \frac{1}{1-0.95} = 6 \cdot 1/\text{წმ} \quad (2-86)$$

თეორიული კინეტიკური მრუდების 1 და 2-ის (ნახ. 17) ანალიზის შედეგად ნათლად ჩანს იშკავას დასკვნის სამართლიანობა იმის შესახებ, რომ რეაქციის სიჩქარის მაქსიმუმი ფიქსირდება $t=0$ პროცესის დასაწყისში. იშკავას ეს შენიშვნა ეჭვის ქვეშ აყენებს ა. სემიონოვის მტკიცებას, იმის შესახებ, რომ რეაქციის სიჩქარის მაქსიმუმი, აღნიშნული პროცესისათვის, მიიღწევა, როდესაც $t > 0$ (იხ. გვ. 100, [71]). აქვე უნდა აღინიშნოს, რომ რეაქციის სიჩქარის მაქსიმალური მნიშვნელობები, როდესაც $t > 0$ დამახასიათებელია იმ კლასის პროცესებისათვის, რომელთა ექსპერიმენტული კინეტიკური მრუდები ხასიათდება S -სებრი ფორმით და ინდუქციური პერიოდით. ნახ. 19-ზე წარმოდგენილია აღნიშნული

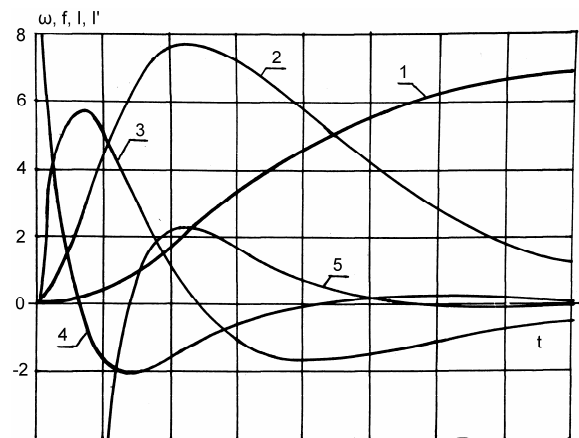
კლასის პროცესებისათვის ($m=2,3$) დამახასიათებელი კინეტიკური და დინამიკური ექსტრემალური მახასიათებლები. მახასიათებლები აგებული (2-25)-(2-30) ფორმულების მიხედვით $m=3$. მნიშვნელობისათვის. მე-4 ცხრილში მოცემულია კინეტიკური ფუნქციების და შესაბამისი დროთა პერიოდების მნიშვნელობების საანგარიშო ფორმულები. მიღებული კინეტიკური ფორმულებისა და ექსტრემალური ფუნქციური და შესაბამისი დროითი პერიოდების განმსაზღვრელი მახასიათებლების მიხედვით შესაძლებელია წარმატებით და საჭირო სიზუსტით გადავწყვიტოთ ქიმიური რეაქციების და ფაზური გარდაქმნის პროცესების ანალიზის, იდენტიფიკაციის, მათემატიკური მოდელირებისა და მართვის საკითხები.

ცხრილი 4 ქიმიური რეაქციების ექსტრემალური მახასიათებლები

$\Omega'_{\max}=$ 0,148 K	$\omega'_{\max}=$ 0,078K²	$\omega''_{\min}=$ -0,023K²	$\omega'''_{\max}=$ 0,0037K³	$\omega'''_{\min}=$ -0,0302K³	$\omega^{IV}_{\max}=$ 0,0167K⁴	$\omega^{IV}_{\min}=$ -0,0006K⁴
T= 3,294K ⁻¹	t= 0,895K ⁻¹	t= 5,772K ⁻¹	t= 7,935K ⁻¹	t= 1,95K ⁻¹	T= 3,06K ⁻¹	t= 10,12K ⁻¹



ნახ. 17 იშკავას ექსპერიმენტული მონაცემები [76]. HCl წარმოქმნის (1) და სიჩქარის (2) კინეტიკური მრუდები აგებული (2-74), (2-25) ფორმულებით.



ნახ. 18 კინეტიკური ექსტრემალური მახასიათებლები $m=3$. წარმოქმნილი სტრუქტურის განვითარების ალბათობა (1), სიჩქარე (2), მაღალი რიგის წარმოებულები (3-5).

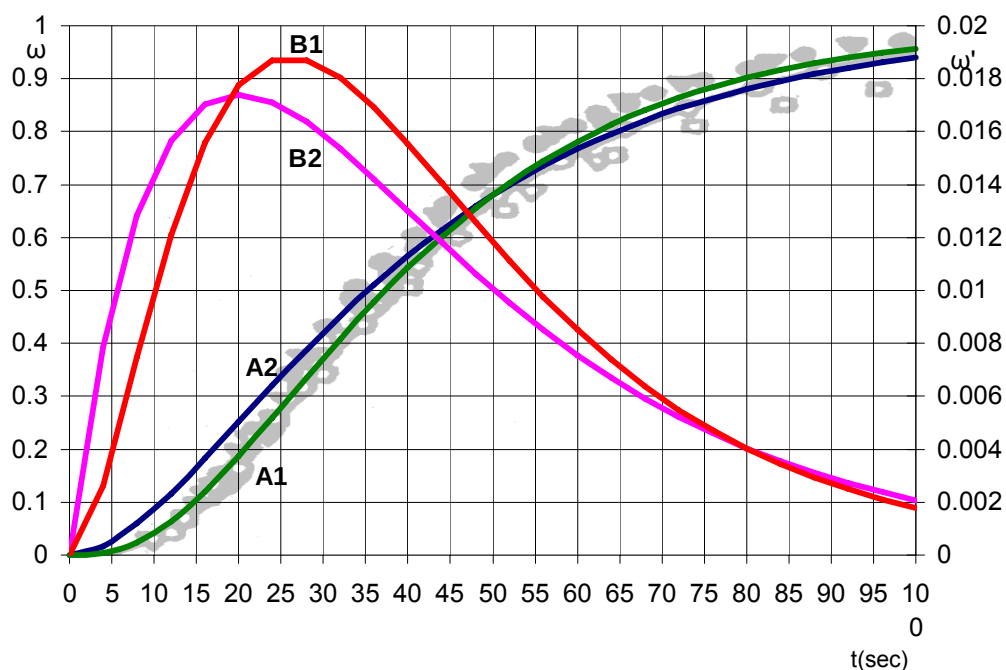
იდენტიფიკაციის შემოთავაზებული მეთოდიკა განხილულია აგრეთვე ინდუქციური პერიოდის მქონე წყალბადის წვის რეაქციისათვის. ასეთივე კლასის პროცესებს მიეკუთვნება ნახშირწყალბადოვანი და

ავტოკატალიზური რეაქციები. საკმაოდ დიდი ინდუქციური პერიოდით ხასიათდებიან გარკვეული კლასის ფაზური გარდაქმნის პროცესები, როგორცაა მაგალითად კრისტალიზაცია და შრობა. აღნიშნული კლასის ფაზური გარდაქმნის პროცესების ანალიზი და იდენტიფიკაცია განხილულია შრომებში [55-57, 81].

ნახ. 19-ზე წარმოდგენილია წყალბადის წვის რეაქციის კინეტიკის ექსპერიმენტული მონაცემები ნ. სემიონოვის [72] და კარმილოვა, ნალბანდიანი, სემიონოვის შრომების მიხედვით [81]. განხილული ნივთიერების გარდაქმნის ხარისხის ალბათობის $\omega(t)$ და გარდაქმნის ხარისხის სიჩქარის $d\omega/dt$ საიდენტიფიკაციო კინეტიკური მრუდები აგებულია (2-19)-(2-21) და (2-86) ფორმულების მიხედვით. რადგანაც პროცესი ხასიათდება ინდუქციური პერიოდით, ინტენსიობის ფაქტორი $m=2$ ან $m=3$. ექსპერიმენტული მონაცემების საიდენტიფიკაციო პარამეტრების მნიშვნელობებად აღებულია: $\omega = \pi = 0,68$, $t = 50$ წმ; ამ ერთად ერთი ექსპერიმენტული მონაცემის მიხედვით ფორმულა (2-86)-ის გამოყენებით გაანგარიშებულია რეაქციის სიჩქარის კონსტანტის მნიშვნელობები $m=2$ და $m=3$ სამისათვის:

$$K_{m=2} = \frac{2}{50} \ln \frac{1}{1-0.68^{1/2}} = 0,069 \text{ 1/წმ}; \quad (2-87)$$

$$K_{m=3} = \frac{3}{50} \ln \frac{1}{1-0.68^{1/3}} = 0.13 \text{ 1/წმ}; \quad (2-88)$$

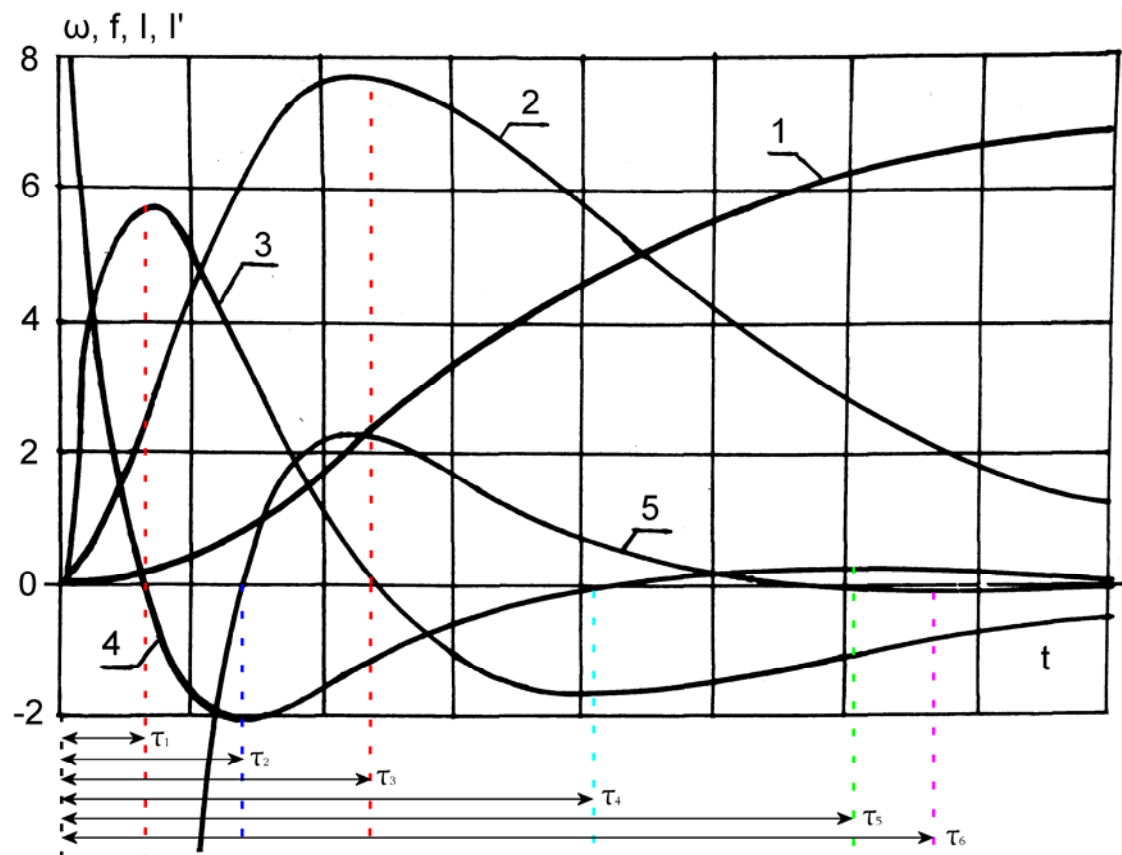


ნახ. 19 წყალბადის წვის პროცესის კინეტიკური (A_1, A_2) და ექსტრემალური (B_1, B_2) მრუდები. ნახ. 4

წყალბადის წვის პროცესის მონაცემების (წერტილები) იდენტიფიკაცია განხორციელებულია $K_{m=3}$ და $K_{m=2}$ -სათვის. იდენტიფიკაციის სიზუსტე მიღწეულია, როდესაც $m=3$. B_1, B_2 მრუდები ახასიათებს პროცესის განვითარების სიჩქარეს. ნახ. 19-ზე წარმოდგენილია წყალბადის წვის იდენტიფიკაციის კინეტიკური მრუდები (A_1, A_2), როდესაც ინტენსივობის ფაქტორი $m=3$, ექსპერიმენტული წერტილების აპროქსიმაციის ხარისხი გაცილებით ზუსტია, ვიდრე როდესაც $m=2$. აქედან გამომდინარე რეაქციის სიჩქარის კონსტანტის რიცხვითი მნიშვნელობით $K_{m=3} = 0,131/\text{წმ}$ განსაზღვრულია პროცესის სხვა მნიშვნელოვანი კინეტიკური და დინამიკური ექსტრემალური ფუნქციური და დროითი პერიოდების შესაბამისი მახასიათებლები. ცხრილი 4-ში შემოთავაზებული თეორიული ფორმულების მიხედვით. დადგენილი რეაქციის სიჩქარის კონსტანტის K -მნიშვნელობით და კინეტიკური და დინამიკური მონაცემების საფუძველზე, მკვლევარს ეძლევა უნიკალური საშუალება ხარისხობრივად და რაოდენობრივად შეაფასოს განხორციელებული

პროცესი. ამ თეორიული მონაცემების საფუძველზე მკვლევარს შეუძლია გადაწყვიტას მთელი რიგი პრაქტიკული ამოცანები, რომლებიც დაკავშირებულია ოპტიმალური რეჟიმის გაანგარიშებაზე, აპარატის დაპროექტირებაზე, ტექნოლოგიური პროცესის მართვაზე და სხვა. ექსტრემალური მახასიათებლების გამოყენებით შესაძლებელია აგრეთვე არასტაციონარული პროცესის კინეტიკური და დინამიკური მახასიათებლების ანალიზი და იდენტიფიკაცია.

ნახ. 20-ზე წარმოდგენილი კინეტიკური და ექსტრემალური მახასიათებლები წარმატებით შეიძლება გამოყენებული იქნეს ქიმიური რეაქციების და ფაზური გარდაქმნების პროცესების იდენტიფიკაციის, ანალიზის და სინთეზის ამოცანების გადაწყვეტიცათვის.



ნახ. 20 კინეტიკური ექსტრემალური მახასიათებლები $m=3$. წარმოქმნილი სტრუქტურის განვითარების ალბათობა (1), სიჩქარე (2), მაღალი რიგის წარმოებულები (3-5).

2.2.8. ფაზური გარდაქმნის პროცესების იდენტიფიკაცია

ფაზური გარდაქმნის პროცესების კლასს მიეკუთვნება შრობის მეთოდების განხორციელების ფართო სპექტრი. შრობის პროცესების კინეტიკის ექსპერიმენტული გამოკვლევები მიგვითითებს, რომ ტენის მოცილება (აორთქლება) საშრობი მასალიდან ინერციული პროცესია, რომელიც დროში ცვალებადი სიჩქარით მიმდინარეობს. არსებული კინეტიკური ფორმულები აღწერენ შრობის ისეთ გაიდებულ პირობებს, როდესაც ტენის აორთქლების სიჩქარე მიჩნეულია მუდმივ სიდიდედ. რასაკვირველია ასეთი კინეტიკური ფორმულები ვერ უზრუნველყოფს შრობის პროცესის კინეტიკის გაანგარიშების საჭირო სიზუსტეს [57, 58].

შრობის პროცესის წინამდებარე იდენტიფიკაციის მეთოდიკა ეყრდნობა ახალი კინეტიკური ფორმულის გამოყენებას, რომელიც ითვალისწინებს რეალური პროცესის დამახასიათებელ ფაქტორებს: ინერციულობასა და აორთქლების ცვალებად სიჩქარეს. შრობის პროცესის ახალი კინეტიკური ფორმულა მიღებულია ბერნულის არაწრფივი დიფერენციალური განტოლების ამოხსნის [52, 55] გარკვეული გარდაქმნის შედეგად და მას აქვს შემდეგი სახე:

გასაშრობ მასალიდან ტენის აორთქლების პროცესის კინეტიკა:

$$\omega = \omega_{\max} \left[1 - \exp\left(-\frac{K}{m} \tau\right) \right]^m \quad (2-89)$$

$$\text{სადაც} \quad K = \beta \frac{L}{S} : \quad (2-90)$$

კინეტიკური ფორმულის (2-89) წარმოებული, რომელიც ახასიათებს ტენის აორთქლების პროცესიც სიჩქარეს, წარმოდგენილია შემდეგი სახით:

$$F(t) = \frac{dw}{dt} = \frac{K}{m} \exp\left(-\frac{K}{m} t\right) \left[1 - \exp\left(-\frac{K}{m} \tau\right) \right]^m \quad (2-91)$$

შრობის პროცესში მასალის ტენშემცველობის ცვლილების კინეტიკა განისაზღვრება შემდეგი ფორმულით:

$$w = w_{\max} \left\{ 1 - \left[1 - \exp\left(-\frac{K}{m} \tau\right) \right]^m \right\} \quad (2-92)$$

სადაც $\omega, \omega_{\max}$ - შრობის მასალის მიმდინარე და მაქსიმალური (საწყისი) ტენიანობები, %

K - შრობის პროცესის სიჩქარის კონსტანტა, წმ.⁻¹;

β - მასაგაცემის კოეფიციენტი, მ.წმ.⁻¹;

S - მასალის ზედაპირის საშუალო ფართი, მ.²;

L - მასალის ზედაპირის საშუალო ფართის შემომსაზღვრელი პერიმეტრი, მ.;

m - ფაქტორი, რომელიც ახასიათებს მასალის გეომეტრიულ ფორმას და აორთქლების ინტენსიობას. (ღერო-ებისათვის $m=1$, ფირფიტებისათვის $m=2$, მოცულობითი სხეულებისათვის $m=3$).

შრობის პროცესის კინეტიკური ფორმულის იდენტიფიკაციის საკითხი განხილულია ორგანული მიცელისებრი მასის შრობის ექსპერიმენტული მონაცემების მიხედვით. ეს მონაცემები მიღებულია სანკტ-პეტერბურგის ქიმიურ-ფარმაცევტული ინსტიტუტის მიერ [59]. ნახ. 21 - ნახ. 22-ზე წარმოდგენილია სხვადასხვა გეომეტრიული ფორმის მქონე საშრობი მასის ტენიანობის ცვლილების ექსპერიმენტული მონაცემები დროში და შესაბამისი S -სებრი თეორიული კინეტიკური მრუდები, რომლებიც გაანგარიშებულია (2-89)-(2-93) ფორმულის გამოყენებით. ნახ. 22 - ნახ. 23-ზე მოცემულია (2-89) ფორმულის პირველი წარმოებულის მიხედვით აგებული ტენის აორთქლების სიჩქარის განაწილების მრუდები შრობის პროცესის სიჩქარის კონსტანტის (K) იდენტიფიცირებული მნიშვნელობებისათვის. ამავე ნახ. 22-ზე დატანილია საშრობი მასის ნიმუშების გეომეტრიული ზომები. K კონსტანტის რიცხვითი მნიშვნელობები განსაზღვრულია (2-93) ფორმულიდან, დამახასიათებელი ექსპერიმენტული მონაცემების საფუძველზე. ჩვენს შემთხვევაში დამახასიათებელ ექსპერიმენტულ მონაცემებად მიჩნეულია შრობის პროცესის ის დრო, როდესაც საშრობი მასალის ტენიანობა (w) დაყვანილია 10%-მდე და შესაბამისად უდრის: $t_1=22 \cdot 60=1320$ წმ; $t_2=50 \cdot 60=3000$ წმ;

$t_3=90*60=5400$ წმ. ამ მონაცემების საფუძველზე (2-89) ფორმულის მიხედვით გაანგარიშებულია K კონსტანტის რიცხვითი მნიშვნელობები:

$$K = \frac{m}{t_3} \ln \frac{1}{(1 - \omega_3 / \omega_{\max})^{1/m}} \quad (2-93)$$

$$K_1 = \frac{2}{1320} \ln \frac{1}{1 - (1 - 10/60)^{1/2}} = 3,69 * 10^{-3} \frac{1}{c} \quad (2-94)$$

$$K_2 = \frac{2}{3000} \ln \frac{1}{1 - (1 - 10/60)^{1/2}} = 1,63 * 10^{-3} \frac{1}{c}; \quad (2-95)$$

$$K_3 = \frac{2}{5400} \ln \frac{1}{1 - (1 - 10/60)^{1/2}} = 0,90 * 10^{-3} \frac{1}{c}. \quad (2-96)$$

K_1, K_2, K_3 რიცხვითი მნიშვნელობების შესაბამისად კინეტიკური ფორმულების (2-89)-(2-93) მიხედვით ნახ. 21 - ნახ. 23-ზე წარმოდგენილია მასალაში ტენზომცველობის ცვლილების და აორთქლებული ტენის სიჩქარის კინეტიკური მრუდები.

შრობის სიჩქარის კონსტანტის (K) და საშრობი მასალის გეომეტრიული ფორმის მონაცემების გათვალისწინებით (2-90) ფორმულის მიხედვით გაანგარიშებულია მასაგაცემის კოეფიციენტის შესაბამისი მნიშვნელობები:

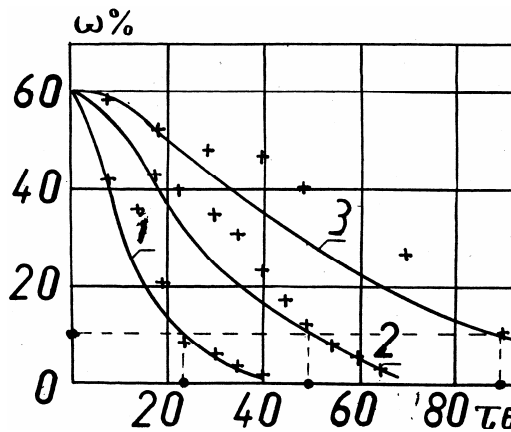
$$\beta_1 = K_1 \frac{S_1}{L_1} = 3,69 \times 10^{-3} \frac{18}{18} = 3,69 \times 10^{-3} \text{ მ } 1/\text{წმ}; \quad (2-97)$$

$$\beta_2 = K_2 \frac{S_2}{L_2} = 1,63 \times 10^{-3} \frac{36}{24,6} = 2,38 \times 10^{-3} \text{ მ } 1/\text{წმ}; \quad (2-98)$$

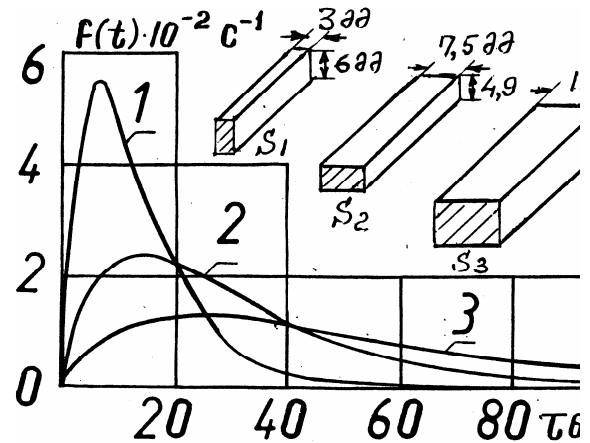
$$\beta_3 = K_3 \frac{S_3}{L_3} = 0,9 \times 10^{-3} \frac{90}{39} = 2,07 \times 10^{-3} \text{ მ } 1/\text{წმ}. \quad (2-99)$$

რადგანაც შრობის მიცელისებრი მასის გეომეტრიული ფორმები შეესაბამება ორგანოზომილებიან ფირფიტებს, კინეტიკური ფორმულის პარამეტრს m-ს მინიჭებული აქვს შესაბამისი მნიშვნელობა (m=2).

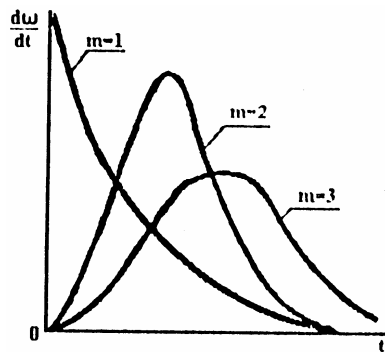
ცხრილი 5-ში შეტანილია შრობის პროცესის იდენტიფიკაციის შედეგად მიღებული მონაცემები, რომლებიც ნათლად გვიჩვენებენ ექსპერიმენტული და თეორიული მნიშვნელობების დამაკმაყოფილებელ მიახლოებას.



ნახ. 21 სხვადასხვა გეომეტრიული ფორმის მიცელისებრი მასის შრობის პროცესის კინეტიკა. (+) ექსპერიმენტული მონაცემები [59]; მუქი ხაზი თეორიული მრუდები აგებული (2-92) ფორმულის მიხედვით: 1- K_1 , 2 - K_2 , 3 - K_3



ნახ. 22 შრობის სიჩქარის თეორიული კინეტიკური მრუდები $F(t)$ ფუნქციის დამახასიათებელი მაქსიმალური მნიშვნელობით, რომლებიც განსაზღვრავს შრობის პროცესის ზრდად და კლებადი სიჩქარის პერიოდებს სხვადასხვა გეომეტრიული ფორმის მიცელისებური მასისათვის: 1 - S_1 , 2 - S_2 , 3 - S_3



ნახ. 23 შრობის პროცესის სიჩქარის თეორიული კინეტიკური მრუდები სხვადასხვა გეომეტრიული ფორმის საშრობი მასალებისათვის ($m=1$, $m=2$, $m=3$)

ნახ. 23-ზე წარმოდგენილი კინეტიკური მრუდები ასახავს საშრობი მასალიდან აორთქლებული ტენის სიჩქარის კანონზომიერებას, რომელიც შეესაბამება K_1 , K_2 და K_3 შრობის პროცესის სიჩქარის კონსტანტების რიცხვით მნიშვნელობებს. სიჩქარის კინეტიკური მრუდები აგებულია (2-91) ფორმულით. შრობის პროცესის სიჩქარის კინეტიკური მრუდების ანალიზის შედეგად (ნახ. 22 - ნახ. 23) შეგვიძლია ვიმსჯელოთ შრობის პროცესის ზრდადი და კლებადი პერიოდების შესახებ $F(t)$ ფუნქციის დამახასიათებელი მაქსიმუმებით. ნახ. 22 - ნახ. 23-ზე წარმოდგენილია $F(t)$ ფუნქციის დამახასიათებელი თეორიული კინეტიკური მრუდები

სხვადასხვა გეომეტრიული ფორმის საშრობი მასალებისათვის ($m=1$, $m=2$, $m=3$).

ცხრილი 5 საშრობი მასის ტენიანობის ცვლილების ექსპერიმენტული და თეორიული მნიშვნელობები

t_x 60წმ.	$K_3=4.52 \cdot 10^{-4} \text{წმ}^{-1}$			$K_2=8.13 \cdot 10^{-4} \text{წმ}^{-1}$			$K_1=18.48 \cdot 10^{-4} \text{წმ}^{-1}$		
	w%		$(\Delta w/w) \cdot 100$	w%		$(\Delta w/w) \cdot 100$			$(\Delta w/w) \cdot 100$
	ექსპ.	თეორ.	%	ექსპ.	თეორ.	%	ექსპ.	თეორ.	%
0	60	60	0	60	60	0	60	60	0
10	58	57.7	5	52	51	1.6	35	35	0
20	50	50	0	38	37	1.6	20	12	13
30	47	42	8.3	34	25	15	5	5	0
40	42	34	13	22	16	10	2	1.5	0.8
50	36	27	15	10	10	0	-	-	-
60	-	21	-	5	6	1.6	-	-	-
70	24	17	11.6	-	4	-	-	-	-
80	-	13	-	-	2	-	-	-	-
90	10	10	0	-	1.5	-	-	-	-
100	5	7	3	-	0.25	-	-	-	-

განხილული იდენტიფიკაციის მეთოდის (2-89)-(2-93) ფორმულების გამოყენებით მკვლევარს აძლევს შესაძლებლობას მინიმალურ ექსპერიმენტულ მონაცემებზე დაყრდნობით გაიანგარიშოს კინეტიკური კოეფიციენტების K , β , m რიცხვითი მნიშვნელობები და განსაზღვროს შრობის პროცესის ხანგრძლივობა, რომელიც უზრუნველყოფს საშრობ მასალაში სასურველ ტენიანობას. კინეტიკური კოეფიციენტების რიცხვითი მნიშვნელობების განსაზღვრის სიზუსტე დამოკიდებულია, როგორც მასალის ტენიანობის ექსპერიმენტული მონაცემების უტყუარობაზე, ასევე m პარამეტრის სიდიდის შერჩევაზე საშრობი მასალის გეომეტრიული ფორმის შესაბამისად.

შრობის პროცესის კინეტიკის შემოთავაზებული იდენტიფიკაციის მეთოდის (2-89)-(2-93) ფორმულების გამოყენებით არ შემოიფარგლება მხოლოდ კინეტიკური პარამეტრების K , β , m რიცხვითი მნიშვნელობების დადგენით. განხილული იდენტიფიკაციის მეთოდის საფუძველზე შეიძლება გადავწყვიტოთ პროცესის გაანგარიშების, დაპროექტებისა და

ოპტიმალური მართვის ამოცანები დამახასიათებელი პერიოდების გათვალისწინებით.

2.3. დანართი

2.3.1. თბოგადაცემის პროცესის სასაზღვრო ამოცანის ანალიზური ამოხსნა მოძრავ ორფაზიან ნაკადებს შორის სტაციონარული პირობისათვის.

სტაციონარული პროცესის შემთხვევაში დიფერენციალურ განტოლებათა სისტემა (1-17), (1-18) მიიღებს შემდეგ სახეს (იხ. თავი 2.1)

–m ფაზისთვის

–s ფაზისთვის

$$\frac{dt_m}{dx} = -K_m(t_m - t_s); \quad (2-100) \quad \frac{dt_s}{dx} = -K_s(t_m - t_s). \quad (2-101)$$

დიფერენციალური განტოლებათა სისტემა (2-100)-(2-101)

წარმოვადგინოთ შემდეგი სახით:

$$\frac{d(t_m - t_s)}{dx} = -(K_1 + K_2)(t_m - t_s); \quad (2-102)$$

შემოვიტანოთ შემდეგი აღნიშვნები:

$$t_m - t_s = U; \quad (2-103) \quad t_{m,o} - t_{s,o} = U_o; \quad (2-104)$$

განტოლება (2-100)-(2-103)-ის გათვალისწინებით მიიღებს შემდეგ სახეს:

$$\frac{dU}{dx} = -(K_1 + K_2)U; \quad (2-105)$$

ავიღოთ ინტეგრალი (2-105)-დან, მივიღებთ:

$$\int_{U_o}^U \frac{dU}{U} = -(K_1 + K_2) \int_0^x dx \quad (2-106) \quad \ln U - \ln U_o = -(K_1 + K_2)x \quad (2-107)$$

$$\ln \frac{U}{U_o} = -(K_1 + K_2)x \quad (2-108) \quad U = U_o \exp[-(K_1 + K_2)x] \quad (2-109)$$

ანუ (2-103) და (2-104) გათვალისწინებით (2-109) გადავწეროთ, მივიღებთ:

$$t_m - t_s = (t_{m,o} - t_{s,o}) \exp[-(K_1 + K_2)x] \quad (2-110)$$

განტოლება (2-110) დან $t_m - t_s$ მნიშვნელობა ჩავსვათ (2-100)-ში, მივიღებთ:

$$\frac{dt_m}{dx} = -K_1(t_{m,o} - t_{s,o}) \exp[-(K_1 + K_2)x] \quad (2-111)$$

$$dt_m = -K_1(t_{m,o} - t_{s,o}) \exp[-(K_1 + K_2)x] dx \quad (2-112)$$

განტოლება (2-112)-ის ინტეგრირების შედეგად მივიღებთ:

$$\int_{t_{m,o}}^{t_{m,k}} dt_m = -K_1(t_{m,o} - t_{s,o}) \int_0^x \exp[-(K_1 + K_2)x] dx \quad (2-113)$$

$$t_{m,x} - t_{m,o} = \frac{K_1}{K_1 + K_2} (t_{m,o} - t_{s,o}) \{ \exp[-(K_1 + K_2)x] - 1 \} \quad (2-114)$$

$$\begin{aligned} t_{m,x} &= t_{m,o} + \frac{K_1}{K_1 + K_2} (t_{m,o} - t_{s,o}) \frac{1 - \exp(K_1 + K_2)x}{\exp(K_1 + K_2)x} = \\ &= \frac{t_{m,o} [K_2 \exp(K_1 + K_2)x + K_1] + t_{s,o} K_1 [\exp(K_1 + K_2)x - 1]}{(K_1 + K_2) \exp(K_1 + K_2)x} = \\ &= \frac{t_{m,o} [\exp(K_1 + K_2)x + K_1 / K_2] + t_{s,o} K_1 / K_2 [\exp(K_1 + K_2)x - 1]}{(K_1 / K_2 + 1) \exp(K_1 + K_2)x} \end{aligned} \quad (2-115)$$

თუ განტოლება (2-110) დან $t_m - t_s$ მნიშვნელობას ჩავსვით (2-101)-ში, მივიღებთ:

$$\frac{dt_s}{dx} = K_2(t_{m,o} - t_{s,o}) \exp[-(K_1 + K_2)x] \quad (2-116)$$

განტოლება (2-116) ინტეგრირებისა და გარდაქმნის შედეგად, მივიღებთ:

$$t_{s,x} = \frac{t_{m,o} [\exp(K_1 + K_2)x - 1] + t_{s,o} [K_1 / K_2 \exp(K_1 + K_2)x + 1]}{(K_1 / K_2 + 1) \exp(K_1 + K_2)x} \quad (2-117)$$

მიღებული (2-115) და (2-117) კინეტიკური ფორმულები ახასიათებს ტემპერატურის ცვლილებას მოძრავ m და s ფაზებს შორის, როდესაც თბომცვლელ დანადგარში განხორციელებულია წინაღდენითი ნაკადი.

განხილული სასაზღვრო ამოცანის ანალიზური ამოხსნის მიხედვით მიღებულია კინეტიკური ფორმულები თანმხვედრი ნაკადისათვის და კერძო შემთხვევებისათვის, როდესაც $t_m = t_{m,o} = const$; $t_s = t_{s,o} = const$. აღნიშნული სასაზღვრო ამოცანები განხილულია 2.1.2 ნაწილში. ქვემოთ მოყვანილია თბოგადაცემის პროცესის ოთხი ძირითადი ტიპური მოდელის კინეტიკური ფორმულები ანალიზის, მოდელირებისა და ალგორითმების შედგენის მისაღებ ფორმებში.

წინაღდენიანი ნაკადისათვის

$$-m \text{ ფაზისთვის} \quad t_m = \frac{t_{m,0} [P \cdot \exp(\lambda) - 1] + t_{s,0} \cdot P [\exp(\lambda_K) - \exp(\lambda)]}{P \cdot \exp(\lambda_K) - 1}; \quad (2-118)$$

$$-s \text{ ფაზისთვის} \quad t_s = \frac{t_{m,0} [\exp(\lambda) - 1] + t_{s,0} [P \cdot \exp(\lambda_K) - \exp(\lambda)]}{P \cdot \exp(\lambda_K) - 1}. \quad (2-119)$$

პირდაპირდენითი ნაკადისათვის

$$-m \text{ ფაზისთვის} \quad t_m = \frac{t_{m,0} [\exp(\lambda_1) + P] + t_{s,0} \cdot P [\exp(\lambda_1) - 1]}{(P + 1) \exp(\lambda_1)}; \quad (2-120)$$

$$-s \text{ ფაზისთვის} \quad t_s = \frac{t_{m,0} [\exp(\lambda_1) - 1] + t_{s,0} [P \cdot \exp(\lambda_1) + 1]}{(P + 1) \exp(\lambda_1)}. \quad (2-121)$$

ნაკადი მუდმივი ტემპერატურის მნიშვნელობით m ფაზაში $t_m = t_{m,o} = \text{const}$

$$-s \text{ ფაზისთვის} \quad t_s = \frac{t_{m,0} [\exp(\lambda_s) - 1] + t_{s,0}}{\exp(\lambda_s)}. \quad (2-122)$$

ნაკადი მუდმივი ტემპერატურის მნიშვნელობით s ფაზაში $t_s = t_{s,o} = \text{const}$

$$-m \text{ ფაზისთვის} \quad t_m = \frac{t_{m,0} + t_{s,0} \cdot [\exp(\lambda_m) - 1]}{\exp(\lambda_m)}; \quad (2-123)$$

სადაც

$$\lambda = (K_1 - K_2)(h - x); \quad (2-124) \quad \lambda_K = (K_1 - K_2) \cdot h; \quad (2-125)$$

$$\lambda_1 = (K_1 + K_2)x; \quad (2-126) \quad P = \frac{K_2}{K_1}; \quad (2-127)$$

$$K_1 = K_m \cdot \frac{1}{v_m}; \quad (2-128) \quad K_2 = K_s \cdot \frac{1}{v_s}; \quad (2-129)$$

$$K_m = \frac{1}{\rho_m \cdot c_m} \alpha \frac{L_m}{F_m}; \quad (2-130) \quad K_s = \frac{1}{\rho_s \cdot c_s} \alpha \frac{L_m}{F_s}. \quad (2-131)$$

$$\lambda_m = K_m x; \quad (2-132) \quad \lambda_s = K_s x; \quad (2-133)$$

2.3.2. თბოგადაცემის პროცესის სასაზღვრო ამოცანის ანალიზური ამოხსნა მოძრავ ორფაზიან ნაკადებს შორის არასტაციონარული პირობისათვის.

არასტაციონარული პროცესის სასაზღვრო ამოცანა (1-17)-(1-24) (იხ. თავი 2.1) წარმოდგენილია შემდეგი სახით:

$$\text{--m ფაზისთვის} \quad \frac{\partial t_m}{\partial \tau} = -K_m(t_m - t_s) - v_m \frac{\partial t_m}{\partial x}; \quad (2-134)$$

$$\text{--s ფაზისთვის} \quad \frac{\partial t_s}{\partial \tau} = -K_s(t_m - t_s) - v_s \frac{\partial t_s}{\partial x}, \quad (2-135)$$

სადაც

$$K_m = \alpha \frac{1}{C_m \cdot \rho_m} \cdot \frac{L_m}{f_m}, \quad (2-136) \quad K_s = \alpha \frac{1}{C_s \cdot \rho_s} \cdot \frac{L_m}{f_s}. \quad (2-137)$$

(2-134), (2-135) სისტემის ამოხსნისათვის მიღებულია შემდეგი საწყისი და სასაზღვრო პირობები:

საწყისი პირობები

$$t_m|_{\tau=0} = f_m(x), \quad (2-138) \quad t_s|_{\tau=0} = f_s(x). \quad (2-139)$$

სასაზღვრო პირობები

$$t_m|_{x=0} = t_{m,o} + |\delta t_m|, \quad (2-140) \quad t_m|_{x=h} = t_{s,o} + |\delta t_s|, \quad (2-141)$$

ჩამოყალიბებული სასაზღვრო ამოცანა (2-134)-(2-141) ახასიათებს ტემპერატურის ცვლილებას არასტაციონარული პირობებისათვის მოძრავ ორფაზიან თბოგადაცემას ნაკადებს შორის დროში (τ) და (x) ღერძის გასწვრივ.

სიდიდეები δt_m , δt_s ტემპერატურების მოსალოდნელი გადახრის სიდიდეებია m, s ფაზეფში ნორმალურ (დავალებულ) მნიშვნელობებიდან დანადგარის შესასვლელზე.

თბო-და მასაგადაცემის პროცესების ფუნდამენტური მიზეზ-შედეგობრივი კანონზომიერება განაპირობებს პოტენციალური ველის (ტემპერატურის, კონცენტრაციის) სიმეტრიულ განვითარებას დროში და სივრცეში. ამ ექსპერიმენტული დაკვირვებების შედეგებზე დაყრდნობით არასტაციონარული სასაზღვრო ამოცანის ამოხსნა მიზანშეწონილია ვეძებოთ სტაციონარული და არა სტაციონარული ფუნქციების ჯამის სახით:

$$U_i(t, x) = U_i(t) + U_i(x) \quad (2-142)$$

სადაც $i = m, s$; ფუნქცია U თბოგადაცემის შემთხვევაში განსაზღვრავს ტემპერატურას (t); მასაგადაცემის შემთხვევაში-კონცენტრაციას (c).

გამოვსახოთ (2-134) და (2-135) სისტემა m და s ფაზების მიმართ, მივიღებთ შემდეგ სისტემას:

m ფაზისათვის

$$\frac{\partial^2 U_m}{\partial \tau} + (K_m + K_s) \frac{\partial^2 U_m}{\partial \tau^2} + (v_m + v_s) \frac{\partial^2 U_m}{\partial \tau \partial x} + v_m v_s \frac{\partial^2 U_m}{\partial x^2} + (K_m v_s + K_s v_m) \frac{\partial U_m}{\partial x} = 0 \quad (2-143)$$

s ფაზისათვის

$$\frac{\partial^2 U_s}{\partial \tau} + (K_m + K_s) \frac{\partial^2 U_s}{\partial \tau^2} + (v_m + v_s) \frac{\partial^2 U_s}{\partial \tau \partial x} + v_m v_s \frac{\partial^2 U_s}{\partial x^2} + (K_m v_s + K_s v_m) \frac{\partial U_s}{\partial x} = 0 \quad (2-144)$$

განვახორციელოთ (2-142) განტოლების დიფერენცირება და ჩამოვაცალიბოთ წარმოებულები, რომლებსაც შეიცავს (2-143) და (2-144) განტოლებათა სისტემა, მივიღებთ:

m და s სისტემისათვის

$$\frac{1}{v_m v_s} \frac{\partial^2 U_i}{\partial \tau^2} + \frac{K_m + K_s}{v_m v_s} \frac{\partial U_i}{\partial \tau} + \frac{\partial^2 U_i}{\partial x^2} + \frac{K_m v_s + K_s v_m}{v_m v_s} \frac{\partial U_i}{\partial x} = 0 \quad (2-145)$$

განტოლება (2-145) თავის სტრუქტურაში აერთიანებს სტაციონარულს და არა სტაციონარულ შემადგენელ ნაწილებს და ახასიათებს ფუნქციის (U) ცვლილებას დროში და სივრცეში (x ღერძის გასწვრივ) განტოლება (2-145)-ის ბოლო ორი წევრი ახასიათებს სტაციონარულ პროცესს და უდრის ნულს:

$$\frac{d^2 U_i}{dx^2} + \frac{K_m v_s + K_s v_m}{v_m v_s} \frac{dU_i}{dx} = 0 \quad (2-146)$$

აქედან გამომდინარე, მართებულია ჩავწეროთ, რომ

$$\frac{d^2 U_i}{d\tau^2} + (K_m + K_s) \frac{dU_i}{d\tau} = 0 \quad (2-147)$$

მიღებული საწყისი დებულების თანახმად "პოტენციალური ველის სიმეტრიული განვითარებია" სასაზღვრო ამოცანის ზოგადი ამოხსნა არასტაციონარული პირობებისათვის წარმოდგენილია შემდეგი სახით:

$$U_i(t, x) = U_i(x) + A_i \exp[-(K_m - K_s)\tau] + B_i \quad (2-148)$$

A_i და B_i კოეფიციენტების მნიშვნელობების განსაზღვრის შემდეგ საწყისი (2-138), (2-139) სასაზღვრო პირობების (2-140), (2-141) გათვალისწინებით მივიღებთ არასტაციონარული ამოცანის ამოხსნას თბოგადაცემის პროცესისათვის ($U = t$):

$$\begin{matrix} -m \\ \text{ფაზისთვის} \end{matrix} \quad t_m(\tau_1 x) = t_m(x) + K_m \frac{\delta t_m - \delta t_s}{K_m + K_s} \exp[-(K_m + K_s)] - \frac{K_m \delta t_s + K_s \delta t_m}{K_m + K_s} \quad (2-149)$$

$$\begin{matrix} -s \\ \text{ფაზისთვის} \end{matrix} \quad t_s(\tau_1 x) = t_s(x) + K_s \frac{\delta t_m - \delta t_s}{K_m + K_s} \exp[-(K_m + K_s)] - \frac{K_m \delta t_s + K_s \delta t_m}{K_m + K_s} \quad (2-150)$$

სადაც $t_m(x)$ და $t_s(x)$ მნიშვნელობები განისაზღვრება სტაციონარული სასაზღვრო ამოცანების ამოხსნების მიხედვით (იხ. დანართი 3.1): წინაღუდნითი ნაკადისათვის (2-118), (2-119) და პირდაპირდენით ნაკადისათვის (2-120), (2-121) ფორმულების შესაბამისად. სტაციონარული რეჟიმის შემთხვევაში შეშფოთების მნიშვნელობები $\delta t_m, \delta t_s$ შეიძლება მივიჩნიოთ ნულის ტოლად და თბოგადაცემის პროცესის ანალიზისათვის ვისარგებლოთ (2-118), (2-119) ან (2-120), (2-121) კინეტიკური ფორმულებით.

2.3.3. თბოგადაცემის პროცესის მატემატიკური მოდელირება შესრულებული საოფისე პროგრამა Excel-ში

თბოგადაცემის პროცესის მათემატიკური მოდელირება

გარსაცმის დიამეტრი, D	0.6 მ	t ref.	ფაზა	ტაწყ	μ, პწმ	λ, ვტ/(მ·K)	β, 1/K	α _ფ , მ
მოლის დიამეტრი, d	0.025 მ	82	1	100	0.000435	0.663	0.00053	0.021
კედლის სისქე	0.002 მ	47	2	20	0.000656	0.628	0.00039	0.028
მოლის სიგრძე, H	6 მ	t მოლი						
მოლის რიცხვი, n	261	1 სველა		65				
კედლის, λ	46.5 ვტ/(მ·K)	0.032 მ		73				
სიგრძე	ფაზა	ნეფიერება	ρ, კგ/მ³	c _p , ჯ/(კგ·K)	ბარიკა	L სმ	S მ²	α _ფ , ვტ/(მ²·K)
მოლუბის სიგრძე	1	წაბლი	983	4190	4.50	18.859	0.09035429	0.051
მოლითაშორისი	2	წაბლი	992	4190	3.00	18.859	0.1545	0.020
				K		169	p=K1/K2	
							0.66666667	
							K1, K2	
							1/მ	
							0.1692771	
							0.2539157	

წინაღობითი ნაკადი

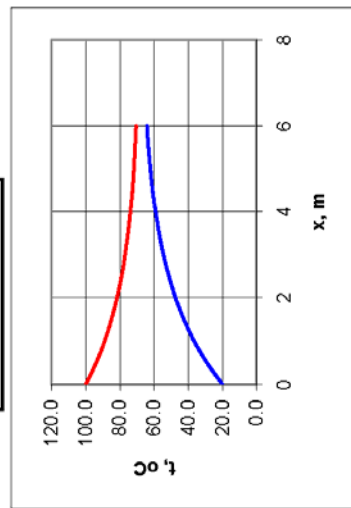
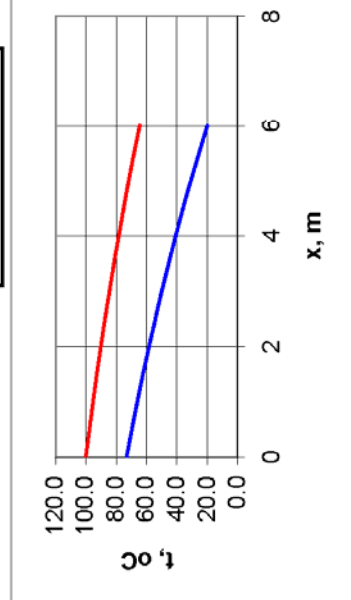
x, მ	Lambda	T1	T2
0	-0.507831361	100.0	73.2
0.6	-0.457048216	97.2	69.0
1.2	-0.406265081	94.3	64.6
1.8	-0.355481946	91.2	60.0
2.4	-0.30469881	87.9	55.1
3.0	-0.253915675	84.5	50.0
3.6	-0.20313254	80.9	44.6
4.2	-0.152349405	77.1	38.9
4.8	-0.10156627	73.1	32.9
5.4	-0.050783135	68.9	26.6
6	0	64.5	20.0
		668721	668721 კვტ

თანხვედრი ნაკადი

Lambda	T1	T2
0	100.0	20.0
0.263916	92.8	30.8
0.507831	87.3	39.1
0.761747	82.9	45.6
1.015663	79.6	50.6
1.269578	77.0	54.5
1.523494	75.0	57.5
1.77741	73.4	59.9
2.031325	72.2	61.7
2.285241	71.3	63.1
2.539157	70.5	64.2
		555735
		555735 კვტ

Re	Pr	Gr
2404	2.75	2458846
817	4.38	1842904

Nu'	Nu
13.64	13.64
12.41	12.41



2.3.4. სტატიკური არაწრფივი დინამიკური სისტემის სასაზღვრო ამოცანის ამოხსნა

სასაზღვრო ამოცანას აქვს შემდეგი სახე:

$$\frac{dt}{d\tau} = K_1 \cdot t^n - K_2 \cdot t; \quad (2-151)$$

$$t|_{\tau=0} = t_0; \quad (2-152) \quad t|_{\tau \rightarrow \infty} = t_{\max}. \quad (2-153)$$

სასაზღვრო ამოცანის ამოხსნისათვის შემოვიტანოთ ახალი ცვლადი $U = t^{1-n}$ [64]. არაწრფივი დიფერენციალური განტოლება (2-151) გარკვეული გარდაქმნის შედეგად იღებს შემდეგ სახეს:

$$\frac{dU}{d\tau} + (1-n)K_2U = (1-n)K_1 \quad (2-154) \quad \text{ან} \quad \frac{dU}{d\tau} + (1-n)K_2U - (1-n)K_1 = 0 \quad (2-155)$$

წრფივი განტოლების (2-155) -ს ამოხსნას აქვს შემდეგი სახე:

$$U = \exp[-\int (1-n)K_2 d\tau] \cdot [\int \exp^{\int (1-n)K_2 d\tau} \cdot (1-n)K_1 / K_2 d\tau + C] \quad (2-156)$$

ინტეგრირების და t ცვლადის შემოტანის შემდეგ განტოლება (2-156)

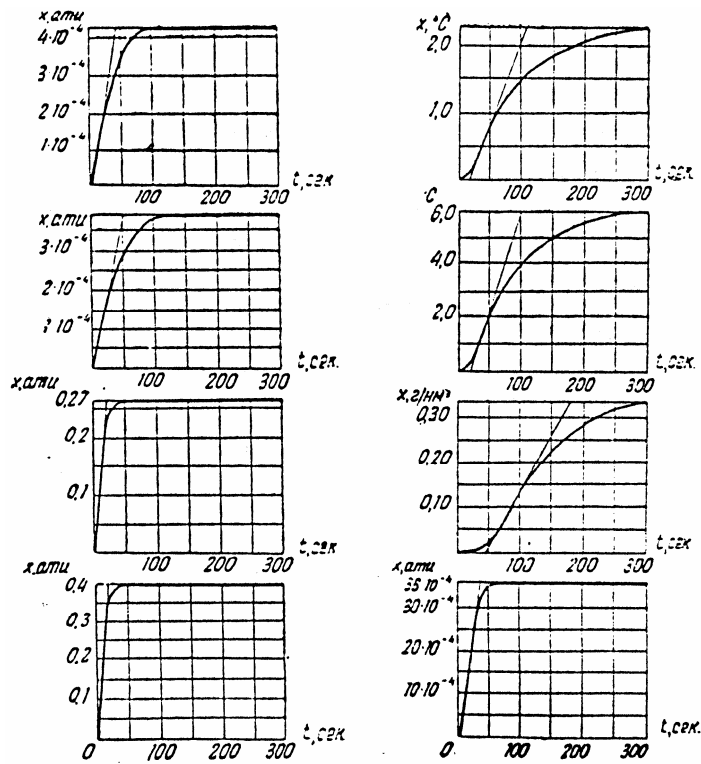
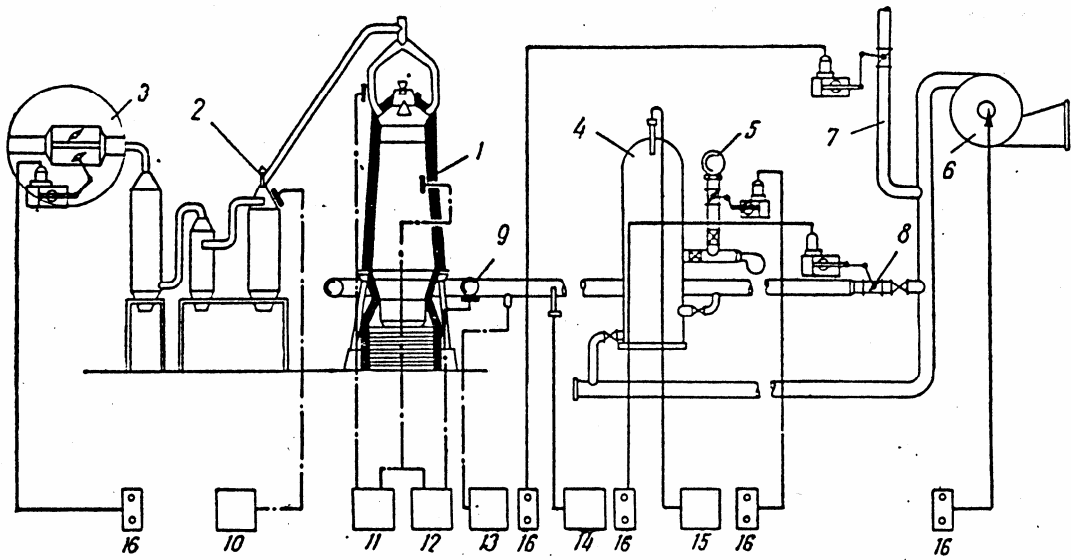
მიიღებს შემდეგ სახეს:

$$t = [K_1 / K_2 + C \exp(-\frac{K_2}{m} \tau)]^m \quad (2-157) \quad \text{სადაც} \quad m = \frac{1}{1-n} \quad (2-158)$$

C კოეფიციენტის განსაზღვრისათვის გამოვიყენოთ საწყისი (2-152) და სასაზღვრო (2-153) პირობები, მივიღებთ:

$$t = t_{\max} K_1 / K_2 [1 - b \exp(-\frac{K_2}{m} \tau)]^m \quad (2-159) \quad \text{სადაც} \quad b = 1 - (t_0 / t_{\max})^{1/m} \quad (2-160)$$

2.3.5. ბრძმედის ღუმელის გაზომვის წერტილების განლაგების სქემა



ბრძმედის ღუმელის დინამიკური მახასიათებლები.

2.3.6. Расчет и моделирование тепловых процессов разделения стабильных изотопов. Гос. фонд алгоритмов и программ (Рег. № Госфап 50900000870; 1990г. ИВЦКП. Груз. НПО ВТИ)

5013 Информационная карта		7992 Инвентарный № в организации-фондодержателе	5517 Регистрационный № ГосфАП	Сроки выполнения работы	
☒ ИК ГосфАП ☐ ИКАП		67 90.01	50900000870	7353 Начало	7362 Окончание
				88.01	90.01
7839 Тип ЭМ	7902 Тип и версия используемой ОС	5715 Язык программирования	7844 Оперативная память		
CM I810	DOC I810	I6	32		
9045 Наименование программного средства					
Расчет и моделирование тепловых процессов разделения стабильных изотопов					
6192 Разработчик					
Таварткиладзе Я.Н., Симонишвили Г.С., Тоидзе М.Ш., Бережани М.Г., Таварткиладзе М.Я., Заридзе Д.Г.					
7965 Разновидность ПС	73 Библиотека программ	7371 Стоимость разработки	5697 Код ОКП		
46 Программный модуль	82 Программная система	5679 Код программы по ЕСПД			
53 Программа	91 Программный комплекс				
64 Пакет программ	28 Информационная структура	8840312.00003 01			
19 Комплект программ	37 Прочие				
7956 Описание при. знака	7947 Описание программы	7920 Текст программы	7974 Спецификация		
		10	3		
Сведения об организации-владельце ФАП		7884 Объем программы			
2493 Код ОКПО	2196 Наименование организации	32			
8840312	ИВЦКП Груз НПО ВТИ				
2897 Телефон	2691 Адрес (индекс, республика, область, город, улица, дом)				
38 11 92	380019, г.Тбилиси, пр.Церетели, 130				
Сведения об организации-разработчике					
2457 Код ОКПО	2151 Наименование организации				
8840312	ИВЦКП Груз НПО ВТИ, Груз.политехнический институт				
2934 Телефон	2655 Адрес (индекс, республика, область, город, улица, дом)				
36 65 95	380019, г.Тбилиси, пр.Церетели, 130				

9091 Краткое наименование (наим.) ПС	5436 Входящий №
9117 Реферат	50900000870
ППС разработан на основе аналитических решений дифференциального уравнения конвективного переноса Фурье-Кирхгофа для типовых тепловых процессов, протекающих в двухфазной системе при прямо- и противотоке. Качественное и количественное преимущество программы заключается в том, что она предусматривает структурную и параметрическую идентификацию математических моделей для типовых тепловых процессов с определением числовых значений коэффициентов теплоподдачи, константы скорости теплопереноса и интенсивности процесса, общей поверхности теплопередачи, количества реагирующих фаз и ряда других параметров, которые обычно рассчитываются по критериальным и приближенным эмпирическим формулам. В результате решения прямой и обратной задач идентификации математических моделей на базе минимальной исходной информации и начальных значений температуры в фазах по длине /высоте/ аппарата. Диалоговый режим дает возможность пользователю осуществить целенаправленный вычислительный эксперимент для анализа, расчета, проектирования и управления тепловыми процессами. Информация оператору представляется в виде графиков распределения температур и таблиц численных значений исходных и расчетных параметров. В программе предусмотрена демонстрационная задача с базой данных.	
7902 Программное средство принято в программу ☒ 13, информационную 31 часть фонда	

5634 Индекс, УДК	5616 Коды тематических рубрик	5607 Индекс рубрикатора ГосфАП
61.01.01	27.35.5.1 50.4.1	06.10.00
Ученая степень, звание	Фамилия, имя, отчество	Подпись МП ФАП
6210	6116 Симонишвили Г.С.	
6228	6116 Таварткиладзе Я.Н.	
	Сулханадзе И.Г.	

ВТИ: Зал. 24 Т. 40000

2.3.7. Расчет и моделирование массообменных процессов разделения стабильных изотопов. Гос. фонд алгоритмов и программ (Рег. № Госфап 50900000871; 1990г. ИВЦКП. Груз. НПО ВТИ)

5013 Информационная карта ☒ ИК ГосфАП ИКАП		7992 Инвентарный № в орг-ганизации-фондодержателе 63 90.01	5517 Регистрационный № ГосфАП 50900000871	Сроки выполнения работы 7353 Начало 7362 Окончание 38.01 90.01	
7839 Тип ЖМ СМ I810	7902 Тип и версия используемой ОС DOS I810	5715 Язык программирования 16	7848 Оперативная память 32		
9045 Наименование программного средства Расчет и моделирование массообменных процессов разделения стабильных изотопов					
6192 Разработчики Таварткиладзе Я.Н., Симонишвили Г.С., Тоидзе М.Ш., Бережани М.Г., Таварткиладзе М.Я., Заридзе Д.Г.					
7965 Разновидность ПС 46 Программный модуль 53 Программа ☒ 62 Пакет программ 19 Комплект программ	73 Библиотека программ 82 Программная система 91 Программный комплекс 28 Информационная структура 37 Прочие	7371 Стоимость разработки 5679 Код программы по ЕСПД 8840312.00002 01	5697 Код ОКП 		
7956 Описание при-зрения 30	7947 Описание программы -	7920 Текст программы 10	7974 Спецификация 3	7884 Объем программы 32	
2493 Код ОКПО 8840312	2196 Наименование организации ИВЦКП Груз НПО ВТИ				
2997 Телефон 38 11 02	2691 Адрес (индекс, республика, область, город, улица, дом) 380019, г.Тбилиси, пр.Церетели, 130				
2457 Код ОКПО 8840312	2151 Наименование организации ИВЦКП Груз НПО ВТИ, Груз.политехнический институт				
2934 Телефон 36 65 95	2655 Адрес (индекс, республика, область, город, улица, дом) 380019, г.Тбилиси, пр.Церетели, 130				

9081 Краткое наименование (наим) ПС ППП РММ ПРСИ	5436 Входящий № 50900000871
9117 Реферат ППП РММ ПРСИ разработан на основе аналитического решения дифференциального уравнения конвективного переноса Фурье-Кархгофа и соответствующей краевой задачи стационарного противоточного массообмена, а также критериального уравнения динамики переходного режима. Программа предусматривает решение аналитических функций, устанавливающих зависимость высоты единицы переноса от гидродинамических условий, плотности орошения, диаметра колонны, размера насадки. Программа позволяет по заданным геометрическим размерам и нагрузке, по заданному потоку, отбора продукта, начальной концентрации и коэффициента разделения рассчитать стационарный профиль изменения изотопной концентрации по длине аппарата и динамику переходного процесса. Диалоговый режим дает возможность пользователю осуществлять целенаправленный вычислительный эксперимент для анализа, проектирования и управления технологическим процессом ПРСИ. Информация оператору представляется в виде таблиц и графиков распределения концентрации по длине колонны и изменения изотопной концентрации продукта во времени. Разработанный программный блок может быть использован для расчета моделирования и управления технологическим процессом ПРСИ.	
7002 Программное средство принято в программную ☒ информационную 31 часть фонда	

5634 Индекс-УДК 519.688	5616 Коды тематических рубрик 2.7.3.5.5.1 5.0.4.1.2.5	5607 Индекс рубрикатора ГосфАП 06.10.00
МП	Ученая степень, звание	Фамилия, инициалы
Рук. орг.-разроб.	6210	6111 Симонишвили Г.С.
Рук. работы	6228	6120 Таварткиладзе Я.Н.
Рук. орг., ведущей ФАП	К.Т.Н. Доктор	Симонишвили Г.С.
Рук. ФАП	К.Т.Н.	Сулханишвили М.Г.

ВНТЦ Зав. 24 Т.40000

დასკვნა

1. განხილულია თბოგადაცემის პროცესების მათემატიკური აღწერის და მოდელირების არსებული მეთოდები. აღნიშნულია და დასაბუთებულია მოძრავ ორფაზიან თბოგადაცემასთან დაკავშირებული პროცესის ადეკვატური სასაზღვრო ამოცანის ჩამოყალიბების და მისი ანალიზური ამოხსნის აქტუალობა და მნიშვნელობა.
2. ორფაზიან მოძრავ თბოგადაცემასთან დაკავშირებული პროცესის მათემატიკური აღწერისათვის ზოგადი სასაზღვრო ამოცანა ჩამოყალიბებულია ფურიე-კირხჰოფის დიფერენციალურ განტოლებათა სისტემის სახით, როგორც მაღალი (m), ასევე დაბალი (s) ტემპერატურული პოტენციალის მქონე მოძრავი თბოგადაცემის ფაზებისათვის. დიფერენციალურ განტოლებათა სისტემა დაკავშირებულია ერთმანეთთან სასაზღვრო პირობით ფაზათა გამყოფ ზედაპირზე ნიუტონის თბური ნაკადის განტოლებით. ნიუტონის განტოლება კი წარმოდგენილია ტემპერატურათა საშუალო სხვაობით.
3. თბოენერგეტიკულ დანადგარებში მიმდინარე თბოგადაცემის პროცესების მათემატიკური მოდელირების, იდენტიფიკაციის, ანალიზის და მართვის მიზნით დასაბუთებულია ზოგადი სასაზღვრო ამოცანის ლოგიკური გამარტივების აუცილებლობა. გამარტივება გულისხმობს რეალური პირობების გათვალისწინებას, კერძოდ, თბოენერგეტიკულ დანადგარებში თბოგადაცემასთან დაკავშირებული მოძრაობის პერპენდიკულარული სიბრტყის m და s ფაზებში ტემპერატურების გასაშუალებას და კონვექციით გადატანილი სითბოს რაოდენობის უპირატეს მნიშვნელობას მოლეკულურ დიფუზიასთან შედარებით. თბოგადაცემასთან დაკავშირებული მოძრაობის პერპენდიკულარული სიბრტყის m და s ფაზებში ტემპერატურების საშუალო მნიშვნელობებით ნიუტონის თბური ნაკადის ბალანსური განტოლება ახლებურად არის წარმოდგენილი და გრინ-ოსტროგრადსკის ფორმულის გამოყენებით

გადაწყვეტილია ზოგადი სასაზღვრო ამოცანის დაყვანა რეალური პროცესის ამსახველ ადეკვატურ სასაზღვრო ამოცანამდე.

4. დამუშავებულია ადეკვატური სასაზღვრო ამოცანის ანალიზური ამოხსნები სტაციონარული და არა სტაციონარული პირობებისათვის და მიღებულია მოძრავ ორფაზიან თბოგადამტან ნაკადებს შორის ტემპერატურის ცვლილების კინეტიკური ფორმულები წინააღმდეგობით და თანმხვედრი ნაკადებისათვის, აგრეთვე ფაზათა დუღილისა და კონდენსაციის პირობებში მომუშავე თბოდანადგარებისათვის.
5. მიღებული თეორიული კინეტიკური ფორმულების საფუძველზე განსაზღვრულია სხვადასხვა ნაკადების სრულტურის პროცესებისათვის თბოგადაცემის კოეფიციენტის, თბოგადაცემის სიჩქარის კონსტანტის, თბოგადაცემის ინტენსივობის კრიტერიუმის მნიშვნელობების საანგარიშო ფორმულები.
6. მიღებული თეორიული კინეტიკური ფორმულები განზოგადებულია და რეკომენდირებულია მასაგადაცემის პროცესების ანალიზისა და იდენტიფიკაციის მიზნით.
7. მიღებული თეორიული კინეტიკური ფორმულების საფუძველზე დამუშავებულია სპეციალური მათემატიკური და პროგრამული უზრუნველყოფა თბო-მასაგადაცემის პროსესების მათემატიკური მოდელირებისა, იდენტიფიკაციისა და მართვის ამოცანების გადაწყვეტის მიზნით.
8. ბერნულის არაწრფივი დიფერენციალური განტოლების გამოყენებით ჩამოყალიბებულია სასაზღვრო ამოცანა და მიღებულია ანალიზური ამოხსნები მართვის სისტემების დინამიკური მახასიათებლების მათემატიკური აღწერის, იდენტიფიკაციისა და ანალიზის მიზნით.
9. მიღებული თეორიული თბოგადაცემის კინეტიკური ფორმულების და მართვის ობიექტის დინამიკური ექსტრემალური მახასიათებლების საფუძველზე დამუშავებულია თბოენერგეტიკულ დანადგარებში მიმდინარე თბური პროცესების მოდელირებისა, იდენტიფიკაციის,

ანალიზის და მართვის ახალი მეთოდები პირდაპირი და შებრუნებული მათემატიკური ამოცანების ამოხსნის გზით.

10. დამუშავებულია ორფაზიან მოძრავ თბოგადამტან ნაკადებს შორის თბოგადაცემის პროცესების ანალიზის, იდენტიფიკაციის, პროგნოზირების და მართვის ამოცანების გადაწყვეტის ახალი მეთოდები და მათი შესაბამისი სპეციალური მათემატიკური და პროგრამული უზრუნველყოფა.
11. დამუშავებულია მართვის ობიექტის დინამიკური და ექსტრემალური მახასიათებლების ანალიზის, იდენტიფიკაციისა და პროგნოზირების ამოცანების გადაწყვეტის ახალი მეთოდები და მათი შესაბამისი სპეციალური მათემატიკური და პროგრამული უზრუნველყოფა.
12. ნაჩვენებია, რომ მიღებული დინამიკური ექსტრემალური მახასიათებლები იზომორფულია ფაზური გარდაქმნის პროცესების მიმართ. "შეშფოთების" ფაქტორი, როგორც მართვის არაწრფივ დინამიკურ სისტემებში, ასევე ქიმიური რეაქციის და ფაზური გარდაქმნის პროცესების მიმდინარეობის დროს კინეტიკურ სისტემაში იწვევს გარდამავალ დინამიკურ პროცესს, რომელიც ხასიათდება ერთიდაიგივე დიფერენციალური განტოლებებით! კერძოდ ბერნულის არაწრფივი დიფერენციალური განტოლოებით. ბერნულის განტოლების ანალიზური ამოხსნები, მასში შემავალი კოეფიციენტებისა და პარამეტრების ფიზიკური შინაარსის დადგენის შედეგები გამოყენებულია ქიმიური რეაქციის და ფაზური გარდაქმნის პროცესების მათემატიკური მოდელირების მიზნით, კერძოდ, ქიმიური ჯაჭვური რეაქციების და ფაზური გარდაქმნის (შრობის) პროცესის მოდელირებისა და იდენტიფიკაციის ამოცანების გადასაწყვეტად.
13. დამუშავებული თბური და მასაცვლის პროცესების მათემატიკური მოდელირებისა და მართვის პროგრამული უზრუნველყოფა დაწერგლია ტექნოლოგიური პროცესების ავტომატიზებულ სისტემებში და რეგისტრირებულია სახელმწიფო ალგორითმებისა და

პროგრამების ფონდში .Рег.№Госфап 50900000870; 1990г. ИВЦКП. Груз. НПО ВТИ), .№ Госфап 50900000871; 1990г. ИВЦКП. Груз .НПО ВТИ იხილეთ დანართი 2.3.6. და 2.3.7.

14. ნაჩვენებია, რომ ორფაზიან მოძრავ თბოგადამტან ნაკადებს შორის თბოგადაცემის სიჩქარის კონსტანტის $K_m [1/წმ]$ რიცხვითი მნიშვნელობები შესაძლებელია გამოვიყენოთ მართვის არაწრფივი სტატიკური და ასტატიკური ობიექტების დინამიკური მახასიათებლების იდენტიფიკაციის მიზნით. ეს მეთოდი საშუალებას მოგვცემს თბოგადაცემის კინეტიკური ფორმულები დავუკავშიროთ მართვის არაწრფივ დინამიკურ მახასიათებლებს.

გამოყენებული ლიტერატურა

1. Леонтьев А.И. Теория тепломассообмена М. МГТУ им. Н.Д.Баумана 1997. 683с.
2. Беляев Г.Б., Сабанин В.Р. Принципы математического моделирования теплоэнергетических объектов. Учебное пособие. М. Изд-во МЭИ 1986. - 250с.
3. . Петухов Б.С., Генин Л.Г., Ковалев С.А. Теплообмен в ядерных энергетических установках. М., Энергоатомиздат, 1986. -472с.
4. Spalding D.B. Mathematical Methods in Nuclear Reactor. Society Meeting on Nuclear-Reactor Thermal Hydraulics., Saratoga N.Y., oct.6. 1980.
5. Поплавский В. М. Состояние и перспективы развития АЭС с реакторами на быстрых нейтронах. Теплоэнергетика.№8. 2004. с.2-9.
6. Дорохович С.Л., Кириллов П.Л. Расчеты теплообмена в каналах при закритическом режиме. Теплоэнергетика.№8. 2004. с.17-22.
7. Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена. Изд-во "Наука", Новосибирск. 1970. 659 с.
8. Лыков А.В. Тепломассообмен. (Справочник). М., "Энергия", 1971, 560с.
9. Мучник Г.Ф., Рубашов И.Б. Методы теории теплообмена. Изд-во " Высшая школа" Москва -1970, с.288
10. Справочник по теплообменникам. В двух томах. т.2. Москва. Энергоатомиздат. 1987.352с.
11. Крамеров А.Я., Шевелев Я.В. Инженерные расчеты ядерных реакторов. М. 1984. 315с.
12. Полянин Л. Н., Ибрагимов М. Х.б Соболев Г. И. Теплообмен в ядерных реакторах.М. ,Энергоиздат. 1982. 378с.
13. Жукаускас А.А. Конвективный перенос теплообменниках. М.Наука.1982.
14. Бартоломей Г.Г., Бать Г.А., Байбаков В.Д., Алхутов М.С. Основы теории и методы расчета ядерных энергетических реакторов. М. Энергоатомиздат.1982.
15. Лыков А.В., Михайлов Ю.А. Теория тепло-и массообмена. М. Госэнергоиздат.1963. 245с.
16. Михайлов М. Д. Нестационарный тепло-массоперенос в одномерных телах. Минск. Изд-во «Наука-техника». 1969.332с.
17. Эйкхофер П. Основы идентификации систем управления. М.;Мир.1975. 683с.

18. Ротач В. Я. Теория автоматического управления теплоэнергетическими процессами. М. Энергоатомиздат.1985. 364 с.
19. Казеев В.А. Повышение безотказности и точности нелинейных систем управления. Л. Энергоатомиздат. 1985.127с.
20. Рей У. Методы управления технологическими процессами. М. Мир.1983. 364с.
21. Дементьев Б.А. Кинетика и регулирование ядерных реакторов. Москва. Энергоатомиздат.1986. -272с.
22. Дмитриев А.Н., Егунов Н.Д., Шаршеналиев Ж. Ш. Спектральный
23. метод анализа, синтеза и идентификации систем управления. Фрунзе. 1986. 234с.
24. Рудик А.П. Оптимизация физических характеристик ядерных реакторов М., Атомиздат. 1979. 277с.
25. Болтянский В.Г. Оптимальное управление дискретными системами.М., «Наука», 1973.
26. Болтянский В.Г. Математические методы .оптимального управления. М., 1969.
27. Васильев Ф.П. Лекции по методам решения экстремальных задач.М., Изд. Московского ун-та. 1974.
28. Бутковский А.Р. Что такое оптимальное управление. М., »Знание». 1966.
29. Габасов Р., Кириллова Ф.М. Особые оптимальные управления. М., «Наука», 1973.
30. Гамкрелидзе Р.В. О скользящих оптимальных режимах.-«Докл. АН СССР» 1962, т.143,№6. М., с.1243.
31. Герасимов А.С., Рудник А.П. Оптимальный режим эксплуатации реакторов АЭС.-«Атомная энергетика»,1977, т.42,вып.2,с.143.
32. Лейтман Дж. Введение в теорию .оптимального управления. Пер.с англ. М., «Наука»,1968.
33. Петухов Б.С. Теплообмен в движущейся однофазной среде МЭИ. 1993. 350с.
34. Петухов Б.С., Генин Л.Г., Ковалев С.А. Теплообмен в ядерных энергетических установках. М. Энергоатомиздат. 1986. 470с.
35. Пикина Г.А., Жук Т.И. Аналитические модели конвективного теплообмена с однофазными теплоносителями. Теплоэнергетика. №10, 2003, с.21-26

36. Пикина Г.А., Математические модели прямоточного пароперегревателя коотла в системе регулирования температуры. //Вестник МЭИ. 2001.№3. с.60-69.
37. Иванов В.А. Регулирование энергоблоков. Л. Машиностроение.1982. 187с.
38. Пикина Г.А. Математические модели теплоэнергетических объектов. М. Изд-во МЭИ. 1997. 218с.
39. Плютинский В. И. Статические и динамические характеристики энергетических установок АЭС. М. Изд-во МЭИ.1980.
40. Корниенко Ю. Н. Параметры распределений и формфакторы квазиодномерном моделирования двухфазных неравновесных потоков. Теплоэнергетика. 2004. №7. с.53-63.
41. Марчук Г.И. Численные методы расчета ядерных реакторов. М., Атомиздат.1958.
42. Джонсон К.Ж. Численные методы в химии. М., «Мир».1983. 503с.
43. Кочуров Б.П., Егоричев Н.Н. Численный метод оптимизации пространственных характеристик реакторов (программа ROC). Препринт ИТЭФ №1. М.,1974.
44. Калиткин Н.И. Численные методы. М., Наука, 1978.
45. Бояринов А.И., .Кафаров В.В. Методы оптимизации в химической технологии. М. Изд, «Химия». 1969. 564с.
46. Девятков Б. Н. Теория переходных процессов в технологических аппаратах с точки зрения задач управления. Новосибирск. 1964.323с.
47. Гугушвили А.Ш., Наддаф Хасан, Таварткиладзе М.Я., Музашвили З.А. Хаос в энергетических системах. Сообщения АН Грузии, 145,№1,1990 с.97-100.
48. Таварткиладзе Я. Н., Таварткиладзе М. Я. Теоретические основы проектирования непрерывно-действующих кристаллизаторов.Тезысы докладов научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава Груз. тех.университета. 16-19 ноебря 1993. с.64.Тбилиси.
49. თავართქილაძე მ., ჯიბლაძე ნ. არაწრფივი მართვის სისტემების დინამიკური მახასიათებლების მათემატიკური აღწერა. "ენერგია", სამეცნიერო -ტექნიკური ჟურნალი, თილისი. № 3(39).2006. გვ.61-64.
50. თავართქილაძე მ. სითბოგადაცემის პროცესის მათემატიკური აღწერა ორფაზიან მოძრავ თბოგადამტან ნაკადებს შორის. . "ენერგია". სამეცნიერო -ტექნიკური ჟურნალი თბილისი.№3(39).2006. გვ..65-72.
51. Таварткиладзе Я.Н., Таварткиладзе М.Я. Альтернативный метод математического описания кинетики цепных реакций. //Химический журнал Грузии,6(3),с.298-303 (2006).

52. ერისთავი მ., თავართქივაძე მ., გოგიბერიძე ა., სეთურიძე პ. შრომის პროცესის კინეტიკის იდენტიფიკაციის მეთოდика. საქართველოს მეცნიერებათა აკადემიის მაცნე. ქიმიის სერია. ტომი 32, №3 -4. თბილისი. 2006. გვ.329-332.
53. Таварткиладзе М., Джибладзе Н., Таварткиладзе Я. Математическое описание и моделирование динамических характеристик теплоэнергетических установок. Сборник докладов международной научной конференции «Информационные технологии в управлении». ». ИТС!07. 10.10. 2007-12.10. I том. Тбилиси.. с.139-142.
54. Таварткиладзе М.,Таварткиладзе Я. Математическое описание, моделирование и управление процессом теплообмена в теплоэнергетических установках. Сборник докладов международной научной конференции «Информационные технологии в управлении». ИТС!07. 10.10. 2007-12.10. II том. Тбилиси.. с.376-82
55. Таварткиладзе М.Я., Математическое моделирование и идентификация кинетики процесса сушки. . Сборник докладов международной научной конференции «Информационные технологии 2008». 27-28. 06. 2008. Тбилиси. т.1. с.76-82
56. ბერეჟიანი მ., თავართქილაძე მ., ბერეჟიანი ა. თბოცვლის პროცესების კომპიუტერული მოდელირება. საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენცია.”ინფორმაციული ტექნოლოგიები 2008”..მოსვენებათა კრებული.ტომი II. თბილისი 2008.გვ. 145-148.
57. Лыков А. В. Процессы переноса тепла и массы при сушке различных материалов Минск. 1974 с. 235.
58. Гинзбург А.С. Основы теории и механики сушки пищевых продуктов. М. Пищевая промышленность, 1973. с. 528.
59. Рубцова Л. Н. и др. Исследование процесса гранулирования и обезвоживания мицелиальных масс с целью их консервации. Процессы, управления, машин и аппаратов пищевой технологии. – Л.:ЛТИХП, 1985. с.62-
60. Плютинский В. И. Статические и динамические характеристики энергетических установок АЭС. Изд-во МЭИ,1980.
61. Копелевич А.П. Инженерные методы расчета при выборе автоматических регуляторов. М. Металургиздат. 1960. 189с.
62. Воронов А. А. и др. Теория автоматического управления.. т.1 и Т.2. М.: Высшая школа, 1986
63. Мензель Д. Основные формулы физики.М.:Изд-во иностранной литературы. 1957.

64. Бронштейн И. Н., Семендяев К. А. Справочник по математике. Лейпциг:Таибнер; -Москва: Наука,. 1981.
65. Badenshein M. Ztchr phys. Chem.1913 Bd.85.s.329-397
66. Neznst W. Ztchr. Elektzochem. 1918 Bd.24 s.335-336
67. Christiansen I.A., Kramezs H.Ztchz.phys.chem.1923 Bt.104 s.451-471.
68. Hinshelwood C.N. the kinetics of chemical change in gaseons systems 2. ed. Oxford. 1929.-266p.
69. Семенов Н.Н. Цепные реакции. Л.: ОНТИ. Госхимиздат.1934,- 555с.
70. Semenov N.N. Chemical kinetics and chain reactions L. Oxford Univ. press. 1935. 480 p.
71. Семенов Н.Н., Эммануэль Н.М. ДАН СССР. 1940. т.28, №2, -220-223 с.
72. Семенов Н.Н. Цепные реакции. 2-е изд., испр. и доп.-М.: Наука. 1986.535 с.
73. Эммануэль Н.М., Зайков Г.Е., Крицман В.А. Цепные реакции.– Исторический аспект. М.:Наука, 1989.-335 с.
74. Guldberg C. N., Waage P., J. prakt. Chem. N.F. 1879., Bd.19., s.60-114
75. Vant-Hoff. Etudes De Dynamique Chimique, Amsterdam, Frederik Muller 1884.,215p. Рус.,пер.Вант-Гофф Я. Г.-Очерки по химической динамике. ОНТИ, 1936.178с.
76. Ichikawa T. –Ztschr.phys.Chem.Abt.B 1930,Bd.10,s.299-336
77. Weigert E.,Kellermann K.-Ztscher phys.Chem.1923.107.s.1-40.
78. Polanyi M.-Ztsher.Phys.chem.1928.Bd.138/s.450-467.
79. Jost W.,SchwetzerH.-Ztsher.phys.Chem.Abt.B.1931.Bd.13,s.373-378.
80. Kossel., The Kinetics of homogenous gas reaction N.Y.:th.Chem.Catalog.Co 1932.320p.
81. Кормилова Л.В., Налбандян А.Б., Семенов Н.Н. Ж., физич. химии., т.32,№6. 1958. с.1193-1204.
82. Тодес О.М., Собалло В.А., Гольцикер А.Д. Массовая кристаллизация из растворов. Ленинград.»Химия» 1984. 231с.