

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

ნათია ქსოვრელი

მდულარე სითხის მექანიკური ზემოქმედება ხურების ზედაპირზე

წარმოდგენილია დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად

სადოქტორო პროგრამა: ენერგეტიკა და ელექტროინჟინერია

შიფრი - 0405

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

თბილისი, 0175, საქართველო

თებერვალი, 2016 წელი

საავტორო უფლება © 2016 წელი. ნათია ქსოვრელი

თბილისი
2016 წელი

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი
ენერგეტიკისა და ტელეკომუნიკაციის ფაკულტეტი

ჩვენ, ქვემოთ ხელისმომწერი ვადასტურებთ, რომ გავეცანით ნათია ქსოვრელის მიერ შესრულებულ სადისერტაციო ნაშრომს დასახელებით: მდუღარე სითხის მექანიკური ზემოქმედება ხურების ზედაპირზე და ვამლევთ რეკომენდაციას საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ენერგეტიკისა და ტელეკომუნიკაციის ფაკულტეტის სადისერტაციო საბჭოში მის განხილვას დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად.

თებერვალი 2016

ხელმძღვანელი: _____ ევტიხი მაჭავარიანი

რეცენზენტი: _____

რეცენზენტი: _____

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

2016

ავტორი: ქსოვრელი ნათია

დასახელება: მდუღარე სითხის მექანიკური ზემოქმედება ხურების
ზედაპირზე

ფაკულტეტი : ენერგეტიკისა და ტელეკომუნიკაციის

ხარისხი: დოქტორი

სხდომა ჩატარდა: თებერვალი 2016

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.

მადლიერება

ავტორი დიდ მადლობას უხდის დისერტაციის სამეცნიერო ხელმძღვანელს, ბატონ ევტიხ მაჭავარიანს დისერტაციის დამუშავების პროცესში გაწეული კონსულტაციებისათვის და გამოხატავს მადლიერების გრძნობას საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ენერგეტიკისა და ტელეკომუნიკაციის ფაკულტეტის ჰიდროენერგეტიკისა და მაგისტრალური სამილსადენო სისტემების დეპარტამენტის თანამშრომლების და განსაკუთრებით ფაკულტეტის დეკანის, ბატონ გია არაბიძის მიმართ, დოქტურანტურაში სწავლის პერიოდში გაწეული გულისხმიერებისა და თანადგომის გამო.

რეზიუმე

ნაშრომში დასაბუთებულია სითხის დუდილის დროს წარმოქმნილი და სითხის მხრიდან გამახურებელ ელემენტზე მოქმედი რეაქტიული ძალის კვლევის აქტუალობა, როგორც სუფთა გამოყენებითი, ასევე სამეცნიერო თვალსაზრისით. ჩატარებულია დუდილის თანმხლები მოვლენების და დუდილზე მოქმედი ფაქტორების ანალიზი და გადმოცემულია ხსენებული ანალიზის შედეგები.

ნაჩვენებია, რომ სითხის დუდილის თეორიაში, რომელიც ჯერ კიდევ სამწუხაროდ არ არის ბოლომდე დაზუსტებული, არსებობს მრავალნაირი მოსაზრება იმის თაობაზე თუ რა მექანიზმებით ხდება სითხოს გადაცემა გამახურებელი, ანუ ამორთქლებელი კედლის ზედაპირიდან სითხეში. სამეცნიერო ლიტერატურაში ყოველწლიურად ქვეყნდება დუდილის პროცესის შესწავლისადმი მიძღვნილი მრავალი ქვეყნის მეცნიერთა ასობით ნაშრომი, რომელთა დიდი ნაწილი ეთმობა დუდილის მოვლენის თეორიულ და ექსპერიმენტულ კვლევას. გაანალიზებულია დუდილის ინტენსივობაზე მოქმედი მრავალი ფიზიკური და გეომეტრიული ფაქტორი და წარმოდგენილია დუდილის მექანიზმის თაობაზე სხვადასხვა ავტორის მიერ შემოთავაზებული მოსაზრებები.

ნათქვამია, რომ თანამედროვე ეტაპზე, უკვე ჩამოყალიბებულია რამოდენიმე თეორიული კონცეფცია, რომელთა საფუძველზე ჩატარებული გაანგარიშებების შედეგები გარკვეულწილად დამაკმაყოფილებლად ემთხვევიან ექსპერიმენტულ შედეგებს. ნათქვამია აგრეთვე, რომ ყველაზე კარგ შედეგებს იძლევა დუდილის ეგრეთწოდებული **მულტიფაქტორინგის** თეორია, რომელიც ქართველი მეცნიერების მიერაა დამუშავებული პროფესორ ირაკლი შეყრილაძის ხელმძღვანელობით. ამ თეორიის მიხედვით დუდილის პროცესში ადგილი აქვს გამახურებელი ელემენტის ზედაპირიდან სითხეში სითხოს გადაცემის სხვადასხვა მექანიზმების და დუდილის ინტენსივობაზე მოქმედი ფაქტორების ერთობლივ მოქმედებას და, ამასთან, გარკვეულ სხვადასხვა პირობებში მადომინირებელ როლს თბოგაცემის ინტენსიურობაში იკავებენ სხვადასხვა ფაქტორები და სხვადასხვა მექანიზმები.

ზემოხსენებული **მულტიფაქტორინგის** თეორიის მიხედვით ბუშტის ზრდისას წარმოიქმნება ეგრეთწოდებული „**მზარდი ბუშტის ტუმბოს ეფექტი**“, რაც გამოისახება მზარდი ბუშტის მიერ სითხის გასროლით მადულარი ზედაპირის მხრიდან სითხის სიღრმეში. ეს ეფექტი დაფიქსირებულია აგრეთვე იმ შემთხვევაშიც, როცა მადულარი ზედაპირი ქვემოთაა მიმართული და მიუხედავად სიმძიმის ძალის მიმართულებისა მზარდი ბუშტი გაცხელებულ სითხეს ისვრის ქვემოთ. ცხადია, რომ მზარდი ბუშტის მიერ სითხის მადულარი ზედაპირიდან შორს გასროლას თან უნდა სდევდეს ბუშტის მხრიდან გარკვეული რეაქტიული ზემოქმედება თვით მადულარ ზედაპირზე.

გარდა აღნიშნულისა, უნდა ითქვას, ძალიან გავრცელებულია მოსაზრება იმის თაობაზე, რომ დუდილის განმავლობაში

ორთქლწარმოქმნის პროცესის დიდი ნაწილი მოდის მზარდი ბუშტის მადულებელ ზედაპირთან შეხების ზედაპირის გარშემო არსებული სითხის **სოლისებურ უბანზე** და ხსენებული ურთიერთშეხების ცენტრალური უბნის, ანუ მშრალი ზედაპირის ფართობის ზრდასთან ერთად იზრდება ბუშტისქვეშა წრიულად განლაგებული სითხის სოლის წრიული ზომა, რასაც თან სდევს სოლის წვერზე აორთქლებული სითხის რაოდენობის ზრდა და გამახურებელ ზედაპირზე მოქმედი რეაქტიული ძალის წარმოქმნა.

მზარდი ბუშტის ტუმბოს ეფექტის კონცეფციის გაერთიანებით მასთან კარგ თანხვედრაში მყოფ, ბუშტისქვეშა სითხის სოლისებური არედან აორთქლების კონცეფციასთან დამუშავებულია შესასწავლი მოვლენის, კერძოდ რეაქტიული ძალის წარმოქმნის გეომეტრიული მოდელი. ეს უკანასკნელი გამოყენებულია ლაბორატორიული ექსპერიმენტული დანადგარის პროექტირებასა და ცდების ჩატარების შესაბამისი მეთოდის დამუშავებაში. ნაშრომში აღწერილია ამ პროექტით შექმნილ დანადგარზე ჩატარებული კვლევის შედეგები.

დადგენილია, რომ დუღილის პროცესში აღძრული რეაქტიული ძალის რიცხვითი მნიშვნელობა მთელი რიგით მაღალია ვიდრე დუღილის თეორიაში ცნობილი გამოსახულებით გაანგარიშებული რეაქტიული ძალა. გამოთქმულია მოსაზრება, რომ რეაქტიული ძალის დუღილის პროცესში რეალურად განვითარებულ და გაანგარიშებით მიღებულ მნიშვნელობებს შორის დაფიქსირებული განსხვავება გაპირობებულია უშუალოდ გამახურებელ ზედაპირზე წარმოებული ორთქლადქცევის პროცესის განსაკუთრებული თავისებურებით, კერძოდ, ეგრთწოდებული **მზარდი ბუშტის ტუმბოს** ეფექტით, რაც განაპირობებს აღნიშნული მოვლენის შემდგომი ექსპერიმენტული კვლევის მიზანშეწონილობას.

ნაშრომში წარმოდგენილია როგორც ვიზუალური დაკვირვებით, ისე სწრაფი ვიდეოგადაღებით მიღებული ინფორმაცია და უშუალო გაზომვების შედეგები, რომლებიც ნათლად ადასტურებენ დუღილის პროცესში მადულარ ზედაპირზე მოქმედი რეაქტიული ძალის აღძვრის მოვლენას. დადგენილია, რომ ხსენებული რეაქტიული ძალა პირდაპირპროპორციულადაა დამოკიდებული დუღილის დროს განვითარებულ ხვედრით თბურ ნაკადზე და კრიტიკული თბური დატვირთვის სიახლოვეში შეადგენს 20-30 ნიუტონს კვადრატულ მეტრზე. ეს სიდიდე მთელი რიგით აღემატება რეაქტიული ძალის თეორიული გაანგარიშებით მიღებულ სიდიდეს, რაც იმაზე მეტყველებს, რომ გარდა უშუალოდ მოლეკულების მოძრაობის რაოდენობის ცვლილებისა, რეაქტიული ძალის აღძვრაში, ჩვენი აზრით, მონაწილეობს ჯერ კიდევ უცნობი სხვა მექანიზმი, რომელიც უთუოდ დაკავშირებულია მზარდი ბუშტის ტუმბოს ეფექტთან.

ნაშრომი შედგება შესავალის, ოთხი თავისა და დასკვნებისაგან. ციტირებული ლიტერატურის სია შეიცავს ძირითადად უცხოური წყაროების 43 დასახელებას. ექსპერიმენტული მონაცემები დამუშავებულია Microsoft Office Excel 2007 პროგრამით და წარმოდგენილია დანართში

სწრაფი ვიდეოგადაღებით მიღებული ვიდეოფილმების შემცველ დისკეტასთან ერთად.

ნაშრომის შედეგები აპრობირებულია ორ საერთაშორისო კონფერენციაზე. ნაშრომის სხვადასხვა ნაწილები გამოქვეყნებულია ოთხ სამეცნიერო სტატიაში, მათ შორის ერთი თანაავტორების გარეშე.

Abstract

The dissertation work describes the Research actuality of Reactive force, which is created during boiling of liquid and which acts on heating surface. This actuality has as a purely practical, as well as scientific importance The work accomplished by boiling and boiling accompanying phenomena influencing factors analysis and set out the results of this analysis. The paper says that since the boiling liquid theory is still not well developed, so every year there are published in the scientific literature in many experimental works that relate to this problem.

Liquid boiling process represents a very complex process, as the thermodynamic and hydrodynamic point of view. In addition, the liquid boiling process is widely used in many fields of techniques and technology. Therefore, the right knowledge and the accurate calculation of the liquid boiling process provides many technological system to normal operation and proper conduct of the ongoing processes. Fluid boiling heat transfer mechanism is one of the most important problems in the theory. Scientists have developed several models of fluid boiling mechanism, but so far there is no exact calculation of fluid boiling any formula, for which there is still a preference for experimental works. That is the purpose of the present study.

The paper analyzes the many factors that affect the intensity of the liquid boiling process and considered all the liquid boiling mechanism, are proposed by different authors. It is said that at the present stage, has already established a number of theoretical concepts, which allow the calculation results are consistent with the experimental results satisfactorily. Most experiments were in good agreement with the so-called **Multifactoring** boiling theory, which was developed by a group of Georgian scientists led by Professor Irakli Shekriladze. According to this theory, Different mechanisms of heat transfer, and the various factors that may affect the intensity of boiling, operate simultaneously and in different conditions, different factors and mechanisms occupy a central role in the heat transfer process.

According to the above theory of **Multifactoring**, vapor bubble growth leads to the emergence of the so-called "**Pumping Effect of Growth Bubble**", which is reflected in the fluid shot from the warming surface to the depths of liquid. By the way, this pumping effects are seen even in the case, when warming surface is facing down and the hot fluid is being emitted in the opposite direction of gravity force. This physical phenomenon plays key role in boiling heat transfer and hydrodynamics. In addition, the "pumping effect of growth bubble" can play a potentially important role of in the boiling crisis and hydrodynamics in some

important boiling systems. The problem of pumping effect of growth bubble generated high-frequency cyclic thermal stresses in heating surfaces, important in terms of reliability of nuclear power plants.

It should be noted also, that it is held on the liquid boiling process that the biggest part of the warmth is transferred is spent on evaporation of the liquid, which is located under the growth bubble and has a **wedge-shape**. The size of the fluid wedge layer (dry section diameter) continually is growing and this is accompanied by an increase in the number of vaporized fluid, accompanied by warming the surface of the reactive power generation.

The paper gives the geometric model of process to generating reactive power, which was based on the union of two concepts, namely Pumping Effect of Growth Bubble and wedge-shape evaporation. This geometric model is used in the laboratory experimental equipment design and testing of appropriate methods of treatment. This paper describes the experimental installations and their research results.

It is estimated that in liquid boiling process arise the reactive force, whose numerical value is higher than the reactive force, which is calculated in accordance with the theory of boiling. It is suggested that, the difference, between actually occurred (during the boiling liquid) reaction force and its calculated values due to the fact that is caused by the fact that the increase of the steam bubble directly on the heating surface, characterized by a complex feature of the above-mentioned **Pumping Effect of Growth Bubble**. This shows the feasibility of further studies of reactive power, which arises in the process of boiling liquid.

The work is presented as a visual as well as fast video received information and direct measurements. These results clearly supports the phenomenon of occurrence of reactive force in the process of boiling of liquids. It found that the reaction force depends directly proportional from the specific heat flow and at the boiling crisis and reaches 25-35 Newton per square meter, which is much larger than its estimated value. This suggests that in addition to changing the of momentum of molecules at the phase transition, in the appearance of the reaction force involved more different, yet unknown mechanism, which we believe, is connected to the pumping effect of the growing bubble.

The thesis consists of introduction, four chapters and conclusions. The list of quoted literature includes 43 titles. Experimental data of different series have been provided in the supplement at the end of the thesis, which have been processed via Microsoft Office Excel 2007 program. There is also a high-speed video recording containing a copy of the results.

The results of the thesis have been approved at two international conferences. The different parts of the thesis have been published in four scientific articles, including one - without co-authors.

შინაარსი

	83
შესავალი	13
თავი I. პრობლემის არსი, ლიტერატურის მიმოხილვა და სამუშაოს მიზანი	
1.1. საკითხის ისტორია	18
1.2. საკითხის დასმა	20
1.3. თემის აქტუალობა	21
1.3.1. დუღილის კვლევისადმი მიძღვნილი თეორიული სამუშაოები	32
1.3.2. დუღილის კვლევისადმი მიძღვნილი ექსპერიმენტული სამუშაოები ..	36
1.4. სითხის დიდ მოცულობაში დუღილისას განვითარებული ხვედრითი თბური ნაკადის სიდიდეზე მოქმედი ფიზიკური ფაქტორები	41
1.5. სამუშაოს მიზანი	43
თავი II. პროცესის მოდელირება და პირველი ექსპერიმენტული დანადგარები	
2.1. ფიზიკური მოდელი	46
2.2. გეომეტრიული მოდელი	52
2.3. სითხის დუღილის დროს წარმოქმნილი რეაქტიული ძალის კვლევის მეთოდის შერჩევა	57
2.4. სითხის დუღილის დროს წარმოქმნილი რეაქტიული ძალის სადემონსტრაციო ცდები და ექსპერიმენტული დანადგარები	58
2.5. სითხის დუღილის დროს წარმოქმნილი რეაქტიული ძალის მოქმედების დასაფიქსირებელი პირველი ექსპერიმენტული დანადგარი	63
2.6. სითხის დუღილის დროს წარმოქმნილი რეაქტიული ძალის გასაზომი ექსპერიმენტული დანადგარი	67
2.7. ცდების ჩატარების მეთოდიკა	69
2.8. ექსპერიმენტული შედეგები	71
თავი III. დუღილის და მისი თანმხლები ფიზიკური მოვლენების შესასწავლი ექსპერიმენტული დანადგარი	
3.1. ექსპერიმენტული დანადგარის აღწერა	74
3.1.1. სადულეზელი კვანძი	75
3.1.2. სადულეზელი კვანძის დამაგრების მექანიზმი	77
3.1.3. ექსპერიმენტული დანადგარის პრინციპული სქემის აღწერა	81
3.1.4. ექსპერიმენტული დანადგარის ელექტრული სქემის აღწერა	84
3.2. ცდების ჩატარების მეთოდიკა	87
3.2.1. ექსპერიმენტული დანადგარის მომზადება ცდებისათვის	87
3.2.2. სადულეზელი კვანძის ვერტიკალურად ქვემოთ გადაადგილების გამზომი სახაზავის გრადუირება	87
3.2.3. უშუალო გაზომვების ჩატარება	90
3.3. ცდების მონაცემების დამუშავება	92
3.3.1. პირველადი მონაცემების შეგროვება	92
3.3.2. ანათვლების დამუშავება	94
3.3.3. ცდომილებათა შეფასება	97

თავი IV. ექსპერიმენტული შედეგები	
4.1	სადუღებელ ელემენტზე აღძრული კუთრი ძალის გაზომვის შედეგები. გვ. 103
4.2	ექსპერიმენტების სპეციალური სერია სწრაფი ვიდეოგადაღების თანხლებით. გვ. 106
	დასკვნა. გვ. 115
	გამოყენებული ლიტერატურა. გვ. 117
	დანართი - ვიდეოფილმების დისკი

ცხრილების ნუსხა

ცხრილი 1.	პირველადი ანათვლების ფორმა გვ. 93
ცხრილი 2.	პირველადი მონაცემების დამუშავების შედეგების შესატანი ფორმა გვ. 96
ცხრილი 3.	ექსპერიმენტების სპეციალური სერიის ჩატარებისას შესრულებული პირველადი ანათვლები და მათი დამუშავების შედეგები. გვ. 113

ნახაზების ნუსხა

ნახაზი 1.	ნუკიამას მრუდი. გვ. 24
ნახაზი 2.	დუღილის რეჟიმები. გვ. 26
ნახაზი 3.	q _{კრ} -ის დამოკიდებულება წნევაზე. გვ. 35
ნახაზი 4.	q _{კრ} -ის დამოკიდებულება ხურების ზედაპირის განივ ზომაზე. გვ. 38
ნახაზი 5.	q _{კრ} -ის დამოკიდებულება გამახურებლის მასალის თბოგამტარობაზე. გვ. 40
ნახაზი 6.	ხვედრითი სითბური ნაკადის დამოკიდებულება ტემპერატურათა სხვაობაზე და ამ დამოკიდებულების მახასიათებელი წერტილები. გვ. 47
ნახაზი 7.	რეაქტიული ძალის შესაძლო დამოკიდებულება ტემპერატურათა სხვაობაზე გამახურებელი კედლის ზედაპირსა და მდულარე სითხეს შორის. გვ. 49
ნახაზი 8.	ორთქლის ბუშტების წარმოქმნის და მოწყვეტის სხვადასხვა ვარიანტები. გვ. 51
ნახაზი 9.	ბუშტის ზრდის ტუმბოს ეფექტის სქემა. გვ. 54
ნახაზი 10.	რეაქტიული ძალის წარმოქმნის გეომეტრიული მოდელი. გვ. 55

ნახაზი 11.	მადულარი სითხის მხრიდან გახურების ზედაპირზე წარმოქმნილი მექანიკური ზემოქმედების სადემონსტრაციო დანადგარი. გვ. 60
ნახაზი 12.	დუღილის პროცესში მადულარი სითხის მხრიდან გახურების ზედაპირზე წარმოქმნილი მექანიკური ზემოქმედების ხარისხობრივად შესასწავლი ექსპერიმენტული დანადგარის სქემა ა. - საწყისი მდგომარეობა, წინხედი; ბ. - გვერდხედი. პუნქტირით ნაჩვენებია ფირფიტის ტიპური მდგომარეობა დუღილის პროცესში. გვ. 64
ნახაზი 13.	ფირფიტის სიმძიმის ცენტრის გადახრის სიდიდის დამოკიდებულება დუღილის პროცესში განვითარებულ ხვედრით თბურ ნაკადზე. გვ. 65
ნახაზი 14.	მადულარ ზედაპირზე მოქმედი ძალის გასაზომი ექსპერიმენტული დანადგარის პრინციპული სქემა. გვ. 68
ნახაზი 15.	ხურების ზედაპირზე მადულარი სითხის მხრიდან მოქმედი ძალის სიდიდის დამოკიდებულება ხვედრითი თბური ნაკადის მნიშვნელობაზე. გვ. 73
ნახაზი 16.	სადუღებელი კვანძის სქემა. გვ. 76
ნახაზი 17.	სადუღებელი კვანძის სითხეში დაფიქსირების მექანიზმი. გვ. 80
ნახაზი 18.	ექსპერიმენტული დანადგარის პრინციპული სქემა. გვ. 83
ნახაზი 19.	ექსპერიმენტული დანადგარის პრინციპული ელექტრული სქემა. გვ. 85
ნახაზი 20.	სადუღებელი კვანძის გადახრის ზოგადი დამოკიდებულება საწონების მასაზე და ცდაში დაფიქსირებული გადახრის მიხედვით შესაბამისი წარმოსახვითი მასის დადგენის სქემა (ისრებით). გვ. 89
ნახაზი 21.	რეაქტიული ძალის დამოკიდებულება დუღილის პროცესში განხორციელებული კუთრი თბური დატვირთვის სიდიდეზე. გვ. 104
ნახაზი 22.	სხვადასხვა ექსპერიმენტულ დანადგარებზე მიღებული შედეგების ურთიერთშედარება გეომეტრიული ზედდების წესით. გვ. 105
ნახაზი 23.	რეაქტიული ძალის დამოკიდებულება ხვედრითი თბური ნაკადის სიდიდეზე სპეციალური სერიის ექსპერიმენტებში. გვ. 114

სურათების ნუსხა

- სურათი. 1. მადულარი სითხის მხრიდან გახურების ზედაპირზე წარმოქმნილი მექანიკური ზემოქმედების სადემონსტრაციო დანადგარში გამოყენებული ფირფიტის თბოსაიზოლაციო მასალით დაფარვების გარეშე. გვ. 62
- სურათი. 2. ექსპერიმენტული დანადგარის საერთო ხედი. გვ: 86
- სურათი. 3. პასიური გამახურებელი ფირფიტა და ადულების ტემპერატურამდე მიყვანილი წყალი. გვ: 108
- სურათი. 4. დუღილის საწყისი რეჟიმი. შეიმჩნევა ფირფიტის უმნიშვნელო გადახრა. გვ: 109
- სურათი. 5. დუღილის სხვადასხვა რეჟიმები. სიმძლავრის ზრდასთან ერთად იზრდება ფირფიტის გადახრა, ანუ მოქმედი რეაქტიული ძალა. გვ: 110
- სურათი. 6. დუღილის კრიზისი. დაფიქსირებულია გამახურებელი ელემენტის გადაწვის მომენტი. უშუალოდ გადაწვის წინ მადულარი ელემენტი მაქსიმალურადაა გადახრილი ვერტიკალური მდგომარეობიდან გვ: 111

ტექსტში გამოყენებული პირობითი აღნიშვნები

- r - სითხის აორთქლების ფარული სითბო, ჯ/კგ;
 ρ^l და ρ^g - შესაბამისად, სითხისა და ნაჯერი ორთქლის სიმკვრივე, კგ/მ³;
 P - კუთრი რეაქტიული ძალა, ნ/მ²;
 M - სასწორის გადახრის გამაწონასწორებელი საწონების მასა, კგ;
 g - სიმძიმის ძალის აჩქარება, მ/წმ²;
 l და L - შესაბამისად, სასწორის უღელისა და ძელის სიგრძეები, მ;
 S - ამორთქლებელი ელემენტის ზედაპირის ფართობი, მ²;
 q_z - აგრეგატული მდგომარეობის ცვლილებაზე, კერძოდ დუღილზე დახარჯული ხვედრითი თბური ნაკადი, ჯ/მ²;
 W - ხურების ზედაპირის ელ. სიმძლავრე, ვტ;
 f - ბუშტის მოწყვეტის სიხშირე, 1/წმ;
 U - დენის ძალა, ა;
 V - ძაბვა, ვ;

ინდექსები

- $კრ$ - კრიტიკული;
 $ნაჯ$ - ნაჯელობის;

შესავალი

თანამედროვე ტექნიკის მრავალ აგრეგატში ხდება დიდი რაოდენობით სითბოს გამოყოფა, რისთვისაც თბოგამომყოფ ზედაპირებზე აწყობენ სპეციალურ არხებს, პერანგებს და ა.შ. რომლებშიც ცირკულირებს გამაგრილებელი სითხე. ასეთი აგრეგატების კლასიკურ ნიმუშებს წარმოადგენენ შიგაწვის ძრავები, აირის კომპრესორები, ორთქლისა და აირის ტურბინები, ატომური რეაქტორები და სხვა. ამ დანადგარების თბოგამომყოფ ზედაპირებზე მრავალ შემთხვევაში ხდება გამაგრილებელი სითხის დუღილი. დუღილს კი თან ახლავს ორფაზა ნაკადების წარმოქმნა, რაც თავის მხრივ აუარესებს გასაგრილებელი ზედაპირების სითხით მომარაგებას და, ე.ი, ამცირებს თბოგაცემის კოეფიციენტს. ამ უკანასკნელის შემცირება კი ცვლის აგრეგატის მუშაობის რეჟიმს და ქმნის გათბობა-გაცივების არასტაციონალურ პირობებს. აქედან გამომდინარე აგრეგატების მუშაობის საიმედოობის უზრუნველსაყოფად და მოთხოვნილი პარამეტრების მისაღწევად აუცილებელია გამაგრილებელი სისტემების მუშაობის პროცესების გაანგარიშების ცოდნა.

უნდა აღინიშნოს, რომ მდულარე სითხეში თბოცვლის პროცესი თანამედროვე მაღალი ენერგიების ტექნიკაში ერთ-ერთი ყველაზე რთული და მნიშვნელოვანი პროცესია.

მიუხედავად იმისა, რომ სითხის დუღილი სხვადასხვა მანქანა-დანადგარებში დიდი ხანია გამოიყენება როგორც თბოცვლის პროცესი, მეცნიერთა სისტემატიური კვლევის საგნად ის მხოლოდ მეოცე საუკუნის მეორე ნახევარში იქცა. ამ გარემოებას დიდი ბიძგი მისცა ატომური და რაკეტული ტექნიკის მაღალი ენერგოდამაბულობის მქონე სხვადასხვა სისტემების განვითარებამ. ამ სისტემებში, როგორც წესი, ხდება სითბოს დიდი რაოდენობით გამოყოფა შედარებით მცირე მოცულობებში. ენერგეტიკის განვითარების ტენდენცია და პერსპექტივები ისეთია, რომ კიდევ მრავალი წლის განმავლობაში მნიშვნელოვან როლს ითამაშებს

სითხის (ხშირ შემთხვევაში წყლის) დუდილის პროცესი. სწორედ ეს გარემოება განაპირობებს იმას, რომ თანდათან სულ უფრო მეტი ქვეყნის სამეცნიერო-კვლევითი ორგანიზაციები და მკვლევარები ერთვებიან იმ რთული პრობლემების გადაჭრაში, რომლებიც დაკავშირებული არიან ახალი ენერგოდაძაბული ტექნოლოგიების ათვისებისა და დანერგვის ამოცანებთან. ეს გარემოება კარგად აისახება იმ ფაქტითაც, რომ თუ მე-20 საუკუნის 60-იან წლებში სითხის დუდილის პროცესის კვლევას ეძღვნებოდა ყოველწლიურად 300-400 სამეცნიერო ნაშრომი (მსოფლიოს მსშტაბით), 80-იან წლებში ამ ციფრმა 800-ს მიაღწია, ხოლო თანამედროვე პირობებში, სამეცნიერო პუბლიკაციებისა და ინტერნეტში მოთავსებული ინფორმაციის გათვალისწინებით, წელიწადში 1000-ზე მეტია.

დუდილის პროცესებს თითქმის ყოველწლიურად ეძღვნება მსხვილი სამეცნიერო კონფერენციები და სიმპოზიუმები, როგორც ცალკეული ქვეყნების, ასევე მთელი მსოფლიოს მასშტაბით.

სამწუხაროდ, მიუხედავად ცალკეული ამოცანების გადაწყვეტისას მიღწეული სერიოზული მეცნიერული შედეგებისა, სითხეების დუდილის პროცესში თბოგადაცემის პრობლემა ჯერ კიდევ სრულად არ არის გადაწყვეტილი. ეს უმთავრესად ეხება ისეთ დანადგარებში მიმდინარე დუდილის პროცესებს, რომლებიც განსაკუთრებულ პირობებში მუშაობენ. კერძოდ: მკაცრი მოთხოვნები მუშაობის რეჟიმის სტაბილურობაზე, დედამიწის გრავიტაციული ველიდან განსხვავებული პირობები, კონსტრუქციის მასალატევადობაზე მკაცრი ზედა ზღვრის არსებობა, პროცესის სრული ავტომატიზაციის მოთხოვნილება და ა.შ.

როგორც ზემოთაც იყო აღნიშნული, სითხის დუდილის პროცესი რთულ ფიზიკურ მოვლენას წარმოადგენს და თავის თავში მრავალ რთულ ასპექტს შეიცავს. ესენია: დუდილის საწყისი ფაზა, განვითარებული ბუმტოვანი დუდილი, ნაჯერობის ტემპერატურაზე დაბალი ტემპერატურის მქონე სითხის დუდილი, სითხის დუდილი

კრიზისულთან ახლო პირობებში, დუდილის კრიზისი, აფსკოვანი დუდილი, დუდილი სხვადასხვა ფიზიკური ველების ზეგავლენის პირობებში და სხვა.

თითოეული ამ ასპექტის მიმართულებით სისტემატიურად მიმდინარეობს მნიშვნელოვანი კვლევითი სამუშაოები. ინტენსიურად მიმდინარეობს აგრეთვე დუდილის პროცესის სხვადასხვა მახასიათებლების კვლევა. ეს მახასიათებლები კი მრავლადაა: დუდილის პროცესში გამახურებელი ზედაპირის ფართობის ერთეულიდან სითხისათვის დროის ერთეულში მიწოდებული სითხოს რაოდენობა (ხვედრითი თბური ნაკადი), კედლიდან სითხეზე თბოგაცემის კოეფიციენტი, კრიტიკული თბური ნაკადი, ბუმტის ჩასახვის რადიუსი, მოქმედ ცენტრთა სიხშირე, ბუმტების მოწყვეტის სიხშირე, კედლის გადახურების ტემპერატურა, ზედაპირის სისუფთავის მდგომარეობა, ზედაპირის ორიენტაცია სივრცეში, ზედაპირის მასალის თბოფიზიკური თვისებები (თბოგამტარობა და ტემპერატურაგამტარობა), სითხის თბოფიზიკური თვისებები (თბოგამტარობა, სიმკვრივე, ზედაპირული დაჭიმულობის კოეფიციენტი, ტემპერატურაგამტარობა), სითხის სისუფთავის ხარისხი და ა.შ.

კვლევის ზემოთ ჩამოთვლილი მიმართულებებიდან პრაქტიკული გამოყენების თვალსაზრისით ერთ-ერთი ყველაზე მნიშვნელოვანია სითხის დუდილის, როგორც ფიზიკური მოლენის მექანიზმის კვლევა. ამ მიმართულებით სისტემატიურად ქვეყნდება მრავალი სამეცნიერო ნაშრომი. ტარდება საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენციები და სიმპოზიუმები, სადაც განიხილავენ სხვადასხვა ქვეყნის მეცნიერთა მიერ განხორციელებულ კვლევებს, რომლებიც ეძღვნება როგორც დუდილის მოვლენის შემადგენელი ცალკეული კომპონენტების თეორიულ, ასევე ექსპერიმენტულ შესწავლას. ეს კომპონენტებია ორთქლწარმოქმნის ცენტრთა რიცხვი და ბუმტის ზრდა, მოწყვეტის დიამეტრი და სიხშირე,

ბუმტის ზრდის პროცესში განხორციელებული ტუმბოს ეფექტი და ბუმტქვემა თხევადი სოლის წარმოქმნა და სხვა.

სითხის დუღილის პროცესი და მასთან დაკავშირებული ფიზიკური მოვლენები საუკუნეზე მეტი ხნის განმავლობაში წარმოადგენდა და დღესაც წარმოადგენს მსოფლიოს მრავალი ქვეყნის მეცნიერთა განსაკუთრებული ინტერესის მატარებელ საგანს.

აღნიშნული პრობლემის კვლევის სერიოზული ტრადიცია არსებობს საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ენერგეტიკის და ტელეკომუნიკაციის ფაკულტეტის თბოენერგეტიკის და ენერგოეფექტურობის დეპარტამენტის ენერჯის არატრადიციული და განახლებადი წყაროების მიმართულების სამეცნიერო ლაბორატორიაში. ეს ტრადიცია სათავეს იღებს ჯერ კიდევ გასული საუკუნის ოთხმოციანი წლებიდან, როდესაც მაშინდელ, თეორიული და ზოგადი თბოტექნიკის №11 კათედრაზე და ამ კათედრის ბაზაზე ჩამოყალიბებულ თბოფიზიკის კათედრაზე, ყოველწლიურად მუშავდებოდა სახელშეკრულებო თუ საბიუჯეტო სამეცნიერო თემები, რომლებიც ეძღვნებოდა სითხის დუღილის თანმხლები სხვადასხვა მოვლენების მეცნიერულ კვლევას [1-3]. ამ და შემდგომი კვლევების შედეგები მსოფლიოს მრავალ საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენციაზე და სიმპოზიუმზეა მოხსენებული [4-6] და დღეისათვის პრაქტიკულად საერთაშორისო აღიარება აქვს მოპოვებული.

მიუხედავად ყოველივე ზემოთქმულისა სითხის დუღილის მექანიზმი ჯერ კიდევ არ არის ბოლომდე შესწავლილი, რასაც ნათლად ადასტურებს ის ფაქტი, რომ სითხის დუღილის შესწავლას ყოველწლიურად ეძღვნება ათასზე მეტი სამეცნიერო პუბლიკაცია, რომლებიც სისტემატურად ქვეყნდება როგორც მსოფლიოს სხვადასხვა ქვეყნის სერიოზულ სამეცნიერო ჟურნალებში, ასევე ამ პრობლემისადმი სისტემატურად მიძღვნილი დიდი საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენციებისა და სიმპოზიუმების შრომათა კრებულებში.

დუღილი, როგორც ფიზიკური პროცესი ფართოდ არის გამოყენებული ტექნიკისა და ტექნოლოგიის მრავალ დარგში. კერძოდ: ქიმიურ და ფარმაცევტულ მრეწველობაში, სამედიცინო და კვების ტექნოლოგიაში, მეტალურგიაში, ატომურ და თბოენერგეტიკაში და სხვა. აქედან გამომდინარე ცხადია, რომ დუღილის ფიზიკური პროცესის და მისი თანმხლები მოვლენების მიმდინარეობის კანონზომიერებათა სწორი ცოდნა მნიშვნელოვნად აამაღლებს დუღილზე დაფუძნებული ტექნოლოგიური პროცესების საიმედოობას და ხელს შეუწყობს ზემოხსენებული დარგების შემდგომ განვითარებას.

წინამდებარე ნაშრომი ეძღვნება ატმოსფერული წნევის პირობებში წყლის დუღილის თანმხლები მოვლენის – სითხის მხრიდან ხურების ზედაპირზე მოქმედი რეაქტიული ძალის წარმოქმნის პირობების თეორიულ შესწავლას, ამ ძალის სიდიდის ექსპერიმენტულ გაზომვის შესაძლებლობის გამოვლენას და ამ შესაძლებლობის პრაქტიკულ განხორციელებას.

თავი I. პრობლემის არსი, ლიტერატურის მიმოხილვა და სამუშაოს მიზანი

1.1. სითხის ისტორია

სითხის დუდილის პროცესი და მასთან დაკავშირებული ფიზიკური მოვლენები საუკუნეზე მეტი ხნის განმავლობაში წარმოადგენდა და დღესაც წარმოადგენს მსოფლიოს მრავალი ქვეყნის მეცნიერთა განსაკუთრებული ინტერესის მატარებელ საგანს.

აღნიშნული პრობლემის კვლევის სერიოზული ტრადიცია არსებობს საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ენერგეტიკის და ტელეკომუნიკაციის ფაკულტეტის თბოენერგეტიკის და ენერგოეფექტურობის დეპარტამენტის ენერჯის არატრადიციული და განახლებადი წყაროების სამეცნიერო ლაბორატორიაში. ეს ტრადიცია სათავეს იღებს ჯერ კიდევ გასული საუკუნის ოთხმოციანი წლებიდან, როდესაც მაშინდელ, თეორიული და ზოგადი თბოტექნიკის №11 კათედრაზე და ამ კათედრის ბაზაზე ჩამოყალიბებულ თბოფიზიკის კათედრაზე, ყოველწლიურად მუშავდებოდა სახელშეკრულებო თუ საბიუჯეტო სამეცნიერო თემები, რომლებიც ეძღვნებოდა სითხის დუდილის თანმხლები სხვადასხვა მოვლენების მეცნიერულ კვლევას. განსაკუთრებით აღსანიშნავია ხსენებულ კათედრაზე შესრულებული კვლევები, რომელთა შედეგებმაც საერთაშორისო აღიარება ჰპოვეს [1-6].

მიუხედავად ყოველივე ზემოთქმულისა სითხის დუდილის მექანიზმი ჯერ კიდევ არ არის ბოლომდე შესწავლილი, რასაც ნათლად ადასტურებს ის ფაქტი, რომ სითხის დუდილის შესწავლას ყოველწლიურად ეძღვნება ათასზე მეტი სამეცნიერო პუბლიკაცია, რომლებიც სისტემატურად ქვეყნდება როგორც მსოფლიოს სხვადასხვა ქვეყნის სერიოზულ სამეცნიერო ჟურნალებში, ასევე ამ პრობლემისადმი სისტემატურად მიძღვნილი დიდი საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენციებისა და სიმპოზიუმების შრომათა კრებულებში.

დუდილი, როგორც ფიზიკური პროცესი ფართოდ არის გამოყენებული ტექნიკისა და ტექნოლოგიის მრავალ დარგში. კერძოდ ქიმიურ და ფარმაცევტულ მრეწველობაში, სამედიცინო და კვების ტექნოლოგიაში, მეტალურგიაში და ატომურ ენერგეტიკაში. აქედან გამომდინარე ცხადია, რომ და მისი თანმხლები მოვლენების მიმდინარეობის კანონზომიერებათა სწორი ცოდნა მნიშვნელოვნად აამაღლებს დუდილზე დაფუძნებული ტექნოლოგიური პროცესების საიმედოობას და ხელს შეუწყობს ზემოხსენებული დარგების შემდგომ განვითარებას.

ამასთანავე უნდა აღინიშნოს რომ სითხის დუდილი ძალზე რთულ ფიზიკურ პროცესს წარმოადგენს. მის ინტენსივობაზე მოქმედებს მრავალი, როგორც გარეგანი, ასევე შინაგანი ფაქტორი. კერძოდ წნევა, ზედაპირის ტემპერატურა, სითხისა და ზედაპირის მასალის თბოფიზიკური თვისებები, ზედაპირის სიმქისე, სითხის ნაკადის სიჩქარე და სხვა. დუდილი ხასიათდება ისეთი მაჩვენებლებით, როგორცაა თბოგადაცემის კოეფიციენტი, ხვედრითი თბური ნაკადი, სითხის გადახურების ან გადაცივების ტემპერატურა, ორთქლწარმოქმნის ცენტრთა რიცხვი, ბუშტების მოწყვეტის დიამეტრი და სიხშირე და სხვა.

წინამდებარე სადისერტაციო ნაშრომი ზოგადად მიზნად ისახავს დუდილის პროცესში თხევადი აგრეგატული მდგომარეობიდან აირად მდგომარეობაში გადასული სითხის მოლეკულების სიჩქარის ცვლილებით გამოწვეული მოძრაობის რაოდენობის ცვლილების ფენომენოლოგიურ შესწავლას. ცნობილია, რომ მოძრაობის რაოდენობის ცვლილება აღძრავს რეაქტიულ ძალას, რომელიც მიმართულია სითხის საორთქლებელი ზედაპირის მართობულად ორთქლიდან სითხისაკენ [7]. კვლევის კონკრეტულ მიზანს წარმოადგენს იმ რეაქტიული ზემოქმედების შესწავლა, რომელიც ხდება უშუალოდ ხურების

ზედაპირზე, სითხიდან ორთქლის ბუშტებში გადასული მოლეკულების მიერ.

ექვსგარეშა, რომ ზემოხსენებული კვლევის შედეგები მნიშვნელოვნად შეუწყობს ხელს დუდილის მექანიზმის შემდგომ შესწავლას და დუდილის კანონზომიერებათა დაზუსტებას.

1.2. საკითხის დასმა

როგორც აღნიშნეთ, დუდილი ფართოდ გამოიყენება ტექნიკის და ტექნოლოგიის მრავალ დარგში. ხშირად დუდილი მიმდინარეობს ისე გამახურებელ ელემენტებზე, რომლებსაც არ გააჩნიათ დიდი სისქე (მაგალითად მადულარ ატომურ რეაქტორებში) და მექანიკურადაც არ გამოირჩევიან დიდი სიმტკიცით. თუ წარმოვიდგენთ, რომ ასეთ ზედაპირზე ბუშტის ყოველი ჩასახვისას გამახურებელ ელემენტზე მოქმედებს გარკვეული რეაქტიული ძალა, ამასთან, ვინაიდან ბუშტები ყოველთვის ერთი და იგივე მოქმედ ცენტრზე წარმოიშვება და საკმაოდ დიდი სიხშირით, მაშინ ადვილი წარმოსადგენია ისიც, რომ ასეთი ადგილები ხსენებულ ზედაპირზე განიცდიან პერიოდულ მექანიკურ ზემოქმედებას, რაც საყოველთაოდ ცნობილია, რომ იწვევს ლითონის დაღლას.

აღნიშნულიდან გამომდინარე მოსალოდნელია, რომ მსგავს შემთხვევებში მოხდეს მადულარი ელემენტის დაზიანება, მისი მწყობრიდან გამოსვლა და შესაბამისად, ტექნოლოგიურ პროცესში ავარიული სიტუაციის ჩამოყალიბება.

დუდილი ფართოდაა გამოყენებული აგრეთვე კოსმოსურ ტექნიკაში. ცნობილია, რომ ხანგრძლივი, პილოტირებული კოსმოსური ფრენის შემთხვევაში, კოსმონავტების სუთქვისათვის აუცილებელ ჟანგბადს თხევად მდგომარეობაში იმარაგებენ და საფრენ აპარატში ხდება მისი ხელახალი რეგაზიფიკაცია. ამისათვის იყენებენ თხევადი ჟანგბადის დუდილით აორთქლებას გარკვეული სადულარი

ელემენტების გამოყენებით. თუ წარმოვიდგენთ, რომ ასეთი ელემენტების ზედაპირზე ბუმბიტის ყოველი ჩასახვისას გამახურებელ ელემენტზე მოქმედებს გარკვეული რეაქტიული ძალა, მაშინ ადვილი წარმოსადგენია ისიც, რომ თავისუფალი ფრენის და უწონობის პირობებში, აპარატის ამა თუ იმ ნაწილის ზედაპირზე აპარატის შიდა მოცულობიდან მოქმედი ძალის გავლენით საფრენმა ხომალდმა შეიძლება გარკვეულად შეიცვალოს ფრენის ტრაექტორია და დასჭირდეს მისი კორექცია, რაც დამატებით ენერგოდანახარჯებთან იქნება, რა თქმა უნდა, დაკავშირებული.

1.3. ლიტერატურის მიმოხილვა

სითხეების დუდილის პროცესი ფართოდ გამოიყენება ტექნიკისა და ტექნოლოგიის მრავალ დარგში. დუდილი გამოიყენება სხვადასხვა დეტალებისა და კვანძების ტემპერატურული რეჟიმების სტაბილიზაციის ამოცანების პრაქტიკულ გადაწყვეტებში, თბური ენერჯის ერთი არედან მეორესთვის სწრაფი და ინტენსიური გადაცემის აუცილებლობის შემთხვევებში, თხევადი აირების რეგაზიფიკაციის პროცესებში, გარკვეული ზედაპირების ან არეების იზოთერმიულობის უზრუნველსაყოფად და სხვა. ამ მხრივ საკმარისია დავასახელოთ ენერგეტიკა, კერძოდ თბოენერგეტიკა, ქიმიური ტექნოლოგია, კოსმოსური ტექნიკა, სამაცივრო და კრიოგენული ტექნიკა და სახალხო მეურნეობის სხვა მრავალი დარგი, რომლებშიც გამოყენებული მანქანა-დანადგარების მუშაობის საიმედოობა, ეფექტურობა და ეკონომიურობა, ხშირ შემთხვევაში მთლიანად დამოკიდებულია მათში მიმდინარე დუდილის პროცესების საპროექტო გათვლებთან შესატყვისობაზე.

აღნიშნულიდან გამომდინარე ცხადია, რომ დიდი მნიშვნელობა ენიჭება დუდილის, როგორც ფიზიკური მოვლენის შესწავლას და მისი მახასიათებლების ზუსტი გაანგარიშების შესრულების შესაძლებლობის გამოვლენას.

დუდილი, როგორც ცნობილია, არის სითხის ორთქლადქცევა თვით სითხის მოცულობაში, კერძოდ ძირითადად სითხისა და გამახურებელი ზედაპირის ურთიერთშეხების ზონაში. სითხის ორთქლადქცევა ხდება გამახურებელ ზედაპირზე წარმოქმნილ ორთქლის ბუშტებში, რომლებიც გარკვეული სიხშირით წყდებიან ზედაპირს და გამოდიან სითხიდან.

იაპონელმა ნუკიამამ გამოიკვლია, რომ სითხეში, კერძოდ წყალში დუდილის პროცესის წამოწყება და ხასიათი დამოკიდებულია სითხოს იმ რაოდენობაზე, რომელიც სითხეს მიეწოდება კედლიდან ფართობის ერთეულზე დროის ერთეულში. ზედაპირის ფართობის ერთეულზე დროის ერთეულში გადაცემულ სითხოს რაოდენობას **ხვედრითი თბური ნაკადი** ეწოდება.

ნუკიამამ კვლევის შედეგები წარმოადგინა გრაფიკულად $q - T$ დიაგრამის სახით და მას ნუკიამას მრუდი ეწოდება. ნუკიამას მრუდი ნაჩვენებია ნახ. 1.1-ზე წარმოდგენილ დიაგრამაზე [8], რომლის აბსცისათა ღერძზე გადაზომილია ტემპერატურათა სხვაობა გამახურებელი ელემენტის ზედაპირის ტემპერატურასა და მდულარე სითხის ნაჯერობის ტემპერატურას შორის, ხოლო ორდინატთა ღერძზე კი დუდილის პროცესში განვითარებული ხვედრითი თბური ნაკადის მნიშვნელობები.

როგორც გამოკვლევებმა აჩვენეს, წყლის დუდილი იწყება იმ შემთხვევაში თუ სითხე გაცხელებულია ნაჯერობის ტემპერატურამდე და კედლის ტემპერატურა აღემატება სითხის ნაჯერობის ტემპერატურას არანაკლებ $3-4^{\circ}$ გრადუსით. მანამდე, ვთქვათ $1-2^{\circ}$ გრადუსით უფრო ცხელი ზედაპირიდან სითხეში სითხოს გადაცემა მიმდინარეობს მხოლოდ თავისუფალი კონვექციით. ტემპერატურათა სხვაობის მომატება იწვევს გამახურებელ ზედაპირზე სითხის ორთქლის ბუშტების წარმოქმნას. ბუშტები წარმოიქმნებიან გამახურებელი ელემენტის ზედაპირზე არსებულ ეგრეთწოდებულ დუდილის ცენტრებზე, იზრდებიან და შემდეგ წყდებიან.

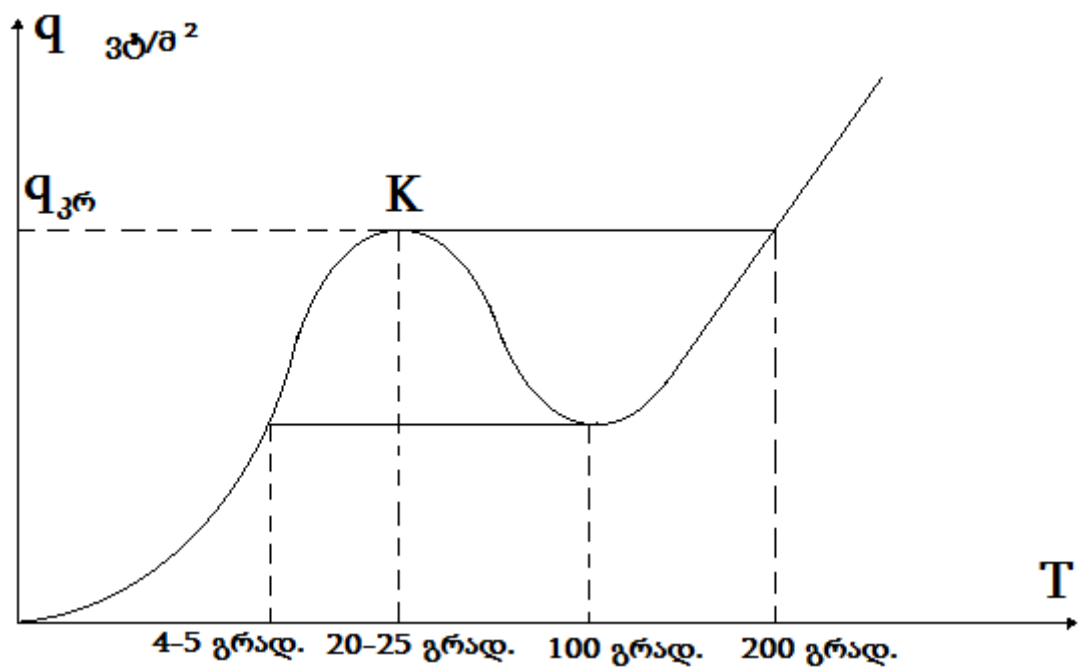
ტემპერატურათა სხვაობის ზრდით იზრდება დუღილის მოქმედ ცენტრთა რაოდენობა, რაც იწვევს დუღილის პროცესის ინტენსიფიკაციას, ანუ ხვედრითი თბური ნაკადის ზრდას. მაგრამ თუ ტემპერატურათა სხვაობამ 20-25° გრადუსამდე მიაღწია, დუღილის მოქმედ ცენტრთა რაოდენობა იმდენად იზრდება, რომ ურთიერთ მეზობელი ბუშტები ერთმანეთს შეეხებიან და გაერთიანდებიან ერთიან ორთქლის ფენად. სწორედ ეს მომენტი ასახული ნახ. 1-ზე წარმოდგენილ ნუკიამას მრუდზე K წერტილით.

ტემპერატურათა სხვაობის შემდგომი მატება იწვევს ორთქლის ფენის სისქის ზრდას და როგორც ეს დიაგრამიდან ჩანს, მკვეთრად ეცემა ზედაპირიდან სითხეში გადაცემული სითბოს ხვედრითი ნაკადი. ხვედრითი თბური ნაკადი დუღილის პროცესის ერთერთი მნიშვნელოვანი მახასიათებელია. მოცემულ წნევაზე სითხის ნაჯერობის ტემპერატურასთან შედარებით რაც უფრო მაღალია ხურების ზედაპირის (კედლის) ტემპერატურა, და შესაბამისად, რაც უფრო მაღალია კუთრი თბური ნაკადის მნიშვნელობა, მით უფრო ინტენსიურია დუღილი და მაღალია თბოგაცემის კოეფიციენტი. მაგრამ კუთრი თბური ნაკადის გარკვეულ მაღალ მნიშვნელობაზე დგება მომენტი, როცა მყისიერად მცირდება თბოგაცემის კოეფიციენტი, რაც იწვევს ხურების ზედაპირის ტემპერატურის სწრაფ ზრდას, ხშირ შემთხვევაში დნობის ტემპერატურამდე. ამ დროს მთავრდება ბუშტოვანი დუღილი და ხურების ზედაპირსა და სითხეს შორის ჩნდება ორთქლის გამყოფი ფენა.

თბოგაცემის კოეფიციენტის და კუთრი სითბური ნაკადის სწრაფი შემცირების მომენტს **დუღილის კრიზისი** ეწოდება, ხოლო უშუალოდ ამ მომენტამდე განვითარებული კუთრი თბური ნაკადის მნიშვნელობას (მაქსიმალურ თბურ ნაკადს) **კრიტიკული თბური ნაკადი**.

დუღილის პროცესს პირობითად სამ რეჟიმად წარმოადგენენ:

1. დუღილის საწყისი რეჟიმი;
2. განვითარებული დუღილის რეჟიმი;
3. წინაკრიზისული დუღილის რეჟიმი.



ნახ. 1. ნუკლეარული მრუდი

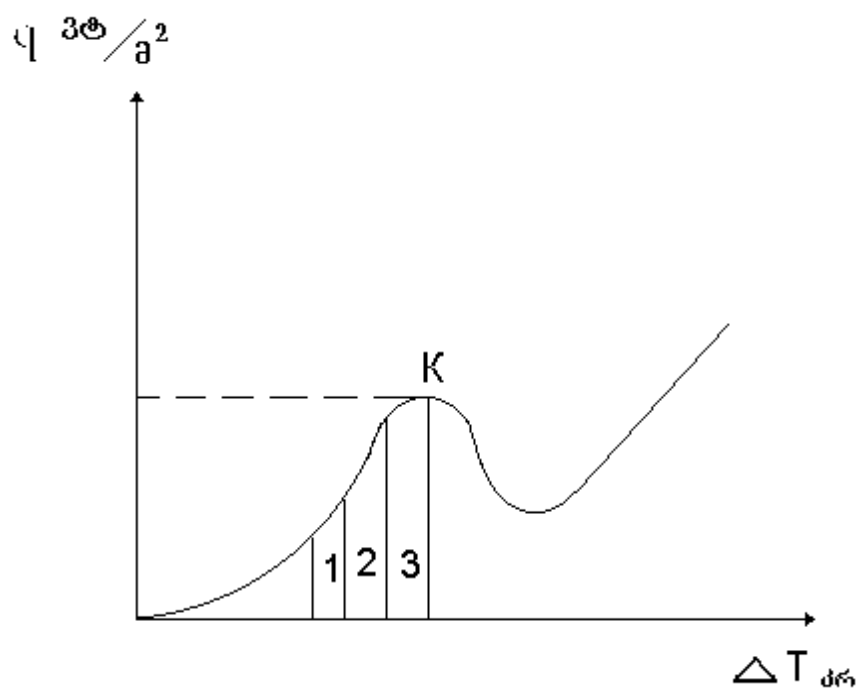
დუდილის ჩამოთვლილი რეჟიმები წარმოდგენილია ნახ. 2-ზე, რომელზეც ნუკიამას მრუდის არაბული ციფრებით დანომრილი უბნები სწორედ დუდილის ზემოთ ჩამოთვლილ რეჟიმებს შეესაბამებიან.

დუდილის კრიზისი წარმოადგენს ერთ-ერთ ურთულეს თბოფიზიკურ პრობლემას. ჯერჯერობით არ არის მიღებული დასკვნა, რომელიც ზოგადად დაახასიათებდა ამ პროცესს. საერთოდ კი არსებულ ფორმულებს, რომლებიც ახასიათებენ კრიტიკულ თბურ ნაკადს, აქვთ მხოლოდ ემპირიული ხასიათი.

უკანასკნელი წლების გამოცდილება ამ საკითხთან დაკავშირებით ნაწილობრივ ხსნის დუდილის კრიზისის მექანიზმს და გვაძლევს კრიტიკული თბური ნაკადის მეტნაკლებად ზუსტი გამოთვლის შესაძლებლობას.

პრაქტიკაში განხორციელებული შემთხვევებიდან გამომდინარე სამეცნიერო ლიტერატურაში ძირითადად ხდება დუდილის პროცესების ოთხ ტიპად კლასიფიცირება: სითხის დუდილი დიდ მოცულობაში, მოძრავი სითხის ბუმტოვანი დუდილი, დუდილი დისპერსიულ-წრიული რეჟიმით მოძრავ თხევად აფსკში და დუდილი სითხის მიერ ცილინდრის განივი შემოდინების რეჟიმში. დუდილის ზემოთ ჩამოთვლილ ოთხივე ტიპს ახასიათებს დუდილის კრიზისის განვითარება ხვედრითი თბური ნაკადის გარკვეულ, დუდილის მოცემული ტიპისათვის დამახასიათებელ მნიშვნელობაზე.

სითხის დიდ მოცულობაში დუდილისას ორთქლწარმოქმნა ხდება სითხეში ჩაძირული გამახურებელი ელემენტის ზედაპირზე. მოცულობაში ვითარდება სითხის თავისუფალი კონვექცია. ხურები ზედაპირს გამუდმებით ეხება სითხის სულ ახალ-ახალი არეები, სითხე აღწევს ნაჯერობის ტემპერატურას და ხურების ზედაპირზე წარმოქმნილი ორთქლის ბუმტები იწყებენ ზედაპირიდან მოწყვეტას გარკვეული სიხშირით. რაც მაღალია სითბური ნაკადი, მით მეტია ორთქლის



ნახ. 2. დუღილის რეჟიმები

ბუშტების ერთდროულად წარმომქმნელი მოქმედი ცენტრების რაოდენობა. ხვედრითი თბური ნაკადის კრიტიკული მნიშვნელობის მიღწევის შემდეგ ორთქლწარმომქმნელი ცენტრების რაოდენობა აღწევს ისეთ მაღალ მნიშვნელობას, რომ ხურების ზედაპირზე ბუშტები ერთიანდებიან, ქმნიან ორთქლის უწყვეტ ფენას რაც თავის მხრივ იწვევს თბოგაცემის მექანიზმის მკვეთრ ცვლილებას. ამასთან, ვინაიდან ორთქლის მიერ ხურების ზედაპირიდან სითბოს ართმევის ინტენსივობა სითხის მიერ სითბოს ართმევის ინტენსივობასთან შედარებით გაცილებით მცირეა, თბოგაცემის მექანიზმის ასეთ ცვლილებას უმრავლეს შემთვევაში მოჰყვება საკმაოდ არასასურველი შედეგები. კერძოდ ხურების ზედაპირის ტემპერატურის მკვეთრი ზრდა, მაღალი წნევის მილის ჰერმეტიულობის დარღვევა (გასკდომა), სითხეში ჩაძირული ელექტროგახურებით მომუშავე ხურების ზედაპირის დადნობა-გადაწვა და სხვა.

გამახურებელი ზედაპირის მიმართ გასწვრივად იძულებითი კონვექციით მოძრავი სითხის დინებისას განხორციელებული ბუშტოვანი დუღილის პროცესში გამახურებელ ზედაპირზე დუღილის კრიზისი შეიძლება განვითარდეს იმ შემთხვევებშიც კი როცა სითხე არ არის გაცხელებული ნაჯერობის ტემპერატურამდე, ან სითხეში ორთქლის მცირე შემცველობაა. ასეთ ვითარებაში წარმომქმნილი დუღილის კრიზისი აიხსნება იმით, რომ ბუშტები თავს იყრიან გამახურებელ ზედაპირის მახლობლობაში და მათ მიერ შექმნილი ორთქლის შრე ხელს უშლის სითხის მოძრაობას ცხელი გამახურებელი ზედაპირისაკენ, ანუ აფერხებს ამ უკანასკნელის სითხით მომარაგების პროცესს.

თხევადი ნივთიერების აფსკის სახით დისპერსიულ-წრიული მოძრაობის რეჟიმში დუღილისას, ჩვეულებრივად, თხევადი აფსკი მთლიანად ფარავს და აცივებს ხურების ზედაპირს. თბური ნაკადის გაზრდის შემთხვევაში სითხის აფსკი შეიძლება წვრილ ნაკადებად დაიშალოს რაც გამოიწვევს მშრალი უბნების გაჩენას და შესაბამისად ამ უბნების სწრაფ და არასასურველ გადახურებას.

სითხის მიერ ცილინდრული ზედაპირების განივი შემოდინების დროს დუდილის კრიზისი შეიძლება განვითარდეს ცილინდრული გამახურებელის ზედაპირზე. ამ დროს სითხე მოძრაობს ცილინდრის ღერძის მართობულად. კრიზისის დადგომამდე ცილინდრის უკანა მხარეს (ე.ი. ცილინდრის კედელზე სითხის დაჯახების საწინააღმდეგო მხარეს) წარმოიქმნება ორთქლის შრე, რომელიც ხელს უშლის სითხის მისვლას ზედაპირამდე. ამის გამო მოძრაობის ასეთი სქემის პირობებში განხორციელებული დუდილის პროცესებში წარმოქმნილი კრიზისული სიტუაციები, როგორც წესი, ყოველთვის ცილინდრზე სითხის დაჯახების სწინააღმდეგო მხარეს ვითარდებიან.

ყველა შემთხვევაში კრიტიკული თბური ნაკადის მნიშვნელობა დამოკიდებულია სხვადასხვა ჰიდროდინამიკურ, თბურ და გეომეტრიულ ფაქტორებზე. ზოგადად კი შეგვიძლია ვთქვათ, რომ დუდილის კრიზისის დადგომა გაპირობებულია ხურების ზედაპირის მახლობლად საჭირო რაოდენობის გამაციებელი სითხის არ არსებობით.

ორთქლის გენერაციის (სითხის დუდილის) პროცესი უაღრესად რთულ არა მარტო თბურ, არამედ ამასთან ერთად ასევე უაღრესად რთულ ჰიდროდინამიურ მოვლენათა რიცხვს მიეკუთვნება. საკმარისია აღინიშნოს, რომ სითხის დუდილი სივრცეში არაერთგვაროვნად განაწილებული ფაზური გარდაქმნის პროცესებისა და ტურბულენტური ნაკადების ერთობლიობას წარმოადგენს, ხოლო ტურბულენტობა, თავის მხრივ, უკვე მეორე საუკუნეა კლასიკური ფიზიკის ყველაზე მნიშვნელოვანი გადაუწყვეტელი პრობლემის სტატუსს ინარჩუნებს.

დუდილის პრობლემის კვლევის მნიშვნელობას, მეორეს მხრივ, მისი გამოყენების უაღრესად ფართო სფერო განაპირობებს, რომელიც თბურ და ატომურ ენერგეტიკასთან ერთად მოიცავს კოსმოსურ, საავიაციო, კრიოგენულ და სამაცივრო ტექნიკას, ქიმიურ და კვების ტექნოლოგიასა და სხვა დარგებს. თანაც, რაც არანაკლებ მნიშვნელოვანია, თითქმის ყველა შემთხვევაში დუდილის პროცესი

ტექნიკური კომპლექსების თერმულად და ჰიდროდინამიურად ყველაზე დაძაბულ კვანძებში ხორციელდება, რომელთა რაციონალურ კონსტრუირებას, როგორც წესი, გადამწყვეტი მნიშვნელობა გააჩნია.

დუდილის პრობლემის კვლევა გასული საუკუნის ოცდაათიანი წლებიდან იღებს სათავეს თბოგადაცემის კლასიკოსის მაქს იაკობის (აშშ-ში ემიგრაციის შემდგომ – მაქს ჯეკობის) და მისი თანამშრომელების სამუშაოებიდან. მეოცე საუკუნის სამოცდაათიან წლებამდე კვლევა ორ ძირითად სუპერ სახელმწიფოში (აშშ-სა და საბჭოთა კავშირში) იყო კონცენტრირებული. შემდგომში კვლევის ფრონტი მნიშვნელოვნად გაფართოვდა და იაპონიასთან და ევროპის ქვეყნებთან ერთად ჩინეთიც მოიცვა.

ათეული წლების თეორიული და ექსპერიმენტული კვლევის შედეგად მნიშვნელოვანი შედეგებია მიღებული დუდილის პროცესში მოქმედი მრავალფეროვანი ფიზიკური ეფექტების შესწავლაში, გადაწყვეტილია ამ ეფექტების რეალიზაციის მრავალი გამოყენებითი ასპექტი. ამასთან ერთად, კვლავაც დღის წესრიგში რჩება თბოგადაცემის პროცესის ინტენსიურობის, თბოგადაცემის მრავალფეროვანი მრუდებისა და ე. წ. დუდილის კრიზისის მოვლენის ერთიანი აღწერის პრობლემა.

პრობლემის კვლევის თანამედროვე მდგომარეობის შეჯამების ცდა მოცემულია წამყვანი ამერიკელი მკვლევარების ორ მიმოხილვაში (L. Piro, W. Rosenow, S. S. Doerffer, Nucleate pool-boiling heat transfer, 1: review of parametric effects of boiling surface, *Int. J. Heat Mass Transfer*, vol. 47 (23), 2004, pp. 5033-5044; და I. L. Piro, W. Rosenow, S. S. Doerffer, Nucleate pool-boiling heat transfer, 2: assessment of prediction methods, *Int. J. Heat Mass Transfer*, vol. 47 (23), 2004, pp.5045-5057), რომელიც 2004 წლის ბოლოს თბოგადაცემის მთავარ საერთაშორისო ჟურნალში გამოქვეყნდა [9, 10]. შემაჯამებელ პუბლიკაციაზე აცხადებს პრეტენზიას აგრეთვე მაქს ჯეკობის მედალის (თბოგადაცემის სფეროს ყველაზე პრესტიჟული

ჯილდოს) 2005 წლის ლაურეატის ვიჯაი დჰირის (ასევე აშშ) ე. წ. “ჯეკობის მოხსენება”, რომელიც არც ისე დიდი ხნის წინ გამოქვეყნდა [11] წამყვან ამერიკულ ჟურნალში (K. V. Dhir, Mechanistic Prediction of Nucleate Boiling Heat Transfer - Achievable or Hopeless Task? *J. Heat Transfer*, vol. 128 (1), 2006, pp. 1-12).

მიმოხილვათა ძირითადი დასკვნები მთლიანობაში პრობლემის გადაუწყვეტელობაზე მეტყველებს. ამ მხრივ დამახასიათებელია პროფ. დჰირის მოხსენების [11] სათაურში გატანილი შეკითხვა, რომელიც საერთოდ ბირთვული დუდილის თბოგადაცემის მექანიკური წინასწარმეტყველების ამოცანის გადაწყვეტადობასაც კი ერთგვარი ეჭვის ქვეშ აყენებს.

ამასთან ერთად, ზოგადი დასკვნების სამართლიანობის ფონზე, ხსენებულ მიმოხილვებში მოყვანილი კვლევის თანამედროვე მდგომარეობის შეფასებები ფრიად საკამათოა.

ლიტერატურის ანალიზმა ცხადჰყო, რომ ისეთი მნიშვნელოვანი მოვლენა, როგორცაა მადულარი სითხის მიერ ხურების ზედაპირის მიმართ აღძრული მექანიკური ზემოქმედება და ამ მოვლენის საფუძველზე თბური ძრავის (ორთქლის მანქანის) შექმნის შესაძლებლობა პრაქტიკულად სავსებით შეუსწავლელია. ამ მხრივ გამონაკლისს წარმოადგენს აკადემიკოს ს. ქუთათელაძის მონოგრაფია [7], რომელშიც თეორიულადაა განხილული ორთქლისა და სითხის ფაზათა გამყოფ ზედაპირზე ფაზების მექანიკური ურთიერთზემოქმედების პირობები და გამოყვანილია ორთქლადქცევის პროცესში წარმოქმნილი, ფაზათა გამყოფი ზედაპირის მართობულად მოქმედი რეაქტიული ძალის საანგარიშო ფორმულა:

$$P = \frac{q_s^2}{\rho'' r^2} \frac{(1 - \rho'')}{\rho'} , \quad [6/\theta^2] \quad (1)$$

სადაც q_1 არის აგრეგატული მდგომარეობის ცვლილებაზე, კერძოდ დუდილზე დახარჯული ხვედრითი თბური ნაკადი, [ვტ/მ²]; r - სითხის აორთქლების ფარული სითბო, [ჯ/კგ]; ρ და ρ' - შესაბამისად, სითხისა და ნაჯერი ორთქლის სიმკვრივე, [კგ/მ³].

აღსანიშნავია, რომ (1) განტოლებით ჩატარებული გაანგარიშებების შედეგები მეტყველებენ ფაზათა გამყოფ ზედაპირზე აორთქლებისას წარმოქმნილი რეაქტიული ძალის სიმცირეზე. მართლაც, მაგალითად წყლის ატმოსფერული წნევის პირობებში აორთქლებისას, თუ დუდილზე დახარჯული ხვედრითი თბური ნაკადი შეადგენს ერთ მილიონ ვატს კვადრატულ მეტრზე, (1) ფორმულით გაანგარიშებული რეაქტიული ძალის მნიშვნელობა 0,3283 ნ/მ²-ს შეადგენს, ხოლო ხვედრითი თბური ნაკადის უფრო მცირე მნიშვნელობებზე კიდევ უფრო მცირდება. აქედან გამომდინარე, აღნიშნულ რეაქტიულ ძალას არ გააჩნია რამდენადმე მნიშვნელოვანი პრაქტიკული ღირებულება [7].

მიუხედავად ნათქვამისა, საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ენერგეტიკის და ტელეკომუნიკაციის ფაკულტეტის თბოენერგეტიკის და ენერგოეფექტურობის დეპარტამენტის ენერჯის არატრადიციული და განახლებადი წყაროების სამეცნიერო ლაბორატორიაში ჩატარებული მრავალჯერადი დაკვირვებების შედეგად დადგენილი იქნა, რომ სითხეში თავისუფლად ჩადირობულ ამორთქლებელ ზედაპირებზე დუდილისას, სითხის მხრიდან ხურების ზედაპირზე მოქმედებს გაცილებით თვალსაჩინო მნიშვნელობის მქონე ძალა, რომლის მოქმედების გამო ხდება სითხეში ვერტიკალურად ჩაშვებული გამახურებელი ზედაპირის გადახრა ვერტიკალური მდგომარეობიდან და სხვადასხვა პროცესების კვლევისას გამომჟღავნდა, რომ ამ გადახრის კუთხის მნიშვნელობა პირდაპირპროპორციულია ხვედრითი თბური ნაკადის სიდიდისა.

1.3.1. დუღილის კვლევისადმი მიძღვნილი თეორიული სამუშაოები.

იმის გათვალისწინებით, რომ დუღილის კრიზისი დგება მაშინ, როდესაც წინაკრიზისული რეჟიმისთვის დამახასიათებელი ორფაზა სასაზღვრო შრე ირღვევა, ს. ქუთათელაძემ ბუმტოვანი დუღილის რეჟიმის ცვლილება განსაზღვრა როგორც წმინდა ჰიდროდინამიკური მოვლენა [12]. ორფაზა სასაზღვრო შრე ირღვევა მაშინ, როდესაც ხურების ზედაპირზე წარმოქმნილ ორთქლს აქვს იმდენად დიდი კინეტიკური ენერგია, რომ სითხე ვეღარ გადის ორთქლის ფენაში. წინაკრიზისული დუღილის ფაზაში ხდება ორთქლის და სითხის ისე ინტენსიური შერევა, რომ ორფაზა სასაზღვრო შრის რღვევა შეიძლება ერთნაირად განვითარდეს ხურების ზედაპირის ნებისმიერ ადგილას.

დუღილის ზემოთთქმული მოდელის საფუძველზე ს. ქუთათელაძემ მიიღო შემდეგი ტოლობა:

$$q_{კრ} = K r \cdot (\rho'')^{1/2} \sqrt{g \delta \sigma (\rho' - \rho'')}^{1/4} \quad (2)$$

სადაც r - ორთქლების ფარული სითბოა, ჯ/კგ;

g - სიმძიმის ძალის აჩქარება, მ/წმ²;

σ - ზედაპირული დაჭიმულობის კოეფიციენტი, ნ/მ;

ρ' და ρ'' - სითხის და ორთქლის სიმკვრივე ნაჯერობის ტემპერატურაზე, კგ/მ³;

(2) გამოსახულებაში შემავალი კოეფიციენტი K გარკვეულ მუდმივ და უგანზომილებო სიდიდეს წარმოადგენს.

ამ კოეფიციენტის განსაზღვრისათვის ნ. ზუბრმა [13] კუბური ელემენტალური მოცულობებისათვის, რომლებშიც ჩაწყობილია ორთქლის სფერული ბუმტები, რელის მეთოდის გამოყენებით გამოიკვლია, თუ რიცხვითა რა ინტერვალში შეიძლება იყოს K კოეფიციენტის ქვემარტივი

მნიშვნელობა. ამ მეთოდის მიხედვით გამახურებლის ზედაპირზე სითხეში წარმოსახვით განლაგებულ კუბის ფორმის უჯრედებში მოცულობებში წარმოიქმნება სფერული ორთქლის ბუშტები. მან დაადგინა, რომ განხილული იდეალური მოდელისათვის K კოეფიციენტის რიცხვითი მნიშვნელობა მოთავსებულია ინტერვალში:

$$(\pi / 3^{1/2} 128)^{1/2} < K < (\pi / 128)^{1/2} \quad (3)$$

ანუ, უშუალოდ

$$K \approx \pi / 24 = 0.13 \quad (4)$$

ამასთან უნდა აღინიშნოს, რომ მრავალრიცხოვანი ექსპერიმენტული მონაცემების თანახმად K მუდმივა პრაქტიკულად ყოველთვის მეტია 0,13-ზე, ამიტომ პრაქტიკულ გაანგარიშებებში მიღებულია, რომ ამ კოეფიციენტის რიცხვითი მნიშვნელობა 0,14-ს შეადგენდეს [14]. დღეისათვის თამამად შეიძლება ითქვას, რომ ფორმულა (2) არის მრავალი ექსპერიმენტული შედეგებით დადასტურებული საანგარიშო გამოსახულება. მაგალითისთვის, ნახ. 1.3-ზე ნაჩვენებია ე. კაზაკოვას [15] მიერ მიღებული ექსპერიმენტული შედეგების შედარება ს. ქუთათელაძის (2) ფორმულით მიღებულ თეორიულ შედეგებთან. ექსპერიმენტები ჩატარებული იყო დისტილირებული წყლის დიდ მოცულობაში ბუნებრივი ცირკულაციისას ბრტყელ ფირფიტებზე დუდილის პირობებში. ექსპერიმენტული შედეგები გამოსახულია მუქი წერტილებით. აქვე, უწყვეტი მრუდით ნაჩვენებია (2) ფორმულით გაანგარიშებული, ნაჯერობის ტემპერატურამდე მიყვანილი წყლის დუდილისას პროგნოზირებული კრიტიკული თბური ნაკადის დამოკიდებულება წნევაზე. როგორც ნახ. 3-დან ჩანს, წნევების მთელ შემოწმებულ ინტერვალში გაანგარიშებული

მრუდი და ექსპერიმენტული მონაცემები საკმარისი სიზუსტით ემთხვევიან ერთმანეთს.

თუ ი. ალადიევს და სხვა მკვლევარების მონაცემებს კრიტიკული თბური ნაკადის სიმძიმის ძალის აჩქარებაზე დამოკიდებულების შესახებ [16] შევადარებთ (2) ფორმულით მიღებულ სიდიდეებს ვნახავთ, რომ აჩქარების მნიშვნელობათა საკმაოდ ფართო დიაპაზონისათვის (გ-დან 2500 გ-მდე) q_{kr} -ის დამოკიდებულება სიმძიმის ძალის აჩქარების მე-4 ხარისხის ფესვთან მკვეთრად და აშკარად ინარჩუნებს პროპორციულობას აჩქარებათა მთელ დიაპაზონში [7].

ს. ქუთათელაძის მიერ წამოყენებული დუღილის კრიზისის ჰიდროდინამიკური მოდელისაგან განსხვავებით ჯეკობსმა შეიმუშავა თბური მოდელი, რომლის თანახმადაც თბური ნაკადის მატებასთან ერთად ხურების ზედაპირზე იზრდება დუღილის აქტიური ცენტრების სიხშირე და $q=q_{kr}$ -ის დროს ისეთ რაოდენობას აღწევს, რომ წარმოქმნილი ბუშტები ქმნიან მასიურ ორთქლის ფენას. ჯეკობსის თბური მოდელი განავითარეს გ. კრუჟილინმა [17] და დ. ლაბუნცოვმა [18]. ამ უკანასკნელის აზრით დუღილის წინაკრიზისულ რეჟიმში მაღალი ორთქლშემცველობის მქონე სითხის ზონა განსაკუთრებით მდგრადია მყარი ზედაპირის სიახლოვეს და ხელს უშლის მდუღარე სითხის ახალი ულუფის ხურების ზედაპირთან მიახლოებას.

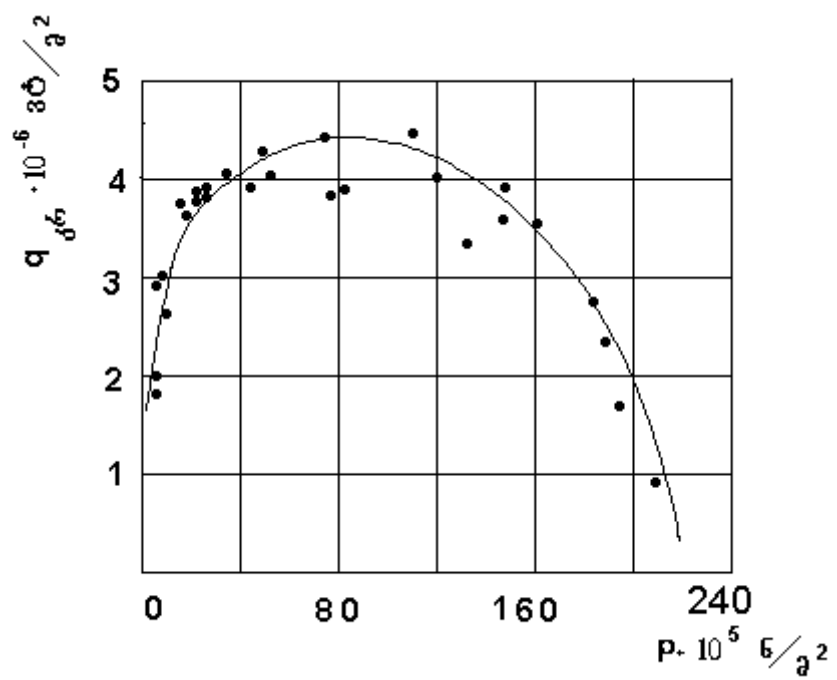
ზემოთქმული აზრიდან გამომდინარე და მსგავსების თეორიის გამოყენებით დ. ლაბუნცოვმა მიიღო კრიტიკული თბური ნაკადის გამოსათვლელი შემდეგი ფორმულა:

$$q_{kr} = K(r \rho' \sigma \lambda T_n)^{1/3} v^{-2/9} [(\rho \rho'' - \rho') / \rho \rho'']^{4/9} \quad (5)$$

სადაც, λ – არის ორთქლის თბოგამტარობის კოეფიციენტი, ვტ/მ²;

v – ორთქლის კინემატიკური სიბლანტის კოეფიციენტი, მ²/წმ;

T_{nax} – წყლის ნაჯერობის ტემპერატურა, K.



ნახ. 3 q_p -ის დამოკიდებულება წნევაზე [9]

თბოტექნიკის დარგში ცნობილი დუდილის კრიზისის ზემოთმოყვანილი მოდელების გარდა მეცნიერთა შორის არსებობს სხვა შეხედულებებიც, რომელთა საფუძველზეც მიღებულია ნახევრად ემპირიული დამოკიდებულებები, რომლებიც დამაკმაყოფილებლად ემთხვევა სხვადასხვა მკვლევართა ცალკეულ ექსპერიმენტულ შედეგებს. მაგრამ დუდილის კრიზისის მარტივი და საყოველთაოდ მიღებული ფიზიკური თეორიის არარსებობის გამო შეუძლებელია მკაცრად და ცალსახად განვსაზღვროთ კრიტიკული თბური ნაკადის ფუნქციონალური დამოკიდებულება სხვადასხვა სითხის სხვადასხვა მასალისაგან დამზადებულ ხურების ზედაპირზე დუდილის ნებისმიერი კონკრეტული შემთხვევისათვის.

1.3.2. დუდილის კვლევისადმი მიძღვნილი ექსპერიმენტული სამუშაოები

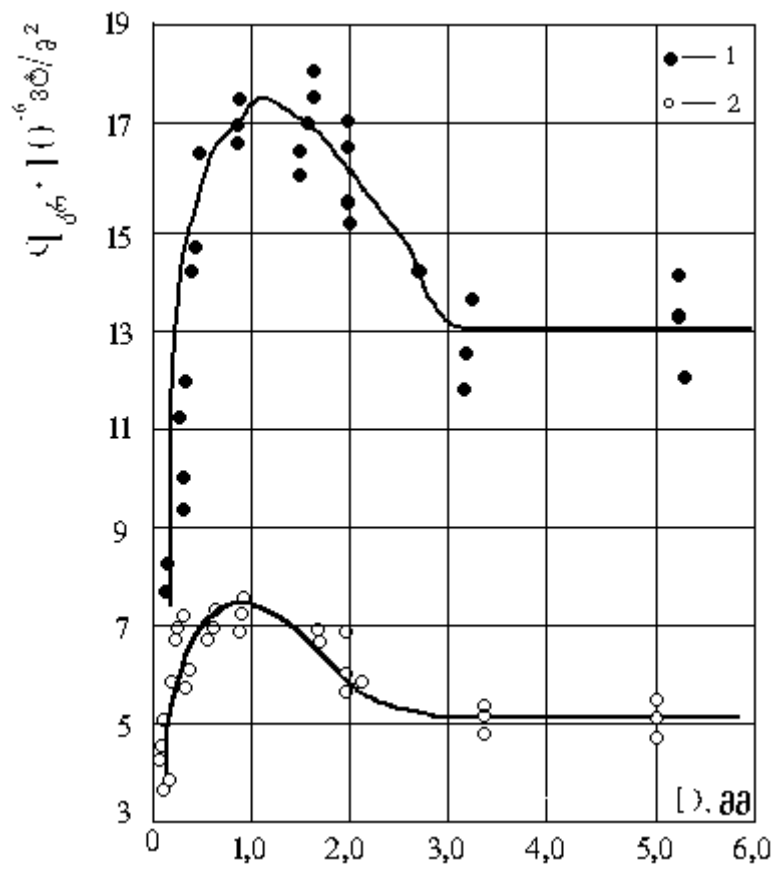
სამეცნიერო ლიტერატურაში არსებობს მრავალი გამოქვეყნებული ნაშრომი, რომლებიც მიძღვნილია სითხის დიდ მოცულობაში დუდილისას განვითარებული თბოგაცემის ექსპერიმენტული კვლევებისადმი. გამოკვლეულია მრავალი კონკრეტული ფაქტორის გავლენა დუდილისას განვითარებული ხვედრითი თბური ხვედრითი ნაკადის სიდიდეზე. წინამდებარე სამუშაოს მიზნებიდან გამომდინარე ჩვენ ამ პარაგრაფში შევეხებით ექსპერიმენტულ სამუშაოთა მხოლოდ იმ ნაწილს, რომელიც შეისწავლის სითხის დიდ მოცულობაში დუდილისას განვითარებულ კრიტიკულ თბურ ნაკადზე გახურების ზედაპირის მასალის, ზომების და სიგლუვის (ზედაპირის დამუშავების ხარისხის) გავლენას.

ერთ-ერთ ნაშრომში [19] მოყვანილია მადუღარი გამახურებელი ელემენტის განივი კვეთის ზომის გავლენა q_{cr} -ის მნიშვნელობაზე. გამახურებლად გამოყენებული იქნა 0,1-დან 5 მმ-მდე დიამეტრის მქონე საკმაოდ გრძელი ჰორიზონტალურად განლაგებული ცილინდრები. ამ

კვლევის შედეგები წარმოდგენილია ნახ. 4-ზე, რომელზეც ნაჩვენებია ცილინდრული გამახურებელი ზედაპირის ჰორიზონტალურ უბანზე წყლისა და სპირტის ნაჯერობის ტემპერატურის შესაბამისი მნიშვნელობების მრუდები. ექსპერიმენტული შედეგებიდან ჩანს, რომ როცა გამახურებელი ელემენტის დიამეტრი 3 მმ-ზე მეტია, კრიტიკული თბური ნაკადის მნიშვნელობა პრაქტიკულად არ არის დამოკიდებული ხურების ზედაპირის ზომებზე, ხოლო თუ მისი ზომები ბუშტის მოწყვეტის დიამეტრის თანაზომადია, ე. ი. 3 მმ-ზე უფრო ნაკლები დიამეტრის მქონე ცილინდრებისათვის, ეს დამოკიდებულება აშკარად ვლინდება.

ბერენსონის ნაშრომში [20] განხილულია დიდ მოცულობაში სითხის დუღილისას ხურების ზედაპირის სველებადობის და გაწიბოვნების გავლენა თბოცვლის პროცესის კრიზისზე. შედეგებმა აჩვენეს, რომ ლითონისაგან დამზადებული გამახურებელი ელემენტის ზემოთ მიმართულ ზედაპირზე დუღილისას ეს გავლენა მინიმალურია და შეიძლება მისი უგულებელყოფა. სხვა ავტორთა ნაშრომების [21-30] თანახმად კი ხურების ზედაპირზე სხვადასხვა დანალექების არსებობა, ზედაპირის ხაოიანობა და ფიზიკური თვისებები კრიტიკული ხვედრითი თბური ნაკადის მნიშვნელობაზე ძლიერ გავლენას ახდენენ. შრომების [23] და [24] ავტორთა აზრით, ეს გავლენა გამოწვეულია მდულარე სითხის მიერ განხილული გამახურებელი ელემენტების ზედაპირების დასველების სხვადასხვა ხარისხის მიზეზით. ცხადია, რომ სველებადობის ხარისხს მკაცრად განსაზღვრავენ როგორც ზედაპირზე წარმოქმნილი ნალექი, ასევე ზედაპირის ხაოიანობა და მასალის ფიზიკური თვისებები.

ნახ. 5-ზე წარმოდგენილია მ. კარნეს და დ. ჩარლსუორტის [22] კვლევების შედეგები, სადაც გამოვლენილია ხურების ზედაპირის ფიზიკური თვისებების გავლენა კრიტიკულ თბურ ნაკადზე. ნაჩვენებია, რომ q_{cr} -ის მნიშვნელობა არის თბოგამტარობის კოეფიციენტის (λ) და ხურების ზედაპირის სისქის ფუნქცია. ანალოგიური შედეგები გვხვდება სხვა ავტორებთანაც.

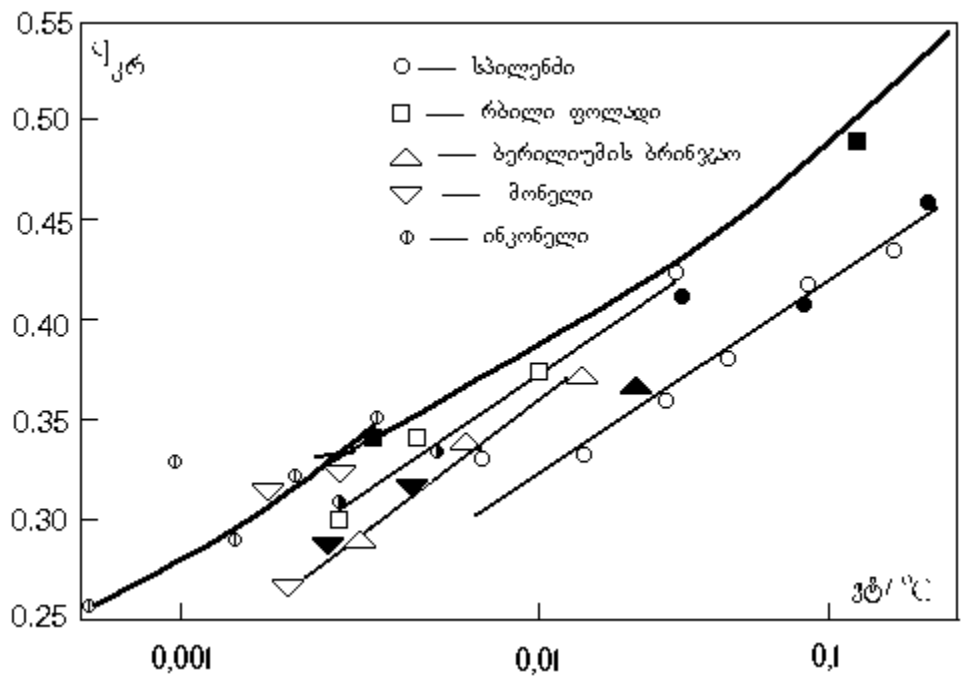


ნახ. 4 q_{gr} -ის დამოკიდებულება ხურების ზედაპირის განივ ზომაზე

აუცილებელია აღინიშნოს, რომ დუდილის პროცესების ექსპერიმენტული შესწავლისას დიდი მნიშვნელობა ენიჭება ექსპერიმენტულ დანადგარში გამოყენებული გამახურებელი ელემენტის სითბური ენერგიით მომარაგების მეთოდს. თუ გახურების მიზნით გამოყენებულია ელექტრული ენერგია, მაშინ გამახურებელი ელემენტის თბური სიმძლავრე მუდმივია და სითხე აცივებს თუ არ აცივებს ხურების ზედაპირს, ამ უკანასკნელში სითბო ყოველთვის გამოიყოფა (სწორედ ამიტომ ხდება ელექტროგამახურებლების გადაწვა დუდილის კრიზისულ რეჟიმში). ამის საპირისპიროდ, თუ გახურების მიზნით გამოყენებულია გამახურებელი ელემენტი (მეორე ზედაპირზე), ან მის მოცულობაში სხვა, გამაცხელებელი ორთქლის კონდენსაციის პროცესი, მაშინ გამახურებელი ელემენტის ტემპერატურა პრაქტიკულად უცვლელია და კრიზისის განვითარების შემთხვევაშიც კი არ მოხდება მისი გადახურება.

ს. ქუთათელაძემ [7], ბონილამ, პერიმ [31] და სხვებმა დაადგინეს, რომ ზედაპირის მდგომარეობა დიდ გავლენას თბურ კრიტიკულ ნაკადზე მაშინ ახდენს, როდესაც თბური დატვირთვა მუდმივია (სითბოს წყაროდ ელექტრული ენერგიის გამოყენების შემთხვევაში). ბერენსონის [20] მონაცემებით კი ზედაპირის ტემპერატურის უცვლელობის პირობებში (სითბოს წყაროდ მაღლარი ზედაპირის მეორე მხრიდან გამაცხელებელი ნაჯერი ორთქლის გამოყენების შემთხვევაში) ზედაპირის მდგომარეობა დუდილის კრიზისის განვითარებაზე არ მოქმედებს. ეს აიხსნება იმით, რომ მუდმივი თბური ნაკადის არსებობისას (ელექტრული გახურებისას) ზედაპირი შეიძლება გადახურდეს ლოკალურად და შემდეგ მოხდეს ორთქლის ფენის გაფართოება. მეორეს მხრივ, მუდმივი ტემპერატურის რეჟიმში მომუშავე გამახურებელი ელემენტის ზედაპირი (როცა გამახურებელი ელემენტის მეორე მხარეს ხდება გამაცხელებელი ორთქლის კონდენსაცია) ყოველთვის იწმინდება ორთქლისაგან და ცალკეულ წერტილებში ორთქლის ბუშტის წარმოქმნა კი ვერავითარ შემთხვევაში ვერ გამოიწვევს მთელი ზედაპირის გადახურებას და კრიზისის განვითარებას.

$q_{კრ}$, მგვტ/მ²



ΔT /°C

ნახ. 5 $q_{კრ}$ -ის დამოკიდებულება გამახურებლის მასალის თბოგამტარობაზე

დასასრულ შევნიშნავთ, რომ ექსპერიმენტული კვლევების საფუძველზე მიღებული მონაცემები მნიშვნელოვნად განსხვავდებიან ერთმანეთისაგან იმ შემთხვევებშიც კი, როდესაც გამოკვლევები ჩატარებულია მეტნაკლებად ერთნაირ პირობებში. ეს შეიძლება ნაწილობრივ აიხსნას ზედაპირის მდგომარეობის ცვლილებით, განსაკუთრებით ისეთ შემთხვევებში, როცა თბური ნაკადი მუდმივია (ელექტროგახურება).

გაწიბოვნებულ და უხეშ გამახურებელ ზედაპირებზე დუღილის ცენტრები დიდი რაოდენობით წარმოიქმნებიან, რის გამოც ასეთ ზედაპირებზე მიმდინარე დუღილის პროცესი შედარებით მდგრადია ვიდრე გლუვ ზედაპირებზე მიმდინარე დუღილი.

1.4. სითხის დიდ მოცულობაში დუღილისას განვითარებული ხვედრითი თბური ნაკადის სიდიდეზე მოქმედი ფიზიკური ფაქტორები

სითხეების დუღილის პროცესებში განვითარებული რეჟიმების ყველა ოთხივე ტიპისათვის შეიძლება გამოვყოთ დუღილის პროცესის ინტენსიურობისა და თბოგაცემის კოეფიციენტის სიდიდეებზე მოქმედ ფიზიკურ ფაქტორთა სამი ჯგუფი. ესენია ჰიდროდინამიკურ, თბურ და გეომეტრიულ ფაქტორთა ჯგუფები.

ჰიდროდინამიკურ ფაქტორებს განეკუთვნება სისტემაში არსებული წნევა და მდუღარე სითხის ხურების ზედაპირის მახლობლად სხვადასხვა მიზეზით მოძრაობისას წარმოქმნილი ნაკადების სიჩქარე. წნევის გავლენა ძირითადად გამოიხატება მასზე სითხის დუღილის ტემპერატურის დამოკიდებულებაში და შესაბამისად, სითხისა და ორთქლის ფიზიკურ თვისებებზე, რომლებსაც უმრავლეს შემთხვევაში სწორედ ტემპერატურა განსაზღვრავს. რაც შეეხება გამახურებელ ზედაპირთან სითხის მოძრაობის სიჩქარეს, ის განსაზღვრავს გამახურებელი ზედაპირის სითხით

მომარაგების ინტენსივობას და საბოლოო ჯამში სიმძიმის ძალის აჩქარებასთანაა დაკავშირებული.

ნაჯერი სითხის დიდ მოცულობაში დუღილისას კრიტიკული თბური ნაკადისა და თბოგაცემის კოეფიციენტის სიდიდეებზე მოქმედ თბურ ფაქტორებს მიეკუთვნებიან ლოკალური თბური ნაკადებისა და გარდამავალი პროცესების სიჩქარის მნიშვნელობები. ამ ფაქტორების გავლენა უშუალოდ ვლინდება ისეთ ფიზიკურ პროცესებში როგორცაა ორთქლის ბუშტის გენერაცია და ორთქლწარმომქმნელი ცენტრების გააქტიურება.

ისეთი გეომეტრიული ფაქტორები, როგორცაა ცილინდრული გამახურებელი ელემენტის დიამეტრი, ზედაპირის სისუფთავის მდგომარეობა (დანალექები, ხაოიანობა), გამახურებელი ელემენტის ორიენტაცია სივრცეში და მისი სითხეში ჩაძირვის სიღრმე, დუღილის ინტენსიურობაზე მოქმედებენ იმდენად, რამდენადაც ისინი ცალსახად განსაზღვრავენ გამახურებელი ელემენტის ზედაპირთან არსებული სითხის გადახურებული შრის შეშფოთების ხარისხს და აქედან გამომდინარე, გამახურებელი ზედაპირის მოცემული უბნის ტემპერატურის ცვლილებას. ამასთან აღსანიშნავია, რომ რაც უფრო ღრმააა ხურების ზედაპირი განთავსებული სითხეში, მით უფრო გვიან ხდება ორთქლის ბუშტის წარმოქმნა და შესაბამისად კრიზისის დადგომა.

სითხის დუღილისას განვითარებულ ხვედრით თბურ ნაკადზე მოქმედი ფაქტორების მრავალფეროვნება ზედმიწევნით ართულებს დუღილის პროცესის ზუსტი თეორიული ანალიზის ჩატარებას. აქედან გამომდინარე ყველა კონკრეტული შემთხვევა მოითხოვს კოეფიციენტების კონკრეტული, მხოლოდ მისთვის დამახასიათებელი მნიშვნელობის დადგენას.

ზემოთქმულიდან გამომდინარე შეიძლება დავასკვნათ, რომ სითხეების სხვადასხვა ხურების ზედაპირებზე დუღილის პროცესში

განვითარებული თბოგადაცემის ექსპერიმენტულ გამოკვლევას ჯერ კიდევ გააჩნია მნიშვნელოვანი, როგორც თეორიული, ისე პრაქტიკული ინტერესი.

1.5. სამუშაოს მიზანი

საყოველთაოდ ცნობილია, რომ სითხის დუღილი ძალზე რთულ ფიზიკურ პროცესს წარმოადგენს. მის ინტენსივობაზე მოქმედებს მრავალი, როგორც გარეგანი, ასევე შინაგანი ფაქტორი. კერძოდ წნევა, ზედაპირის ტემპერატურა, სითხისა და ზედაპირის მასალის თბოფიზიკური თვისებები, ზედაპირის სიმქისე, სითხის ნაკადის სიჩქარე და სხვა. დუღილი ხასიათდება ისეთი მაჩვენებლებით, როგორიცაა თბოგადაცემის კოეფიციენტი, ხვედრითი თბური ნაკადი, სითხის გადახურების ან გადაცივების ტემპერატურა, ორთქლწარმოქმნის ცენტრთა რიცხვი, ბუშტების მოწყვეტის დიამეტრი, ბუშტების მოწყვეტის სიხშირე და სხვა. სწორედ ამ ფაქტორთა სიმრავლე განაპირობებს სითხის დუღილის მოვლენის სირთულეს და მისი ექსპერიმენტული შესწავლის შემთხვევაში თხოულობს რთული ლაბორატორიული დანადგარების შექმნასა და ძვირად ღირებული და ზუსტი სამეცნიერო აპარატურის გამოყენებას.

არსებული ლიტერატურის ანალიზი გვაჩვენებს, რომ მოცემულ მომენტში არ არსებობს უნივერსალური ფორმულა, რომელიც განსაზღვრავს სითხის მხრიდან ხურების ზედაპირზე მოქმედ რეაქტიულ ძალას ნებისმიერი სითხეების დუღილის დროს და ამასთანავე გაითვალისწინებს ხურების ზედაპირის მდგომარეობას და გამახურებელი ნივთიერების თვისებებს. ამიტომ დიდი მნიშვნელობა აქვს დუღილის ისეთი პროცესის გამოკვლევას, რომელსაც ადგილი აქვს დიდ მოცულობაში სითხის დუღილისას.

დუღილის პროცესში თბოგადაცემის ინტენსიფიკაციის პრობლემა წარმოადგენს ერთ-ერთ უმთავრეს საკითხს თანამედროვე თბოფიზიკასა და თბოენერგეტიკისათვის. გახურების ზედაპირის როლში მრავალნაირი მასალა გამოიყენება. ერთ-ერთი მათგანია ბრტყელი ხურების ზედაპირი,

რომელსაც ჩვენ უპირატესობა მივანიჭეთ აღნიშნული ზემოქმედების უკეთ გამოსავლენად.

თანამედროვე კოსმოსური ტექნოლოგია მოითხოვს თბომცვლელი, ამართქლებელი და სხვა დანადგარების თბური სიმპლავრების გაზრდას. დუდილის პროცესის დარღვევით გამოწვეული ავარიები დიდ დანაკლისებთანაა დაკავშირებული. ცხადია, რომ ინჟინერ-კონსტრუქტორებისთვის დიდი პრაქტიკული მნიშვნელობა აქვს დუდილისას წარმოქმნილი მოვლენების ზუსტ გაანგარიშებას, მათ შორის სითხის დიდ მოცულობაში დუდილისას.

ყოველივე ზემოთქმულიდან გამომდინარე ჩამოვყალიბეთ წინამდებარე ნაშრომის ძირითადი მიზნები.

სამუშაო ზოგადად მიზნად ისახავს დუდილის პროცესში თხევადი აგრეგატული მდგომარეობიდან აირად მდგომარეობაში გადასული სითხის მოლეკულების სიჩქარის ცვლილებით გამოწვეული მოძრაობის რაოდენობის ცვლილების ფენომენოლოგიურ შესწავლას. ცნობილია, რომ მოძრაობის რაოდენობის ცვლილება აღძრავს რეაქტიულ ძალას, რომელიც მიმართულია სითხის საორთქლებელი ზედაპირის მართობულად ორთქლიდან სითხისაკენ. სადისერტაციო კვლევის კონკრეტულ სამეცნიერო მიზნებს წარმოადგენენ:

1. ლითონის ბრტყელი ფირფიტებისაგან დამზადებულ გამახურებელ ელემენტებზე წყლის დუდილის ორგანიზება დიდ მოცულობაში ატმოსფერული წნევის პირობებში. ექსპერიმენტული დანადგარის დაპროექტება და აწყობა.

2. ცდების ჩატარების მეთოდის დამუშავება.

3. ბრტყელ და გლუვ ზედაპირებზე დუდილისას განვითარებული მექანიკური ზემოქმედების გეომეტრიული მოდელირება ექსპერიმენტული სერიების უკეთ დაგეგმვის მიზნით.

4. წყლის დუდილის სხვადასხვა რეჟიმის პირობებში იმ რეაქტიული ძალის ვიზუალიზაცია, რომელიც მოქმედებს ხურების, ანუ ამართქლებელ

ზედაპირზე და რომელიც აღიძვრება უშუალოდ ხურების ზედაპირთან შეხებაში მყოფი სითხის ფენაში წარმოქმნილ ორთქლის ბუშტებში გადასული მოლეკულების მიერ და შესაძლებლობის შემთხვევაში ამ ძალის სიდიდის გაზომვა.

5. ხსენებული რეაქტიული ზემოქმედების სიდიდის დუღილის დროს განხორციელებულ ხვედრით თბურ ნაკადზე დამოკიდებულების დადგენა.

6. ისეთი ექსპერიმენტული დანადგარის შექმნა, რომლის მეშვეობით შესაძლებელი იქნება როგორც დუღილის დროს წარმოქმნილი რეაქტიული ძალის კვლევა, ასევე დუღილის ყველა რეჟიმის შესწავლა დუღილის დასაწყისიდან დუღილის კრიზისამდე.

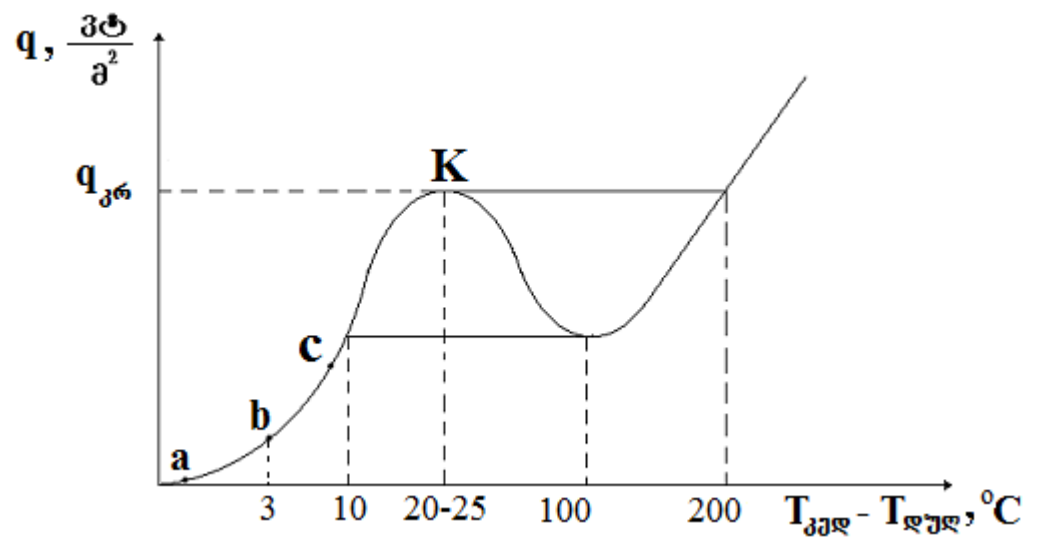
სამუშაოს მიზანს შეადგენდა აგრეთვე კვლევის პროცესისათვის გამოყენებული ექსპერიმენტული დანადგარის და კვლევის მეთოდის დამუშავება ტექნიკური უმაღლესი სასწავლებლების თბოენერგეტიკული მიმართულებების სასწავლო ლაბორატორიებში გამოსაყენებლად, სტუდენტების მიერ დუღილის რეჟიმების და დუღილის კრიზისის ამოცანების შესრულების შესაძლებლობის უზრუნველყოფის თვალსაზრისით.

თავი II. პროცესის მოდელირება და პირველი ექსპერიმენტული დანადგარები

2.1. ფიზიკური მოდელი

როგორც ცნობილია, დუდილი წარმოადგენს სითხის ორთქლადქცევის პროცესს მისსავე მოცულობაში და უპირველეს ყოვლისა გახურების ზედაპირზე [3]. დუდილის პროცესს, რასაკვირველია, თან ახლავს ზედაპირიდან სითხოს ართმევის პროცესი, რომლის ინტენსიურობა დამოკიდებულია თვით დუდილის ინტენსიურობაზე. ეს უკანასკნელი კი დამოკიდებულია იმ ზედაპირის ტემპერატურაზე, რომელზეც დუდილი მიმდინარეობს და ამრიგად, დუდილის დროს სითხის მიერ კედლის ზედაპირიდან ართმეულ სითხოს რაოდენობასა და კედლის ზედაპირის ტემპერატურას შორის არსებობს გარკვეული დამოკიდებულება, რომელიც გარკვეულ მახასიათებელ წერტილებში იცვლის თავის ხასიათს და განაპირობებს დუდილის სხვადასხვა რეჟიმს. დუდილის ეს რეჟიმები პირველად იაპონელმა მეცნიერმა ნუკიამამ [8] შეისწავლა. ნახ. 6-ზე წარმოდგენილია ნუკიამას მიერ დადგენილი ხსენებული დამოკიდებულება მახასიათებელი წერტილების მითითებით.

ნუკიამას მიერ შესრულებული გამოკვლევების შედეგად დადგენილია, რომ როდესაც გამახურებელი ელემენტის ზედაპირსა და სითხის ნაჯერობის ტემპერატურებს შორის სხვაობა უმნიშვნელოა და სამ გრადუსს არ აღემატება, (უბანი **a-b**), ზედაპირიდან სითხეში გადაცემული სითხური ნაკადიც უმნიშვნელოა და მხოლოდ თავისუფალი კონვექციითაა გაპირობებული. კედლის ტემპერატურის შედარებით მეტი მნიშვნელობების დროს (უბანი **b - c**) და ადგილი აქვს აქა იქ ერთეული ბუშტების წარმოქმნას. **b** წერტილის მარჯვნივ, მის ზედაპირის გადახურება აღწევს ორთქლის ბუშტის წარმოქმნისათვის, ანუ დუდილის დაწყებისათვის აუცილებელ მინიმალურ სიდიდეს. კერძოდ **b** წერტილში იწყება დუდილი უშუალო სიახლოვეში გახურების ზედაპირზე წარმოქმნილი ბუშტების რაოდენობა იმდენად მცირეა, რომ მრუდის



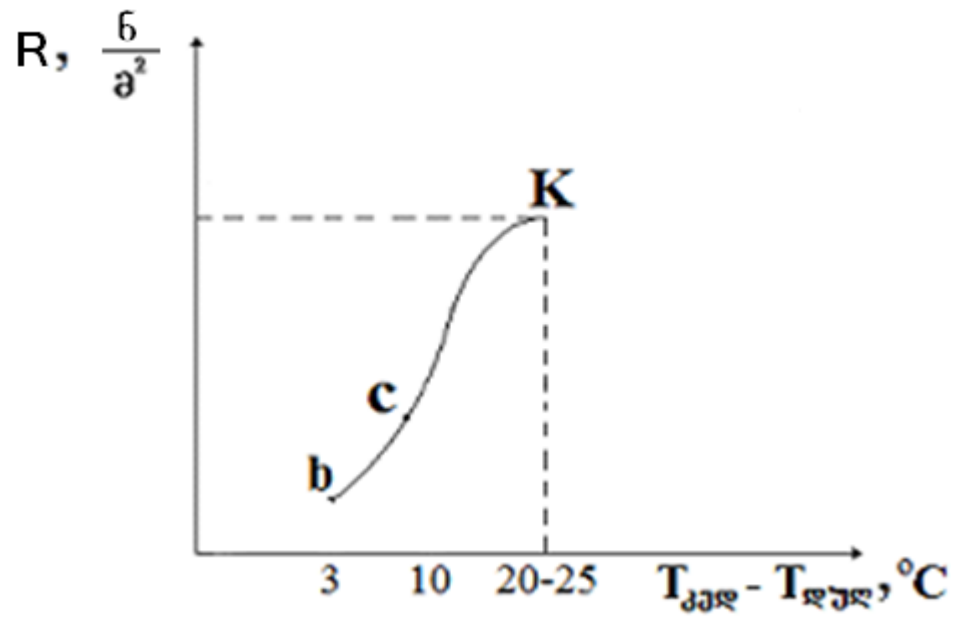
ნახ. 6. ხვედრითი სითბური ნაკადის დამოკიდებულება ტემპერატურათა სხვაობაზე და ამ დამოკიდებულების მახასიათებელი წერტილები [3]

b - c უბანზე თბოგაცემის ინტენსიურობა ჯერ კიდევ ძირითადად თავისუფალი კონვექციითაა გაპირობებული. გამახურებელი ელემენტის ზედაპირსა და სითხის ნაჯერობის ტემპერატურებს შორის სხვაობის გაზრდით ორთქლის ბუშტებით გადატანილი სითბური ნაკადი განუხრელად მატულობს და თანდათან სულ უფრო აჭარბებს კონვექციით გადატანილი სითბოს რაოდენობის წილს, რომელიც **c** წერტილიდან დაშორების კვალობაზე სულ უფრო უმნიშვნელო ხდება მთლიანად გადატანილ სითბოს რაოდენობაში.

K წერტილში ორთქლის ბუშტების წარმოქმნის ინტენსიურობა აღწევს მაქსიმალურ მნიშვნელობას და მასთან ერთად მაქსიმალურ მნიშვნელობას აღწევს აგრეთვე ხვედრითი სითბური ნაკადი. ხვედრითი სითბური ნაკადის სწორედ ეს მაქსიმალური მნიშვნელობა წარმოადგენს კრიტიკულ ხვედრით თბურ ნაკადს, ვინაიდან ტემპერატურათა სხვაობის შემდგომი გაზრდა იწვევს თბოგაცემის კოეფიციენტისა და შესაბამისად, ხვედრითი თბური ნაკადის მკვეთრ შემცირებას, როგორც ეს ნათლად ჩანს ნახ. 6-ზე წარმოდგენილ დიაგრამაზე.

ამ მოვლენის მიზეზი მდგომარეობს იმაში, რომ გამახურებელ ზედაპირზე ორთქლის ბუშტების წარმოქმნის მაქსიმალური ინტენსივობის შემთხვევაში ხდება ურთიერთმეზობელი ბუშტების გაერთიანება და ორთქლის ერთიანი შრის წარმოქმნა, რომელიც განრთხმულია გამახურებელი ელემენტის ზედაპირზე და ხელს უშლის წყალს ზედაპირთან მისვლაში.

ვინაიდან ჩვენი კვლევის მიზანია დუდილის პროცესში წარმოქმნილი რეაქტიული ძალა და მისი კონკრეტული მნიშვნელობების დადგენა დუდილის სხვადასხვა რეჟიმების პირობებში, ცხადია, რომ ეს ძალა დამოკიდებული იქნება დუდილის ინტენსივობაზე პრაქტიკულად იმავე კანონზომიერებით, როგორც გადაცემული სითბო, რადგან რეაქტიული ძალა წარმოიქმნება სითხის მოლეკულების მოძრაობის რაოდენობის ცვლილებით სითხის ფაზიდან ორთქლის ფაზაში გადასვლისას და

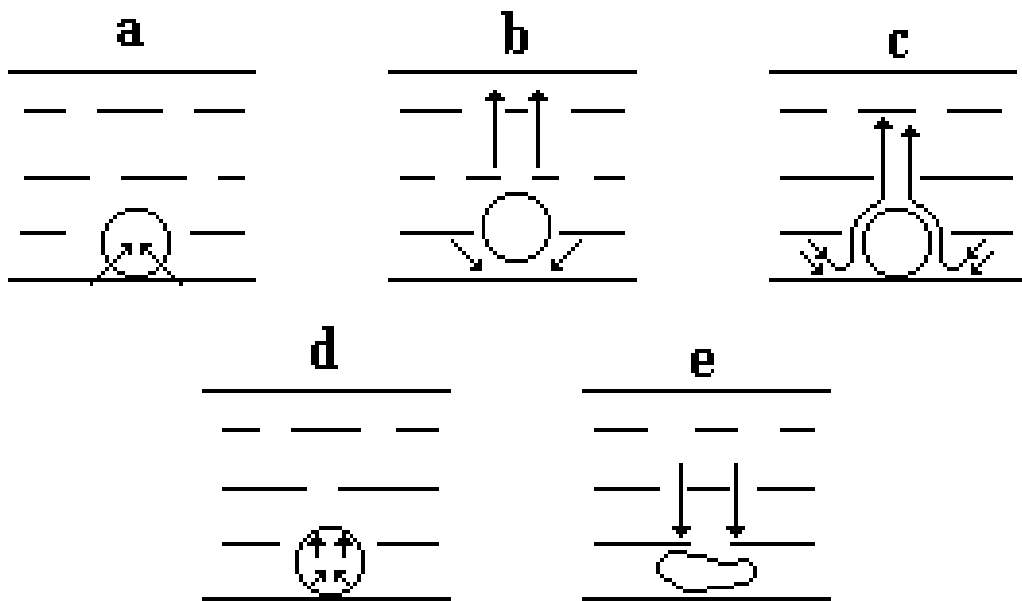


ნახ. 7. რეაქტიული ძალის შესაძლო დამოკიდებულება ტემპერატურათა სხვაობაზე გამახურებელი კედლის ზედაპირსა და მდულარე სითხეს შორის

რაც უფრო მეტი მოლეკულა გადავა სითხის ფაზიდან ორთქლის ფაზაში, მით უფრო დიდი იქნება წარმოქმნილი რეაქტიული ძალა.

მაშასადამე, რადგან ბუშტების წარმოქმნა ნუკიამას მრუდის მიხედვით (ნახ. 6) იწყება **b** წერტილში, ამიტომაც რეაქტიული ძალა უნდა გაჩნდეს სწორედ ამ წერტილში. ეს იმას ნიშნავს, რომ რეაქტიული ძალის მნიშვნელობა მთელი კონვექციური თბოგადაცემის პროცესში, ანუ უშუალოდ **b** წერტილამდე ნულის ტოლია და როგორც კი ბუშტები წარმოქმნას დაიწყებენ, მაშინვე უნდა გაჩნდეს მინიმალური რეაქტიული ძალა. შემდეგ, რეაქტიული ძალა, დუდილის ინენსივობის ზრდასთან ერთად დაიწყებს მატებას და მაქსიმალურ მნიშვნელობას მიაღწევს უშუალოდ დუდილის კრიზისის დადგომისას, ანუ **K** წერტილის მახლობლობაში. მაშასადამე, რეაქტიულ ძალის დამოკიდებულება კედლის და სითხის ტემპერატურებს შორის სხვაობაზე, დაახლოებით ნუკიამას მრუდის (**bK**) მონაკვეთის ანალოგიური უნდა იყოს, როგორც ეს ნახ. 7 -ზეა ნაჩვენები.

სითხის დუდილის თეორიაში, რომელიც ჯერ კიდევ სამწუხაროდ არ არის ბოლომდე დაზუსტებული, არსებობს მრავალნაირი მოსაზრება იმის თაობაზე თუ რა მექანიზმებით ხდება სითხის გადაცემა გამახურებელი, ანუ ამორთქლებელი კედლის ზედაპირიდან სითხეში [32]. სამეცნიერო ლიტერატურაში ყოველწლიურად ქვეყნდება დუდილის პროცესის შესწავლისადმი მიძღვნილი მრავალი ქვეყნის მეცნიერთა ასობით ნაშრომი, რომელთა დიდი ნაწილი ეთმობა დუდილის მოვლენის თეორიულ კვლევას. ამ სამუშაოებში განიხილება ორთქლის ბუშტების წარმოქმნის მრავალნაირი მექანიზმი და სქემა. მაგალითისათვის ნახ. 8 -ზე წარმოდგენილია ორთქლის ბუშტების წარმოქმნისა და მოწყვეტის სხვადასხვა ავტორის მიერ შემოთავაზებული ვარიანტები. გარდა ამისა გაანალიზებულია დუდილის ინტენსივობაზე მოქმედი მრავალი ფიზიკური და გეომეტრიული ფაქტორი და ა. შ. სწორედ ამ მექანიზმების და ფაქტორების დიდი რაოდენობა და მრავალმხრივობა ართულებს დუდილის მოვლენის



ნახ. 8. ორთქლის ბუშტების წარმოქმნის და მოწყვეტის სხვადასხვა ვარიანტები

თეორიულ ანალიზს, თუმცა თანამედროვე ეტაპზე, უკვე ჩამოყალიბებულია რამოდენიმე თეორიული კონცეფცია, რომელთა საფუძველზე ჩატარებული გაანგარიშებების შედეგები გარკვეულწილად დამაკმაყოფილებლად ემთხვევიან ექსპერიმენტულ შედეგებს.

ექსპერიმენტულ მონაცემებთან შედარებისას ჯერჯერობით ყველაზე კარგ შედეგებს იძლევა დუდილის ეგრეთწოდებული **მულტიფაქტორინგის** თეორია, რომელიც ქართველი მეცნიერების მიერაა დამუშავებული პროფესორ ირაკლი შეყრილაძის ხელმძღვანელობით [33-38]. ამ თეორიის მიხედვით დუდილის პროცესში ადგილი აქვს გამახურებელი ელემენტის ზედაპირიდან სითხეში სითბოს გადაცემის სხვადასხვა მექანიზმების და დუდილის ინტენსივობაზე მოქმედი ფაქტორების ერთობლივ მოქმედებას და, ამასთან, გარკვეულ სხვადასხვა პირობებში მადომინირებელ როლს თბოგაცემის ინტენსიურობაში იკავებენ სხვადასხვა ფაქტორები და სხვადასხვა მექანიზმები [38].

აღნიშნულიდან გამომდინარე მოსალოდნელია, რომ დუდილის პროცესში წარმოქმნილი რეაქტიული ძალის ხვედრით სითბურ ნაკადთან ან გამახურებელი ელემენტის ზედაპირის ტემპერატურასთან დამოკიდებულების ხასიათი (კერძოდ სიმრუდე, დახრის კუთხე) შეიცვალოს, რაც დამატებით მოგვცემს საფუძველს ზემოხსენებული მულტიფაქტორინგის კონცეფციის სამართლიანობის შესახებ.

2.2. გეომეტრიული მოდელი.

დუდილის პროცესში სითხის მხრიდან გახურების ზედაპირზე ძალური მოქმედების არსებობას თეორიულად ამართლებს ის ფაქტი, რომ ამ ბოლო დროს დუდილის მექანიზმის შესწავლაში სერიოზულად მოიკიდა ფეხი ეგრეთწოდებულმა „ტუმბოს ეფექტმა“, რომელიც პროფესორ ირაკლი შეყრილაძის მიერ იყო დამუშავებული ჯერ კიდევ გასული საუკუნის 60-იან

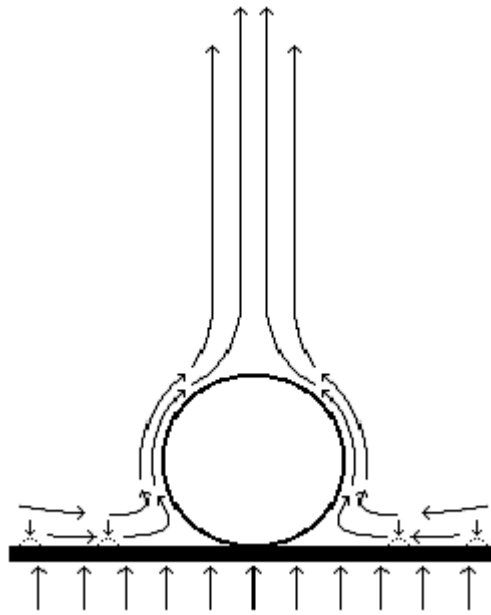
წლებში [39] და შემდეგ, მისივე ხელმძღვანელობით მრავალმხრივ შესწავლილი.

ბუშტის ზრდისას წარმოქმნილი ტუმბოს ეფექტის სქემა წარმოდგენილია ნახაზზე 9.

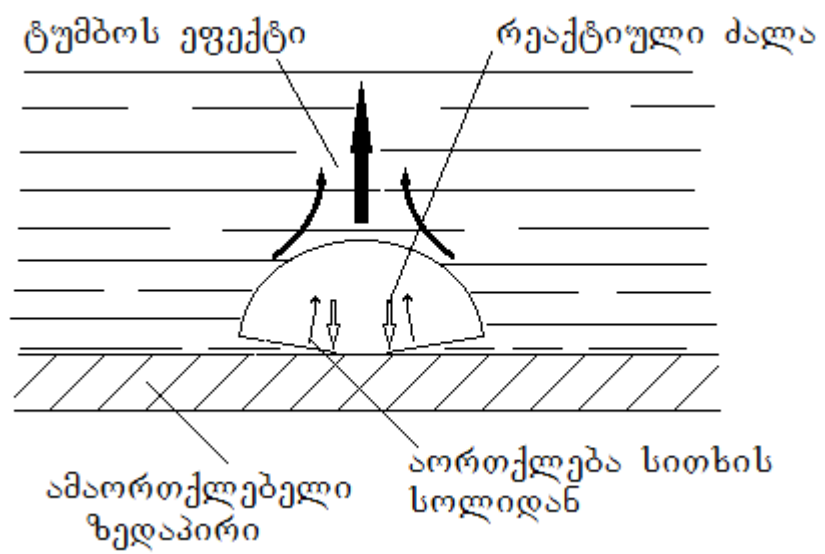
ამ სქემიდან ჩანს, რომ ბუშტის ზრდისას წარმოიქმნება ეგრეთწოდებული „ტუმბოს ეფექტი“, რაც გამოისახება მზარდი ბუშტის მიერ სითხის გასროლით მადულარი ზედაპირის მხრიდან სითხის სიღრმეში. ეს ეფექტი დაფიქსირებულია აგრეთვე იმ შემთხვევაშიც, როცა მადულარი ზედაპირი ქვემოთაა მიმართული და მიუხედავად სიმძიმის ძალის მიმართულებისა მზარდი ბუშტი გაცხელებულ სითხეს ისვრის ქვემოთ [5]. ცხადია, რომ მზარდი ბუშტის მიერ სითხის მადულარი ზედაპირიდან შორს გასროლას თან უნდა სდევდეს ბუშტის მხრიდან გარკვეული რეაქტიული ზემოქმედება თვით მადულარ ზედაპირზე.

გარდა აღნიშნულისა, უნდა ითქვას, ძალიან გავრცელებულია მოსაზრება იმის თაობაზე, რომ დუდილის განმავლობაში ორთქლწარმოქმნის პროცესის დიდი ნაწილი მოდის მზარდი ბუშტის მადულარულ ზედაპირთან შეხების ზედაპირის გარშემო არსებული სითხის **სოლისებურ უბანზე** და ხსენებული ურთიერთშეხების ცენტრალური უბნის, ანუ მშრალი ზედაპირის ფართობის ზრდასთან ერთად იზრდება ბუშტისქვეშა წრიულად განლაგებული სითხის სოლის წრიული ზომა, რასაც თან სდევს სოლის წვერზე აორთქლებული სითხის რაოდენობის ზრდა [40].

ხსენებული პრობლემების ანალიზისას გადაწყვეტილი იქნა მზარდი ბუშტის ტუმბოს ეფექტის კონცეფცია გაერთიანებულიყო მასთან კარგ თანხვედრაში მყოფ, ბუშტისქვეშა სითხის სოლისებური არედან აორთქლების კონცეფციასთან და ამ გაერთიანების საფუძველზე დამუშავებულია შესასწავლი მოვლენის, კერძოდ რეაქტიული ძალის წარმოქმნის გეომეტრიული მოდელი (ნახ. 10).



ნახ. 9. ბუმტის ზრდის ტუმბოს ეფექტის სქემა



ნახ. 10. რექტიული ძალის წარმოქმნის გეომეტრიული მოდელი

როგორც ეს ნახ. 10-ზე ჩანს, სითხის დუდილის პროცესში ზრდადი ბუმტის ცენტრალური ნაწილის გარშემო იმყოფება სითხის ერთგვარი წრიული სოლი, რომელშიც არსებული სითხე არის დუდილის ტემპერატურასთან შედარებით ოდნავ გადახურებული ვინაიდან იმყოფება გამახურებელ კედელთან, ანუ მადულარი ელემენტის ზედაპირთან უშუალო შეხებაში. ზრდადი ბუმტის ცენტრალური ნაწილთან ახლოს მდებარე ხსენებული სოლის წვეროსთან მყოფ ყველაზე თხელ და წრიულ არეში არსებული სითხის მოლეკულები იძენენ საკმარის ენერგიას იმისათვის რომ თხევადი ფაზიდან გადავიდნენ ორთქლის ფაზაში, რასაც თან სდევს თვითოეული მათგანის მოძრაობის რაოდენობის ცვლილება, რაც თავის მხრივ წარმოქმნის გამახურებელ ელემენტზე ვერტიკალურად ზემოდან ქვევით მოქმედ რეაქტიულ ძალას.

დიდ მოცულობაში განვითარებული ბუმტოვანი დუდილის პროცესში და იმ პირობებში, როცა სითხის მთელი მოცულობა ნაჯერობის ტემპერატურამდეა გაცხელებული, სითხოს გადაცემა კედლიდან სითხეში, ანუ გამახურებელი ზედაპირის მიერ გაცემული სითხო მთლიანად იხარჯება მხოლოდ სითხის აორთქლებაზე. აქედან გამომდინარე შეიძლება გამოთვლილი იქნას დროის ერთეულში აორთქლებული სითხის რაოდენობა, ანუ სითხის ფაზიდან ორთქლის ფაზაში გადასული მოლეკულების რაოდენობა N . ასეთ შემთხვევაში შესაძლებელი ხდება ამ N მოლეკულის მოძრაობის რაოდენობის ცვლილებით აღძრული რეაქტიული ძალის გაანგარიშება, რომლის შედეგის ექსპერიმენტულ მონაცემებთან შედარებით შესაბამისი დასკვნების გაკეთება იქნება შესაძლებელი.

კერძოდ, ზემოხსენებული, დუდილის მულტიფაქტორინგის თეორიის მიხედვით დუდილის სხვადასხვა რეჟიმში სითხოგადაცემის სხვადასხვა მექანიზმები ასრულებენ მადომინირებელ როლს. ასეთ შემთხვევაში რეაქტიული ძალის დამოკიდებულება გამახურებელი კედლის ზედაპირსა და მდულარე სითხეს შორის არსებულ ტემპერატურათა სხვაობაზე განსხვავებული უნდა იყოს ნიკიამას მრუდის **bK** მონაკვეთისაგან

(იხ. ნახ. 7) და უნდა ხასიათდებოდეს გადახრის წერტილებით, რადგან სხვადასხვა მექანიზმებით სითბოს გადაცემისას წარმოუდგენელია რეაქტიული ძალის წარმოქმნის პირობები, რომ ერთნაირი იყოს.

2.3. სითხის დუდილის დროს წარმოქმნილი რეაქტიული ძალის კვლევის მეთოდის შერჩევა

სითხეების დუდილისა და მისი თანმხლები ფიზიკური მოვლენების ექსპერიმენტული შესწავლის მიზნით სხვადასხვა ავტორების მიერ შემუშავებულია ექსპერიმენტული მეთოდების მთელი რიგი, რომლებშიც გამოიყენება სხვადასხვა გამზომი ხელსაწყოები და სარეგისტრაციო მოწყობილობები. ძირითად მეთოდებს წარმოადგენს ფოტოგრაფიული, თბური, აკუსტიკური, ოპტიკური, რადიაციული და სხვა. დამუშავებულია აგრეთვე კომბინირებული მეთოდებიც, რომლებიც დაფუძნებული არიან ზემოთ ჩამოთვლილი მეთოდების ერთმანეთთან ან სხვა, კვლევის ფიზიკურ და ფიზიკო-ქიმიურ ხერხებთან გარკვეული წესით შეთანწყობაზე.

დუდილის პროცესის კვლევის სხვადასხვა მეთოდების არსი, მათი შესაძლებლობანი, დადებითი და უარყოფითი მხარეები და ა.შ. საკმარისად ფართოდაა გაანალიზებული ნაშრომში [41].

უნდა აღინიშნოს, რომ დუდილის პროცესის კვლევის ყველაზე მარტივ მეთოდს წარმოადგენს თბური მეთოდი, რომელიც უზრუნველყოფს სხვადასხვა პარამეტრების ექსპერიმენტულ გაზომვას დიდ მოცულობაში სითხის დუდილის პროცესში.

კვლევის მოცემულ ეტაპზე ლითონის სხვადასხვა ზომის ფირფიტებისაგან დამზადებულ ხურების ზედაპირებზე ატმოსფერული წნევის პირობებში წყლის დუდილისას განვითარებული რეაქტიული ძალის მნიშვნელობათა ექსპერიმენტულად გამოსაკვლევად ჩვენ ავირჩიეთ ზემოხსენებული თბური მეთოდი. ამ მეთოდის გამოყენებისას ექსპერიმენტის განმავლობაში გასაზომი სიდიდეა მხოლოდ თბური

ნაკადის მნიშვნელობა და ამ მნიშვნელობების შესაბამისი რეაქტიული ძალა, რომელიც განვითარდება ხურების ზედაპირზე მდულარე სითხის მხრიდან.

საცდელ გამახურებელ ელემენტებზე დუდილის ჩასატარებლად აუცილებელია მათი ზედაპირებისათვის გარკვეული რაოდენობის თბური ენერჯის მიწოდება. ამ მიზნით, გამოყენებული იქნება ელექტრული ენერჯია. დუდილი იწარმოებს გამახურებელ ელემენტში უშუალოდ გატარებული ელექტროდენის მიერ გამოყოფილი სითბოს ხარჯზე.

2.4. სითხის დუდილის დროს წარმოქმნილი რეაქტიული ძალის სადემონსტრაციო ცდები და ექსპერიმენტული დანადგარები

თბოგადაცემის თეორიის ერთ-ერთი კორიფემ, სამსონ სიმონის ძე ქუთათელაძე, თბოგადაცემის თეორიის საფუძვლებისადმი მიძღვნილ თავის წიგნში [2] სპეციალურად განიხილავს ნივთიერების თხევადი და ორთქლის ფაზათა შორის საზღვარზე ფაზებს შორის თბური და მექანიკური ურთიერთქმედების პირობებს რის საფუძველზეც ადგენს, რომ ნივთიერების ნაკადის მოძრაობის რაოდენობა მკვეთრად მატულობს თხევადი ფაზიდან ორთქლის ფაზაში გადასვლისას და შედეგად წარმოიქმნება რეაქტიული ძალა, რომელიც მიმართულია ორთქლის ფაზიდან თხევადი ფაზისაკენ ფაზათა გამყოფი საზღვრის მართობულად. ფაზათა გამყოფი ზედაპირის ფართობის ერთეულზე წარმოქმნილი რეაქტიული ძალის საანგარიშოდ ავტორს გამოყვანილი აქვს შემდეგი განტოლება:

$$P_n = \frac{q_d^2}{\rho'' r^2} \left(1 - \frac{\rho''}{\rho'} \right), \quad [N/m^2] \quad (2.1)$$

სადაც q_d - სითხის ორთქლადქცევისათვის განვითარებული თბური ნაკადის სიმკვრივეა $[ჯ/წმ\cdot m^2]$; r - სითხის აორთქლების ფარული სითბოა

[ჯ/კგ]; ρ' და ρ'' - შესაბამისად სითხისა და ორთქლის ფაზების სიმკვრივეებია [კგ/მ³].

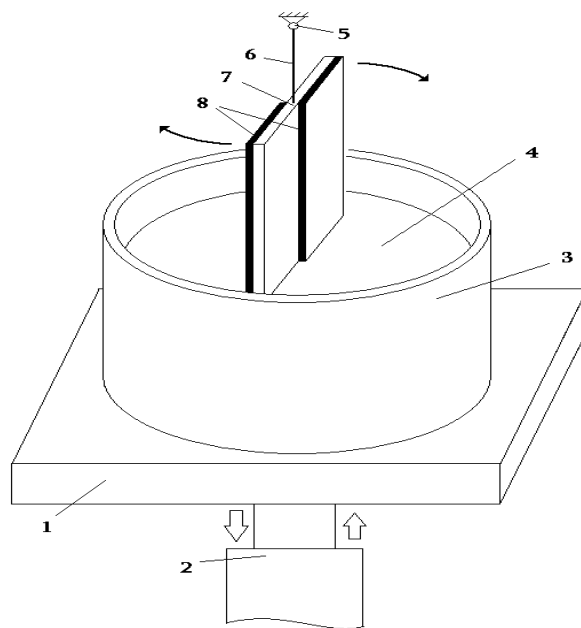
ს. ქუთათელაძე ასაბუთებს, რომ ნივთიერების თხევადი ფაზიდან აირად ფაზაში გადასვლისას წარმოქმნილი რეაქტიული ძალა ჩვეულებრივად ძალიან პატარა სიდიდის მქონეა და განსაკუთრებული ყურადღების მიქცევას არ იმსახურებს. მართლაც, თუ წარმოდგენილ გამოსახულებაში შევიტანთ რიცხვით მნიშვნელობებს, კერძოდ ატმოსფერული წნევის პირობებში დავუშვებთ, რომ მადუღარი სითხისაკენ მიმართული ხვედრითი თბური ნაკადი $q_a = 1 \cdot 10^6$ ვტ/მ², ხოლო წყლის ნაჯერი ორთქლის ცხრილებიდან ატმოსფერული წნევის პირობებში $r = 2,25792 \cdot 10^6$ ჯ/კგ, $\rho' = 957,85$ კგ/მ³ და $\rho'' = 0,590$ კგ/მ³, მაშინ ფართობის ერთეულზე მოქმედი რეაქტიული ძალისათვის მივიღებთ:

$$P_n = \frac{(1 \cdot 10^6)^2}{0,590 \cdot (2,25792 \cdot 10^6)^2} \left(1 - \frac{0,590}{957,85} \right) = 0,33 \quad [ნ / მ^2] \quad (2.2)$$

ცხადია, რომ რეაქტიული ძალის მიღებული მნიშვნელობა ძალიან მცირე სიდიდისაა და მართლაც თითქოს არ უნდა იმსახურებდეს განსაკუთრებული ყურადღების მიქცევას. თუმცა საჭიროება მოითხოვს ავღნიშნოთ, რომ პრაქტიკულ შემთხვევებში ასეთი მცირე ძალაც კი სრულიად თვალსაჩინო ეფექტებს იწვევს და მისი უგულებელყოფა არ მიგვაჩნია მართალზომიერად.

გამოთქმული მოსაზრების დასამტკიცებლად მოფიქრებული იქნა სადემონსტრაციო ცდა, რომლის არსი გადმოცემულია ნახაზზე 11.

სადგარზე 1, რომელსაც გააჩნია ვერტიკალურად ზემოთ და ქვემოთ გადაადგილების საშუალება 2, მოთავსებულია დიუარის ჭურჭელი 3, რომელშიც იმყოფება თხევადი აზოტი 4. ჭურჭლის ზემოთ, უძრავ საყრდენზე 5 ძაფით 6 ჩამოკიდებულია სპილენძის ფირფიტა 7, რომლის გრძივ ნახევრებზე, ურთიერთსაწინააღმდეგო ზედაპირებზე განლაგებულია თბოსიზოლაციო მასალა 8.

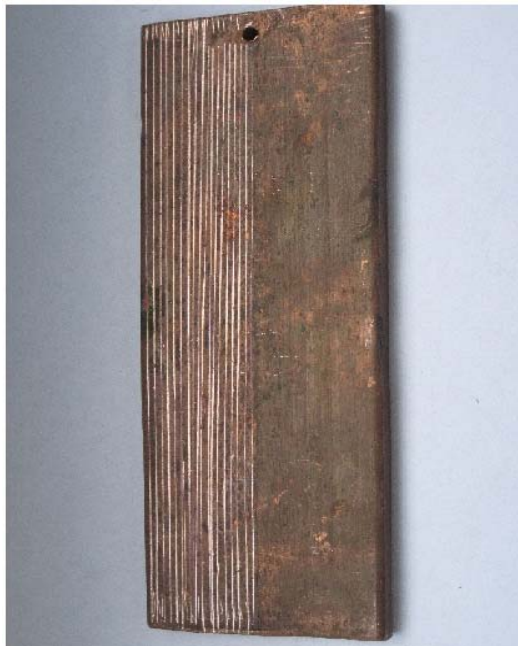


ნახ. 11. მადულარი სითხის მზრიდან გახურების ზედაპირზე წარმოქმნილი მექანიკური ზემოქმედების სადემონსტრაციო დანადგარი

სადემონსტრაციო ცდა იწყება შემდეგნაირად. სადგარის მაღლა აწევით ხდება საყრდენზე ჩამოკიდებული სპილენძის ფირფიტის მოთავსება თხევად აზოტში, რომელიც ფიფრფიტის თბოტევადობით შეტანილი სითბოს ხარჯზე იწყებს ინტენსიურ დუღილს როგორც შიშველი სპილენძის, ასევე თბოიზოლაციის ყველა ზედაპირზე. ამავე დროს იწყება ფირფიტის ბრუნვა ნახაზზე ნაჩვენები მიმართულებით. თბოსაიზოლაციო მასალა მალე ცივდება და შემდეგ ამ უკანასკნელის ზედაპირებზე დუღილი გაცილებით დაბალი ინტენსივობით ხასიათდება, ვიდრე შიშველი სპილენძის ზედაპირებზე. ეს მომენტი ხასიათდება ფირფიტის ბრუნვის სიჩქარის მომატებით. ძაფი იგრძობა, მოკლდება და ფირფიტა იძენს გარკვეულ პოტენციურ ენერგიას. ბოლოს, როცა სპილენძის ფირფიტა ცივდება თხევადი აზოტის ტემპერატურამდე, ნახაზზე ნაჩვენები მიმართულებით ბრუნვა წყდება და ფირფიტა იწყებს გაცილებით ნაკლები ინტენსივობის ბრუნვას უკუმიმართულებით, რასაც განაპირობებს ძაფის გრეხვით დაგროვილი პოტენციური ენერგია.

შემდეგ მოფიქრებული იქნა სადემონსტრაციო ცდის უფრო მარტივად ჩატარება, კერძოდ თბოსაიზოლაციო ფირფიტების გამოყენების გარეშე. ცნობილია, რომ დუღილის ინტენსივობა მნიშვნელოვნადაა დამოკიდებული გამახურებელი ზედაპირის სიმქისეზე. ამიტომ ხსენებული სპილენძის ფირფიტის ურთიერთსაწინააღმდეგო ნახევარზედაპირები, თბოსაიზოლაციო მასალით დაფარვის ნაცვლად ჩვენ დავკაწრეთ ისე, როგორც ეს ნაჩვენებია წარმოდგენილ ფოტოზე 12. ამგვარად მომზადებული ფირფიტის თხევად აზოტში ჩაშვებისას ჩვენ მივიღეთ ძაფზე ჩამოკიდებული ფირფიტის ბრუნვის იგივე ეფექტი.

აღწერილი სადემონსტრაციო ცდები გვიჩვენებენ იმ ფაქტის არსებობას, რომ მადულარი სითხის მხრიდან ნამდვილად ვითარდება გარკვეული მექანიკური ზემოქმედება გამახურებელ ელემენტზე.



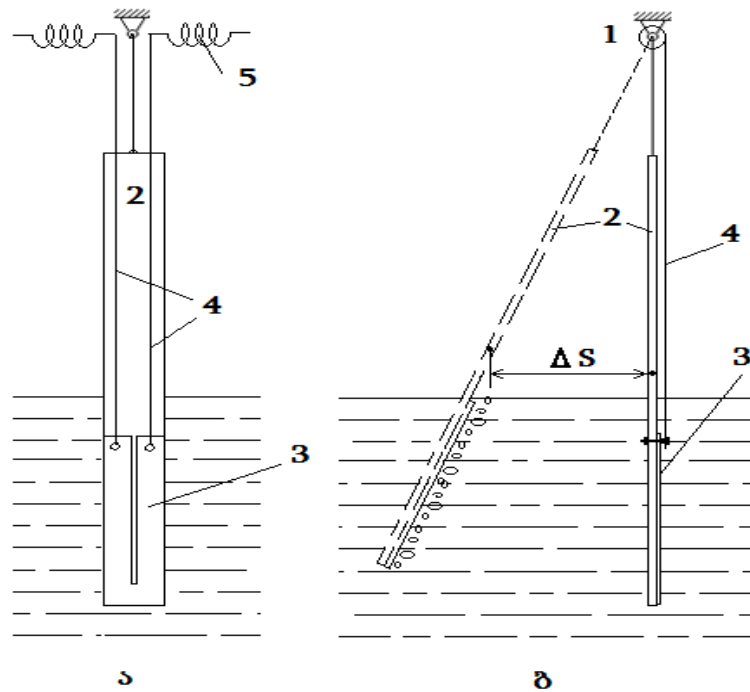
სურათი: 1. მადულარი სითხის მხრიდან გახურების ზედაპირზე
წარმოქმნილი მექანიკური ზემოქმედების
სადემონსტრაციო დანადგარში გამოყენებული ფირფიტის
თბოსაიზოლაციო მასალით დაფარვების გარეშე

2.5. სითხის დუდილის დროს წარმოქმნილი რეაქტიული ძალის მოქმედების დასაფიქსირებელი პირველი ექსპერიმენტული დანადგარი

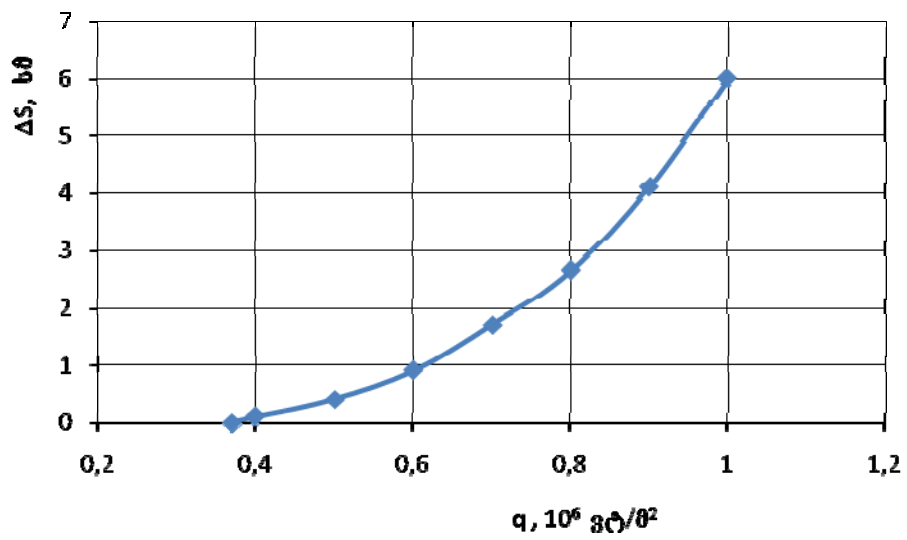
მადულარი სითხის მხრიდან გამახურებელ ელემენტებზე წარმოქმნილი მექანიკური ზემოქმედების უფრო მკაფიოდ დანახვისა და დაფიქსირებისათვის ჩატარებული იქნა სპეციალური ცდები. ეს ცდები ჩატარდა სპეციალურად ამ მიზნით კონსტრუირებულ ექსპერიმენტულ დანადგარზე რომლის პრინციპული სქემა ნახ. 12-ზეა წარმოდგენილი.

უძრავ საყრდენზე 1 ჩამოკიდებულია ბრტყელი, ელექტროსაიზოლაციო, კერძოდ გეტინაქსის ფირფიტა 2, რომელსაც ქვედა ნაწილზე დაკრული აქვს მეტალის თხელი კილიტა 3, სითხოს გამომყოფი გამახურებელი ელემენტის სახით. ფირფიტის ეს ნაწილი წყალშია ჩაშვებული. კილიტასთან შეერთებულია დენმიმცვანები 4 ისე, რომ საყრდენზე 1 ჩამოკიდებულ ფირფიტას 2 თავისუფლად შეუძლია გადაადგილდეს ჩამოკიდების წერტილის გარშემო, ისე, როგორც ეს ნაჩვენებია პუნქტირით ნახ. 2.8, ა-ზე. ფირფიტის 2 ბრუნვის წერტილის გასწვრივ დენმიმცვანების სპირალური ფორმით 5 მოთავსება უზრუნველყოფს ფირფიტის თავისუფალ გადაადგილებას ბრუნვის ღერძის გარშემო.

ცდის დაწყებამდე ფირფიტა 2, ისევე როგორც მასზე დამაგრებული გამახურებელი კილიტა და დენმიმცვანები იმყოფებიან ვერტიკალურ მდგომარეობაში. შემდეგ კილიტას მიეწოდება ელექტრული დენი და ხდება მისი, როგორც გამახურებლის სიმძლავრის თანდათანობითი ზრდა. კილიტაში ხდება სითხოს გამოყოფა, რომელიც თავდაპირველად სითხეში გადადის კონვექციური მექანიზმით. კილიტის, როგორც გამახურებელი ელემენტის გარკვეულ სიმძლავრეზე მის ზედაპირზე იწყება გარემომცველი წყლის დუდილი. ამ მომენტამდე ფირფიტა ინარჩუნებს ვერტიკალურ მდგომარეობას, ხოლო როგორც კი კილიტის ზედაპირზე გაჩნდება პირველი ბუშტები, ფირფიტა მთლიანად მაშინვე მარცხნივ



ნახ. 12. დუღილის პროცესში მადულარი სითხის მხრიდან გახურების ზედაპირზე წარმოქმნილი მექანიკური ზემოქმედების ხარისხობრივად შესასწავლი ექსპერიმენტული დანადგარის სქემა
 ა. - საწყისი მდგომარეობა, წინხედი; ბ. - გვერდხედი. პუნქტორით ნაჩვენებია ფირფიტის ტიპური მდგომარეობა დუღილის პროცესში.



ნახ. 13. ფირფიტის სიმბიმის ცენტრის გადახრის სიდიდის დამოკიდებულება დუღილის პროცესში განვითარებულ ხვედრით თბურ ნაკადზე

გადაადგილდება და რაც მეტია გამახურებელში გამოყოფილი სიმძლავრე, ანუ რაც უფრო ინტენსიურია დუდილის პროცესი, მით უფრო მეტად იხრება ფირფიტა დუდილის საწინააღმდეგო მხარეს და აღწევს მაქსიმუმს, როდესაც კილიტის ზერდაპირზე ვითარდება კრიტიკული თბური დატვირთვა. ფირფიტაში გატარებული დენის რეგულირებით მიიღწეოდა დუდილის სხვადასხვა ინტენსივობა და იზომებოდა დუდილის მოცემულ

რეჟიმში გავითარებული გადახრა. გადახრის პარამეტრად შერჩეული იყო ფირფიტის სიმძიმის ცენტრის გადაადგილების სიდიდე (ΔS), გაზომილი სანტიმეტრებში. მიღებული ექსპერიმენტული შედეგები წარმოდგენილია ნახ. 13-ზე ნაჩვენები დიაგრამის სახით.

აქვე უნდა აღინიშნოს, რომ მოყვანილი შედეგები არ იძლევიან მოვლენის სრული შეფასების შესაძლებლობას, რადგან ამ შედეგების მიხედვით შეუძლებელია ხსენებულ ფირფიტაზე მადულარი სითხის მხრიდან მოქმედი ძალის სიდიდის დადგენა. აღწერილი ცდებით ფიქსირდება მხოლოდ ერთი ფაქტი - რაც მეტია დუდილის ინტენსივობა, მით მეტია გადახრა, ანუ მით მეტი ძალა მოქმედებს გამახურებელ ელემენტზე მადულარი სითხის მხრიდან.

ზემოთ აღწერილი სადემონსტრაციო დანადგარებზე და ვერტიკალური ფირფიტის გადახრის გამოსაკვლევ ექსპერიმენტულ დანადგარზე მიღებული შედეგები, ნათლად ცხადყოფენ, რომ დუდილის პროცესში მდულარე სითხის მხრიდან გამახურებელ ზედაპირზე აღძრული მექანიკური ზემოქმედება საკმაოდ მკაფიო პრაქტიკული გამოვლინებით ხასიათდება.

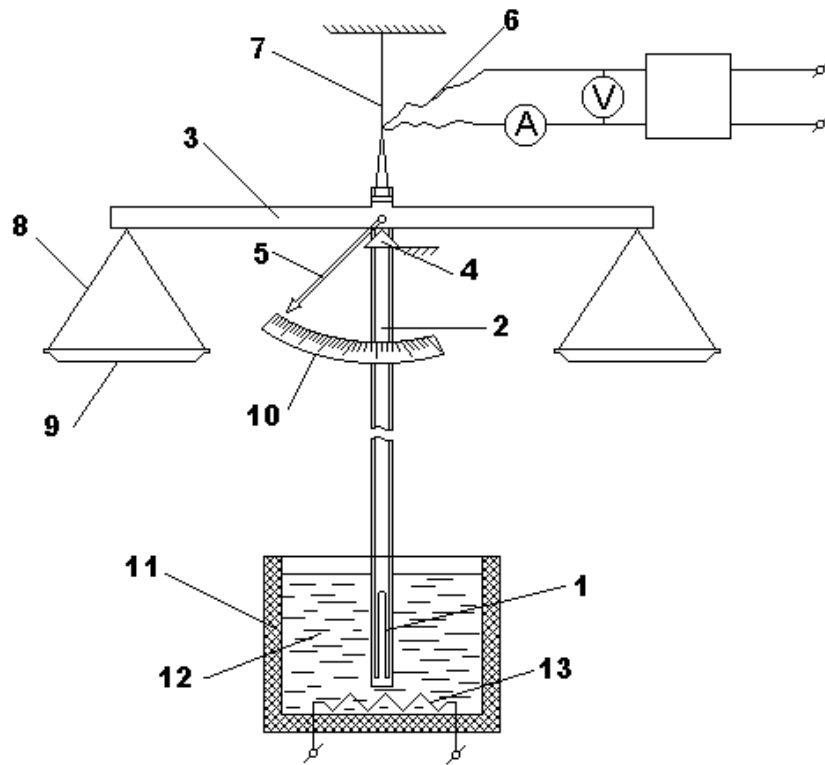
ნათქვამიდან გამომდინარე შეიძლება დავასკვნათ, რომ სავსებით მიზანშეწონილია აღნიშნული მოვლენის კიდევ უფრო მიზანდასახული, როგორც თეორიული, ასევე პირველ რიგში ექსპერიმენტული გამოკვლევა. ჩვენი აზრით მომავალი კვლევების ამოცანებია ხურების ზედაპირზე მდულარე სითხის მხრიდან აღძრული მექანიკური ზემოქმედების წარმოქმნის პირობებისა და უშუალო მიზეზების დადგენა და

განსაკუთრებით, აღძრული ძალების აბსოლუტური მნიშვნელობების გაზომვა დუღილის პროცესის სხვადასხვა ინტენსიურობის, ანუ ხვედრითი თბური ნაკადის სხვადასხვა მნიშვნელობების დროს. ამ მიზნით გადაწყვეტილი იქნა ახალი, სპეციალური ექსპერიმენტული დანადგარის დაპროექტება.

2.6. სითხის დუღილის დროს წარმოქმნილი რეაქტიული ძალის გასაზომი ექსპერიმენტული დანადგარი

დუღილის პროცესში წარმოქმნილი და სითხის მხრიდან მადულარ ზედაპირზე მოქმედი ძალის შედარებით საიმედო რიცხვითი მნიშვნელობების დასადგენად დავაპროექტეთ სპეციალური ექსპერიმენტული დანადგარი, რომლის პრინციპული სქემა ნაჩვენებია ნახაზზე 14. ამართქლებელი ელემენტი 1, თითბერის გლუვი კილიტადან, რომლის სისქეა 0,2 მმ, მიმაგრებულია საკმაოდ ხისტ და მსუბუქ ძელზე 2 (თვალსაჩინოებისთვის ძელი ამართქლებელი ელემენტით სქემაზე ვერტიკალური ღერძის გარშემო მობრუნებულია 90° გრადუსით), რომელიც მიმაგრებულია თანაბარმხრიანი ტექნიკური სასწორის უღელზე 3 ვერტიკალურ სიბრტყეში, რომელიც გადის საყრდენი პრიზმის 3 წვერზე და მაჩვენებელი ისრის 5 შეერთების წერტილში. სადენები 6, შეერთებულია ამართქლებელ ელემენტთან, გაყვანილია ძელზე 2, ჩამოკიდებულია ძაფით 7 ჭერზე და მიერთებულია კვების წყაროსთან სპირალურად უღელის ღერძის ბრუნვის მიმართ, იმგვარად, რომ მათმა დრეკადობამ არ იქონიოს გავლენა სასწორის ჩვენებაზე. ამართქლებელი ზედაპირის სასწორის უღელთან დამაკავშირებელი ძელის 2 სიგრძე სასწორის უღლის სიგრძესთან მიმართებაში იმგვარადაა შერჩეული, რომ იმოქმედოს ბერკეტის წესით ძალის გამაძლიერებლად. კერძოდ, ჩვენ

შემთხვევაში, ძელის სიგრძე ხუთჯერ აღემატება სასწორის უღლის სიგრძეს, რითაც მიიღწევა სასწორის წონასწორობიდან გამოყვანა ამართქლებელი ელემენტის ზედაპირზე სითხის მხრიდან წარმოქმნილი



ნახ. 14. მადულარ ზედაპირზე მოქმედი ძალის გასაზომი
ექსპერიმენტული დანადგარის პრინციპული სქემა

მცირედი ზემოქმედების დროსაც კი. საყრდენ პრიზმაზე დამატებითი ხახუნის ძალის აღმოსაფხვრელად, რომელსაც იწვევს ძელის 2 წონა, ეს უკანასკნალი იმავე ძაფით 7, ჭერზეა დამაგრებული.

2.7. ცდების ჩატარების მეთოდოლოგია

ცდის დასაწყისში უღელი საკიდებით 8 და სინებით 9 მოყვანილი უნდა იქნეს წონასწორობაში იმგვარად, რომ სასწორის წონასწორობასთან ერთად, ძელზე დამაგრებულმა და სითხეში ჩასაძირად გამზადებულმა ამორთქლებელმა ელემენტმა მიიღოს ვერტიკალური მდგომარეობა. ამორთქლებელი ელემენტი ჭურჭლის 11 აწევის გზით ჩაიძირება გამოხდილ წყალში 12, რომელიც ფონური გამახურებლის 13 მეშვეობით წინასწარ გაცხელდება ატმოსფერული წნევის შესაბამის ნაჯერობის ტემპერატურამდე. ამის შემდეგ ჩაირთვება ამორთქლებელი ელემენტის წრედი და ძაბვის რეგულატორის მეშვეობით მიიღწევა წყლის დუღილის სასურველი რეჟიმი. დუღილისას სასწორი თავად გამოვა წონასწორობის მდგომარეობიდან. სასწორის წონასწორობიდან გადახრის კომპენსირება მოხდება სინებზე შესაბამისი საწონების დალაგების გზით, წონასწორობის მდგომარეობის აღდგენამდე. ამასთან სტაციონალური წონწსწორობა პრაქტიკულად ვერ დამყარდება, რის გამოც სასწორის ისარი იმოდრავებს შკალის შუა კვეთის (ნულოვანი აღნიშვნის) სიახლოვეს. სასწორის ამგვარი შედარებითი წონასწორობის მიღწევის შემდეგ დაფიქსირდება სინებზე დადებული გირების საერთო მასა და შეფასდება სასწორის ისარის მერყეობის ამპლიტუდა მასის ერთეულებში. ამგვარად განისაზღვრება მადუღარი სითხის მხრიდან ხურების ზედაპირზე მოქმედი ძალის მინიმალური და მაქსიმალური მნიშვნელობები.

აღნიშნული ძალის კუთრი მნიშვნელობა გამოითვლება შემდეგნაირად:

$$P = \frac{M g l}{L S} , \quad [N/m^2] \quad (2.3)$$

სადაც: M - მაკომპენსირებელი საწონების მასაა- [კგ]; g - სიმძიმის ძალის აჩქარება, [მ/წმ²]; l და L - შესაბამისად უღელისა და ძელის სიგრძეებია, [მ]; S - ამორთქლებელის ზედაპირის ფართობი, [მ²].

ცხადია, რომ ძალის მაქსიმალური და მინიმალური მნიშვნელობების დასადგენად (2) გამოსახულებაში შესაბამისად შევიყვანოთ სასწორიდან ათვლილი მასის მაქსიმალური და მინიმალური მნიშვნელობებს.

საძიებელი კუთრი ძალის საშუალო მნიშვნელობა გამოითვლება როგორც საშუალო არითმეტიკული ($P_{\text{მაქს}} + P_{\text{მინ}}$) / 2 და მიეკუთვნება მოცემული დუდილის რეჟიმისას მოქმედ კუთრ თბურ ნაკადს. ეს უკანასკნელი დაფიქსირდება ამორთქლებელი ელემენტის ელექტრულ წრედში ჩართული ვოლტმეტრისა და ამპერმეტრის ჩვენებათა ერთმანეთზე გადამრავლების გზით.

ექსპერიმენტები ჩატარდება კუთრი თბური ნაკადის სხვადასხვა მნიშვნელობებისას დიაპაზონში 50 ათასიდან 800 ათასამდე [ვტ/მ²]. კუთრი თბური ნაკადის ყოველ მნიშვნელობაზე დუდილის მოცემული რეჟიმი შენარჩუნებული იქნება არანაკლებ ათი წუთის განმავლობაში. ამ დროის მანძილზე დაფიქსირდება სასწორის შკალის შუა კვეთთან (ნულოვან აღნიშვნასთან) მაჩვენებელი ისრის მერყეობის მაქსიმალური და მინიმალური ამპლიტუდები.

დუდილის ყოველ რეჟიმში მიღწეული ხვედრითი თბური ნაკადის მნიშვნელობას გავიანგარიშებთ შემდეგი ფორმულით:

$$q = \frac{k I E}{a b} \quad [W/m^2] \quad (2.4)$$

სადაც I – დენის ძალაა დენის ტრანსფორმატორის მეორად გრაგნილში, [ა];

k – დენის ტრანსფორმატორის ტრანსფორმაციის კოეფიციენტი;

U – ძაბვის ვარდნა საცდელ ნიმუშზე, [ვ];

l – გამახურებელი ელემენტის ნიმუშის სიგანე, [მ];

a – გამახურებელი ელემენტის სიგრძე ანუ მანძილი პოტენციალის გამომყვანებს შორის, [მ].

თბური ნაკადი შეიძლება ვიანგარიშოთ სხვა ფორმულითაც:

$$q = \frac{Q_{\text{ელ}}}{s} = \frac{IU}{ab} \quad [\text{ვტ/მ}^2] \quad (2.5)$$

სადაც I და U ექსპერიმენტულ უბანში გამავალი ელ. დენის პარამეტრებია, s ხურების ზედაპირის ფართობია, [მ²].

2.8. ექსპერიმენტული შედეგები

ცხადია, რომ ძალის მაქსიმალური და მინიმალური მნიშვნელობების დასადგენად (2) გამოსახულებაში შესაბამისად შეგვყავდა სასწორიდან ათვლილი მასის მაქსიმალური და მინიმალური მნიშვნელობები.

მიღებული კუთრი ძალის საშუალო მნიშვნელობა გამოითვლებოდა როგორც საშუალო არითმეტიკული ($P_{\text{მაქს}} + P_{\text{მინ}}$) / 2 და მიეკუთვნებოდა მოცემული დუდილის რეჟიმისას მოქმედ კუთრ თბურ ნაკადს. ეს უკანასკნელი ფიქსირდებოდა ამორთქლებელი ელემენტის ელექტრულ წრედში ჩართული ვოლტმეტრისა და ამპერმეტრის ჩვენებათა ერთმანეთზე გადამრავლების გზით.

ექსპერიმენტები ჩატარდა კუთრი თბური ნაკადის სხვადასხვა მნიშვნელობებისას დიაპაზონში 50 ათასიდან 800 ათასამდე [ვტ/მ²]. კუთრი თბური ნაკადის ყოველ მნიშვნელობაზე დუდილის მოცემული რეჟიმი შენარჩუნებული იყო არანაკლებ ათი წუთის განმავლობაში. ამ დროის მანძილზე ფიქსირდებოდა სასწორის შკალის შუა კვეთთან (ნულოვან აღნიშვნასთან) მაჩვენებელი ისრის იმერყეობის მაქსიმალური და მინიმალური ამპლიტუდები.

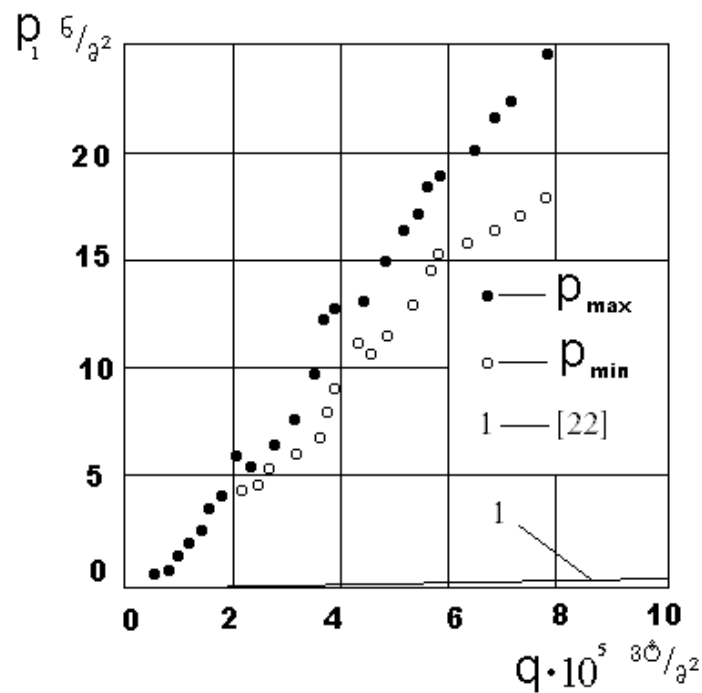
ნახ. 15-ზე მოყვანილია ზემოთაღწერილი, ამართქლებელი ელემენტის ზედაპირზე მადულარი წყლის მხრიდან განვითარებული ძალის ექსპერიმენტული კვლევის შედეგები. იქვე შედარებისთვის ნაჩვენებია მრუდი, რომელიც მიღებულია აკადემიკოს ს. ქუთათელაძის მიერ რეკომენდებული ორთქლადქცევის პროცესში ნაკადის სიჩქარის ცვლილებით წარმოქმნილი რეაქციის კუთრი ძალის გამოსათვლელი ფორმულით (1.1).

როგორც ნახ. 15-დან ჩანს, ზემოთ აღწერილ ექსპერიმენტებში გაზომილი, გამახურებელ ელემენტზე მადულარი სითხის მხრიდან მოქმედი ძალის მნიშვნელობები მკვეთრად განსხვავდება ს. ქუთათელაძის ფორმულით გამოთვლილი მნიშვნელობებისაგან კუთრი თბური ნაკადის მთელ დიაპაზონში. მაგალითად, დუღილის იმ რეჟიმში, როდესაც კუთრი თბური ნაკადი შეადგენდა 800 ათას ვტ/მ²-ს, ჩვენს მიერ გაზომილი ძალის მნიშვნელობა გამოთვლილ მნიშვნელობას თითქმის ასჯერ აღემატება.

უნდა აღინიშნოს, რომ კუთრი თბური ნაკადის გაზრდისას იზრდებოდა როგორც ხურების ზედაპირზე მადულარი წყლის მხრიდან მოქმედი ძალის საშუალო მნიშვნელობა, ასევე სხვაობა ამ ძალის მაქსიმალურ და მინიმალურ მნიშვნელობებს შორის.

ზემოთ მოყვანილი შედეგების საფუძველზე აშკარად შეგვიძლია დავასკვნათ, რომ დუღილისას მადულარ სითხესა და ხურების ზედაპირს შორის ხდება გარკვეული მექანიკური ურთიერთქმედება. აქედან გამომდინარე სავსებით ცხადია, რომ საჭიროა შესრულდეს მთელი რიგი საკმაოდ რთული და მრავალმხრივი კვლევები რათა გამოვლინდეს აღნიშნული ურთიერთქმედების ზუსტი მექანიზმი. ამასთან, ვინაიდან ხურების ზედაპირზე მადულარი წყლის მხრიდან მოქმედი ძალის ექსპერიმენტულად დადგენილი მნიშვნელობები არც ისე მცირე სიდიდეებს წარმოადგენენ, ჩვენი აზრით სავსებით მიზანშეწონილია ამ ძალის პრაქტიკული გამოყენების შესაძლებლობათა გამოვლენა და ისეთი თბური მანქანის დაპროექტება, რომელშიც თბური ენერჯის მექანიკურ ენერჯიად

გარდასაქმნელად სწორედ ეს მოვლენა იქნება გამოყენებული. ამასთან მოსალოდნელია, რომ ერთ მოცულობაში ამართქლებელ-საკონდენსაციო პროცესების უწყვეტი განხორციელებით შესაძლებელი იქნება თბური ენერჯის სასარგებლო მუშაობად უწყვეტად გარდამქმნელი თბური მანქანის მუშაობის უნარიანობის უზრუნველყოფა.



ნახ. 15. ხურების ზედაპირზე მაღლარი სითხის მხრიდან მოქმედი ძალის სიდიდის დამოკიდებულება ხვედრითი თბური ნაკადის მნიშვნელობაზე

თავი III. დუდილის და მისი თანმხლები ფიზიკური მოვლენების შესასწავლი ექსპერიმენტული დანადგარი

3.1. ექსპერიმენტული დანადგარის აღწერა.

დუდილის პროცესში მადულარი სითხის მხრიდან ხურების ზედაპირზე აღძრული მექანიკური ზემოქმედების თეორიული და ექსპერიმენტული შესწავლის საწყის ეტაპზე მიღებული შედეგების აღწერის საფუძველზე ჩამოყალიბებდა კვლევის შემდგომი ეტაპის ამოცანები, რომელთა შორის დასახული იყო ხურების ზედაპირზე მდულარე სითხის მხრიდან აღძრული მექანიკური ზემოქმედების (რეაქტიული ძალის) წარმოქმნის პირობებისა და უშუალო მიზეზების დადგენა და განსაკუთრებით, აღძრული ძალების აბსოლუტური მნიშვნელობების გაზომვა დუდილის პროცესის სხვადასხვა ინტენსიურობის, ანუ ხვედრითი თბური ნაკადის სხვადასხვა მნიშვნელობების დროს.

ლითონის ფირფიტებზე ატმოსფერული წნევის პირობებში წყლის დუდილისას წარმოქმნილი რეაქტიული ძალის მნიშვნელობათა ექსპერიმენტულად გამოსაკვლევად ჩვენ გადავწყვიტეთ სპეციალურად დაგვეპროექტებინა და შეგვექმნა ისეთი ექსპერიმენტული დანადგარი, რომელიც საშუალებას მოგვცემდა უშუალოდ გაგვეზომა იმ რეაქტიული ძალის აბსოლუტური მნიშვნელობა, რომელიც წარმოიქმნება დუდილის სხვადასხვა ინტენსივობის პირობებში და მოახდენს ძალურ ზემოქმედებას გამახურებელ ელემენტზე.

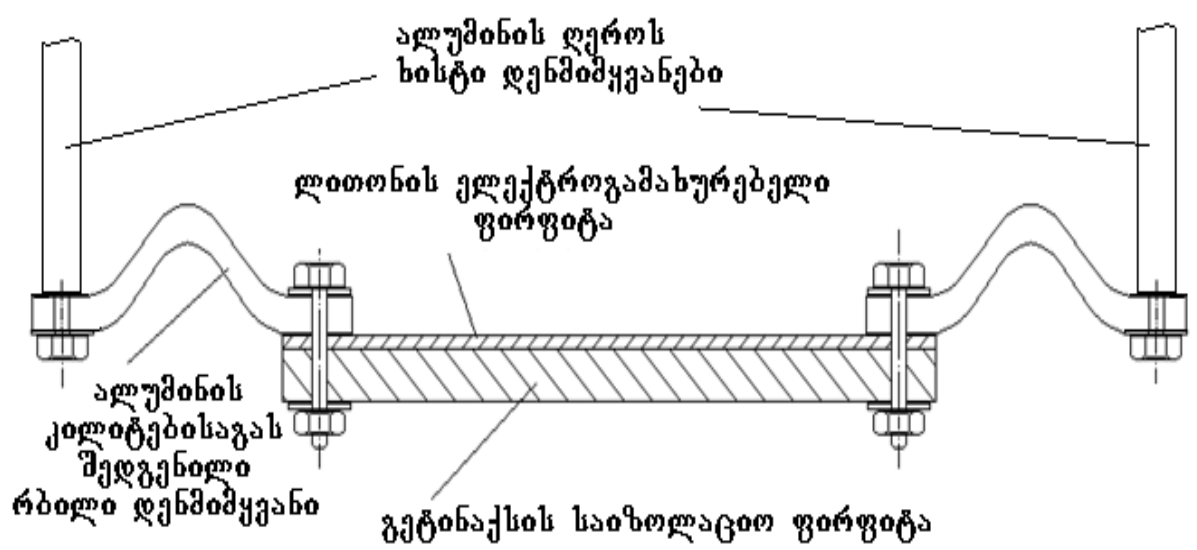
წინამდებარე ნაშრომი ეძღვნება ზემოხსენებული ამოცანის გადასაჭრელად ჩვენს მიერ დაპროექტებული და შექმნილი ახალი ექსპერიმენტული დანადგარისა და ცდების ჩატარების მეთოდის აღწერას. გადმოცემულია აგრეთვე პირველადი ანათვლების შეგროვებისა და ცდების მონაცემების დამუშავების მეთოდისა და შესაძლო ცდომილებათა ანალიზი.

3.1.1. სადულელებელი კვანძი.

ლითონის ფირფიტისაგან დამზადებულ გამახურებელ ელემენტებზე დუდილის ჩასატარებლად აუცილებელია მათი ზედაპირებისათვის გარკვეული რაოდენობის თბური ენერჯის მიწოდება. ამ მიზნით, დაიგეგმა საცდელი ლითონის ფირფიტისათვის ელექტრული ენერჯის მიწოდება. დუდილი იწარმოებს გამახურებელ ელემენტში უშუალოდ გატარებული ელექტროდენის მიერ გამოყოფილი სითბოს ხარჯზე.

ლითონის გამახურებელი ელემენტის ზედაპირზე წარმოქმნილი რეაქტიული ძალის დადგენა შესაძლებელია მხოლოდ იმ შემთხვევაში, თუ გამახურებელი ფირფიტის ერთერთი ზედაპირი იმგვარად იქნება იზოლირებული, რომ მას მადულარი სითხე არ შეეხება და არც ამ მხრიდან გამოყენებული საიზოლაციო მასალის ზედაპირზე სითხის დუდილს ადგილი არ ექნება. მაშინ სითხის დუდილი განხორციელდება გამოსაცდელი ლითონის მხოლოდ ცალ ზედაპირზე და წარმოქმნილი რეაქტიული ძალა სადულელებელ კვანძზე (ნახ. 16) მოახდენს მხოლოდ ცალმხრივ მექანიკურ ზემოქმედებას, რის შემდეგაც რჩება ამ ზემოქმედების ვიზუალიზაციის და მოქმედი რეაქტიული ძალის გაზომვის ამოცანა. ამ ამოცანის გადაწყვეტის მეთოდისა ქვემოთაა აღწერილი.

სადულელებელი კვანძი შედგება 0,1 მმ სისქის, 50 მმ სიგანის და 180 - 200 მმ სიგრძის ლითონის, კერძოდ სპილენძის ელექტროგამტარი ფირფიტისაგან, რომელიც დაწებებულია და მექანიკურადაც მტკიცეაა დამაგრებული გეტინაქსის სქელ და ოდნავ ფართო ფირფიტაზე რათა დუდილი განხორციელდეს ელექტროგამტარი სადულარი ფირფიტის მხოლოდ ცალ ზედაპირზე. გეტინაქსის ფირფიტა ერთდროულად ასრულებს ორ მოვალეობას. კერძოდ, ელექტროგამტარი სადულარი ფირფიტის ქვედა ზედაპირთან არ უშვებს წყალს და წარმოადგენს თბოიზოლატორს, რომელიც ამცირებს ელექტროგამტარი სადულარი ფირფიტის ქვედა ზედაპირიდან წყალში გადაცემული სითბოს რაოდენობას. ეს საშუალებას გვაძლევს ჩავთვალოთ, რომ ელექტროგამტარ



ნახ. 16. სადულეზელი კვანძის სქემა

სადულარ ფირფიტაში გამოყოფილი სითბო მთლიანად იხარჯება ამ უკანასკნელის ზედა ზედაპირზე შეხებაში მყოფი წყლის დუღილზე და კონკრეტულ შემთხვევაში წარმოქმნილი რეაქტიული ძალა უშუალოდ ამ შემთხვევაში განვითარებულ ხვედრით თბურ ნაკადთან დავაკავშიროთ.

ფირფიტის თავსა და ბოლოში სპეციალური ჭანჭიკებით მოჭერილია ალუმინის არახისტი (მოძრავი) დენმიმცვანები, რომლებიც წარმოადგენენ ალუმინის კილიტების (სისქით 0,13 მმ, სიგანით 50 მმ და სიგრძით 250 მმ) ანაკრებს. კერძოდ მარცხენა და მარჯვენა დენმიმცვანები თვითოეული 150-150 ცალი კილიტისაგან არის შედგენილი. კილიტების ანაკრებისაგან შემდგარ ორივე დენმიმცვანს მინიჭებული აქვთ ნახევარტალის ფორმა და მათ ბოლოებს ერთმანეთის მიმართ

გარკვეულ დიაპაზონში თავისუფალი გადაადგილება შეუძლიათ. თითოეული არახისტი დანმიმცვანი ერთი ბოლოთი დამაგრებულია სადულარ ელემენტზე ხოლო მეორე ბოლოთი კონსტრუქციულად ხისტად დამაგრებულ, ალუმინის მასიური ღეროსაგან დამზადებულ დენმიმცვანზე. ამგვარად დამაგრებულ სადულარ კვანძს აქვს სივრცეში ყველა მიმართულებით თავისუფალი (გარკვეულ საზღვრებში) გადაადგილების საშუალება.

3.1.2. სადულარე კვანძის დამაგრების მექანიზმი.

ვინაიდან ჩვენი გამოკვლევის მიზანია ელექტროგამტარ სადულარ ფირფიტაზე წარმოქმნილი რეაქტიული ზემოქმედების რაოდენობრივი შეფასება, ანუ იმ ძალის გაზომვა, რომელიც იმოქმედებს სადულარ ფირფიტაზე მდულარე სითხის მხრიდან, ცხადია, რომ სადულარე კვანძის დამაგრების სისტემამ უნდა უზრუნველყოს კვანძის თავისუფალი გადაადგილება მხოლოდ იმ მიმართულებით, რა მიმართულებითაც იმოქმედებს ხსენებული ძალა. ჩვენს მიერ ადრე ჩატარებული სადემონსტრაციო ცდების შედეგების გათვალისწინებით ვასკვნით, რომ მდულარე სითხის მხრიდან აღძრული და გახურების ზედაპირზე მოქმედი

რეაქტიული ძალა ამ ზედაპირის მართობულადაა მიმართული სითხიდან სადულეებელ ელემენტზე. აქედან გამომდინარე, აუცილებელია სადულეებელი კვანძის სითხეში ისეთი განლაგება, რომ წარმოქმნილმა ორთქლის ბუშტებმა არ გამოიწვიონ (ვთქვათ ამომგდები ძალის ზეგავლენით) სადულეებელი კვანძის რაიმე გადაადგილება. ამ პირობას ყველაზე მეტად აკმაყოფილებს მადუღარი ზედაპირის ჰორიზონტალური განლაგება და თან ისე, რომ დუღილი მიმდინარეობდეს ზედა მხრიდან, ანუ მოწყვეტილი ბუშტები თავისუფლად გადაადგილდნენ სითხის სარკული ზედაპირისაკენ (ნაშრომში [43] აღწერილ სადემონსტრაციო დანადგარებში სადუღარი ფირფიტები ვერტიკალურად იყვნენ განლაგებული).

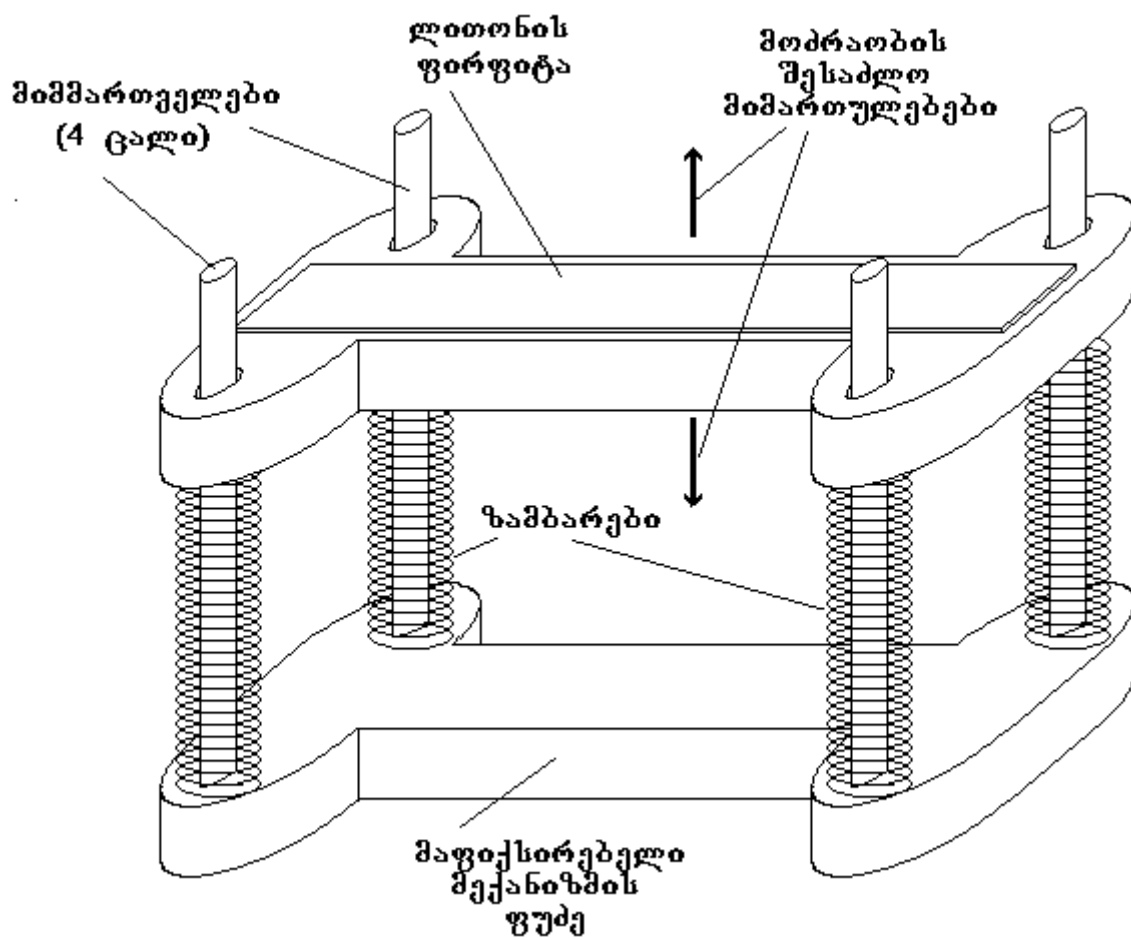
ასეთ შემთხვევაში სავსებით ცხადია, რომ დუღილის პროცესში აღძრული და მდუღარე სიხის მხრიდან სადულარ ზედაპირზე მოქმედი რეაქტიული ძალა იმოქმედებს ვერტიკალურად, ზემოდან ქვემოთ. ამიტომაც სადულეებელი კვანძის სითხეში დაფიქსირების მექანიზმი უნდა უზრუნველყოფდეს მის ზემოდან ქვემოთ გადაადგილებას სხვადასხვა მანძილზე, იმის მიხედვით თუ რა სიდიდის რეაქტიული ძალა წარმოიქმნა დუღილის მოცემულ რეჟიმში. ამასთან, ხსენებულმა მექანიზმმა უნდა უზრუნველყოს სადულეებელი კვანძის თავდაპირველ, ზედა მდგომარეობაში დაბრუნება, როცა დუღილი შეწყდება, ანუ რეაქტიული ძალის მნიშვნელობა ნულამდე დაეცემა.

აღნიშნული შესაძლებლობის განსახორციელებლად ელექტრო და თბოსაიზოლაციო გეტინაქსის ფირფიტას, რომელზეც ლითონის ელექტრო-სადულარია დაწებებული ოთხივე კუთხეში გაყრილი აქვს ვერტიკალურად და ერთმანეთის მიმართ უძრავად დამაგრებული მიმმართველები, რომლებიც სადულარებელ კვანძს ვერტიკალურად ზემოთ და ქვემოთ გადაადგილებისგარდა არანაირი მოძრაობის საშუალებას არ აძლევენ. ამასთან ოთხივე მიმმართველზე არსებული ზამბარები უზრუნველყოფენ სადულეებელი კვანძის ძირს დაწევას დუღილის პროცესში წარმოქმნილი რეაქტიული ძალის ზემოქმედებისას და ძირს დაწეული სადულეებელი

კვანძის გადაადგილებას ზემოთ, სხვადასხვა მიზეზით რეაქტიული ძალის შემცირებისას, ან თავდაპირველ მდგომარეობაში დაბრუნებას, დუღილის შეწყვეტისას.

სადუღებელი კვანძის სითხეში დაფიქსირების მექანიზმი წარმოდგენილია ნახაზზე 17.

ხსენებული მექანიზმი მოიცავს ლითონის ელექტროსადუღარიან ელექტრო და თბოსაიზოლაციო გეტინაქსის ფირფიტას, ამ ფირფიტის ანალოგიურ, იმავე მასალისაგან დამზადებულ ფირფიტას, მაფიქსირებელი ზედაპირის ერთგვარ ფუძეს, რომელზეც ჩამაგრებულია ოთხი მიმმართველი და გეტინაქსის ფირფიტებს შორის მიმმართველებზე ჩამოცმულ ოთხ ზამბარას, როგორც ეს ნაჩვენებია ნახაზზე 17 მიმმართველებიანი ქვედა ფირფიტა, ანუ სადუღებელი კვანძის სითხეში მაფიქსირებელი მექანიზმის ფუძე, ექსპერიმენტული დანადგარის კორპუსის მიმართ უძრავადაა დამაგრებული და ამგვარად სადუღებელ კვანძზე აღძრული რაიმე ზემოქმედება გამოიწვევს მის გადაადგილებას ზემოდან ქვემოთ, ხოლო ამ ზემოქმედების შეწყვეტის შემდეგ ზამბარების რეაქციის ძალა გამოიწვევს სადუღებელი კვანძის დაბრუნებას თავდაპირველ მდგომარეობაში, ანუ ზედა მდგომარეობაში, რაც ასახავს სადუღებელი კვანძის და ამ კვანძის სითხეში მაფიქსირებელი მექანიზმის მიმმართველებზე არსებული ზამბარების ნორმალურ, დაუტვირთავ მდებარეობას. სადუღებელი კვანძის სითხეში მაფიქსირებელი მექანიზმის ფუძეზე დამაგრებულია ჩვეულებრივი, მილიმეტრულ შკალიანი სახაზავი (ნახაზზე ნაჩვენები არ არის), რომლის ათვლის საწყისი, ნულოვანი წერტილი ემთხვევა სადუღებელი კვანძის და ამ კვანძის სითხეში მაფიქსირებელი მექანიზმის მიმმართველებზე არსებული ზამბარების ნორმალურ, დაუტვირთავ მდებარეობას. სადუღებელ კვანძზე დამაგრებულია სპეციალური ისარი, რომელიც საწყის მომენტში სახაზავის ათვლის საწყის, ნულოვან წერტილთან მდებარეობს. სადუღებელი კვანძის ნებისმიერი გადაადგილება ვერტიკალურად ქვემოთ, დაფიქსირდება სახაზავის შკალაზე გამოყვანილი



ნახ. 17. სადულებელი კვანძის სითხეში დაფიქსირების მექანიზმი

ისარის გადაადგილების მიხედვით. სადუღებელ კვანძზე დამაგრებულია სპეციალური ისარი, რომელიც საწყის მომენტში სადუღებელი კვანძის სითხეში მაფიქსირებელი მექანიზმის ფუძეზე დამაგრებულია ჩვეულებრივი, მილიმეტრულ შკალიანი სახაზავი (ნახაზზე ნაჩვენები არ არის), რომლის ათვლის საწყისი, ნულოვანი წერტილი ემთხვევა სახაზავის ათვლის საწყის, ნულოვან წერტილთან მდებარეობს. სადუღებელი კვანძის ნებისმიერი გადაადგილება ვერტიკალურად ქვემოთ, დაფიქსირდება სახაზავის შკალაზე გამოყვანილი ისარის გადაადგილების მიხედვით.

3.1.3. ექსპერიმენტული დანადგარის პრინციპული სქემის აღწერა.

ატმოსფერულ წნევაზე, დიდ მოცულობაში წყლის დუღილისას განვითარებული რეაქტიული ძალის შესასწავლად ჩვენს მიერ დამუშავებული ექსპერიმენტული ლაბორატორიული დანადგარის პრინციპული სქემა მოყვანილია ნახ. 18-ზე.

დანადგარი ძირითადად წარმოადგენს გარედან თბოიზოლირებულ ლითონის კედლებიან ჭურჭელს 1, რომელშიც ჩასხმულია წყალსადენის ჩვეულებრივი წყალი 2. ამ წყალში ჩაშვებულია მინის ჭურჭელი 3 დისტილირებული წყლით 4. მინის ჭურჭელში ჩაშვებულია ორი ელექტროდი (სპეციალური კონსტრუქციის ალუმინისაგან დამზადებული დენმიმყვანი) 5, რომელთა დისტილირებულ წყალში ჩაშვებულ ბოლოებზე მაგრდება სადუღებელი კვანძი 6მისი, სითხეში დასაფიქსირებელი მექანიზმით 7. ელექტროდების ზედა, ჰაერში არსებულ ბოლოებზე მიერთებულია ჩვეულებრივი სადენები 8. ხსენებული ელექტროდები გაყრილია გეტინაქსის სქელ ფირფიტაში 9, რომელიც კონსტრუქციულად ამაგრებს მათ უძრავ მდგომარეობაში და რომელიც, ერთდროულად წარმოადგენს როგორც ლითონის კედლებიანი მოცულობის 1, ასევე მინის ჭურჭლის 3 სახურავს. ლითონის თბოიზოლირებული ჭურჭლის 1 ფსკერზე ჩამონტაჟებულია ფონის გამახურებელი 10, რომლის საშუალებითაც ხდება

ლითონის ჭურჭელში ჩასხმული წყლის ხანგრძლივი დუღილი და, ამდენად, ხდება მინის ჭურჭლის, მასში არსებული დისტილირებული წყლის, სადუღებელი კვანძის და მისი სითხეში დამაფიქსირებელი მექანიზმის თერმოსტაბილიზაცია ანუ ამ ყველაფრის ტემპერატურის მუდმივად 100°C-ის მახლობლობაში შენარჩუნება.

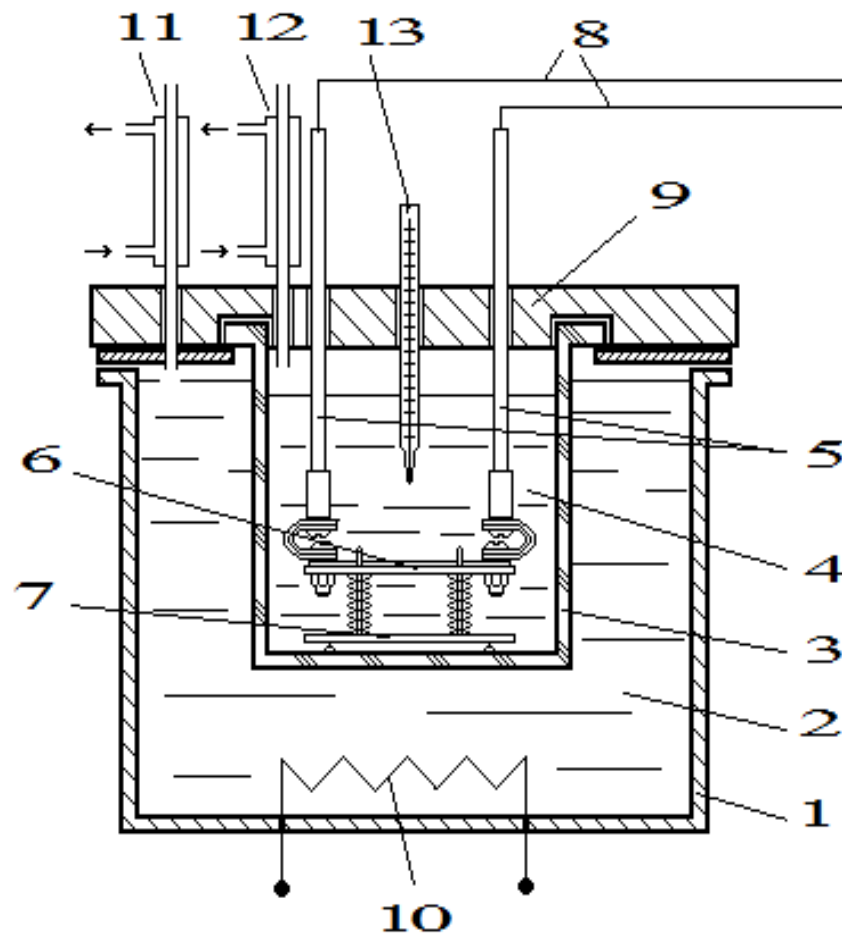
ვინაიდან ორივე ჭურჭელში მყოფი წყალი ნაჯერობის ტემპერატურამდეა გაცხელებული, მისი ზედაპირებიდან ხდება წყლის ინტენსიური აორთქლება. წყლის დონის მუდმივობის შენარჩუნება ხდება ჭურჭლების სახურავებში ჩამონტაჟებული ორთქლის კონდენსატორების 11 და 12 საშუალებით. კონდენსატორების გარე არხებში ცირკულირებს გამაცივებელი წყალი, რომელიც განაპირობებს ჭურჭლებიდან გამომავალი ორთქლის კონდენსაციას, ხოლო შიგა არხებში დაკონდენსირებული ორთქლი სითხის სახით ბრუნდება შესაბამის ჭურჭლებში სიმძიმის ძალის მეშვეობით. ამგვარად წყლის დონეები ორივე ჭურჭელში მუდმივად იყვნენ შენარჩუნებული მთელი ცდის განმავლობაში. ამასთან, დონეები ისე იყო შერჩეული, რომ გარე ჭურჭელში სითხის დონე 5-10 სმ-ით მეტი იყო ვიდრე შიგა, გამზომ ჭურჭელში, რაც უზრუნველყოფდა შიგა ჭურჭლის მისაღებ იზოთერმულობას.

ლითონის კედლებიანი და თბოიზოლირებული გარე ჭურჭელი უზრუნველყოფილია სამი, სხვადასხვა კუთხით განლაგებული ფანჯრით, რომლებიც ნახაზზე ნაჩვენებია არ არიან და რომელთა მეშვეობითაც ხდება სადუღებელ კვანძზე მიმდინარე პროცესის როგორც სასურველი განათებულობის მიღწევა, ასევე ვიდეო და ფოტოგადაღება.

მინის ცილინდრული ჭურჭლის ცენტრალურ ნაწილში ჩაშვებულია ვერცხლისწყლიანი თერმომეტრი 13, მდუღარე გამოხდილი წყლის ტემპერატურის გასაზომად უშუალოდ გამახურებელი ზედაპირის სიახლოვეში.

გამოსაკვლევი დუღილის პროცესი ხორციელდება ჭურჭელში 3, რომელშიც მოთავსებულია დუღილის ექსპერიმენტული უბანი, ხოლო ამ ჭურჭლის გარშემო მოთავსებული ჩვეულებრივი წყალი ცხელდება

ნაჯერობის ტემპერატურამდე ფონის გამახურებლით 10. როგორც ზემოთ იყო აღნიშნული, ექსპერიმენტული უბნის გარშემო ნაჯერობის ტემპერატურამდე გაცხელებული წყლის პერანგის არსებობა უზრუნველყოფს ექსპერიმენტული უბნის ტემპერატურულ სტაბილურობას (იზოთერმულობას).



ნახ. 18. ექსპერიმენტული დანადგარის პრინციპული სქემა.

3.1.4. ექსპერიმენტული დანადგარის ელექტრული სქემის აღწერა.

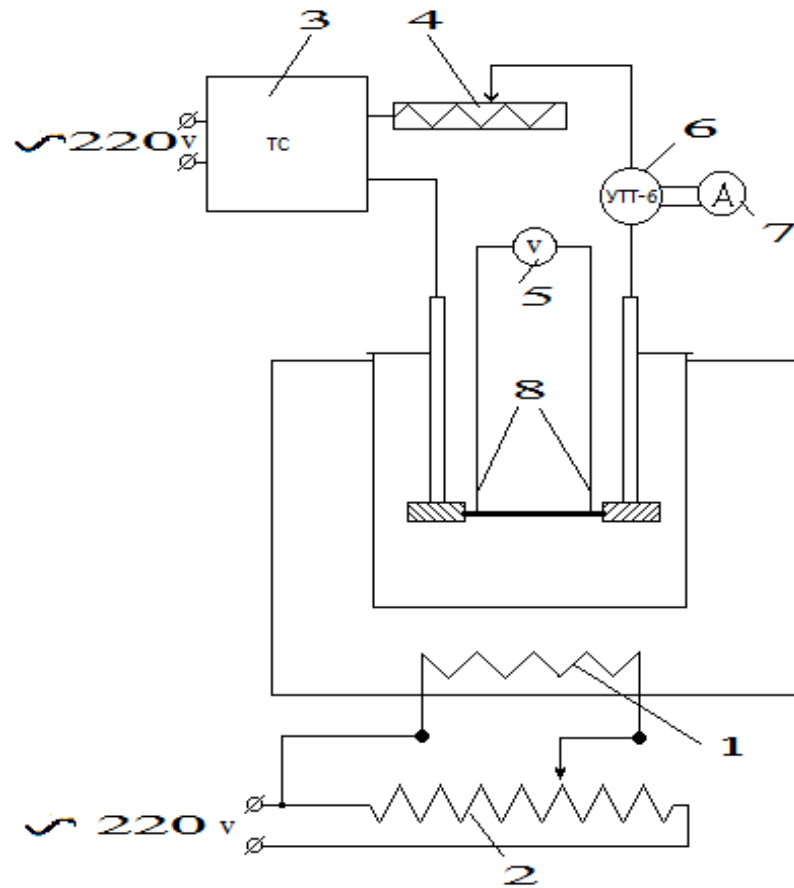
ექსპერიმენტული დანადგარის პრინციპული ელექტრული სქემა მოყვანილია ნახ. 19-ზე.

ფონის გამახურებელი 1 იკვებება ლაბორატორიული ავტოტრანსფორმატორით 2, რომლის საშუალებითაც ძაბვა რეგულირდება იმგვარად, რომ მიღწეული და შენარჩუნებული იყოს ჩვეულებრივი წყლის დუდილი გარე, ლითონის კედლებიან ჭურჭელში. ეს, როგორც ზემოთ იყო ნახსენები, უზრუნველყოფს საცდელი ექსპერიმენტული უბნის შემადგენელი ელემენტების კარგ თერმოსტაბილიზაციას.

გამოსაკვლევ ნიმუშის ელექტრული კვება ხორციელდებოდა TC ტიპის ელექტროტრანსფორმატორის 3 საშუალებით, რომელსაც გააჩნია გამომავალი ძაბვის რეგულატორი 4. ამ უკანასკნელის საშუალებით მიიღწეოდა ელექტრო გახურების სასურველი სიმძლავრე, ანუ გამოსაკვლევ ნიმუშში განვითარებული ხვედრითი თბური ნაკადის სასურველი სიდიდე. ამ სიდიდის ზუსტად დასადგენად წრედში გამავალი დენის ძალის გაზომვასთან ერთად უნდა გაიზომოსა ძაბვის ვარდნა უშუალოდ გამახურებელი ელემენტის გარკვეულ უბანზე. ამ მიზნით გამახურებელ ელემენტზე წინასწარ მოხდება პოტენციალების გამომყვანი გამტარების 5 მიერთება.

გამახურებელ ელემენტში გამავალი დენის ძალის გასაზომად გამოყენებულია VTT-6-ის ტიპის დენის ტრანსფორმატორი 6, რომლის მეორად გრაგნილში მიერთებული აქვს ამპერმეტრი 7. გამახურებელ ელემენტზე ძაბვის ვარდნის გასაზომად გამოყენებულია ვოლტმეტრი 8.

ზემოთ აღწერილი ექსპერიმენტული დანადგარის საერთო ხედი წარმოდგენილია სურ. 2-ზე.



ნახ. 19. ექსპერიმენტული დანადგარის
პრინციპული ელექტრული სქემა.



სურათი: 2. ექსპერიმენტული დანადგარის საერთო ხედი

3.2. ცდების ჩატარების მეთოდოლოგია

3.2.1. ექსპერიმენტული დანადგარის მომზადება ცდებისათვის.

ცდების ყოველი სერიის დასაწყისში უნდა ჩატარდეს ჭურჭლების წყალთან შეხებაში მყოფი ზედაპირების გარეცხვა, რის შემდეგ მინის ჭურჭელი შეივსება გამოხდილი წყლით და გარე ჭურჭელი კი ჩვეულებრივი წყალსადენის წყლით ისე, რომ წყლის პერანგის დონე 5-10 სმ-ით მეტი იყოს მინის ჭურჭელში არსებულ დონესთან შედარებით. შემდეგ ჩაირთვება ფონის გამახურებელი და მოხდება ორივე ჭურჭელში არსებული წყლის გაცხელება ატმოსფერული წნევის შესაბამის ნაჯერობის ტემპერატურამდე, რაც დაფიქსირდება მინის ჭურჭელში ჩაშვებული ვერცხლისწყლიანი თერმომეტრის საშუალებით.

3.2.2. სადუღებელი კვანძის ვერტიკალურად ქვემოთ გადაადგილების გამოზომი სახაზავის გრადუირება

ზემოთ აღწერილი, სადუღებელი კვანძის სითხეში მაფიქსირებელი მექანიზმის ფუძეზე დამაგრებული მოძრავ ისრიანი სახაზავის გრადუირება უნდა მოხდეს პერიოდულად, სასურველია ცდების ყოველი ახალი სერიის დასაწყისში, რათა თავიდან იქნას აცილებული მიმართველებზე არსებული ზამბარების შესაძლო დაღლილობის გამო გამოწვეული ცდომილებები. გრადუირება უნდა შესრულდეს ცდების ჩასატარებლად გამზადებულ დანადგარში, კერძოდ მინის ჭურჭელში და ნაჯერობის ტემპერატურამდე გაცხელებული წყლის არსებობის პირობებში. თავდაპირველად, სადუღებელი კვანძის სითხეში მაფიქსირებელი მექანიზმის ფუძეზე ვერტიკალურად დამაგრებული სახაზავის მდებარეობა ისე უნდა შეიცვალოს, რომ მისი ათვლის საწყისი ნულოვანი წერტილი დაემთხვას თვით სადუღებელ კვანძზე დამაგრებული ისრის მდებარეობას. ამის შემდეგ, პინცეტის საშუალებით, უნდა მოხდეს სადუღებელი კვანძის

ზედაპირზე სხვასდასხვა საწონების დალაგება მასის თანდათანობითი მატებით. ამასთან, ყოველ მასაზე უნდა მოხდეს მაჩვენებელი ისრის ახალი მდებარეობის დაფიქსირება სახაზავის მილიმეტრული სკალის მიხედვით. სადულეებელ კვანძზე მოთავსებული საწონების მასების და სახაზავზე დაფიქსირებული შესაბამისი გადაადგილებების მნიშვნელობები შეტანილი უნდა იქნას ცხრილში, რომლის მიხედვითაც უნდა აიგოს გრაფიკული დამოკიდებულება -

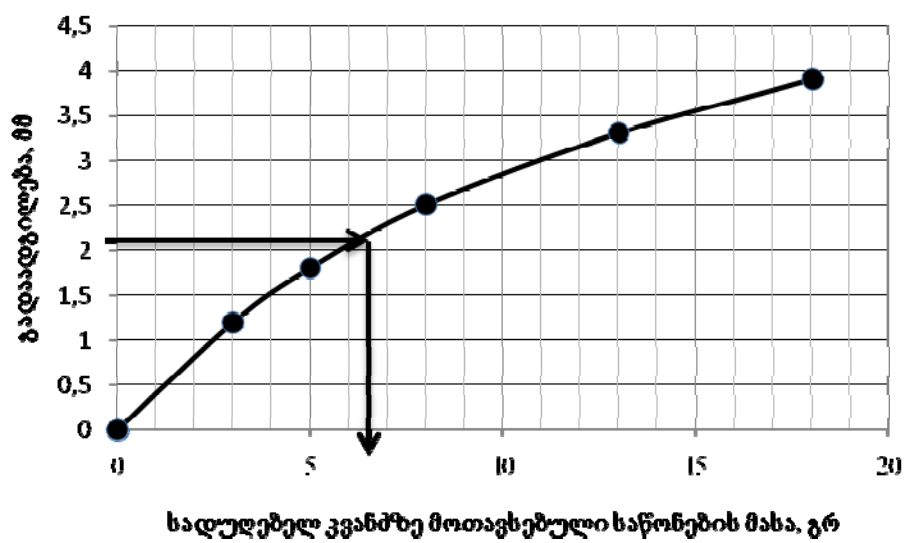
$$F = f(m) \quad (3.1)$$

სადაც F - სადულეებელი კვანძის ვერტიკალურად ქვემოთ გადაადგილებაა [მმ], ხოლო m - სადურებელ კვანძის ზედაპირზე მოთავსებული საწონების მასაა [გრ].

ზოგადად ამ დამოკიდებულების შესაბამის გრაფიკულ სურათს უნდა ექონდეს ნახ. 20-ზე ნაჩვენები სახე, ხოლო კონკრეტულად, გრაფიკის ფორმა დამოკიდებული იქნება სადურებელი კვანძის სითხეში მაფიქსირებელი მექანიზმის ფუძეზე დამაგრებულ მიმმართველებზე არსებული ზამზარების მდგომარეობასა და მახასიათებლებზე.

ასეთი დამოკიდებულების გრაფიკული ფორმით წარმოდგენა აუცილებელია, რადგან ექსპერიმენტების ჩატარებისას დუღილის რომელიმე რეჟიმში სადულეებელი კვანძის ქვემოთ გადაადგილების დაფიქსირებული რიცხვითი მნიშვნელობის მიხედვით დადგენილი იქნას ამ გადაადგილების შესაბამისი წარმოსახვითი მასა, რომელიც უნდა ყოფილიყო მოთავსებული სადულეებელი კვანძის ზედაპირზე, რათა მიგველო ამ რეჟიმში დაფიქსირებული გადაადგილების მნიშვნელობა.

ნახ. 20-ზე ისრებით ნაჩვენებია დუღილის მოცემულ რეჟიმში დაფიქსირებული გადახრის მიხედვით ხსენებული წარმოსახვითი მასის დადგენის სქემა.



ნახ. 20. სადულეზელიკვანძის გადახრის ზოგადი დამოკიდებულება საწონების მასაზე და ცდაში დაფიქსირებული გადახრის მიხედვით შესაბამისი წარმოსახვითი მასის დადგენის სქემა (ისრებით)

მაგალითად, ამ სქემის მიხედვით ჩანს, რომ თუ დუდილის რომელიმე რეჟიმში სადუღებელი კვანძის ქვემოთ ვერტიკალურად გადაადგილების სიდიდე იყო 2,25 მმ, მაშინ სადუღებელი კვანძის ზედაპირზე მითავსებული საწონების წარმოსახვითი მასა 6,6 გრამს შეადგენს. მაშასადამე, დუდილის მოცემულ რეჟიმში წარმოქმნილი და სადუღებელი კვანძის ზედაპირზე ვერტიკალურად მოქმედი რეაქტიული ძალა უზრუნველყოფს სადუღებელი კვანძის იმავე გადაადგილებას, რასაც შეასრულებდა 6,6 გრამის მასის მქონე საწონი.

ხსებული გრაფიკული დამოკიდებულების აგების შემდეგ უნდა ჩაითვალოს, რომ ექსპერიმენტული დანადგარი მზადაა ცდების შემდეგი სერიის დასაწყებად.

3.2.3. უშუალო გაზომვების ჩატარება

ექსპერიმენტები უნდა ჩატარდეს ქვემოთ აღწერილი თანამიმდევრობით.

ნაჯერობის ტემპერატურის სტაბილურად მიღწევის შემდეგ ჩაირთვება გამოსაკვლევი გამახურებელი ელემენტის ელექტრული წრედი, ისე რომ გამახურებელი ელემენტის სიმძლავრე იყოს მინიმალური იყოს (მის ზედაპირზე დუდილი რომ არ დაიწყოს).

ამის შემდეგ რეგულატორის მეშვეობით დავიწყებთ გამახურებელი გამოსაკვლევი ნიმუშის ელექტრული სიმძლავრის გაზრდას, მანამ სანამ ვიზუალურად არ დავინახავთ, რომ გამოსაკვლევ ნიმუშზე დაიწყო განვითარებული ბუშტოვანი დუდილი. შემდეგ დავიწყებთ გამახურებლის სიმძლავრის კონტროლს გამზომი ხელსაწყოების ჩვენებათა ჩაწერას და ამ სიმძლავრის საფეხურებრივ ზრდას ისე, რომ ყოველი შემდეგი სიმძლავრე წინაზე დაახლოებით $5 \div 7$ %-ით მეტი იყოს.

სიმძლავრის კონტროლი მოხდება გამახურებელი ელემენტის წრედში გამავალი დენის ძალისა და უშუალოდ გამახურებელზე გაზომილი ძაბვის ვარდნის ნამრავლის დაფიქსირებით.

სიმძლავრის ყოველ მომატებულ საფეხურზე დუდილის პროცესს შევინარჩუნებთ 15-20 წუთის განმავლობაში რომლის დროსაც დავაფიქსირებთ როგორც ყველა ხელსაწყოს ჩვენებას და აგრეთვე, სადუღებელი კვანძის ქვემოთ გადაადგილების სიდიდეს. ამის შემდეგ კვლავ ვზრდიდით გამახურებლის სიმძლავრეს და ასე შემდეგ მანამდე, სანამ ვიზუალური დაკვირვებითა და წინა ცდების გამოცდილების გათვალისწინებით არ დავრწმუნდებოდით, რომ დუდილის მოცემული რეჟიმი უკვე წინაკრიზისულ არეში იმყოფება. ამის შემდეგ ცდებს გავიმეორებთ.

აღწერილი ექსპერიმენტული დანადგარი, მასში გამოყენებული ელექტრული კვების წყაროები, გამზომი ხელსაწყოები და ცდების ჩატარების თანამიმდევრობა ერთდროულად უზრუნველყოფს როგორც დუდილის პროცესში აღძრული რეაქტიული ძალის სიდიდის დადგენის შესაძლებლობას, ასევე სადუღებელი კვანძის ელექტრული გამახურებლის გადაწვის შემთხვევაში, ამ კონკრეტული მასალის ზედაპირზე დუდილის კრიზისის შესაბამისი თბური დატვირთვის დადგენის შესაძლებლობასაც. დუდილის პროცესში აღძრული რეაქტიული ძალის კვლევის შემთხვევაში ცდები უნდა შეწყდეს დუდილის წინაკრიზისული რეჟიმის დადგომისთანავე, რათა არ მოხდეს სადურებელ კვანძზე დამაგრებული ლითონის დენგამტარი ფირფიტის გადაწვა. იმ შემთხვევაში თუ ხსენებული ფირფიტა გადაიწვა, დაფიქსირდება კონკრეტული მასალის კონკრეტულ ზედაპირზე განვითარებული კრიზისის შესაბამისი თბური სიმძლავრე, რასაც თავის მხრივ, აგრეთვე გააჩნია სამეცნიერო და პრაქტიკული ინტერესი, თუმცა საჭირო გახდება სადუღებელი კვანძის ხელახალი მომზადება, ანუ მასზე ახალი სადუღარი ფირფიტის დამაგრება. რის შემდეგაც დაიწყება ცდების ახალი სერია.

3.3. ცდების მონაცემების დამუშავება.

3.3.1. პირველადი მონაცემების შეგროვება

როგორც ზემოთ იყო აღნიშნული, ფონის გამახურებლის მეშვეობით ნაჯერობის ტემპერატურის სტაბილურად მიღწევის შემდეგ ჩაირთვება გამოსაკვლევი გამახურებელი ელემენტის ელექტრული წრედი, ისე რომ გამახურებელი ელემენტის სიმძლავრე იყოს მინიმალური იყოს და რეგულატორის მეშვეობით დავიწყებთ გამახურებელი გამოსაკვლევი ნიმუშის ელექტრული სიმძლავრის საფეხურებრივად გაზრდას, რომ ყოველი შემდეგი სიმძლავრე წინაზე დაახლოებით $5 \div 7\%$ -ით მეტი იყოს.

როგორც ზემოთ იყო აღნიშნული, სიმძლავრის ყოველ მომატებულ საფეხურზე დუდილის პროცესს შევინარჩუნებთ იმდენ ხანს, სანამ არ დავაფიქსირებთ როგორც ყველა ხელსაწყოს ჩვენებას და აგრეთვე, სადუღებელი კვანძის ქვემოთ გადაადგილების სიდიდეს. ამის შემდეგ კვლავ ვზრდიდით გამახურებლის სიმძლავრეს და ასე შემდეგ მანამდე, სანამ ვიზუალური დაკვირვებითა და წინა ცდების გამოცდილების გათვალისწინებით არ დავრწმუნდებოდით, რომ დუდილის მოცემული რეჟიმი უკვე წინაკრიზისულ არეში იმყოფება.

სიმძლავრის ყოველ მნიშვნელობაზე ვიზუალურად დავაფიქსირებთ დუდილის რეჟიმს და სადუღებელი კვანძის ვერტიკალურად ქვევით გადაადგილებას. დუდილის ყველა რეჟიმს, ანუ სადუღებელ კვანძზე განვითარებულ ყველა სიმძლავრეზე შესრულდება ყველა საჭირო ანათვლების აღება. კერძოდ, დავაფიქსირებთ სადუღებელი კვანძის წრედში ჩართული ამპერმეტრის I და ვოლტმეტრის U ჩვენებებს, შესაბამისად ამპერებში და ვოლტებში.

ადრე ჩატარებული სადემონსტრაციო ცდების შედეგების მიხედვით, ცნობილია, რომ დუდილის ყოველ რეჟიმში გადაადგილების სიდიდე განიცდის ცვლილებას გარკვეულ მაქსიმალურ და მინიმალურ მნიშვნელობებს შორის. ამიტომაც სითხეში მოთავსებულ მილიმეტრულ

შკალიან სახაზავზე ავითვლით ისრის გადაადგილების მაქსიმალურ δ_{max} და მინიმალურ δ_{min} სიდიდეებს.

დუდილის ყოველი განსხვავებული რეჟიმის პირობებში გაზომილი სიდიდეების რიცხვითი მნიშვნელობები შეტანილი უნდა იქნას ცხრილში, რომლის ფორმა წარმოდგენილია ქვემოთ, ცხრილი 1-ის სახით.

პირველადი ანათვლების ფორმა

ცხრილი 1

№	ამპერმეტრის ჩვენება	ვოლტმეტრის ჩვენება	გადაადგილება სახაზავზე	
	i, ა	U, ვ	δ , მმ	
			max	min
1				
2				
3				
4				
5				

3.3.2. გაზომვის შედეგების დამუშავება

ცხრილში 1 შეტანილ პირველად ანათვლებს დავამუშავებთ ქვემოთ მოყვანილი თანამიმდევრობით.

როგორც ზემოთ იყო აღნიშნული, სადულეებელ კვანძში გამავალი დენის სიდიდის გამო მისი უშუალო გაზომვა რაიმე ამპერმეტრით შეუძლებელია, რისთვისაც სადულეებელი კვანძის წრედში ჩართულია დენის ტრანსფორმატორი, ტრანსფორმაციის კოეფიციენტით k . ამ ტრანსფორმატორის მეორადი დენი იზომება ჩვეულებრივი ამპერმეტრით, რომლის ჩვენების გამრავლებით აღნიშნულ ტრანსფორმაციის კოეფიციენტზე მივიღებთ სადულეებელ კვანძში რეალურად გასული დენის ძალის სიდიდეს.

ამრიგად ვადგენთ სადულეებელ კვანძში გასული დენის ძალის რეალურ მნიშვნელობას, როგორც –

$$I = i \times k, [ა] \quad (3.2)$$

სადაც i - არის დენის ტრანსფორმატორის მეორადი დენის ძალის ამპერმეტრით გაზომილი მნიშვნელობა, [ა]; ხოლო k არის დენის ტრანსფორმატორის ტრანსფორმაციის კოეფიციენტი.

სადულეებელი კვანძის სიმძლავრის $Q_{ელ}$ გაანგარიშება მოხდება გამახურებელი ელემენტის წრედში რეალურად გამავალი დენის ძალისა და უშუალოდ გამახურებელზე გაზომილი ძაბვის ვარდნის ურთიერთგადამრავლებით.

ანუ

$$Q_{ელ} = I \times U, [ვტ] \quad (3.3)$$

როგორც ზემოთ ავღნიშნეთ, ცდები შეიძლება ჩატარდეს სხვადასხვა ზომის სადულეებელ ფირფიტებზე. ამიტომ ყოველი

ფირფიტის სიგრძე **b** და სიგანე **a** წინასწარ უნდა იქნას გაზომილი. ამასთან, სიგრძე **b** გაზომილი უნდა იყოს როგორც მანძილი ძაბვის გამომყვან ელექტროდებს შორის. ეს უკანასკნელები კი სითბოს გამომყოფ ფირფიტაზე დამაგრებული უნდა იყვნენ ფირფიტაზე მიმდინარე დუდილის ზონის საზღვრებზე, რათა დუდილის დროს წარმოქმნილი რეაქტიული ძალა ზუსტად შეესაბამებოდეს გამახურებელ ელემენტის გამოთვლილ ფართობს, ანუ შეძლებისდაგვარად გაანგარიშებული უნდა იყოს გამახურებელი ელემენტის ზუსტად ის ფართობი, რომელზეც მიმდინარეობს დუდილი და რომელზეც წარმოიშვება რეაქტიული ძალა.

ხსენებული სიგრძისა და სიგანის ურთიერთგადამრავლებით მიიღება სითბოს გამომყოფი ელემენტის, ანუ სადუღებელი ფირფიტის საძიებელი ფართობი. ეს ფართობი გაანგარიშებული უნდა იქნას კვადრატულ მეტრებში.

მაშასადამე,

$$\mathbf{F} = \mathbf{b} \times \mathbf{a}, \quad [\text{მ}^2] \quad (3.4)$$

დუდილის ყოველ რეჟიმში მიღწეული ხვედრითი თბური ნაკადის მნიშვნელობას ვანგარიშობდით შემდეგი ფორმულით:

$$q_{\text{ელ}} = \frac{Q_{\text{ელ}}}{F} \quad [\text{ვტ/მ}^2] \quad (3.5)$$

სადაც $q_{\text{ელ}}$ - გამახურებელ ელემენტში დროის ერთეულში გამოყოფილი სითბოს რაოდენობაა, (ჯ/წმ); ხოლო F - გამახურებელი ელემენტის სადუღებელი ფართობია, (მ²). გამახურებელ ელემენტში დროის ერთეულში გამოყოფილი სითბოს რაოდენობაა, (ჯ/წმ);

პირველადი მონაცემების დამუშავების შედეგები, ანუ (2÷5) გამოსახულებებით მიღებული მნიშვნელობები, შეტანილი უნდა იქნას ცხრილში 2, რომლის ფორმა ქვემოთაა წარმოდგენილი.

ამის შემდეგ, ცხრილი 2-ის მე-7, მე-8 და მე-9 სვეტებში მოთავსებული მონაცემების მიხედვით, გრაფიკულად უნდა აიგოს სადულელები კვანძის ქვემოთ გადაადგილების მაქსიმალური და მინიმალური სიდიდეების დამოკიდებულებები დუდილის პროცესში განვითარებულ ხვედრით თბურ ნაკადზე, როგორც ეს ნაჩვენებია ნახ. 3.6-ზე, რომელზეც, მაგალითისათვის, გამოსახულია ადრე ჩატარებული სადემონსტრაციო ცდებით მიღებული დამოკიდებულებები.

პირველადი მონაცემების დამუშავების შედეგების

შესატანი ფორმა

ცხრილი 2

	სადულელები კვანძის სიმძლავრე				სადულელები ფორფიტის ფართობი	კუთრი თბური სიმძლავრე	გადაადგილება სახაზავზე	
	i, ა	$I = i \times k, ა$	U, ვ	$Q_{ელ} = I \times U, ვტ$	F, მ ²	$q_{ელ}, ვტ/მ^2$	$\delta_{max}, მმ$	$\delta_{min}, მმ$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1								
2								
3								
4								

3.3.3. ცდომილებათა შეფასება

მიღებული ექსპერიმენტული შედეგების საიმედოობის განსაზღვრისათვის მიზანშეწონილია ჩატარდეს გაზომვებში დაშვებულ შესაძლო ცდომილებათა ანალიზი და რაოდენობრივი შეფასება.

ცდომილებათა შეფასებისათვის საჭიროა გავითვალისწინოთ ნებისმიერი ის შესაძლო შეცდომა, რომელიც შეიძლება იქნას დაშვებული ყველა აუცილებელი გაზომვების ჩატარებისას.

დასახული მიზნის განსახორციელებლად სასურველია ჩვენს მიერ ზემოთ, კერძოდ, 4.2 განყოფილებაში აუცილებელი გაანგარიშებებისათვის გამოყენებული (2 ÷ 5) გამოსახულებები ერთმანეთში ჩასმის წესით გავაერთიანოთ ერთ გამოსახულებაში.

ამგვარად შეგვიძლია მივიღოთ:

$$Q_{ელ} = \frac{k \cdot i \cdot U}{b \cdot a} \quad [ჯ/წმ] \quad (3.6)$$

(3.6) გამოსახულების მარჯვენა მხარეს მრიცხველში შემავალი ნამრავლი $k \cdot i \cdot U$ წარმოადგენს იმ ელექტრულ სიმძლავრეს, რომელსაც საცდელი ნიმუში გამოყოფს სითბოს სახით $Q_{ელ}$, მაგრამ მხედველობაში უნდა იქნას მიღებული, რომ გამოყოფილი სითბური ენერჯის ნაწილი, მიუხედავად საცდელი უბნის იზოთერმულობისა, გარემოში იკარგება. სითბოს ამ კარგვების უდიდესი ნაწილი Q_1 გაპირობებულია ძირითადად ნიმუშზე დენმიმცვანების თბოგამტარობით და ამ დენმიმცვანების ჰაერში არსებული ზედა ბოლოების ტემპერატურის განსხვავებით საცდელ უბანში განვითარებული ტემპერატურისაგან. ამის გარდა სითბოს შედარებით მცირე ნაწილი იკარგება აგრეთვე პოტენციალების გამომყვანი ელექტროდების გავლით Q_2 , მინის ჭურჭლის სახურავის ჰაერთან თბოცვლით Q_3 და კონდენსატორიდან გამოპარული დაუკონდენსირებელი ორთქლით Q_4 . ეს უკანასკნელი კონდენსატორში მიმდინარე პროცესის

კარგი ორგანიზაციის შემთხვევაში პრაქტიკულად ნულის ტოლია და შემდეგში მხედველობაში არ მივიღებთ.

სითბოს დანაკარგები Q_1 , Q_2 და Q_3 გაპირობებული არიან დენმიმცვანების, პოტენციალების გამომცვანების და მინის ჭურჭლის სახურავის მასალების თბოგამტარობით და ამიტომ ნებისმიერი მათგანის რიცხვითი მნიშვნელობა შეიძლება განვსაზღვროთ თბოგამტარობით გადაცემული სითბოს რაოდენობის გამოსათვლელი, ცნობილი განტოლებით (ფურიეს განტოლება):

$$Q_{1,2,3} = \frac{\lambda_{1,2,3} \cdot \Delta t_{1,2,3} \cdot f_{1,2,3}}{l_{1,2,3}}, \text{ [ვტ/მ}^2\text{]} \quad (3.7)$$

სადაც $\lambda_{1,2,3}$ - შესაბამისად არიან ალუმინისაგან დამზადებული დენმიმცვანი ელექტროდების, სპილენძის პოტენციალების გამომცვანი ელექტროდების და მინის ჭურჭლის გეტინაქსისაგან დამზადებული სახურავის მასალების თბოგამტარობის კოეფიციენტები, [ვტ / მ გრად];

$\Delta t_{1,2}$ - ტემპერატურათა მაქსიმალური სხვაობები საცდელი ნიმუშის ზედაპირსა და მდულარე წყალს შორის, ალუმინის დენმიმცვანებისა და სპილენძის პოტენციალების გამომცვანების შემთხვევებში, ხოლო Δt_3 - ტემპერატურათა მაქსიმალური სხვაობა მდულარე წყალსა და გარემო ჰაერს შორის, მინის ჭურჭლის გეტინაქსიდან დამზადებული სახურავის შემთხვევაში [°C];

$f_{1,2,3}$ - შესაბამისად, ალუმინის დენმიმცვანების და სპილენძის ელექტროდების ჯამური განივი კვეთის ფართობები და მინის ჭურჭლის სახურავის ზედაპირის ფართობი, [მ²];

$l_{1,2}$ - შესაბამისად, ალუმინის დენმიმცვანების და სპილენძისაგან დამზადებული პოტენციალების გამომცვანი ელექტროდების სითბოგამტარი მონაკვეთის სიგრძე მდულარი ელემენტიდან მდულარე

წყლის ტემპერატურის მქონე უზნამდე, ხოლო L_3 – მინის ქურქლის სახურავის სისქე [მ].

გამოსახულება (3.7)-ში შემავალი ოთხივე სიდიდის რეალური რიცხვითი მნიშვნელობები წინასწარ არის ცნობილი, ვინაიდან ცნობილია თბოგამტარობის პროცესში მონაწილე ყველა დეტალის გეომეტრიული ზომები და მასალაები, რომლებისთვისაც ცნობარების გამოყენებით ვადგენთ თბოგამტარობის კოეფიციენტის კოეფიციენტის მნიშვნელობას. ამრიგად, ზემოთ ჩამოთვლილი სითბური დანაკარგების მნიშვნელობები წინასწარ შეგვიძლია გავიანგარიშოთ.

ყველა შემთხვევაში საცდელი ნიმუშის თბური ბალანსის განტოლებას ექნება შემდეგი სახე:

$$Q = Q_{ელ} - Q_1 - Q_2 - Q_3 \quad (3.8)$$

შემოვიღოთ აღნიშვნა –

$$\psi_i = \frac{Q_i}{Q_{ელ}} \quad (3.9)$$

სადაც i – ზემოხსენებული დანაკარგების რიგითი ნომერია. ხოლო ფარდობა:

$$\frac{Q_i}{Q_{ელ}}$$

გვიჩვენებს თუ ელექტრული სიდიდეებით დადგენილი სიმძლავრის, $Q_{ელ}$ -ის რა ნაწილი იკარგება ამა თუ იმ, i -ური მიზეზით.

თუ მე-(3.8) გამოსახულების მარჯვენა მხარიდან ფრჩხილებს გარეთ გავიტანთ $Q_{ელ}$ -ს და გავითვალისწინებთ (3.9)-ს, მაშინ შეგვიძლია დავწეროთ:

$$Q = Q_{ელ} \cdot (1 - \psi_1 - \psi_2 - \psi_3) \quad (3.10)$$

თუ მე-(3.7) ფორმულით სამივე შემთხვევისათვის ვიანგარიშებთ ყოველ Q_i -ს და შევიტანთ Ψ_1 -ის გამოსათვლელ (3.9) ფორმულაში, მივიღებთ Ψ_1 -ის ზემოთ აღწერილი ექსპერიმენტული დანადგარისათვის დამახასიათებელ მაქსიმალურ რიცხვით მნიშვნელობებს. კერძოდ, გამოთვლებმა გვიჩვენა, რომ ჩვენი ექსპერიმენტული დანადგარისათვის ზემოხსენებული დანაკარგების წილი შემდეგია:

1. დენმიმცვანი ალუმინის ელექტროდებით გამოწვეული დანაკარგების წილი სადულეზელ ზედაპირზე განვითარებული ელექტრული სიმძლავრიდან შეადგენს $\Psi_1=0,015$ -ს;

2. პოტენციალების გამომცვანი სპილენძის ელექტროდების მიერ გამოწვეული დანაკარგების წილი ელექტრული სიმძლავრიდან შეადგენს $\Psi_2=0,001$ -ს;

3. მინის ჭურჭლის სახურავიდან გამოწვეული დანაკარგების წილი ელექტრული სიმძლავრიდან ტოლი იქნება $\Psi_3= 0,0025$ -ს.

თუ გამოსახულება (3.5)-ს გარდავექმნით (3.10)-ის და (3.2-3.5) გამოსახულებების გათვალისწინებით, შეგვიძლია დავწეროთ:

$$q = \frac{k \cdot i \cdot U \cdot (1 - \Psi_1 - \Psi_2 - \Psi_3)}{b \cdot a} \quad [\text{მტ/მ}^2] \quad (3.11)$$

ხვედრითი თბური ნაკადის გაზომვის საშუალო კვადრატული ცდომილების გამოსათვლელად (11) ფორმულიდან გამომდინარე ვღებულობთ შემდეგ გამოსახულებას:

$$\frac{\sigma(q)}{q} = \sqrt{\left[\frac{\sigma(K)}{K}\right]^2 + \left[\frac{\sigma(I)}{I}\right]^2 + \left[\frac{\sigma(U)}{U}\right]^2 + \left[\frac{\sigma(b)}{b}\right]^2 + \left[\frac{\sigma(a)}{a}\right]^2 + \sum_1^3 \left[\frac{\sigma(\Psi_i)}{1 - \sum \Psi_i}\right]} \quad (3.12)$$

თუ გავითვალისწინებთ, რომ გამოსახულება (3.12)-ის მარცხენა მხარეს ფესვქვეშ არსებული ბოლო შესაკრების მნიშვნელი დაახლოებით ერთის ტოლია და (3.7), (3.8), (3.9) და (3.10) ფორმულებით ვიანგარიშებთ კერძო ცდომილებებს (გამოყენებული ხელსაწყოების სიზუსტის კლასების გათვალისწინებით), საბოლოოდ მივიღებთ, რომ წყლის დუდილის პროცესში განვითარებული ხვედრითი თბური ნაკადის გაზომვის საშუალო კვადრატული ცდომილება ტოლი იქნება –

$$\frac{\sigma(q)}{q} = 4,1 \%, \quad (3.13)$$

ხოლო ზღვრული ცდომილება 8,2 %-ის ტოლი იქნება.

ამგვარად, შეიძლება დავასკვნათ, რომ ჩვენს მიერ გამოყენებული ექსპერიმენტული დანადგარის საშუალებით გაზომილი, წყლის დუდილის პროცესში გამოსაკვლევ ნიმუშებზე განვითარებული ხვედრითი და კრიტიკული თბური ნაკადების მნიშვნელობების მაქსიმალური ცდომილება $\pm 8,2 \%$ -ს არ აღემატება.

რაც შეეხება სადუღებელი კვანძის ქვემოთ გადაადგილების სიდიდის გაზომვისა და რეაქტიული ძალის რიცხვითი მნიშვნელობის დადგენის ცდომილებას, ის დამოკიდებული იქნება წარმოქმნილი რეაქტიული ძალის დროში ცვლილების ხასიათზე. უნდა აღინიშნოს, რომ პირველ ექსპერიმენტულ დანადგარზე ჩატარებული კვლევის შედეგები მკაფიოდ გვიჩვენებენ წარმოქმნილი რეაქტიული ძალის დროში მკვეთრ ცვალებადობას მის მაქსიმალურ და მინიმალურ მნიშვნელობებს შორის. ამიტომაც ამ ძალის გაზომვისას დაშვებული შესაძლო ცდომილებები წინასწარ გაანგარიშებას არ ექვემდებარება.

დასასრულ უნდა აღინიშნოს, რომ დამუშავებულია ცდების ჩატარების მეთოდოლოგია და შესაბამისად დაპროექტებულია და დამზადებულია სითხეების დუდილის პროცესისა და მისი თანმხლები ფიზიკური მოვლენების შესასწავლი, ახალი და ორიგინალური ექსპერიმენტული

დანადგარი, რომელიც წარმატებით შეიძლება იქნეს გამოყენებული როგორც სამეცნიერო და პრაქტიკული ინტერესებისათვის, ასევე სასწავლო მიზნებით, ტექნიკური უნივერსიტეტების თბოენერგეტიკული დარგის სტუდენტებისათვის.

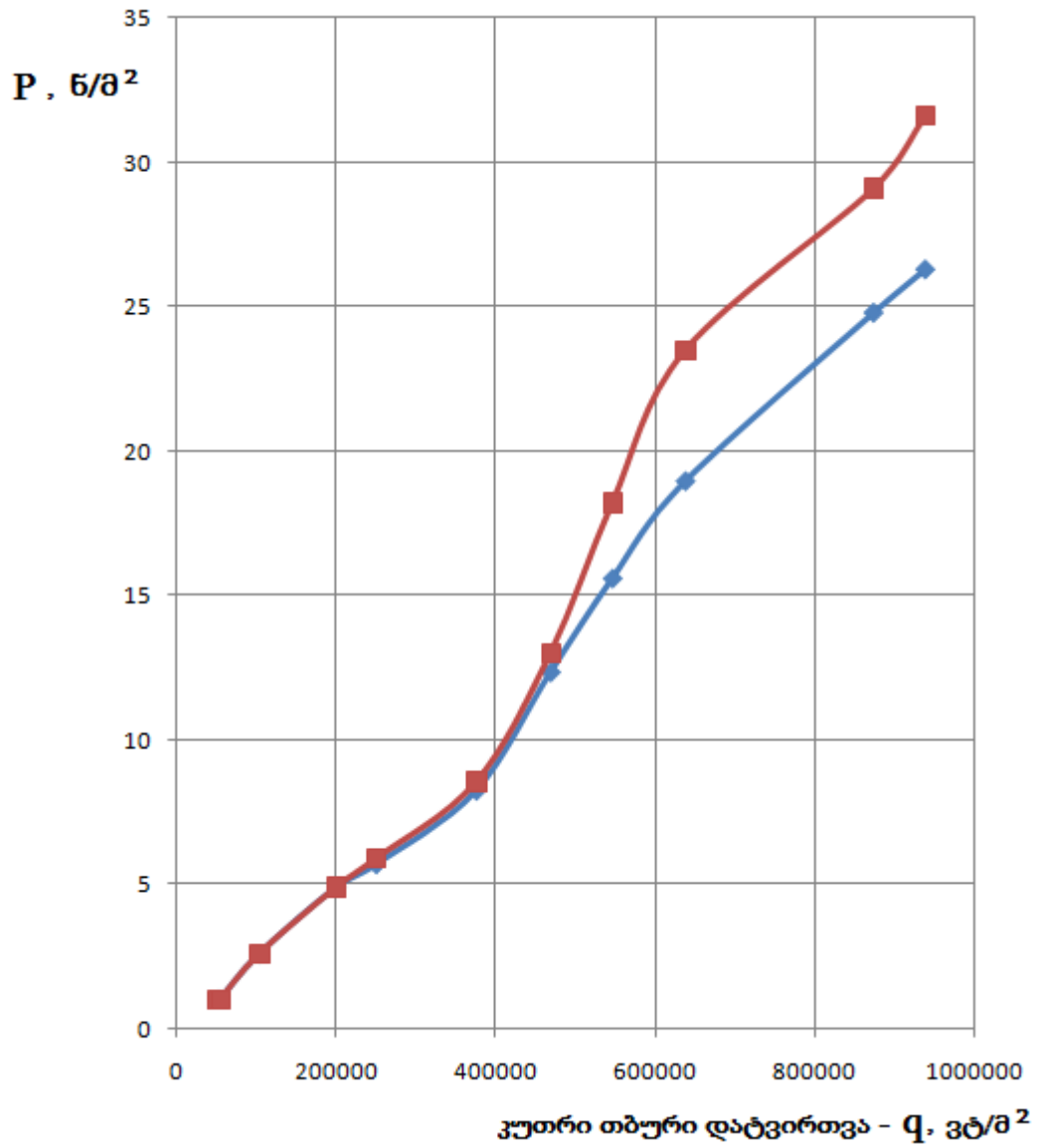
თავი IV. ექსპერიმენტული შედეგები

4.1. სადულეზელ ელემენტზე აღძრული კუთრი ძალის

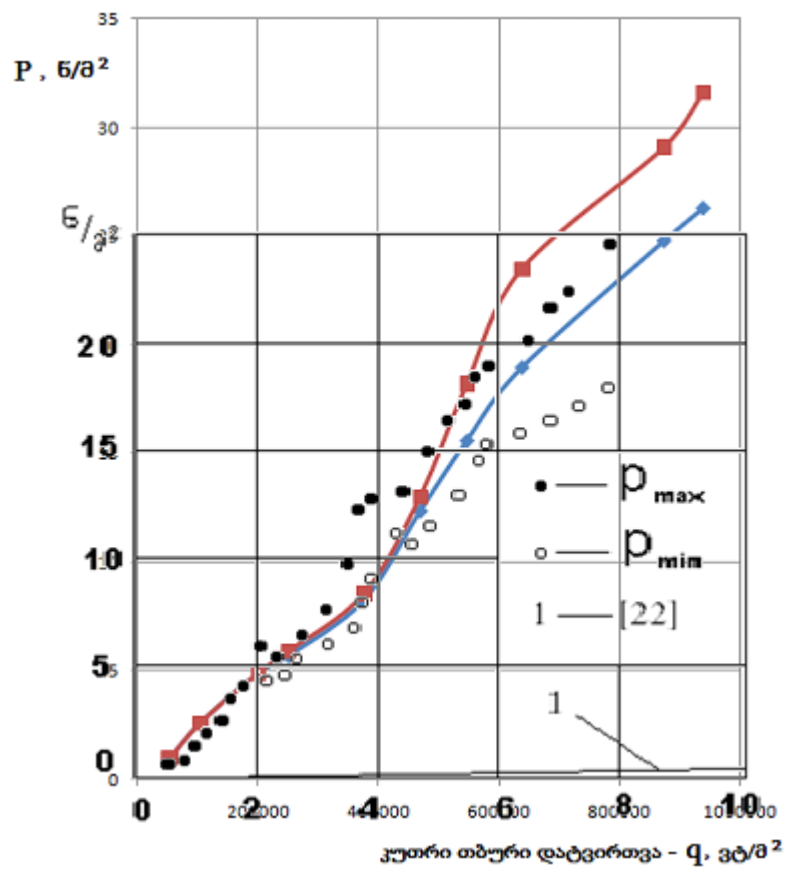
გაზომვის შედეგები

მესამე თავში აღწერილი ექსპერიმენტული დანადგარის და ცდების ჩატარების იქვე მოყვანილი მეთოდის გამოყენებით ჩატარებული იქნა ექსპერიმენტები სხვადასხვა გამახურებელ ელემენტებზე. აღსანიშნავია, რომ ისევე როგორც მოსალოდნელი იყო, მაღლარი ფირფიტის გადახრა, ანუ მასზე მოქმედი რეაქტიული ძალა, მატულობდა სიმძლავრის მომატებასთან ერთად. ამასთან, მაღალ სიმძლავრეებზე, მაღლარი ფირფიტა განიცდიდა რხევით მოძრაობას. ამიტომ, ისევე როგორც პირველ ექსპერიმენტულ დანადგარზე, საჭირო შეიქმნა მაქსიმალური და მინიმალური გადახრების და შესაბამისი ძალების დაფიქსირება. ამ ექსპერიმენტების ერთერთი ტიპური სერიის შედეგები წარმოდგენილია ნახ. 22-ზე. ამ ნახაზზე წარმოდგენილი გრაფიკების შედარება მესამე თავში წარმოდგენილ, პირველ ექსპერიმენტულ დანადგარზე მიღებულ შედეგებთან, ადასტურებს, რომ ორივე დანადგარზე მიღებულია ერთიმეორესთან საკმაო სიზუსტით მიახლოებული შედეგები. ეს შედარება, რომელიც შესრულდა დიაგრამების ურთიერთზედდების მეშვეობით და ღერძებზე გამოყენებული მასშტაბების ურთიერთ შეთანხმებით წარმოდგენილია ნახ. 23-ზე, საიდანაც ნათლად ჩანს მიღებული შედეგების მაღალი ხარისხით იდენტურობა.

აღსანიშნავია, რომ მაღალ ხვედრით თბურ ნაკადებზე გამოვლენილი მცირეოდენი განსხვავება შესაძლებელია გამოწვეულია ამ შედარებაში მონაწილე ამორთქლებელი, ანუ სადულარი ფირფიტების გეომეტრიული ზომების განსხვავებით, რადგან მიუხედავად კუთრი თბური დატვირთვის ერთნაირობისა, სხვადასხვა ფართობის მქონე ფირფიტების სითხეში ბრტყლად გადაადგილებისას სხვადასხვა წინააღმდეგობის გადალახვა უწევთ.



ნახ. 21. რეაქტიული ძალის დამოკიდებულება დუდილის პროცესში განხორციელებული კუთრი თბური დატვირთვის სიდიდეზე



ნახ. 22. სხვადასხვა ექსპერიმენტულ დანადგარებზე მიღებული შედეგების ურთიერთშედარება გეომეტრიული ზედდების წესით

4.2. ექსპერიმენტების სპეციალური სერია სწრაფი ვიდეოგადაღების თანხლებით

მდულარე სითხის მხრიდან გამახურებელი ელემენტის ზედაპირზე აღძრული რეაქტიული ძალის ამ ელემენტზე შემოქმედების პროცესის ზუსტი შესწავლის მიზნით ჩატარდა ექსპერიმენტების სპეციალური სერია, რომლის დროსაც ხდებოდა როგორც აღძრული რეაქტიული ძალის სიდიდის დაფიქსირება, ასევე სწრაფი ვიდეოგადაღება.

ამ სერიის ცდების ჩატარებისას სადულარი ფირფიტის გადახრის დასაფიქსირებლად გამოყენებული იქნა სწრაფი ვიდეოგადაღების კამერა, რომელიც უზრუნველყოფს სწრაფად მიმდინარე ფიზიკური პროცესების ჩვენს შემთხვევაში სწრაფი თერმო-ჰიდროდინამიკური პროცესების გადაღებას შავ-თეთრი გამოსახულების ციფრული ჩაწერითა და შემდგომი დამუშავებით. გადაღების სისწრაფე გარჩევადობაზე დამოკიდებულებით 10-დან თითქმის 18 ათასამდე კადრს წამში. გარჩევადობა 192x96-დან 1280x1024-მდე პიქსელის დიაპაზონში რეგულირდება. მეხსიერების ბლოკი-8 გიგა ბაიტია. აღნიშნული ვიდეოკამერის მახასიათებლები სავსებით შესაძლებელს ხდის ორთქლის ბუშტის ზრდის და მიწყვეტის პროცესების მაღალ მეცნიერულ დონეზე შესწავლას.

თავდაპირველად, ვიდეოკამერის მოხმარების ათვისების მიზნით ჩატარდა სითხეების დუღილის პროცესის პირველადი სატესტო გადაღებები. დაპროექტდა და დამზადდა რამდენიმე ექსპერიმენტული ანაკრები და შესაბამისი ექსპერიმენტული სტენდი სითხეების დუღილის პროცესში მიმდინარე ნაკლებად შესწავლილი თერმოჰიდროდინამიური მოვლენების ექსპერიმენტული კვლევის მიზნით. განხორციელდა აღნიშნული ანაკრებებისა და სტენდების ტესტირება და ჩატარდა პირველადი საცდელი ექსპერიმენტები. კერძოდ, შესრულდა ქვემოთ მიმართულ ხურების ზედაპირსა და 0.4 მმ დიამეტრის ნიქრომის მავთულზე სხვადასხვა სითხის დუღილის პროცესების ვიდეოგადაღება. მიღებული პირველადი შედეგები იძლევა ოპტიმისტურ საფუძველს, რომ

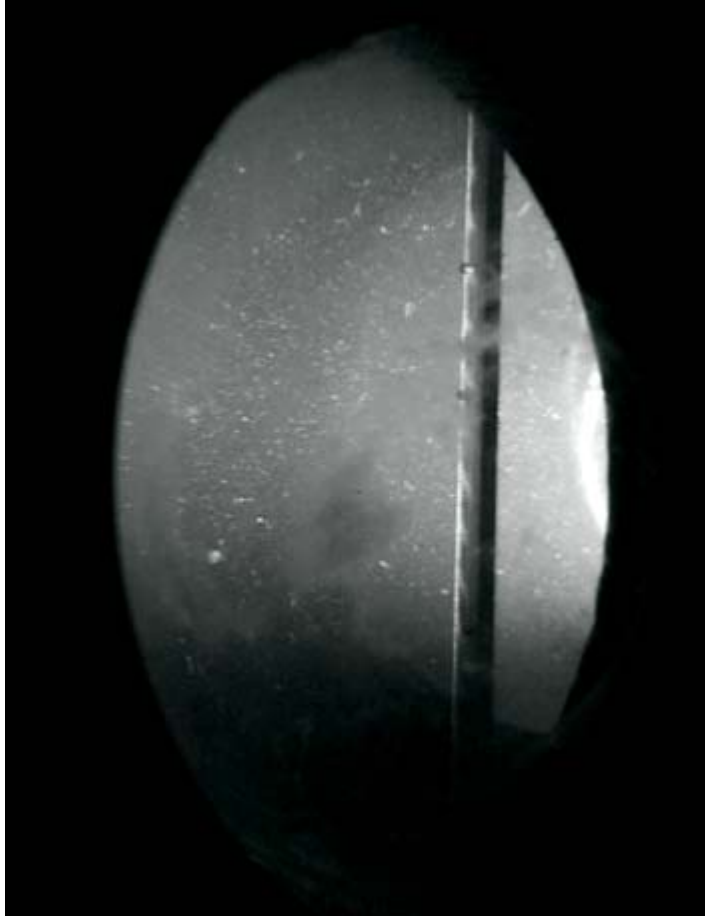
დადგინდეს სითხეების დუღილის პროცესში ხურების ზედაპირზე წარმოქმნილი მზარდი ბუმტის ტუმბოს ეფექტის თერმო-ჰიდროდინამიკური მახასიათებლები, რომლებიც საშუალებას მოგვცემს გავარკვიოთ აღნიშნული ეფექტის ნაკლებად შესწავლილი შედეგები. მაგალითად, ხურების ზედაპირების თერმული დადლის მეტად მნიშვნელოვანი სპეციფიური ტიპი, რომელიც სპეციალური ინტრესის სფეროს განეკუთვნება და რომელიც აღნიშნული იყო წინამდებარე ნაშრომის პირველ თავში..

სურათებზე 3–6 წარმოდგენილია ექსპერიმენტების ამ სერიის შესაბამისი ვიდეოფილმებიდან ამოღებული კადრები. კერძოდ სურ. 4-ზე ნაჩვენებია მომენტი, როცა ექსპერიმენტული დანადგარის მოცულობაში იმყოფება დუღილის ტემპერატურამდე გაცხელებული წყალი, ხოლო გამახურებელი ელემენტის სიმძლავრე ნულის ტოლია. ხოლო სურ. 4-ზე დუღილის დაწყების მომენტი დაფიქსირებული, როცა გამახურებლის სიმძლავრე 902,1 ვატს შეადგენდა (იხ. ცხრილი 3-ის N 1 სტრიქონი). ამ პირობებში შეიმჩნევა ფირფიტის ძალიან უმნიშვნელო გადახრა.

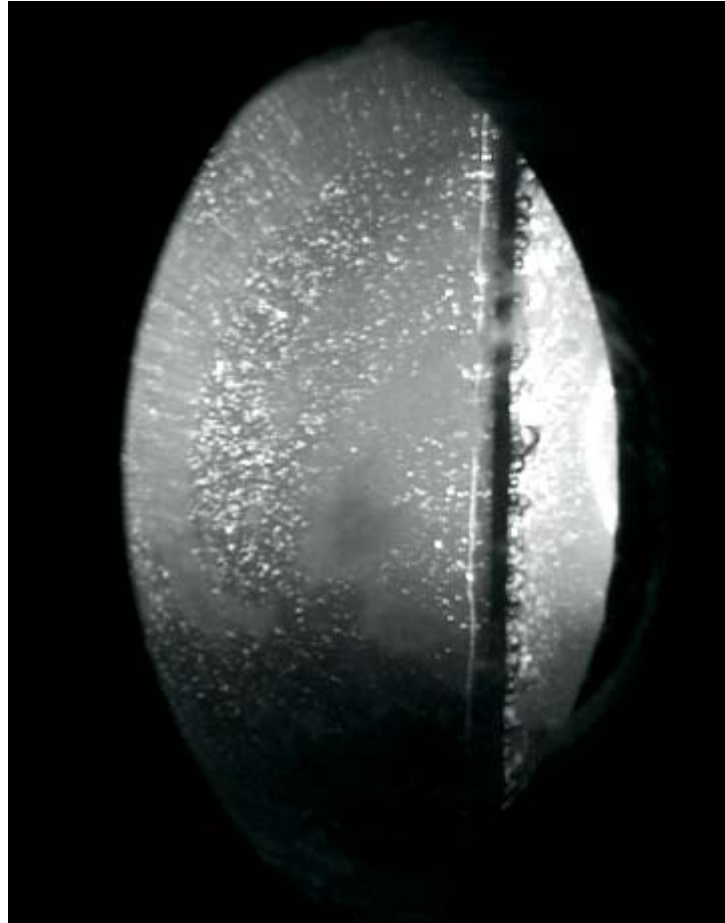
შემდეგ სურათებზე 5 წარმოდგენილია ფირფიტის გადახრილი მდგომარეობა გამახურებელი ელემენტის სხვადასხვა სიმძლავრის შემთხვევაში. ამ კადრებზე ნათლად ჩანს გამახურებელი ელემენტის გადახრის სიდიდის, ანუ აღძრული რეაქტიული ძალის დამოკიდებულება ხვედრითი თბური ნაკადის სიდიდეზე.

სურათზე რომელიც წარმოდგენილია სურ. 6-ზე წარმოდგენილია ის მომენტი, როცა ვითარდება დუღილის კრიზისი. ამ დროს მადულარი ელემენტი მაქსიმალურადაა გადახრილი ვერტიკალური მდგომარეობიდან.

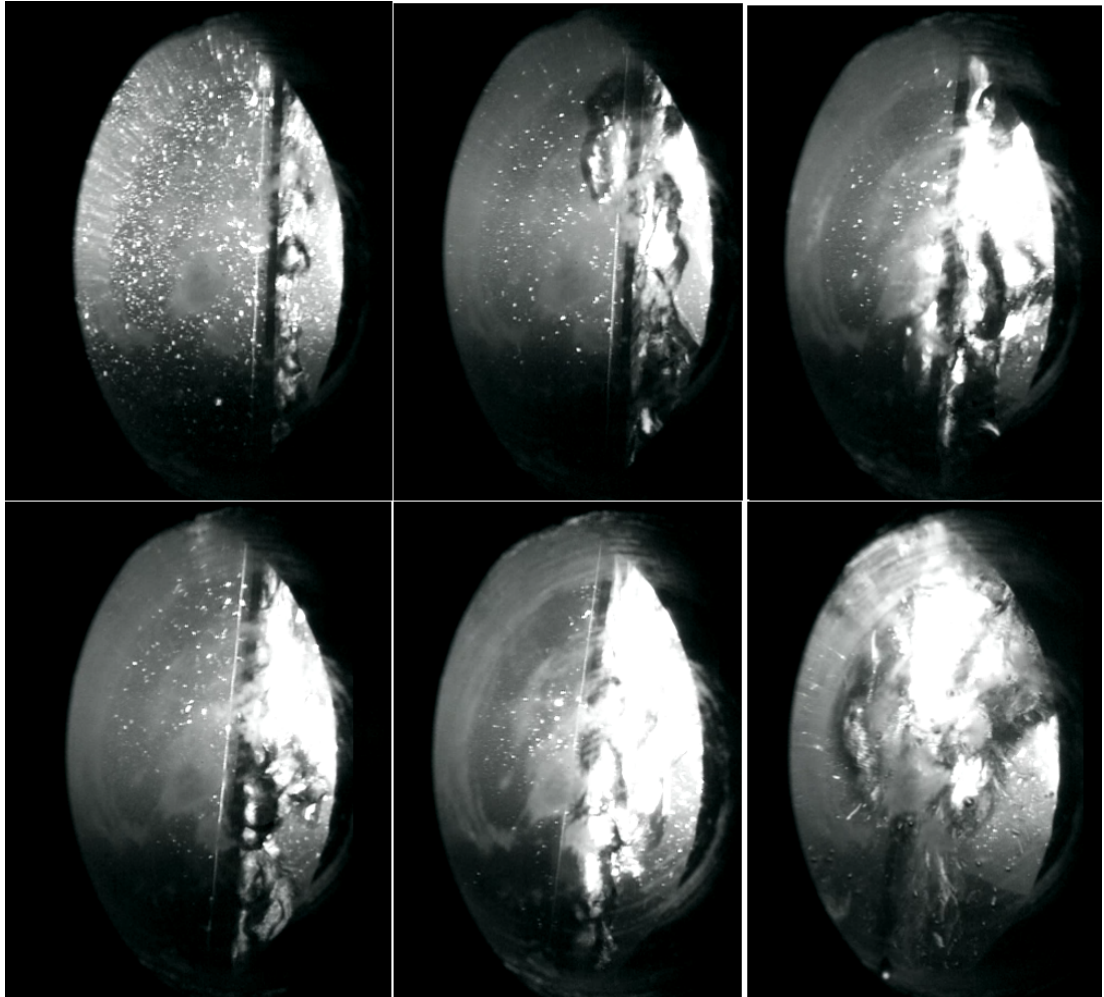
აღსანიშნავია, რომ მაღალ თბურ სიმძლავრეებზე შეიმჩნევა მადულარი ელემენტის არა მარტო გადახრა ვერტიკალური მდგომარეობიდან, არამედ



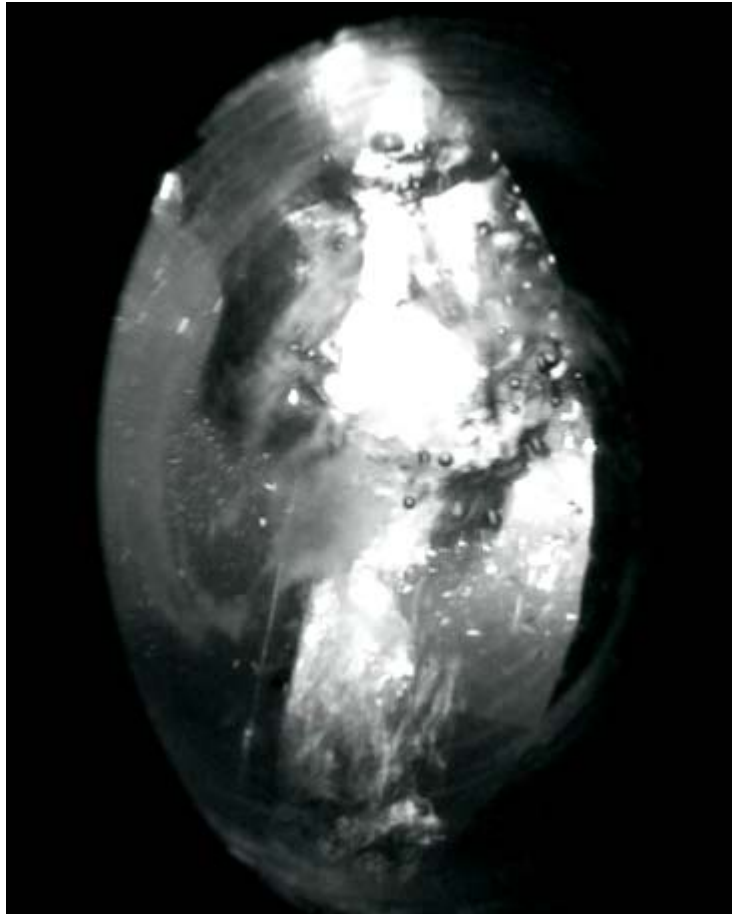
სურ. 3. პასიური გამახურებელი ფირფიტა და ადუღების
ტემპერატურამდე მიყვანილი წყალი



სურ. 4. დუღილის საწყისი რეჟიმი. შეიმჩნევა ფირფიტის
უმნიშვნელო გადახრა.



ნახ. 5. დუღილის სხვადასხვა რეჟიმები. სიმპლავრის ზრდასთან ერთად იზრდება ფირფიტის გადახრა, ანუ მოქმედი რეაქტიული ძალა



ნახ. 6. დუღილის კრიზისი. დაფიქსირებულია გამახურებელი ელემენტის გადაწვის მომენტი. უშუალოდ გადაწვის წინ მადულარი ელემენტი მაქსიმალურადაა გადახრილი ვერტიკალური მდგომარეობიდან

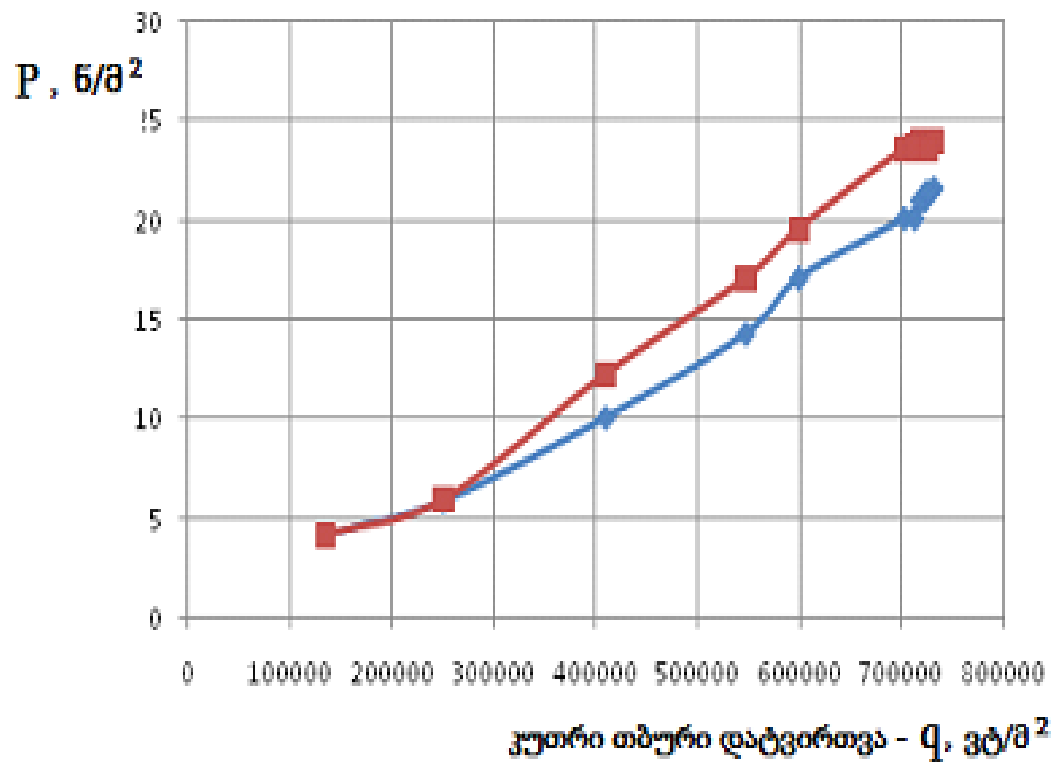
მთლიანი ტანით გადაადგილებაც მარჯვნიდან მარცხნივ (წარმოდგენილი კადრების მიხედვით). ვინაიდან მადუღარი ელემენტის ქვედა ბოლო თავისუფალია, ხოლო ზედა ბოლო დაკავშირებულია დენმიმცვან ელასტიურ ელექტროდებთან, მაღალ სიმძლავრეებზე განვითარებული რეაქტიული ძალა იწვევს არა მარტო ქვედა ბოლოს გადახრას, არამედ ძლევს ელასტიური, მაგრამ გარკვეული სიხისტის მქონე დენმიმცვანების წინააღმდეგობას და გამახურებელი ელემენტის ზედა ბოლოსაც გადაადგილებს.

ექსპერიმენტების ზემოთაღწერილი სპეციალური სერიის ჩატარებისას შესრულებული გაზომვების შედეგები წარმოდგენილია ცხრილში 3 და ნახ. 24-ზე, საიდანაც ჩანს, რომ რეაქტიული ძალის დამოკიდებულება ხვედრითი თბური ნაკადის სიდიდეზე იგივე ხასიათისაა.

ექსპრიმენტების სპეციალური სერიის ჩატარებისას შესრულებული
პირველადი ანათვლები და მათი დამუშავების შედეგები.

ცხრილი 3

№	I, დენი ა	U, ძაბვა ვტ	R, წინაღობა ომი	Q, სიმძლავრე ვატი	q, კუთრი სიმძლავრე ვტ/მ ²	შენიშვნა
1.	58.2	15.5	0.2663	902.1	136681.81	ამ სერიის ცდებში გამოყენებული გამახურებელი ელემენტის თბოგამომყოფი ზედაპირის ფართობი შეადგენდა F=0.0066 მ ² -ს
2.	79.2	21	0.2651	1663.2	252000	
3.	100.8	26.9	0.2669	2711.52	410836.36	
4.	113	32	0.2831	3616	547878.78	
5.	121.5	32.6	0.2683	3960.9	600136.36	
6.	130	35.7	0.2746	4641	703181.81	
7.	130	36.7	0.2823	4771	722878.78	
8.	131	36.2	0.2763	4742.2	718515.15	
9.	131	36.5	0.2786	4781.5	724469.69	
10.	131.1	35.9	0.2738	4706.49	713104.54	
11.	133.5	36.2	0.2712	4832.7	732227.27	
12.	133.6	35.9	0.2687	4796.24	726703.03	



ნახ. 23. რეაქტიული ძალის დამოკიდებულება ხვედრითი თბური ნაკადის სიდიდეზე სპეციალური სერიის ექსპერიმენტებში

დასკვნა

შესრულებული სამუშაო და მიღებული შედეგები გვაძლევს საფუძველს გავაკეთოთ შემდეგი დასკვნები:

1. ჩატარებულია ლიტერატურული მიმოხილვა რომლის საფუძველზე შერჩეულია დუღილის პროცესში აღძრული და გამახურებელ ზედაპირზე მექანიკურად მოქმედი რეაქტიული ძალის ექსპერიმენტული კვლევის მეთოდი, დაპროექტებულია სადემონსტრაციო და ექსპერიმენტული და ლაბორატორიული დანადგარები, და მიღებული შედეგების დამუშავების მეთოდიკა.

2. პირველად არის დადგენილი, რომ დუღილის პროცესში აღიძვრება მადულარი სითხის მხრიდან გამახურებელ ზედაპირზე მექანიკურად მოქმედი რეაქტიული ძალა, რომლის სიდიდე პროპორციულადაა დამოკიდებული დუღილის დროს განვითარებულ ხვედრით თბურ ნაკადზე.

3. პირველად არის დადგენილი, რომ დუღილის პროცესში აღძრული რეაქტიული ძალის რიცხვითი მნიშვნელობა მთელი რიგით მაღალია ვიდრე დუღილის თეორიაში ცნობილი გამოსახულებით გაანგარიშებული რეაქტიული ძალა, რომელიც აღიძვრება ორთქლის მხრიდან სითხისა და ორთქლის გამყოფ ზედაპირზე და რომელიც გაპირობებულია მოლეკულების თხევადი მდგომარეობიდან აირად მდგომარეობაში გადასვლით გამოწვეული მოძრაობის რაოდენობის ცვლილებით.

4. პირველად არის გამოთქმული მოსაზრება, რომ რეაქტიული ძალის დუღილის პროცესში რეალურად განვითარებულ და გაანგარიშებით მიღებულ მნიშვნელობებს შორის დაფიქსირებული განსხვავება გაპირობებულია უშუალოდ გამახურებელ ზედაპირზე წარმოებული ორთქლადქცევის პროცესის განსაკუთრებული თავისებურებით, კერძოდ, ეგრეთწოდებული **მზარდი ბუშტის ტუმბოს** ეფექტით, რაც განაპირობებს აღნიშნული მოვლენის შემდგომი ექსპერიმენტული კვლევის მიზანშეწონილობას.

5. სადისერტაციო თემის დამუშავების პროცესში შექმნილი დანადგარები წარმატებით შეიძლება იქნენ გამოყენებული ტექნიკური უნივერსიტეტის ენერგეტიკის ფაკულტეტის სტუდენტებისათვის თბოგადაცემის პროცესების სწავლებისას და განსაკუთრებით, დუდილის რეჟიმებისა და დუდილის კრიზისის საკითხებზე ლაბორატორიული ამოცანების შესრულებისას.

გამოყენებული ლიტერატურის სია

1. Е. С. Мачавариани. Экспериментальное исследование явления кризиса кипения и коэффициента теплоотдачи при кипении воды в большом объеме на пористых поверхностях нагрева. საქართველოს მეცნიერებათა აკადემიის მაცნე, 100, №3, 1980.
2. Е. С. Мачавариани, У. П. Хабаидзе. Исследование кризиса кипения и коэффициента теплоотдачи при кипении воды и этилового спирта на пористых поверхностях нагрева. Тезиси докладов Всесоюзной конф. по теплофизике и гидрогазодинамике процессов кипения и конденсации. Т. 1, Рига, 1982 г.
3. ე. მაჭავარიანი, უ. ხაბაიძე, მ. გოგოლაძე. დუღილის თავისებურებანი კაპილარულ ფოროვან ამორთქლებელ ელემენტებზე სითბოს შინაგანი გამოყოფის პირობებში. სტუ-ს შრომების კრებული, №2 (299), 1986 წ.
4. ი. შეყრილაძე, ჯ. რუსიშვილი, გ. გიგინეიშვილი, დ. შეყრილაძე. დუღილის თბოგადაცემის მულტიფაქტორინგის კონცეპცია. ენერჯია, სამეცნიერო ტექნიკური ჟურნალი. 2 (50), ნაწ. 2/2009. გვ. 14-18.
5. Shekrladze, I.G., Rusishvili J. G. Gigineishvili G. I. Pumping effect of growing bubble: to overcome decades of neglect and silencing. 21-ე საუკუნის მეცნიერებისა და ტექნოლოგიების განვითარების ძირითადი პარა-დიგმები. სტუ-ს შრომები. 2012 წ. გვ. 248-257.
6. Shekrladze, I.G., On the role of the "pumping effect" of a vapour bubble growing at the wall during nucleate boiling, *Problems of Convection Heat Transfer and Steam Purity*, Metsniereba Press, Tbilisi, pp. 90-97, 1970
7. Кутателадзе С. С. Основы теории теплообмена. Наука, Новосибирск. 1970, 659 стр.
8. Nukiyama, S. (1934). "Film boiling water on thin wires". *Soc. Mech. Engng., Japan* 37.

9. Piore L., W. Rosenow, S. S. Doerffer, Nucleate pool-boiling heat transfer, 1: review of parametric effects of boiling surface, *Int. J. Heat Mass Transfer*, vol. 47 (23), 2004, pp. 5033-5044.
10. Piore I. L., W. Rosenow, S. S. Doerffer, Nucleate pool-boiling heat transfer, 2: assessment of prediction methods, *Int. J. Heat Mass Transfer*, vol. 47 (23), 2004, pp.5045-5057.
11. Dhir K. V., Mechanistic Prediction of Nucleate Boiling Heat Transfer - Achievable or Hopeless Task? *J. Heat Transfer*, vol. 128 (1), 2006, pp. 1-12.
12. Кутателадзе С. С. Теплопередача при кипении и конденсации. Машгиз, М.-Л. 1952. 204 стр.
13. Zuber N. Hydrodynamic Aspects of Boiling Heat Transfer. AECV, p.p.439, 1959.
14. Несис Е. И. Кипение жидкости. Наука. Москва, 1973 г. 137 с.
15. Казакова Е. А. Изв. АН СССР, Отд. тех. наук, №1, 1949, 67-75 с.
16. Аладьев И. Т., Яшнов В. И. В сборнике «Конвективная теплопередача». Энергия, 1964 г. Стр. 249.
17. Кружилин Г. Н. Автореферат докторской диссертации. ЭНИН, М., 1948 г. с. 38.
18. Лабунцов Д. А. Теплоэнергетика, №7, (76), 1960 г. 79 – 88 стр.
19. P. Costelo, V. Frea „Chem Engng. Progr., Symp. Ser.” v 61, N57, p 258, 1965.
20. Berenson P. J. *Int. J. Heat Mass Transfer*, , Vol. 5, pp. 985-994, 1970.
21. H. Ivey, D. Morris, „Chem. Engng. Progr., Symp. Ses.” v61,N60,p157, 1965;
22. M. Carne. D. Charlesworth, „Chem. Engng. Progr., Symp. Ses.”,v 62, N64, p. 24, 1966.
23. Robin T.T. and Snyder N.W., Bubble dynamics in subcooled nucleate boiling based on the mass transfer mechanism, *Int. J. Heat Mass Transfer*, , Vol. 13, pp. 305-318, 1970

24. Nesis, Ye.I., Sologub, I.S., Temperature fluctuations in subcooled boiling at a single site, *Kipenie i kondensatsia*, RPI Press, Riga, pp. 5-13, 1984
25. Tolubinski, V.I., Kriveshko, A.A., Ostrovski, Yu.N., About temperature fluctuations of the heating surface under the active nucleation site, *Teplofizika i teplotekhnika*, Vol. 19, pp. 22-26, 1971
26. Forster, H.K., Greif, R., Heat transfer in boiling liquid, mechanism and correlations, *Tr. ASME, J. Heat Transfer*, Vol. 81, pp. 43-53, 1959
27. Judd, R.L., Hwang, K.S., A comprehensive model for nucleate pool boiling heat transfer including microlayer evaporation, *ASME J Heat Transfer*, Vol. 98, pp. 623-629, 1976
28. Paul, D.D., Chiaasiaan, S.M., Abel-Khalik, S.I., On the contribution of various mechanisms to nucleate pool boiling heat transfer, *Pool and External Flow Boiling, ASME Proceedings 1992*, pp. 125-133, 1992
29. Kutateladze, S.S., Malenkov, I.G., The hydrogasodynamic aspects of liquid boiling heat transfer, *Teplofizika Visokikh Temperatur*, Vol. 14, pp. 793-803, 1976
30. Thome, J.R., Groll, M., Mertz, R., Microscale Heat transfer: boiling and evaporation, *Heat Exchanger Design Update*, Begell House, NY, 2.13.4.1-27, 2003
31. C. Bonilla, C. Perry, A. Prans, *Int. J. Heat Mass Transfer* v 37, p. 685, 1991.
32. Присняков В. Ф. Теория физики кипения жидкостей. Днепропетровск, 1977 г. 113 стр.
33. Shekriladze, I.G., On the role of the "pumping effect" of a vapour bubble growing at the wall during nucleate boiling, *Problems of Convection Heat Transfer and Steam Purity*, Metsniereba Press, Tbilisi, pp. 90-97, 1970
34. Shekriladze, I.G., Mestvirishvili, Sh.A., Rusishvili, J.G., Zhosholiani, G.I., Ratiani, V.G., Study of heating surface temperature fluctuations in the