

მოდელურ გვირაბში ხანძრის განვითარების სცენარების ანალიზი სიცოცხლის გადარჩენის მიზნით რეალურ მიწისქვეშა სივრცეში

დავით ცანავა

დოქტორანტი, საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

აბსტრაქტი

გვირაბის კრიტიკულ მონაკვეთებზე სუფთა ჰაერის ხანგრძლივი დროით შენარჩუნებისა და ევაკუაციის პერიოდის გაზრდის იდეა ეფუძნება გვირაბის აეროდინამიკური წინაღობის ხელოვნურად გაზრდას ტრანსფორმირებადი სისტემის მეშვეობით, რომელიც შეაფერხებს წვის პროდუქტების გავრცელებას და არ შეაფერხებს ადამიანების გადაადგილებას, აგრეთვე ხელს შეუწყობს სუფთა და გაჟუჭყიანებული ჰაერის ნაკადების ერთმანეთისაგან გამიჯვნას. იდეის რეალიზაცია მრავალ კომპონენტურა დამოკიდებული, რომელთა შორის აღსანიშნავია ხანძრის სიმძლავრე და მისი განვითარების სცენარი, გამოყოფილი ტოქსიკური ნაერთების სახეობა და გავრცელების ხასიათი, გვირაბის გეომეტრია და ვენტილაციის სისტემა. ტრანსფორმირებადი სისტემის გამოყენება ნიშნავს ცეცხლგამძლე ბარიერებით გვირაბების მოკლე უბნებად დაყოფას ხანძრისა და მისი დამაზიანებელი ფაქტორების გავრცელების შეფერხებისათვის. ხაზგასმით აღსანიშნავია, რომ გვირაბის მოკლე უბნებად დაყოფის აღნიშნული ხერხის გამოყენება საქართველოში მოქმედი და მშენებარე გვირაბების საპროექტო გადაწყვეტებში გათვალისწინებული არ არის. კერძოდ, საქართველოში უახლოეს 3-5 წელიწადში უნდა აშენდეს 50-ზე მეტი საავტომობილო გვირაბი, რომელთა საპროექტო გადაწყვეტების თანახმად, მოსალოდნელი საფრთხის ერთადერთი რისკ-ფაქტორია ხანძარი, ხოლო უსაფრთხოების ღონისძიებები არ ითვალისწინებენ გვირაბების ოპერატიული დაყოფის შესაძლებლობას. აქედან გამომდინარე, აღნიშნული საკითხი ძალზე აქტუალურია საქართველოს პირობებისათვის. თეორიულ ანალიზს მოითხოვს კრიტიკული სიჩქარისა და უკუდინების სიგრძის კორელაცია ხანძრის მაჩვენებლებთან ტრანსფორმირებადი სისტემის გავლენის გარეშე და მისი გავლენის მხედველობაში მიღებით. აღნიშნული გათვალისწინებული უნდა იქნეს გვირაბის მომსახურე პერსონალისა და მშველების მიერ უბედურების ზონაში მოქცეული ადამიანების ევაკუაციის საკითხის გადაწყვეტისას.

საკვანძო სიტყვები: გვირაბის ვენტილაცია; მიწისქვეშა ხანძარი; ფიზიკური მოდელი; ტრანსფორმირებადი სისტემა; სიცოცხლის გადარჩენა.

1. შესავალი

საქალაქო და საავტომობილო ტრანსპორტისათვის, ისე როგორც სარკინიგზო მიმოსვლისა და სამთო მრეწველობისათვის გვირაბები განუყოფელი ნაწილია თანამედროვე პირობებში. ამიტომ გვირაბების უსაფრთხოება დიდად მნიშვნელოვანია, ხოლო სავენტილაციო სისტემები უსაფრთხოების უზრუნველყოფაში დიდ როლს თამაშობენ, განსაკუთრებით გამოკვეთილია აღნიშნული ხანძრით გამოწვეული საგანგებო სიტუაციების დროს. საქართველოში უახლოეს 3-5 წელიწადში უნდა აშენდეს 50-ზე მეტი საავტომობილო გვირაბი, რომელთა საპროექტო გადაწყვეტების თანახმად, მოსალოდნელი საფრთხის ერთადერთი რისკ-ფაქტორია ხანძარი. ხანძრის კრიტიკული სიჩქარე არის ერთ-ერთი ძირითადი მახასიათებელი, რომელიც გავლენას ახდენს გვირაბის ვენტილაციის კონსტრუქციაზე. აღნიშნული სიჩქარე არის ვენტილაციის მინიმალური გრძივი სიჩქარე, რომელიც გამორიცხავს კვამლის შესაძლო ნაკადის უკუდინებას, ანუ მის მოძრაობას გვირაბის შესასვლელისაკენ და შესაბამისად, ხელს უწყობს ევაკუაციას და ხანძრის ჩაქრობას.

არსებობს კრიტიკული სიჩქარისადმი მიძღვნილი მრავალი ექსპერიმენტული, ანალიზური და რიცხვითი კვლევა. თეორიული კვლევები ფოკუსირებული იყო თომასის კორელაციაზე და ფრუდის მასშტაბირების თეორიაზე [1, 2]. თომასმა შემოგვთავაზა ემპირიული ფორმულა ფრუდის კრიტიკული რიცხვის მიხედვით, რომელშიც კრიტიკული სიჩქარე პროპორციულია ხანძრის სითბოს გამოყოფის მაჩვენებლის $1/3$ ხარისხის (იხ. ფორმულები 7 და 8 ამ სტატიის მე-2 ნაწილში). ოკამ და ატკინსონმა ექსპერიმენტულად გამოიკვლიეს კრიტიკული სიჩქარე მოდელის მასშტაბურ გვირაბებში. მათ შემოგვთავაზეს უგანზომილებო კრიტიკული სიჩქარის გაანგარიშებისათვის გამოსაყენებელი ფორმულა, რომელიც არის სითბოს გამოყოფის მაჩვენებლის ფუნქცია, გვირაბის სიმაღლის გამოყენებით, რომელიც არის დამახასიათებელი სიგრძე [3].

ამის შემდეგ, ვუმ და ბაკარმა ექსპერიმენტულად გამოიკვლიეს კრიტიკული სიჩქარე სხვადასხვა განივკვეთის გვირაბებში. ოკასა და ატკინსონის საპირისპიროდ ისინი ამტკიცებდნენ, რომ გვირაბის სიმაღლე არ არის შესაფერისი არჩევანი დამახასიათებელი სიგრძისთვის და განსაზღვრეს, რომ გვირაბის გაოთხმაგებული განივი კვეთის ფართობის განაყოფი გვირაბის პერიმეტრზე უნდა იქნას გამოყენებული, როგორც დამახასიათებელი სიგრძე გვირაბის ხანძრების ანალიზისას. გვირაბის ხანძრებისას ჩვეულებრივ საჭიროა სითბოს მიმოცვლის თბოფიზიკური გაანგარიშება გარშემომცელ სამთო მასივთან [4, 5], ხოლო ვუ და ბაკარის ექსპერიმენტულ კვლევას იყენებენ რიცხვითი კვლევებით გამოთვლილი შედეგების დასადასტურებლად [6-8].

გამოთვლითი ინსტრუმენტების განვითარებამ ბოლო პერიოდში განაპირობა, კრიტიკული სიჩქარის შესწავლის დიდი ნაწილის მიძღვნა რიცხვითი კვლევების ჩატარებაზე [8-14]. არსებობს სხვადასხვა რიცხვითი კვლევები კრიტიკული სიჩქარისა და გვირაბის სახანძრო მახასიათებლების ეფექტური პარამეტრების კორელაციის შესახებ. აღნიშნული პარამეტრებია მაგალითად გვირაბის გეომეტრია და დახრილობა, ხანძრის წყაროს ზომა და ადგილმდებარეობა (გვირაბის იატაკის ღერძულა ხაზი ან კედლების მახლობლად), სავენტილაციო სისტემები და ხანძარსაწინააღმდეგო მოწყობილობები,

ავტომობილებით ბლოკირების ადგილი და გვირაბის ეკვივალენტური რადიუსი. ცნობილია, რომ გვირაბის ავტომობილებით ჩახერგვა ამცირებს კრიტიკულ სიჩქარეს. გვირაბის ბლოკირების ერთ-ერთი სახეა ტრანსფორმირებადი სისტემების გამოყენება, რომლებიც აგრეთვე ამცირებენ კრიტიკულ სიჩქარეს და ხელს უწყობენ სიცოცხლის გადარჩენას [15-19].

წინამდებარე სტატიაში განხილული პრობლემის არსი არის ჰაერის ნაკადების აეროდინამიკის ცვალებადობის კანონზომიერებებისა და ვენტილაციის მნიშვნელოვანი ტექნოლოგიური პარამეტრების დადგენა გვირაბში ხანძრის გავლენით, როცა ცვალებადია გვირაბის დახრილობა, სითბოს გამოყოფის მაჩვენებელი, გვირაბის განივი კვეთი, გვირაბის სიგანის ფარდობა სიმაღლესთან, გვირაბის ტრანსპორტით შევსების კოეფიციენტი, აგრეთვე გართულებულია გვირაბის აეროდინამიკა დამატებითი წინაღობების ჩართვით.

2. მოდელები და ანალიზის მეთოდოლოგია

2.1. ფიზიკური მოდელების აღწერა

ფრუდის კრიტერიუმით დამოდელების სტრატეგია ფართოდ გამოიყენება ხანძრების ექსპერიმენტებში. მისი განსაკუთრებულობა ისაა, რომ ფრუდის რიცხვი, რომელიც ახასიათებს ინერციულობისა და ტივტივადობის ძალებს, ექსპერიმენტში პირდაპირ იქნება შენარჩუნებული. ფრუდის მიხედვით მოდელების შემთხვევაში ტემპერატურათა ველი ერთნაირია, ხოლო სითბოს გამოყოფის მასშტაბი მოდელსა და ნატურას შორის გეომეტრიული მასშტაბის მიხედვით შემდეგნაირად გამოისახება

$$\frac{Q_m}{Q_n} = \left(\frac{\ell_m}{\ell_n} \right)^{\frac{5}{2}}, \tag{1}$$

$$\frac{u_m}{u_n} = \left(\frac{\ell_m}{\ell_n} \right)^{\frac{1}{2}}, \tag{2}$$

სადაც Q_m , Q_n - შესაბამისად არის კონვექციური სითბოს გამოყოფის მაჩვენებელი მოდელზე და ნატურაში, კვტ; ℓ_m , ℓ_n - გვირაბის სიგრძე მოდელზე და ნატურაში, მ; u_n , u_m - ჰაერის სიჩქარე მოდელზე და ნატურაში, მ/წმ.

ექსპერიმენტები შესრულდა გვირაბის ფიზიკურ მოდელებზე. შესწავლილი იქნა ხანძრის გავლენა გრძივი ვენტილაციის პირობებში კრიტიკულ სიჩქარეზე, უკუდინების სიგრძეზე და ვენტილაციის კოლაფსის მოსალოდნელობაზე ტრანსპორტისა და ტრანსფორმირებადი ელემენტების ჩართვით მოდელებზე და მათ გარეშე. ტრანსფორმირებადი ელემენტით გვირაბის კვეთის გადაფარვის მაჩვენებელი არის 0-50 % ფარგლებში. ყველა ექსპერიმენტისათვის საერთო არის ფიგ. 1-ზე მოცემული გვირაბის მოდელი.

2.2. ტრანსპორტით გვირაბის შევსების კოეფიციენტი

ტრანსპორტით გვირაბის შევსების კოეფიციენტი α სხვადასხვა ტიპის მოდელისათვის იანგარიშება ფორმულით

$$\alpha = \frac{F}{f}, \tag{3}$$

სადაც F არის ტრანსპორტის განივი კვეთი, მ²; f - გვირაბის განივი კვეთი, მ².

ტრანსპორტით გვირაბის შევსების კოეფიციენტის ცვალებადობის ფარგლები დაგეგმილ ექსპერიმენტებში არის 6.3-37.50 %.



ფიგ. 1. სტუ-ს ექსპერიმენტული გვირაბის მოდელი მასთან მიერთებული გადამწოდებით და საზომი მოწყობილობებით.

2.3. ჰაერის სიჩქარეები მოდელზე და ნატურაში

მოდელირებული საავტომობილო გვირაბისათვის ჰაერის ხარჯი იცვლება 20-150 მ³/სთ ფარგლებში. 20 მ³/სთ ჰაერის ხარჯის შემთხვევაში მოდელზე სიჩქარე იქნება $u_m = 0.185$ მ/წმ; რასაც (2) ფორმულის თანახმად შეესაბამება სიჩქარე ნატურაში $u_n = 1.2$ მ/წმ; 150 მ³/სთ ჰაერის ხარჯის შემთხვევაში მოდელზე სიჩქარე იქნება $u_m = 1.389$ მ/წმ; რასაც (2) ფორმულის თანახმად შეესაბამება სიჩქარე ნატურაში $u_n = 8.8$ მ/წმ. მოდელზე დაბალი სიჩქარეებით ნატურაში გაცილებით უფრო მაღალი სიჩქარეების უზრუნველყოფას განაპირობებს ფრუდის რიცხვი, რომელიც ამ მხრივ რადიკალურად განსხვავდება რეინოლდსის რიცხვისაგან.

2.4. სითბოს გამოყოფის მაჩვენებელი მოდელზე და ნატურაში

განსაკუთრებით გამოკვეთილია ფრუდის რიცხვით დამოძღვების მოსახერხებლობა სითბოს გამოყოფის მაჩვენებლის მოდელური და ნატურული სიდიდეების შედარების შემთხვევაში. კერძოდ, პიარკის რეკომენდაციების შესაბამისად, საავტომობილო გვირაბების სავენტილაციო სისტემები დაპროექტებული უნდა იყოს 30 მგვტ სიმძლავრის ხანძრის პროდუქტების განეიტრალებიდან გამომდინარე [20]. ფრუდის რიცხვის გამოყენებით 30 000 კვტ ხანძრის დამოძღვებას, ზემოთ მითითებული სათანადო მასშტაბის $M_Q = 0.0000988$ თანახმად, მოდელზე ესაჭიროება მხოლოდ 2.964 კვტ სიმძლავრე.

ზემოაღნიშნულიდან გამომდინარე, მოცემულ გვირაბის მოდელზე ვენტილაციის უფრო მეტი სიჩქარისა და ხანძრის უფრო მეტი სიმძლავრის დამოძღვების სიმარტივე და ოპერატიულად განხორციელების შესაძლებლობა მტკიცებას არ საჭიროებს, რადგან ამის გარეშეც აშკარაა. კერძოდ, ფრუდის კრიტერიუმის გამოყენებით შესაძლებელია ხანძრის ექსპერიმენტების ჩატარება შედარებით უსაფრთხო ნაკლები ტემპერატურების პირობებში.

2.5. გვირაბის დახრილობის უზრუნველყოფა

გვირაბის დახრილობის ფარგლებია $-10^\circ < s < 10^\circ$, ყოველი გრადუსი იძლევა 1.75 % დახრილობას. დახრილობის უზრუნველყოფა მოხდება სპეციალური ტელფერითა და მოდელის დამჭერი მოწყობილობებით. ჰორიზონტალური სიბრტყიდან მოდელის გადახრა გრადუსების მიხედვით მოცემულია ცხრილში 1.

ცხრილი 1. მოდელის ვერტიკალური გადახრა ჰორიზონტალური სიბრტყიდან $-10^\circ < s < 10^\circ$ დახრილობის უზრუნველსაყოფად

დახრის კუთხე, გრადუსი	ვერტ. მანძილი, მ	დახრის კუთხე, გრადუსი	ვერტ. მანძილი, მ	დახრის კუთხე, გრადუსი	ვერტ. მანძილი, მ	დახრის კუთხე, გრადუსი	ვერტ. მანძილი, მ
-1	-0.21	-6	-1.25	1	0.21	6	1.25
-2	-0.42	-7	-1.46	2	0.42	7	1.46
-3	-0.63	-8	-1.67	3	0.63	8	1.67
-4	-0.84	-9	-1.88	4	0.84	9	1.88
-5	-1.05	-10	-2.08	5	1.05	10	2.08

2.6. უკუდინების განსაზღვრა

უკუდინების განსაზღვრა ხდება ტემპერატურის მიხედვით, უჟანგავი ფოლადის k ტიპის თერმომოწყვილებით. თერმომოწყვილების განლაგება ჩანს ფიგ. 1-დან. კრიტიკული სიჩქარე განისაზღვრება უკუდინების სიგრძის ანალიზის გზით, სათანადო მრუდის ექსტრაპოლაციით. ყველა მოდელურ გვირაბში თერმომოწყვილები დამონტაჟებული არის ჭერს ქვემოთ 20 მმ დაშორებით როგორც აღმავალი, ისე დაღმავალი ნაკადის მთელ სიგრძეზე. გვირაბის ცენტრიდან ორივე მხარეზე 2-2 მ სიგრძის მონაკვეთზე (სულ 4 მ სიგრძეზე) დამონტაჟდა 40 ცალი თერმომოწყვილი ისე, რომ მათ ღერძებს შორის მანძილი შეადგენს 0.1 მ.

მოდელური გვირაბის დანარჩენ სიგრძეზე აგრეთვე დამონტაჟდება თერმოწყვილები, რომელთა შორის მანძილი შეადგენს 0.2 მ. სულ თერმოწყვილების რიცხვი ერთი რომელიმე ტიპის მოდელისათვის შეადგენს 80 ცალს. ანათვლების აღება თერმოწყვილებიდან ხდება დაკვირვებების ონლაინ-სისტემით, რომელიც ჩანს ფიგ. 1-ზე.

2.7. სავენტილაციო სისტემის მოსალოდნელი კოლაფსის ექსპერიმენტული შემოწმება

ძლიერი ხანძრის პირობებში, გარკვეული პერიოდის შემდეგ, ვენტილატორების მუშაობის გავლენა სავენტილაციო ნაკადზე კლებადობით ხასიათდება იმისდა მიუხედავად, თუ რა მიმართულებით განვითარდება მაღალი ტემპერატურის გავლენა - ეს იქნება ხანძრით გამოწვეული დინამიკური წნევის გაზრდა, ჰაერის სიმკვრივის შემცირება, თუ ორივე ერთად. მაშასადამე, კოლაფსი არის ძლიერი და სწრაფად განვითარებადი ხანძრის შედეგად გვირაბის სავენტილაციო სისტემის დეპრესიის თანაზომადი დომინანტური დინამიკური წნევის აღძვრისა და გავრცელების პროცესი. აღსანიშნავია, რომ ხანძრის მიერ განვითარებული დინამიკური წნევა ვენტილატორის მიერ განვითარებულ წნევასთან ალგებრულად იკრიბება.

ხანძრის სიძლიერის გავლენა ვენტილაციაზე სხვადასხვაგვარად არის შეფასებული სამეცნიერო ლიტერატურაში, შედარებით ახლოსაა ამ პროექტში გატარებულ იდეასთან ნაშრომში [14] მიღებული შედეგები.

გვირაბის დახრილობისა და ხანძრის გამოყოფის მაჩვენებლის ცვალებადობით დაგეგმილია აქნიშნულ საკითხში სიცხადის შეტანა. თეორიული ბაზა იქნება კლაპეირონის განტოლება იდეალური გაზებისათვის.

2.8. საანგარიშო ფორმულები

როგორც ცნობილია, სირთულის გამო დახრილ გვირაბებში კრიტიკული სიჩქარე და უკუდინების სიგრძე ნაკლებად არის შესწავლილი და მათი სიდიდეების გამოთვლა ხდება ჰორიზონტალური გვირაბებისათვის არსებული შედეგების გამოყენებით [21]. დახრილ გვირაბში კრიტიკული სიჩქარის u_c საანგარიშო ფორმულაში გამოყენებულია ჰორიზონტალური გვირაბისათვის კრიტიკული სიჩქარის რიცხვითი სიდიდის $u_{c,0}$ -ის მიხედვით შემდეგი განტოლებით

$$u_{c,\theta} = K_g u_{c,0}, \tag{5}$$

სადაც K_g არის გრადიენტ-ფაქტორი, რომელიც გამოიყენება ხანძრების შემთხვევაში დახრილი გვირაბებისათვის.

NFPA 502 გვთავაზობს გრადიენტ-ფაქტორის განტოლებას დახრილი გვირაბებისათვის [20]

$$K_g = 1 + 0.0374s^{0.8}, \tag{6}$$

სადაც s არის გვირაბის დახრილობა, %, რომელიც განისაზღვრება აწევის სიმაღლის ფარდობით ჰორიზონტალურ სიგრძესთან. სხვა სიტყვებით, თუ კუთხე არის θ , მაშინ გვირაბის დახრილობა არის $tg\theta$. ფორმულაში (6) s არის დახრილობა, გამოსახული პროცენტებში, ანუ $s = 100tg\theta$.

კრიტიკული სიჩქარის გამოთვლა შესაძლებელია ფორმულით

$$u_c = k \left(\frac{g \dot{Q}_c H}{\rho_0 c_p T A} \right)^{1/3}, \quad (7)$$

სადაც k არის პროპორციულობის მუდმივა; g - გრავიტაციული აჩქარება, მ/წმ²; \dot{Q}_c - ხანძრის შედეგად გამოყოფილი კონვექციური სითბო, კვტ; H - გვირაბის სიმაღლე, მ; ρ_0 - გარე ჰაერის სიმკვრივე, კგ/მ³; c_p - ჰაერის კუთრი თბოტევადობა, კჯ/(კგ. K); T - კვამლის საშუალო ტემპერატურა, K; A - გვირაბის განივი კვეთის ფართობი, მ².

პროპორციულობის მუდმივა განისაზღვრება ფორმულით

$$k = Fr_c^{-1/3}, \quad (8)$$

სადაც Fr_c არის ფრუდის კრიტიკული რიცხვი, რომელიც განისაზღვრება ფორმულით

$$Fr_c = \frac{\Delta \rho g H}{\rho_0 u_c^2}, \quad (9)$$

სადაც განმარტებული სიდიდეების გარდა $\Delta \rho$ არის სიმკვრივეთა სხვაობა გარე ჰაერსა და კვამლს შორის, კგ/მ³.

კვამლის საშუალო ტემპერატურა გამოითვლება ფორმულით

$$T = T_0 + \frac{\dot{Q}_c}{\rho_0 c_p A u_c}, \quad (10)$$

სადაც განმარტებული სიდიდეების გარდა T_0 არის გარე ჰაერის ტემპერატურა, K.

აღსანიშნავია, რომ კრიტიკული სიჩქარის განსაზღვრისათვის ფორმულით (7), საჭიროა კვამლის საშუალო ტემპერატურისა და პროპორციულობის მუდმივას ცოდნა, ხოლო მათი საანგარიშო ფორმულები (8)-(10) შეიცავენ საძიებელ სიდიდეს u_c -ს. აღნიშნულის დასაძლევად შემოიტანეს 4.5-ის ტოლი ფრუდის კრიტიკული რიცხვი, რაც ამარტივებს გაანგარიშებას. როგორც ქვემოთ დავინახავთ, აღნიშნული არ არის პრობლემის გადაჭრის გზა.

უკუდინების კრიტიკული სიჩქარე ფრუდის კრიტერიუმს, როგორც აღინიშნა ზემოთ, პირველად დაუკავშირა თომასმა, აღნიშნა რა, რომ წვის პროდუქტებისა და ჰაერის ნარევის დინების ხასიათი დამოკიდებულია კვამლის ტივტივადობისა და სავენტულაციო ჭავლის ინერციული ძალების ფარდობაზე, რომელიც გამოხატულია ფრუდის კრიტერიუმით და მცირე მასშტაბის სპირტის ალის მიხედვით შემოიტანა კრიტერიუმის კრიტიკული რიცხვითი სიდიდე $Fr_c = 1$.

ლისა და სხვების ნაშრომში [22] შესწავლილი იყო 0,3X0,3X10 მ ზომების შეშის ხერგილისაგან გამოწვეული ხანძარი აეროდინამიკურ მილში და აღნიშნული იყო, რომ ხანძრის კერაზე აეროდინამიკური წინაღობა 6-ჯერ მატულობდა სავენტულაციო ნაკადისათვის, ხოლო ხანძრის მიღმა ორივე მხარეზე - დაახლოებით 1,5-ჯერ. უკუდინება შეიმჩნეოდა, როცა ხანძრის კერაზე დროსელირებული სავენტულაციო ნაკადის სიჩქარე შეადგენდა 0,6 მ/წმ-ს, რაც შეესაბამებოდა ფრუდის კრიტერიუმის რიცხვით სიდიდეს $Fr_c \approx 7$.

დანზიგერმა და კენედიმ [23], ისე, რომ არ შეუსწავლიათ პროცესები სათანადო სიღრმით, რეინოლდსის რიცხვის მსგავსად ელოდნენ რა, რომ ფრუდის კრიტერიუმსაც ექნებოდა კრიტიკული რიცხვითი სიდიდე, კრიტიკული რიცხვითი მნიშვნელობა 4.5 შემოიტანეს

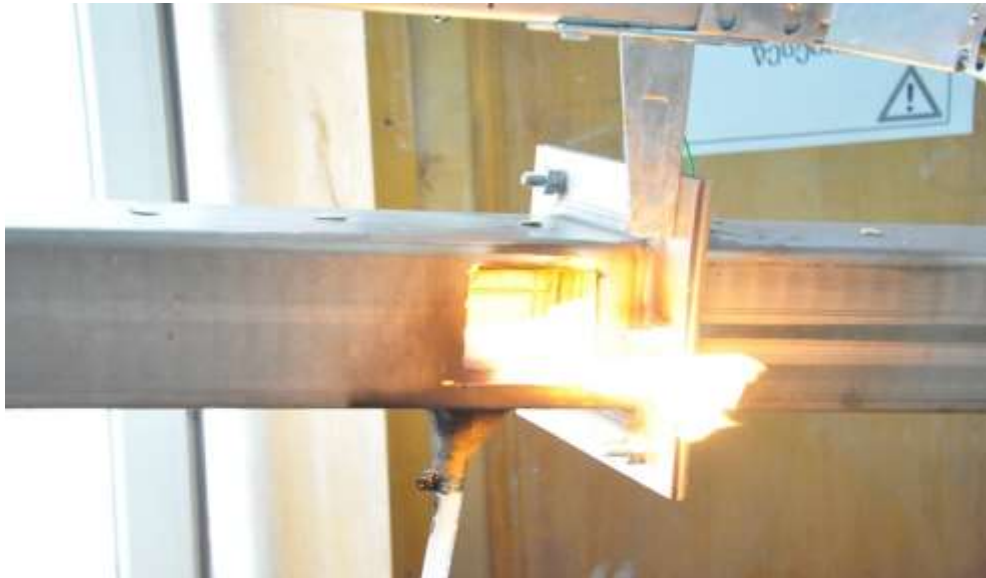
თითქოსდა ლისა და სხვების მითითებული ნაშრომის მიხედვით, რომელიც მრავალი ავტორის მიერ განხილვის საგანი იყო წლების განმავლობაში კრიტიკული სიჩქარისა და უკუდინების მანძილთან დაკავშირებით. ანალოგიურია კენედის მოხსენება „კრიტიკული სიჩქარე: წარსული, აწმყო და მომავალი“, რომელიც მან გააკეთა 1996 წელს ლონდონში სემინარზე „კვამლი და კრიტიკული სიჩქარე გვირაბებში“ [24]. აღნიშნული დაშვება საკითხს ამარტივებს, რადგან ამ შემთხვევაში ფორმულა (7)-ის მიხედვით კოეფიციენტი $k = 0.606$, მაგრამ არ არის მართებული, რაც დიდი სიფრთხილით უნდა იქნეს მიღებული მხედველობაში.

3. მიღებული შედეგების ანალიზი

გვირაბის ხანძრის სცენარები დამუშავდა სტუ-ს საავტომობილო გვირაბის მოდელზე, რომელიც დამზადებულია 2 მმ სისქის უჟანგავი ლითონის ფურცლისაგან. გვირაბში ხანძრის იმიტაციისათვის გამოყენებული იყო გათხევადებული აირი, ხოლო „იწვებოდა“ სხვადასხვა ავტომობილების მასშტაბით დამზადებული მოდელები. ინფორმაციის მიღება მოდელიდან ხდებოდა თერმოწყვილების საშუალებით DT-85 „დატათეიქერის“ მიერ. აღნიშნული მოწყობილობა 40 წერტილიდან ერთდროულად ღებულობს მონაცემებს ყოველი წამის განმავლობაში, ამუშავებს მას და ცხრილებისა და გრაფიკების სახით აწვდის საბორტო კომპიუტერს. ყველა საზომი მოწყობილობა ჩანს ფიგ. 1-ზე, ხოლო მსუბუქი ავტომობილის ხანძარი გვირაბის მოდელზე მსხვილი პლანით წარმოდგენილია ფიგ. 2-ზე.

მაგალითისათვის მოგვაქვს ხანძრის განვითარების ერთ-ერთი სცენარის ცხრილი იმ სახით, როგორსაც იძლევა აღნიშნული მოწყობილობა. ცხრილში 2 მოცემულია ნატურალური ზომის გვირაბში მომხდარი 15 კვტ სიმძლავრის ხანძრის მასშტაბირებული ვარიანტი, როცა სავენტილაციო ნაკადის სიჩქარე ნატურალურ გვირაბში შეადგენს 0,5 მ/წმ. ამ შემთხვევაში გვირაბის კვეთი გადაფარული არ არის მოქნილი ტრანსფორმირებადი ელემენტით, ხოლო მოდელზე ხანძრის სიმძლავრე იცვლება 1,49-1,50 კვტ-ის ფარგლებში.

აღნიშნული სცენარის შედეგების მიხედვით დამუშავებული გრაფიკი წარმოდგენილია ნახ. 3-ზე. ამ შემთხვევაში გვირაბის მოდელზე ჰაერის ნაკადის სიჩქარე გვირაბის მოდელზე შეადგენს 0,079 მ/წმ, რომლის გაზომვა ხდებოდა სპეციალური გადამწოდით. როგორც აღინიშნა, აღნიშნული სიჩქარე შეესაბამება ნატურალური ზომის გვირაბში სავენტილაციო ნაკადის 0,5 მ/წმ სიჩქარეს. გვირაბის უსაფრთხოების სისტემაში მოცემული სცენარის პირობებში, როგორც უკვე აღინიშნა, ჩართული არ არის მოქნილი ტრანსფორმირებადი ელემენტი და მხოლოდ ხანძრის დროსეულური ეფექტი განაპირობებს აეროდინამიკური წინააღობის ცვალებადობას მოდელზე.



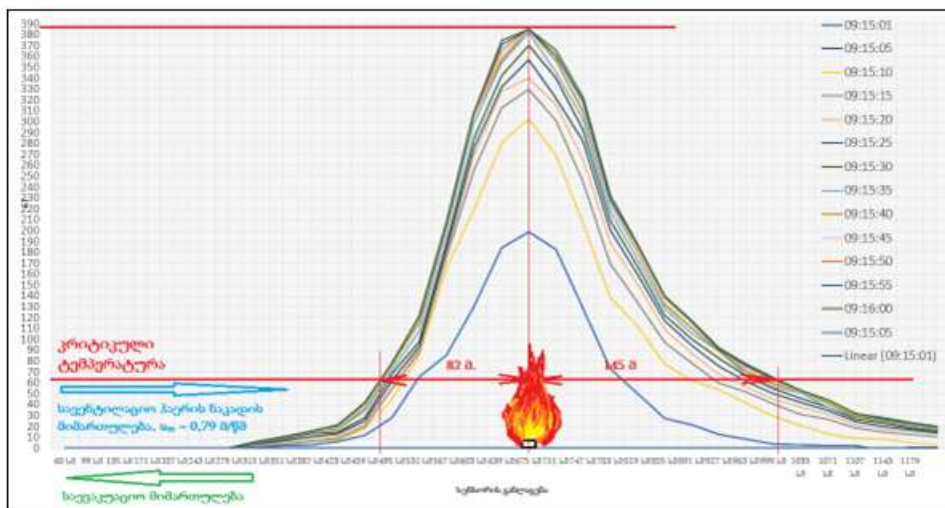
ფიგ. 2. მინიავტობუსის ხანძრის მოდელირება გვირაბის მოდელზე მსხვილი პლანით (საწვავი - გათხევადებული აირი).

ცხრილი 1. ფიზიკური მოდელიდან თერმოფიზიკურ მდგომარეობით აღებული მონაცემები

Timestamp	09:15:01	09:15:05	09:15:10	09:15:15	09:15:20	09:15:25	09:15:30	09:15:35	09:15:40	09:15:45	09:15:50	09:15:55	09:16:00
60 სმ	0	0,177742	0,300072	0,300956	0,327998	0,375068	0,284918	0,279218	0,401704	0,532832	0,441792	0,462948	0,447298
99 სმ	0	0,09013	0,165502	0,25412	0,258424	0,243166	0,207792	0,224118	0,172402	0,581174	0,30807	0,210464	0,238976
135 სმ	0	0,158092	0,146046	0,263658	0,250728	0,361104	0,257088	0,26877	0,248008	0,361596	0,325802	0,359112	0,309494
171 სმ	0	-0,00221	0,05295	0,194134	0,198566	0,150988	0,282006	0,439118	0,25015	0,332504	0,363042	0,298268	0,373016
207 სმ	0	0,091318	0,185714	0,262206	0,311226	0,375712	0,251082	0,236504	0,312996	0,394082	0,370768	0,413954	0,198004
243 სმ	0	0,074144	0,26581	0,415064	0,368554	0,497862	0,353422	0,492294	0,446432	0,633888	0,628502	0,521434	0,464128
279 სმ	0	0,03883	0,180264	0,416854	0,330746	0,446356	0,437056	0,376932	0,463928	0,564702	0,422924	0,571198	0,433126
315 სმ	0	1,220504	1,434926	1,560396	2,649078	3,651248	4,5744516	5,756724	5,851752	5,881842	6,071952	6,161389	6,158946
351 სმ	0	2,40755	3,136302	3,940326	6,165336	7,181164	8,1908096	9,066708	10,09672	10,29309	10,41706	10,51376	10,57828
387 სმ	0	3,611008	5,867834	6,979532	9,772306	10,87969	13,921732	14,85055	14,95097	15,02097	15,81638	15,71355	15,96151
423 სმ	0	6,261951	7,816754	8,959326	11,17711	13,8989	14,86404	17,85446	18,09506	19,70772	20,88555	21,04892	21,7737
459 სმ	0	12,27138	17,84696	19,93355	22,093	25,62584	28,182262	33,8126	37,03668	38,75335	40,88417	41,96656	41,93993
495 სმ	0	28,49195	45,4217	54,86933	59,98422	62,78422	68,563356	72,36168	77,0997	77,87784	78,91612	78,41998	78,42264
531 სმ	0	65,59898	85,50437	88,37652	90,78861	93,81466	98,332492	107,6681	115,5557	120,1294	120,6868	121,4345	121,9513
567 სმ	0	85,99804	165,9408	175,2301	178,0541	182,3971	188,57841	199,9082	205,7734	206,4286	206,6551	207,5844	207,9306
603 სმ	0	129,9257	218,8784	255,1128	268,2499	275,162	284,52757	297,9979	305,8384	306,4931	307,0918	307,4405	307,9369
639 სმ	0	184,1758	280,4528	312,8276	328,4197	332,2817	342,17087	353,9775	357,4104	361,6494	366,0626	371,034	374,682
675 სმ	0	198,8727	302,5446	330,2267	340,3355	357,2594	370,28382	381,7849	384,8872	385,3087	385,5722	385,2084	384,9175
711 სმ	0	182,52	269,2234	301,1978	316,0418	322,0682	340,52787	344,9605	356,0267	365,2762	361,0359	360,6842	365,9479
747 სმ	0	128,1019	206,7268	244,3775	265,1388	282,0147	292,56944	301,8469	308,7071	312,961	318,5605	319,1116	322,8297
783 სმ	0	73,26044	138,8997	169,3293	188,6898	200,1294	208,99531	217,3816	223,8097	224,8024	228,3789	228,1407	232,6331
819 სმ	0	50,61654	112,0365	134,4743	151,1252	159,8198	167,64449	173,7444	181,377	183,1183	186,4247	186,9217	188,2129
855 სმ	0	27,88654	77,35387	97,24255	109,2179	117,072	122,56127	128,1614	132,2519	134,4866	138,8157	139,4183	139,7482
891 სმ	0	21,68208	62,22838	78,60828	86,9508	94,44024	100,37706	105,2102	109,7293	112,7419	115,4803	116,3978	117,419
927 სმ	0	12,814	53,66765	60,14029	67,75963	75,33523	82,421954	89,07126	89,43248	90,48936	90,79996	91,10503	91,97843
963 სმ	0	8,046688	41,61271	52,14228	56,28074	61,42243	66,258778	68,15555	71,16299	73,23203	75,14112	75,72223	77,48576
999 სმ	0	4,070498	29,67916	41,01574	45,52901	50,26316	54,6605	56,22678	59,04413	61,76916	63,0204	64,34568	65,22174
1035 სმ	0	3,05692	20,89194	31,54028	37,90068	42,08459	45,577104	50,72774	52,28014	52,57432	53,25034	53,55987	53,6175
1071 სმ	0	2,806821	13,90662	26,93719	31,23643	34,52745	38,139542	37,74671	41,59737	43,43122	44,3008	44,34643	44,70553
1107 სმ	0	2,355076	8,963156	18,49127	21,56856	24,51177	26,540544	28,70642	30,04284	31,66359	31,83118	32,08946	32,27866
1143 სმ	0	-2,00625	8,387822	15,36797	18,02389	19,86025	22,879574	24,36767	25,36137	26,14767	26,81188	26,95831	27,93169
1179 სმ	0	1,303517	5,731158	12,91898	15,96579	17,59867	18,94297	20,33464	21,37659	22,27992	22,82365	23,05475	23,92439
	0	1,045994	3,56205	10,30822	13,49395	14,5947	15,751244	17,09727	18,21631	18,36072	19,43614	19,47015	20,03248

ნახ. 3-ზე წარმოდგენილი გრაფიკისათვის ექსპერიმენტის ხანგრძლივობა შეადგენდა 60 წმ, ამ შემთხვევაში ექსპერიმენტის პირობებიდან გამომდინარე DT-85 „დატათეიქერის“ მიერ მონაცემების აღება ხდებოდა არა ყოველ წამში, არამედ ხანძრის ამოქმედებიდან 5 წმ ინტერვალით, რადგან ტემპერატურის ცვალებადობის მონაცემებზე საცდელი დაკვირვებების მიხედვით არ იყო დროის უფრო ნაკლებ ინტერვალზე ყურადღების გამახვილება საჭირო. გვირაბის მოდელზე ჰაერის სიჩქარე, როგორც უკვე აღინიშნა, შეადგენდა 0,079 მ/წმ, რაც ნატურალური ზომების გვირაბში 0,5 მ/წმ შესაბამისია. ნახაზიდან ჩანს, რომ 50 წმ შემდეგ

ხანძრის კერის სიახლოვეს ტოქსიკური ნამწვი პროდუქტების ტემპერატურა გახდა 385,6 °C, რაც მაქსიმალური მაჩვენებელია ამ შემთხვევაში და გაზის ხარჯის მიხედვით თეორიულად გამოთვლილ ტემპერატურას შეესაბამება. ამ შემთხვევაში ხდება ნაკადის უკუდინება მოდელზე, ხოლო რეალური ნატურალური ზომის გვირაბისათვის უკუდინების სიგრძე შეადგენს 82 მ, რაც ჩანს მოცემული ნახაზიდანაც.



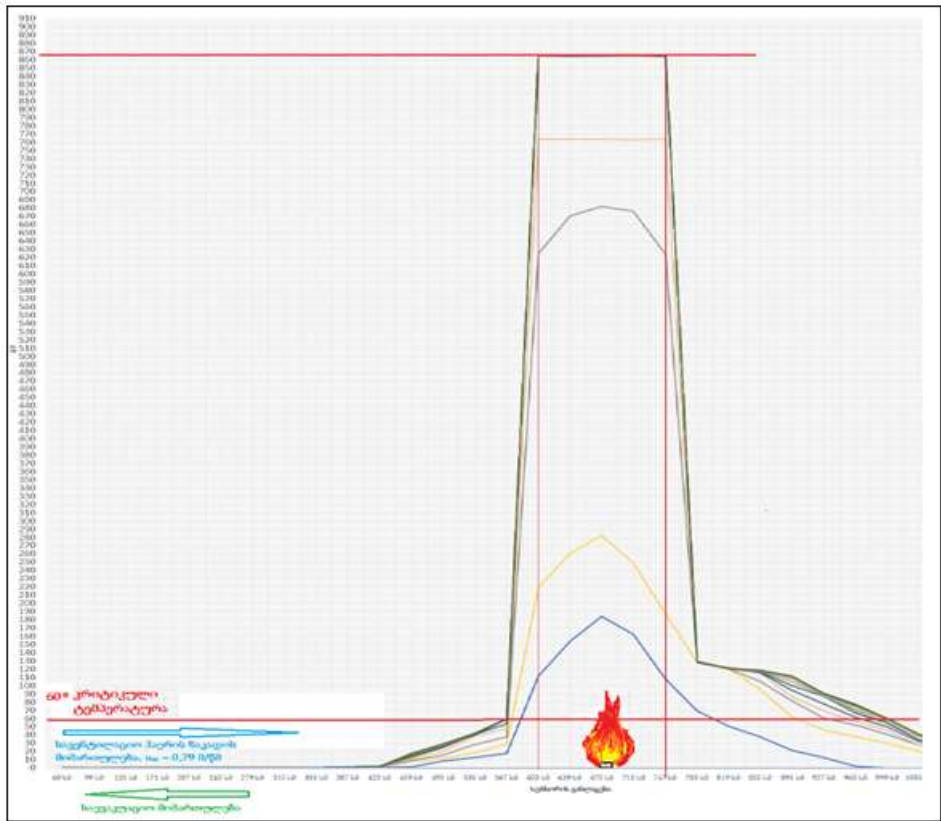
ნახ. 3. ნატურულ გვირაბში 15 კვტ ხანძრის განვითარების სცენარი ფიზიკურ მოდელზე, როცა ჰაერის სიჩქარე არის 0,5 მ/წმ და ნაკლებია კრიტიკულ სიდიდეზე.

ზოგადად სატრანსპორტო გვირაბებში ნებისმიერი მიზეზით გაჩენილი ხანძრის შემთხვევაში სიცოცხლის გადარჩენის ერთ-ერთი გზაა გვირაბის აეროდინამიკური წინააღმდეგობის ხელოვნურად გაზრდა და ნამწვი პროდუქტებით გაჯერებული ჰაერის მოძრაობის შეფერხება, რაც შეიძლება განხორციელდეს ტრანსფორმირებადი ელემენტების საშუალებით. აღნიშნული ელემენტები შესაძლებელია დამონტაჟდეს გვირაბში ერთმანეთისაგან გარკვეული მანძილის დაშორებით, რომლებიც შექმნიან ტრანსფორმირებად სისტემას. მაგალითად, შესაძლებელია მათი განთავსება გვერდითი გასასვლელების ცენტრალურ ნაწილში ისე, რომ ყოველ გასასვლელს, რომელთა შორის მანძილი 250-300 მ შეადგენს ემსახურებოდეს ორი ელემენტი. ჩვეულებრივ პირობებში, მოლოდინის რეჟიმში მყოფი ტრანსფორმირებადი სისტემა აკეცილია გვირაბის ჭერზე, არ ამცირებს გვირაბის ძვირადღირებულ მიწისქვეშა სივრცეს, რომელიც ტრანსპორტის მოძრაობისათვის არის განკუთვნილი და არ ზრდის გვირაბის აეროდინამიკურ წინააღმდეგობას.

ადვილი მისახვედრია, რომ ტრანსფორმირებადი სისტემა უნდა ამოქმედდეს ხანძრის დროს სენსორებიდან მიღებული ინფორმაციით ავტომატურ რეჟიმში ან მართვის პულტიდან, რომელიც განთავსებული უნდა იყოს გვირაბის მართვის სამსახურის სამუშაო სივრცეში. შესაძლებელი უნდა იყოს აგრეთვე ტრანსფორმირებადი სისტემის ხელით ჩართვა გვირაბში საგზაო მოძრაობის ნებისმიერი მონაწილის მიერ.

ნახ. 4-ზე წარმოდგენილია ჰორიზონტალურ გვირაბში ხანძრის განვითარების სცენარი იმავე პირობებში, რაც მოცემულია ცხრილში 2. განსხვავება ისაა, რომ ხანძრის კერიდან ორივე მხარე გვირაბის განივი კვეთის 50% გადაფარულია ტრანსფორმირებადი ელემენტებით.

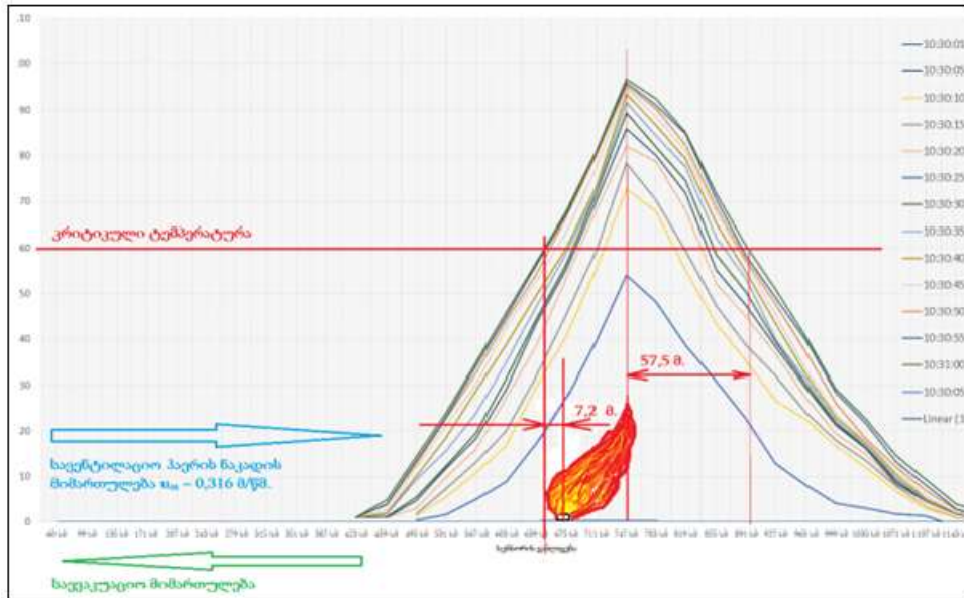
მოდელზე ორ ელემენტს შორის მანძილი შეადგენს 1,5 მ, რაც შეესაბამება ნატურალური ზომის გვირაბის 60 მ.



ნახ. 4. ნატურულ გვირაბში 15 კვტ ხანძრის განვითარების სცენარი ფიზიკურ მოდელზე მაშინ, როცა გვირაბის განივი კვეთი 50 %-ით გადაფარულია ტრანსფორმირებადი ელემენტით, ხოლო ელემენტებს შორის მანძილი ნატურაში შეადგენს 60 მ.

როგორც წარმოდგენილი ნახ. 4-დან ჩანს, მიუხედავად იმისა, რომ გვირაბის მოდელზე ჰაერის სიჩქარე შეადგენს $u_m = 0,079$ მ/წმ და მისი რიცხვითი სიდიდე ნაკლებია, ვიდრე უკუდინების გამოსარიცხი კრიტიკული სიჩქარე $u_c = 0,242$ მ/წმ, ტრანსფორმირებადი ელემენტით გვირაბის გადაფარვის ადგილიდან უკუდინებას ადგილი არ აქვს და ტემპერატურის რიცხვითი მნიშვნელობა არ აღემატება $60\text{ }^{\circ}\text{C}$, რაც არის ადამიანის სიცოცხლის შენარჩუნებისათვის დასაშვები ტემპერატურა. ისიც აღსანიშნავია, რომ ტრანსფორმირებადი ელემენტებით გადაფარულ შიდა სივრცეში ტემპერატურა მკვეთრად მატულობს, რაც ადვილი მისახვედრია ენერჯის მუდმივობის კანონიდან გამომდინარე. ექსპერიმენტული მონაცემების აღება ამ შემთხვევაშიც ხდებოდა 5 წმ-ის ინტერვალით, ხოლო ექსპერიმენტის ხანგრძლივობა ანალოგიურად შედგენდა 60 წმ.

ნახ. 5-ზე წარმოდგენილია ნამწვი აირებისა და სავენტილაციო ჰაერის ნარევის ტემპერატურული ნაზარდის ცვალებადობის ხასიათი ჰორიზონტალური გვირაბისათვის ნატურული ზომის გვირაბში 15 კვტ ხანძრის სცენარისათვის. მოდელზე ხანძრის სიმძლავრე არის 1,49 კვტ. განსხვავება ნახ. 3-ზე მოცემული სცენარიდან ისაა, რომ ამ უკანასკნელ შემთხვევაში მოდელზე ჰაერის სიჩქარე აღემატება მის კრიტიკულ სიდიდეს და უკუდინებას ადგილი არ აქვს.



ნახ. 5. ნატურულ გვირაბში 15 კვტ ხანძრის განვითარების სცენარი ფიზიკურ მოდელზე, როცა ჰაერის სიჩქარე არის 2,0 მ/წმ და აღემატება კრიტიკულ სიდიდეს.

ნახ. 5-დან ჩანს, რომ უკუდინება მოცემულ შემთხვევაში არ ხდება, ჰაერის ტემპერატურის მაქსიმალური ნაზარდი არის 98,8 °C და სათანადო მრუდი ხანძრის კერის ვერტიკალურ პროექციაზე კი არ მდებარეობს, არამედ წანაცვლებულია გვირაბის სავეაკუაციო მხარეზე 72 სმ მანძილით (ნატურალური ზომების გვირაბში აღნიშნული მანძილი შეადგენს 28,8 მ). სრული სურათისათვის აღსანიშნავია, რომ ამ შემთხვევაში სავენტილაციო სისტემაში ჩართული არ არის მოქნილი ტრანსფორმირებადი ელემენტები, რადგან ამის საჭიროება არ არის იმიტომ, რომ ადგილი არ აქვს უკუდინებას მოცემული სცენარის პირობებში. საქმე ის გახლავთ, რომ ამ შემთხვევაში მოდელსა და ნატურას ახასიათებთ უკუდინების გამოსარიცხად ხელსაყრელი პარამეტრები. კერძოდ, მოდელის პარამეტრები: ხანძრის სიმძლავრე 1,49 კვტ; ჰაერის ნაკადის სიჩქარე $u_n = 0,316$ მ/წმ; კრიტიკული სიჩქარე მოდელისათვის $u_c = 0,242$ მ/წმ. როგორც ვხედავთ, ჰაერის სიჩქარე აღემატება მის კრიტიკულ რიცხვით სიდიდეს. იგივე პარამეტრები ნატურალური ზომის გვირაბისათვის, რომლის განივიკვეთის ფართობი არის 48 მ², ხოლო სიმაღლე - 6 მ, შემდეგია: ხანძრის სიმძლავრე 15 კვტ; ჰაერის ნაკადის სიჩქარე $u_n = 2,0$ მ/წმ; კრიტიკული სიჩქარე $u_{cn} = 1.53$ მ/წმ.

ნახ. 5-დან აგრეთვე ჩანს, რომ ხანძრის კერიდან სავეაკუაციო მიმართულებით 60 °C რიცხვითი სიდიდის მქონე იზოთერმა ვრცელდება 658 სმ ნიშნულამდე, რაც ნატურალური ზომების გვირაბში შეესაბამება 7,2 მ. აღნიშნულმა გავრცელებამ მოდელზე შეადგინა 18 სმ. ამავე დროს, სავენტილაციო ჰაერის ნაკადის მოძრაობის მიმართულებით 60 °C იზოთერმა ხანძრის კერიდან ვრცელდება 216 სმ მანძილზე, რაც ნატურალური ზომების გვირაბში შეადგენს 84,5 მ.

4. დასკვნა

შესრულებული კვლევების საფუძველზე შესაძლებელია დავასკვნათ, რომ ნულოვანი დახრის მქონე ნახევრად განივი სავენტილაციო სისტემის მქონე საავტომობილო გვირაბში, 15 კვტ სიმძლავრის ხანძრის განვითარების შემთხვევაში, ხანძრის კერიდან გვირაბის ორივე მხარეზე 4 მ დაშორებული მოქნილი ტრანსფორმირებადი ელემენტების საშუალებით შესაძლებელია შეფერხდეს დამაზიანებელი ფაქტორების - მაღალი ტემპერატურისა და მზუთავი აირების გავრცელება, მაშინ როდესაც აღნიშნული ელემენტებით გადაფარულია გვირაბის სავალი ნაწილის განივი კვეთის 50%.

ექსპერიმენტებისა და შესწავლილი ხანძრის სცენარების მიხედვით ხანძრის კერიდან 60 °C რიცხვითი სიდიდის მქონე იზოთერმა ნატურალური ზომების გვირაბში ვრცელდება მაქსიმუმ 84,5 მ მანძილზე 15 კვტ სიმძლავრის ხანძრის შემთხვევაში და ამ დროს საჭირო არ არის ტრანსფორმირებადი ელემენტით სარგებლობა, თუ ჰაერის ნაკადის სიჩქარე აღემატება მის კრიტიკულ სიდიდეს.

სავენტილაციო ნაკადის სიჩქარის კრიტიკულზე ნაკლები სიდიდის შემთხვევაში საჭიროა ტრანსფორმირებადი სისტემების გააქტიურება სასიცოცხლო გარემოს შენარჩუნების მიზნით მიწისქვეშ. ამ დროს მიწისქვეშა სივრცის ხანძრის ლოკალიზაციის უზნის შემოსაზღვრულ ფარგლებში ხდება დამაზიანებელი ფაქტორების ზღვრული მაჩვენებლების მკვეთრი ზრდა, რაც გამომდინარეობს ენერჯის მუდმივობისა და მასის მუდმივობის კანონებიდან და მხედველობაში უნდა იქნეს მიღებული უბედურების ზონაში მოქცეული ადამიანების ევაკუაციის საკითხის გადაწყვეტისას გვირაბის მომსახურე პერსონალისა და მაშველების მიერ. ამ შემთხვევაში მოქმედებათა ცხადი ალგორითმის წინასწარი დამუშავების საჭიროება ყოველი გვირაბის კონკრეტული მაჩვენებლების შესაბამისად ეჭვს არ იწვევს.

ლიტერატურა

1. P.H. Thomas (1968) The Movement of Smoke in Horizontal Passages against an Air Flow. *Fire Research Station*. Boreham Wood, p. 8.
2. Y.Z. Li, H. Ingason (2017) Effect of cross section on critical velocity in longitudinally ventilated tunnel fires. *Fire Saf. J.* 91, pp. 303-311. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2017.03.069>
3. X. Guo, X. Pan, Z. Wang, J. Yang, M. Hua, J. Jiang (2018) Numerical simulation of fire smoke in extra-long river-crossing subway tunnels. *Tunneling and Underground Space Technology*, 82, pp. 82-98.
4. O.A. Lanchava (1982) Heat and mass exchange in permanent mine workings. *Soviet Mining*, 18 (6), pp. 529-532.
5. O.A. Lanchava (1986) Heat and mass exchange in newly driven mine workings. *Soviet Mining* (Engl. Transl.); (United States) 21 (5).
6. O. Lanchava, N. Ilias (2017) Some issues of thermal calculation of ventilation air for the metro. *Journal of Engineering Sciences and Innovation* 2 (2), pp. 92-105.
7. H. Savalanpour, B. Farhanieh, H. Afshin (2021) Proposing a general formula to calculate the critical velocities in tunnels with different cross-sectional shapes. *Tunnelling and Underground Space Technology* 110, 103798.
8. Y.Z Li., H. Ingason (2018) Discussions on critical velocity and critical Froude number for smoke control in tunnels with longitudinal ventilation. *Fire Safety Journal*, 99, pp. 22-26.

9. O Lanchava, G Javakhishvili (2021) Impact of strong fires on a road tunnel ventilation system. *Bulletin of the Georgian National Academy of Sciences* 15 (4).
10. O Lanchava, N Ilias (2020) Critical velocity analysis for safety management in case of tunnel fire. *MATEC Web of Conferences* 305, 00023.
11. J. Lia, Y.F. Li, C.H. Cheng, W.K. Chow (2019) A study on the effects of the slope on the critical velocity for longitudinal ventilation in tilted tunnels. *Tunneling and Underground Space Technology*, 89, pp. 262-265.
12. O Lanchava, N Ilias, G Nozadze, SM Radu, RI Moraru, Z Khokerashvili, N Arudashvili (2017) The impact of the piston effect on the technological characteristics of ventilation in the subway tunnels. *Proceedings of 8th International Symposium "Occupational Health and Safety" SESAM*, pp. 342-352.
13. A. Beard, R. Carvel (2012) Handbook of Tunnel Fire Safety, *Second edition*, Thomas Telford Limited, p. 678.
14. A. Vaitkevicius, R. Carvel (2016) Investigating the Throttling Effect in Tunnel Fires. *Fire Technology*, 52, pp. 1619–1628.
15. O. Lanchava, E. Medzmariashvili, N. Ilias, G. Khitalishvili, Z. Lebanidze (2009) Prospects of usage of transforming systems for extinguishing fire in tunnels. *International Scientific Conference "Advanced Lightweight Structures and Reflector Antennas"*, Tbilisi.
16. Y.Z Li., H. Ingason (2018) Discussions on critical velocity and critical Froude number for smoke control in tunnels with longitudinal ventilation. *Fire Safety Journal*, 99, pp. 22-26.
17. J. Li, Y.F. Li, C.H. Cheng, W.K. Chow (2019) [A study on the effects of the slope on the critical velocity for longitudinal ventilation in tilted tunnels](#). *Tunneling and Underground Space Technology*, 89, pp. 262-267.
18. O. Lanchava, N. Ilias, S.M. Radu, G. Nozadze, M. Jangidze (2022) PREVENTING THE SPREAD OF COMBUSTIBLE PRODUCTS IN TUNNELS BY IMPLEMENTING A DIVISIBLE SYSTEM. *Environmental Engineering and Management Journal* 21 (4), pp. 627-635.
19. O. Lanchava, N. Ilias, S.M. Radu, G. Nozadze, D. Tsanova (2022) [Analysis of the use of transformable elements in intelligent tunnel ventilation systems](#). MATEC Web of Conferences 354, 00020.
20. UN, Economic and Social Council, Economic Commission for Europe (2001), *Report TRANS/AC.7/9*, 59.
21. Y.Z. Li, B. Lei, H. Ingason (2010) Study of critical velocity and backlayering length in longitudinally ventilated tunnel fires. *Fire Safety Journal* 45, pp. 361-370.
22. C.K. Lee, R.F. Chaiken, J.M. Singer (1979) Interaction between duct fires and ventilation flow: an experimental study. *Combustion Science and Technology* 20, pp. 59-72.
23. N.H. Danziger, W.D. Kennedy (1982) Longitudinal ventilation analysis for the Glenwood canyon tunnels. *Fourth International Symposium on the Aerodynamics & Ventilation of Vehicle Tunnels, BHRA Fluid Engineering*, pp. 169-186.
24. W.D. Kennedy (1996) Critical velocity: past, present and future. *Seminar of Smoke and Critical Velocity in Tunnels, JFL Lowndes*, pp. 305–322.