



ხანძრის ფიზიკური მოდელირების შედეგები საავტომობილო გვირაბებისათვის

ზაზა ხოკერაშვილი, დავით ცანავა

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი, თბილისი, კოსტავას 77

აბსტრაქტი

ნაშრომში წარმოდგენილია 1:60 მასშტაბის საავტომობილო ტრანსპორტისათვის განკუთვნილი დახრილი გვირაბების ფიზიკურ მოდელზე ხანძრის განვითარების კვლევის შედეგები. გვირაბის დახრილობა იცვლებოდა 0-10% ფარგლებში 2%-იანი ბიჯით, ნატურ გვირაბში ინიცირებული და განვითარებული ხანძრის სიმძლავრე იცვლებოდა 5-15 მგვტ-ის ფარგლებში 5 მგვტ ბიჯით, ამასთან ნატური გვირაბის სიგრძე იყო 360 მ, სიგანე - 8 მ, სიმაღლე - 6 მ, განივი კვეთის ფართობი - 48 მ², ხოლო გვირაბის სიგანისა და სიმაღლის თანაფარდობა - 1,33. მოცემული გეომეტრიის ნატური გვირაბის მოდელი შესაბამისი მასშტაბით დამზადებული იყო 2 მმ სისქის უჟანგავი ფოლადის ფურცლისაგან. გვირაბის მოდელის ზომები არის: სიგრძე 6 მ, სიგანე 0,16 მ, სიმაღლე 0,12 მ, განივი კვეთის ფართობი 0,0192 მ². აღნიშნულ მოდელზე ექსპერიმენტების გზით შევისწავლეთ ხანძრის ინიცირებისა და განვითარების შემთხვევაში გამოყოფილი აირების (კვამლის) გავრცელების ხასიათი, განვსაზღვრეთ გრადიენტ ფაქტორის გავლენა კრიტიკული სიჩქარისა და უკუდინების მანძილის ცვალებადობის ტემპზე. აღნიშნული მახასიათებლების შესწავლა განხორციელდა გვირაბის მოდელში არსებული ჰაერის ტემპერატურის ცვალებადობის მიხედვით. ჰაერის ტემპერატურის გაზომვა ხდებოდა ღია და დახურული ტიპის აღმქმელებით აღჭურვილი K ტიპის თერმოწყვილებით. გაზომვის მაქსიმალური ტემპერატურა 800 °C. თერმოწყვილები დამონტაჟდა გვირაბის მოდელის ჭერში მთელ სიგრძეზე 5 და 10 სმ ბიჯით. ხანძარი დამოდელდა ბუნებრივი აირით. მოდელის ერთი პორტალიდან ღერძული ვენტულატორით ხდებოდა სავენტულაციო ჰაერის მიწოდება მოდელის შიგა

სივრცეში. სავენტილაციო ჰაერის სიჩქარე იზომებოდა ანემომეტრით, ხოლო ჰაერის ხარჯის გაანგარიშება ხდებოდა ყოველ ცალკეულ მომენტში სიჩქარის მიხედვით. დამოუკიდებელი ხანძრის საჭირო სიმძლავრის უზრუნველყოფა ხდებოდა ბუნებრივი აირით, ხოლო გაზომვა - მოცულობითი და მასური რეგულატორ-აღმრიცხველის საშუალებით. მოდელზე დამონტაჟებული K ტიპის თერმოწყვილებიდან, ანემომეტრიდან და ბუნებრივი აირის ხარჯსაზომიდან მონაცემების ერთდროული აღება, დამუშავება, ანალიზი და ციფრულ ფორმატში მათი გადმოცემა ხდებოდა მონაცემების შეგროვების DT-85 ტიპის „დატათეიქერის“ საშუალებით. მიღებული შედეგების გამოყენება შესაძლებელია საავტომობილო გვირაბების ვენტილაციის პროექტების დასამუშავებლად, რომლებშიდაც გათვალისწინებული იქნება ხანძრის გავლენა ვენტილაციაზე.

საკვანძო სიტყვები: აეროდინამიკური წინაღობა, კრიტიკული სიჩქარე, გრადიენტ ფაქტორი, უკუდინების მანძილი.

1. შესავალი

სახელმწიფოს ეკონომიკური განვითარების სტრატეგიულ გეგმაში, სატრანზიტო პოტენციალის ოპტიმალურად გამოყენება ერთ-ერთ პრიორიტეტულ მიმართულებად განიხილება. აღნიშნულიდან გამომდინარე, შესაბამისი დონორი ორგანიზაციების დაფინანსებით წარმატებით ხორციელდება სხვადასხვა მნიშვნელოვანი პროექტებს დაგეგმვა და რეალიზება. ერთ-ერთ ასეთ, ქვეყნის განვითარებისათვის კრიტიკულად მნიშვნელოვან პროექტს წარმოადგენს, თანამედროვე სტანდარტების ჩქაროსნული ავტომაგისტრალისა და მისი გამართულად და უსაფრთხოდ ექსპლუატაციისათვის საჭირო დამხმარე ნაგებობების მშენებლობა. აღნიშნული პროექტის ფარგლებში, ჩქაროსნული ავტომაგისტრალის მშენებლობის პარალელურად, დაგეგმილია და უმეტეს შემთხვევაში მიმდინარეობს 50 ზე მეტი მაღალი სტანდარტის შესაბამისი საავტომობილო გვირაბების მშენებლობა.

საავტომობილო გვირაბების შესაბამისი სტანდარტი განიხილავს, მათ საიმედოდ, უსაფრთხოდ და მდგრადად ექსპლუატაციისა და ფუნქციონირების შესაძლებლობას. საავტომობილო გვირაბების უსაფრთხოდ ექსპლუატაციის ერთ-ერთი აუცილებელი კომპონენტი, როგორცაა „უსაფრთხოების აუცილებელი მინიმალური დონე“ განსაზღვრულია ევროსაბჭოსა და ევროპარლამენტის ერთობლივად შემუშავებულ, მიღებულ და დამტკიცებულ დირექტივაში.

ვენტილაციის კრიტიკული სიჩქარე და სუფთა ჰაერის ჭავლში კვამლის საპირისპირო გავრცელების მანძილი - უკუდინების სიგრძე, საგანგებო სიტუაციების მართვის პროექტებში მნიშვნელოვანი ტექნოლოგიურ მაჩვენებლებს წარმოადგენს. თუ u_0 არის გრძივი ვენტილაციის

სიჩქარე, ხოლო u_c გრძივი ვენტილაციის კრიტიკული სიჩქარე. მაშინ შემთხვევა, როცა $u_0 > u_c$ უკუდინების გამოსარიცხი ტექნოლოგიური საშუალებაა. გვირაბის დახრილობის მიხედვით ეს მაჩვენებლები ცვალებადობას განიცდიან. ცვალებადობის ტემპის მაჩვენებელი დახრილობის მიხედვით არის უგანზომილებო კოეფიციენტი - გრადიენტ-ფაქტორი k_g . შესაბამისად, გრადიენტ-ფაქტორის გამოყენებით კრიტიკული სიჩქარისა და უკუდინების სიგრძის პროგნოზი ხდება უფრო კარგად შესწავლილი ჰორიზონტალურ გვირაბებში ხანძრის განვითარების სცენარების მიხედვით.

კრიტიკული სიჩქარე განიმარტება როგორც გრძივი ვენტილაციის მინიმალური სიჩქარე, რომელიც გამორიცხავს კვამლის უკუნაკადის წარმოქმნას. უკუდინების სიგრძე არის ის მანძილი, რომელზედაც დაღმავალ სუფთა ჰაერის ნაკადში ვრცელდება კვამლი და წვის ტოქსიკური პროდუქტები. გრადიენტ-ფაქტორი განიმარტება როგორც გვირაბის დახრილობის მიხედვით კრიტიკული სიჩქარისა და უკუდინების სიგრძის ზრდის პროპორციულობის კოეფიციენტი. სავენტილაციო სისტემის კოლაფსი განიმარტება როგორც სავენტილაციო სისტემის მდგომარეობა, როცა გვირაბში ჰაერის მოძრაობის მიმართულებას და ინტენსიურობას განაპირობებს ხანძრის მიერ განვითარებული წევა.

კრიტიკული სიჩქარის ცნება შემოღებულია თომასის მიერ ნახევრად ემპირიული ფორმულის სახით, რომელიც იყენებს ფრუდის რიცხვის კრიტიკულ სიდიდეს [1]. აღნიშნული ნაშრომი განივრცო [2-4], აგრეთვე სხვა ნაშრომებში და მიღებულია ემპირიული დამოკიდებულებები ექსპერიმენტული მონაცემების გამოყენებით.

დანზიგერი და კენედი [4] რეინოლდსის რიცხვის ანალოგიურად ელოდნენ რა, რომ ფრუდის რიცხვსაც ექნებოდა კრიტიკული რიცხვითი სიდიდე, მნიშვნელობა 4.5 შემოიტანეს როგორც კრიტიკული. აქ მხოლოდ იმას აღვნიშნავთ, რომ ფრუდის რიცხვის კრიტიკული სიდიდის იდეა საკითხს ამარტივებს, რადგან ამ შემთხვევაში კრიტიკული სიჩქარე და ყველა მითითებული საძიებელი სიდიდე შედარებით მარტივად გამოითვლება. დანზიგერი და კენედის მოდელი ფართოდ გამოიყენება კრიტიკული სიჩქარის საანგარიშოდ. ის რეკომენდებულია ზოგიერთ საპროექტო ცნობარში, როგორებიცაა პიარკის ცნობარი [5] და აშშ-ის სახანძრო დაცვის ასოციაციის ცნობარი [6, 7].

აღსანიშნავია აგრეთვე, რომ ფრუდის კრიტიკული რიცხვის გამოყენების შემთხვევაში ხშირად არ მიიღწევა საჭირო სიზუსტე, რაც პირველად აღინიშნა ლიტერატურაში [8, 9]. აღნიშნულის მიხედვად ფრუდის რიცხვი ხშირად გამოიყენება პრაქტიკაში სახანძრო ვენტილაციის პარამეტრების დასადგენად, რომლებიც აუცილებელია სიცოცხლის გადასარჩენად.

გვირაბებში ხანძრის პირობებში სიცოცხლის გადარჩენა აღიარებული საერთაშორისო პრობლემაა, რომლის გადაჭრაზე მრავალი მკვლევარი და ინჟინერი მუშაობს მთელ მსოფლიოში. სიცოცხლის გადარჩენაზე აქცენტირება განსაკუთრებით მას შემდეგ გაძლიერდა, რაც მასშტაბურ ხანძრებს მოჰყვა ადამიანთა მსხვერპლი. ასეთი ხანძრების მაგალითებია: ხანძარი მონბლანის საავტომობილო გვირაბში, საფრანგეთი/იტალია, რომლის შედეგად 39 ადამიანი დაიღუპა;

ხანძარი ფუნქულორის გვირაბში, ავსტრია, რომლის დროს 155 ადამიანი დაიღუპა; თავდასხმა ცეცხლის გაჩენით მეტროში სადგურზე ჯუნგანგო, სამხრეთ კორეა, 189 დაღუპული; ხანძარი მეტროს გვირაბში, აზერბაიჯანი, 260-ზე მეტი დაღუპული [14]; ხანძარი იანჩჟოუს გვირაბში, ჩინეთი, 40 დაღუპული [32]. სპეციალურ ლიტერატურაში [14] აღწერილია 40-ზე მეტი ხანძარი, რომელსაც მოჰყვა მსხვერპლი. პრობლემის საყოველთაოდ აღიარების დასტურია გაეროს ევროპულ კომისიის მუშაობა ამ მიმართულებით [10-12].

გვირაბის ხანძრების საშიშროება ძირითადად განპირობებულია ცხელი და მომწამვლელი კვამლის გავრცელებით მიწისქვეშა სივრცეში, რომელიც აგრეთვე თითქმის მთლიანად ზღუდავს ხილვადობას [15, 16]. მიწისქვეშ ხანძრის განვითარების თავისებურებები მრავალი ავტორის ყურადღების საგანი გახდა, დაგროვილია საკმარისი გამოცდილება და შესაძლებელია კვალიფიციურად გადაწყდეს ხანძართან დაკავშირებული მეტად მნიშვნელოვანი საკითხები: კვამლის გავრცელება [17-21], ვენტილაციის კრიტიკული სიჩქარე [9, 21-26], სითბოსა და ტენის გაცვლა ახლად გაყვანილ და „ძველ“ გვირაბებში [27-29], კვამლის უკუდინების სიგრძე [30-33], შესაძლებელია შესრულდეს მეტროს გვირაბების თბოფიზიკური გაანგარიშება, განისაზღვროს მატარებლების მოძრაობის დეგუმის ეფექტის გავლენა ვენტილაციაზე და სხვა მომიჯნავე საკითხები [34-40]. სტატისტიკის მიხედვით ცალკეულ გვირაბში სერიოზული ხანძრის მოხდენის შესაძლებლობა ართუ ისე მაღალია, მაგრამ გვირაბების რაოდენობის მატება და მოძრაობის ინტენსიურობის ზრდა იწვევს ხანძრის გაჩენის რისკის მომატებას. ძლიერი ხანძარი კი შეზღუდულ მიწისქვეშა სივრცეში აუცილებლად გამოიწვევს კატასტროფულ შედეგებს. ასეთი მაგალითებია ხანძარი მონბლანის გვირაბში (საფრანგეთი/იტალია) 1999 წლის 24 მარტს, რომელმაც იმსხვერპლა 39 ადამიანი; ხანძარი ავსტრიის გვირაბში ტაუერნი, რომელმაც იმსხვერპლა 12 ადამიანი (8 ავარიით მიღებული ტრავმებით, 4 ტოქსიკური აირებით სუნთქვის შედეგად); ხანძარი ფუნქულორის გვირაბში (ავსტრია) 2000 წლის 11 ნოემბერს, რომლის შედეგად ტოქსიკური აირებით სუნთქვის შედეგად დაიღუპა 155 ადამიანი [14] ხანძარი გოტარდის (Gotthard) გვირაბში (შვეიცარია) 2001 წლის 24 ოქტომბერს, რომლის შედეგად დაიღუპა 11 ადამიანი; ბოროტი განზრახვით გაჩენილი ხანძარი მეტროს სადგურში დაეგუ (Daegu) (სამხრეთ კორეა), რომელმაც იმსხვერპლა 198 ადამიანი, დამატებით 146 ადამიანი მოიწამლა ტოქსიკური აირებით და კვამლით [8]; ხანძარი იანჰოუს გვირაბში (ჩინეთი) 2014 წლის 1 მარტს, რომლის დროსაც დაიღუპა 40 ადამიანი, 12 მოიწამლა, განადგურდა 42 ავტომობილი [31].

2. თეორიული ნაწილი

პრობლემის არსი არის ჰაერის ნაკადების აეროდინამიკის ცვალებადობის კანონზომიერებებისა და ვენტილაციის მნიშვნელოვანი ტექნოლოგიური პარამეტრების დადგენა გვირაბის ხანძრისას როცა ცვალებადია გვირაბის დახრილობა, სითბოს გამოყოფის მაჩვენებელი, გვირაბის განივი

კვეთი, გვირაბის სიგანის ფარდობა სიმაღლესთან, გვირაბის ტრანსპორტით შევსების კოეფიციენტი და რაც მთავარია, ხანძრის კერაზე ცვალებადია სუფთა ჰაერისა და წვის პროდუქტების თანაფარდობა მათი ერთმანეთთან შერევის დროს.

ფრუდის რიცხვის მიხედვით, ნატურ გვირაბში განვითარებული ხანძრის დამოდელების ძირითადი პრინციპი ისაა, რომ გვირაბში ხანძრის განვითარებისას ფორმირებული ტივტივადობისა და ინერციის ძალები ფრუდის რიცხვის მიხედვით განისაზღვრებიან. ეს უკანასკნელი კი დამოდელების დროს უცვლელად უნდა იყოს შესანჩუნებული. ფრუდის რიცხვის გამოსათვლელი ფორმულა შემდეგნაირად გამოისახება

$$Fr_c = \frac{\Delta p g H}{\rho_0 u_c^2}, \quad (1)$$

სადაც Fr_c არის ფრუდის კრიტიკული რიცხვი; g - თავისუფალი ვარდნის აჩქარება, მ/წმ²; H - გვირაბის სიმაღლე, მ; ρ_0 - გარე ჰაერის სიმკვრივე, კგ/მ³; u_c - ჰორიზონტალურ გვირაბებში კრიტიკული სიჩქარე, მ/წმ; Δp - გვირაბის გარეთ არსებული ჰაერის სიმკვრივესა და გვირაბის შიგა სივრცეში არსებული ნამწვი აირების სიმკვრივეს შორის სხვაობა, კგ/მ³.

აღნიშნული მეთოდით ნატურ გვირაბში განვითარებული ხანძრის დამოდელებისას, ტემპერატურათა ველი ნატურ გვირაბში და მოდელებში ერთნაირია და უცვლელად ნარჩუნდება, ხოლო ნატურ გვირაბში და მოდელებში გამოყოფილი სითბოს რაოდენობის მასშტაბი შემდეგი გეომეტრიული მასშტაბით გამოისახება

$$\frac{Q_m}{Q_n} = \left(\frac{l_m}{l_n}\right)^{2.5}, \quad (2)$$

სადაც Q_m და Q_n არის მთლიანი სითბოს გამოყოფის მაჩვენებლები მოდელებში და ნატურ გვირაბში შესაბამისად, კვტ; l_m და l_n - გვირაბის სიგრძე მოდელებზე და ნატურაში შესაბამისად, მ.

ამასთან ერთად, ფრუდის რიცხვის მიხედვით ხანძრის დამოდელებისას, ნატურ გვირაბში და მოდელებზე სავენტიაციო ჰაერის ნაკადის სიჩქარის მასშტაბი შემდეგი გეომეტრიული მასშტაბით გამოისახება

$$\frac{u_m}{u_n} = \left(\frac{l_m}{l_n}\right)^{0.5}, \quad (3)$$

სადაც u_m და u_n არის ჰაერის ნაკადის სიჩქარე შესაბამისად მოდელებზე და ნატურაში, მ/წმ.

ხანძრის დამოდელების დეზინგერისა და კენედის მეთოდის მიხედვით, ჰორიზონტალურ გვირაბებში სავენტიაციო ნაკადის კრიტიკული სიჩქარე გამოითვლება

$$u_c = k \left(\frac{g Q_c H}{\rho_0 c_p T A}\right)^{1/3}, \quad (4)$$

სადაც Q_c არის კონვექციური სითბო, კვტ; c_p - ჰაერის კუთრი თბოტევადობა, კჯ/(კგ·K); T - გვირაბში ნამწვი აირების საშუალო ტემპერატურა, K; A - გვირაბის განივი კვეთის ფართობი, მ².

k არის პროპორციულობის მუდმივა და გამოითვლება ფრუდის რიცხვის მიხედვით

$$k = Fr_c^{-1/3}. \quad (5)$$

ჰორიზონტალური გვირაბებისათვის, ფრუდის კრიტიკული რიცხვით ხანძრის დამოდებების სტრატეგიისათვის, როდესაც ხანძრის კერაზე სუფთა ჰაერისა და წვის პროდუქტების თანაბარი შერევა ხდება, დეზინგერიმ და კენდიმ განსაზღვრეს ფრუდის კრიტიკული რიცხვი $Fr_c = 4,5$. მაშასადამე თუ $Fr_c < 4,5$ მაშინ გვირაბში განვითარებული ხანძრისას უკუდინებას ადგილი არ ექნება ($u_0 > u_c$).

ფრუდის კრიტიკული რიცხვის მნიშვნელობის მიხედვით (4) ფორმულაში პროპორციულობის მუდმივა $k = 0,606$.

გვირაბში განვითარებული ხანძრისას, გამოყოფილი კონვექციური სითბოს რაოდენობა გამოითვლება

$$\dot{Q}_c = \rho_0 c_p u_0 A \Delta T, \quad (6)$$

სადაც \dot{Q}_c არის გამოყოფილი სითბოს სრული რაოდენობა, კვტ, u_0 - გვირაბში სავენტრალური ჰაერის ნაკადის სიჩქარე, მ/წმ.

ამასთან ერთად კონვექციური სითბოს რაოდენობა, გვირაბში ხანძრის განვითარებისას გამოყოფილი სითბოს სრული რაოდენობის 70%-ს შეადგენს

$$\dot{Q}_c = 0,7 \dot{Q}. \quad (7)$$

გვირაბში განვითარებული ხანძრისას, წვის პროდუქტების საშუალო ტემპერატურა

$$T = T_0 + \frac{\dot{Q}_c}{\rho_0 c_p A u_c}, \quad (8)$$

სადაც T_0 არის გვირაბის გარეთ ჰაერის ტემპერატურა, K.

კვლევების მიხედვით, გვირაბის დახრილობის მიხედვით კრიტიკული სიჩქარის ცვალებადობის განმსაზღვრელი „გრადიენტ ფაქტორი“ განისაზღვრება ფორმულით

$$k_g = \frac{u_{cs}}{u_c}, \quad (9)$$

სადაც k_g არის „გრადიენტ-ფაქტორი“; u_{cs} - დახრილ გვირაბში „კრიტიკული სიჩქარე“, მ/წმ.

3. შედეგები და ანალიზი

დასმული საკითხების გარკვევისა და ანალიზის მიზნით, განხორციელდა შესაბამისი კვლევა 1:60 მასშტაბის გვირაბის ფიზიკურ მოდელზე, რომლის დახრის კუთხის ცვალებადობის დიაპაზონი 0-10 % -ია, ხოლო ცვალებადობის ბიჯი 2%, ნატურალური გვირაბის განივი კვეთის ფართობია 48 მ², სიგრძე 360 მ, სიგანე 8 მ, სიმაღლე 6 მ, სიგანისა და სიმაღლის თანაფარდობა 1,33.

2 მმ სისქის უჟანგავი ფოლადის ფურცლებისაგან, შესაბამისი მასშტაბის მიხედვით დამზადდა ნატური გვირაბის მოდელი, რომლის პარამეტრებია: სიგრძე 6 მ, სიგანე 0,16 მ, სიმაღლე 0,12 მ, განივი კვეთის ფართობი 0,0192 მ².

გვირაბის მოდელის წარმოსახვით ჭერზე, ზედა ზედაპირზე, ყოველ 5 სმ მანძილის დაშორებით ხანძრის კერასთან, ხოლო 10 სმ მანძილის დაშორებით მოდელის დანარჩენ ნაწილზე, მოეწყო 2 მმ დიამეტრის ხვრელები. აღნიშნულ ხვრელებში, ხანძრის კერასთან განთავსდა 6 ცალი K ტიპის თერმოწყვილები დახურული აღმქმელებით, ხოლო დანარჩენ ხვრელებში- K ტიპის თერმოწყვილები ღია აღმქმელებით.



ფიგ. 1. საავტომობილო გვირაბის ფიზიკური მოდელი:

1 – K ტიპის თერმოწყვილები; 2 - ღერძული ვენტელატორი; 3 - ჰაერის სიჩქარის საზომი ხელსაწყო; 4 - გვირაბის მოდელი; 5 - მოდელის ასაწევ-დასაწევი მოწყობილობა; 6 - მონაცემთა შემკრები მოწყობილობა DT-85; 7 - ბუნებრივი აირის მისაწოდებელი მოქნილი მილი, რომელთანაც მიერთებულია აირის ხარჯსაზომი

გვირაბის მოდელის ერთი მხარე დამაგრებულია განსაზღვრულ სიმაღლეზე საგანგებოდ მოწყობილ სადგარზე, ხოლო მეორე ბოლო კი გვირაბის მოდელის დახრილობის შესაცვლელ საგანგებოდ მოწყობილ კონსტრუქციაზე. აღნიშნული კონსტრუქცია საშუალებას იძლევა ვცვალოთ გვირაბის მოდელის დახრის კუთხე შესაბამისი ბიჯით. გვირაბის მოდელის დახრის შემთხვევაში იმ მხარეს, რომელიც ჰიფსომეტრულად უფრო მაღლა მდებარეობს, ვიდრე დამოდელელებული ხანძრის კერა, განთარსებულია შესაბამისი სიმძლავრის ღერძული ტიპის ვენტილატორი, რომლის საშუალებითაც ხდება გვირაბის მოდელში სავენტილაციო ჰაერის მიწოდება (ფიგ.1.). ღერძული ვენტილატორის მიმდებარედ, გვირაბის მოდელის კონკრეტულ ლოკაციაზე განთარსებულია ციფრული ტიპის, ჰაერის სიჩქარის გასაზომი მოწყობილობა, რომლის ჩვენების მიხედვით შესაძლებელია სავენტილაციო ჰაერის ხარჯის ანგარიში. აღნიშნული ხელსაწყო გაზომვის დიაპაზონია 0,05-10 მ/წმ.

გვირაბის მოდელის შუა ნაწილში, წარმოსახვით ძირზე შესაბამისი ფართის წინასწარ მოწყობილ ღიობში განთავსებულია ბუნებრივი აირის საქშენი, რომლის საშუალებითაც ხდება გვირაბის მოდელზე ხანძრის ინიცირება. ბუნებრივი აირის საქშენში მიწოდებული მეთანის რაოდენობის, და მაშასადამე დამოდელელებული ხანძრის სიმძლავრის რეგულირება ხდება ბუნებრივი აირის მოცულობითი და მასური რეგულატორ-აღმრიცხველის საშუალებით, რომელიც ინტეგრირებულია DT-85 მონაცემების შემკრებ და დამამუშავებელ მოწყობილობასთან.

ამასთან ერთად, აღნიშნულ მოწყობილობასთან მიერთებულია აქ მოყვანილი ციფრული ანემომეტრი და გვირაბის მოდელის მთელს სიგრძეზე განთავსებული თერმოწყვილები. აღნიშნულ DT-85 მოწყობილობას, „დატათეიქერს“ აქვს შესაძლებლობა მასზე მიერთებული ხელსაწყოებიდან, სულ მცირე ყოველი 1 წმ-ის ინტერვალით მიიღოს, შეკრიბოს და დაამუშაოს შესაბამისი ინფორმაცია, რომლის შედეგების წარმოჩენა ხდება მასთან მიერთებულ კომპიუტერის მონიტორზე.

წარმოდგენილ გვირაბის მოდელზე შევისწავლეთ:

- 1) გვირაბში განვითარებული ხანძრისას კვამლის გავრცელების ხასიათი;
- 2) სავენტილაციო ნაკადის „კრიტიკული სიჩქარის“ კორელაცია გვირაბის მოდელის დახრილობა-ბასთან;
- 3) „კრიტიკული სიჩქარის“ ცვალებადობის ტემპის განმსაზღვრელი, „გრადიენტ ფაქტორი“. ფორმულა 2-ის საშუალებით გავიანგარიშეთ ხანძრის სიმძლავრის მოდელირების მასშტაბი

$$\frac{\dot{Q}_m}{\dot{Q}_n} = \left(\frac{l_m}{l_n}\right)^{2.5} = \left(\frac{6}{360}\right)^{2.5} = 0.000036$$

აქედან $\dot{Q}_m = 0.000036\dot{Q}_n$.

მიღებული მასშტაბის მიხედვით ნატურ გვირაბში განვითარებული 5-10-15 მგვტ. ხანძრის სიმძლავრე, გადავიანგარიშეთ გვირაბის მოდელისათვის და შესაბამისად შეადგინა 0.18-0.36-0.54 კვტ. მიღებული შედეგები შევიტანეთ ცხრილი 2-ში.

აღსანიშნავია, რომ 1 მ³ ბუნებრივი აირის სრული წვისას გამოიყოფა 9,3 კვტ რაოდენობის სითბო. ამ მონაცემების მიხედვით გადავიანგარიშეთ საჭირო ბუნებრივი აირის ხარჯი. მიღებული შედეგები ასახულია ცხრილი 1-ში.

ცხრილი 1.

ხანძრის სიმძლავრეების მნიშვნელობები ნატურ გვირაბსა და მოდელზე შესაბამისი მასშტაბის მიხედვით

ხანძრის სრული სიმძლავრე, გვირაბში და მოდელზე.		კონვექციური სითბოს რაოდენობა, გვირაბში და მოდელზე.		ბუნებრივი აირის ხარჯი, მ ³ /სთ.
Q _n , მგვტ.	Q _m , კვტ.	Q _{cn} , მგვტ.	Q _{cm} , კვტ.	
5	0.18	3,5	0.126	0.019
10	0.36	7,0	0.252	0.039
15	0.54	10,5	0.378	0.058

ფორმულა -7 -ის მიხედვით დავიანგარიშეთ, შესაბამისი სიმძლავრის ხანძრებისათვის, კონვექციური სითბოს რაოდენობა, როგორც ნატური ასევე გვირაბის მოდელისათვის. შედეგები შეტანილია ცხრილი 2 -ში.

ფორმულა 3-ის მიხედვით დავადგინეთ, ხანძრის დამოდელეებისას სავენტილაციო ჰაერის ნაკადის მასშტაბი

$$\left(\frac{u_m}{u_n}\right) = \left(\frac{l_m}{l_n}\right)^{0.5} = \left(\frac{6}{360}\right)^{0.5} = 0.13$$

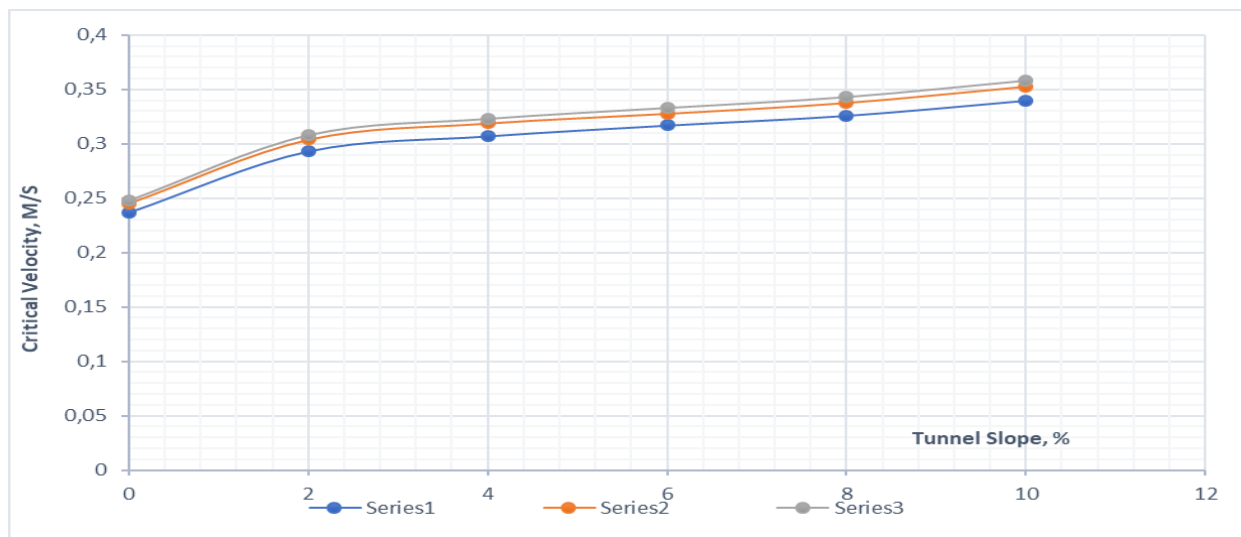
აქედან $u_m = 0.13u_n$.

მიღებული მასშტაბის მიხედვით, გვირაბის მოდელისათვის გადავიანგარიშეთ სავენტილაციო ჰაერის ნაკადის სიჩქარის მნიშვნელობა და შედეგები შევიტანეთ ცხრილი 2-ში.

სავენტილაციო ჰაერის ნაკადის სიჩქარეების მნიშვნელობები ნატურ გვირაბსა და მოდელზე შესაბამისი მასშტაბის მიხედვით

სავენტილაციო ჰაერის ნაკადის სიჩქარე და ნატურაში მოდელზე		სავენტილაციო ჰაერის მასური ხარჯი მოდელზე G_m , კგ/სთ	ნატურ გვირაბში ხანძრის სიმძლავრის შესაბამისი ტემპერატურის ნაზარდის მნიშვნელობა ექსპერიმენტის მონაცემების მიხედვით. °C		
u_n , მ/წმ	u_m , მ/წმ		5 მგვტ.	10 მგვტ.	15მგვტ.
0,5	0,065	5,39	84	168	252
1,0	0,13	10,8	42	84	126
1,5	0,195	16,15	27,4	54,8	82,2
2,0	0,26	21,53	20,7	41,3	62
2,5	0,325	26,9	16,5	32,7	49,1

გვირაბის მოდელზე განთავსებული ციფრული ანემომეტრის ჩვენებების მიხედვით,

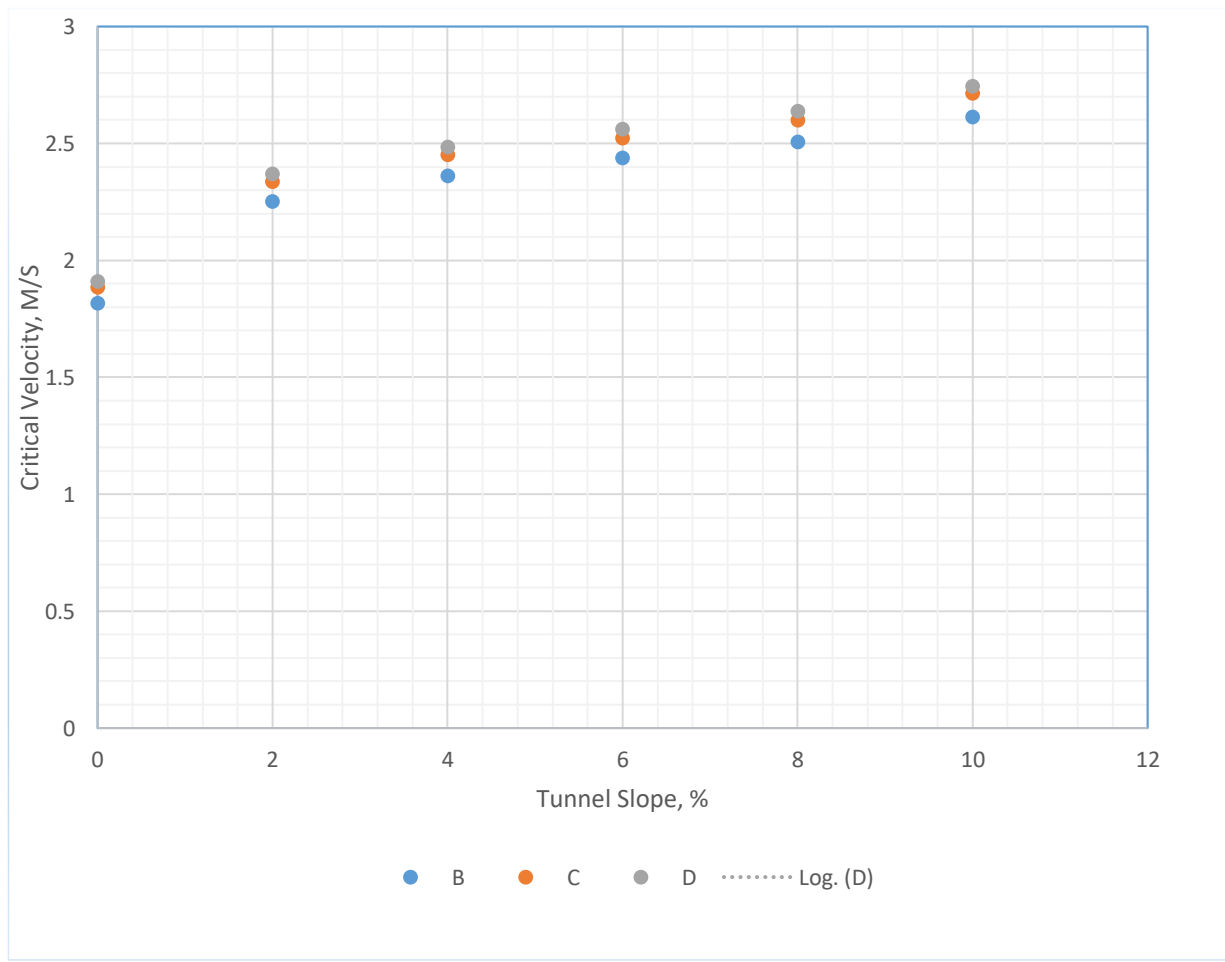


ფიგ. 2. გვირაბის მოდელზე „კრიტიკული სიჩქარის“ ცვალებადობა ჰორიზონტალური და დახრილი გვირაბებისათვის დამოკიდებული ხანძრის სხვადასხვა სიმძლავრისათვის:
 1 – 0,18 კვტ; 2 – 0,36 კვტ; 3 – 0,46 კვტ

გავიანგარიშეთ სავენტილაციო ჰაერის მასური ხარჯი, ხოლო მოდელირებული ხანძრის კერასთან განთავსებული თერმოწყვილების(დახურული აღმქმელებით) მონაცემების მიხედვით, სხვადასხვა სიმძლავრის ხანძრებისათვის განისაზღვრეთ ტემპერატურის ნაზარდის(გვირაბში წვის პროდუქტებისა და გვირაბის გარეთ ჰაერის ტემპერატურებს შორის სხვაობა)საშუალო მნიშვნელობები. შედეგები შეტანილია ცხრილი 3-ში. ამომავალი, ტემპერატურათა ველის უცვლელობაა ხანძრის დამოდების დროს.

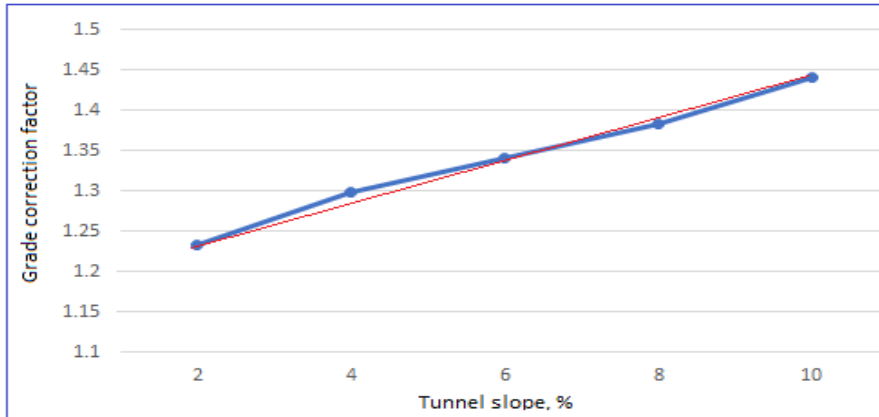
სავენტილაციო ნაკადის „კრიტიკული სიჩქარის“ ცვალებადობასთან დაკავშირებით, გვირაბის მოდელზე განხორციელებული ექსპერიმენტის შედეგები მოცემულია ფიგ.2-ზე.

სავენტილაციო ჰაერის ნაკადის „კრიტიკული სიჩქარის“ მნიშვნელობები და მათი ცვალებადობა ნატურ გვირაბში დახრის კუთხის მიხედვით წარმოდგენილია ფიგ. 3-ზე.



**ფიგ. 3 ჰორიზონტალურ და დახრილ გვირაბებში „კრიტიკული სიჩქარის“ ცვალებადობა სხვადასხვა სიმძლავრის ხანძრებისათვის:
B - 5 მგვტ; C - 10 მგვტ; D - 15 მგვტ**

ნატურ გვირაბში 5-10-15 მგვტ. სიმძლავრის ხანძრების დამოძღვებისას გვირაბის მოდელზე ჩატარებული ექსპერიმენტული კვლევის შედეგად დავადგინეთ „გრადიენტ-ფაქტორის“ საშუალო მნიშვნელობების ცვალებადობა გვირაბის მოდელის დახრის კუთხის მიხედვით. მიღებული შედეგები მოცემულია ფიგ. 4-ზე.



**ფიგ. 4. გვირაბის მოდელის დახრილობის მიხედვით „გრადიენტ-ფაქტორის“ გასაშუალებული კოეფიციენტების ცვალებადობა:
 ლურჯი კონტური - 5-10-15 მგვტ სიმძლავრის ხანძრების საშუალო მაჩვენებლები; წითელი კონტური - გაწვრივებული საშუალო მაჩვენებლები**

დადგენილი კანონზომიერებებისა და მიღებული ახალი შედეგების გამოყენება შესაძლებელია სავენტილაციო ნაკადის „კრიტიკული სიჩქარისა“ და „უკუდინების მანძილის“ განსაზღვრისას გვირაბის ვენტილაციისა და ხანძრებით გამოწვეული საგანგებო სიტაციების მართვის პროექტებში.

4. დასკვნა

15 მგვტ. სიმძლავრის ხანძრის პირობებში, გვირაბის 10 % -ით დახრილობის შემთხვევაში, სავენტილაციო ნაკადის კრიტიკული სიჩქარის მაქსიმალური მნიშვნელობა შეადგენს 2,75 მ/წმ, ჰორიზონტალური გვირაბისათვის, კრიტიკული სიჩქარის მინიმუმი არ აღემატება 1,82 მ/წმ, ხოლო, როდესაც გვირაბის დახრის კუთხის დიაპაზონი 2-10 % - ია, კრიტიკული სიჩქარის ცვალებადობის კანონზომიერება წრფივია და იცვლება 2,25-2,75 დიაპაზონის ფარგლებში. ნატურ გვირაბში 5 - 15 მგვტ სიმძლავრის ხანძრებისათვის, როდესაც გვირაბის დახრის კუთხის დიაპაზონი შეადგენს 2-10 %, გრადიენტ-ფაქტორის ცვალებადობის კანონზომიერება წრფივია. გრადიენტ-ფაქტორის მნიშვნელობა მოცემული დიაპაზონისათვის იცვლება 1,22 - 1,45 ფარგლებში.

წინამდებარე ნაშრომი მომზადებულია შოთა რუსთაველის ეროვნული სამეცნიერო ფონდის ფინანსური მხარდაჭერით. (გრანტის ნომერი: AR-19-1936, დასახელება: „ტრანსფორმირებადი სისტემების დამუშავება და გამოცდა საავტომობილო გვირაბში სიცოცხლის გადასარჩენად ხანძრის პირობებში“).

გამოყენებული ლიტერატურა

1. P.H. Thomas (1958) *Fire Research Notes* 351, Available on <http://www.iafss.org/publications/frn/351/-1>.
2. P.L. Hinkley (1970) The flow of hot gases along an enclosed shopping mall - a tentative theory. *Fire Research Notes* 807, Fire Research Station, Watford, UK.
3. A.J.M. Heselden (1976) Studies of fire and smoke behavior relevant to tunnels. In: *Proceedings of the 2nd International Symposium of Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels*. Cambridge University Press, pp. 1-6.
4. N.H. Danziger, and W.D. Kennedy (1982) *4th International Symposium on the Aerodynamics & Ventilation of Vehicle Tunnels*, 169-186.
5. World Road Association (1999) Fire and smoke control in road tunnels. PIARC Report 05.05.B, World Road Association.
6. National Fire Protection Association (2011) NFPA 502 Standard for road tunnels, bridges, and other limited access highways. National Fire Protection Association, Quincy, US.
7. National Fire Protection Association (2014) NFPA 502 Standard for road tunnels, bridges, and other limited access highways. National Fire Protection Association, Quincy, US.
8. Y.Z. Li, H. Ingason, and L. Jiang (2018) *Influence of tunnel slope on smoke control* (RISE Research Institutes of Sweden).
9. Y.Z. Li, and H. Ingason (2018) *Fire Safety Journal* **99**, 22-26.
10. COMMISSION DIRECTIVE 2004/102/EC (2004) On minimum safety requirements for tunnels in the Trans-European Road Network, THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL OF THE EUROPEAN UNION, On line at: http://www.ocean-commerce.co.jp/ISPM_Report/pdf_countries/EUDirective2004102EC.pdf
11. TRANS/AC 7/9 (2001) RECOMMENDATIONS OF THE GROUP OF EXPERTS ON SAFETY IN ROAD TUNNELS, Economic and Social Council, Multidisciplinary Group of Experts on Safety in Tunnels, On line at: <https://unece.org/DAM/trans/doc/2002/ac7/TRANS-AC7-09e.pdf>
12. TRANS/AC 7/11 (2002) REPORT OF THE AD HOC MULTIDISCIPLINARY GROUP OF EXPERTS ON SAFETY IN TUNNELS ON ITS FIFTH SESSION, Economic and Social Council, Multidisciplinary Group of Experts on Safety in Tunnels, On line at: <https://unece.org/fileadmin/DAM/trans/doc/2002/ac7/TRANS-AC7-11e.pdf>

13. A. Vaitkevicius, and R. Carvel (2016) Investigating the Throttling Effect in Tunnel Fires. *Fire Technology*, Vol. 52, pp. 1619–1628.
14. A.N. Beard, and R.O. Carvel (2005) *The Handbook of Tunnel Fire Safety*, Thomas Telford Publishing, London.
15. Ilias N., Lanchava O., Nozadze G. (2017) Numerical modelling of fires in road tunnels with longitudinal ventilation system. *Supplement of Quality-Access to Success*, 18, 85-88.
16. O. Lanchava, G. Abashidze, and D. Tsverava (2017) Securing fire safety for underground structures. *Quality-Access to Success*, Vol. 18, S1, pp. 47-50.
17. F. Tang, Z.L. Cao, A. Palacios, and Q. Wang (2018) A study on the maximum temperature of ceiling jet induced by rectangular-source fires in a tunnel using ceiling smoke extraction. *International Journal of Thermal Sciences*, 127, 329–334.
18. O. Lanchava, N. Ilias, G. Nozadze, and S.M. Radu (Jan 2019) Heat and hygroscopic mass exchange modeling for safety management in tunnels of metro. *Quality Access to Success*, Vol. 20, S1, pp. 27-33.
19. O. Lanchava, N. Ilias, G. Nozadze, S.M. Radu, R.I. Moraru, Z. Khokerashvili, and 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 2017*, Bucharest, pp. 342-352.
20. A. Kashef, Z. Yuan, and B. Lei (2013) Ceiling temperature distribution and smoke diffusion in tunnel fires with natural ventilation, *Fire Safety Journal* 62, 249–255.
21. O. Lanchava (2020) Analysis of the parameters of the fire modeled in a road tunnel, *GEORGIAN SCIENTISTS* 2 (4).
22. G.T. Atkinson, and Y. Wu (1996) Smoke control in sloping tunnels. *Fire Safety Journal*, 27, 335–341.
23. J. Li, Y.F. Li, C.H. Cheng, and 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.
24. O. Lanchava, and N. Ilias (2020) Critical velocity analysis for safety management in case of tunnel fire. *MATEC Web of Conferences* 305, 00023.
25. Y.-P. Lee, and K.-Ch. Tsai (2012) Effect of vehicular blockage on critical ventilation velocity and tunnel fire behavior in longitudinally ventilated tunnels, *Fire Safety Journal* 53, 35–42.
26. O. Lanchava, N. Ilias, G. Nozadze (Jan 2017) Some problems for assessment of fire in road tunnels. *Quality Access to Success*, Vol. 18, S1, pp. 69-72.
27. O.A. Lanchava (1982) Heat and mass exchange in permanent mine workings. *Soviet Mining* 18 (6), 529-532.

28. O.A. Lanchava (1986) Heat and mass exchange in newly driven mine workings. *Sov. Min. Sci. (Engl. Transl.); (United States)* 21 (5).
29. O.A. Lanchava (1998) Hygroscopic heat and mass transfer in underground structures, *GTU*, Tbilisi, 272.
30. H. Ingason, and Y.Z. Li (2010) Model scale tunnel fire tests with longitudinal ventilation. *Fire Safety Journal*, 45, 371–384.
31. H. Wan, Z. Gao, J. Han, Y. Zhang (2019) A numerical study on smoke back-layering length and inlet air velocity of fires in an inclined tunnel under natural ventilation with a vertical shaft. *International Journal of Thermal Sciences*, Volume 138, pp. 293-303.
32. C.G. Fan, J. Yang (2017) Experimental study on thermal smoke backlayering length with an impinging flame under the tunnel ceiling. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 82, pp. 262–268.
33. 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*, Vol. 82, pp. 82-98.
34. O. Lanchava, N. Ilias, G. Nozadze, S.M. Radu, R.I. Moraru, Z. Khokerashvili, and N. Arudashvili (2019) FDS Modelling of the Piston Effect in Subway Tunnels. *Environmental Engineering and Management Journal*. 18 (4), pp. 317-325.
35. O. Lanchava, and N. Ilias (2018) Complex calculation method of temperature, mass transfer potential and relative humidity for ventilation flow in subway. *Technical Sciences* 3 (1), 69-84.
36. O. Lanchava, and N. Ilias (2017) Some issues of thermal calculation of ventilation air for the metro. *Journal of Engineering Sciences and Innovation* 2 (2), 92-105.
37. O. Lanchava, G. Nozadze, N. Bochorishvili, Z. Lebanidze, N. Arudashvili, M. Jangidze, and K. Tsikarishvili (2014) Criteria for evaluation of emergency firefighting in transport tunnels. “*Transport Bridge Europe-Asia*”, Materials of International Conference, 29-34.
38. O. Lanchava, N. Ilias, S.M. Radu, L. Makharadze, T. Kunchulia, N. Arudashvili, Z. Khokerashvili (2020) A system of transformable crosspieces to block harmful combustion product propagation in tunnels. Web-page “Association for Science”.
39. N. Ilias, O. Lanchava, and G. Nozadze (2020) Numerical simulation of air flow in short metro ventilation shafts caused by a piston effect. *MATEC Web of Conferences* 305, 00050.
40. O.A. Lanchava, G. Nozadze, N. Arudashvili, and Z. Khokerashvili (2021), TO DETERMINATION OF VENTILATION AIR OF THE METRO OF TBILISI BY THERMAL FACTOR. *GEORGIAN SCIENTISTS* 3 (1).

The results of physical modeling of fires for road tunnels

Zaza Khokerashvili, Davit Tsanava

Georgian Technical University

Abstract

The paper gives the results of a fire development study using physical models of inclined vehicular traffic tunnels scaled 1:60. The tunnel inclination varied within 0-10% with a 2% increment. The fire strength initiated and developed in a natural tunnel varied within 5-15 MW with a 5 MW increment. The length of the natural tunnel was 360 m, width: 8 m, height: 6 m, cross-sectional area: 48 m², and the tunnel width and height ratio: 1.33. The model of the natural tunnel of the given geometry was made of a 2-mm-thick stainless steel sheet with an appropriate scale. The sizes of the tunnel model are: length: 6 m, width: 0.16 m, height: 0.12 m, and cross-sectional area: 0.0192 m². By doing experiments on this model, we studied the nature of propagation of gases (smoke) emitted during the fire initiation and development, specified the impact of the gradient factor on the rate of variability of the critical velocity and backlayering distance. The said characteristics were studied according to the air temperature variability in the tunnel model. The air temperature was measured with K-type thermocouples equipped with open and closed detectors. Maximum measuring temperature was 800°C. The thermocouples were installed in the ceiling of the tunnel model along the entire length, with 5 and 10 cm increments. The fire was modeled with natural gas. Ventilation air was supplied into the model by an axial fan from one portal of the model. The velocity of the ventilation air was measured with an anemometer, and the air discharge was calculated at every moment according to the velocity. The required strength of the modeled fire was provided by natural gas, and the measurement was done with a volumetric and mass regulatory meter. Simultaneous data collection, processing, analysis and digital transmission of data from the K-type thermocouples, anemometers and natural gas flow meters were provided with DT-85 Datalogger. The obtained results can be used to develop road tunnel ventilation projects that take into account the impact of fires on ventilation.

Key words: Aerodynamic resistance, critical velocity, gradient factor, backlayering distance