

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

ხელნაწერის უფლებით

ირაკლი გუგუშვილი

სითხის დუდილის პროცესში წარმოქმნილი რეაქტიული ძალის
ექსპერიმენტული კვლევა

დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად
წარდგენილი დისერტაციის

ავტორეფერატი

სადოქტორო პროგრამა: „ენერგეტიკა და ელექტროინჟინერია“

შიფრი: 0713

თბილისი

2026 წელი

სამუშაო შესრულებულია საქართველოს ტექნიკურ უნივერსიტეტში
ენერგეტიკის ფაკულტეტი
თბოენერგეტიკის, ენერგოეფექტური ტექნოლოგიების და ენერგოაუდიტის
დეპარტამენტი

ხელმძღვანელი: პროფესორი ე. მაჭავარიანი

რეცენზენტები:

დაცვა შედგება 2026 წლის "-----" "-----" "-----" საათზე
საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ენერგეტიკის ფაკულტეტის
სადისერტაციო ნაშრომის დაცვის კოლეგიის სხდომაზე, კორპუსი VIII,
სხდომათა დარბაზი.

მისამართი: 0160, თბილისი, კოსტავას 77.

დისერტაციის გაცნობა შეიძლება სტუ-ის ბიბლიოთეკაში,
ხოლო ავტორეფერატისა - ფაკულტეტის ვებგვერდზე

ფაკულტეტის სწავლული მდივანი,
პროფესორი

გ. გიგინეიშვილი

ნაშრომის ზოგადი დახასიათება

თემის აქტუალურობა. სითხის დუღილი ენერგეტიკისა და თბოტექნიკის ერთ-ერთი უმნიშვნელოვანესი პროცესია. იგი ერთდროულად მოიცავს სითხოს გადაცემას, მასის გადასვლას თხევადიდან ორთქლის ფაზაში და იმპულსის ლოკალურ გადანაწილებას. დუღილის პროცესში წარმოქმნილი ორთქლის ბუშტები არა მხოლოდ ზრდიან თბოგადაცემის ინტენსივობას, არამედ გამახურებელ ზედაპირზე ქმნიან მექანიკურ უკუქმედებას, რომლის შეფასებაც მნიშვნელოვანია ენერგეტიკული და ტექნოლოგიური დანადგარების საიმედოობისათვის.

კვლევის პრობლემატიკა. დუღილის თბოგადაცემის საკითხი ფართოდ არის შესწავლილი, თუმცა დუღილისას წარმოქმნილი მექანიკური ეფექტი, კერძოდ გამახურებელ ზედაპირზე მოქმედი რეაქტიული ძალა, შედარებით ნაკლებად არის რაოდენობრივად შეფასებული. ამ ხარვეზს პრაქტიკული მნიშვნელობა აქვს, რადგან მაღალი თბური დატვირთვის პირობებში ბუშტების ინტენსიური წარმოქმნა შეიძლება გახდეს ვიბრაციის, ადგილობრივი წნევითი პულსაციისა და ზედაპირის არასტაბილური მუშაობის წყარო.

მეცნიერული სიახლე. ნაშრომის სიახლე მდგომარეობს იმაში, რომ დუღილი განხილულია არა მხოლოდ როგორც თბური ფაზური გარდაქმნა, არამედ როგორც მექანიკური ეფექტის წარმომქმნელი პროცესი. ექსპერიმენტულად შესწავლილია დაუმაგრებელ გამახურებელ ფირფიტაზე მოქმედი უკუქმედებითი ძალა და დადგენილია მისი დამოკიდებულება მიწოდებულ ელექტრულ სიმძლავრეზე, ხვედრით თბურ დატვირთვაზე, ფირფიტის გადაადგილების დროზე და გადაადგილების სიჩქარეზე.

სამუშაოს მიზანი. სამუშაოს მიზანია სითხის დუღილის პროცესში გამახურებელ ზედაპირზე წარმოქმნილი რეაქტიული ძალის ექსპერიმენტულ-განგარიშებითი შეფასება, მისი ფიზიკური წარმოშობის ახსნა და მიღებული შედეგების თბოფიზიკური ანალიზი.

კვლევის ამოცანები. დასახული მიზნის მისაღწევად გაანალიზებულია დუღილის ისტორიული და თეორიული საფუძვლები; შესწავლილია დუღილის

რეჟიმები, ნუკლიდის მრუდი და კრიტიკული თბური ნაკადის პრობლემა; შეიქმნა ლაბორატორიული დანადგარი; ჩატარდა ექსპერიმენტები სამი გამახურებელი ფირფიტით; განისაზღვრა დენის ძალა, ძაბვა, სიმძლავრე, ხვედრითი თბური დატვირთვა, გადაადგილების დრო, სიჩქარე და რეაქტიული ძალა.

კვლევის ობიექტი და მეთოდები. კვლევის ობიექტია სითხის დუღილისას გამახურებელი ფირფიტისა და ორთქლის ბუშტების ურთიერთქმედება. გამოყენებულია ექსპერიმენტული მეთოდი, ელექტრული პარამეტრების გაზომვა, გადაადგილების დროის ფიქსაცია, მიღებული მონაცემების გაანგარიშება და შედარებითი ანალიზი. რეაქტიული ძალა უშუალოდ ძალმზომი სენსორით არ გაზომილა; იგი განსაზღვრულია ფირფიტის მოძრაობისა და ჰიდრავლიკური წინაღობის შეფასების საფუძველზე.

სამუშაოს აპრობაცია: სადისერტაციო სამუშაოს ძირითადი შედეგები მოხსენებული იქნა თბოენერგეტიკის, ენერგოეფექტური ტექნოლოგიების და ენერგოაუდიტის დეპარტამენტში პირველ, მეორე და მესამე კოლოქვიუმებზე, წინასწარ დაცვაზე და სტუ-ის სტუდენტთა 90-ე საერთაშორისო კონფერენციაზე.

ნაშრომის მოცულობა და სტრუქტურა. სადისერტაციო ნაშრომი მოიცავს 109 გვერდს, მათ შორის 8 ცხრილსა და 22 ნახაზს. იგი შეიცავს შესავალს, ოთხ თავს, დასკვნებსა და გამოყენებული ლიტერატურის ჩამონათვალს.

ნაშრომის ძირითადი შინაარსი

შესავალში დასაბუთებულია თემის აქტუალობა, განსაზღვრულია დუღილის თბოფიზიკური და ჰიდროდინამიკური ბუნება, ჩამოყალიბებულია კვლევის მიზანი და ამოცანები. ნაშრომში დუღილი შეფასებულია როგორც კომპლექსური მოვლენა, რომელშიც სითბოს, მასისა და იმპულსის გადაცემა ერთიან პროცესად წარმოჩნდება.

პირველი თავი. სითხის დუღილისა და ორთქლწარმოქმნის ისტორიულ-თეორიული საფუძვლები

ტემპერატურა თერმოდინამიკური სისტემის ერთ-ერთი ძირითადი პარამეტრია, რომელიც ასახავს როგორც მაკროსკოპულ, ისე მიკროსკოპულ პროცესებს. მისი თანამედროვე გაგება მრავალსაუკუნოვანი ისტორიული განვითარების შედეგია და მჭიდროდ უკავშირდება ადამიანის წარმოდგენების ჩამოყალიბებას სითბოსა და სიცივის ბუნების შესახებ.

ადრეულ ეტაპზე სითბოსა და სიცივის აღქმა ემყარებოდა უშუალო გამოცდილებას, ხოლო ცეცხლის დაუფლებამ მნიშვნელოვანი როლი შეასრულა ადამიანის ცივილიზაციის განვითარებაში. ანტიკურ ეპოქაში ცეცხლი სამყაროს ერთ-ერთ ძირითად ელემენტად მიიჩნეოდა, ხოლო სითბოსა და მოძრაობას შორის კავშირის იდეა საფუძვლად დაედო შემდგომ თერმოდინამიკურ შეხედულებებს.

განსაკუთრებული მნიშვნელობა ჰქონდა ჰერონ ალექსანდრიელის მიერ შექმნილ ეოლიპილს, რომელიც ორთქლის რეაქტიული ძალის გამოყენებით მოძრაობდა და თბური ენერჯის მექანიკურ მოძრაობად გარდაქმნის ერთ-ერთ ადრეულ მაგალითს წარმოადგენდა. მიუხედავად იმისა, რომ იმ პერიოდის მეცნიერული ცოდნა შეზღუდული იყო, სწორედ ანტიკურ ეპოქაში ჩამოყალიბდა მნიშვნელოვანი წარმოდგენები სითბური მოვლენებისა და სხეულებს შორის თბური ურთიერთქმედების შესახებ.

ტემპერატურის ცნების განვითარება განსაკუთრებით დაკავშირებულია გაზომვის მეთოდების სრულყოფასთან. დროთა განმავლობაში ტემპერატურა ხარისხობრივი აღქმიდან რაოდენობრივ ფიზიკურ სიდიდედ გადაიქცა, ხოლო

თერმოსკოპისა და შემდგომში ტემპერატურული შკალების შექმნამ შესაძლებელი გახადა სითბური პროცესების ზუსტი გაზომვა და მეცნიერული კვლევა.

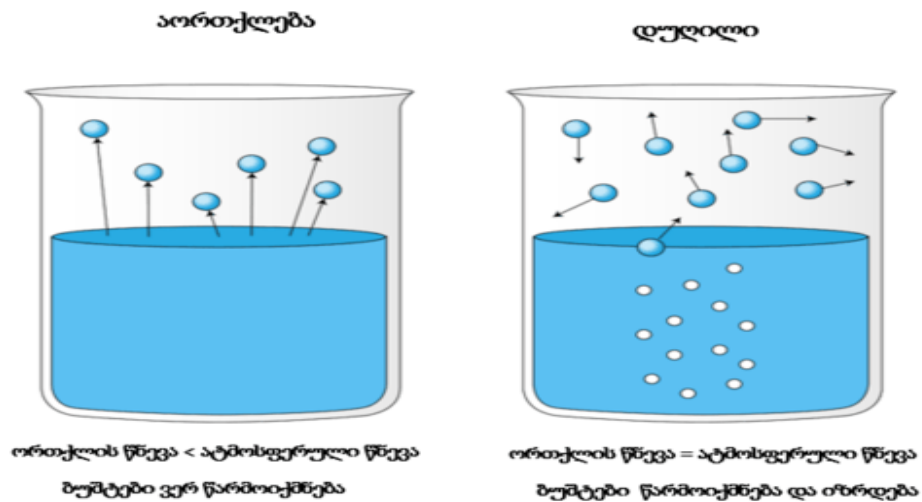
მეორე თავი. ლიტერატურის მიმოხილვა და სამუშაოს მიზანი

თბური მოვლენების ტექნიკურ გამოყენებაში მნიშვნელოვანი ადგილი უჭირავს დუღილის პროცესს, რომელიც სითბოს გადაცემის ერთ-ერთ ყველაზე რთულ და მრავალფაქტორულ მექანიზმს წარმოადგენს. დუღილისადმი ინტერესი განპირობებულია როგორც მისი თეორიული, ისე პრაქტიკული მნიშვნელობით. დადგენილია, რომ პროცესზე გავლენას ახდენს სითხისა და გამაცხელებელი ზედაპირის მრავალი ფიზიკური პარამეტრი, რაც მნიშვნელოვნად ართულებს მის სრულყოფილ შესწავლას.

მიუხედავად მრავალწლიანი ინტენსიური კვლევებისა, დუღილის პროცესის სრული თეორიული აღწერა დღემდე არ არსებობს. თანამედროვე კვლევები ძირითადად მიმართულია ბუშტების წარმოქმნისა და მოცილების მექანიზმების, აგრეთვე სითბოს გადაცემის ინტენსივობის შესწავლისკენ. აღნიშნული საკითხები განსაკუთრებულ ინტერესს იწვევს, რადგან ბუშტების დინამიკა პროცესში წარმოადგენს როგორც ენერგეტიკული, ისე მექანიკური ზემოქმედების მნიშვნელოვან წყაროს.

სითხის გათბობისას იზრდება მისი ნაწილაკების საშუალო კინეტიკური ენერგია, რის შედეგადაც მატულობს აორთქლების ინტენსივობა. გარკვეულ ტემპერატურაზე იწყება დუღილი, როდესაც აორთქლის წნევა უტოლდება გარე წნევას და სითხის მოცულობაში წარმოიქმნება სტაბილური აორთქლის ბუშტები.

1-ლ სურათზე, მარცხენა მხარეს წარმოდგენილი მდგომარეობა შეესაბამება სითხის გაცხელების იმ ეტაპს, როდესაც მისი ტემპერატურა ჯერ არ არის მიღწეული დუღილის წერტილამდე, თუმცა მიმდინარეობს აორთქლება. აღნიშნული პროცესი ხასიათდება იმით, რომ სითხის ზედაპირიდან მუდმივად ტოვებენ მოლეკულები, რომელთაც გააჩნიათ საკმარისი ენერგია გარემოში გადასასვლელად. ამ შემთხვევაში აორთქლება მიმდინარეობს მხოლოდ ზედაპირზე და არ მოიცავს სითხის მთელ მოცულობას.



სურ.1. ა) ხდება მხოლოდ სითხის ზოგიერთი მოლეკულის სითხიდან ჰაერში გადასვლა; ბ) ორთქლის ბუშტები ჩნდებიან სითხეში და ამომგდები ძალის გავლენით მიემართებიან სითხის ზედაპირისაკენ, სადაც ბუშტები სკდებიან და ორთქლი გადადის ჰაერში

მარჯვენა მხარეს კი წარმოდგენილია მდგომარეობა, როდესაც სითხის ტემპერატურამ მიაღწია კრიტიკულ მნიშვნელობას, რომლის დროსაც იწყება ორთქლის ბუშტუკების წარმოქმნა არა მხოლოდ ზედაპირზე, არამედ სითხის მთელ მოცულობაში. ეს ბუშტუკები წარმოიქმნება სითხის შიგნით არსებული მიკრონუკლეაციური ცენტრების გარშემო, შემდგომ იზრდება და ამოტივტივდება ზედაპირისკენ. მათი მოძრაობა და ზრდა განპირობებულია შიდა ორთქლის წნევის ზრდით.

დუღილი იწყება მაშინ, როდესაც ორთქლის ბუშტში არსებული წნევა გაუტოლდება გარემოს წნევას. ამ პირობებში ბუშტები სტაბილურად ვითარდებიან, აღწევენ სითხის ზედაპირს და იწვევენ ორთქლის ინტენსიურ გამოყოფას. შესაბამის ტემპერატურას დუღილის ტემპერატურა ეწოდება.

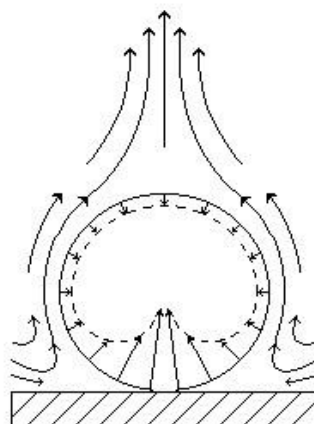
დუღილის ტემპერატურა დამოკიდებულია გარემო წნევაზე. წნევის შემცირებისას დუღილი უფრო დაბალ ტემპერატურაზე იწყება, ამიტომ სიმაღლის ზრდასთან ერთად დუღილის ტემპერატურა მცირდება. შესაბამისად, დუღილი წარმოადგენს პროცესს, რომლის მიმდინარეობაზეც ერთდროულად მოქმედებს როგორც მოლეკულური, ისე მაკროსკოპული ფაქტორები.

დადგენილია, რომ დუღილის დაწყებასა და ინტენსივობაზე მნიშვნელოვან გავლენას ახდენს ხვედრითი თბური ნაკადი, ანუ სითბოს რაოდენობა, რომელიც გამაცხელებელი ზედაპირიდან სითხეს გადაეცემა. პროცესის ხასიათი ასევე

დამოკიდებულია წნევაზე, ზედაპირის ტემპერატურაზე, სითხისა და ზედაპირის თბოფიზიკურ თვისებებზე, ზედაპირის მიკრორელიეფსა და ჰიდროდინამიკურ პირობებზე.

დუღილი ფართოდ გამოიყენება ენერგეტიკაში, ქიმიურ და ფარმაცევტულ მრეწველობაში, კვების ტექნოლოგიებში, მეტალურგიასა და სხვა ტექნიკურ სფეროებში. ფიზიკური თვალსაზრისით, იგი წარმოადგენს ორთქლადქცევის პროცესს, რომელიც მიმდინარეობს როგორც სითხის ზედაპირზე, ისე მის მოცულობაში, სადაც წარმოიქმნება, იზრდება და ზედაპირს სცილდება ორთქლის ბუშტები.

ნაშრომის შესავალ ნაწილში წარმოდგენილი ინფორმაციის საფუძველზე შეიძლება გავაკეთოთ დასკვნა, რომ სითხის დუღილის პროცესი წარმოადგენს რთულ ფიზიკურ პროცესს და ჯერჯერობით კვლავ ინტენსიური კვლევის საგანია. კერძოდ, მეცნიერ-მკვლევათა შორის სისტემატიური კამათის საგანია დუღილის პროცესში წარმოქმნილი ორთქლის ბუშტის ზრდის და მის შიგნით აორთქლების ინტენსივობის, ბუშტის გარეთ არსებული მდუღარე სითხის მოძრაობის სიჩქარისა და მიმართულების განმსაზღვრელი პროცესების წარმოქმნის პირობები და ამ პროცესების სიჩქარის განმსაზღვრელი მექანიზმების რაობა. დუღილის პროცესის სირთულის საილუსტრაციოდ მომყავს ლიტერატურაში კარგად ცნობილი სქემა, რომელზეც ნათლად ჩანს სითხის ორთქლადქცევის მექანიზმის სირთულე.



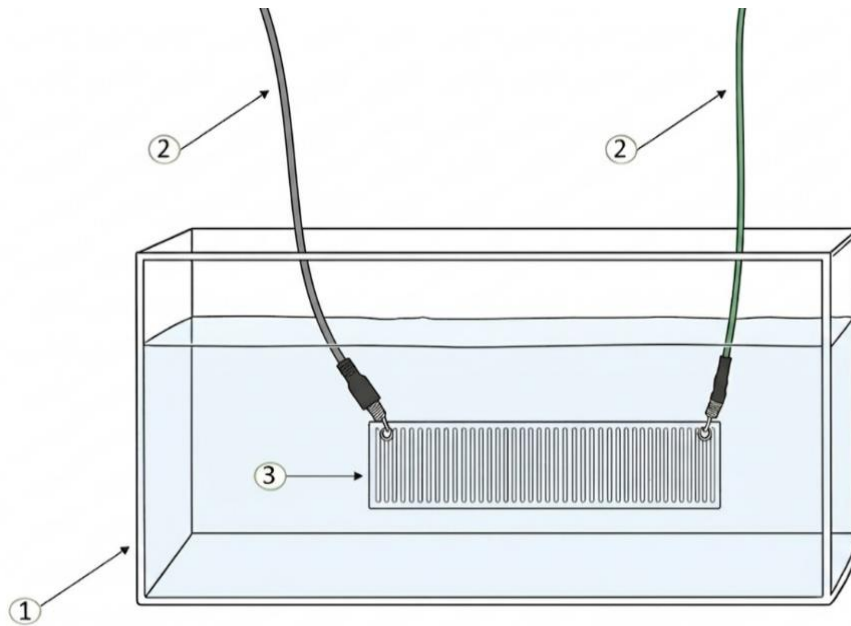
ნახ. 1. ორთქლის ბუშტის ზრდის და სითხის მოძრაობის სქემა

ზემოთ წარმოდგენილ სქემაზე ნათლად ჩანს, რომ სითხის ორთქლადქცევა მიმდინარეობს ბუშტისა და სითხის გამყოფი ზედაპირიდან, რაც იწვევს ბუშტის ზრდას და შემდგომში, გარკვეული ზომის მიღწევის შემდეგ, მის მოწყვეტასა და ზედაპირზე ამოსვლას. სწორხაზოვანი ისრებით ნაჩვენებია ორთქლის მოლეკულების მოძრაობა სითხიდან ბუშტში. ცხადია, რომ ზედაპირის სიახლოვეში სითხის ტემპერატურა ყოველთვის ოდნავ მეტია, ვიდრე ზედაპირიდან მოშორებით. შესაბამისად, ორთქლის ფაზაში მათი გადასვლის სიჩქარე სხვადასხვაა. ამიტომაც ნახაზზე, წყვეტილი, ადამიანის გულის ფორმის, მრუდი წარმოადგენს სითხიდან გამოტყოცნილი მოლეკულების მიერ სითხისა და ორთქლის გამყოფი ზედაპირიდან ორთქლის ფაზაში გადასვლის სიჩქარის ერთგვარ ეპიურას და ამ სიჩქარის ვექტორებს მიმართულებას შევუცვლით, მივიღებთ მათ მიერ გამყოფი ზედაპირისათვის მინიჭებული რეაქტიული ძალების ეპიურას. ამ უკანასკნელის მიხედვით შეგვიძლია ჩავთვალოთ რომ დუდილისი ზედაპირისაკენ მიმართული რეაქტიული ძალები გაცილებით უფრო დიდი იქნება, ვიდრე სხვები. შესაბამისად, რეაქტიული ძალის შეფასება მიზანშეწონილია განხორციელდეს არა იზოლირებულად, არამედ სითბოს, მასისა და იმპულსის ერთიანი ბალანსის საფუძველზე.

ყოველივე ზემოთქმულიდან გამომდინარე, ჩემი სადისერტაციო სამუშაოს მიზანია ექსპერიმენტულად შევისწავლო თუ რა სიდიდის რეაქტიული ძალა მოქმედებს სითხის დუდილისას მადულარ ზედაპირზე.

მესამე თავი. ექსპერიმენტული დანადგარი, მეთოდისა და შედეგები

გამახურებელ ფირფიტაზე ძაბვის მიწოდებით და მისი თანდათანობითი მომატებით ვანხორციელებთ დუდილის სხვადასხვა რეჟიმს ელექტოგამახურებელის გადაწვამდე. რაც იწვევს გამახურებელი ფირფიტის სხვადასხვა სიჩქარით გადაადგილებას მადულარი ზედაპირის საწინააღმდეგო მიმართულებით. ამ გადაადგილების პროცესს ვიღებთ ვიდეოკამერით და ვაფიქსირებთ გადაადგილების მანძილსა და ხანგრძლივობას. ეს უკანასკნელი საშუალებას გვაძლევს გამოვიანგარიშოთ გადაადგილების სიჩქარე.



ნახ.2. ექსპერიმენტული დანადგარის საკვლევი უბანი:
1. საცდელი მოცულობა (წყლის ჭურჭელი); 2. დენმიმცვანები;
3. გამახურებელი ფირფიტა

ცდების ჩატარების მიზნით, პირველ ეტაპზე ავზი წყლით შევავსეთ და ჩავრთეთ ფონის გამახურებელი (კიპიტელნიკი), რათა წყლის ტემპერატურა 100°C -მდე მიგვეყვანა. აღნიშნული პროცესი აუცილებელი იყო, რადგან ექსპერიმენტში გამოყენებული გამახურებელი ფირფიტის დანიშნულებას მხოლოდ წყლის ადუღება წარმოადგენდა. შესაბამისად, წინასწარ 100°C -მდე გაცხელებულ წყალში ფირფიტა გაცილებით მარტივად უზრუნველყოფდა დუდილის პროცესის დაწყებას.

მას შემდეგ, რაც ფონის გამახურებელმა წყალი 100°C -მდე გააცხელა, ავზში ჩავუშვიტ ცდებისთვის სპეციალურად დამზადებული გამახურებელი ფირფიტა, რომელსაც ორივე მხრიდან ჰქონდა მიერთებული დენმიმცვანები. ეს დენმიმცვანები დაახლოებით 2 მეტრი სიგრძის იყო და ავზის თავზე იყვნენ დამაგრებული. დენმიმცვანების სიგრძე იმიტომ ავიღეთ დიდი რომ ფირფიტა, რეაქტიული ძალის გავლენით გამოწვეული გადაადგილებისას არ გადახრილიყო ვერტიკალური მდგომარეობიდან და მასზე გაჩენილ ორთქლის ბუშტბს არ განეხორციელებინათ ფირფიტაზე ამომგდები ძალით ზემოქმედება. ფირფიტისატვის ელექტრული დენის მიწოდებით მის ზედაპირზე იწყება

დუდილის პროცესი და ფირფიტის გადაადგილება ხდება მხოლოდ ბუმტების მიერ განვითარებული რეაქტიული ძალის ზეგავლენით.

ფირფიტის გადაადგილება ფიქსირდებოდა ვიდეოკამერის საშუალებით. ასევე იზომებოდა დრო, რომლის განმავლობაშიც ფირფიტა საწყისი წერტილიდან (A) საბოლოო წერტილამდე (B) გადაადგილდებოდა. A და B წერტილებს შორის მანძილი დაფიქსირებული გვექონდა და ყველა ცდაში უმრავლეს შემთხვევაში ის 99,5 სანტიმეტრს შეადგენდა.

თითოეული ცდის დროს აღირიცხებოდა მიწოდებული დენისა და ძაბვის მნიშვნელობებიც, რომელთა რეგულირება ხდებოდა რეგულირებადი დენის წყაროს გამოყენებით.

ცდების მიმდინარეობისას ეტაპობრივად იზრდებოდა თბური დატვირთვა. როდესაც ხვედრითი თბური დატვირთვის მნიშვნელობა ხდებოდა ერთი მილიონი ვატი და მეტი ყალიბდებოდა აფსკური დუდილის რეჟიმი და საცდელი ნიმუში გადაიწვებოდა ხოლმე. აღნიშნული შედეგი სრულიად ლოგიკურია, რადგან ცნობილია, რომ წყლის დუდილის პროცესში კრიტიკული თბური დატვირთვის მნიშვნელობა დაახლოებით $1\ 000\ 000$ ვტ/მ²-ის ფარგლებშია.

ცდები ჩატარდა სპეციალურად დამზადებულ სამ ნიმუშზე, რომლებიც ქვემოთ სურათზეა გამოსახული. ა და ბ.



ა



ბ

სურ.2. საექსპერიმენტო გამახურებელი ფირფიტები.
ა - საცდელი სამი ფირფიტა; ბ - დენმიმყვანების განლაგება

სურათზე (ბ) კარგად ჩანს რომ დენმიმყვანების შესაერთებელი ადგილები გაფართოებულია და განლაგებულია ფირფიტის ერთ მხარეს წყლიან ავზში ვერტიკალურად განლაგებისათვის, როგორც ეს ნახაზ 2-ზეა ნაჩვენები.

ქვემოთ წარმოდგენილია სამივე სერიის ცდების პირველადი გაზომვების შედეგები. როგორც ადრე აღვნიშნე ვზომავდი მხოლოდ საცდელ ფირფიტაზე მიწოდებულ ძაბვას, ფირფიტაში გატარებულ დენს და ფირფიტის გადაადგილების დროს.

ცხრილი 1. საცდელ გამახურებელ ფირფიტებში გამავალი დენის ძალისა და მიწოდებული ძაბვის მნიშვნელობები

ცდის N	ფირფიტა 1.			ფირფიტა 2.			ფირფიტა 3.		
	დენი, ა.	ძაბვა, ვ.	დრო, წმ.	დენი, ა.	ძაბვა, ვ.	დრო, წმ.	დენი, ა.	ძაბვა, ვ.	დრო, წმ
1	48,1	39,5	6,5	47,9	39,29	6,6	47,8	38,4	6,8
2	51,3	42,2	6,3	51,2	42,03	6,3	50,9	41,78	6,65
3	56,2	46,4	5,97	54,8	44,97	5,97	55,4	45,49	6,21
4	63,9	52,9	5,83	58,6	48,12	5,83	59,8	49,11	6,1
5	66,4	54,8	5,47	62,9	51,69	5,62	63,7	52,34	5,92
6	68,2	56,3	5,36	66,3	54,52	5,49	67,5	55,49	5,61
7	75,8	62,8	5,3	70,7	58,17	5,27	71,2	58,59	5,52
8	77,01	63,7	3,29	73,9	60,86	3,67	74,6	61,41	3,4
9	82,3	68,3	3,15	77,4	63,83	3,32	78,3	64,55	3,21
10	84,6	70,1	2,9	81,8	67,55	3,1	82,1	67,77	3,09
11	88,5	73,6	2,67	85,2	70,43	2,81	85,6	70,72	2,61
12	89,5	74,3	2,52	88,7	73,41	2,65	89,4	73,92	2,49
13	91,1	75,6	2,43				93,0	77,17	2,24
14	92,2	76,1	2,31						

ამ ცხრილიდან ჩანს რომ მეორე ფირფიტა-2 გადაიწვა ყველაზე მალე, ანუ თბური დატვირთვის შედარებით დაბალი მნიშვნელობისას მაგრამ შემდეგში, ჩვენს მიერ ჩატარებული გაანგარიშების შედეგმა აჩვენა რომ ხვედრითი თბური დატვირთვა ამ ფირფიტისათვისაც მილიონ ვატზე მეტი იყო გადაწვის მომენტში.

ცნობილია, რომ წყლისთვის, ატმოსფერულ წნევაზე დურილისას კრიტიკული თბური დატვირთვა დაახლოებით შეადგენს 1,2 მგვტ-ს ერთ კვადრატულ მეტრ ფართობზე .

ზემოთმოყვანილ ცხრილში წარმოდგენილი გაზომვების შედეგების მიხედვით ვანგარიშობდით გამახურებელი ფირფიტის სიმძლავრეს და მასზე მოსულ ხვედრით თბურ დატვირთვას. ხვედრით თბურ დატვირთვას ვანგარიშობდით გამახურებლის სიმზლავრის გაყოფით გამახურებლის თბოგამომყოფ ფართობზე, რომელიც სამივე ნიმუშისათვის 0,00635 მ²-ს შეადგენდა.

ამ გაანგარიშებათა შედეგები წარმოდგენილია ცხრილებში 2, 3 და 4.

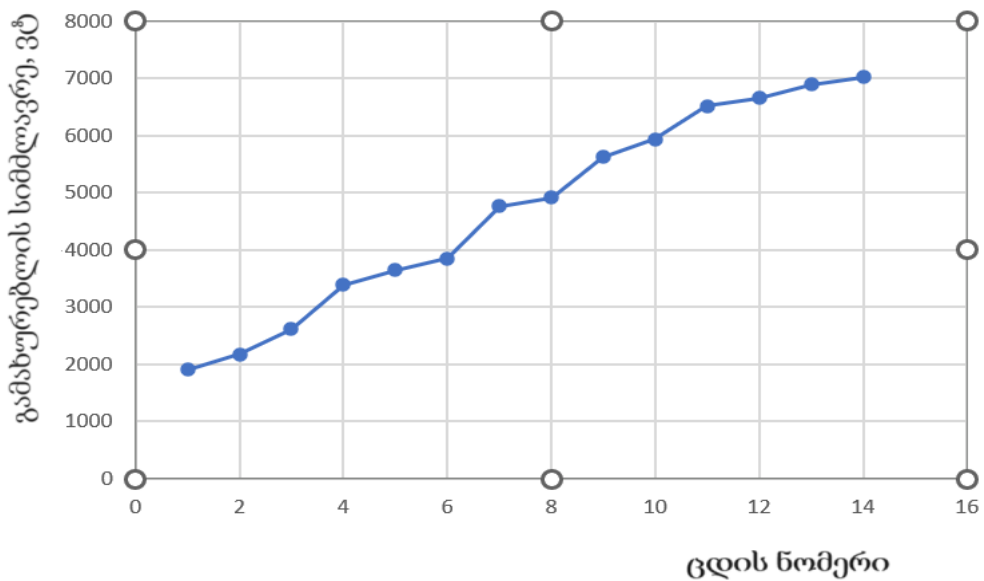
ცხრილი 2. პირველი საცდელი გამახურებელი ფირფიტის მიერ განვითარებული სიმძლავრე და ხვედრითი თბური დატვირთვა

ცდის N	დენი, ა.	ძაბვა, ვ.	სიმძლავრ ე. ვტ	ხვედრითი თბური დატვირთვა, ვტ/მ ²
1	48,1	39,5	1899.95	299204.1
2	51,3	42,2	2164.86	340922.2
3	56,2	46,4	2607.68	410657.4
4	63,9	52,9	3380.31	532331.2
5	66,4	54,8	3638.72	573025.6
6	68,2	56,3	3839.66	604669.7
7	75,8	62,8	4760.24	749642.6
8	77,01	63,7	4905.537	772524
9	82,3	68,3	5621.09	885209.3
10	84,6	70,1	5930.46	933928.8
11	88,5	73,6	6513.6	1025762
12	89,5	74,3	6649.85	1047218
13	91,1	75,6	6887.16	1084590
14	92,2	76,1	7016.42	1104946

ცხრილიდან ჩანს რომ მეთოთხმეტე ცდაზე პირველი საცდელი გამახურებელი ფირფიტაზე განვითარდა ერთი მილიონ ასი ათასზე ოდნავ მეტი კუთრი თბური დატვირთვა განვითარდა და დუღილის კრიზისის წარმოქმნის გამო ფირფიტაზე არსებული ელექტროგამახურებელი გადაიწვა, რაც სავსებით მისაღებია.

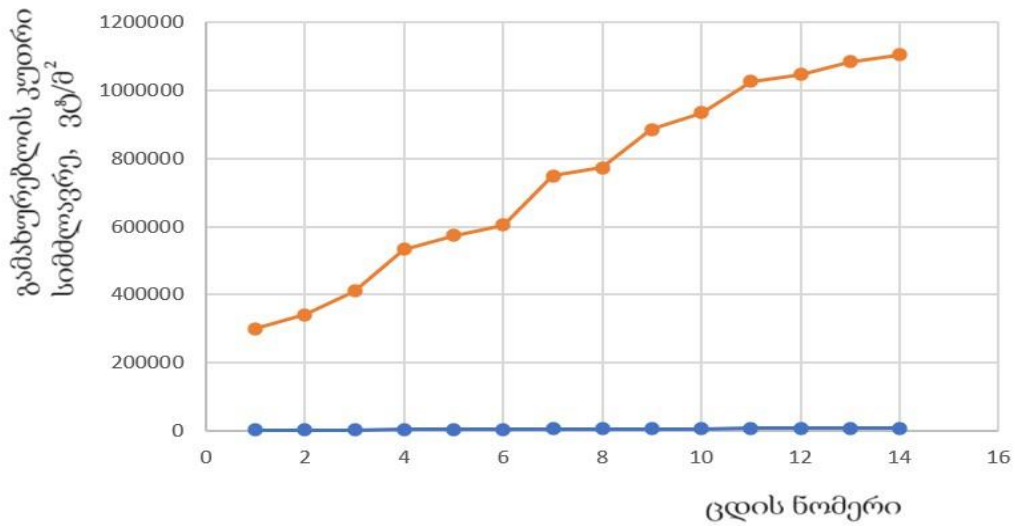
ქვემოთ ნახ. 3-ზე წარმოდგენილი მაქვს პირველი საცდელი ელექტროგამახურებელი ფირფიტის სიმძლავრის გრაფიკი დუღილის დაწყებიდან გადაწვამდე.

ნახაზ 3-ზე წამოვადგენ კვლავ პირველ ფირფიტაზე განვითარებული კუთრი თბური სიმძლავრის მნიშვნელობების გრაფიკს სადაც ჩანს, რომ პირველი ფირფიტა გადაიწვა მეთოთხმეტე ცდაზე, როდესაც კუთრი თბური სიმძლავრის მნიშვნელობამ ერთ კვადრატულ მეტრ ფართობზე ერთი მილიონ ასი ათას ვატს გადააჭარბა.



ნახაზი 3. პირველი საცდელი ელექტროგამახურებელი ფირფიტის სიმძლავრის მნიშვნელობები ვატებში

ცხრილი 2-ისა და ნახაზების 2 და 3 ანალოგიურად ქვემოთ წარმოვადგენ მეორე და მესამე საცდელ ელექტროგამახურებელ ფირფიტების გამოყენებით ჩატარებული ცდების შედეგებს ცხრილების 3 და 4 და ნახაზების 4 და 5 სახით.

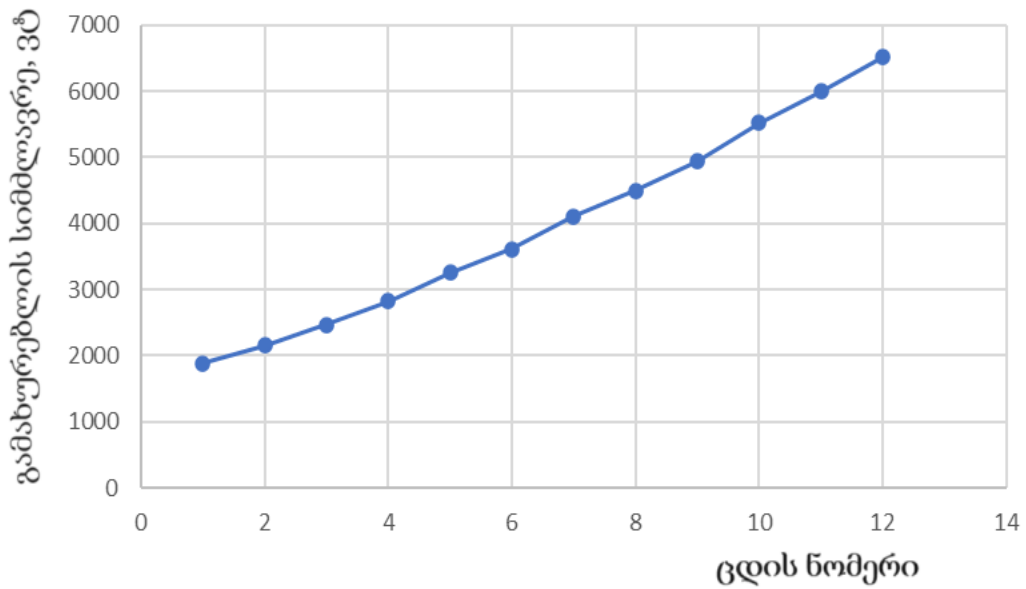


ნახაზი 4. პირველი საცდელი ელექტროგამახურებელი ფირფიტის მიერ განვითარებული კუთრი სიმძლავრე [ვტ/მ²]

ცხრილი 3. მეორე საცდელი გამახურებელი ფირფიტის მიერ განვითარებული სიმძლავრე და ხვედრითი თბური დატვირთვა

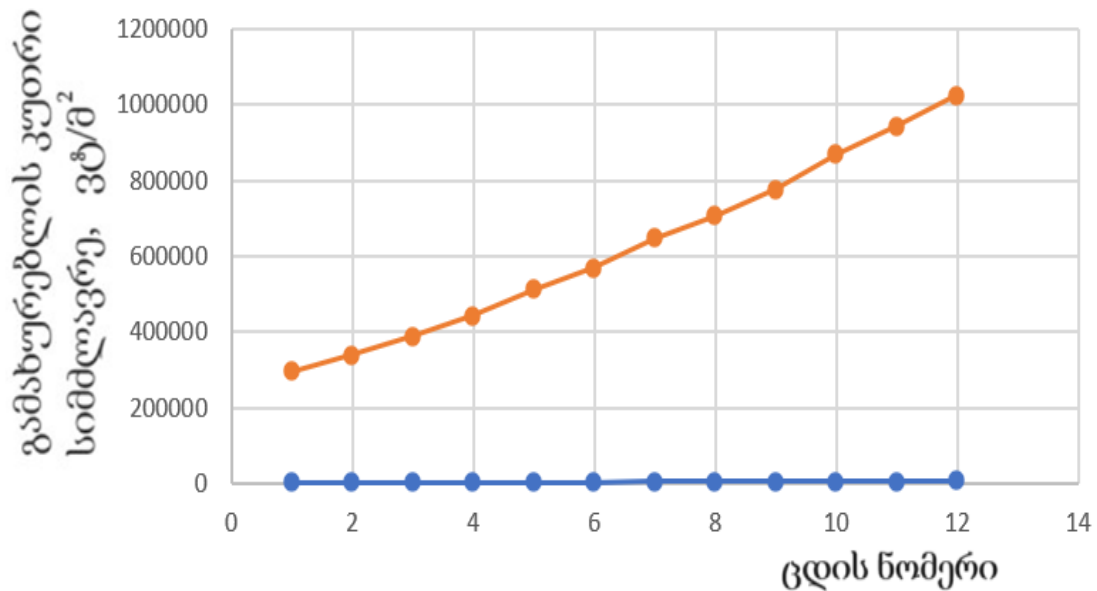
ცდის N	დენი, ა.	ძაბვა, ვ.	სიმძლავრე, ვტ	ხვედრითი თბური დატვირთვა, ვტ/მ²
1	47,9	39,29	1881.991	296375.9
2	51,2	42,03	2151.936	338886.9
3	54,8	44,97	2464.356	388086.8
4	58,6	48,12	2819.832	444067.1
5	62,9	51,69	3251.301	512014.9
6	66,3	54,52	3614.676	569239.2
7	70,7	58,17	4112.619	647655.2
8	73,9	60,86	4497.554	708274.8
9	77,4	63,83	4940.442	778020.8
10	81,8	67,55	5525.59	870169.9
11	85,2	70,43	6000.636	944980.2
12	88,7	73,41	6511.467	1025426

მეორე საცდელი ელექტროგამახურებელი ფირფიტის სიმძლავრის გრაფიკი დუღილის დაწყებიდან გადაწვამდე წარმოდგენილია ნახ. 5-ზე.



ნახაზი 5. მეორე საცდელი ელექტოგამახურებელი ფირფიტის სიმძლავრის მნიშვნელობები ვატებში

ნახაზ 6-ზე წამოვადგენ მეორე ფირფიტაზე განვითარებული კუთრი თბური სიმძლავრის მნიშვნელობების გრაფიკს სადაც ჩანს, რომ მეორე ფირფიტა გადაიწვა მეთორმეტე ცდაზე, როდესაც კუთრი თბური სიმძლავრის მნიშვნელობამ ერთ კვადრატულ მეტრ ფართობზე ერთი მილიონ ვატს გადააჭარბა.



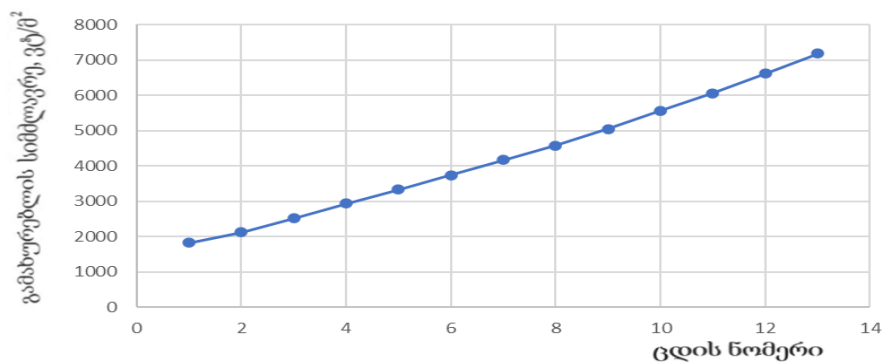
ნახაზი 6. მეორე საცდელი ელექტოგამახურებელი ფირფიტის მიერ განვითარებული კუთრი სიმძლავრე [ვტ/მ²]

და ბოლოს, ანალოგიურად, ქვემოთ წარმოვადგენ მესამე საცდელი ელექტროგამახურებელი ფირფიტის გამოყენებით ჩატარებული ცდების შედეგებს.

ცხრილი 4. მესამე საცდელი გამახურებელი ფირფიტის მიერ განვითარებული სიმძლავრე და ხვედრითი თბური დატვირთვა

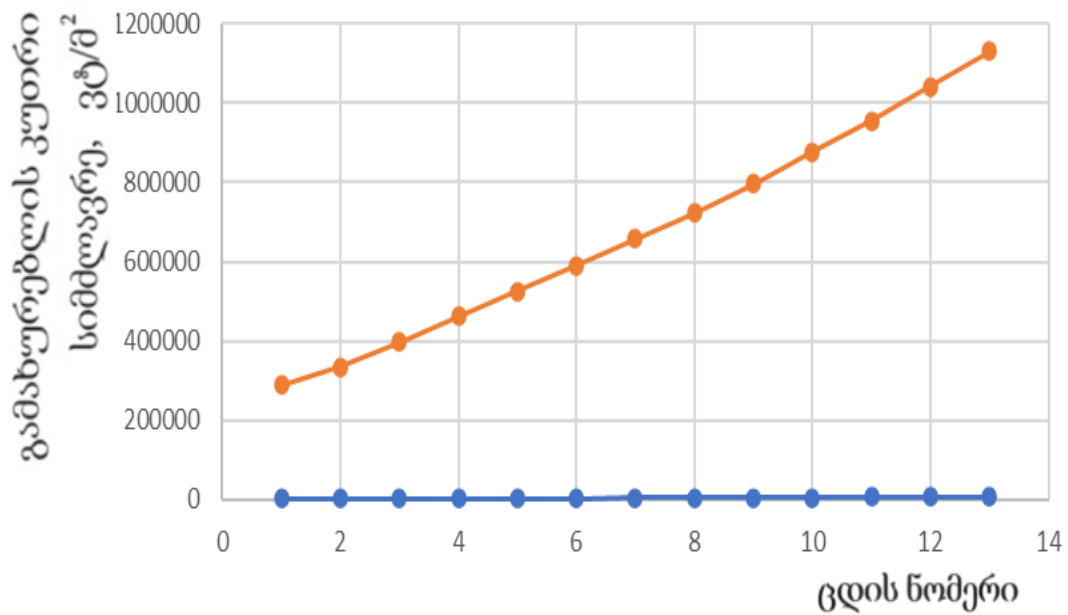
ცდის N	დენი, ა.	ძაბვა, ვ.	სიმძლავრე, ვტ	ხვედრითი თბური დატვირთვა, ვტ/მ ²
1	47,8	38,4	1835.52	289278
2	50,9	41,78	2126.602	335152.5
3	55,4	45,49	2520.146	397175
4	59,8	49,11	2936.778	462836.2
5	63,7	52,34	3334.058	525447.5
6	67,5	55,49	3745.575	590302.6
7	71,2	58,59	4171.608	657445.4
8	74,6	61,41	4581.186	721994.9
9	78,3	64,55	5054.265	796552.2
10	82,1	67,77	5563.917	876873.3
11	85,6	70,72	6053.632	954052.4
12	89,4	73,92	6608.448	1041491
13	93,0	77,17	7176.81	1131065

მესამე საცდელი ელექტროგამახურებელი ფირფიტის სიმძლავრის გრაფიკი დუღილის დაწყებიდან გადაწვამდე წარმოდგენილია ნახ. 7-ზე.



ნახ. 7. მესამე საცდელი ელექტროგამახურებელი ფირფიტის სიმძლავრის მნიშვნელობები ვატებში

ანალოგიურად ნახაზ 8-ზე წამოვადგენ მესამე ფირფიტაზე განვითარებული კუთრი თბური სიმძლავრის მნიშვნელობების გრაფიკს სადაც ჩანს, რომ მესამე ფირფიტა გადაიწვა მეცამეტე ცდაზე, როდესაც კუთრი თბური სიმძლავრის მნიშვნელობამ ერთ კვადრატულ მეტრ ფართობზე ერთი მილიონ ასი ათას ვატს გადააჭარბა.



ნახაზი 8. მესამე საცდელი ელექტოგამახურებელი ფირფიტის მიერ განვითარებული კუთრი სიმძლავრე [ვტ/მ²]

ჰიდრაულიკის კურსიდან ცნობილია, რომ მოძრავი სითხის მიმართულების მართობულად ჩაშვებული ფირფიტა გარკვეულ წინაღობას უწევს სითხის ნაკადს და არსებობს ამ წინაღობის გამოსაანგარიშებელი ფორმულა:

$$F = C \cdot \rho \cdot S \cdot \left(\frac{V^2}{2}\right), \text{ ნ.} \quad (1)$$

სადაც ρ წყლის სიმკვრივეა - კგ/მ³, ხოლო S გამახურებელი ფირფიტის ფართობი - მ², ხოლო V ამ ფირფიტის გადაადგილების სიჩქარე - მ/წმ.

რაც შეეხება კოეფიციენტ C -ს ეს არის ჰიდრაულიკის კურსიდან ცნობილი, სითხეში მოძრავ სხეულთა შუბლა წინაღობის კოეფიციენტი, რომელიც ბრტყელ მართკუთხა ფირფიტებზე მათი სიბრტყის მართობულად სითხით შემოდინების პროცესებისათვის აიღება 1,1-დან 1,28-მდე დიაპაზონში და კვადრატული

ფირფიტებისათვის მინიმალურია, ანუ 1,1-ის ტოლია. ვინაიდან ჩვენი მართკუთხა გამახურებლების სიგრძე თითქმის 5-ჯერ აღემატება მათ სიგანეს, ჩვენი გაანგარიშებისათვის ჩავთვალეთ რომ მისი მნიშვნელობა 1,25-ის ტოლია, ანუ $C = 1,25$.

ჰიდრავლიკის კურსში განხილულ ამოცანასთან შედარებით, ჩვენს შემთხვევაში, სურათი შებრუნებულია. უძრავ სითხეში გადაადგილება ბრტყელი, მართკუთხა ფირფიტა. ცხადია, რომ სითხის გადაადგილების წინააღმდეგობის ძალა რიცხობრივად ზუსტად იგივე ძალის ტოლია რა ძალითაც ფირფიტა უწევს წინააღმდეგობას სითხის ნაკადს. მაშასადამე ფორმულა (1)-ით გაანგარიშებული წინააღმდეგობის ძალა რიცხობრივად ტოლი იქნება იმ ძალის, რომელიც მოქმედებს ფირფიტაზე და გადაადგილბს მას. ფირფიტაზე კი მოქმედებს დუღილის დროს წარმოქმნილი რეაქტიული ძალა. შესაბამისად, ექსპერიმენტალური მონაცემების ფორმულა (1)-ში შეტანით გაანგარიშებული ძალა ტოლი იქნება იმ რეაქტიული ძალისა, რომელიც მოქმედებს ფირფიტაზე დუღილის პროცესში.

ფირფიტის გადაადგილების სიჩქარეს ვიღებდით გადაადგილების მანძილის გადაადგილების დროზე გაყოფით. გადაადგილების მანძილი ყოველ ცდაში ერთი და იგივე იყო რადგან გამახურებელი ფირფიტის საწყისი მდებარეობა მუდამ ერთ ადგილას იყო დაფიქსირებული და ამ ადგილიდან ფირფიტის გადაადგილება ხდებოდა წყლის ავზის მოპირდაპირე კედელზე დაჯახებამდე. ეს მანძილი შეადგენდა 9,5 სანტიმეტრს. რაც შეეხება გადაადგილების დროს, მას ვიგებდით როგორც გამახურებელი ფირფიტის ელექტრულ ქსელში ჩართვის მომენტიდან მოპირდაპირე კედელზე ფირფიტის დაჯახებამდე გადაღებული ვიდეოფილმის ხანგრძლივობის დადგენის საშუალებით.

ზემოთ მოცემული მეთოდით ჩატარებული გაანგარიშების შედეგად მიღებული დუღილის პროცესში წარმოქმნილი და მადულარ ზედაპირზე მოქმედი რეაქტიული ძალის მნიშვნელობები სამივე ნიმუშისათვის წარმოდგენილია ცხრილებში 5, 6 და 7.

ცხრილი 5. N1 გამახურებელ ფირფიტაზე ჩატარებული ცდების შედეგები

	დენი ამპერი	ძაბვა ვოლტი	სიმძლავრე ვატი	დრო წამი	სიჩქარე (მ/წმ)	ხვედრიანი თბური დატვირთვა (ვტ/მ ²)	რეაქტიული ძალა ნ/მ ²
	48	39.5	1896	6.5	0.013846	298818	0.177502
	51.3	42.2	2164.86	6.3	0.014286	341191.5	0.188963
	56.2	46.4	2607.68	5.97	0.015075	410981.9	0.210411
	63.9	52.9	3380.31	5.83	0.015437	532751.8	0.220638
	66.4	54.8	3638.72	5.47	0.016453	573478.3	0.250637
	68.2	56.3	3839.66	5.36	0.016791	605147.4	0.261040
	75.8	62.8	4760.24	5.3	0.016981	750234.8	0.266981
	77	63.7	4904.9	3.29	0.027356	773033.9	0.692883
	82.3	68.3	5621.09	3.15	0.028571	885908.6	0.755797
0	84.6	70.1	5930.46	2.9	0.031034	934666.7	0.891723
1	88.5	73.6	6513.6	2.67	0.033708	1026572	1.052011
2	89.5	74.3	6649.85	2.52	0.035714	1048046	1.180950
3	91	75.6	6879.6	2.43	0.037037	1084255	1.270065
4	92,2	76,1	7016.42	2.31	0.038961	1105787	1.330327

ამ ცხრილებიდან ჩანს რომ დუღილის პროცესში წარმოიქმნება მცირე სიდიდის რეაქტიული ძალა, რომელიც მოქმედებს მადულარ ზედაპირის მართობულად. ეს ძალა დიდი არ არის მაგრამ იწვევს დაუმაგრებელი მადულარი ფირფიტის სითხეში გადაადგილებას.

ცხრილი 6. N 2 გამახურებელ ფირფიტაზე ჩატარებული ცდების შედეგები

	დენი ამპერი	ძაბვა ვოლტი	სიმძლავრე ვატი	დრო წამი	სიჩქარე (მ/წმ)	ხვედრითი თბური დატვირთვა (ვტ/მ ²)	რეაქტიული ძალა ნ/მ ²
	47.9	39.29	1881.99	6.6	0.013636	296610.1	0.172158
	51.2	42.03	2151.94	6.3	0.014286	339154.6	0.188963
	54.8	44.97	2464.36	5.97	0.015075	388393.4	0.210411
	58.6	48.12	2819.83	5.83	0.015437	444418	0.220638
	62.9	51.69	3251.3	5.62	0.016014	512419.4	0.237440
	66.3	54.52	3614.68	5.49	0.016393	569688.9	0.248812
	70.7	58.17	4112.62	5.27	0.017078	648166.9	0.270040
	73.9	60.86	4497.55	3.67	0.024523	708834.4	0.556803
	77.4	63.83	4940.44	3.32	0.027108	778635.5	0.680377
0	81.8	67.55	5525.59	3.1	0.029032	870857.4	0.780384
1	85.2	70.43	6000.64	2.81	0.032028	945726.7	0.949761
2	88.7	73.41	6511.47	2.65	0.033962	1026235.9	1.067926

წარმოდგენილი ცხრილებიდან ჩანს აგრეთვე რომ დუღილის პროცესში აღძრული და მადულარ ზედაპირზე მოქმედი რეაქტიული ძალის სიდიდე იზრდება დუღილის დროს განვითარებული ხვედრითი თბური ნაკადის ზრდასტან ერთად.

გარდა ამისა ჩანს აგრეთვე რომ ხვედრითი თბური ნაკადის სიდიდის დაახლოებით 0,5 – 0.6 მილიონი ვატის ფარგლებში ზემოხსენებული დამოკიდებულება უფრო მკვეთრად გამოხატული, რაც ჩვენი აზრით შეიძლება დაკავშირებული იყოს იმ გეომეტრიულ ფაქტორებთან, რითაც ხასიათდება ჩვენი

გამახურებელი ელემენტების თბოგამომყოფი ზედაპირების გეომეტრიული ზომები.

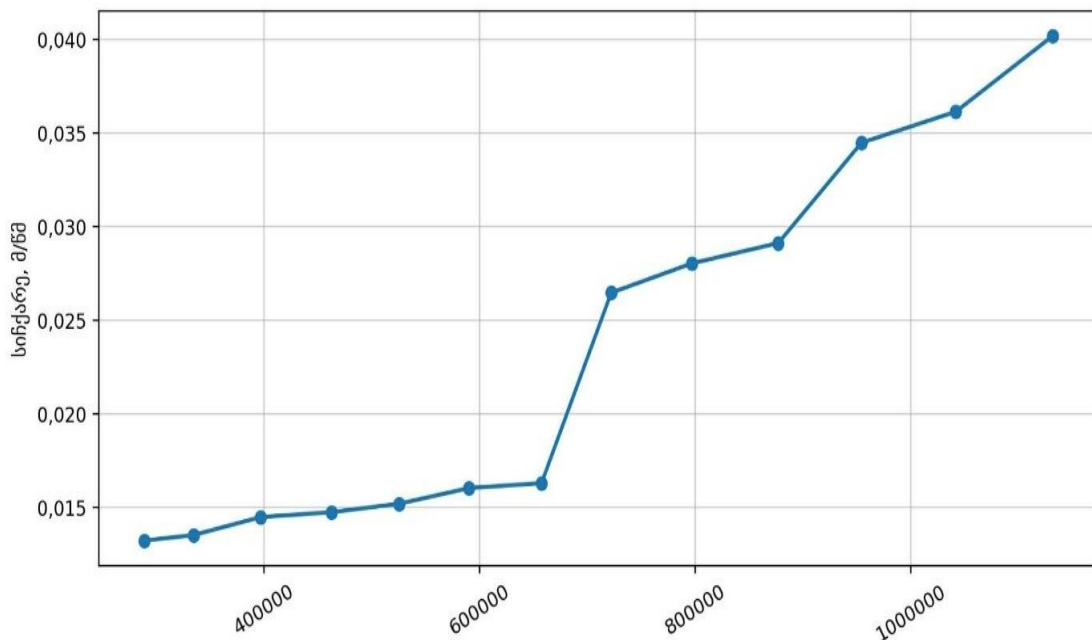
ცხრილი 7. N 3 გამახურებელ ფირფიტაზე ჩატარებული ცდების შედეგები

	დენი ამპერი	ძაბვა ვოლტი	სიმძლავრე ვატი	დრო წამი	სიჩქარე (მ/წმ)	ხვედრიანი თბური დატვირთვა (ვტ/მ ²)	რეაქტიული ძალა ნ/მ ²
1	47.8	38.4	1835.52	6.8	0.013235	289286.1	0.162182
2	50.9	41.78	2126.6	6.65	0.013534	335161.9	0.169593
3	55.4	45.49	2520.15	6.21	0.014493	397186.1	0.194478
4	59.8	49.11	2936.78	6.1	0.014754	462849.2	0.201546
5	63.7	52.34	3334.06	5.92	0.015203	525462.3	0.213999
6	67.5	55.49	3745.58	5.61	0.016043	590319.1	0.238301
7	71.2	58.59	4171.61	5.52	0.016304	657463.8	0.246118
8	74.6	61.41	4581.19	3.4	0.026471	722015.1	0.648777
9	78.3	64.55	5054.26	3.21	0.028037	796574.5	0.727809
10	82.1	67.77	5563.92	3.09	0.029126	876897.9	0.785446
11	85.6	70.72	6053.63	2.61	0.034483	954079.1	1.100942
12	89.4	73.92	6608.45	2.49	0.036145	1041520.6	1.209625
13	93	77.17	7176.81	2.24	0.040179	1131096.9	1.494695

მეოთხე თავი. ექსპერიმენტული შედეგების ანალიზი

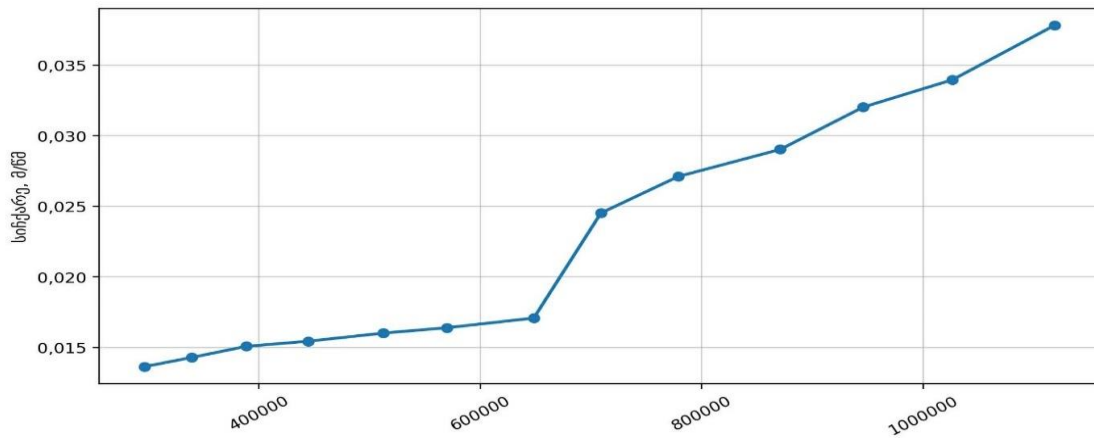
ნაშრომში ძირითად შედეგად მიმაჩნია ის, რომ ჩატარებული ექსპერიმენტული კვლევის საფუძველზე მიღებული მონაცემები სავსებით ცხადად ამტკიცებენ იმას რომ ატმოსფერულ წნევაზე წყლის დუღილის ყველა რეჟიმში წარმოიქმნება მადულარ ზედაპირზე მოქმედი რეაქტიული ძალა, რომელიც იწვევს სითხეში თავისუფლად ჩაკიდებული მადულარი ფირფიტის გადაადგილებას და ამ გადაადგილების სიჩქარე დამოკიდებულია დუღილის პროცესში განვითარებული ხვედრითი თბური ნაკადის სიდიდეზე.

ზემოთქმული ნათლად ჩანს ქვემოთ წარმოდგენილი ექსპერიმენტული დამოკიდებულებებიდან სამივე გამოკვლეული ნიმუშისათვის.



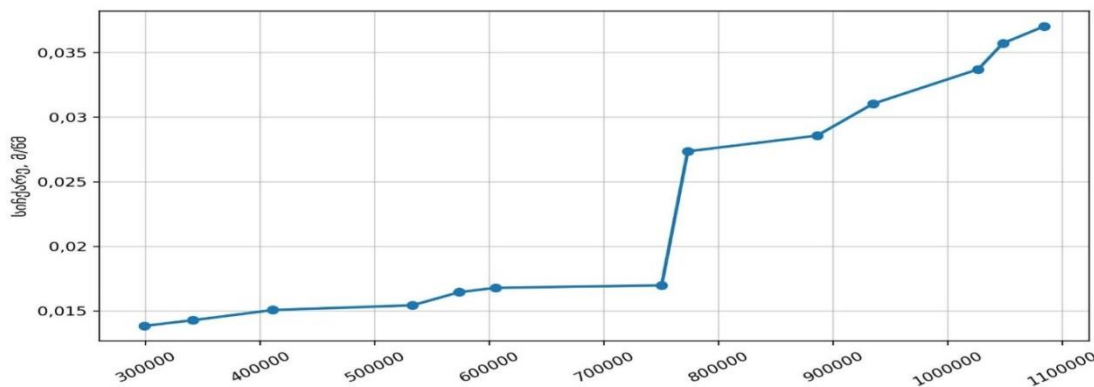
ნახ. 9. სიჩქარის დამოკიდებულება ხვედრით თბურ დატვირთვაზე (I ნიმუში)

ამასთან აუცილებელია აღინიშნოს რომ რეაქტიული ძალის წარმოქმნით გამოწვეული საცდელი მადულარი ფირფიტების (სამივე ფირფიტის) გადაადგილების სიჩქარეები მატულობენ რა ხვედრითი თბური დატვირთვის მატებასთან ერთად, რაღაც დიაპაზონში, ხვედრითი თბური ნაკადის დაახლოებით 700 ათასი ვტ/მ² მნიშვნელობის სიახლოვეს, განიცდიან გადაადგილების სიჩქარის მკვეთრ მატებას.



ნახ.10. სიჩქარის დამოკიდებულება ხვედრით თბურ დატვირთვაზე (II ნიმუში)

ხვედრითი თბური ნაკადის მნიშვნელობათა გარკვეულ დიაპაზონში მადულარი ფირფიტის გადაადგილების სიჩქარის მკვეთრი მატება ნიშნავს რომ ამ მომენტში მკვეთრად იზრდება ფირფიტაზე მოქმედი რეაქტიული ძალა, ანუ უშუალოდ მადულარი ზედაპირიდან აორთქლებული წყლის მოლეკულების რაოდენობა. ადვილი მოსალოდნელია, რომ ეს ფაქტი დაკავშირებული იყოს შესაბამის თბურ დატვირთვაზე წარმოქმნილი ორთქლის ბუშტების ზომების ცვლილებასთან და ამ ზომების მადულარი ელემენტის გეომეტრიულ ზომების ურთიერთშეფარდებასთან.



ნახ.11. სიჩქარის დამოკიდებულება ხვედრით თბურ დატვირთვაზე (III სერია)

ნათქვამიდან გამომდინარე მიზანსეწონილად მიმაჩნია ანალოგიური ცდების ჩატარება სხვადასხვა ზომის სადენებიანი ფირფიტების გამოყენებით.

დასკვნა

ჩატარებული სადისერტაციო კვლევის საფუძველზე შეიძლება ჩამოყალიბდეს შემდეგი ძირითადი დასკვნები, რომლებიც ასახავს სამუშაოს შესრულების ლოგიკურ თანმიმდევრობას, კვლევის მეთოდურ განვითარებასა და მიღებული შედეგების მეცნიერულ მნიშვნელობას:

1. თავდაპირველად გაანალიზდა სითხის დუდილის, ორთქლადქცევის, ტემპერატურისა და თბური ენერჯის მექანიკურ მოძრაობად გარდაქმნის ისტორიული და თეორიული საფუძვლები. ამ ეტაპმა აჩვენა, რომ დუდილი არ არის მხოლოდ თბური პროცესი; იგი ერთდროულად უკავშირდება სითხოს გადაცემას, ფაზურ გარდაქმნას, ორთქლის ბუშტების წარმოქმნას, მასის გადატანასა და იმპულსის ცვლილებას.

2. შემდეგ ეტაპზე შესრულდა ქართული და საერთაშორისო სამეცნიერო ლიტერატურის მიმოხილვა. განხილული იქნა დუდილის რეჟიმები, ნუკლიამას მრუდი, კრიტიკული თბური ნაკადის პრობლემა, ბუშტოვანი და აფსკური დუდილის თავისებურებები, აგრეთვე დუდილის კრიზისთან დაკავშირებული თბო-ჰიდროდინამიკური მოვლენები. ლიტერატურის ანალიზმა გამოკვეთა, რომ დუდილის თბოგადაცემის საკითხები ფართოდ არის შესწავლილი, ხოლო დუდილის შედეგად წარმოქმნილი რეაქტიული ძალის ექსპერიმენტული შეფასება შედარებით ნაკლებად არის დამუშავებული.

3. თეორიული და ლიტერატურული ანალიზის შემდეგ ჩამოყალიბდა კვლევის მთავარი ამოცანა: ექსპერიმენტულად შემოწმებულიყო, წარმოიქმნება თუ არა სითხის დუდილის დროს გამახურებელ ზედაპირზე ისეთი მექანიკური ზემოქმედება, რომელიც შეიძლება რეაქტიულ ძალად შეფასდეს. ამ მიდგომამ კვლევა გადაიყვანა მხოლოდ თერმოდინამიკური აღწერიდან თერმო-მექანიკურ ანალიზზე.

4. ამის შემდეგ შეიქმნა ექსპერიმენტული დანადგარი და შემუშავდა გაზომვის მეთოდიკა. სამუშაოს საწყის ეტაპზე გამოიცადა სხვადასხვა კვების წყარო და ლაბორატორიული მოწყობილობა, რის შედეგადაც შეირჩა ისეთი სქემა, რომელმაც უზრუნველყო ფირფიტაზე საჭირო ელექტრული სიმძლავრის მიწოდება, წყლის

დუღილის გამოწვევა და ფირფიტის გადაადგილების ფიქსირება. ამ ეტაპზე კვლევამ პრაქტიკულად აჩვენა, რომ რეაქტიული ძალის შესწავლა საჭიროებს როგორც საკმარის თბურ დატვირთვას, ისე ფირფიტის თავისუფალი გადაადგილების შესაძლებლობას.

5. შემდგომში ექსპერიმენტები ჩატარდა სამი საცდელი გამახურებელი ფირფიტის გამოყენებით. თითოეულ შემთხვევაში განისაზღვრა დენის ძალა, ძაბვა, ფირფიტის გადაადგილების დრო და შესაბამისი გამოთვლითი პარამეტრები: ელექტრული სიმძლავრე, ხვედრითი თბური დატვირთვა, გადაადგილების სიჩქარე და რეაქტიული ძალა. ამ მონაცემებმა შესაძლებელი გახადა დუღილის პროცესის არა მხოლოდ ვიზუალური დაკვირვება, არამედ მისი რაოდენობრივი შეფასებაც.

6. ექსპერიმენტული მონაცემების ანალიზმა აჩვენა, რომ ხვედრითი თბური დატვირთვის ზრდასთან ერთად იზრდება საცდელი ფირფიტის გადაადგილების სიჩქარე. ეს ნიშნავს, რომ ორთქლის ბუშტების უფრო ინტენსიური წარმოქმნა და ზედაპირიდან მოწყვეტა იწვევს ფირფიტაზე მოქმედი მექანიკური უკუქმედების გამლიერებას. დაახლოებით 7.5×10^5 ვტ/მ²-ის მიდამოში დაფიქსირებული სიჩქარის მკვეთრი ზრდა მიუთითებს დუღილის რეჟიმის ცვლილებაზე ან ბუშტების დინამიკის გააქტიურებაზე.

7. კვლევამ დაადასტურა, რომ სითხის დუღილის პროცესში გამახურებელ ზედაპირზე რეაქტიული ძალა მართლაც წარმოიქმნება. მისი სიდიდე შედარებით მცირეა და არ შეიძლება შეფასდეს როგორც დომინანტური მექანიკური ფაქტორი, თუმცა იგი საკმარისია თავისუფლად ჩაკიდებული ფირფიტის გადაადგილების გამოსაწვევად. შესაბამისად, მიღებული შედეგები ადასტურებს, რომ დუღილის პროცესი ქმნის არა მხოლოდ თბურ, არამედ გაზომვად მექანიკურ ეფექტსაც.

8. მიღებული შედეგების საფუძველზე დადგინდა, რომ რეაქტიული ძალის ფორმირება დამოკიდებულია რამდენიმე ურთიერთდაკავშირებულ პარამეტრზე: მიწოდებულ ელექტრულ სიმძლავრეზე, ხვედრით თბურ დატვირთვაზე, გამახურებელი ფირფიტის გეომეტრიაზე, წყლის საწყის თბურ მდგომარეობაზე, ბუშტების წარმოქმნის სიხშირეზე, მათი მოწყვეტის დინამიკასა და სითხის ჰიდროდინამიკურ წინააღობაზე. ამიტომ აღნიშნული ძალის სრულყოფილი

შეფასება მიზანშეწონილია სითბოს, მასისა და იმპულსის ერთიანი ბალანსის საფუძველზე.

9. კვლევის ერთ-ერთ მნიშვნელოვან შედეგად უნდა ჩაითვალოს ის, რომ ექსპერიმენტმა გამოკვეთა დუდილის მექანიკური ეფექტის პრაქტიკული დასაბუთების შესაძლებლობა. მიუხედავად იმისა, რომ რეაქტიული ძალა უშუალო ძალმზომი სენსორით არ გაზომილა და შეფასდა ფირფიტის გადაადგილების მონაცემების საფუძველზე, მიღებული ტენდენციები თანმიმდევრულია და შეესაბამება დუდილის ფიზიკურ კანონზომიერებებს.

10. საბოლოოდ, ნაშრომი ქმნის საფუძველს შემდგომი კვლევებისათვის. მიზანშეწონილია ექსპერიმენტების გაგრძელება სხვადასხვა ზომისა და გეომეტრიის მქონე გამახურებელი ფირფიტებით, მაღალი სიზუსტის ძალმზომი სენსორებით, მაღალი სიჩქარის ვიდეოანალიზით და დუდილის რეჟიმების უფრო დეტალური თბო-ჰიდროდინამიკური აღწერით. ასეთი კვლევა შესაძლებელს გახდის დუდილისას წარმოქმნილი რეაქტიული ძალის უფრო ზუსტ განსაზღვრას და მისი გათვალისწინების გზების შემუშავებას თბომცვლელებში, ორთქლის გენერატორებში, ენერგეტიკულ დანადგარებსა და სხვა საინჟინრო სისტემებში.

დისერტაციის თემაზე გამოქვეყნებული სამეცნიერო ნაშრომების სია:

1. Gugushvili I. Experimental study of reactive force generated in the boiling process of liquids. Danish Scientific Journal, 2026, №107, pp. 89.
2. მაჭავარიანი ე., გუგუშვილი ი. მადულარ ზედაპირზე წარმოქმნილი რეაქტიული ძალის ექსპერიმენტულ-გამოთვლითი შეფასება. „ენერჯია“, 2026, №2(115), 6 გვ.
3. მაჭავარიანი ე., გუგუშვილი ი. ხვედრითი თბური დატვირთვის გავლენა დუღილის რეჟიმსა და მადულარი ფირფიტის გადაადგილებაზე. „ენერჯია“, 2026, №2(115), 6 გვ.

Abstract

The present thesis examines the reactive force generated during the boiling of a liquid and its thermophysical, hydrodynamic, and practical significance. Boiling is considered not merely as the transformation of a liquid into vapor, but as a complex physical phenomenon in which heat, mass, and momentum are transferred simultaneously. The opening part of the thesis presents the historical development of the use of heat, temperature, and steam from antiquity to modern thermodynamics. Special attention is given to Hero of Alexandria's aeolipile as an early example of the conversion of thermal energy into mechanical motion, as well as to the formation of temperature scales, which made quantitative analysis of thermal processes possible. This historical overview demonstrates that modern ideas about boiling and vapor generation are the result of centuries of observation and experimentation.

In the literature review, boiling is presented as one of the most complex and relevant problems in modern thermophysics. The thesis discusses Shiro Nukiyama's studies, boiling regimes, the characteristics of nucleate and film boiling, the significance of critical heat flux, and the boiling crisis. It emphasizes that the intensity of boiling depends on many factors: pressure, temperature, the microrelief of the heating surface, the physical properties of the liquid, thermal load, and the dynamics of vapor bubble formation and detachment. The formation, growth, and detachment of bubbles create the mechanical reaction evaluated in the study as a reactive force. The thesis also highlights the research contributions of Georgian and international scientists whose works created a basis for understanding boiling heat transfer, critical regimes, and mechanical effects. The relevance of the research is strengthened by the fact that boiling is widely used in heat exchangers, steam generators, cooling systems of nuclear reactors, and the chemical and food industries. In such devices, the intensive motion of bubbles determines not only heat transfer but may also become a source of vibration, local pressure pulsations, and structural loads. Therefore, experimental evaluation of reactive force is important for improving the reliability and safety of equipment.

The main aim of the thesis is to determine experimentally the magnitude of the reactive force acting on a boiling surface during liquid boiling. For this purpose, a laboratory apparatus was created with a water tank, a regulated electrical power source, and specially manufactured heating plates. In the experiments, the water was first brought to the boiling temperature, after which electrical energy of different power levels was supplied to the plate. During the tests, current, voltage, plate displacement time, and displacement distance were measured. On the basis of these data, power, specific thermal load, displacement velocity, and the reactive force acting on the plate were determined. Three experimental plates were used, which made it possible to compare the obtained results and assess the repeatability of the process.

The experiments showed that as the thermal load increases, the intensity of vapor generation, the displacement velocity of the plate, and the reactive force acting on it also increase. The results obtained from all three test samples confirmed a common pattern: a higher thermal load intensifies bubble release and, accordingly, increases the mechanical action on the boiling surface. The study also notes that when the process approaches the critical thermal load, it becomes unstable and may lead to overheating or damage to the

plate. The reactive force was not measured directly with a force sensor; instead, it was determined on the basis of the motion of the plate and the evaluation of hydraulic resistance. Therefore, the obtained results have an experimental-calculative character.

The concluding part shows that the reactive force generated during boiling is small, yet it actually exists and is sufficient to move an unfixed heating plate in the liquid. The research results confirm that the mechanical effects of boiling should be studied on the basis of a unified balance of heat, mass, and momentum. The thesis has both theoretical and practical significance, because it fills an existing gap in the study of boiling processes and creates a basis for more accurate evaluation and safer operation of energy, thermal engineering, and other technological systems. The conclusions obtained may be used in future research where more precise measurement, modeling, and engineering consideration of mechanical loads generated during boiling will be required in practical installations of different scales.