

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

ხელნაწერის უფლებით

საბა კახიანი

თბოთბოარაგების ავტონომიური სისტემის სითბური
დამაგროვებლების ეფექტურობის გაზრდა ადგილობრივი
თბოსაიზოლაციო მასალების გამოყენებით

დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად
წარდგენილი დისერტაციის

ავტორ ეფერ ატი

სადოქტორო პროგრამა: „ენერგეტიკა და ელექტროინჟინერია“
შიფრი: 0713

თბილისი
2026 წელი

სამუშაო შესრულებულია საქართველოს ტექნიკურ უნივერსიტეტში

ენერგეტიკის ფაკულტეტი

თბოენერგეტიკის, ენერგოეფექტური ტექნოლოგიების და ენერგოაუდიტის
დეპარტამენტი

ხელმძღვანელი: ასოცირებული პროფესორი ლევან რობაქიძე

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. თანამედროვე ენერგეტიკის განვითარების ერთ-ერთ ძირითად მიმართულებას წარმოადგენს ენერგოეფექტურობის ამაღლება, განახლებადი ენერგიის წყაროების ფართო ინტეგრაცია და ენერგეტიკული უსაფრთხოების უზრუნველყოფა. კლიმატის ცვლილებით განპირობებული გამოწვევები, ენერგომატარებლების მზარდი მოხმარება, ტრადიციული საწვავის რესურსების შეზღუდულობა და გარემოზე უარყოფითი ზემოქმედების შემცირების აუცილებლობა განაპირობებს ისეთი ტექნოლოგიური გადაწყვეტილებების დანერგვის საჭიროებას, რომლებიც უზრუნველყოფს ენერგორესურსების რაციონალურ გამოყენებასა და დაბალკარბონიანი ენერგეტიკის განვითარებას. ამ პროცესში განსაკუთრებული მნიშვნელობა ენიჭება ავტონომიური თბომომარაგების სისტემებს, რომლებიც განახლებადი ენერგიის წყაროების გამოყენებით ამცირებს ტრადიციულ საწვავზე დამოკიდებულებას, ზრდის ენერგეტიკულ დამოუკიდებლობას და ხელს უწყობს გარემოსდაცვითი მიზნების მიღწევას.

განახლებადი ენერგიის წყაროებს შორის მზის ენერგიას განსაკუთრებული ადგილი უკავია, თუმცა მისი ეფექტიანი გამოყენება მნიშვნელოვნად არის დამოკიდებული სითბოს დაგროვებისა და ხანგრძლივი შენახვის შესაძლებლობაზე. მზის გამოსხივების დღედამური და სეზონური ცვალებადობა განაპირობებს ენერგიის გამომუშავებისა და მომხმარებლის მოთხოვნის პერიოდებს შორის დროით შეუსაბამობას. აღნიშნული გარემოება განსაკუთრებულ მნიშვნელობას ანიჭებს სეზონური სითბოს აკუმულირების ტექნოლოგიების განვითარებას, რომლებიც უზრუნველყოფს ენერგიის დაგროვებას მისი გამომუშავების პერიოდში და შემდგომ გამოყენებას გათბობის სეზონზე. ამ თვალსაზრისით, მაღალტემპერატურული სეზონური სითბოს დამაგროვებლები წარმოადგენს თანამედროვე ავტონომიური თბომომარაგების სისტემების მნიშვნელოვან ელემენტს.

სამუშაოების მიზანი. მაღალტემპერატურული სეზონური სითბოს დამაგროვებლების ეფექტიანობა მნიშვნელოვანწილად განისაზღვრება მათი

კონსტრუქციული გადაწყვეტით, გამოყენებული თბოსაიზოლაციო მასალების თვისებებითა და სითბური დანაკარგების მინიმიზაციის ხარისხით. არსებული ტექნოლოგიური გადაწყვეტილებების მნიშვნელოვანი ნაწილი ეფუძნება მაღალი ღირებულების იმპორტირებულ მასალებს, რაც ზრდის სისტემების მოწყობისა და ექსპლუატაციის ხარჯებს. შესაბამისად, განსაკუთრებულ პრაქტიკულ ინტერესს წარმოადგენს ადგილობრივი ინერტული და თბოსაიზოლაციო მასალების გამოყენების შესაძლებლობის შესწავლა, მათი თბოტექნიკური თვისებების შეფასება და ენერგოეფექტურობაზე მათი გავლენის განსაზღვრა. სწორედ აღნიშნული პრობლემის კვლევას, ადგილობრივი მასალების თბოტექნიკური მახასიათებლების შეფასებასა და მაღალტემპერატურული სეზონური სითბოს დამაგროვებლის ეფექტიანობის ამაღლებისათვის შესაბამისი კონსტრუქციული გადაწყვეტების შემუშავებას ეძღვნება წარმოდგენილი სადისერტაციო ნაშრომი.

კვლევის მიზანი და ამოცანა. სადისერტაციო ნაშრომის მიზანია ავტონომიური თბომომარაგების სისტემებისათვის განკუთვნილი მაღალტემპერატურული სეზონური სითბოს დამაგროვებლის ეფექტიანობის ამაღლება ადგილობრივი ინერტული და თბოსაიზოლაციო მასალების გამოყენების საფუძველზე, მათი თბოტექნიკური მახასიათებლების კვლევის, ექსპერიმენტული შეფასებისა და დამაგროვებლის ოპტიმალური კონსტრუქციული გადაწყვეტის შემუშავების გზით.

დასახული მიზნის მისაღწევად განისაზღვრა და განხორციელდა შემდეგი ძირითადი ამოცანები:

- ავტონომიური თბომომარაგების სისტემების განვითარების თანამედროვე მდგომარეობისა და არსებული ტექნოლოგიური გადაწყვეტილებების ანალიზი;
- განახლებადი ენერგიის წყაროების თბომომარაგების სისტემებში გამოყენების შესაძლებლობების შეფასება;
- სითბოს სეზონური აკუმულირების ტექნოლოგიებისა და მაღალტემპერატურული სითბოს დამაგროვებლების კონსტრუქციული სქემების შესწავლა;
- ადგილობრივი ინერტული და თბოსაიზოლაციო მასალების ფიზიკურ-თბოტექნიკური თვისებების კვლევა;

- მაღალტემპერატურული სითბოს დამაგროვებლის ექსპერიმენტული კვლევის ჩატარება და მიღებული შედეგების ანალიზი;
- თბური დანაკარგების შემცირების შესაძლებლობების შეფასება და დამაგროვებლის კონსტრუქციული პარამეტრების ოპტიმიზაცია;
- კვლევის შედეგებზე დაყრდნობით პრაქტიკული რეკომენდაციების შემუშავება ავტონომიური თბომომარაგების სისტემების ენერგოეფექტურობის ამაღლების მიზნით.

კვლევის ობიექტი. კვლევის ობიექტს წარმოადგენს ავტონომიური თბომომარაგების სისტემებში გამოყენებული მაღალტემპერატურული სეზონური სითბოს დამაგროვებელი, მისი კონსტრუქციული თავისებურებები და თბოტექნიკური მახასიათებლები, აგრეთვე ადგილობრივი ინერტული და თბოსაიზოლაციო მასალების გამოყენების შესაძლებლობები.

კვლევის საგანი. კვლევის საგანს წარმოადგენს მაღალტემპერატურული სეზონური სითბოს დამაგროვებლის თბოტექნიკური ეფექტიანობის ამაღლების შესაძლებლობები ადგილობრივი ინერტული და თანამედროვე თბოსაიზოლაციო მასალების ერთობლივი გამოყენების საფუძველზე, სითბოს დაგროვებისა და შენარჩუნების პროცესების თეორიული და ექსპერიმენტული კვლევა, აგრეთვე შემოთავაზებული ტექნოლოგიური გადაწყვეტების პრაქტიკული გამოყენების ტექნიკურ-ეკონომიკური შეფასება.

ნაშრომის მეცნიერული სიახლე. ნაშრომის მეცნიერული სიახლე მდგომარეობს მაღალტემპერატურული სეზონური სითბოს დამაგროვებლის კვლევისათვის ექსპერიმენტული მეთოდოლოგიის შემუშავებაში; ადგილობრივი ინერტული მასალებისა და თანამედროვე თბოსაიზოლაციო ტექნოლოგიების ერთობლივი გამოყენების ეფექტიანობის ექსპერიმენტულ შეფასებასა და დასაბუთებაში; დამაგროვებლის თბოტექნიკური მახასიათებლების განსაზღვრასა და თეორიული და ექსპერიმენტული შედეგების ურთიერთშედარებაში; აგრეთვე სითბური დანაკარგების შემცირების მიზნით დამაგროვებლის თბოიზოლაციის ოპტიმალური კონსტრუქციული გადაწყვეტის შემუშავებაში.

ნაშრომის პრაქტიკული მნიშვნელობა. კვლევის შედეგები შეიძლება გამოყენებულ იქნეს მზის ენერგიაზე დაფუძნებული ავტონომიური

თბომომარაგების სისტემების პროექტირებისას, მაღალტემპერატურული სეზონური სითბოს დამაგროვებლების კონსტრუირებისას, ენერგოეფექტური საინჟინრო სისტემების სრულყოფისა და მათი ექსპლუატაციის პროცესში.

შემუშავებული რეკომენდაციები ქმნის ადგილობრივი ინერტული და თბოსაიზოლაციო მასალების პრაქტიკული გამოყენების შესაძლებლობას, რაც ხელს უწყობს იმპორტირებულ მასალებზე დამოკიდებულების შემცირებას, სითბური დანაკარგების მინიმიზაციას და სისტემის საინვესტიციო და საექსპლუატაციო ხარჯების შემცირების შესაძლებლობას.

ნაშრომის სტრუქტურა და მოცულობა. დისერტაცია მოიცავს 125 გვერდს, 7 თავს, დასკვნასა და გამოყენებულ ლიტერატურის ნუსხას. ნაშრომში წარმოდგენილია 4 ცხრილი და 47 ნახაზი.

ნაშრომის ძირითადი შინაარსი

შესავალი

თანამედროვე ენერგეტიკის განვითარების პირობებში განსაკუთრებული მნიშვნელობა ენიჭება განახლებადი ენერგიის წყაროების ეფექტიან გამოყენებას, ენერგეტიკული უსაფრთხოების უზრუნველყოფასა და ენერგოეფექტური ტექნოლოგიების დანერგვას. ავტონომიური თბომომარაგების სისტემების განვითარების ერთ-ერთ მნიშვნელოვან წინაპირობას წარმოადგენს სითბოს სეზონური აკუმულირების ეფექტიანი ტექნოლოგიების სრულყოფა, ვინაიდან ენერგიის გამომუშავებისა და მოხმარების პერიოდებს შორის არსებული დროითი შეუსაბამობა ზღუდავს განახლებადი ენერგიის სრულფასოვანი გამოყენების შესაძლებლობას. ამასთან დაკავშირებით დასაბუთებულია მაღალტემპერატურული სეზონური სითბოს დამაგროვებლების სრულყოფის აუცილებლობა და ადგილობრივი თბოსაიზოლაციო და ინერტული მასალების გამოყენების შესაძლებლობების კვლევის აქტუალობა. განსაზღვრულია კვლევის მიზანი, ამოცანები, კვლევის ობიექტი და საგანი, წარმოდგენილია კვლევის მეთოდები, ნაშრომის მეცნიერული სიახლე, პრაქტიკული მნიშვნელობა და დაცვისათვის გამოტანილი ძირითადი დებულებები.

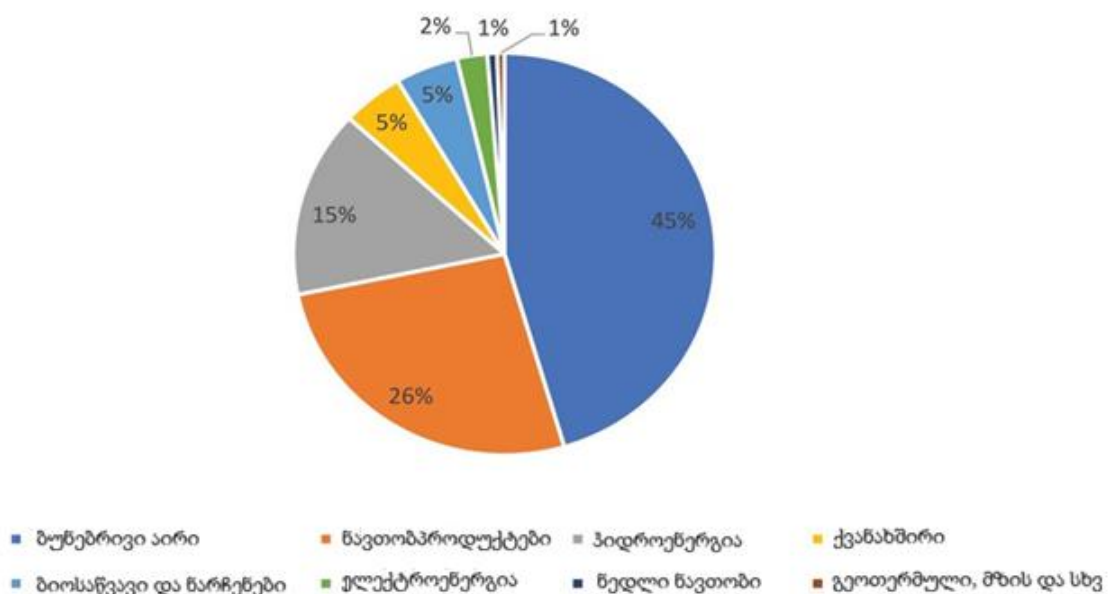
თავი I. ავტონომიური თბომომარაგების შესახებ - ზოგადი ინფორმაცია

პირველ თავში განხილულია ავტონომიური თბომომარაგების სისტემების არსი, განვითარების ისტორია, თანამედროვე მდგომარეობა და გამოყენების ძირითადი მიმართულებები. გაანალიზებულია ცენტრალიზებული და ავტონომიური თბომომარაგების სისტემების თავისებურებები, მათი უპირატესობები და ნაკლოვანებები, აგრეთვე წარმოდგენილია ავტონომიური თბომომარაგების სისტემების კლასიფიკაცია.

დასაბუთებულია, რომ ავტონომიური თბომომარაგების სისტემები იძლევა ენერგორესურსების უფრო რაციონალურად გამოყენების, ენერგოდამოუკიდებლობის გაზრდისა და ენერგიის ტრანსპორტირებისას

წარმოქმნილი დანაკარგების შემცირების შესაძლებლობას. განსაკუთრებული ყურადღება ეთმობა თანამედროვე ენერგეტიკის განვითარების ტენდენციებს, ენერგოეფექტურობის ამაღლების აუცილებლობასა და განახლებადი ენერგიის წყაროების თბომომარაგების სისტემებში ინტეგრაციის მნიშვნელობას.

განხილულია საქართველოს ენერგეტიკული სექტორის განვითარების თანამედროვე მდგომარეობა, ქვეყნის ენერგეტიკული პოტენციალი და ავტონომიური თბომომარაგების სისტემების დანერგვის პერსპექტივები. ჩატარებული ანალიზის საფუძველზე დასაბუთებულია, რომ მზის ენერგიაზე დაფუძნებული ავტონომიური თბომომარაგების სისტემების ეფექტიანობა მნიშვნელოვანწილად არის დამოკიდებული სითბოს დაგროვებისა და ხანგრძლივი შენახვის შესაძლებლობაზე, რაც განსაზღვრავს წარმოდგენილი კვლევის ერთ-ერთ ძირითად მიმართულებას.



ნახ. 1. საქართველოში ელექტროენერგიის გამომუშავების სტრუქტურა ენერგიის წყაროების მიხედვით

თავი II. განახლებადი ენერგიის წყაროების გამოყენება

თბომომარაგებისთვის

მეორე თავში განხილულია განახლებადი ენერგიის წყაროების გამოყენების თანამედროვე მდგომარეობა, მათი განვითარების ტენდენციები და

თბომომარაგების სისტემებში ინტეგრაციის შესაძლებლობები. გაანალიზებულია მზის, ქარის, გეოთერმული ენერგიის, ბიომასისა და დაბალპოტენციური გარემოს ენერგიის გამოყენების ძირითადი მიმართულებები, მათი ტექნიკური და ეკონომიკური მახასიათებლები, აგრეთვე გარემოსდაცვითი უპირატესობები. აღნიშნულია, რომ განახლებადი ენერგიის რესურსების ეფექტიანი გამოყენება წარმოადგენს თანამედროვე ენერგეტიკული პოლიტიკის ერთ-ერთ უმნიშვნელოვანეს მიმართულებას, რადგან მათი ფართო დანერგვა ხელს უწყობს ტრადიციული ენერგომატარებლების მოხმარების შემცირებას, ენერგეტიკული უსაფრთხოების განმტკიცებასა და გარემოზე უარყოფითი ზემოქმედების შემცირებას.

თავში განსაკუთრებული ყურადღება ეთმობა მზის ენერგიის გამოყენებას თბომომარაგების სისტემებში. განხილულია მზის გამოსხივების ფიზიკური საფუძვლები, მზის ენერგიის რესურსების განაწილება, მზის კოლექტორების ძირითადი ტიპები, მათი კონსტრუქციული თავისებურებები და მუშაობის პრინციპები. წარმოდგენილია ბრტყელი და ვაკუუმური მზის კოლექტორების შედარებითი ანალიზი, შეფასებულია მათი ენერგეტიკული მაჩვენებლები, გამოყენების სფეროები და ეფექტიანობაზე მოქმედი ძირითადი ფაქტორები. განსაკუთრებული ყურადღება ეთმობა მზის კოლექტორების მუშაობის რეჟიმებს სხვადასხვა კლიმატურ პირობებში და იმ ფაქტორებს, რომლებიც განსაზღვრავს მათი მუშაობის საიმედოობასა და ეფექტიანობას.

განხილულია მზის თბომომარაგების სისტემების ძირითადი სქემები, მათი შემადგენელი ელემენტები და ფუნქციური დანიშნულება. გაანალიზებულია მზის კოლექტორების, სითბოს დამაგროვებლების, სითბოს გადამტანი სითხის ცირკულაციის სისტემების, ავტომატური მართვის საშუალებებისა და დამხმარე ენერგიის წყაროების ურთიერთქმედება. ნაჩვენებია, რომ სისტემის საერთო ენერგოეფექტიანობა დამოკიდებულია თითოეული ელემენტის სწორად შერჩევაზე და მათ ოპტიმალურ ურთიერთკავშირზე. განსაკუთრებული ყურადღება ეთმობა მზის ენერგიის არათანაბარი გენერაციით გამოწვეულ პრობლემებს და აღნიშნულია, რომ მათი გადაჭრის ერთ-ერთ ეფექტიან საშუალებას წარმოადგენს სითბოს სეზონური აკუმულირების სისტემების გამოყენება.

თავში განხილულია აგრეთვე თბური ტუმბოების გამოყენების შესაძლებლობები ავტონომიურ თბომომარაგების სისტემებში. აღწერილია მათი მუშაობის პრინციპი, თერმოდინამიკური ციკლი, ენერგეტიკული ეფექტიანობის კოეფიციენტი (COP) და ექსპლუატაციის თავისებურებები. შეფასებულია სხვადასხვა ტიპის თბური ტუმბოს გამოყენების უპირატესობები და შეზღუდვები, ასევე მათი ერთობლივი მუშაობის შესაძლებლობა მზის თბომომარაგების სისტემებთან. ნაჩვენებია, რომ განახლებადი ენერგიის სხვადასხვა წყაროს კომბინირებული გამოყენება ზრდის ავტონომიური თბომომარაგების სისტემების საიმედოობასა და ენერგოეფექტიანობას.

თავი III. სითბური ენერგიის სეზონური შენახვის სისტემები

მესამე თავში განხილულია სითბური ენერგიის სეზონური შენახვის სისტემების განვითარების თანამედროვე მდგომარეობა, მათი კლასიფიკაცია, მუშაობის პრინციპები და პრაქტიკული გამოყენების შესაძლებლობები. გაანალიზებულია სითბოს აკუმულირების ტექნოლოგიების როლი განახლებადი ენერგიის წყაროებზე დაფუძნებულ თბომომარაგებაში. ნაჩვენებია, რომ მზის ენერგიის გამომუშავებისა და თბურ ენერგიაზე მოთხოვნის პერიოდებს შორის არსებული დროითი შეუსაბამობის დასაძლევად აუცილებელია სითბოს ხანგრძლივი შენახვის ტექნოლოგიების გამოყენება, რაც განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია გათბობის სეზონზე მზის ენერგიის ეფექტიანი გამოყენებისთვის.

თავში კლასიფიცირებულია სითბური ენერგიის აკუმულირების ძირითადი მეთოდები: მგრძნობიარე სითბოს (Sensible Heat Storage), ფაზური გარდაქმნის (Latent Heat Storage) და თერმოქიმიური (Thermochemical Storage) აკუმულირება. განხილულია მათი მუშაობის პრინციპები, გამოყენებული მასალები, ტექნიკური მახასიათებლები, უპირატესობები და შეზღუდვები. შედარებითი ანალიზი შესრულებულია ენერგოტევადობის, ექსპლუატაციის ხანგრძლივობის, ტექნიკური სირთულისა და ეკონომიკური ეფექტიანობის მიხედვით. განსაკუთრებული ყურადღება დაეთმო მგრძნობიარე სითბოს აკუმულირების სისტემებს, რომელთა პრინციპზეა დაფუძნებული დისერტაციაში შემუშავებული მაღალტემპერატურული სეზონური სითბოს დამაგროვებელი.

განხილულია მაღალტემპერატურული სეზონური სითბოს დამაგროვებლების კონსტრუქციული სქემები, ძირითადი ელემენტები და ფუნქციონირების ეტაპები - სითბოს მიღება, დაგროვება, შენახვა და მომხმარებლისთვის მიწოდება. გაანალიზებულია თბოსაიზოლაციო ფენების გავლენა სითბურ დანაკარგებზე და დამაგროვებლის ეფექტიანობაზე. ასევე შეფასებულია ინერტული და თბოსაიზოლაციო მასალების ძირითადი თბოტექნიკური მახასიათებლები, მათ შორის თბოგამტარობა, სითბოტევადობა, სიმკვრივე და თერმული მდგრადობა. განსაკუთრებული ყურადღება დაეთმო ადგილობრივი მასალების გამოყენების შესაძლებლობებს. გაანალიზებულია მათი ტექნიკური მახასიათებლები და თანამედროვე თბოსაიზოლაციო მასალებთან ერთობლივი გამოყენების პოტენციალი. დადგენილია, რომ ადგილობრივი ინერტული მასალის გამოყენება შესაბამის თბოსაიზოლაციო სისტემასთან კომბინაციაში წარმოადგენს დამაგროვებლის კონსტრუქციის სრულყოფისა და მისი ეკონომიკური ეფექტიანობის გაუმჯობესების პერსპექტიულ მიმართულებას.

ლიტერატურული მიმოხილვისა და საერთაშორისო პრაქტიკის ანალიზის საფუძველზე გამოვლენილია სეზონური სითბოს შენახვის სისტემების ძირითადი ტექნიკური გამოწვევები, მათ შორის სითბური დანაკარგების შემცირება, მასალების ოპტიმალური შერჩევა და კონსტრუქციული გადაწყვეტების გაუმჯობესება. აღნიშნულმა ანალიზმა განსაზღვრა შემდგომი კვლევის მიმართულება - ადგილობრივი ინერტული და თანამედროვე თბოსაიზოლაციო მასალების გამოყენებით მაღალტემპერატურული სეზონური სითბოს დამაგროვებლის ეფექტიანობის ამაღლება.

თავი IV. მზის კოლექტორები სითბოს დამაგროვებლებთან

ერთობლიობაში შენობების თბომომარაგებისათვის

მეოთხე თავში გამოკვლეულია მზის კოლექტორებისა და მაღალტემპერატურული სეზონური სითბოს დამაგროვებლის ერთობლივი მუშაობის შესაძლებლობები შენობების ავტონომიური თბომომარაგების სისტემებში. შემუშავებულია სისტემის ფუნქციური სქემა, რომელშიც განსაზღვრულია მზის კოლექტორების, სითბოს დამაგროვებლის,

თბოგადამცემების, ცირკულაციის სისტემის, ავტომატური მართვისა და დამხმარე მოწყობილობების ურთიერთქმედება. გაანალიზებულია სითბოს მიღების, დაგროვების, შენახვისა და მომხმარებლისთვის მიწოდების ძირითადი რეჟიმები.

კვლევის შედეგად დადგენილია, რომ მზის კოლექტორების მიერ გამომუშავებული ჭარბი თბური ენერგიის სეზონურ დამაგროვებელში აკუმულირება ქმნის შესაძლებლობას, შემცირდეს ენერგიის გამომუშავებისა და მოხმარების პერიოდებს შორის არსებული დროითი შეუსაბამობის გავლენა და დაგროვილი ენერგია გამოყენებულ იქნეს გათბობის სეზონზე. შეფასებულია სისტემის მუშაობის სხვადასხვა რეჟიმი და გამოვლენილია ის პირობები, რომლებიც განსაზღვრავს მზის ენერგიის ეფექტიან გამოყენებასა და დამაგროვებელში სითბოს შენარჩუნებას.

დამაგროვებლის თბოსაიზოლაციო სისტემის კვლევის ფარგლებში შეფასებულია სხვადასხვა თბოსაიზოლაციო გადაწყვეტის გავლენა სითბურ დანაკარგებზე. დადგენილია, რომ თბოსაიზოლაციო ფენების თბოტექნიკური მახასიათებლები, სისქე და კონსტრუქციული განლაგება მნიშვნელოვან გავლენას ახდენს დამაგროვებლის თერმულ რეჟიმზე და დაგროვილი სითბოს შენარჩუნების ხანგრძლივობაზე. ასევე გამოვლენილია ადგილობრივი ინერტული მასალის გამოყენების შესაძლებლობა დამაგროვებლის კონსტრუქციაში თანამედროვე თბოსაიზოლაციო მასალებთან კომბინაციაში.

ჩატარებული თეორიული და საინჟინრო გაანგარიშებების საფუძველზე შეფასებულია შემოთავაზებული კონსტრუქციული გადაწყვეტის ენერგეტიკული მაჩვენებლები და განსაზღვრულია მისი შემდგომი ექსპერიმენტული კვლევის ძირითადი პირობები. მიღებული შედეგები მიუთითებს, რომ ადგილობრივი ინერტული მასალისა და ეფექტიანი თბოსაიზოლაციო სისტემის კომბინაცია წარმოადგენს დამაგროვებლის თბური დანაკარგების შემცირებისა და ენერგოეფექტიანობის გაუმჯობესების ტექნიკურად დასაბუთებულ მიმართულებას.

მეოთხე თავში მიღებული შედეგები გამოყენებულია ექსპერიმენტული კვლევის მეთოდის, სამუშაო რეჟიმებისა და შეფასების კრიტერიუმების განსაზღვრისათვის. აღნიშნული კვლევითი ეტაპი წარმოადგენს თეორიული

მოდელისა და კონსტრუქციული გადაწყვეტის ექსპერიმენტული შემოწმების საფუძველს, რაც განხილულია მეხუთე თავში.

თავი V. მაღალტემპერატურული სითბოს დამაგროვებლის თბოტექნიკური მახასიათებლების ექსპერიმენტული შესწავლა

მეხუთე თავში წარმოდგენილია მაღალტემპერატურული სითბოს დამაგროვებლის თბოტექნიკური მახასიათებლების ექსპერიმენტული კვლევის შედეგები. კვლევის მიზანს წარმოადგენდა დისერტაციაში შემუშავებული თეორიული მიდგომების პრაქტიკული შემოწმება, დამაგროვებლის მუშაობის რეჟიმების შეფასება და ადგილობრივი ინერტული და თანამედროვე თბოსაიზოლაციო მასალების გამოყენების ეფექტიანობის განსაზღვრა. დასახული მიზნის მისაღწევად შემუშავებული და დამზადებული იქნა ექსპერიმენტული დანადგარი, რომლის საშუალებითაც შესწავლილი იქნა დამაგროვებლის მუშაობა სხვადასხვა სამუშაო რეჟიმში და განსაზღვრული იქნა მისი ძირითადი თბოტექნიკური პარამეტრები.



ნახ. 2. ექსპერიმენტული დანადგარის აწყობისა და კონსტრუქციული ელემენტების მომზადების ეტაპები

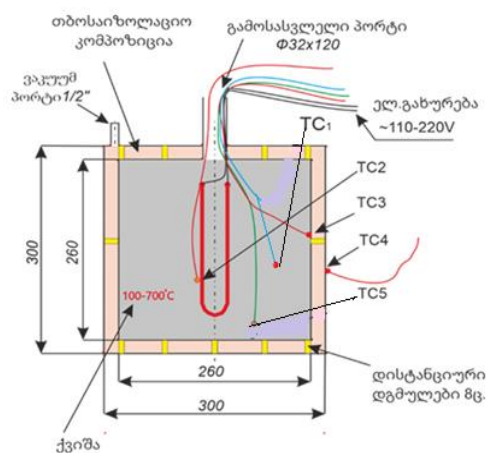
თავში აღწერილია ექსპერიმენტული დანადგარის კონსტრუქცია, გამოყენებული მოწყობილობები და საზომი ხელსაწყოები, აგრეთვე კვლევის

ჩატარების მეთოდის. წარმოდგენილია ექსპერიმენტის ეტაპები, გაზომვის პირობები და მიღებული მონაცემების დამუშავების პრინციპები.



ნახ. 3. ექსპერიმენტული დანადგარის საერთო სახე და ძირითადი კომპონენტები

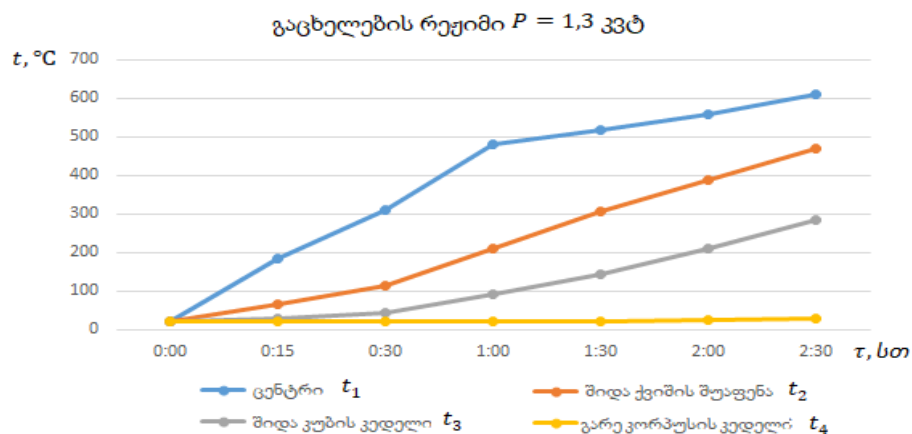
განსაკუთრებული ყურადღება დაეთმო ტემპერატურული რეჟიმების ცვლილებას, სითბოს დაგროვების, შენარჩუნებისა და გაცემის პროცესების შეფასებას. ექსპერიმენტების მიმდინარეობისას დამაგროვებლის სხვადასხვა საკონტროლო წერტილში აღირიცხა ტემპერატურის ცვლილება, რამაც შესაძლებელი გახდა დამაგროვებელში სითბოს გავრცელების დინამიკისა და თბური რეჟიმების შეფასება.



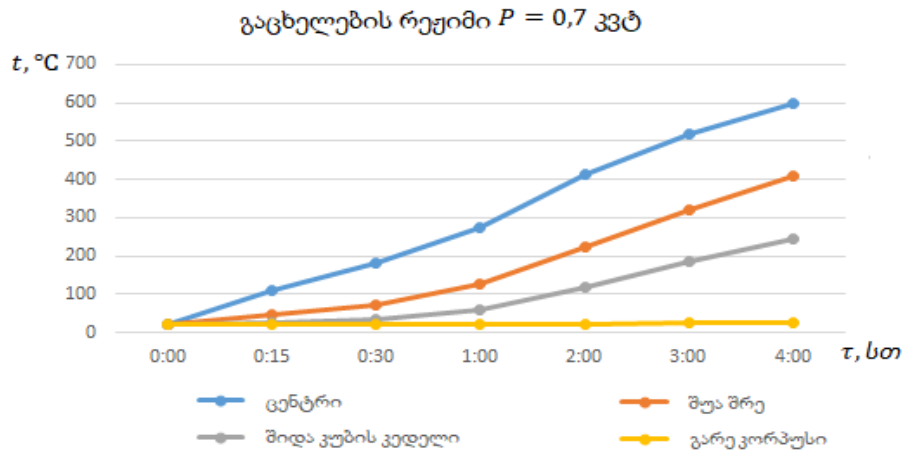
ნახ. 4. ექსპერიმენტული დანადგარის კონსტრუქციული სქემა და ძირითადი პარამეტრები

ექსპერიმენტული კვლევის ფარგლებში შეფასებულია სხვადასხვა თბოსაიზოლაციო მასალის გავლენა დამაგროვებლის თბოტექნიკურ და ენერგეტიკულ მახასიათებლებზე. ჩატარებული გაზომვების საფუძველზე დადგენილია, რომ თბოსაიზოლაციო ფენის კონსტრუქციული გადაწყვეტა მნიშვნელოვან გავლენას ახდენს სითბური დანაკარგების ინტენსივობასა და დაგროვილი ენერგიის შენარჩუნების ხანგრძლივობაზე. მიღებული შედეგების ანალიზმა აჩვენა, რომ ადგილობრივი ინერტული მასალის თანამედროვე თბოსაიზოლაციო მასალებთან კომბინირებული გამოყენება აუმჯობესებს დამაგროვებლის თბოტექნიკურ მახასიათებლებს, ამცირებს სითბურ დანაკარგებს და ზრდის სისტემის ენერგოეფექტიანობას.

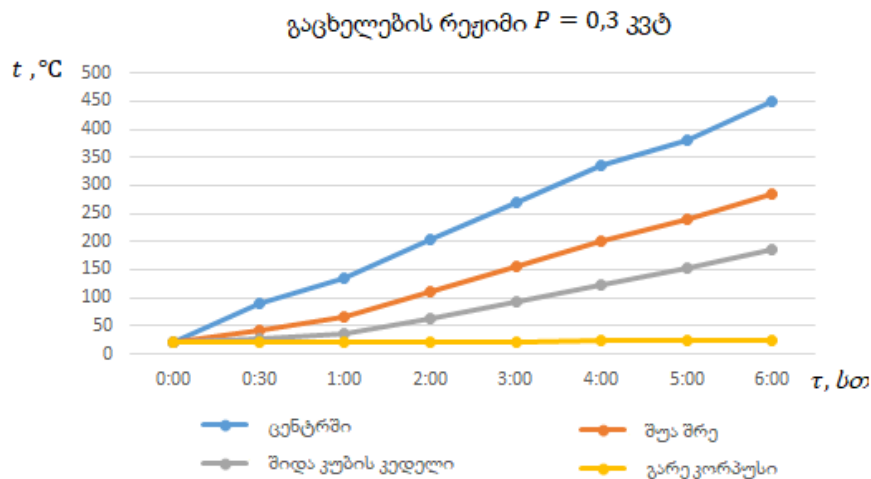
კვლევის პროცესში მიღებული ექსპერიმენტული მონაცემები შედარებულია თეორიული გაანგარიშებების შედეგებთან. შედარებითმა ანალიზმა აჩვენა თეორიული მოდელისა და ექსპერიმენტული შედეგების მაღალი შესაბამისობა, რაც ადასტურებს გამოყენებული მიდგომის სანდოობას. მიღებული შედეგების საფუძველზე გამოვლენილია დამაგროვებლის მუშაობის ეფექტიანობაზე მოქმედი ძირითადი ფაქტორები და განსაზღვრულია მათი ოპტიმალური მნიშვნელობები. ექსპერიმენტული კვლევის შედეგები ადასტურებს, რომ შემოთავაზებული კონსტრუქციული გადაწყვეტა ხელს უწყობს სითბური დანაკარგების შემცირებას და სეზონური სითბოს დაგროვების ეფექტიანობის ამაღლებას.



ნახ. 5. ექსპერიმენტული დანადგარის ტემპერატურის ცვლილება დროში $P = 1.3$ კვტ სიმძლავრის პირობებში



ნახ.6. ექსპერიმენტული დანადგარის ტემპერატურის ცვლილება დროში $P = 0.7$ კვტ სიმძლავრის პირობებში



ნახ. 7. ექსპერიმენტული დანადგარის ტემპერატურის ცვლილება დროში $P = 0.3$ კვტ სიმძლავრის პირობებში

მეხუთე თავში წარმოდგენილი კვლევის შედეგების საფუძველზე შემუშავებულია პრაქტიკული რეკომენდაციები მაღალტემპერატურული სეზონური სითბოს დამაგროვებლების კონსტრუირების, თბოსაიზოლაციო მასალების შერჩევისა და ავტონომიური თბომომარაგების სისტემების პროექტირებისათვის. დადგენილია, რომ ადგილობრივი რესურსების გამოყენება თანამედროვე თბოსაიზოლაციო ტექნოლოგიებთან კომბინაციაში ქმნის სისტემის ღირებულების შემცირების, საექსპლუატაციო მაჩვენებლების გაუმჯობესებისა და შენობების თბომომარაგებაში განახლებადი ენერგიის წყაროების გამოყენების ეფექტიანობის ამაღლების შესაძლებლობას.

VI თავი. კვლევის გამოყენებითი მნიშვნელობა და დანერგვის საჭიროება საქართველოს პირობებში

მეექვსე თავში განხილულია კვლევის გამოყენებითი მნიშვნელობა და საქართველოში მაღალტემპერატურული სეზონური სითბოს დამაგროვებლის დანერგვის პერსპექტივები. კვლევის შედეგებზე დაყრდნობით დასაბუთებულია, რომ საჩხერის სამშენებლო ქვიშა შეიძლება გამოყენებულ იქნეს მაღალტემპერატურული სითბოს დამაგროვებლის მყარ მუშა სხეულად. შემუშავებული ექსპერიმენტული მეთოდика, მათემატიკური მოდელი და კონცეპტუალური პროექტები ქმნის საინჟინრო საფუძველს სხვადასხვა მოცულობისა და დანიშნულების სითბოს დამაგროვებელი სისტემების დაპროექტებისა და მოდერნიზებისათვის.

განსაზღვრულია ტექნოლოგიის გამოყენების ძირითადი სფეროები, მათ შორის ინდივიდუალური საცხოვრებელი სახლები, საზოგადოებრივი შენობები, მცირე სასტუმროები, აგროსამრეწველო და მცირე საწარმოო ობიექტები. შეფასებულია სითბოს დამაგროვებლის ინტეგრირების შესაძლებლობა მზის ფოტოელექტრულ და მზის თერმულ სისტემებთან, რაც იძლევა განახლებადი ენერგიის ჭარბი რესურსის სითბურ ენერგიად გარდაქმნის, დაგროვებისა და გათბობის სეზონზე მისი გამოყენების შესაძლებლობას.

შეფასებულია შემოთავაზებული ტექნოლოგიის ეკონომიკური და გარემოსდაცვითი პოტენციალი. ადგილობრივი ნედლეულის გამოყენება ამცირებს იმპორტირებულ მასალებზე დამოკიდებულებას და ქმნის სისტემის მოწყობისა და ექსპლუატაციის ხარჯების შემცირების შესაძლებლობას. ამასთან, განახლებადი ენერგიის წყაროების გამოყენების გაფართოება ხელს უწყობს ენერგიის რაციონალურ მოხმარებას, წიაღისეულ საწვავზე დამოკიდებულებისა და სათბურის აირების ემისიების შემცირებას. ტექნოლოგიის გამოყენება განსაკუთრებით პერსპექტიულია საქართველოს მაღალმთიან და ნახევრადმთიან რეგიონებში, სადაც გათბობის ხანგრძლივი სეზონი ზრდის სეზონური სითბოს შენახვის პრაქტიკულ მნიშვნელობას.

კვლევის შედეგების პრაქტიკული რეალიზაციის მიზნით შემოთავაზებულია საპილოტე დანერგვის მოდელი 100–120 მ² ფართობის

ინდივიდუალურ საცხოვრებელ სახლში. მოდელი ითვალისწინებს მზის ენერგიის სისტემის, ელექტროგამაცხელებლის, საჩხერის სამშენებლო ქვიშით შევსებული მაღალტემპერატურული სითბოს დამაგროვებლის, გათბობის სისტემისა და ავტომატური მართვისა და მონიტორინგის საშუალებების ინტეგრირებას. საპილოტე ობიექტზე რეკომენდებულია სისტემის მუშაობის მონიტორინგი არანაკლებ ერთი სრული გათბობის სეზონის განმავლობაში, რათა განისაზღვროს მისი ენერგეტიკული, ეკონომიკური და საექსპლუატაციო მაჩვენებლები და შეფასდეს ტექნოლოგიის შემდგომი მასშტაბირების შესაძლებლობა.

ამრიგად, კვლევის შედეგები მიუთითებს, რომ საჩხერის სამშენებლო ქვიშაზე დაფუძნებული მაღალტემპერატურული სეზონური სითბოს დამაგროვებელი წარმოადგენს საქართველოს პირობებში პერსპექტიულ ტექნოლოგიურ გადაწყვეტას. მისი საპილოტე დანერგვა საშუალებას იძლევა პრაქტიკულად გადამოწმდეს შემუშავებული ტექნიკური გადაწყვეტების ეფექტიანობა და შეფასდეს მათი ენერგეტიკული, ეკონომიკური და საექსპლუატაციო მაჩვენებლები, რაც შექმნის საფუძველს ტექნოლოგიის შემდგომი სრულყოფისა და მასშტაბირებისათვის.

VII თავი. ტექნიკურ-ეკონომიკური და გარემოსდაცვითი შეფასების

მეთოდика

მეშვიდე თავში შემუშავებულია საჩხერის სამშენებლო ქვიშაზე დაფუძნებული მაღალტემპერატურული სითბოს დამაგროვებლის ტექნიკური, ეკონომიკური და გარემოსდაცვითი შეფასების მეთოდика. განსაზღვრულია სისტემის ენერგოეფექტიანობის, სითბური დანაკარგების, დამუხტვა-განმუხტვის პროცესებისა და შენობის თბური მოთხოვნის შეფასების ძირითადი მიდგომები. ტექნიკურ-ეკონომიკური ანალიზის ფარგლებში გათვალისწინებულია სისტემის სასიცოცხლო ციკლის ხარჯები და გამოყენებულია ისეთი ეკონომიკური მაჩვენებლები, როგორიცაა ამოსყიდვის პერიოდი, წმინდა მიმდინარე ღირებულება (NPV) და დათანაბრებული სითბოს ღირებულება (LCOH).

თავში ასევე შემუშავებულია სისტემის ეფექტიანობის მაჩვენებლებისა და მონიტორინგის მიდგომა, რომელიც ითვალისწინებს დამაგროვებლის

ტემპერატურული ველის, დაგროვილი და მომხმარებლისთვის მიწოდებული სითბური ენერგიის, სითბური დანაკარგების, დამუხტვა-განმუხტვის ეფექტიანობისა და სარეზერვო ენერგიის წყაროს გამოყენების უწყვეტ კონტროლს. აღნიშნული მონაცემების საფუძველზე შესაძლებელია ექსპერიმენტული და თეორიული შედეგების შედარება, სისტემის მუშაობის შეფასება და მისი ოპტიმიზაციის მიმართულებების განსაზღვრა.

განხილულია აგრეთვე დამაგროვებლის უსაფრთხო და საიმედო ექსპლუატაციის ძირითადი მოთხოვნები. განსაკუთრებული ყურადღება ეთმობა მაღალტემპერატურული რეჟიმების კონტროლს, ეფექტიან თბოიზოლაციას, ელექტრო და მექანიკურ უსაფრთხოებას, ავტომატური ავარიული დაცვის სისტემებისა და პერიოდული ტექნიკური მომსახურების უზრუნველყოფას. შეფასებულია ტექნოლოგიის გარემოსდაცვითი ეფექტიანობის პოტენციალი, კერძოდ, განახლებადი ენერგიის გამოყენებით წიაღისეული საწვავის ჩანაცვლებისა და სათბურის აირების ემისიების შემცირების შესაძლებლობა.

ამრიგად, მეშვიდე თავში შემუშავებული კომპლექსური შეფასების მეთოდიკა ქმნის საფუძველს საჩხერის სამშენებლო ქვიშაზე დაფუძნებული მაღალტემპერატურული სითბოს დამაგროვებლის ტექნიკური საიმედოობის, ეკონომიკური მიზანშეწონილობისა და გარემოსდაცვითი ეფექტიანობის შეფასებისათვის და საქართველოს პირობებში მისი პრაქტიკული დანერგვის შესაძლებლობების განსაზღვრისათვის.

დასკვნა

წინამდებარე სადისერტაციო ნაშრომში განხილულ იქნა მზის ენერგიაზე დაფუძნებული ავტონომიური თბომომარაგების სისტემები და მათთან ინტეგრირებული სეზონური სითბოს დაგროვების ტექნოლოგიები. ჩატარებული თეორიული ანალიზისა და ექსპერიმენტული კვლევის საფუძველზე შეიძლება შემდგი დასკვნის გამოტანა:

1. ავტონომიური თბომომარაგების სისტემები წარმოადგენს შენობების ენერგომომარაგების ეფექტურ ალტერნატივას, რადგან უზრუნველყოფს ენერგოდამოუკიდებლობის ზრდას, სითბური დანაკარგების შემცირებას და განახლებადი ენერგიის წყაროების ინტეგრაციის შესაძლებლობას.
2. ლიტერატურის ანალიზისა და საერთაშორისო გამოცდილების შესწავლის საფუძველზე დადასტურდა, რომ მზის ენერგიის ფართომასშტაბიანი გამოყენების ერთ-ერთ მთავარ შეზღუდვას წარმოადგენს ენერგიის სეზონური არათანაბარი გამომუშავება, რომლის ეფექტური გადაჭრის საშუალებაა სეზონური სითბოს დაგროვების სისტემების გამოყენება.
3. კვლევის ფარგლებში შემუშავდა და დამზადდა მაღალტემპერატურული სითბოს დამაგროვებლის ექსპერიმენტული მოდელი, რომლის საშუალებით განხორციელდა დამუხტვისა და განმუხტვის პროცესების, ტემპერატურული ველის განაწილებისა და სითბური დანაკარგების დეტალური შესწავლა.
4. ექსპერიმენტულმა შედეგებმა დაადასტურა, რომ ვაკუუმური და ფხვნილოვანი თბოიზოლაციის კომბინირებული გამოყენება მნიშვნელოვნად ამცირებს სითბოს დანაკარგებს და უზრუნველყოფს დაგროვილი ენერგიის ხანგრძლივად შენარჩუნებას, ხოლო თერმოსის ტიპის კონსტრუქცია წარმოადგენს ეფექტურ საინჟინრო გადაწყვეტას მაღალტემპერატურული სითბოს აკუმულაციისათვის.
5. ჩატარებულმა კვლევამ ასევე დაადასტურა, რომ სისტემის საერთო ეფექტურობა მნიშვნელოვნად არის დამოკიდებული თბოიზოლაციის ხარისხზე, დამაგროვებლის გეომეტრიულ ფორმაზე, მუშა სხეულის ფიზიკურ თვისებებსა და მართვის ალგორითმზე. შესაბამისად, სეზონური სითბოს დამაგროვებლების პროექტირებისას გადამწყვეტი მნიშვნელობა ენიჭება არა მხოლოდ მუშა

სხეულის სწორ შერჩევას, არამედ თბოგადაცემისა და სითბური დანაკარგების ოპტიმიზაციას.

6. მიღებული ექსპერიმენტული მონაცემების საფუძველზე შემუშავდა უფრო დიდი მოცულობის სითბოს დამაგროვებლის ოთხი კონცეპტუალური პროექტი, რომლებიც ადასტურებენ, რომ წარმოდგენილი ტექნოლოგიის მასშტაბირება ტექნიკურად შესაძლებელია, როგორც ინდივიდუალური საცხოვრებელი სახლებისთვის, ასევე საზოგადოებრივი და მცირე სამრეწველო ობიექტებისთვის.
7. შემდგომი კვლევების ფარგლებში მიზანშეწონილია განხორციელდეს უფრო დიდი მოცულობის საპილოტე სითბოს დამაგროვებლის შექმნა, მისი რეალურ საცხოვრებელ ან საზოგადოებრივ ობიექტზე გამოცდა, საქართველოს სხვადასხვა რეგიონში მოპოვებული ფხვიერი მინერალების გამოყენებით და მიღებული შედეგების ფართომასშტაბიანი ტექნიკურ-ეკონომიკური შეფასება.

დისერტაციის თემაზე გამოქვეყნებული ნაშრომების სია:

1. კახიანი ს., რობაქიძე ლ., მაზანიშვილი ბ., გვენცაძე დ. თბოსაიზოლაციო პანელებში ადგილობრივი მინერალური ნედლეულის გამოყენების შესაძლებლობები. „ენერგია“, 2025, N2(113), გვ. 47-54;
2. Kakhiani S. Georgia's Innovation Potential in Renewable Energy Technology Development: Opportunities for the Use of Local Resources. Danish Scientific Journal, 2026.
3. კახიანი ს., ჭილაძე ს., რობაქიძე ლ. მაღალტემპერატურული სეზონური სითბოს აკუმულირების ადგილობრივ რესურსებზე დაფუძნებული მიდგომა ავტონომიური თბომომარაგებისთვის. „ენერგია“, 2026, N2(116).

Abstract

The subject of the doctoral research is the study of the efficiency of heat storage systems for autonomous heat supply and the assessment of their potential for practical implementation and application.

Chapter I provides a general overview of autonomous heat supply systems. Their relevance is attributed to the potential for energy independence and the integration of renewable energy sources. The practices of autonomous heating systems in European countries, predominantly using natural gas boilers, are reviewed. According to 2023 data, 62.5% of the energy consumed by households in the European Union was used for heating, of which only 33% was covered by renewable energy sources. According to Geostat data for 2024, 54.6% of natural gas consumed in the communal sector in Georgia was used for heating, which is 1.85 times higher than the average share of energy consumption for heating in the EU residential sector (29.5%). This difference is mainly associated with the low energy efficiency of residential buildings in Georgia. The main components and development prospects of autonomous heating systems are also discussed.

Chapter II examines the energy transition from carbon-intensive energy sources to renewable energy under conditions of global climate change. It is noted that the energy sector is one of the major sources of greenhouse gas emissions, while a significant share of energy demand is associated with low-temperature heat, including space heating and domestic hot water supply. The potential of solar, wind, and geothermal energy is discussed, with particular emphasis on solar energy. The main types of solar collectors, their operating principles and applications are reviewed, together with configurations of integrated solar energy systems and the current state of solar thermal energy development.

Chapter III substantiates the need for seasonal thermal energy storage for the integration of renewable energy sources into energy systems. The challenges associated with balancing energy supply and demand due to the variable nature of solar and wind energy are discussed. The main heat storage mechanisms—sensible heat, latent heat, and thermochemical storage—are reviewed. Different types of seasonal thermal energy storage systems, their applications, advantages, and limitations are described. Methods for selecting thermal insulation materials and products are also presented, along with an assessment of the influence of storage volume and geometry on heat losses.

Chapter IV discusses integrated systems combining solar collectors with seasonal thermal energy storage, enabling excess heat generated during the summer period to be utilized during winter. Various system configurations, operating principles, and applications are presented. The necessity of a backup heat source, including gas or electric boilers, to compensate for insufficient energy supply and cover peak loads is emphasized. Examples of large-scale projects implemented worldwide demonstrate the technical feasibility and economic viability of seasonal thermal energy storage systems.

Chapter V presents the results of an experimental investigation of a high-temperature heat storage system using construction sand as a solid sensible heat storage medium. An experimental model, similar to a Dewar vessel, was designed and manufactured and equipped with an electric heat source and thermocouples for

temperature measurements. A methodology for maintaining a constant temperature at the center of the storage unit and regulating the input power was developed. Based on this methodology, the temperature dependence of heat losses was experimentally determined under different temperature regimes and thermal insulation configurations, including vacuum insulation panels (VIPs). The obtained data were used to evaluate the effect of insulation thickness on overall heat losses and to develop recommendations for selecting optimal thermal insulation. Based on the experimental results, four conceptual storage system designs with different shapes, volumes, and energy capacities were developed, and indicative costs for their design, materials, manufacturing, and implementation were estimated.

Chapter VI substantiates the technical and practical prospects of using a high-temperature seasonal heat storage system based on construction sand from Sachkhere under Georgian conditions. Potential application areas are identified, including residential, public, and small industrial buildings, particularly when integrated with photovoltaic and solar thermal systems. The economic, social, and environmental significance of the technology is assessed. The use of locally available raw materials can reduce dependence on imported materials, facilitate the effective utilization of renewable energy, and decrease dependence on fossil fuels. The implementation of a pilot system for a residential building with an area of 100–120 m² is proposed, with monitoring intended to evaluate its energy, economic, and operational performance.

Chapter VII presents a methodology for the techno-economic and environmental assessment of a high-temperature heat storage system based on construction sand from Sachkhere. The main indicators for evaluating energy efficiency, economic feasibility, and environmental performance are defined, together with monitoring and safe operation requirements. Based on the obtained results, the practical applicability of the proposed heat storage system under Georgian conditions is assessed.

Overall, the research results confirm the technical feasibility and development potential of a high-temperature seasonal heat storage system based on construction sand from Sachkhere under Georgian conditions and provide a basis for the development of energy-efficient, economically accessible, and environmentally sustainable autonomous heat supply systems.