

ერთის მხრივ, სსიპ გრიგოლ წულუკიძის სამთო ინსტიტუტი (შემდგომში “შემსყიდველი”), წარმოდგენილი მისი დირექტორის ნიკოლოზ ჩიხრაძის სახით და მეორეს მხრივ, ი/მ „თეა დოლიძე“ (შემდგომში „მიმწოდებელი“), წარმოდგენილი თეა დოლიძის სახით, „სახელმწიფო შესყიდვების შესახებ“ საქართველოს კანონის მე-3 მუხლის პირველი პუნქტის „ს1“ ქვეპუნქტის საფუძველზე, გამარტივებული შესყიდვის საშუალებით დებენ წინამდებარე სახელმწიფო შესყიდვის შესახებ ხელშეკრულებას (შემდგომში - ხელშეკრულება) შემდეგზე:

1. ხელშეკრულების საგანი

ქართულიდან ინგლისურ ენაზე მთარგმნელობითი მომსახურების (შემდგომში - მომსახურება) შესყიდვა (CPV კოდი: 79530000) ხელშეკრულების პირობების და დანართი №1-ის შესაბამისად, რომელიც წარმოადგენს ხელშეკრულების განუყოფელ ნაწილს.

2. ხელშეკრულების ღირებულება

- 2.1. შესყიდვის ობიექტის ფასი განისაზღვრება ეროვნულ ვალუტაში - ლარში.
- 2.2. ხელშეკრულების ჯამური ღირებულება შეადგენს 290,00 (ორას ოთხმოცდაათი) ლარს ყველა გადასახადის ჩათვლით.

3. ანგარიშსწორების ფორმა, გრაფიკი (ვადები) და ადგილი

- 3.1. მიმწოდებელთან ანგარიშსწორება განხორციელდება უნაღდო ანგარიშსწორებით ეროვნულ ვალუტაში.
- 3.2. ანგარიშსწორება განხორციელდება №AR-19-1936 საგრანტო პროექტის ბიუჯეტის სახსრებით.
- 3.3. მიმწოდებელთან ანგარიშსწორება განხორციელდება მიღება-ჩაბარების აქტის გაფორმებიდან არაუგვიანეს 10 (ათი) სამუშაო დღისა.

4. შესყიდვის ობიექტის მიღება-ჩაბარების წესი

- 4.1. შესყიდვის ობიექტის მიღება ფორმდება მიღება-ჩაბარების აქტით, რომელიც დადასტურდება შემსყიდველისა და მიმწოდებლის ხელმოწერებით.
- 4.2. შემსყიდველის მხრიდან მიღება-ჩაბარების აქტზე ხელმოწერ უფლებამოსილ პირს წარმოადგენს №AR-19-1936 საგრანტო პროექტის კოორდინატორი ომარ ლანჩავა.

5. შესყიდვის ობიექტის მიწოდების ადგილი და ვადა

- 5.1. შესყიდვის ობიექტის მიწოდების ადგილია: ქ. თბილისი, მინდელის ქ. №7.
- 5.2. შესყიდვის ობიექტის მიწოდება განხორციელდება ხელშეკრულებაზე ხელის მოწერის დღიდან არაუგვიანეს 10 (ათი) სამუშაო დღისა.

6. მხარეთა უფლება-მოვალეობანი

- 6.1. შემსყიდველი უფლებამოსილია ნებისმიერ დროს განახორციელოს მიმწოდებლის მიერ ნაკისრი ვალდებულებების შესრულება და ხარისხის ინსპექტირება.
- 6.2. შემსყიდველი ვალდებულია უზრუნველყოს მიწოდებული მომსახურების ღირებულების ანაზღაურება ხელშეკრულებით გათვალისწინებულ ვადებში.
- 6.3. მიმწოდებელი უფლებამოსილია მოსთხოვოს შემსყიდველს მომსახურების ღირებულების ანაზღაურება ხელშეკრულებით გათვალისწინებულ ვადებში.
- 6.4. მიმწოდებელი ვალდებულია მიაწოდოს მომსახურება იმ ვადაში, რომელიც მითითებულია ხელშეკრულების 5.2. პუნქტში და სრულყოფილ მდგომარეობაში, მზადყოფნაში გამოსაყენებლად.

7. პირგასამტეხლო ხელშეკრულების პირობების შეუსრულებლობისათვის

- 7.1. ხელშეკრულებით ნაკისრი ვალდებულების შესრულების ვადის დარღვევის შემთხვევაში, მხარეს ეკისრება პირგასამტეხლო ყოველ ვადაგადაცილებულ დღეზე შეუსრულებელი ვალდებულების ღირებულების 0,1%-ის ოდენობით.
- 7.2. პირგასამტეხლოს გადახდა არ ათავისუფლებს მხარეს ძირითადი ვალდებულებების შესრულებისაგან.

8. ხელშეკრულებაში ცვლილების შეტანა და ხელშეკრულების შეწყვეტა

- 8.1. ხელშეკრულებაში ნებისმიერი ცვლილების, დამატების შეტანა შესაძლებელია მხოლოდ წერილობითი ფორმით, მხარეთა შეთანხმების საფუძველზე.
- 8.2. ხელშეკრულების პირობების, მათ შორის, ფასის შეცვლა დაუშვებელია, თუ ამ ცვლილებების შედეგად იზრდება ხელშეკრულების ჯამური ღირებულება ან უარესდება ხელშეკრულების პირობები შემსყიდველისათვის, გარდა საქართველოს სამოქალაქო კოდექსის 398-ე მუხლით გათვალისწინებული შემთხვევებისა. ხელშეკრულების პირობების გადასინჯვა ხდება საქართველოს კანონმდებლობით დადგენილი წესით.
- 8.3. საქართველოს სამოქალაქო კოდექსის 398-ე მუხლით გათვალისწინებულ შემთხვევაში, ხელშეკრულების ჯამური ღირებულების გაზრდა დაუშვებელია ხელშეკრულების ღირებულების 10%-ზე მეტი ოდენობით.
- 8.4. ხელშეკრულების ერთ-ერთი მხარის მიერ ხელშეკრულების პირობების შეუსრულებლობის შემთხვევაში მეორე მხარე უფლებამოსილია ცალმხრივად მიიღოს გადაწყვეტილება ხელშეკრულების შეწყვეტის შესახებ.
- 8.5. მხარე ვალდებულია 8.4. პუნქტით გათვალისწინებულ გადაწყვეტილების მიღების განზრახვის შესახებ არანაკლებ 5 კალენდარული დღით ადრე წერილობით ან კომუნიკაციის ელექტრონული საშუალებების გამოყენებით შეატყობინოს მეორე მხარეს.
- 8.6. ხელშეკრულება ასევე შეიძლება შეწყდეს მხარეთა ინიციატივით, ურთიერთშეთანხმების საფუძველზე.
- 8.7. ხელშეკრულება შედგენილია ორი თანაბარი ძალის მქონე ეგზემპლარად, რომელთაგანაც თითოეული გადაეცემა მხარეებს.

9. დაუძლეველი ძალა

მხარეები თავისუფლდებიან ხელშეკრულებით განსაზღვრული ვალდებულებების შეუსრულებლობით გამოწვეული პასუხისმგებლობისაგან, თუ აღნიშნული გამოწვეულია აუცდენელი დაუძლეველი ძალის ზეგავლენით. აღნიშნულის არსებობის შემთხვევაში, მხარე ვალდებულია აცნობოს მეორე მხარეს ნაკისრი ვალდებულებების შესრულების შეუძლებლობის შესახებ.

10. დავები და მათი გადაწყვეტის წესი

ხელშეკრულების მოქმედების პერიოდში წამოჭრილი ყველა დავა გადაიჭრება ურთიერთშეთანხმების გზით. შეთანხმების მიუღწევლობის შემთხვევაში, დავის გადასაწყვეტად მხარეები უფლებამოსილნი არიან მიმართონ სასამართლოს საქართველოს მოქმედი კანონმდებლობის შესაბამისად.

11. ხელშეკრულების მოქმედების ვადა

ხელშეკრულების მოქმედების ვადა განისაზღვრება ხელშეკრულების ხელის მოწერის დღიდან 2022 წლის 30 აპრილის ჩათვლით.

შემსყიდველი:

სსიპ გრიგოლ წულუკიძის
სამთო ინსტიტუტი

ქ. თბილისი, ე. მინდელის ქ. №7
ს/კ 204 862247

ტელ: 232-47-16; 232-95-87
ელ. ფოსტა: tmi@mining.org.ge
სახელმწიფო ხაზინა
ბანკის კოდი: TRESGE22
სახაზინო კოდი: 708727228

სსიპ გრიგოლ წულუკიძის
სამთო ინსტიტუტის დირექტორი:



ნ. ჩიხრაძე

მიმწოდებელი:

ი/მ „თეა დოლიძე“

ქ. თბილისი, ნუცუბიძის ქ. №199
პ/ნ: 01010013979

ტელ: 599-24-62-89
ელ. ფოსტა: tdolidze@mail.ru
სს „თიბისი ბანკი“
ბანკის კოდი: TBCBGE22
ა/ა: GE92TB7001636010100054

ი/მ „თეა დოლიძე“

თ. დოლიძე

მექანიკა

არასტაციონარული თბო- და მასაგადაცემის კოეფიციენტების განსაზღვრა გვირაბებში

ომარ ლანჩავა*, თეიმურაზ კუნჭულია*, ზაზა ხოკერაშვილი*, ნინო არუდაშვილი*, დავით ცანავა*

* შრომის უსაფრთხოებისა და საგანგებო სიტუაციების მართვის დეპარტამენტი, საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი, თბილისი, საქართველო

(წარმოდგენილია აკადემიის წევრის ე. მემმარიაშვილის მიერ)

ხელოვნური მიწისქვეშა ნაგებობები და სხვა ბუნებრივი დრუ მოცულობები მიწისქვეშ, რომლებშიც საჭიროა ადამიანების ყოფნა, საჭიროებენ სასიცოცხლო პირობების შექმნას, რაც ძირითადად გამართული ვენტილაციით გამოიხატება. სავენტილაციო ჰაერი გვირაბების გარშემომცველ სამთო მასივთან ინტენსიურად ცვლის სითბოსა და ტენს. აღნიშნულის შედეგად იცვლება როგორც ჰაერის, ისე მასივის ტემპერატურა და ტენშიმცველობა. მასივიდან აღძრული თბური და მასის ძირითადი ნაკადები განპირობებულია ტემპერატურისა და მასაგადატანის პოტენციალის გრადიენტებით, რომლებიც იმავდროულად იწვევენ დამატებით გადატანას დიუფურისა და სორეს ეფექტების სახით. ნაშრომში ონზაგერის თეორემაზე დაფუძნებით, კიურის პრინციპის მხედველობაში მიღებით ნაჩვენებია, რომ აღნიშნული ორი გრადიენტი იწვევს თბომასაგაცვლის პროცესის ყველა გამოვლინებას მიწისქვეშ. ნაჩვენებია, რომ სამთო მასივსა და სავენტილაციო ნაკადს შორის თბომასაგადაცემას განაპირობებენ პირველი რანგის ტენზორები - მითითებული ტემპერატურისა და მასაგადატანის პოტენციალის გრადიენტები, რომლებიც არიან პირდაპირი მამოძრავებელი ძალები იმავე დასახელების ნაკადებისათვის და დამატებითი მამოძრავებელი ძალები იმ შემთხვევაში, როცა ნაკადის და ძალების სახელები ერთმანეთს არ ემთხვევა. როგორც ძირითადი, ისე დამატებითი ძალებით განპირობებული ნაკადები ერთნაირად მოქმედებენ სავენტილაციო ნაკადის კლიმატური პარამეტრების - ტემპერატურისა და ფარდობითი ტენიანობის ცვალებადობაზე გვირაბის ფარგლებში, რომელსაც სეზონური ხასიათი აქვს. სამთო მასივიდან სითბოსა და მასის არასტაციონარული გადაცემის კოეფიციენტები სეზონურ ცვალებადობას განიცდიან, რაც მხედველობაში უნდა იქნეს მიღებული გვირაბების ვენტილაციის თბოფიზიკური გაანგარიშების შემთხვევაში.

არასტაციონარული კოეფიციენტები, გვირაბი, თბომასაგადაცემა, სეზონური ცვალებადობა (ინგლისური ალფაბეტის მიხედვით უნდა დაეწყოს თარგმანში)

1. შესავალი

ყველა ხელოვნურ ან ბუნებრივ მიწისქვეშა ღრუ მოცულობები, რომლებიც განკუთვნილი არიან მიწისქვეშ მიმდინარე ტექნოლოგიური პროცესების წარსამართავად, ან სატრანსპორტო, ჰიდროტექნიკური, სასაწყობო, თავდაცვის, სამკურნალო, სამეცნიერო, ურბანისტული ან სხვა მიზნებისათვის და მათში საჭიროა ადამიანების ყოფნა, ექვემდებარებიან ვენტილაციას. ამ დროს სავენტილაციო ჰაერი ახდენს რა სითბოსა და ტენის გაცვლას გარშემომცველ ქანთა მასივთან იცვლის ტემპერატურას და ფარდობით ტენიანობას.

იმ შემთხვევაში, თუ სამთო მასივი განლაგებულია წყალგაუმტარი ქანთა ფენის ქვემოთ, ან გამაგრებასთან ერთად გამოიყენება მემბრანა, გვირაბის შიდა სივრცეში ადგილი არ აქვს წყლის მოდენას, ხოლო ჰაერის ტენიანობის მომატება ამ შემთხვევაში ხდება მასის გაცვლით. აღნიშნული ტერმინით განისაზღვრება ტენი, რომელიც სორბციულად არის დაკავშირებული ქანთა მასივთან, ჰაერზე მისი გადაცემა ხდება დესორბციის გზით, ხოლო გადამტან პოტენციალს ამ დროს ეწოდება მასაგადატანის პოტენციალი, რომლის როლშიც შესაძლებელია გამოვიდეს ქიმიური პოტენციალი.

ამგვარად, წყალგაუმტარი შრის ქვემოთ განლაგებული გვირაბის არეალში სამთო მასივი, არის ჰეტეროგენული და მრავალკომპონენტური გარემო, რომელიც ხასიათდება ტემპერატურისა და მასაგადატანის პოტენციალის სტაციონარული ველებით. ვენტილაციის დაწყებამდე, აღნიშნული გარემო არის გაწონასწორებული, შეუქცევადი, იზოლირებული თერმოდინამიკური სისტემა მაქსიმალური ენტროპიით. ეს სისტემა წონასწორობიდან გამოდის გარეშე ძალის, ვენტილატორის მუშაობით განპირობებული, განსხვავებული თერმოდინამიკური პარამეტრებით დახასიათებადი სავენტილაციო ნაკადის გავლენით, ხოლო პოტენციალი განისაზღვრება ფორმულით $\vartheta = RT \ln \varphi$. ან ფორმულაში R არის უნივერსალური მუდმივა, $\mathcal{J}/(\text{მოლი}\cdot\text{K})$; T - აბსოლუტური ტემპერატურა, K ; $\ln \varphi$ - წონასწორული ფარდობითი ტენიანობის ნატურალური ლოგარითმი. მოცემული ფორმულით რიცხვითი სიდიდე მიიღება უარყოფითი ნიშნით და ეს არის მასაგადატანის პოტენციალი ჰიგროსკოპულ არეში. ჰიგროსკოპული და ჰიდროსკოპული არეების ზღვარზე $\vartheta = 0$, ხოლო ჰიდროსკოპულ არეში ღებულობს დადებით მნიშვნელობებს რითაც მოცემული პოტენციალის სკალა რადანაირ მსგავსებას ავლენს ცელსიუსის ტემპერატურათა სკალასთან [3].

2. თეორია

რაიმე X_i თერმოდინამიკური მამოძრავებელი ძალის ზემოქმედებით აუცილებლად იცვლება სისტემის ერთ-ერთი ექსტენსიური პარამეტრი, რომელიც შეესაბამება მოცემულ ძალას. აღნიშნულ პარამეტრს მექანიკური პროცესების გავლენით x_i განზოგადებული კოორდინატი ეწოდება და ნებისმიერი სახის მუშობა გამოისახება ტოლობით $dA_i = -X_i dx_i$. თუ X არის წნევა, მაშინ მისი შესაბამისი განზოგადებული კოორდინატი არის კუთრი მოცულობა v , ხოლო A გამოხატავს აირის შეკუმშვაზე ან გაფართოებაზე საჭირო მუშობას.

ცხადია, რომ სისტემის ყველა ექსტენსიური პარამეტრი კოორდინატი არ არის, მაგრამ განზოგადებული კოორდინატი აუცილებლად ექსტენსიური პარამეტრია, რომელიც იცვლება პოტენციალის ზემოქმედების შედეგად. ყველა განზოგადებული კოორდინატი ერთობლივი თბომასაგადაცემის პროცესში არ არის მარტივი დასადგენი. მაგალითად გამოდგება ენტროპია S , რაც არის თერმული ზემოქმედების განზოგადებული კოორდინატი, ხოლო პოტენციალი ამ შემთხვევაში არის თერმოდინამიკური ტემპერატურა T .

ონზაგერის თეორემის თანახმად, რომელიც ძალაშია როგორც კლასიკური, ისე რელიატივისტური თვალსაზრისით, თერმოდინამიკური მამოძრავებელი ძალები განისაზღვრება ენტროპიის ცვლილების კერძო წარმოებულით წონასწორული მდგომარეობიდან პარამეტრების გადახრის სიდიდის მიხედვით [1]

$$X_i = \partial(\Delta S) / \partial \vartheta_i \quad (1)$$

სადაც ΔS არის წონასწორული მდგომარეობის შეცვლის შესაბამისი ენტროპიის ცვლილება დროის ერთეულში; ϑ_i - სისტემის დამახასიათებელი Π_i თერმოდინამიკური პარამეტრის გადახრა წონასწორული მდგომარეობიდან Π_i^0 .

წონასწორულ მდგომარეობაში, როცა $\vartheta_i = 0$, თერმოდინამიკური სისტემის დაკონკრეტებისას Π_i შესაძლებელია გახდეს კლასიკური პარამეტრები: წნევა, ტემპერატურა, კონცენტრაცია, პარციალური წნევა და ა.შ., ანუ ყველა ის პარამეტრი, რომელიც ახასიათებს თერმოდინამიკურ სისტემას შეუქცევად პროცესებში.

შეუქცევადი პროცესების ძირითად თანაფარდობას, ანუ ონზაგერის წრფივ განტოლებათა სისტემას აქვს სახე

$$j_i = \sum_{k=1}^n L_{ik} X_k (i=1,2,\dots,n) \quad (2)$$

სადაც L_{ik} არის სისტემის მდგომარეობის ცვლილების კინეტიკური პარამეტრები.

განტოლების (2) ფიზიკური შინაარსის გასაგებად მივმართოთ მაგალითს: თუ სისტემა ხასიათდება ორი ცვლადი პარამეტრით (χ_1, χ_2), რომელთა ცვლილება

განპირობებულია შესაბამისი პოტენციალებით (X_1, X_2). მაშინ ნაკადები განისაზღვრებიან (2) ფორმულის ანალოგიურად

$$j_1 = L_{11}X_1 + L_{12}X_2, \quad j_2 = L_{21}X_1 + L_{22}X_2 \quad (3)$$

საიდანაც ჩანს, რომ ნაკადი j_1 დამოკიდებულია არა მარტო მის შესაბამის X_1 მამოძრავებელ ძალაზე, არამედ იმავე სისტემის სხვა პოტენციალზეც. აღნიშნულს ითვალისწინებს კიურის პრინციპი, რომელიც შეუქცევადი პროცესების თერმოდინამიკას მიუსადაგა დე გროტმა. აღნიშნული პრინციპის თანახმად ნაკადებზე ერთდროულ გავლენას ახდენენ ისეთი თერმოდინამიკური ძალები, რომელთაც აქვთ ერთიდაიგივე ტენზორული რანგი ან რანგებს შორის განსხვავება არის ლუწი რიცხვი [2]. სითბოსა და მასის გადატანისათვის კაპილარულ-ფოროვან სხეულში მამოძრავებელი ძალები - ტემპერატურის გრადიენტი და მასაგადატანის პოტენციალის ტემპერატურასთან ფარდობის გრადიენტი არიან ვექტორები და პირველი რანგის ტენზორები.

ამგვარად, თერმოდინამიკურ მამოძრავებელ ძალებს კაპილარულ-ფოროვან სხეულში სითბოსა და მასის გადატანისათვის აქვთ სახე

$$X_q = -1/T \nabla T, \quad X_m = -T \nabla(\vartheta/T) \quad (4)$$

საიდანაც ცხადია, რომ სითბოს გადატანის თერმოდინამიკური მამოძრავებელი ძალა პირდაპირპროპორციულია ტემპერატურის გრადიენტის, ხოლო მასის გადატანის თერმოდინამიკური მამოძრავებელი ძალა, მასაგადატანის პოტენციალის ტემპერატურასთან ფარდობის გრადიენტისა. აქ ∇ ჰამილტონის ოპერატორია.

თუ უწყვეტ სხეულთან გვაქვს საქმე, რომელიც არ შეიცავს ფორებს და შესაბამისად კოეფიციენტი $L_{12} = 0$, მაშინ კოეფიციენტი $L_{11} = \lambda$ ფორმულა (3)-ის პირველი განტოლებიდან. ამ შემთხვევაში იმავე განტოლებიდან მიიღება სითბოგამტარობის ფურიეს განტოლება

$$q = -\lambda \text{grad}T \quad (5)$$

სადაც q არის თბური ნაკადი, ვტ/მ²; λ - თბოგამტარობის კოეფიციენტი, ვტ/(მ.K); $\text{grad}T$ - ტემპერატურის გრადიენტი, K/მ.

ანალოგიურად, იზოთერმულ პირობებში ტემპერატურის გრადიენტი $X_1 = 0$ და ფორმულა (3)-ის მეორე განტოლებიდან მიიღება ლიკოვის ფორმულირება

$$q_m = -\lambda_m \text{grad}\vartheta \quad (6)$$

სადაც q_m არის მასის ნაკადი, კგ.მოლი/(ჯ.მ.წმ); λ_m - მასაგამტარობის კოეფიციენტი, კგ.მოლი/(ჯ.მ.წმ); $\text{grad}\vartheta$ - მასაგადატანის პოტენციალის გრადიენტი, ჯ/(მოლი.მ).

ამგვარად, (3) ფორმულით გამოხატული ონზაგერის წრფივ განტოლებათა სისტემა თბურ და მასის ნაკადებს კაპილარულ-ფოროვან არაიზოთერმულ გარემოში განიხილავს შემდეგნაირად: თბური ნაკადი განპირობებულია ტემპერატურის

გრადიენტით (პირდაპირი მამოძრავებელი ძალით), რომელსაც ემატება დამატებითი თბური ნაკადი (აღძრული დამატებითი ძალით - მასაგადატანის პოტენციალის დროში ცვალებადობით). მასის ნაკადი კი განპირობებულია მასაგადატანის პოტენციალის გრადიენტით (პირდაპირი მამოძრავებელი ძალის მდგენელით), რომელსაც ემატება მასის დამატებითი ნაკადი (აღძრული ამ შემთხვევისათვის დამატებითი ძალით - ტემპერატურის გრადიენტით. დამატებით თბურ ნაკადს დიუფურის ეფექტი ეწოდება, ხოლო ანალოგიურ მასის ნაკადს - სორეს ეფექტი.

თუ უსასრულო სამთო მასივში გაყვანილ გვირაბს აქვს წრის ფორმა რადიუსით R_0 , გვირაბის გასწვრივ სამთო მასივში სითბოსა და მასის გადატანას მხედველობაში არ მივიღებთ, ხოლო თვით მასივს მივიჩნევთ იზოტროპულად და ერთგვაროვნად, მაშინ მასივსა და სავენტილაციო ნაკადს შორის თბომასაგადაცემა აღიწერება შემდეგი დიფერენციალური განტოლებებით

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \nabla^2 t + \varepsilon r \frac{c_m}{c} \frac{\partial \vartheta}{\partial \tau} \quad (7)$$

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial \tau} = a_m \nabla^2 \vartheta + a_m \delta_g \nabla^2 t \quad (8)$$

სადაც t , ϑ არის შესაბამისად სამთო მასივის ტემპერატურა და მასაგადატანის პოტენციალი, °C, ჯ/მოლი; a , a_m - ტემპერატურაგამტარობისა და მასაგადატანის პოტენციალგამტარობის კოეფიციენტი მ²/წმ; ∇^2 - ლაპლასის ოპერატორი; ε - ფაზური გარდაქმნის კრიტერიუმი სამთო მასივში; r - ფაზური გარდაქმნის კუთრი ენთალპია, კჯ/კგ; c_m , c - ქანის იზოთერმული მასატევადობისა და კუთრი თბოტევადობის კოეფიციენტები, მოლი/ჯ, კჯ/(კგ.გრად); τ - დრო, წმ; δ_g - თერმოგრადიენტული კოეფიციენტი, ჯ/(მოლი.K).

ცალსახობის პირობების ჩამოყალიბებისათვის ვემხრობით თვალსაზრისს, რომლის მიხედვითაც სავენტილაციო ნაკადის ტურბულენტურობიდან გამომდინარე, ნაკადის ტემპერატურა და პოტენციალი თანაბრადაა განაწილებული კვეთში, ნაკადი ერთგანზომილებიანია და გამყოფ ზედაპირზე ადგილი აქვს ტოლობებს

$$\alpha (t_2 - t_1) - \lambda grad t = 0 \quad (9)$$

$$\alpha_m (\vartheta_2 - \vartheta_1) - \lambda_m grad \vartheta = 0 \quad (10)$$

სადაც α , α_m - შესაბამისად არის ზედაპირის თბო- და მასაგაცემის კოეფიციენტი, ვტ/(მ².გრად); კგ.მოლი/(ჯ.მ².წმ); t_1 , ϑ_1 - ჰაერის ნაკადის ტემპერატურა და მასაგადატანის კოეფიციენტი, °C, ჯ/მოლი; t_2 , ϑ_2 - იგივე ზედაპირისათვის; $grad t$, $grad \vartheta$ - ტემპერატურისა და მასაგადატანის პოტენციალის გრადიენტები სამთო მასივში, გრად/მ, ჯ/(მოლი.მ).

ზემოაღნიშნულიდან გამომდინარე, ცალსახობის პირობებს აქვთ სახე

$$\tau = 0, R = R_0: \quad t_{R_0,0} = t_0, \vartheta_{R_0,0} = \vartheta_0 \quad (11)$$

$$\tau > 0, R \rightarrow \infty: \quad t_{R,\tau} = t_0, \vartheta_{R,\tau} = \vartheta_0 \quad (12)$$

$$\tau > 0, R = R_0: \quad -\lambda \frac{\partial t}{\partial R} + \alpha (t_2 - t_1) + \alpha_m r(\vartheta_2 - \vartheta_1) = 0 \quad (13)$$

$$\tau > 0, R = R_0: \quad -\lambda_m \frac{\partial \vartheta}{\partial R} - \lambda_m \delta \vartheta \frac{\partial t}{\partial R} + \alpha_m (\vartheta_2 - \vartheta_1) = 0 \quad (14)$$

სადაც განმარტებული სიდიდეების გარდა R არის ცილინდრული კოორდინატი; R_0 - გვირაბის კვეთის ეკვივალენტური რადიუსი, მ.

დიფერენციალური განტოლებები (9), (10) მიეკუთვნებიან მეორე რიგის ელიფსურ განტოლებებს, რომლებშიც და სასაზღვრო პირობებიც (11)-(14) მასის გადატანასთან დაკავშირებული კოეფიციენტები არიან ფუნქციურ დამოკიდებულებაში გადამტან პოტენციალებთან. ასეთი ცვლადკოეფიციენტებიანი ელიფსური განტოლებები ანალიზურ ამოხსნას არ ექვემდებარებიან [4].

3. მიღებული შედეგები და დისკუსია.

მსგავსების თეორიის გამოყენებით ამოცანის ამოხსნა და მიღებული შედეგებით პრაქტიკული სარგებლობა მოსახერხებელია მსგავსების კრიტერიუმების გამოყენებით. როგორც ახლად გაყვანილ, ისე ხანგრძლივი პერიოდით განიავებად გვირაბებში თბო- და მასაგადატანის მარტივი პროცესების შემთხვევაში გვირაბის კედლების უგანზომილებო პოტენციალები ასახულია ფუნქციური დამოკიდებულებებით [5, 6]

$$\bar{t}_{\tau, R_0} = f(Fo, Bi) \quad (15)$$

$$\bar{\vartheta}_{\tau, R_0} = f(Fo_m, Bi_m) \quad (16)$$

სადაც \bar{t}_{τ, R_0} არის გვირაბის კედლის უგანზომილებო ტემპერატურა, რომელიც მოცემულია ერთის ნაწილებში; $\bar{\vartheta}_{\tau, R_0}$ - მასაგადატანის უგანზომილებო პოტენციალი ერთის ნაწილებში; Fo, Bi, Fo_m, Bi_m - შესაბამისად ფურიეს, ბიოს, ფურიეს მასაგაცვლის, ბიოს მასაგაცვლის კრიტერიუმები, რომლებიც განისაზღვრებიან ფორმულებით

$$Fo = \frac{\alpha \tau}{R_0^2}, \quad Bi = \frac{\alpha R_0}{\lambda}, \quad Fo_m = \frac{\alpha_m \tau}{R_0^2}, \quad Bi_m = \frac{\alpha_m R_0}{\lambda_m} \quad (17)$$

ტემპერატურისა და მასაგადატანის უგანზომილებო პოტენციალები განისაზღვრება გამოსახულებებით

$$\bar{t}_{\tau, R_0} = \frac{t - t_1}{t_2 - t_1}, \quad \bar{\vartheta}_{\tau, R_0} = \frac{\vartheta - \vartheta_1}{\vartheta_2 - \vartheta_1} \quad (18)$$

სადაც განმარტებული სიდიდეების გარდა t არის ქანთა მასივის ტემპერატურა, °C; ϑ - ქანთა მასივის მასაგადატანის პოტენციალი, ჯ/მოლი.

დიფერენციალური განტოლებებით (7), (8) და სათანადო სასაზღვრო პირობებით გამოსახული ამოცანის ამოხსნა შესაძლებელია ბადური რიცხვითი მეთოდებით, ელემენტარული მოცულობების გამოყენებით. ამის შედეგად ვღებულობთ ქანთა

მასივის ტემპერატურისა და მასაგადატანის პოტენციალის ცვალებადობის ხასიათს გვირაბის კედლებზე, რაც გამოსაყენებელია ვენტილაციის თბოფიზიკური გაანგარიშების შესასრულებლად.

აღსანიშნავია, რომ მითითებული ცვალებადობა განპირობებულია როგორც არასტაციონარულობით, ისე ჰაერის ტემპერატურისა და ფარდობითი ტენიანობის სეზონური ცვალებადობით, რაც აგრეთვე აისახება მოცემული არასტაციონარული კოეფიციენტების რიცხვით სიდიდეებზე. არასტაციონარულობა გამოხატულია პროცესების მიღვეადობით და სტაბილიზაციით გვირაბის განიავების ხანგრძლივობიდან გამომდინარე, ხოლო სეზონური ცვალებადობა ყოველთვის სახეზეა. სეზონური ცვალებადობის ხასიათს დადგენა შესაძლებელია სავენტილაციო ჰაერის კლიმატური პარამეტრების - ტემპერატურისა და ფარდობითი ტენიანობის გვირაბში ცვალებადობაზე დაკვირვებების შედეგების ანალიზით. თუ ჩავთვლით, რომ ექსპერიმენტების ჩასატარებელი გვირაბის ფარგლებში სავენტილაციო ნაკადის ტემპერატურა, ფარდობითი ტენიანობა, ტენშემცველობა, მასაგადატანის პოტენციალი და ენთალპია წრფივად იცვლება, მაშინ შესაძლებელია დასაბუთებულად მივიჩნიოთ, რომ ჰაერის შინაგანი ენერგიის ნებისმიერი ცვლილება, შესაძლებელია შეფასდეს მისი მდგომარეობის მახასიათებელი პარამეტრის - ენთალპიის ცვალებადობის მიხედვით.

ჰაერის ენთალპია გამოისახება ტოლობით

$$i = c_p t_1 + (2500 - 1.96t_1)d \quad (19)$$

სადაც განმარტებული სიდიდეების გარდა i არის ჰაერის ენთალპია, კჯ/კგ; $(2500 - 1.96t_1)$ - ორთქლადქცევის კუთრი ენთალპია t_1 ტემპერატურაზე, კჯ/კგ; d - ჰაერის ტენშემცველობა, კგ/კგ.

ენთალპია ჰაერის მოლეკულების მოძრაობის კინეტიკური ენერგიის გარდა, რომელიც მაკროსკოპულად ტემპერატურით არის გამოხატული, ახასიათებს აგრეთვე მოლეკულათა ურთიერთქმედების პოტენციურ ენერგიას. პოტენციური ენერგია ამ შემთხვევაში დამოკიდებულია წყლის ორთქლის მოლეკულების რაოდენობაზე ჰაერში, მაკროსკოპულად ტენშემცველობით გამოიხატება და თავის თავში მოიცავს ფაზური გარდაქმნის თბურ ეფექტს.

სამ- და ორკომპონენტური თერმოდინამიკურ სისტემაში „სამთო მასივი-მიწისქვეშა წყლები-სავენტილაციო ჰაერი“ ან სისტემაში „სამთო მასივი-სავენტილაციო ჰაერი“ წყალგაუმტარი შრის ქვემოთ განლაგებული გვირაბებისათვის ენერგიის გადანაწილება შესაძლებელია მოხდეს ნებისმიერი გზით. მხედველობაში გვაქვს კონვექცია, კონდუქცია, აორთქლება, კონდენსაცია. მაგრამ ენერგიის გადასვლის გზის მიუხედავად, მაღალი პოტენციალის მქონე კომპონენტების მიერ გადაცემული

სითბოსა და მასის რაოდენობა ტოლია დაბალი პოტენციალის მქონე ელემენტების მიერ მიღებული სითბოსა და მასის რაოდენობისა.

შემოვიტანოთ აღნიშვნები

$$i_q = c_p t_1 \quad (20)$$

$$i_m = (2500 - 1.96t_1)d \quad (21)$$

სადაც i_q არის ჰაერის კუთრი კინეტიკური ენერგია, კჯ/კგ; i_m - კუთრი პოტენციური ენერგია, კჯ/კგ.

(19)-(21) ფორმულების ორივე მხარის გამრავლებით სავენტილაციო ჰაერის საშუალო მასურ ხარჯზე გვირავის კვეთში მიიღება

$$Q = Q_q + Q_m \quad (22)$$

$$Q_q = \bar{G} c_p t_1 \quad (23)$$

$$Q_m = (2500 - 1.96t_1)d\bar{G} \quad (24)$$

სადაც Q , Q_q და Q_m შესაბამისად არის ჰაერისაკენ მიმართული სრული, ცხადი და ფარული თბური ნაკადები, კვტ; \bar{G} - ჰაერის საშუალო მასური ხარჯი გვირაბში, კგ/წმ.

ამრიგად, ფორმულით (22) ჰაერის რაიმე \bar{G} რაოდენობისათვის სრული ენთალპია შესაძლებელია წარმოვადგინოთ მისი ცხადი და ფარული ენთალპიების ჯამის სახით.

აქედან გამომდინარე, ნებისმიერი სიგრძის გვირაბისათვის, ან მისი უბნისათვის (23) და (24) ფორმულების საფუძველზე შეიძლება განისაზღვროს ჰაერის ცხად და ფარულ სითბურ ნაკადთა ნაზარდები შემდეგი ფორმულებით

$$\Delta Q_q = \bar{G} c_p \Delta t \quad (25)$$

$$\Delta Q_m = (2500 - 1.96t_1)\Delta d\bar{G} = \bar{G}r\Delta d \quad (26)$$

სადაც Δt არის ჰაერის ტემპერატურის ნაზარდი გვირაბის უბნის ფარგლებში, °C; t_1 - ჰაერის ტემპერატურა იმავე ფარგლებში, °C; Δd - ჰაერის ტენშემცველობის ნაზარდი იმავე ფარგლებში, კგ/კგ; r - ფაზური გარდაქმნის კუთრი ენთალპია t_1 ტემპერატურაზე, კჯ/კგ.

(25) და (26) ფორმულებით გამოსახული თბური ნაკადები იმავე პირობებისათვის შესაძლებელია განისაზღვროს (7) და (8) განტოლებების ამონახსნების მიხედვით ამ უკანასკნელთა სიზუსტის შეფასების მიზნით. არასტაციონარული სითბოსა და მასის გაცემის კოეფიციენტების გამოყენებით ნაკადების საანგარიშო ფორმულებს შემდეგი სახე აქვთ

$$\Delta Q_q = 0.001K_\tau P_T l (t_0 - t_1) \quad (27)$$

$$\Delta Q_m = K_{\tau m} (P_T l - F)(\vartheta_0 - \vartheta_1)r \quad (28)$$

სადაც ΔQ_q არის სამთო მასივიდან კონვექციითა და კონდუქციით გადაცემული ენერგია, კვტ; K_τ - არასტაციონარული თბოგაცემის კოეფიციენტი, ვტ/(მ².გრად); P_T - გვირაბის პერიმეტრი, მ; l - გვირაბის ან მისი უბნის სიგრძე, მ; t_0 - სამთო მასივის

საშუალო ბუნებრივი ტემპერატურა, °C; ΔQ_m - სამთო მასივიდან ფაზური გარდაქმნის შედეგად გადაცემული ენერგია, კვტ; F - წყლის ღია ზედაპირის ფართობი, მ²; ϑ_0 - ბუნებრივი მასაგადატანის პოტენციალის საშუალო მნიშვნელობა სამთო მასივისათვის, ჯ/მოლი; ϑ_1 - სავენტილაციო ნაკადის მასაგადატანის პოტენციალი, ჯ/მოლი.

აღსანიშნავია, რომ ფორმულაში (27) დიფერენცირებული არ არის სითბოს გადაცემა წყლის ღია ზედაპირიდან, რადგან მისი ტემპერატურა ფაქტობრივად ტოლია იმ სამთო მასივის ტემპერატურისა, საიდანაც ისინი გადმოედინებიან. აგრეთვე ფორმულა (28) ითვალისწინებს მხოლოდ სამთო მასივიდან ფაზური გარდაქმნის შედეგად გადაცემულ ენერგიას და მხედველობაში არ ღებულობს აორთქლებას წყლის ღია ზედაპირიდან, რომელიც კარგადაა შესწავლილი და მისი გათვალისწინება განცალკევებულად უნდა მოხდეს. ამიტომ ტენშემცველობის ნაზარდს თუ გამოვაკლებთ წყლის ღია ზედაპირიდან აორთქლებული წყლის რაოდენობას, მაშინ დარჩენილი სიდიდე (Δd_m) ჰაერის მიერ სამთო მასივიდან მიღებული მასის რაოდენობა იქნება. აღნიშნულის გათვალისწინებით ფორმულა (26) მიიღებს სახეს

$$\Delta Q_m = \bar{G}r\Delta d_m \quad (29)$$

ფორმულებიდან (25), (27)-(29) მარტივი გარდაქმნებით მიიღება

$$K_\tau = 1000 \frac{\bar{G}\Delta t c_p}{P_{Tl}(t_0 - t_1)} \quad (30)$$

$$K_{\tau m} = \frac{\bar{G}\Delta d_m}{(P_{Tl} - F)(\vartheta_0 - \vartheta_1)} \quad (31)$$

აღნიშნულ ფორმულებში შემავალი სიდიდეების უშუალოდ გაზომვა რეალურ გვირაბებში არ წარმოადგენს სირთულეს და ამის გამო მოგვაჩნია, რომ წარმოდგენილი მეთოდიკით შესაძლებელია ექსპერიმენტულად განისაზღვროს არასტაციონარული სითბოს გაცვლის K_τ კოეფიციენტი ისე, როგორც - არასტაციონარული მასის გაცვლის $K_{\tau m}$ კოეფიციენტი.

მეორე მხრივ, შესაძლებელია თეორიულად განისაზღვროს აღნიშნული სიდიდეების რიცხვითი მნიშვნელობები (7), (8) დიფერენციალური განტოლებებისა და შესაბამისი სასაზღვრო პირობების (11)-(14) ამონახსნების მხედველობაში მიღებით, ნაშრომში [7] მოცემული მეთოდიკის შესაბამისად.

მონოლითური გამაგრების მქონე გვირაბისათვის არასტაციონარული თბოგაცემის და მასაგაცემის კოეფიციენტები შესაბამისად იანგარიშება ფორმულებით

$$K_\tau = K_1 \bar{t}_{\tau, Ro}, \quad K_{\tau m} = K_2 \bar{\vartheta}_{\tau, Ro} \quad (32)$$

სადაც სითბოს გადაცემის K_1 და მასის გადაცემის K_2 კოეფიციენტები განისაზღვრებიან ფორმულებით

$$K_1 = 1 / \left(\frac{1}{\alpha} + \frac{\sigma}{\lambda} \right) \quad K_2 = 1 / \left(\frac{1}{\alpha_m} + \frac{\sigma}{\lambda_m} \right) \quad (33)$$

ამ ფორმულებში განმარტებული სიდიდეების გარდა σ არის სამაგრის სისქე, მ.
 თბოგაცემის კოეფიციენტი იანგარიშება ფორმულით

$$\alpha = \frac{\varepsilon_1 \bar{G}^{0.8} P_T^{0.2}}{302S} \quad (34)$$

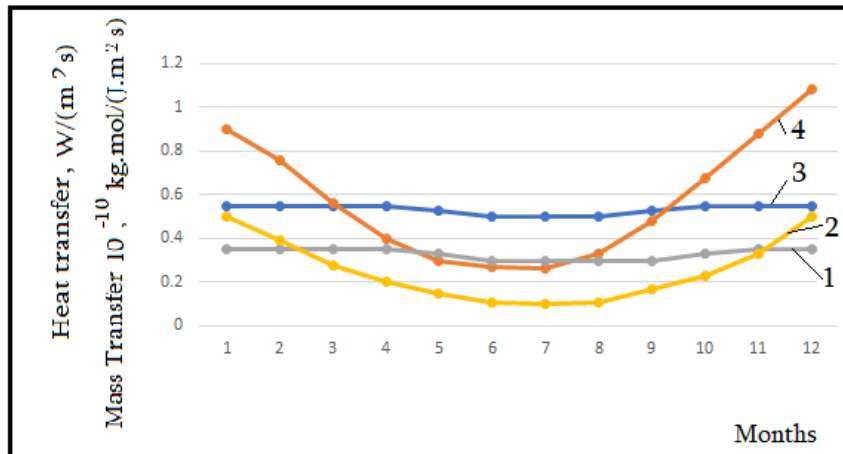
სადაც განმარტებული სიდიდეების გარდა ε_1 არის გვირაბის სამაგრის სიმაღლის კოეფიციენტი. ბეტონის გამაგრებისათვის $\varepsilon_1 = 1.0$; S - გვირაბის განივი კვეთის ფართობი, მ².

მასაგაცემის კოეფიციენტი იანგარიშება ფორმულით

$$\alpha_m = 0.468 \frac{\lambda_{m1} V^{0.5}}{R_0^{0.5} \nu^{0.17} D^{0.33}} \quad (35)$$

სადაც λ_{m1} არის ჰაერის მასაგამტარობის კოეფიციენტი, კგ.მოლი/(ჯ.მ.კ); V - ჰაერის სიჩქარე, მ/წმ; R_0 - გვირაბის კვეთის ეკვივალენტური რადიუსი, მ; ν - ჰაერის კინემატიკური სიბლანტის კოეფიციენტი, მ²/წმ; D - წყლის ორთქლის დიფუზიის კოეფიციენტი, მ²/წმ.

არასტაციონარული სითბოსა და მასის გაცვლის კოეფიციენტების წლიური ცვალებადობა თეორიული ანგარიშისა და ექსპერიმენტული დაკვირვებების მიხედვით მოცემულია ფიგ. 1-ზე.



როგორც ფიგურიდან ჩანს, აღნიშნული კოეფიციენტების ექსპერიმენტული სიდიდეები მკვეთრად გამოხატული სეზონური ცვალებადობით ხასიათდებიან, ხოლო თეორიულად ნაანგარიშებ სიდიდეებს სეზონის მიხედვით უმნიშვნელო ფლუქტუაცია ახასიათებთ. ამის გამო არასტაციონარული თბომასაგადაცემის

კოეფიციენტების თეორიული სიდიდეები მოითხოვენ კორექტირებას სეზონის მიხედვით. თბოფიზიკური გაანგარიშების პრაქტიკაში აღნიშნული მიღებული წესია. იმ შემთხვევაში, როცა ცნობილია მოცემულ გვირაბში კლიმატური პარამეტრების წლიური ცვალებადობის ხასიათი, შესაძლებელია დიდი სიზუსტით განისაზღვროს კოეფიციენტების სეზონის მიხედვით კორექტირების ნაზრდები. ასეთი მონაცემების არარსებობის პირობებში შესაძლებელია წრფივი ინტერპოლაციის გამოყენება იმ გარემოების მხედველობაში მიღებით, რომ გარდამავალ პერიოდში (გაზაფხულზე და შემოდგომაზე) კოეფიციენტების თეორიული და ექსპერიმენტული სიდიდეები ერთმანეთის ტოლია.

4. დასკვნა

ონზაგერის თეორემის თანახმად, კიურის პრინციპის გათვალისწინებით, სამთო მასივსა და სავენტილაციო ნაკადს შორის თბომასაგადაცემას განაპირობებენ პირველი რანგის ტენზორები - ტემპერატურისა და მასაგადატანის პოტენციალის გრადიენტები, რომლებიც არიან პირდაპირი მამოძრავებელი ძალები იმავე დასახელების ნაკადებისათვის და დამატებითი მამოძრავებელი ძალები იმ შემთხვევაში, როცა ნაკადის და ძალების სახელები ერთმანეთს არ ემთხვევა. როგორც ძირითადი, ისე დამატებითი ძალებით განპირობებული ნაკადები ერთნაირად მოქმედებენ სავენტილაციო ნაკადის კლიმატური პარამეტრების - ტემპერატურისა და ფარდობითი ტენიანობის ცვალებადობაზე გვირაბის ფარგლებში, რომელსაც სეზონური ხასიათი აქვს. სამთო მასივიდან სითბოსა და მასის არასტაციონარული გადაცემის კოეფიციენტები სეზონურ ცვალებადობას განიცდიან, რაც მხედველობაში უნდა იქნეს მიღებული გვირაბების ვენტილაციის თბოფიზიკური გაანგარიშების შემთხვევაში.

Acknowledgements

This work was supported by Shota Rustaveli National Science Foundation (SRNSF) [Grant number AR-19-1936, Project title “*Development and testing of transformable system to save life in road tunnel in case of fire*”].

References

1. Onsager L. (1931) RECIPROCAL RELATIONS IN IRREVERSIBLE PROCESSES. *Physical Review* **37**: 405-426.
2. de Groot S.R., Mazur R. (1984) *Non-equilibrium thermodynamics*. Dover Publications Inc., New York: 505.
3. Oniani Sh. I., Lanchava O.A. (2020) Hygroscopic potential of mass transfer in rock massif. *GEORGIAN SCIENTISTS* **2** (2).
4. Mathews J., Walker R.L. (1970) *Mathematical Methods of Physics*. 2nd Edition: 450.
5. Lanchava O.A. (1982) *Journal of Mining Science* **1**(6): 87-92.
6. Lanchava O.A. (1985) *Journal of Mining Science* **1**(5): 99-104.
7. Kuzin V.A., Velichko A.E., Khokhotva N.N. (1979) *Edinaia metodika prognozirovania temperaturnykh uslovii v ugol'nykh shakhtakh*: 196.
<https://files.stroyinf.ru/Index2/1/4293744/4293744579.htm>