

ხანძრის გავლენა გვირაბის ვენტილაციაზე რიცხვითი მოდელირების შედეგების მიხედვით

ომარ ლანჩავა¹, გიორგი ჯავახიშვილი²

¹ შრომის დაცვისა და საგანგებო სიტუაციების მართვის დეპარტამენტი, საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი, თბილისი, საქართველო

² სამთო ტექნოლოგიების დეპარტამენტი, საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი, თბილისი, საქართველო

აბსტრაქტი. ნაშრომში მოცემულია FDS გარემოში რიცხვითი მოდელირებით შესრულებული ხანძრის მიწისქვეშ განვითარების სცენარები და თანმდევი პროცესების ანალიზი. ნაჩვენებია გრძივი ვენტილაციის კრიტიკული სიჩქარის, წვის პროდუქტების უკუდინების სიგრძისა და გრადიენტ-ფაქტორის ცვალებადობა ხანძრის სიმძლავრის, გვირაბის გეომეტრიისა და სხვა ფაქტორების მიხედვით. აღნიშნულია, რომ ფრუდის რიცხვის კრიტიკული მნიშვნელობა, ისე როგორც ვენტილაციის კრიტიკული სიჩქარე არ არიან მუდმივი სიდიდეები მიწისქვეშ მიმდინარე რთულ პროცესებში. კონკრეტული რიცხვითი მაგალითების მიხედვით ნაჩვენებია, რომ თერმულად და მექანიკურად აღძრული სავენტილაციო ნაკადები ერთმანეთთან ალგებრულად იკრიბებიან და აღნიშნული გარემოების მხედველობაში მიღების გარეშე შესაძლებელია გართულდეს სიცოცხლის გადარჩენა მიწისქვეშა ხანძრების შემთხვევაში. როგორც თეორიულად, ისე რიცხვითი ექსპერიმენტების გზით ნაშრომში დადგენილად უნდა მივიჩნიოთ, რომ ძლიერ ხანძარს გვირაბებში შეუძლია აღძრას ვენტილატორებზე უფრო დიდი დინამიკური წნევა, რომელსაც შეუძლია დადმავალი სავენტილაციო ნაკადების გადაყირავება 3% და უფრო მეტი დახრილობის გვირაბებში. წინამდებარე ნაშრომი დღის წესრიგში აყენებს არა მხოლოდ ხანძრის შემთხვევათა გულმოდგინე დაწვრილებით აღწერასა და ანალიზს, არამედ კონკრეტული გვირაბის გეომეტრიის, ადგილმდებარეობის, ბუნებრივი პირობების, სავენტილაციო სისტემებისა და ხანძრის სიმძლავრის მიხედვით მოქმედების ცხადი ალგორითმის დამუშავების საჭიროობას და მიღებული შედეგების გავრცელებას მამშველებზე, გვირაბის მომსახურე პერსონალსა და მთელ საზოგადოებაზე.

საკვანძო სიტყვები: გრძივი ვენტილაცია, კრიტიკული სიჩქარე, უკუდინება, გრადიენტ-ფაქტორი, FDS მოდელირება.

1. შესავალი

სტატისტიკის მიხედვით ცალკეულ გვირაბში სერიოზული ხანძრის მოხდენის შესაძლებლობა ართუ ისე მაღალია, მაგრამ პერსპექტივაში გვირაბების რაოდენობის მატება და

მოდრაობის ინტენსიურობის ზრდა იწვევს ხანძრის გაჩენის რისკის მომატებას. ხანძრის განვითარება მიწისქვეშ თავისებურებებით ხასიათდება, რომლებიც შეზღუდულ მიწისქვეშა სივრცეში აუცილებლად გამოიწვევენ კატასტროფულ შედეგებს. ამიტომ საავტომობილო გვირაბების ვენტილაცია დაფუძნებულია ორ ერთმანეთისაგან განსხვავებულ სცენარზე: 1. გვირაბის ვენტილაცია სტანდარტულ პირობებში, 2. სახანძრო ვენტილაციის დამუშავება საგანგებო პირობებისათვის სიცოცხლის, ინფრასტრუქტურის გადარჩენისა და ხანძრის ლიკვიდაციისათვის ხელშეწყობის მიზნით.

გვირაბის ხანძრების საშიშროება განპირობებულია წვის ტოქსიკური პროდუქტების ანომალური გავრცელებით მიწისქვეშა სივრცეში, რომელიც პრაქტიკულად მთლიანად ზღუდავს ხილვადობას. შესრულებული კვლევებისა და არსებული გამოცდილების მიხედვით შესაძლებელია კვალიფიციურად გადაწყდეს ხანძართან დაკავშირებული ისეთი საკითხები, როგორებიცაა: კვამლის გავრცელების პრევენცია მიწისქვეშ [1-5], ტემპერატურის დინამიკა და მისი მავნე გავლენის შემცირება გვირაბებში [6-8], ხანძრის მიწისქვეშ განვითარების სცენარები [4, 9-11], კვამლისა და ტოქსიკური წვის პროდუქტების გავრცელების კანონზომიერებები სავენტილაციო ნაკადის მოძრაობის საპირისპირო მიმართულებით [5, 10-12], კრიტიკული სიჩქარის, უკუდინების მანძილის თეორიული და ექსპერიმენტული კვლევა [11, 13-15], გვირაბის დახრილობის გავლენა უკუდინების სიგრძეზე ბუნებრივი ვენტილაციის პირობებში [5, 12], ხანძრის გავლენა სავენტილაციო სისტემაზე [7, 12, 15].

გრძივი ვენტილაციის კრიტიკული სიჩქარე და წვის პროდუქტების უკუდინების სიგრძე გვირაბის ვენტილაციის მნიშვნელოვანი ტექნოლოგიური პარამეტრებია ხანძრის შემთხვევაში. უკუდინება არის წვის პროდუქტების საპირისპირო გავრცელება ჰაერის სუფთა ჭავლზე, რაც გამოწვეულია მათი მაღალი ტემპერატურით, ამის გამო ნაკლები სიმკვრივით და მოძრაობით ამომგდები ძალების ხარჯზე.

კრიტიკული სიჩქარე კი არის უკუდინების გამომრიცხავი მინიმალური სიჩქარე, რომელიც უნდა მიენიჭოს სავენტილაციო ნაკადს გრძივი სავენტილაციო სისტემის პირობებში. სახანძრო ვენტილაციის ორივე მნიშვნელოვანი პარამეტრი სამეცნიერო მიმოქცევაში შემოტანილია თომასის მიერ [17, 18]. კრიტიკული სიჩქარის კონცეფციამ განვითარება ჰპოვა დახრილი გვირაბებისათვის მას შემდეგ, რაც კრიტიკული სიჩქარის რიცხვითი სიდიდის შემასწორებელი კოეფიციენტი - გრადიენტ-ფაქტორი იქნა შემოღებული. ვენტილაციის ყველა აღნიშნული ტექნოლოგიური პარამეტრი ფართოდ გამოიყენება სახანძრო ვენტილაციის დამუშავების საქმეში [19-23].

ჩვენს ნაშრომში [7] კლაპირონის განტოლების საფუძველზე დადგენილია, რომ გვირაბებში ძლიერი ხანძრის პირობებში თერმულად აღძრული ნაკადი ყოველთვის პრევალირებს მექანიკურად აღძრულ ნაკადზე. ამიტომ ხანძარს ამ თვალსაზრისით უფრო მეტი პოტენციალი აქვს, ვიდრე უმძლავრეს საგვირაბე ვენტილატორებს. შესაბამისად, ყველა ცნობილი უსაფრთხო სავენტილაციო სისტემები უსაფრთხოებას ინარჩუნებენ მხოლოდ გარკვეულ პირობებში და მხოლოდ გარკვეულ დროის შუალედში. როგორც წესი, ეს უკანასკნელი ყოველთვის შეზღუდულია ძლიერი ხანძრების შემთხვევაში.

2. თეორია

უკუდინების კრიტიკული სიჩქარე ფრუდის კრიტერიუმს პირველად დაუკავშირა თომასმა [17], აღნიშნა რა, რომ წვის პროდუქტებისა და ჰაერის ნარევის დინების ხასიათი დამოკიდებულია კვამლის ტივტივადობისა და სავენტილაციო ჭავლის ინერციული ძალების ფარდობაზე, რომელიც გამოხატულია ფრუდის კრიტერიუმით და მცირე მასშტაბის სპირტის ალის მიხედვით შემოიტანა კრიტერიუმის კრიტიკული რიცხვითი სიდიდე $Fr_c = 1$.

თვით ფრუდის კრიტერიუმს კი აქვს სახე

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

ფორმულებში შემავალი სიმბოლოები განმარტებულია ცხრილში 1.

ცხრილი 1. ფორმულებში შემავალი სიდიდეების განმარტება და განზომილებები

p - წნევა, კპა;

v - აირის კუთრი მოცულობა, $v = 1/\rho$, მ³/კგ;

ρ - აირის სიმკვრივე, კგ/მ³;

R - აირის კუთრი მუდმივა, $R = 287$ ჯ/(კგ·K);

m - ნამწვი აირის მასა, კგ;

V - ჰაერის მოცულობა, რომელიც მონაწილეობს წვის პროცესში, მ³;

dV - მოცულობის ნაზარდი, მ³;

dl - ნაკადის მიერ გავლილი მანძილი, მ;

du - ნაკადის სიჩქარის ნაზარდი მოცემულ მომენტში, მ/წმ;

A - გვირაბის განივი კვეთის ფართობი, მ²;

τ - დრო, წმ;

p_2 - ხანძრის მიერ განვითარებული წნევის სიდიდე, კპა;

c_p - ჰაერის კუთრი თბოტევადობა, კჯ/(კგ·K);

Fr_c - ფრუდის კრიტიკული რიცხვი;

g - გრავიტაციული აჩქარება, მ/წმ²;

H - გვირაბის სიმაღლე, მ;

k - პროპორციულობის მუდმივა;

k_g - გრადიენტ-ფაქტორი;

l - გვირაბის სიგრძე, მ;

b - გვირაბის სიგანე, მ;

\dot{Q} - მთლიანი სითბოს გამოყოფის მაჩვენებელი ნატურაში, კვტ;

\dot{Q}_c - კონვექციური სითბო, კვტ;

s - გვირაბის დახრილობა, %;

T - კვამლის საშუალო ტემპერატურა, K;

T_0 - გარე ჰაერის ტემპერატურა, K;

ΔT - ტემპერატურის ნაზარდი, K;

u_c - კრიტიკული სიჩქარე ჰორიზონტალური გვირაბისათვის, მ/წმ;

u_{cs} - კრიტიკული სიჩქარე დახრილ გვირაბში, მ/წმ;

u_0 - გრძივი ვენტილაციის საწყისი სიჩქარე, მ/წმ;

$\Delta\rho$ - სიმკვრივეთა სხვაობა გარე ჰაერსა და კვამლს შორის, კგ/მ³;

ρ_0 - გარე ჰაერის სიმკვრივე, კგ/მ³;

φ - გვირაბის სიგანის ფარდობა გვირაბის სიმაღლესთან;

L_b - უკუდინების სიგრძე, მ.

ხანძრისათვის დამახასიათებელი უმნიშვნელოვანესი პარამეტრი გრძივი ვენტილაციის პირობებში - კრიტიკული სიჩქარე ჰორიზონტალური გვირაბებისათვის განისაზღვრება ფორმულით

$$u_c = k \left(\frac{g \dot{Q}_c H}{\rho_0 c_p T A} \right)^{1/3} \quad (2)$$

პროპორციულობის მუდმივა k განისაზღვრება ფრუდის კრიტიკული რიცხვით

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

ხანძრის მიერ გამოყოფილი კონვექციური სითბო განისაზღვრება ფორმულით

$$\dot{Q}_c = \rho_0 c_p u_0 A \Delta T \quad (4)$$

კონვექციური სითბოსა და საერთო სითბოს შორის შემდეგი დამოკიდებულებაა

$$\dot{Q}_c = 0.7 \dot{Q} \quad (5)$$

კვამლის საშუალო ტემპერატურა გამოითვლება ფორმულით

$$T = T_0 + \frac{\dot{Q}_c}{\rho_0 c_p A u_c} \quad (6)$$

სირთულის გამო დახრილ გვირაბებში კრიტიკული სიჩქარე და უკუდინების სიგრძე ნაკლებად არის შესწავლილი და მათი სიდიდეების გამოთვლა ხდება ჰორიზონტალური გვირაბებისათვის არსებული შედეგების გამოყენებით [24]. დახრილ გვირაბში კრიტიკული სიჩქარის u_{cs} საანგარიშო ფორმულაში გამოყენებულია ჰორიზონტალური გვირაბისათვის კრიტიკული სიჩქარის რიცხვითი სიდიდე u_c შემდეგი განტოლებით [25]

$$u_{cs} = k_g u_c \quad (7)$$

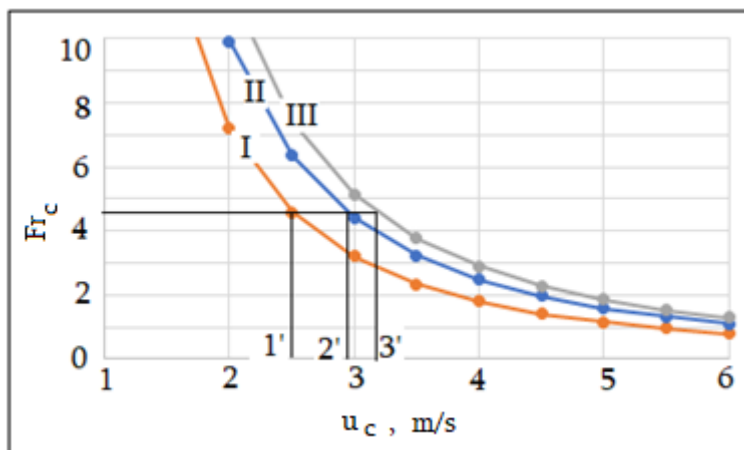
მესამე მნიშვნელოვანი პარამეტრი - უკუდინების სიგრძე L_b განისაზღვრება შემდეგი ფორმულით

$$\frac{L_b}{H} = 18.5 \ln(u_{cs}/u_c) \quad (8)$$

აღსანიშნავია, რომ კრიტიკული სიჩქარის განსაზღვრისათვის ფორმულით (2), საჭიროა კვამლის საშუალო ტემპერატურისა და პროპორციულობის მუდმივას ცოდნა, ხოლო მათი საანგარიშო ფორმულები (3) და (6) შეიცავენ საძიებელ სიდიდეს u_c -ს. აღნიშნულის დასაძლევად შემოიტანეს 4.5-ის ტოლი ფრუდის კრიტიკული რიცხვი, რაც ამარტივებს გაანგარიშებას, მაგრამ არ არის საკითხის გადაჭრის გზა [7, 8].

დანზიგერმა და კენედიმ [26], 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 [27], 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“ [28].

აღნიშნული დაშვება საკითხს ამარტივებს, რადგან ამ შემთხვევაში ფორმულა (3)-ის მიხედვით კოეფიციენტი $k = 0.606$, მაგრამ არ არის მართებული, რაც ჩანს ქვემოთ მოცემული ფიგურიდანაც.



ფიგ. 1. ფრუდის კრიტიკული რიცხვის ცვალებადობა კრიტიკული სიჩქარის მიხედვით, როცა გვირაბის სიმაღლე არის 6 მ; გვირაბის განივი კვეთის ფართობი 50 მ²; გარე ჰაერის ტემპერატურა 293 K ; კვამლის საშუალო ტემპერატურების შესაბამისად: I – 573; II – 903; III – 1373 K.

ფიგ. 1-დან ჩანს, რომ კრიტიკული სიჩქარის რიცხვითი სიდიდის ცვალებადობის დიაპაზონი არის 2.5-3.2 მ/წმ მაშინ, თუ ფრუდის კრიტიკული რიცხვი არის მუდმივი სიდიდე ($Fr_c = 4.5$). ამგვარად, კრიტიკული სიჩქარის მაქსიმალური სიდიდე ამ შემთხვევაში შეადგენს 3.2 მ/წმ და თითქოსდა ანალოგიურ პირობებში უკუდინების პრობლემა აღარ უნდა არსებობდეს. მით უმეტეს, რომ ავარიული ვენტილაციის სტრატეგიაში მიღებულია, რომ გრძივი ვენტილაციის პირობებში, ჰაერის სიჩქარე 3 მ/წმ საკმარისია კვამლის კონტროლისათვის გვირაბების დიდ ნაწილში ნებისმიერი ხანძრის პირობებში. აღნიშნული დებულება დასაბამს იღებს თომასიდან [18], რომელიც აგრეთვე დადასტურებულია

ნაშრომებში [3, 16]. კვამლის გაკონტროლების იდეა კი არის, რომ ხანძრის კერიდან გვირახის ჰაერმიმწოდებელ პორტალამდე უნდა იყოს კვამლისა და წვის სხვა ტოქსიკური პროდუქტებისაგან თავისუფალი ზონა.

აღნიშნული დებულებისა და მასთან დაკავშირებული არსებითი მნიშვნელობის საკითხების მართებულობის შემოწმების მიზნით შევასრულეთ რიცხვითი მოდელირება FDS პროგრამულ გარემოში სასრულ მოცულობათა მეთოდის გამოყენებით.

3. შედეგები და დისკუსია

3.1. ხანძრის სცენარები გვირახში გრძივი ვენტილაციის პირობებში

FDS პროგრამულ გარემოში სასრულ მოცულობათა მეთოდის გამოყენებით შესწავლილია გვირახში სხვადასხვა სიმძლავრის 5, 10, 20, 30, 50 მეგავატი ხანძრების განვითარების სცენარები სხვადასხვა დახრილობის გვირახებში ($s = 0, 1, 3, 4, 6 \%$). გვირახის გეომეტრია შემდეგია: სიგრძე - $l = 100$ მ; სიგანე - $b = 8$ მ; სიმაღლე - $H = 6$ მ; ხანძრის კერის ფართობი 16 მ²; გვირახის გვერდების თანაფარდობის კოეფიციენტი $\varphi = 1.33$. ცეცხლის კერა გეომეტრიული ზომებით $2.75 \times 5.8 \times 1.5$ მ განთავსებულია გვირახის ცენტრალურ ნაწილში. ხანძრის მოდელირებისათვის უმრავლეს შემთხვევებში წვის რეაგენტი იყო ბენზინი. შესრულდა აგრეთვე ცალკეული რიცხვითი ექსპერიმენტები წვის შემდეგ რეაგენტებზე: დიზელი, ნავთობი და შეშა. მოდელირების დრო - 120 წმ. რიცხვითი ამოცანების მოდელირებისათვის გამოყენებული იქნა მოცულობითი ბადური მეთოდი, ბადის ცალკეული უჯრედის ზომები იყო $0.5 \times 0.5 \times 0.5$ მ. ყოველი მოდელი შეიცავდა დაახლოებით 55 ათას უჯრედს.

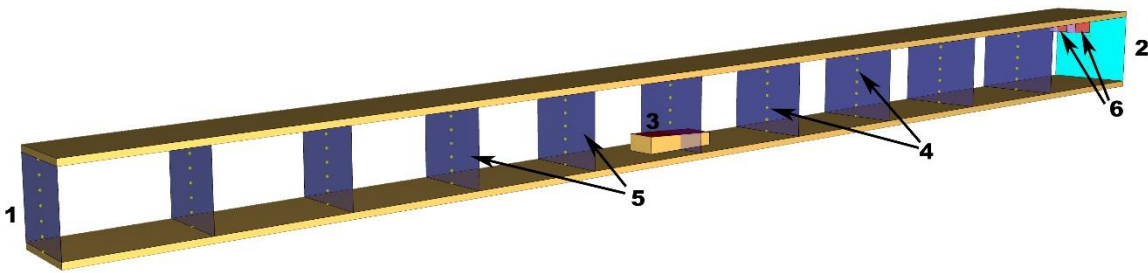
დადმავალი სავენტილაციო ნაკადების მოდელირებისათვის ზედა პორტალთან დროისათვის $\tau = 0$ წმ ჩაირთვება 2, 3 ან 4 ცალი ჭავლური ვენტილატორი, რომელთა ჯამური წარმადობა შესაბამისად შეადგენს 28, 42 და 56 მ³/წმ. ვენტილატორის მიერ განვითარებული წნევა არის 2000 პა. ვენტილატორები ექვეციით წარიტაცებენ ჰაერის ნაკადს, რომლის საშუალო სიჩქარე გვირახში ცვალებადია ვენტილატორების რიცხვის მიხედვით. დროის მომენტში $\tau = 60$ წმ მოდელზე ამოქმედდება ხანძარი და ექსპერიმენტი დანარჩენ დროში გრძელდება ხანძრის თანხლებით. აღმავალი სავენტილაციო ნაკადების მოდელირებისათვის ვენტილატორების ჩართვა მოხდება ქვედა პორტალთან, ხოლო დანარჩენი აღწერილის ანალოგიურად განხორციელდება.

მოდელირების შედეგების რეგისტრაციისთვის გამოყენებული იქნა წერტილოვანი და მოცულობითი ვირტუალური საზომი მოწყობილობები. წერტილოვანი საზომი მოწყობილობები ახდენდნენ გასაზომი სიდიდის რეგისტრაციას განთავსების წერტილში. ასეთი მოწყობილობები განლაგდა გვირახის ღერძულა ხაზზე გრძივი მიმართულებით 10 მ ინტერვალით ორ რიგად. პირველი რიგი განლაგდა გვირახის სავალი ნაწილიდან 1.7 მ სიმაღლეზე, ხოლო მეორე რიგი - 5.7 მ-ზე. მოდელირებისას გამოყენებული იქნა ოთხი ჯგუფის საზომი მოწყობილობები, რომლებიც ახდენდნენ ჰაერის სიჩქარის, ტემპერატურის, ჰაერის და ჭვარტლის სიმკვრივეების გაზომვას და დამახსოვრებას. მოცულობითი საზომი მოწყობილობები ახდენდნენ გვირახის ერთეულოვანი სისქის ელემენტარულ კვეთში ჰაერის,

ნახშირბადის მონოოქსიდის, ნახშირბადის დიოქსიდისა და ჭკარტლის სიმკვრივეების საშუალო მნიშვნელობების განსაზღვრას.

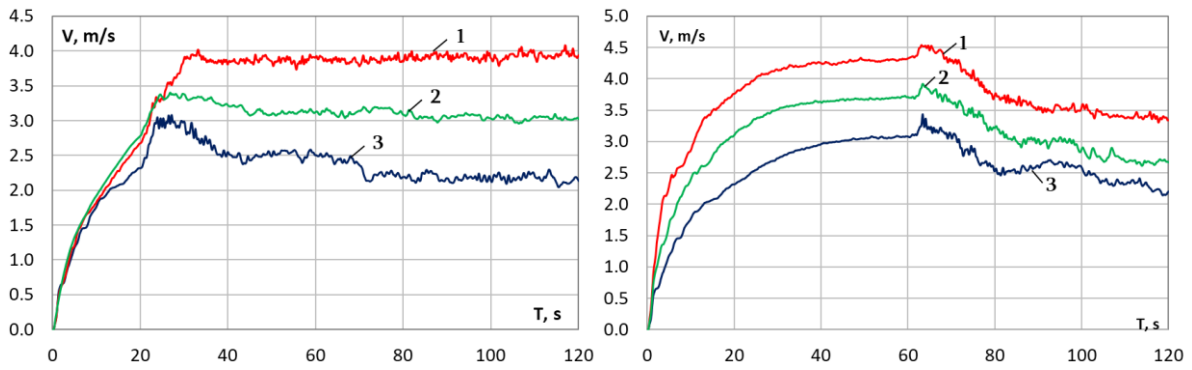
ჰაერის მოძრაობის სიჩქარის დეტალური აღრიცხვისთვის გამოყენებული იქნა გაზომვის კომბინირებული მეთოდი, როდესაც რეგისტრაცია ხორციელდებოდა როგორც წერტილოვანი, ისე მოცულობითი საზომი მოწყობილობების მეშვეობით. ამასთან, წერტილოვანი მოწყობილობები განლაგდა გვირაბის ღერძულა ხაზის მართობულ სიბრტყეზე. ყოველ სიბრტყეში შვიდი-შვიდი ცალი ანალოგიური მოწყობილობა ერთმანეთისაგან 1 მ დაშორებით განლაგდა ისე, რომ პირველი მოწყობილობა განთავსდა იატაკის დონეზე. სიბრტყეებს შორის დაშორება ექსპერიმენტის მსვლელობისას შეადგენდა 10 მ (ფიგ 2).

წარმოვადგენთ გვირაბში ხანძრის მოდელირების დამახასიათებელ სქემას, რომელიც შეესაბამება როგორც დახრილ, ისე ჰორიზონტალურ გვირაბს. ყველა მოდელისათვის ხანძრის კერა განლაგებული არის გვირაბის ცენტრალურ ნაწილში. აღმავალი ნაკადის შემთხვევაში ჰაერის მიწოდება ხდება პორტალიდან 1, ხოლო გაჭუჭყიანებული ჰაერის არინება - პორტალიდან 2. დაღმავალი ნაკადისათვის პირიქით - ჰაერმიწოდებელი არის პორტალი 2.



ფიგ. 2. ჭავლური ვენტილატორებისა და საზომი მოწყობილობების განლაგება გვირაბის მოდელზე გრძივი ვენტილაციის სხვადასხვა სქემებისათვის: 1 - ქვედა პორტალი, საიდანაც იწყება სიგრძის ათვლა; აღნიშნულ პორტალში დამონტაჟებულია ორი, სამი ან ოთხი ცალი ჭავლური ვენტილატორი აღმავალი სავენტილაციო ნაკადებისათვის; 2 - ზედა პორტალი, სადაც დამონტაჟებულია ორი, სამი ან ოთხი ცალი ჭავლური ვენტილატორი დაღმავალი სავენტილაციო ნაკადებისათვის; 3 - ხანძრის კერა; 4 - წერტილოვანი საზომი მოწყობილობები; 5 - მოცულობითი საზომი მოწყობილობები; 6 - ვენტილატორები დაღმავალი სავენტილაციო ნაკადებისათვის.

ექსპერიმენტების მიზანი იყო კრიტიკული სიჩქარის განუხრელი ზრდის დემონსტრირება ხანძრის სიმძლავრის მატების პირობებში, აგრეთვე უკუდინების თავიდან ასაცილებლად აღნიშნული ცნებაზე დაფუძნების რეალობასთან შეუსაბამობა რიცხვითი მოდელირების შედეგების შესაბამისად. გვირაბის განივი კვეთისათვის აღებული იქნა მარკუთხა ფორმის მარტივი გეომეტრია. სავენტილაციო ნაკადის საშუალო სიჩქარის ცვალებადობა 50 მგვტ ხანძრის შემთხვევაში სხვადასხვა დახრილობის გვირაბებში მოცემულია ფიგ. 3-ის მარცხენა ნახაზზე. ამ შემთხვევაში გვირაბში ჰაერის მიწოდება ხდება ერთმანეთის მიმართ პარალელურად დამონტაჟებული ორი ცალი ჭავლური ვენტილატორით. იმავე ფიგურის მარჯვენა ნახაზზე მოცემულია სავენტილაციო ნაკადის სიჩქარის ცვალებადობა როცა ერთმანეთის პარალელურად მოქმედებენ ორი, სამი და ოთხი ცალი ერთდროულად ჩართული ვენტილატორები.



ფიგ. 3. სავენტილაციო ნაკადის საშუალო სიჩქარის ცვალებადობა 50 მგვტ ხანძრის შემთხვევაში: მარცხენა ნახაზზე: 1 - დახრილობა 6 % (აღმავალი ნაკადი); 2 - დახრილობა 0 % ; 3 - დახრილობა 6 % (დაღმავალი ნაკადი), ერთდროულად მოქმედებს ორი ვენტილატორი, ხანძარი ამოქმედდა 20 წმ-ის შემდეგ; მარჯვენა ნახაზზე: 1 - ერთდროულად მოქმედებს ოთხი ვენტილატორი; 2 - ერთდროულად მოქმედებს სამი ვენტილატორი; 3 - ერთდროულად მოქმედებს ორი ვენტილატორი, ხანძარი ამოქმედდა 60 წმ-ის შემდეგ.

ფიგ. 3-ის მარცხენა ნახაზიდან გვირახის ნულოვანი დახრილობის შემთხვევაში ჩანს, რომ ხანძარი წარმოადგენს წინაღობას სავენტილაციო ნაკადისათვის (მრუდი 2). დროში 0.00 წმ ჩაერთო ჭავლური ვენტილაცია, სავენტილაციო ნაკადმა მიიღო სიჩქარე დაახლოებით 3.4 მ/წმ-მდე. მე-20 წმ-ზე გვირახის ცენტრალურ ნაწილში ამოქმედებული 50 მგვტ სიმძლავრის ხანძარი დროსელური ეფექტის ხარჯზე ამცირებს ჰაერის სიჩქარეს 0.4 მ/წმ-ით. ამ შემთხვევაში ხანძრის მიერ აღძრული წევა პრაქტიკულად ნულის ტოლია.

ვენტილაციის დაღმავალი ნაკადის შემთხვევაში (მრუდი 3) სავენტილაციო ნაკადი არის დადებითი მიმართულების, ხანძრის არსებობა კვლავ წინაღობაა ვენტილაციისათვის და იგი ჰაერის სიჩქარეს ამ შემთხვევაშიდაც დაახლოებით 0.4 მ/წმ-ით ამცირებს, ხოლო სიჩქარის დანარჩენი შემცირება - დაახლოებით 1.4 მ/წმ არის ხანძრის მიერ აღძრული უარყოფითი მიმართულების ნაკადისა და დადებითი მიმართულების სავენტილაციო ნაკადის ალგებრულად შეკრების შედეგი.

აღმავალი სავენტილაციო ნაკადის შემთხვევაში (მრუდი 1) სავენტილაციო და ხანძრის მიერ აღძრული ნაკადის ალგებრული შეკრება ზრდის ჯამურ ნაკადს დაახლოებით 1.3 მ/წმ-ით, რადგან ორივე ნაკადი ერთ მიმართულებისაა. კერძოდ, ორივე ნაკადი არის უარყოფითი მიმართულების. ხანძარი ამ შემთხვევაშიც აეროდინამიკური წინაღობაა სავენტილაციო ნაკადისათვის და ჯამური სიჩქარე შემცირებულია სათანადო სიდიდით, დაახლოებით 0.4-0.5 მ/წმ-ით.

ამგვარად გამოიკვეთა, რომ ჰაერის სიმკვრივის შემცირებით აღძრული ნაკადი 3.0-3.5-ჯერ უფრო ძლიერ გავლენას ახდენს სავენტილაციო ნაკადის ინტენსიურობისა და ხარჯის შემცირებაზე, ვიდრე ხანძარი როგორც ადგილობრივი წინაღობა.

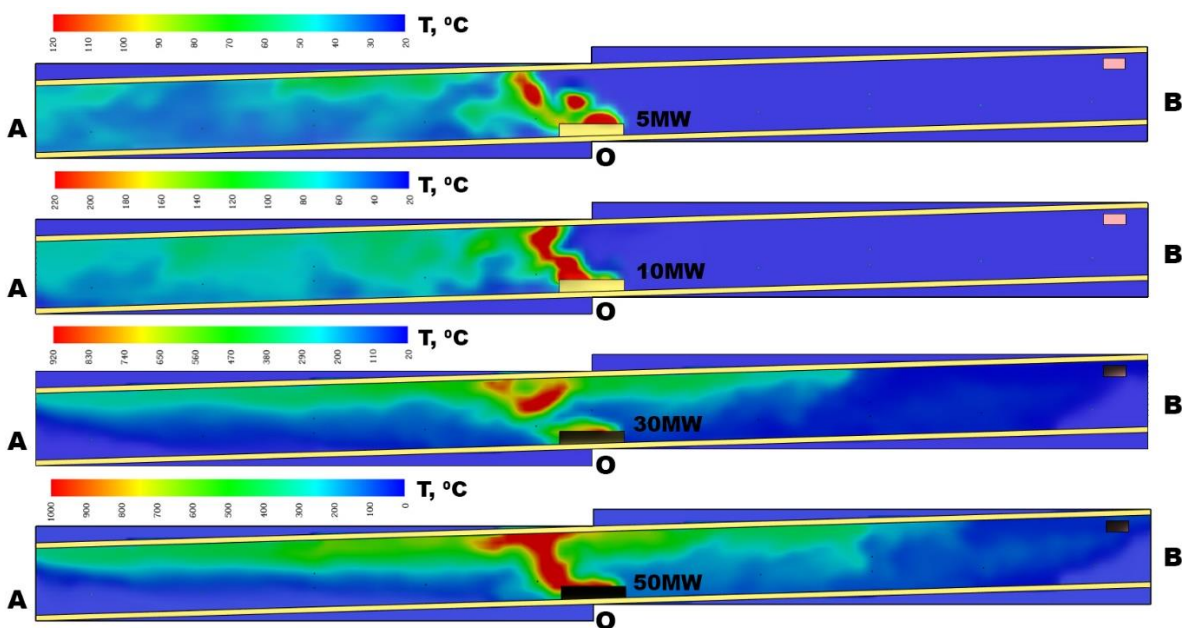
რალა აღნიშვნა უნდა, ამ აზრაცში მოცემული აღწერა უფრო სრულყოფილია, ვიდრე დროსელის ეფექტის გავლენის სხვა ავტორების მიერ შესრულებული უფრო ადრინდელი ანალიზები, რომლებიც საერთოდ არ ღებულობდა მხედველობაში მექანიკური და თერმული სავენტილაციო ნაკადების ალგებრულად შეკრების შესაძლებლობას.

ლისა და სხვების ნაშრომში [27] შესწავლილი იყო 0,3X0,3X10 მ ზომების შემის ხერგილისაგან გამოწვეული ხანძარი აეროდინამიკურ მილში და აგრეთვე აღნიშნული იყო აეროდინამიკური წინაღობის შესახებ, რომელიც ხანძრის კერაზე 6-ჯერ მატულობდა, ხოლო ხანძრის მიღმა ორივე მხარეზე - დაახლოებით 1.5-ჯერ. შესაბამისად, მოცემულ ნაშრომში დიფერენცირებული არ არის სიმკვრივის შემცირებით შექმნილი გარემოება, ყველაფერი მიწერილია აეროდინამიკურ წინაღობაზე და პროცესების ანალიზი სიღრმით არ გამოირჩევა. იმავე ნაშრომში აღნიშნულია, რომ უკუდინება შეიმჩნეოდა, როცა ხანძრის კერაზე დროსელირებული სავენტიაციო ნაკადის სიჩქარე შეადგენდა 0.6 მ/წმ-ს, რაც შეესაბამებოდა ფრუდის კრიტერიუმის რიცხვით სიდიდეს $Fr_c \approx 7$. არც ეს მონაცემები არ შეესაბამება ჩვენს მიერ მიღებულ მაჩვენებლებს. ნაშრომში [16] ყურადღება გამახვილებულია ხანძრის უნარზე მოახდინოს სავენტიაციო ნაკადის დროსელირება, რაც ნიშნავს დამატებითი აეროდინამიკური წინაღობის შექმნას სავენტიაციო ჭავლის მოძრაობის გზაზე. დიფერენცირებული ამ ნაშრომშიც არ არის ნაკადების ალგებრულად შეკრებით გამოწვეული ფიზიკური ეფექტები და ხანძრით შექმნილი აეროდინამიკური წინაღობა. იმავე ნაშრომში მითითებულია, რომ ხანძრის სიმძლავრის ზრდის პირობებში სულ უფრო მეტი ჭავლური ვენტიატორი არის საჭირო კვამლის კონტროლისათვის აღმოდებულ გვირაბებში, რაც აგრეთვე არის აღწერილი მომდევნო აბზაცში ჩვენი შედეგების მიხედვითაც.

ფიგ. 3-ის მარჯვენა ნახაზიდან ჩანს, რომ გვირაბის განივკვეთში ერთმანეთის პარალელურად მოქმედი ორი ცალი ვენტიატორის შემთხვევაში, ჰაერის სიჩქარე ხანძრის ამოქმედებამდე აღწევს კრიტიკული სიჩქარის დეკლარირებულ რიცხვით სიდიდეს (3.0 მ/წმ), მაგრამ ხანძრის ამოქმედების შემდეგ ($\tau = 60$ წმ) ჰაერის ნაკადის საშუალო სიჩქარე კი არ მატულობს წვის პროდუქტების დამატების შედეგად, არამედ კლებულობს, რაც არის უკუდინების შედეგი გვირაბის იმ ნაწილში, სადაც გადის სუფთა ჭავლი. სამი ვენტიატორის ერთდროულად მოქმედების შემთხვევაში სიჩქარე აღწევს კრიტიკულ სიჩქარეზე გაცილებით უფრო მეტ რიცხვით სიდიდეს და უტოლდება 3.5 მ/წმ, მაგრამ სუფთა ჰაერის ჭავლზე უკუდინებას მაინც აქვს ადგილი. ფიგ. 3-ის მარჯვენა ნახაზიდან აგრეთვე ჩანს, რომ გვირაბის განივკვეთში ერთმანეთის პარალელურად მოქმედი ოთხი ცალი ვენტიატორის შემთხვევაშიც კი, ხანძრის ამოქმედების შემდეგ ($\tau = 60$ წმ) ჰაერის ნაკადის საშუალო სიჩქარე კი არ მატულობს წვის პროდუქტების დამატების შედეგად, არამედ კლებულობს. ამ მოვლენის ბუნება გახსნილია ნაშრომებში [29-39], რომლებშიც აღნიშნულია, რომ ხანძარი აღძრავს საგვირაბე ვენტიატორების შესაძლებლობებზე გაცილებით მაღალ დინამიკურ წნევას.

ამგვარად, გრძივი ვენტიაციის კრიტიკული სიჩქარე 3 მ/წმ, რომელიც უკუდინების თავიდან ასაცილებელ ზღვრულ სიჩქარედ მითითებულია ნაშრომებში [3, 16, 18], სინამდვილეში განუხრელად იზრდება რიცხვითი მოდელირების წარმოდგენილი შედეგების მიხედვით, რაც აგრეთვე ირიბად ადასტურებს, რომ ცნობები ფრუდის კრიტიკული რიცხვის მუდმივობის შესახებ გვირაბის ხანძრებში არ შეესაბამება სინამდვილეს. ჩვენი შეხედულებით აქ მნიშვნელოვანია თერმულად და მექანიკურად აღძრული ნაკადების ალგებრულად შეკრებადობის მხედველობაში მიღება გვირაბის ხანძრებში და აგრეთვე, ხანძრის ისეთი სცენარების დამუშავება მიწისქვეშა სივრცისათვის, როცა ხანძრის კერაზე სუფთა და გაჭუჭყიანებული ჰაერის ნაკადების ერთმანეთთან შერევა სხვადასხვა პროპორციით ხდება.

ფიგ. 4-ზე წარმოდგენილია რიცხვითი მოდელირების შედეგები 5, 10, 30, 50 მგვტ სიმძლავრის ხანძრებისათვის სხვადასხვა დახრილობის 0, 1, 3, 4, 6 % გვირაბებში. გვირაბის გეომეტრია: სიგრძე - 100 მ; სიგანე - 8 მ; სიმაღლე - 6 მ; ხანძრის კერის ფართობი 16 მ²; ცეცხლის კერა განთავსებულია გვირაბის ცენტრალურ ნაწილში. ხანძრის მოდელირებისათვის წვის რეაგენტი - ბენზინი. მოდელირების დრო 120 წმ, B პორტალთან დროისათვის $\tau = 0$ წმ ერთმანეთის მიმართ პარალელურად ჩაირთვება 2 ცალი ჭავლური ვენტილატორი ჯამური წარმადობით 28 მ³/წმ და წნევით 2000 პა. ვენტილატორები ექვეციით წარიტაცებენ ჰაერის ნაკადს, რომლის ხარჯი შესაძლებელია განისაზღვროს ჰაერის სიჩქარისა და გვირაბის კვეთის მიხედვით. დროის მომენტში $\tau = 20$ წმ მოდელზე ამოქმედდება ხანძარი და ექსპერიმენტი დაიწყო დროში გრძელდება ხანძრის თანხლებით. ამ პერიოდისათვის სავენტილაციო ნაკადს დაფარული აქვს მანძილი B პორტალიდან ხანძრის კერამდე



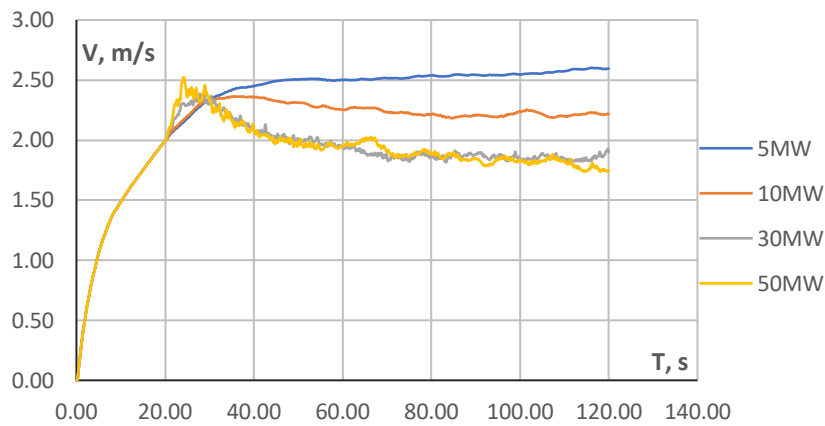
ფიგ. 4. ჰორიზონტალური გვირაბის ვენტილაცია 5, 10, 30, 50 მგვტ ხანძრის გაჩენის მომენტისათვის $\tau = 20$ წმ: 1 - ჭავლური ვენტილატორი; O - ხანძრის კერის ცენტრი.

სხვადასხვა სიმძლავრის ხანძრის დროს გამოყოფილი მავნე აირებისა და კვამლის მოცულობის სიდიდეები შეტანილია ცხრილში 2. შეფასება გაკეთებულია გვირაბის ნულოვანი დახრილობის პირობებში. ამ შემთხვევაში ჰაერის სიმკვრივის შემცირება ტემპერატურის მომატების შედეგად პრაქტიკულად არ იწვევს უკუდინებას, ხოლო წვის პროდუქტები შეერევა სავენტილაციო ნაკადში და იწვევს ამ უკანასკნელის სიჩქარის გაზრდას. ჰაერის სიჩქარე გვირაბში განისაზღვრა რიცხვითი მოდელის მიხედვით ჰაერის ნაკადის ფრონტის მოძრაობის შესაბამისად B პორტალიდან A პორტალის მიმართულებით. სიჩქარე u_1 განისაზღვრა B პორტალიდან O წერტილამდე მანძილისა და მის დასაფარავად საჭირო დროის მიხედვით, ჰაერის შესაბამისი ხარჯი არის G_1 . სიჩქარე u_2 შეესაბამება მანძილს O წერტილიდან A პორტალამდე, ჰაერის შესაბამისი ხარჯი არის G_2 . კვამლისა და წვის სხვა ტოქსიკური პროდუქტების ხარჯი განისაზღვრა ფორმულით

$$G = G_2 - G_1 \quad (9)$$

ცხრილი 2. ჰაერის ხარჯი და სიჩქარე გვირაბში მოდელირების მიხედვით

ხანძრის სიმძლავრე, მგვტ	u_1 , მ/წმ	u_2 , მ/წმ	G_2 , მ ³ /წმ	G_1 , მ ³ /წმ	G , მ ³ /წმ
5	2.9	3.6	139.2	172.8	33.6
10	2.9	4.1	139.2	196.6	57.6
30	2.9	5.0	139.2	240.0	100.8
50	2.9	5.6	139.2	268.8	129.6



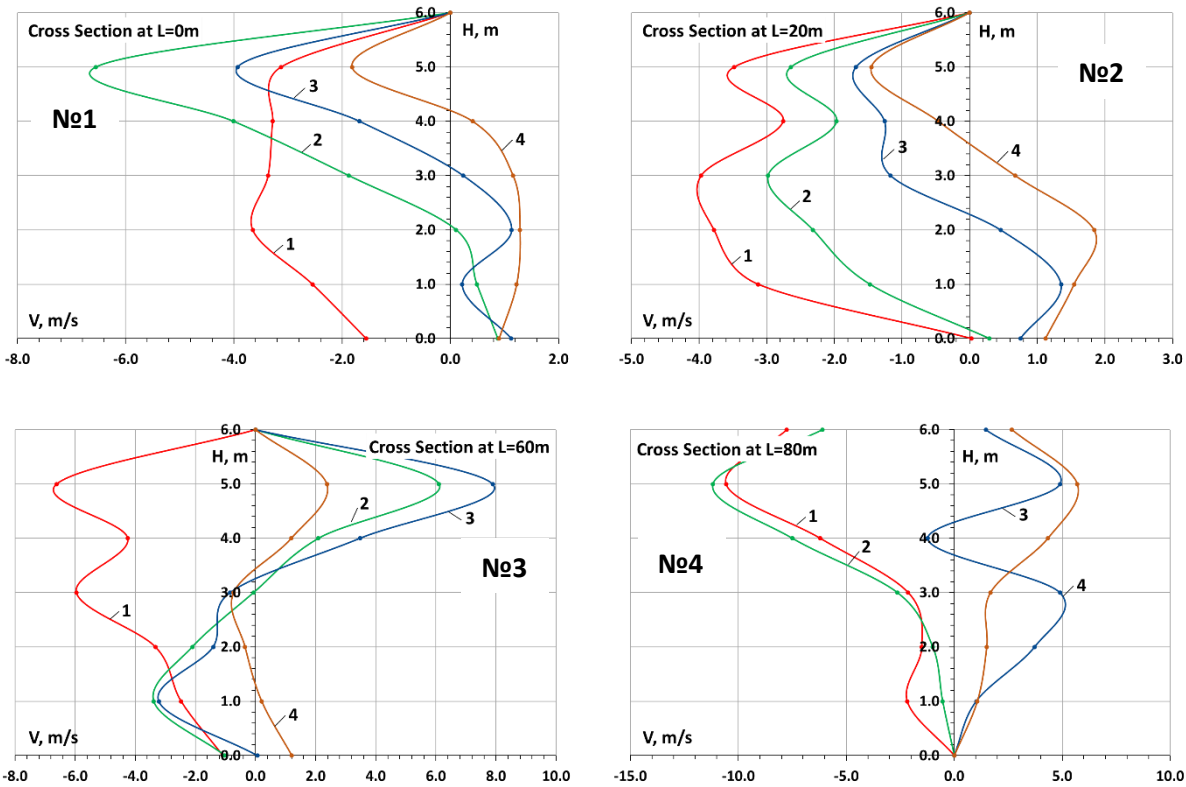
ფიგ. 5. დახრილ გვირაბში (3%) ჰაერის საშუალო სიჩქარის ცვალებადობა ხანძრის სიმძლავრის მიხედვით დაღმავალი სავენტილაციო ნაკადებისათვის.

დახრილ გვირაბებში, ხანძრის პროდუქტების შერევის მიუხედავად, ხანძრის ამოქმედების პერიოდის ($\tau = 20$ წმ) შემდეგ, სავენტილაციო ნაკადის სიჩქარე ყოველთვის არ მატულობს. ფიგ. 5-დან ჩანს, რომ 30 და 50 მგვტ სიმძლავრის ხანძრებისათვის სავენტილაციო ნაკადის საშუალო სიჩქარე კლებულობს, მიუხედავად იმისა, რომ ჰაერს უფრო მეტი წვის პროდუქტები შეერევა, ვიდრე 5 მგვტ ხანძრის დროს. ამ შემთხვევაში, საბოლოოდ, ნაკადის ინერციის ძალებს გაცილებით აღემატება ჰაერის სიმკვრივის შემცირებით გამოწვეული ტივტივადობის ძალები. უფრო ზუსტად, პროცესზე გავლენის თვალსაზრისით, სავენტილაციო ნაკადის მოცულობის ზრდის ტემპი გაცილებით ჩამორჩება ტივტივადობის ძალების გავლენის ტემპს.

3.2. სიჩქარის პროფილები გვირაბის დამახასიათებელ განივ კვეთებში

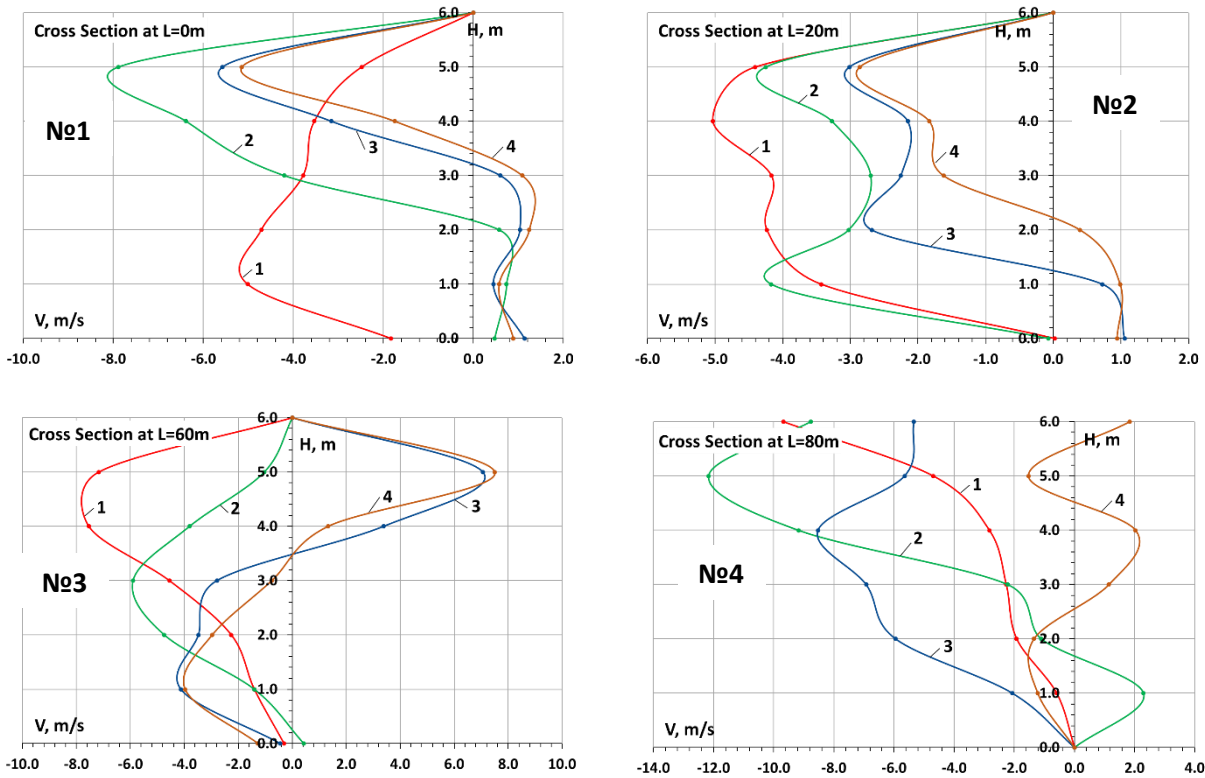
რიცხვითი მოდელირების შედეგად მიღებული სიჩქარის პროფილები მოცემულია ფიგ. 6, 7 და 8-ზე. ყველა ფიგურაზე განივი კვეთები მოცემულია ქვედა პორტალიდან დაშორების მანძილის მიხედვით შემდეგი კანონზომიერებით: ნახაზი N1 - ქვედა პორტალი; ნახაზი N2 - ქვედა პორტალიდან დაშორება 20 მ; ნახაზი N3 - ქვედა პორტალიდან დაშორება 60 მ და ნახაზი N4 - ქვედა პორტალიდან დაშორება 80 მ. მრუდების ნომრები შეესაბამება დროის შუალედებს

ექსპერიმენტის დაწყებიდან: 1 - $\tau = 60$ წმ; 2 - $\tau = 80$ წმ; 3 - $\tau = 100$ წმ; 4 - $\tau = 120$ წმ. სიჩქარის პროფილების ყველა ნახაზზე სიჩქარის უარყოფითი მნიშვნელობა ნიშნავს ნაკადის მოძრაობას პორტალისაკენ 1, ხოლო დადებითი მნიშვნელობა - პორტალისაკენ 2 (იხ. ფიგ. 2).



ფიგ. 6. დაღმავალი სავენტილაციო ნაკადის სიჩქარის პროფილები ორი ცალი ჭავლური ვენტილატორის მუშაობის დროს, მრუდები შეესაბამებიან დროის შუალედებს: 1 - $\tau = 60$ წმ; 2 - $\tau = 80$ წმ; 3 - $\tau = 100$ წმ; 4 - $\tau = 120$ წმ.

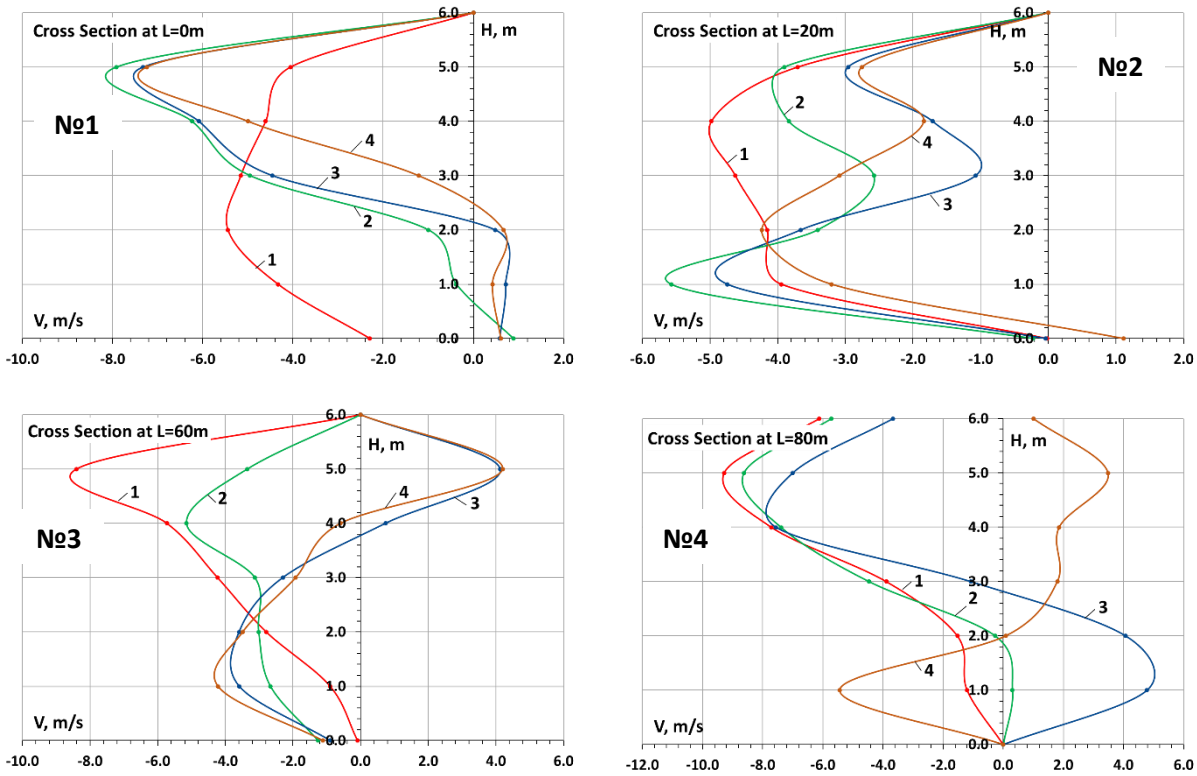
ფიგ. 6-ის ნახაზიდან 1, მრუდი 1 გვიჩვენებს, რომ ხანძრის ამოქმედებამდე ჰაერის ნაკადი მოძრაობს პორტალი 1-ის მიმართულებით, ხოლო სიჩქარის ეპიურას აქვს კლასიკური სახე. ამ დროს ზედა პორტალთან ერთდროულად მუშაობს ორი ჭავლური ვენტილატორი. როგორც კი ამოქმედდება ხანძარი, მაშინვე იცვლება სიტუაცია (მრუდები 2, 3 და 4). ჰაერის მოძრაობის მიმართულებას და ინტენსიურობას უკვე უფრო მეტად განაპირობებს ხანძრის მიერ აღძრული დინამიკური წნევა, ხოლო ვენტილატორების გავლენა შემცირების ტენდენციით ხასიათდება. აღსანიშნავია, რომ სიჩქარის პროფილების ყველა წარმოდგენილი ნახაზი ცხადყოფს, რომ წნევის ცვალებადობა ვრცელდება ბგერის სისწრაფით, რაც ანალოგიური სისწრაფით სათანადო შედეგების ცვალებადობას იწვევს.



ფიგ. 7. დაღმავალი სავენტილაციო ნაკადის სიჩქარის პროფილები სამი ცალი ჭავლური ვენტილატორის მუშაობის დროს, მრუდები შეესაბამებიან დროის შუალედებს: 1 - $\tau = 60$ წმ; 2 - $\tau = 80$ წმ; 3 - $\tau = 100$ წმ; 4 - $\tau = 120$ წმ.

ის გარემოება, რომ ზოგიერთი შედეგი ამოვარდნილია აღწერილი საერთო სურათიდან, განსაკუთრებით ფიგ. 7-ზე წარმოდგენილი მასალების მიხედვით, ადასტურებს ხანძრის ძლიერ გავლენას, აგრეთვე მექანიკური (ვენტილატორის მუშაობით) და თერმული (ხანძრით გავლენით) ენერგიებით აღძრული ნაკადების ალგებრულად შეკრების რთულ პროცესს, რაც პულსაციურობით და შემთხვევითობებით არის ნიშანდებული.

ფიგ. 8-ის ყველა ნახაზიდან ჩანს, რომ პორტალში 2 ერთდროულად მოქმედი ოთხი ცალი ჭავლური ვენტილატორის შემთხვევაშიც კი თერმული წევა პრევალირებს ვენტილატორების გავლენაზე და ხდება სავენტილაციო ნაკადის დაშრევა. ეს მოვლენა საერთოდ ეწინააღმდეგება კრიტიკული სიჩქარის ცნებას, რომლის თანახმადაც ერთი პორტალი არის გვირაბში სუფთა ჰაერის მიმწოდებელი, ხოლო მეორე პორტალი - გაჭუჭყიანებული ჰაერის ასარინებელი. წარმოდგენილი შედეგებიდან ჩანს, რომ ორივე პორტალიდან ხდება როგორც ჰაერის მიწოდება, ისე გაჭუჭყიანებულის არინება, რაც უნდა განვიხილოთ როგორც ძლიერი ხანძრის გავლენა და კრიტიკული სიჩქარის შეუსაბამობა ასეთი ხანძრების შეფასებისა და მართვის მიზნით. აღნიშნულიდან გამომდინარე, რიცხვითი სრულმასშტაბიანი მოდელირების შედეგების მიხედვით სრულიად ცხადია, რომ კრიტიკული სიჩქარის გამოყენებას აქვს ზღვარი, რაც სხვა თანაბარ პირობებში შემოსაზღვრულია ხანძრის სიმძლავრით და გვირაბის დახრილობით.



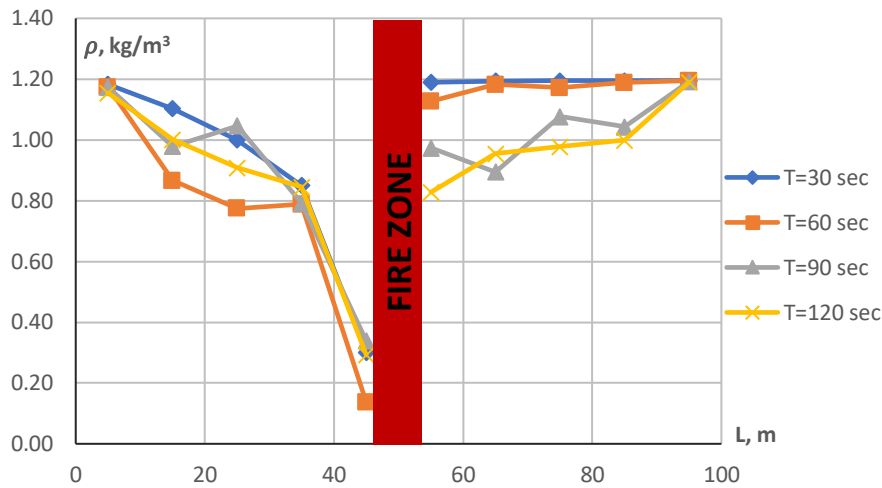
ფიგ. 8. დაღმავალი სავენტილაციო ნაკადის სიჩქარის პროფილები ოთხი ცალი ჭავჭავი ვენტილატორის მუშაობის დროს, მრუდები შეესაბამებიან დროის შუალედებს: 1 - $\tau = 60$ წმ; 2 - $\tau = 80$ წმ; 3 - $\tau = 100$ წმ; 4 - $\tau = 120$ წმ.

3.3. ჰაერის სიმკვრივისა და ტემპერატურის ცვალებადობა გვირაბის სიგრძეზე

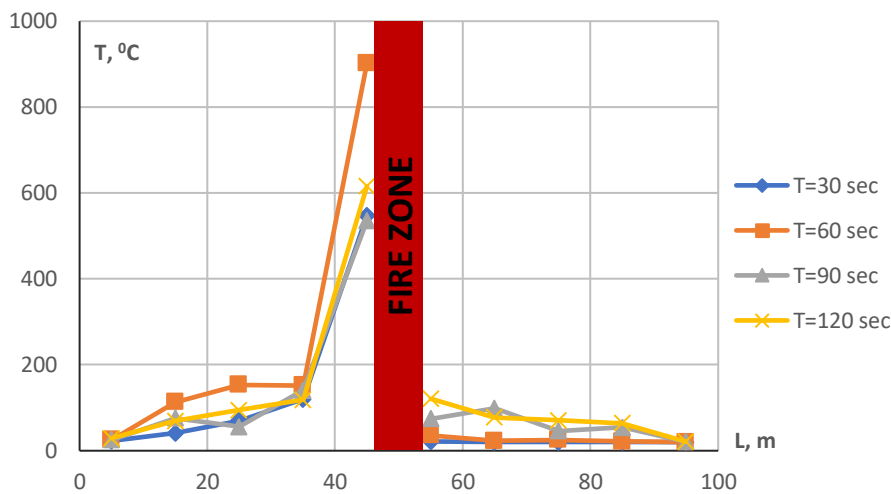
სავენტილაციო ჰაერის სიმკვრივის დინამიკა ხანძრის კერაზე და გვირაბის სიგრძის მიხედვით მოცემულია ფიგ. 9-ზე. ნახაზიდან ჩანს, რომ დაღმავალ ნაკადზე ჰაერის სიმკვრივე შემცირებულია და უშუალოდ ხანძრის კერაზე მისი მინიმალური სიდიდე იცვლება $0.18 - 0.28$ კგ/მ³ ფარგლებში. ანალიზისათვის ავიღოთ სიმკვრივის რიცხვითი სიდიდის მაქსიმალური მნიშვნელობა 0.28 კგ/მ³. ხანძრის კერაზე მაქსიმალური ტემპერატურა, რომელმაც განაპირობა ჰაერის სიმკვრივის შემცირება მოცემულ ნიშნულამდე შეადგენს 610 °C, ანუ 883 K (იხ. ფიგ. 10).

კლაპეირონის განტოლებით განსაზღვრული ხანძრის მიერ აღძრული წნევა მოცემული მაჩვენებლებისათვის შეადგენს 71.0 kPa. შევნიშნოთ, რომ ასეთი სიდიდის დინამიკური წნევა გვირაბში ყველა შემთხვევაში გამოიწვევს სავენტილაციო ნაკადის გადაყირავებას. კლაპეირონის განტოლებას ამ შემთხვევაში აქვს სახე

$$pv = RT \tag{10}$$



ფიგ. 9. სავენტილაციო ჰაერის სიმკვრივის ცვალებადობა 3% დახრილობის გვირაბის სიგრძის მიხედვით 30 მგვტ სიმძლავრის ხანძრის პირობებში.



ფიგ. 10. სავენტილაციო ჰაერის ტემპერატურის ცვალებადობა 30 მგვტ სიმძლავრის ხანძრის პირობებში, გვირაბის ცენტრალურ გრძივ სიბრტყეზე იატაკიდან 1.7 მ სიმაღლეზე 3% დახრილობის გვირაბის სიგრძის მიხედვით.

მამასადამე, როგორც თეორიულად, ისე რიცხვითი ექსპერიმენტების გზით დადგენილად უნდა მივიჩნიოთ, რომ ძლიერ ხანძარს გვირაბებში შეუძლია აღძრას ვენტილატორებზე უფრო დიდი დინამიკური წნევა, რომელსაც შეუძლია დადებითი მიმართულების (დაღმავალი) სავენტილაციო ნაკადების გადაყრავება 3% და უფრო მეტი დახრილობის გვირაბებში.

4. დასკვნები

თეორიულად და რიცხვითი ექსპერიმენტებით დადგენილია, რომ სითბოს გამოყოფის მაღალი მაჩვენებლის მქონე ძლიერი ხანძარი აღძრავს საგვირაბე ჰავლური ვენტილატორების სტატიკურ წნევაზე გაცილებით უფრო დიდ დინამიკურ წნევას. შესაბამისად, აღნიშნული სიდიდეებით გამოწვეული ნაკადები, მათი მოძრაობის სხვადასხვა მიმართულების პირობებში, ალგებრულად შეკრების შემდეგ, იწვევენ ძლიერ უკუდინებას დაღმავალი სავენტილაციო ნაკადების შემთხვევაში. ამიტომ კრიტიკული სიჩქარის დეკლარირებული რიცხვითი სიდიდე 3 მ/წმ ამ შემთხვევაში ვერ უზრუნველყოფს უკუდინების თავიდან

აცილებას, რაც მხედველობაში უნდა იქნეს მიღებული სახანძრო ვენტილაციის პროექტების შედგენის დროს, რადგან ამ დროს უარესდება უბედურების ზონაში მოხვედრილი ადამიანების თვითევაკუაციის შესაძლებლობები.

შესრულებული ანალიზი მკაფიოდ უჩვენებს, რომ მომხდარი ხანძრების შესწავლა და განზოგადება გამოდგება მათი მავნე გავლენის შესამცირებელი ღონისძიებების ადეკვატური დაგეგმვისა და განხორციელებისათვის. აღნიშნული დღის წესრიგში აყენებს არა მხოლოდ ხანძრის შემთხვევათა გულმოდგინე დაწვრილებით აღწერასა და ანალიზს, არამედ კონკრეტული გვირაბის გეომეტრიის, ადგილმდებარეობის, ბუნებრივი პირობების, სავენტილაციო სისტემების და ხანძრის სიმძლავრის მიხედვით მოქმედების ცხადი ალგორითმის დამუშავების საჭიროობას და მიღებული შედეგების გავრცელებას მამველებზე, გვირაბის მომსახურე პერსონალსა და მთელ საზოგადოებაზე.

References

1. Chow W.K., Gao Y., Zhao J., Dang J.F., Chow C.L., Miao L.: Smoke movement in tilted tunnel fires with longitudinal ventilation, *Fire Safety Journal* **75**, 2015, pp14–22.
2. Ingason H., Li Y.Z.: Model scale tunnel fire tests with point extraction ventilation, *Journal of Fire Protection Engineering* **21**(1), 2011, pp 5-36.
3. Kong J., Xu Z., You W., Wang B., Liang Y., Chen T.: Study of smoke back-layering length with different longitudinal fire locations in inclined tunnels under natural ventilation, *Tunnelling and Underground Space Technology* **107**, 2021, 103663.
4. Ilias N., Lanchava O., Nozadze G.: Numerical modelling of fires in road tunnels with longitudinal ventilation system, *Quality Access to Success*, **18**(S1), 2017, pp 77-80.
5. Vauquelin O., D Telle D.: Definition and experimental evaluation of the smoke “confinement velocity” in tunnel fires, *Fire Safety Journal* **40**(4), 2005, pp 320-330.
6. Lei P., Chen C., Zhang Y., Xu T., Sun H.: Experimental study on temperature profile in a branched tunnel fire under natural ventilation considering different fire locations, *International Journal of Thermal Sciences* **159**, 2021, 106631.
7. Lanchava O., Javakhishvili G.: Impact of strong fires on a road tunnel ventilation system, *Bulletin of the Georgian National Academy of Sciences* **15** (4), 2021, pp 38-45.
8. Lanchava O.: Analysis of critical air velocity for tunnel fires controlled by ventilation, *Mining Journal* **1**(42), 2019, pp 126-132.
9. Deberteix P., Gabay D., Blay D.: Experimental study of fire-induced smoke propagation in a tunnel in the presence of longitudinal ventilation, *Proceedings of the International Conference on Tunnel Fires and Escape from Tunnels*, 2001.
10. Lanchava O., Ilias N., Nozadze G.: Some problems for assessment of fire in road tunnels, *Quality Access to Success* **18** (S1), 2017, pp 69-72.
11. Li Y.Z., Ingason H.: Effect of cross section on critical velocity in longitudinally ventilated tunnel fires, *Fire Safety Journal* **91**, 2017, pp 303-311 <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2017.03.069>.
12. Fan C.G., Yang J.: Experimental study on thermal smoke backlayering length with an impinging flame under the tunnel ceiling, *Experimental Thermal and Fluid Science* **82**, 2017, pp 262–268.
13. Yi L., Xu Q., Xu Z., Wu D.: An experimental study on critical velocity in sloping tunnel with longitudinal ventilation under fire, *Tunnelling and Underground Space Technology* **43**, 2014, pp 198-203.

14. Weng M., Lu X., Liu F., Du C.: Study on the critical velocity in a sloping tunnel fire under longitudinal ventilation, *Applied Thermal Engineering* **94**, 2016, pp 422–434.
15. Li Y.Z., Ingason H.: Discussions on critical velocity and critical Froude number for smoke control in tunnels with longitudinal ventilation, *Fire Safety Journal* **99**, 2018, pp 22-26.
16. Vaitkevicius A., Carvel R., Colella F.: Investigating the Throttling Effect in Tunnel Fires, *Fire Technology* **52**, 2016, pp 1619–1628 DOI: 10.1007/s10694-015-0512-z.
17. Thomas P.H.: The movement of buoyant fluid against a stream and the venting of underground fires, *Fire Research Notes*, **351**, 1958, <http://www.iafss.org/publications/frn/351/-1>.
18. Thomas P.H.: The Movement of Smoke in Horizontal Passages against an Air Flow. *Fire Research Station*. Boreham Wood, 1968, p 8.
19. Road tunnels: vehicle emissions and air demand for ventilation, PIARC Technical Committee C4, Technical report 2012R05EN: 87 <http://www.piarc.org>, 2012.
20. Road tunnels: vehicle emissions and air demand for ventilation, PIARC Technical Committee D5, Technical report 2019R02EN: 62 <http://www.piarc.org>, 2019.
21. NFPA 502, Standard for Road Tunnels, Bridges, and Other Limited Access Highways, 2020.
22. Lanchava O., Ilias N., Nozadze G., Radu S.M., Moraru R.I., Khokerashvili Z., Arudashvili N.: FDS Modelling of the Piston Effect in Subway Tunnels. *Environmental Engineering and Management Journal* **18**(4), 2019, pp 317-325.
23. Li J., Li Y.F., Cheng C.H., Chow W.K.: A study on the effects of the slope on the critical velocity for longitudinal ventilation in tilted tunnels, *Tunnelling and Underground Space Technology* **89**, 2019, pp 262-267.
24. Li Y.Z., Lei B., Ingason H.: Study of critical velocity and backlayering length in longitudinally ventilated tunnel fires, *Fire Safety Journal* **45**, 2010, pp 361-370.
25. Lia J., Li Y.F., Cheng C.H., Chow W.K.: A study on the effects of the slope on the critical velocity for longitudinal ventilation in tilted tunnels, *Tunneling and Underground Space Technology* **89**, 2019, pp 262-265.
26. Danziger N.H., Kennedy W.D.: Longitudinal ventilation analysis for the Glenwood canyon tunnels, *Fourth International Symposium on the Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels*, BHRA *Fluid Engineering*, 1982, pp 169-186.
27. Lee C.K., Chaiken R.F., Singer J.M.: Interaction between duct fires and ventilation flow: an experimental study, *Combustion Science and Technology* **20**, 1979, pp 59-72.
28. Kennedy W.D.: Critical velocity: past, present and future, *Seminar of Smoke and Critical Velocity in Tunnels*, JFL Lowndes, 1996, pp 305–322.
29. Lanchava O., N. Ilias N.: Calculation of railway tunnels ventilation. *Journal of Engineering Sciences and Innovation*, **5**(1), 2020, pp 69-86.
30. Lanchava O., Abashidze G., Tsverava D.: Securing fire safety for underground structures, *Quality Access to Success*, **18**(S1), 2017, pp 47-50.
31. Lanchava O., Ilias N., Nozadze G., Radu S.M.: Heat and hygroscopic mass exchange modeling for safety management in tunnels of metro, *Quality Access to Success*, **20**(S1), 2019, pp 27-33.
32. Lanchava O., Ilias N.: Complex calculation method of temperature, mass transfer potential and relative humidity for ventilation flow. *Technical Sciences* **3** (1), 2018, pp 69-84.
33. Lanchava O.A. Heat and mass exchange in newly driven mine workings. Sov. Min. Sci. (Engl. Transl.); (United States) **21**(5), 1986.
34. Lanchava O., Ilias N., Nozadze G., Radu S.M., Moraru R.I., Khokerashvili Z., Arudashvili N.: 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, pp 342-352.

35. Lanchava O., Nozadze G., Bochorishvili N., Lebanidze Z., Arudashvili N., Jangidze M., Tsikarishvili K.: Criteria for evaluation of emergency firefighting in transport tunnels. *Transport Bridge Europe-Asia*, 2014, pp 29-34.
36. Lanchava O., Ilias N.: Critical velocity analysis for safety management in case of tunnel fire. *MATEC Web of Conferences* **305**, 00023 (2020), SESAM 2019 <https://doi.org/10.1051/mateconf/202030500023>
37. Lanchava O., Ilias N., Nozadze G.: Numerical simulation of air flow in short metro ventilation shafts caused by a piston effect. *MATEC Web of Conferences* **305**, 00050 (2020), SESAM 2019. <https://doi.org/10.1051/mateconf/202030500050>
38. Lanchava O., Ilias N., Radu S.M., Jangidze M., Khokerashvili Z.: Fire development study on physical models of transport tunnels. *MATEC Web of Conferences* 342, 03020 (2021) <https://doi.org/10.1051/mateconf/202134203020>
39. Lanchava O., Ilias N., Radu S.M., Nozadze G., Tsanava D.: Analysis of the use of transformable elements in intelligent tunnel ventilation systems. *MATEC Web of Conferences* 354, 00020 (2022) <https://doi.org/10.1051/mateconf/202235400020>
40. Lanchava O.A.: Hygroscopic heat and mass transfer in underground structures. GTU, Tbilisi, 1998, p 272.