

ტენ. მეცნ. დოქტორი, პროფესორი **ო. ლანჩავა,**

აკად. დოქტორი, ასისტენტ-პროფესორი **ნ. არუდაშვილი,**

დოქტორანტი **ზ. ხოკერაშვილი**

**სითბოსა და ჰიგროსკოპული მასის არასტაციონარული გადაცემა მეტროს სავენტილაციო ჭავლსა და გარშემომცველ სამთო მასივს შორის**

სატრანსპორტო გვირაბების მშენებლობისა და ექსპლუატაციის თანამედროვე ტექნოლოგიებიდან გამომდინარე ნაშრომში მიღებულია, რომ მემბრანის შიგნით, გვირაბის გამაგრებისა და მოპირკეთების ფარგლებში, წყლის დრენაჟი აღარ ხდება და ადგილი აქვს ჰიგროსკოპული მასის (ტენის) გაცვლის არასტაციონარულ პროცესს, სითბოს გადაცემის ანალოგიურ პროცესთან ერთად. ამრიგად, სამთო მასივში ადგილი აქვს მხოლოდ ფორებში სორბირებულ ტენს, ხოლო გვირაბებში ცხადი სახით წყალი შესაძლებელია იქნეს მხოლოდ გამონაკლის შემთხვევაში, ლოკალური წყაროების სახით, რომელთა გავლენა სავენტილაციო ჭავლზე განცალკევებულად განიხილება. მოცემულია სითბოსა და ტენის გადაცემის როგორც მარტივი პროცესების, ისე ერთობლივი პროცესების მათემატიკური მოდელირების შედეგები გრაფიკებისა და ნომოგრამების სახით, რომელთა გამოყენებითაც შესაძლებელია თბოფიზიკური გაანგარიშებისათვის აუცილებელი სითბოსა და ტენის გადაცემის არასტაციონარული კოეფიციენტების განსაზღვრა. სორესა და დიუფურის ეფექტებით აღძრული დამატებითი ნაკადები, როგორც წესი, აძლიერებენ ძირითად ნაკადებს, მაგრამ პრაქტიკაში შესაძლებელია შეგვხვდეს შემთხვევა, როცა დამატებითი ნაკადების გავლენის მხედველობაში მიღება საჭირო აღარ იყოს. პროცესების ანალიზის საფუძველზე შემოთავაზებულია კრიტერიუმი, რომლის მსაზღვრელი რიცხვითი სიდიდის ზემოთ თბოფიზიკური გაანგარიშებისათვის აუცილებელია დიუფურისა და სორეს დამატებითი ეფექტების გათვალისწინება. აღნიშნული ეფექტების იგნორირება შესაძლებელია, თუ  $10^6 L\alpha=1$ .

**შესავალი**

თერმოაეროდინამიკური მრავალპარამეტრიანი ამოცანების გადაწყვეტისას ორკომპონენტური სისტემისათვის "სამთო მასივი-სავენტილაციო ნაკადი,, საჭირო ხდება არასტაციონარული სითბოსა და მასის გადაცემის კოეფიციენტების გაანგარიშება სორესა და დიუფურის დამატებითი ეფექტების გათვალისწინებით ან მათი გათვალისწინების გარეშე.

როგორც წესი, ამ კოეფიციენტების განსაზღვრა ხდება ერთობლივი თბომასაგადაცემის დიფერენციალური განტოლებების ამონახსნების გამოყენებით. პრობლემა ის არის, რომ განტოლებები ანალიზურად ამოიხსნება მხოლოდ არსებითი გამამარტივებელი დაშვებების მიღების შემდეგ რაც საჭირო სიზუსტეს ვერ უზრუნველყოფს.

ამავე დროს სორესა და დიუფურის დამატებითი ეფექტების, ისე როგორც ძირითადი ნაკადების შესაფასებლად, ამოსავალი იყო სითბოსა და მასის გადატანის პროცესების დამახასიათებელი ფიზიკური თვისებების თანაფარდობას კერძოდ, ა.ვ. ლიკოვი მიანიშნებდა, რომ შეიძლებოდა ტემპერატურაგამტარობისა და მასაგადატანის პოტენციალგამტარობის კოეფიციენტების ტოლობის  $\alpha=\alpha_m$  გამოყენება [1], ხოლო **ო. ა. კრემნევი** და **ვ.ი. ჟურავლენკო** სარგებლობდნენ ტოლობით

$\sqrt{a/a_m} = 1$  [2]. ამ უკანასკნელი ფორმულით შერბილებულია კოეფიციენტებს შორის განსხვავება იმ პირობით, თუ ორივე კოეფიციენტის რიცხვითი მნიშვნელობა ერთი რიგისაა.

ჩვენს კვლევებში გამოიკვეთა, რომ აღნიშნული კოეფიციენტები ქანებისათვის მინიმუმ ორი რიგით მაინც განსხვავდებიან ერთმანეთისაგან [3] და ამდენად ბუნებრივად დადგა დიუფურისა და სორეს დამატებითი ეფექტების უფრო ზუსტად გათვალისწინების საკითხი.

წინამდებარე ნაშრომში არჩეულია ცნობილი ნაშრომებისაგან [1, 2] განსხვავებული გზა. ჩვენ გამოვდივართ არა მითითებული ტოლობიდან  $\alpha = \alpha_m$ . არამედ სავენტილაციო ნაკადის აერომექანიკიდან. დამატებითი ნაკადების შესაფასებლად ვსარგებლობთ სითბოს გაცემის თერმული წინაღობის  $1/\alpha$  ცნებით თბური სასაზღვრო შრის არეალში, ისევე როგორც მასის გაცემის ანალოგიური წინაღობის ცნებით  $1/\alpha_m$  შესაბამისი სასაზღვრო შრის არეალში ( $\alpha, \alpha_m$ - გვირაბის ზედაპირიდან თბოგაცემისა და მასაგაცემის კოეფიციენტები, ვტ/მ<sup>2</sup>.გრად, კგ.მოლი/ჯ.მ<sup>2</sup>.წმ). ამასთანავე, ჩვენ არ ვგულისხმობთ ისეთ დამატებით შემზღუდველ პირობებს, არც აღნიშნულ წინაღობებისათვის არც ნაკადებისათვის, რაც არ არის გათვალისწინებული ნიუტონ-რიხმანის, ფურიესა და ფიკის ძირითად კანონებში.

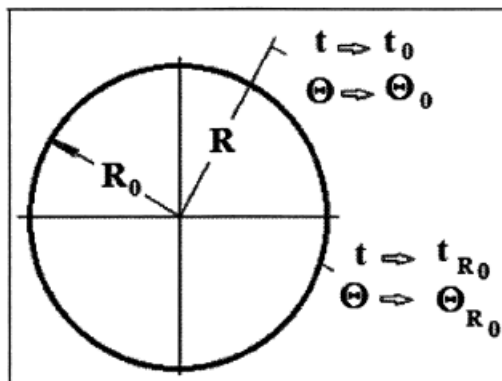
### თეორიული ანალიზი

თუ უსასრულო სამთო მასივში გაყვანილ გვირაბს აქვს წრის ფორმა რადიუსით  $R_0$  (იხ. ნახ. 1), გვირაბის გასწვრივ გარშემომცველ სამთო მასივში სითბოსა და მასის (ტენის) გადაცემას მხედველობაში არ მივიღებთ, ხოლო თვით მასივს მივიჩნევთ იზოტროპულად და ერთგვაროვნად, მაშინ მასივსა და ნაკადს შორის თბომასაგადაცემა აღიწერება შემდეგი დიფერენციალური განტოლებებით

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \Delta^2 t + \varepsilon \frac{c_m}{c} \frac{\partial \Theta}{\partial \tau}; \quad (1)$$

$$\frac{\partial \Theta}{\partial \tau} = a_m \Delta^2 \Theta + a_m \delta_\theta \Delta^2 t, \quad (2)$$

სადაც  $t$  არის სამთო მასივის ტემპერატურა °C;  $\alpha$ - ტემპერატურაგამტარობის კოეფიციენტი, მ<sup>2</sup>/წმ;  $\Delta^2$  - ლაპლასის ოპერატორი;  $\varepsilon$  - ფაზური გარდაქმნის კრიტერიუმი სამთო მასივში;  $r$  - ფაზური გარდაქმნის კუთრი ენთალპია, კჯ/კგ;  $C_m, C$  - შესაბამისად იზოთერმული მასატევადობისა და კუთრი თბოტევადობის კოეფიციენტები, მოლი/ჯ, კჯ/კგ.გრად;  $\tau$ -დრო, წმ;  $\Theta$  - სამთო მასივის მასაგადატანის პოტენციალი, ჯ/მოლი;  $\alpha_m$  - მასაგადატანის პოტენციალგამტარობის კოეფიციენტი, მ<sup>2</sup>/წმ;  $\delta_\theta$ - თერმოგრადიენტული კოეფიციენტი, ჯ/მოლი.გრად.



ნახ. 1. ტემპერატურისა და მასაგადატანის პოტენციალის განაწილება გვირაბის კედლებსა და გარშემომცველ სამთო მასივში გვირაბის ღერძის მართობულ სიბრტყეზე:  $R$  - ცილინდრული კოორდინატი;  $R_0$  - გვირაბის ეკვივალენტური რადიუსი;  $0$  და  $R_0$  ინდექსები შესაბამისად უზენეუბენ ტემპერატურისა და მასაგადატანის პოტენციალის სიდიდეებს გარშემომცველ იზოტროპულ გარემოში და გამყოფ ზედაპირზე

ცალსახობის პირობებს აქვთ შემდეგი სახე

$$\tau = 0, R = R_0: t_{(R_0,0)} = t_0, \Theta_{(R_0,0)} = \Theta_0, \quad (3)$$

$$\tau > 0, R = \infty: t_{(R,\tau)} = t_0, \Theta_{(R,\tau)} = \Theta_0, \quad (4)$$

$$\tau > 0, R = \infty:$$

$$-\lambda \frac{\partial t}{\partial R} + \alpha(t_k - t_h) + \alpha_m r(\Theta_k - \Theta_h) = 0; \quad (5)$$

$$-\lambda_m \frac{\partial \Theta}{\partial R} - \lambda_m \delta_\theta \frac{\partial t}{\partial R} + \alpha_m (\Theta_k - \Theta_h) = 0, \quad (6)$$

სადაც განმარტებული სიდიდეების გარდა,  $R$  არის ცილინდრული კოორდინატი;  $\lambda, \lambda_m$  - შესაბამისად თბოგამტარობისა და მასაგამტარობის კოეფიციენტები ქანისათვის, ვტ/მ.გრად, კგ.მოლი/ჯ.მ.წმ;  $t_k, \Theta_k$  - შესაბამისად გვირაბის ზედაპირის ტემპერატურა და მასაგადატანის პოტენციალი, °C, ჯ/მოლი;  $t_h, \Theta_h$  - იგივე სავენტისათვის ნაკადისათვის.

თუ დიუფურისა და სორეს ეფექტებს მხედველობაში არ მივიღებთ, მაშინ (1) და (2) განტოლებები მიიღებენ ფურიესა და კირჰოფის მიერ შემოთავაზებულ სახეს

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \Delta^2 t; \quad (7)$$

$$\frac{\partial \Theta}{\partial \tau} = a_m \Delta^2 \Theta, \quad (8)$$

ხოლო სასაზღვრო პირობებს ასეთ შემთხვევაში ექნებათ სახე:

$$\tau > 0, R = \infty:$$

$$-\lambda \frac{\partial t}{\partial R} + \alpha(t_k - t_h) = 0, \quad (9)$$

$$-\lambda_m \frac{\partial \Theta}{\partial R} + \alpha_m (\Theta_k - \Theta_h) = 0. \quad (10)$$

დიუფურისა და სორეს დამატებით ეფექტების მხედველობაში მიღება, როგორც წარმოდგენილი ფორმულებიდან ჩანს, ისეთი შემთხვევაა, როცა ტემპერატურის გრადიენტი აღძრავს დამატებით მამოდრავებელ ძალას მასის გადატანის პროცესისათვის, ხოლო მასაგადატანის პოტენციალის გრადიენტი თავის მხრივ აღძრავს დამატებით თბურ ნაკადს.

არსებითა, რომ პრაქტიკულად გვხვდება შემთხვევები, როცა აღიშნული ეფექტების მხედველობაში მიღების გარეშე და შესაბამისად, თბოფიზიკური ამოცანების შედარებით მარტივად გაანგარიშებით, მიიღება სარწმუნო შედეგები. ამისათვის დიდი მნიშვნელობა ენიჭება სათანადო კრიტერიუმის დამუშავებას, რადგან გვირახის კედლის უგანზომილებო ტემპერატურა და უგანზომილებო მასაგადატანის პოტენციალი შეიძლება წარმოდგენილი იქნეს კრიტერიუმებზე ფუნქციური დამოკიდებულების სახით.

$$\Delta^2 = \frac{\partial^4}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R}$$

თუ ზემოაღნიშნულ ფორმულებში ლაპლასის ოპერატორს აქვს სახე  $\Delta^2$  პირველი რიგის წარმოებულები მუდმივებია დროსა და სივრცეში, ე.ი.

$$\frac{\partial \Theta}{\partial R_{R=R_0}} = Const, \quad \frac{\partial t}{\partial R_{R=R_0}} = Const, \quad \frac{\partial \Theta}{\partial \tau_{R=R_0}} = Const, \quad \frac{\partial t}{\partial \tau_{R=R_0}} = Const,$$

შესაბამისად  $\frac{\partial^2 \Theta}{\partial R^2} = 0$  და  $\frac{\partial^2 t}{\partial R^2} = 0$  წარმოებულების ფარდობას თუ შევცვლით მათი სასრული

სიდიდებით ლოპიტალის წესის თანახმად  $\frac{\partial^m Y}{\partial x^m} \rightarrow \frac{Y}{x^m}$  ფორმულის საფუძველზე, მაშინ (1) განტოლება

მიიღებს სახეს  $|\frac{\Delta_\tau t}{\tau}|_{R=R_0} = a(0 + |\frac{\Delta_R t}{R^2}|_{R=R_0}) + \frac{\epsilon r c_m}{c} |\frac{\Delta_\tau \Theta}{\tau}|_{R=R_0}$  საიდანაც მარტივი გარდაქმნებით მიიღება

$$\frac{\Delta_\tau t}{\Delta_R t} = Fo + \epsilon Ko, \tag{11}$$

სადაც წარმოდგენილია ფურიესა და კოსოვიჩის კრიტერიუმები, რომლებსაც შესაბამისად აქვთ სახე

$$Fo = \frac{a\tau}{R_0^2}, \tag{12}$$

$$Ko = \frac{rc_m}{c} \frac{\Delta \Theta}{\Delta t} \tag{13}$$

მასაგადატანის პოტენციალის საანგარიშო ფორმულის გათვალისწინებით [5], ბოლო ფორმულა მიიღებს სახეს

$$Ko = \frac{rc_m}{c} \ln \Phi. \tag{14}$$

სადაც  $\Phi$  არის წონასწორული ფარდობითი ტენიანობა, ერთის ნაწილებში.

(11) ფორმულის ანალოგიურად (2) და (6) ფორმულებიდან მიიღება

$$\frac{\Delta_\tau \Theta}{\Delta_R \Theta} = Fo_m (1 + Pn_m); \tag{15}$$

$$\frac{\Delta_\tau \Theta}{\Delta_R \Theta} = Bi_m (1 + Pn_m^{-1}), \tag{16}$$

სადაც წარმოდგენილია მასაგაცვლის ფურცის, ბიოს და პოსნოვის კრიტერიუმები, რომლებსაც შესაბამისად აქვთ სახე

$$Fo_m = \frac{a_m \tau}{R_o^2}; \quad (17)$$

$$Bi_m = \frac{\alpha R_o}{\lambda}; \quad (18)$$

$$Pn_m = \delta_\theta \frac{\Delta t}{\Delta \Theta}. \quad (19)$$

ბიოს თბოგაცვლის კრიტერიუმს, როგორც ცნობილია, აქვს სახე [6]

$$Bi = \frac{\alpha R_o}{\lambda}. \quad (20)$$

როგორც აღინიშნა, დამატებითი ეფექტების გათვალისწინება თბოფიზიკური ამოცანების გადაწყვეტისას საზოგადოდ ( $\alpha$ ,  $\alpha_m$  კოეფიციენტების ტოლობა) პრინციპულ სიძნელეებს ხვდება. მსგავსების კრიტერიუმების გამოყენებით კი, არანაკლები სიძნელეებია, რადგან პოსნოვისა და კოსოვიჩის კრიტერიუმები შეიცავენ სამიეზო სიდიდეებს  $\Delta t$  და  $\Delta \Theta$  სახით. ამდენად მათი გამოყენებით ცალსახა შედეგების მიღება თითქმის შეუძლებელია.

შესაბამისად, წინამდებარე ნაშრომში არჩეულია განსხვავებული მეთოდი. სასრული პროპორციული სიდიდეების შეტანით და ლოპიტალის წესის გამოყენებით (5) ფორმულა მიიღებს

$$\lambda \frac{\Delta_R t}{R} = \alpha \Delta_\tau t + \alpha_m r \Delta_\tau \Theta, \quad (5)$$

სახეს

რომლის გამრავლებით  $\frac{R}{\lambda \Delta_\tau t}$  სიდიდეზე მიიღება

$$\frac{\Delta_R t}{\Delta_\tau t} = \frac{\alpha R}{\lambda} + \frac{\alpha_m r R}{\lambda} \frac{\Delta_\tau \Theta}{\Delta_\tau t}$$

თუ  $R=R_o$ , მაშინ ზემოთ მოცემული ფორმულების გათვალისწინებით ბოლო ფორმულა მიიღებს სახეს

$$\frac{\Delta_\tau t}{\Delta_{R_o} t} = Bi + \frac{\delta_\theta \alpha_m r}{\alpha} Bi Pn_m^{-1}. \quad (21)$$

ამ ფორმულის მარჯვენა მხარეზე გამოსახული წილადი არის უგანზომილებო სიდიდე, რომელიც არის ახალი კრიტერიუმი.

მაშასადამე

$$La = \frac{\delta_\theta \alpha_m r}{\alpha}. \quad (22)$$

ახალ კრიტერიუმს და განსაკუთრებით კი მის მსაზღვრელ სიდიდეს, ღრმა ფიზიკური აზრი აქვს. ის წარმოადგენს ლიუისის, კოსოვიჩისა და პოსნოვის კრიტერიუმების სინთეზს. აღნიშნულის დასამტკიცებლად აღვნიშნოთ, რომ ლიუისის კრიტერიუმი განისაზღვრება გამოსახულებით [5]

$$Le = \frac{a_m}{a} \quad (23)$$

ბოლო სითბოსა და მასის ნაკადების სიმკვრივეებს გაყოფის ზედაპირზე "სამთო მასივი-სავენტილაციო ჭავლი," აქვთ სახე

$$\alpha \Delta_\tau t = \lambda \Delta_{R_0} t, \quad (24)$$

$$\alpha_m \Delta_\tau \Theta = \lambda_m \Delta_{R_0} \Theta. \quad (25)$$

ქანის ფიზიკურ თვისებებს შორის დამოკიდებულებების გათვალისწინებით და მარტივი გარდაქმნებით ბოლო ფორმულებიდან მიიღება [3]

$$\alpha = a c \gamma_0 \frac{\Delta_\tau t}{\Delta_{R_0} t}, \quad (26)$$

$$\alpha_m = a_m c_m \gamma_0 \frac{\Delta_\tau \Theta}{\Delta_{R_0} \Theta}. \quad (27)$$

უკანასკნელი ფორმულების ჩასმით (22) ფორმულაში, (14), (19), (23) ფორმულების გათვალისწინებით და მარტივი გარდაქმნებით მიიღება

$$La = LeKoPn_m \quad (28)$$

პოსნოვის კრიტერიუმი ერთმანეთთან აკავშირებს მოცულობით სითბოსა და მასის ნაკადებს და აჩვენებს ტემპერატურული გრადიენტით მასაგადატანის პოტენციალის ცვალებადობას სამთო მასივში. კოსოვიჩის კრიტერიუმი სავენტილაციო ნაკადის ენერგეტიკული იმპულსის გავლენის მანიშნებელია, ხოლო ახალი კრიტერიუმი ერთმანეთთან აკავშირებს სითბოს გაცემის თერმულ წინაღობას  $1/\alpha$  თბური სასაზღვრო შრის არეალში და მასის გაცემის ანალოგიურ წინაღობას  $1/\alpha_m$  შესაბამისი სასაზღვრო შრის არეალში. მიზანშეწონილია აქვე ვაჩვენოთ განსხვავება ლიუისისა და ახალ კრიტერიუმს შორის.  $Le$  მასივის თვისებებიდან გამომდინარე, აჩვენებს თბური და მასის სასაზღვრო შრეების ურთიერთმიმართებას. ეკვივალენტური ჭავლებისათვის, თუ  $\alpha = \alpha_m$ , თბური და მასის სასაზღვრო შრეების სისქე ერთნაირია და თბო- და მასაგადაცემა სავენტილაციო ნაკადზე რიცხობრივად ერთმანეთის ტოლია. თუმცა მითითებულ ტოლობას რეალურად ადგილი არ აქვს, რაც ჩანს ცხრილიდან 1. ახალი კრიტერიუმი იმავეს აჩვენებს ათვლის სხვა სისტემიდან - ნაკადის აერომექანიკიდან, რომლისთვისაც ნაკადების ტოლობის დაცვის საჭიროება არაა.

აღნიშნა, რომ (1), (2) ფორმულებით ასახული განტოლებები, შესაბამისი ცალსახობის პირობებით, ანალიზურ ამოხსნას არ ექვემდებარება და საჭიროა მათემატიკური მოდელირების მეთოდის გამოყენება.

მათემატიკური მოდელები როგორც თბოგამტარობის, აგრეთვე მასაგამტარობის შემთხვევისათვის შედგენილია ცხრილში 1 მოცემული ერთნაირი ქანების ფიზიკური პარამეტრების



მიხედვით. თბოგაცემისა და მასაგაცემის კოეფიციენტები მოდელებზე შესაბამისად იცვლებოდა ფარგლებში 3.0-50.0 ვტ/მ<sup>2</sup>გრად და (1.5-50.0)\*10<sup>-10</sup> კგ.მოლი/ჯ.მ<sup>2</sup>.წმ.

**ცხრილი 1**

**ქანების თბო- და მასაფიზიკური მახასიათებლები, რომელთა მიხედვითაც აივო მათემატიკური ანალოგები**

ქანის ფიზიკური თვისებები	1 ვარიანტი	2 ვარიანტი	3 ვარიანტი	4 ვარიანტი
სიმკვრივე $\gamma_g, კგ/მ^3$	2800	2580	2600	3440
კუთრი თბოტევადობის კოეფიციენტი $C, კვ/კგ.გრად$	0.904	0.883	0.900	0.804
თბოგამტარობა $\lambda, ვტ/მ.გრად$	2.020	2.050	2.850	3.860
ტემპერატურაგამტარობა $a, 10^{-4} მ^2/წმ$	7.98	9.29	12.18	13.96
ქანის ტენზომკვლეობა $U, კგ/კგ$	0.07	0.08	0.03	0.02
იზოთერმული მასატევადობა $C_m, 10^{-5} მოლი/ჯ$	20.0	6.8	0.9	4.5
მასაგამტარობა $\lambda_m, 10^{-10} კგ.მოლი/ჯ.მ.წმ$	12.32	4.08	1.36	6.81
მასაგადატანის პოტენციალგამტარობა $a_m, 10^{-9} მ^2/წმ$	2.2	2.4	5.8	4.4

ცხრილში 1 მოცემული ფიზიკური სიდიდეების ყოველი კონკრეტული მნიშვნელობისათვის ძალაშია ზოგადი კანონზომიერება, რომლის თანახმადაც გამყოფ ზედაპირზე და სამთო მასივში ტემპერატურის განაწილების ხასიათი დამოკიდებულია არა მხოლოდ და არა იმდენად  $\alpha$  და  $\lambda$  კოეფიციენტების კონკრეტულ მნიშვნელობებზე, არამედ მათ თანაფარდობაზე ბიოს კრიტერიუმის სახით [6, 7]. იმის აღნიშვნა თითქმის ზედმეტიცაა, რომ თბოგაცემის კოეფიციენტი  $\alpha$  ეკვივალენტური აეროდინამიკური ნაკადებისათვის მუდმივი სიდიდეა.

ზემოაღნიშნული გამონაკლისის გარეშე ვრცელდება მასაგადაცემის პროცესებზეც, რადგან მასაგაცემის კოეფიციენტი  $\alpha_m$  ეკვივალენტური აეროდინამიკური ნაკადებისათვის ამ შემთხვევაშიც უცვლელი სიდიდეა, ხოლო პროცესის სტაბილიზაციის ხარისხი დამოკიდებულია არა იმდენად რომელიმე ცალ კეული კოეფიციენტის რიცხვით სიდიდეზე, არამედ მათ თანაფარდობაზე  $\alpha_m/\lambda_m$  სახით [6, 7], რაც წარმოდგენილია ბიოს მასაგადატანის კრიტერიუმის სახით.

ანალოგიურად, თერმოგრადიენტული მასაგადატანა არ არის დამოკიდებული მხოლოდ თერმოგრადიენტული კოეფიციენტის რიცხვით სიდიდეზე. არამედ მის კომბინაციაზე სხვა სიდიდეებთან. რაც ასახულია პოსნოვის ან ახალი კრიტერიუმით.

აღნიშნული შეეხება ყველა მარტივ ცვლადებს, რომლებიც წარმოდგენილია ფიზიკური სიდიდეებით ( $\alpha, \lambda, R_0, \lambda_m$  და ა.შ.) და განზოგადებულ ცვლადებს, რომლებიც წარმოდგენილია უგანზომილებო სიმპლექსების ან კომპლექსების სახით  $Le, Bi, L\alpha, Fo, Bi_m$  ორივე ძირითადი მამომრავებელი ძალის მიმართ.

საკვლევი ობიექტების პირობებისათვის დამახასიათებელი კრიტერიუმების ცვალებადობის ფარგლების განსაზღვრა დიდ სირთულეს არ წარმოადგენს, რის გამოც შესაძლებელია მოდელების საკმარისი რაოდენობის წინასწარი დაგეგმვა. გავაკეთოთ აღნიშნული ფურის კრიტერიუმის მაგალითზე. მსაზღვრელი დრო ამ კრიტერიუმიდან შეიძლება იცვლებოდეს ნულიდან ნაგებობის არსებობის ვადამდე ან რაიმე გონივრული წინასწარ დასახული ხანგრძლივი პერიოდისათვის.

სხვადასხვა ქანებისათვის ტემპერატურაგამტარობის კოეფიციენტის სიდიდეებისა და მსაზღვრელი გეომეტრიული ზომების მიხედვით დგინდება, რომ ფურის კრიტერიუმში შესაძლებელია იცვლებოდეს 0-150-ის დიაპაზონში. ანალოგიურად დადგინდება ყველა კრიტერიუმის ცვალებადობის არე, რის შემდეგაც განისაზღვრება მოდელების ოპტიმალური რიცხვი ისეთნაირად, რომ მოდელებზე აისახოს კრიტერიუმების ცვალებადობის მთელი დიაპაზონი ნატურულ პირობებში. ცხადია, რომ მარტივი ცვლადებით იგივეს განხორციელება უფრო რთული, ხოლო ზოგ შემთხვევაში, შეუძლებელიც არის. აქედან ირიბად დასტურდება კრიტერიუმების სარგებლიანობა.

ქვემოთ გამოჩნდება, რომ მოდელირებით მიღებული შედეგები განზოგადებული იქნა დამატებითი მამოძრავებელი ძალების გავლენის გათვალისწინებით და წარმოდგენილია ნომოგრამების სახით. მაშასადამე, სუფთა თბოგადაცემა და თბოგადაცემა დიუფურის ეფექტის თანხლებით ერთნაირად იანგარიშება. ამ შემთხვევაში ცვალებადია გამყოფი ზედაპირის უგანზომილებო ტემპერატურა, რადგან თბოგადაცემის კოეფიციენტი  $\alpha$ , როგორც აღინიშნა, ეკვივალენტური აეროდინამიკური ნაკადებისათვის მუდმივი სიდიდეა. თავის მხრივ უგანზომილებო ტემპერატურა ცალსახა ფუნქციური დამოკიდებულებით არის დაკავშირებული პროცესის დამახასიათებელ განზოგადებულ ცვლადებთან

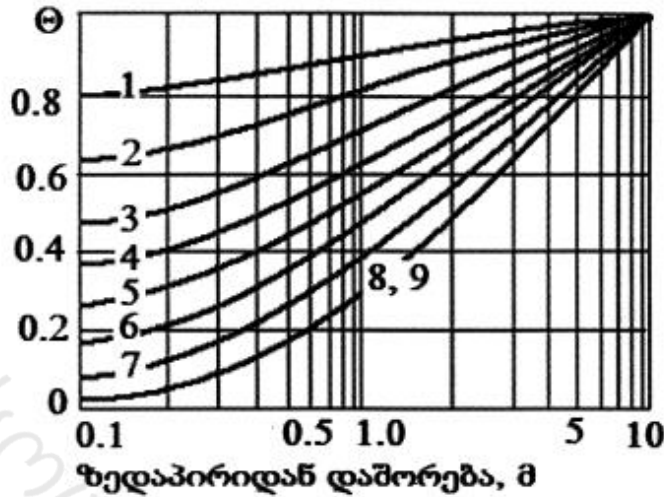
მასაგადაცემის დიფერენციალური განტოლება (2) და შესაბამისი ცალსახობის პირობები ცვლადი კოეფიციენტებით ხასიათდებიან დროსა და სივრცეში. ქანების ფიზიკური მახასიათებლები არსებითად არიან დამოკიდებული სამიეხელი მასაგადაცემის პოტენციალის სიდიდეზე, რაც უნდა აისახოს მოდელებზე. აღნიშნულიდან გამომდინარე, მასაგადაცემის პროცესების დამოდელება შედარებით რთულია.

არსებითი მნიშვნელობა ენიჭება იმ ფაქტს, რომ ბიოს ორივე კრიტერიუმის რიცხვითი სიდიდე 40-ის ფარგლებში, სამთო მასივისათვის შეიძლება მიჩნეული იქნეს ზღვრულად, რადგან მისი შემდგომი ზრდა გავლენას აღარ ახდენს არც თბოგადაცემისა და არც მასაგადაცემის პროცესების ინტენსიურობაზე.

მასაგადაცემის პროცესისათვის აღნიშნული კარგად ჩანს ნახაზიდან 2, სადაც უგანზომილები პოტენციალის წირები 8 და 9 ერთმანეთს ემთხვევიან მასივის არეალში, რომელიც გაყოფის ზედაპირიდან რადიალური მიმართულებით განლაგებულია 0.1-10 მ დიაპაზონში. აღნიშნულიდან გამომდინარე, მანძილი 50 მ რომლის მიხედვით შესრულდა მოდელირება, შეგვიძლია მივიჩნიოთ მასივის უსასრულობის კარგ იმიტაციად.

უშუალოდ გაყოფის ზედაპირზე იგივე თვისება ახასიათებს ბიოს მასაგადაცემის კრიტერიუმს რიცხვითი სიდიდის "50,-ის ზემოთ.

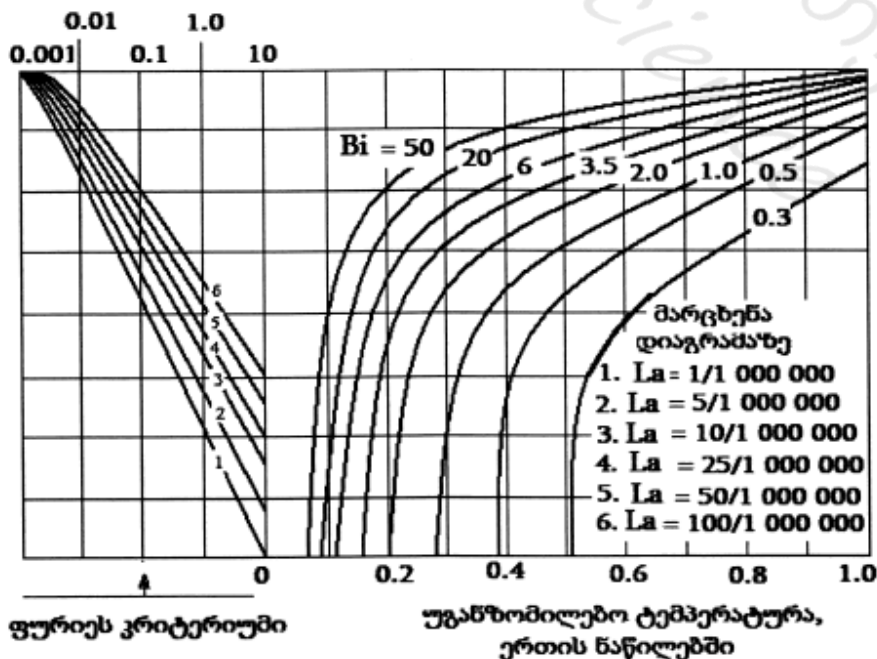




ნახ. 2. მასაგადატანის უგანზომილები პოტენციალის განაწილება რადიალური მიმართულებით:  $Fo_m = 1.12$ ; 1 -  $Bi_m = 0.45$ ; 2 - 1.0; 3 - 2.3; 4 - 3.5; 5 - 6.0; 6 - 10.0; 7 - 24.0; 8 - 40.0; 9 - 75.0 (იზოთერმული მასაგადატანა)

სავენტილაციო ნაკადის ტენშემცველობისა და ფარდობითი ტენიანობის ცვალებადობაზე გვირახის ფარგლებში, სამთო მასივიდან მასაგადაცემასთან ერთად რომელიც ძირითადი ფაქტორია, აორთქლება წყლის თავისუფალი ზედაპირიდან მნიშვნელოვან გავლენას ახდენს და მისი გათვალისწინება აუცილებელია. ამასთანავე სითხის თავისუფალი ზედაპირიდან აორთქლება საკმაო სიზუსტითაა შესწავლილი და შეიძლება მისი ზუსტი გაანგარიშება. მთავარი კი ისაა, რომ აორთქლება სითხის თავისუფალი ზედაპირიდან და ჰიგროსკოპული მასაგადაცემა სამთო მასივიდან სხვადასხვა კანონზომიერებით ხასიათდებიან. ამის გამო ამ ნაშრომში გრუნტის წყლები განიხილება როგორც ტენის ადგილობრივი განაწილებული წყარო და გათვალისწინებაც საანგარიშო ფორმულებში დიფერენცირებულად ხდება, რის შესახებ აღნიშნული იყო.

თბოგადაცემა დიუფურის ეფექტის გათვალისწინებით აღნიშნულ ორკომპონენტან სისტემაში „სამთო მასივი- სავენტილაციო ნაკადი“ განზოგადდა ფურიეს, ბიოს და ამ ნაშრომში წარმოდგენილი ახალი კრიტერიუმების მიხედვით და წარმოდგენილია მე-3 ნახაზზე.



**ნახ. 3. განზოგადებული დამოკიდებულება  $\bar{i} = f(Fo, Bi, La)$  ორკომპონენტური სისტემისათვის "სამთო მასივი-სავენტილაციო ჭავლი"**

ახალი კრიტერიუმის მსაზღვრელი რიცხვითი მნიშვნელობის  $10^6 La = 1$  (წირი 1 ნახ. 3-ის მარცხენა დიაგრამაზე) შესაბამისი უგანზომილებო ტემპერატურა ფურიესა და ბიოს კრიტერიუმების სათანადო მნიშვნელობებისათვის ასახავს სუფთა თბოგადაცემის პროცესს.

ახალი კრიტერიუმის სხვა მნიშვნელობებისათვის განსაზღვრული გვირაბის კედლის უგანზომილებო ტემპერატურა ითვალისწინებს დამატებით თბოგადაცემას დიუფურის ეფექტის სახით.

ნომოგრამით სარგებლობის წესი შემდეგია:

მარცხენა დიაგრამაზე აიღება ფურიეს კრიტერიუმის რიცხვითი სიდიდის შესაბამისი წერტილი (ფურიეს კრიტერიუმების რიცხვითი მნიშვნელობები აბსცისაზე განლაგებულია ლოგარითმული წესით), საიდანაც დაეშვება ორდინატი ახალი კრიტერიუმის სიდიდის შესაბამისი წირის გადაკვეთამდე. გადაკვეთის წერტილიდან გაივლება აბსცისა მარჯვენა დიაგრამაზე ბიოს კრიტერიუმის რიცხვითი სიდიდის შესაბამისი წირის გადაკვეთამდე. გადაკვეთის ამ უკანასკნელი წერტილიდან დაეშვება ორდინატი და მარჯვენა დიაგრამის აბსცისაზე აიღება უგანზომილებო ტემპერატურის საძიებელი სიდიდე.

ნომოგრამით სარგებლობისას ფურიეს კრიტერიუმისათვის ლოგარითმული კოორდინატის გამოყენება აუცილებელია.

გვირაბის კედლის უგანზომილებო ტემპერატურა ახალ კრიტერიუმთან პირდაპირ პროპორციული, ხოლო ფურიესა და ბიოს კრიტერიუმებთან უკუპროპორციული დამოკიდებულებით ხასიათდება.

როგორც აღინიშნა, მასაგადატანა კაპილარულ-ფოროვან სხეულებში პირდაპირი მამოძრავებელი ძალის - მასაგადატანის პოტენციალის გრადიენტის გარდა განპირობებულია დამატებითი მამოძრავებელი ძალით - სორეს ეფექტით, რომელიც გამოწვეულია ტემპერატურის გრადიენტით. ეს უკანასკნელი ეფექტი გათვალისწინებული უნდა იქნეს პოსნოვის ან ახალი კრიტერიუმით.

ქანების თერმოგრადიენტული კოეფიციენტის რიცხვითი სიდიდეების მიხედვით განისაზღვრა პოსნოვის კრიტერიუმის მნიშვნელობები, რაც მათემატიკურ მოდელებზე ასახული იქნა სასაზღვრო პირობის მეშვეობით, ხოლო არაიზოთერმული მასაგადაცემა განზოგადდა მასაგაცვლის ფურიეს, ბიოსა და ახალი კრიტერიუმის მიხედვით, რომელიც წარმოდგენილია ნახაზზე 4.

ახალი კრიტერიუმის მსაზღვრელი მნიშვნელობის შესაბამისი უგანზომილებო მასაგადატანის პოტენციალი ამ ნახაზზე ასახავს იზოთერმული მასაგადაცემის შემთხვევას. ახალი კრიტერიუმის სხვა მნიშვნელობებისათვის განსაზღვრული იგივე სიდიდე ითვალისწინებს დამატებით მასაგადატანას სორეს ეფექტის ხარჯზე.

ნომოგრამით სარგებლობა ნახ. 3-ზე გამოსახული ნომოგრამის ანალოგიურად ხდება.

უგანზომილებო ტემპერატურის მსგავსად, უგანზომილებო მასაგადატანის პოტენციალი ახალ კრიტერიუმთან პირდაპირი, ხოლო ფურიესა და ბიოს მასაგაცვლის კრიტერიუმებთან უკუპროპორციული დამოკიდებულებით ხასიათდება.

არასტაციონარული თბოგადაცემის კოეფიციენტი გაუმარბელებელი და მონოლითური გამაგრების მქონე გვირაბებისათვის შესაბამისად განისაზღვრება ფორმულებით

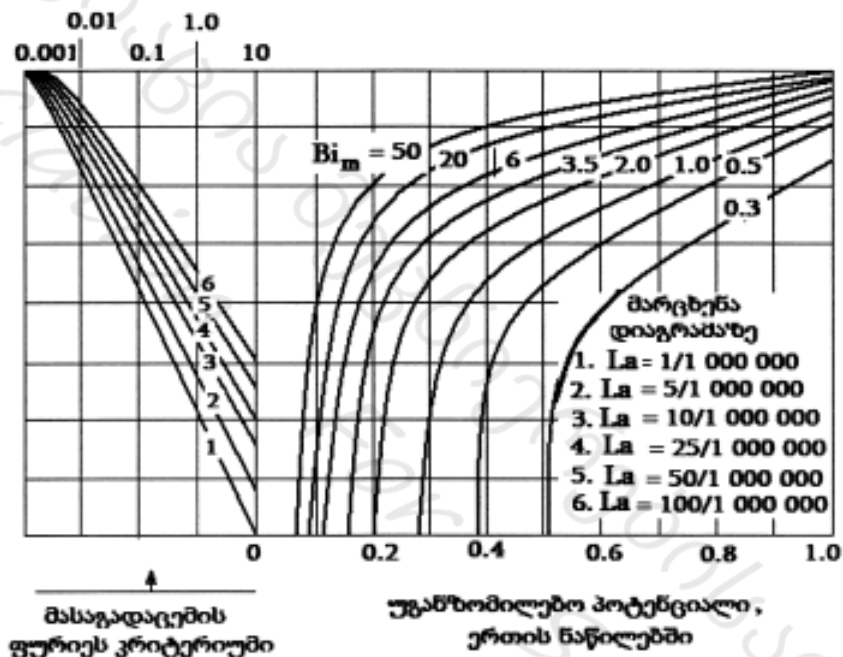
$$K_\tau = \alpha \bar{t}; \quad (29)$$

$$K_\tau = K_1 \bar{t}, \quad (30)$$

სადაც  $K_\tau$  არის არასტაციონარული თბოგადაცემის კოეფიციენტი, ვტ/მ<sup>2</sup>. გრად;  $\bar{t} = t(\tau, R_0)$  - გვირახის ზედაპირის უგანზომილებო ტემპერატურა, ერთის ნაწილებში;  $K_1$  - თბოგადაცემის კოეფიციენტი სამთო მასივიდან სავენტრალაციო ნაკადზე გვირახის გამაგრების გავლენის გათვალისწინებით, ვტ/მ<sup>2</sup>.გრად, რომელიც განისაზღვრება ფორმულით

$$K_1 = (1/\alpha + \delta_1 / \lambda_1)^{-1}. \quad (31)$$

ამ ფორმულაში  $\delta_1$   $\lambda_1$  შესაბამისად არის სამაგრის სისქე, მ და სამაგრი მასალის თბოგამტარობის კოეფიციენტი, ვტ/მ.გრად. თბოგაცემის კოეფიციენტი  $\alpha$  იანგარიშება ცნობილი მეთოდით [8].



ნახ. 4. განზოგადებული დამოკიდებულება  $\bar{\Theta} = \Theta(\tau, R_0)$  ორკომპონენტანი სისტემისათვის "სამთო მასივი - სავენტრალაციო ჭავლი"

არასტაციონარული მასაგადაცემის კოეფიციენტი გაუმაგრებელი და მონოლითური გამაგრების მქონე გვირახებისათვის შესაბამისად განისაზღვრება ფორმულით

$$K_m = \alpha_m \bar{\Theta}; \quad (32)$$

$$K_m = K_2 \bar{\Theta}, \quad (33)$$

სადაც  $K_m$  არის არასტაციონარული მასაგადაცემის კოეფიციენტი, კვ.მოლი/ჯ.მ<sup>2</sup>.წმ;  $\bar{\Theta} = \Theta(\tau, R_0)$  - გვირახის ზედაპირის უგანზომილებო მასაგადაცემის პოტენციალი, ერთის ნაწილებში;  $K_2$  - მასაგადაცემის კოეფიციენტი სამთო მასივიდან სავენტრალაციო ნაკადზე გვირახის გამაგრების გავლენის გათვალისწინებით, კვ.მოლი/ჯ.მ<sup>2</sup>.წმ, რომელიც განისაზღვრება ფორმულით

$$K_2 = (1/\alpha_m + \delta_1 / \lambda_{m1})^{-1},$$



სადაც  $\lambda_{m1}$  არის სამაგრი მასალის მასაგამტარობის კოეფიციენტი, კგ.კმოლი/კჯ.მ.წმ. მასაგაცემის კოეფიციენტი  $\alpha_m$  განისაზღვრება ცნობილი მეთოდით [8].

როგორც წარმოდგენილი ფორმულებიდან ჩანს, არასტაციონარული თბო- და მასაგადაცემის კოეფიციენტების ანგარიშის გზით განსაზღვრის სირთულე დაყვანილია გვირაბის ზედაპირის უგანზომილებო ტემპერატურისა და უგანზომილებო მასაგადატანის პოტენციალის განსაზღვრის სიზუსტეზე.

#### დასკვნები

- თბომასაგადაცემის ძირითადი აღმძვრელი ძალების, ტემპერატურისა და მასაგადატანის პოტენციალის გრადიენტების, ზედდებისას თერმული წინაღობა თბური სასაზღვრო შრის, ხოლო მასაგაცემის ანალოგიური წინაღობა მასის სასაზღვრო შრის ფარგლებში განიცდიან ცვალებადობას და ურთიერთგავლენას, რის შედეგადაც აღმძვრება დამატებითი ნაკადები ძირითადი ნაკადების პარალელურად და მათი ინტენსიურობის გასაზრდელად. ახალი კრიტერიუმით ხდება ძირითად ნაკადებზე დამატებითი ნაკადების აჯამვის საჭიროობის შეფასება და საბოლოო სიდიდეების ადეკვატური განსაზღვრა.
- ახალი კრიტერიუმის რიცხვითი სიდიდე  $10^6 L\alpha=1$  მიანიშნებს იმ ზღვარს, რომლის ზემოთ ერთობლივი თბომასაგადაცემა სამთო მასივიდან უნდა შეფასდეს დიუფურისა და სორეს დამატებითი ეფექტების გათვალისწინებით და სითბოსა და მასის გადაცემის არასტაციონარული კოეფიციენტების გაანგარიშება უნდა მოხდეს აღნიშნულის მხედველობაში მიღებით, ხოლო ქვემოთ ერთობლივი პროცესი განიხილება როგორც მარტივი და ერთმანეთისაგან დამოუკიდებელი თბო- და მასაგადაცემა, რომელთა დროსაც აღნიშნული კოეფიციენტების გაანგარიშება უნდა მოხდეს ტრადიციული მეთოდებით.
- არასტაციონარული თბო- და მასაგადაცემის კოეფიციენტები, რომლებიც გაყოფის ზედაპირის შესაბამისი უგანზომილებო ტემპერატურის ან მასაგადატანის პოტენციალის ფუნქციაა, ახალ კრიტერიუმთან პირდაპირი, ხოლო ფურიესა და ბიოს შესაბამის კრიტერიუმებთან უკუპროპორციული დამოკიდებულებებით ხასიათდება.
- გრაფიკული მეთოდით არასტაციონარული თბო- და მასაგადაცემის კოეფიციენტების განსაზღვრისას, უგანზომილებო ტემპერატურის ან მასაგადატანის უგანზომილებო პოტენციალის რიცხვითი სიდიდეების შერჩევის დროს, საჭიროების შემთხვევაში, კრიტერიუმებით პირდაპირ ხდება დიუფურისა და სორეს ეფექტების გათვალისწინება.

### ლიტერატურა

1. Лыков А.В. Теплообмен. Энергия, Москва, 1978. 480 с.
2. Кремнев О. А., Журавленко В. Я. Тепло- и массообмен в горном массиве и подземных сооружениях. Наукова думка, Киев, 1980. 384 с.
3. Lanchava O., Ilias N. Some issues of thermal calculation of ventilation air for the metro. Journal of Engineering Sciences and Innovation. Volume 2, Issue 2, Bucharest, Romania, 2017. pp. 92-105.
4. Lanchava O. Separation and Evaluation of Simultaneous HeatMass Exchange in Binary Systems. 2005, pp. 400-404, Bull. Georg. Acad. Sci. <http://science.org.ge/old/moambe/Summary-172-3.htm>
5. Кутателадзе СС Анализ подобия в теплофизике. Наука, Новосибирск, 1982. 308 с.
6. Ланчава О.А. О теплообмене в капитальных горных выработках. ФТПРШЛ, N26, Наука, Новосибирск, 1982. с. 87-92.



7. Ланчава О. А. О тепломассообмене в свежвпроиленных горных выработках. ФТПРГШ, N25, Наука, Новосибирск, 1985. с. 99-104.
8. Ониани Ш.И., Ланчава О.А. Единая методика прогнозирования температурных условий в угольных шахтах. Макеевка-Донбасс, 1979. 196 с.

LANCHAVA O., ARUDASHVILI N.,

KHOKERASHVILI Z.

#### NON-STATIONARY TRANSMISSION OF HEAT AND HYGROSCOPIC MASS BETWEEN VENTILATION FLOW OF METRO AND SURROUNDING MINING MASSIF

According to modern technologies of construction and operation of transport tunnels, it is assumed in the present work that drainage of water does not occur inside the membrane in the area of reinforced coating of the tunnel and here takes place a non-stationary process of transfer of hygroscopic mass (moisture) together with a similar process of heat transfer between the ventilation stream and the surrounding mining massif. Thus, we have to deal only with the sorption mass content in the pores of the massif and the water in the explicit form in the tunnels can only be in exceptional cases as local sources and therefore, their influence on the ventilation flow should be considered separately. The paper provides results of mathematical modeling of heat and mass transfer processes as well as graphs and nomograms, which can be used to define non-stationary coefficients of the heat and mass transmission required for thermal physics calculation of underground ventilation. The additional flows initiated by the Soret and Dufour effects usually strengthen the main flows, but in practice one can find a case where it is not necessary to take into account the effect of additional flows. Based on the analysis of processes, the criteria that determine the numerical value of these show the case when accounting for additional flows of Soret and Dufour is mandatory. The marked effects can be ignored when  $10^6 L\alpha=1$ .