

ნორინგ მოლოდინი, რევაზ მოლოდინი

მეცნიერები ხახუნზე და შედეგების რეალიზაციის დონე

ანოტაცია. ნაშრომში მოცემულია ლენტური კონვეიერის ხახუნის ამძრავების ძირითადი მაჩვენებლების: წვეის ფაქტორის, საკონტაქტო ზედაპირების საექსპლუატაციო პარამეტრების, ამძრავის სამსახურის ვადის და ა.შ. პროექტირების, კონსტრუქციული სრულყოფის და წარმოების (მშენებლობის) პრობლემები, რომლითაც დაკავებულია სხვადასხვა ქვეყნის მრავალი საპროექტო, დამამზადებელი და ოპერატორი ორგანიზაციები. ამჟამად არსებულ მონაცემთა ანალიზით, წვეის ფაქტორის (მაქსიმუმ  $e^{\mu}=40$ ) გაზრდის მოთხოვნები და შესრულების შესაძლებლობა ჯერ კიდევ არ ამოწურულა, მით უმეტეს, რომ ვაკუუმში ხახუნის კოეფიციენტი მაღალია და ამასთან რეოლოგიური პირობების მიმართ სტაბილურია. აღნიშნულიდან გამომდინარე, ვიკვლევთ სტანდარტული პარამეტრების მიხედვით დამზადებული ვაკუუმ-ამძრავის გამოყენებით, რეოლოგიური პირობებისაგან დამოუკიდებლად, მაღალი წვეის ფაქტორის ( $e^{\mu}$ ) მიღების შესაძლებლობას.

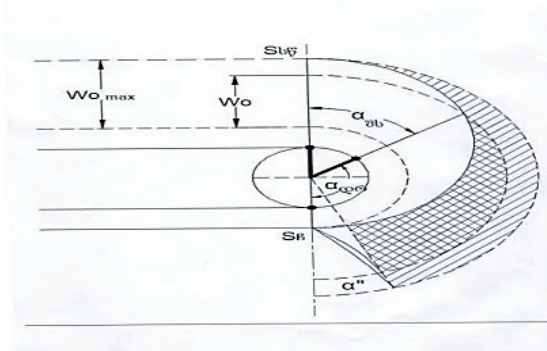
საკვანძო სიტყვები: რეოლოგიური პირობები; წვეის ფაქტორი; ხახუნის ამძრავები; ხახუნის მოლეკულურ-მექანიკური თეორია; რეციპიენტი; კნუდსენის კოეფიციენტი; ზომერფელდის რიცხვი; ვაკუუმ ქვეზონა; დრეკადი სრიალის რკალი; შედარებითი სიმშვიდის რკალი; საკუთარი წვეის ფაქტორი; ადჰეზიური ხახუნის კოეფიციენტი.

რეცენზენტი: სსიპ გრიგოლ წულუკიძის სამთო ინსტიტუტის საბადოთა დამუშავებისა და სამთო გეოტექნიკის ლაბორატორიის უფროსი, აკად. დოქტორი ნ. ბოჭორიშვილი.

ნებისმიერი სამუშაოს სრულფასოვანი შესრულება აისახება ხახუნის პროცესთან დაკავშირებული მოვლენების მიზნობრივ გამოყენებაზე; მაგალითად მექანიკაში - ხახუნის ამძრავებში სადაც დაუმუშავებელია ბუქსაობა, ხახუნის ძალა უნდა იყოს მაქსიმალური, სათანადო მარაგით [1, 2, 3]; ამყობ მექანიზმებში კი მინიმალური. ტრიბოლოგიურ მეცნიერებაში მომუშავე პროფესორი დ. გარკუნოვი აღნიშნავდა, „ხახუნი ბუნების საოცარი მოვლენაა“-ო და აღნიშნულის ასახსნელად მრავალ ჩვენთვისაც ცნობილ მაგალითს იშველიებდა. საერთაშორისო ჟურნალ „ვეარ“-ის რედაქტორ დოქტორი სალომონის აზრით კი ხახუნის შემსწავლელი მეცნიერება - ტრიბონიკა (ტრიბოლოგია) ხელოვნებისა და აზროვნების სახეობაა; მეცნიერებისა და ტექნიკის სხვადასხვა სფეროს სპეციალისტთა მოქნილი კოოპერაციისადმი ინტელექტური მიდგომაა. ეს ოპერაციების ანალიზის გამოყენების ხელოვნებაა, უდიდესი ეკონომიკური მნიშვნელობის ამოცანების გადაწყვეტისათვის; გამოყენებული ტექნიკური მოწყობილობების საიმედოობაზე, ექსპლუატაციისა და ცვეთაზე. ამგვარად მეცნიერებისა და ტექნოლოგიების გაერთიანება, შემდგომი წინსვლისა და

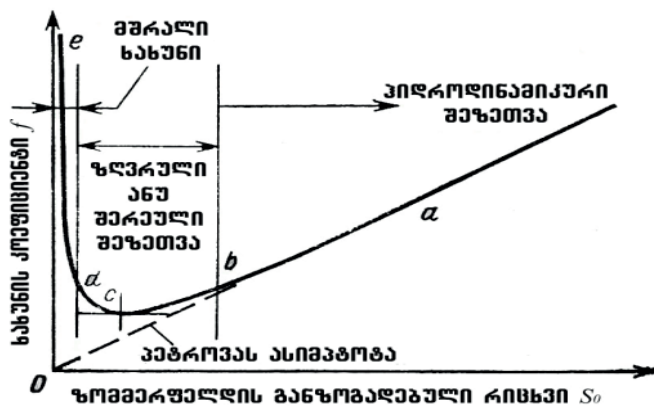
სრულყოფილი მიღწევებისათვის, აუცილებელია.

მურის მიერ წარმოდგენილი ლიტერატურის [4, 5] მონაცემებით, განსაკუთრებულ რეჟიმში ხახუნისას (ხახუნის წყვილის ფურჩის გარეშე ზედაპირებიან ჰვრიტეში) გარეგანი ხახუნი გადადის შინაგანში, ზედაპირები ეჭიდებიან, – დუღდებიან და ერთი მეორის მიმართ გადაადგილებისას მნიშვნელოვნად ზიანდებიან (**ეს ჩვენთვის მიუღებელია**), ზოგჯერ ამ მოვლენას „სუფთა ხახუნს“ (ამჟამად კი კოჰეზიას) უწოდებენ, თუმცა მისი გარეგანი ხახუნად განხილვა არსებითად არ შეიძლება. უახლესმა კვლევებმა უჩვენეს, რომ ვაკუუმში ხახუნი არ წარმოადგენს პრინციპულად ახალ პროცესს; იგი ემორჩილება იგივე ზოგად კანონზომიერებებს, რასაც ატმოსფერულ პირობებში. კერძოდ, ვაკუუმში ხახუნისათვის სრულიად მიზანშეწონილია ხახუნის მოლეკულურ-მექანიკური თეორია (ჩვენთვის მეტად საინტერესოა და ცვეთაშემამცირებელია მოლეკულური თეორია; იხ. ნახ. 1). თუმცა ვაკუუმში ხახუნის ადჰეზიური მდგენელი გაცილებით მაღალია, ვიდრე ჰაერის გარემოში, შესაბამისად, დიდი უნდა იყოს ადჰეზიური ხახუნის კოეფიციენტიც ([4] ნახ. 2-ში). ლენტის დრეკადი სრიალი კი, თუ ეს მაინც მოხდება, მცირედ დაჭიმულ ჩამოქანების უბანშია, მისი თითქმის დაზიანების - ცვეთის გარეშე.



ნახ. 1. წევის ძალების რეალიზაციის ეპიურა

ნაშრომის ავტორთა შეხედულებით, ხახუნის პროცესის პირობების შერჩევით და შექმნით; სიტუაციური მოთხოვნილებების სწორი გათვალისწინებით; ადჰეზიური ხახუნის კოეფიციენტის (იხ.  $f-S_0$  გრაფიკი ნახ. 2 [6, 7, 8]), სწორი მართვით; ტრიბოლოგიისა და მასთან დაქვემდებარებული მეცნიერებების მიღწევების სწორი გამოყენებით; თანამედროვე კონსტრუქციული მასალების მიზანსწრაფული შერჩევით და ხახუნის წყვილის სათანადო კონსტრუქციული



ნახ. 2.  $f-S_0$  დამოკიდებულების გრაფიკი

გადაწყვეტით, უცილობლად აღსრულდება ტრიბოლოგიის ერთ-ერთი ძირითადი ამოცანაც, ხახუნის ძალისა და კოეფიციენტის რეგულირება; ამასთან ერთად, თუ უკვე ზედმეტ კვანძებს მოვიცილებთ და ძვირადღირებულს, აუცილებლობისას ნაკლებადღირებულთ შევცვლით: მაგ. საკონვეიერო ლენტებს, მის საყრდენებს, დგარის მეტალოკარკასს, საწყისი დაჭიმულობის შემქმნელ ძვირ საჯალამბრე მოწყობილობებს და ა.შ.; მაშინ - ვინაიდან წვეის ძალების  $F$  და წვეის ფაქტორის  $e^{\mu}$  საჭირო სიდიდემდე რეგულირება (მხოლოდ ჩვენს შემთხვევაში) ხორციელდება ადჰეზიური ხახუნის  $\mu$  კოეფიციენტისა და ტექნოლოგიური პროცესის (ხახუნის ელასტოპლასტიკური, ზღვრულ და მშრალი რეჟიმების) მართვით, - შეიქმნება მწარმოებლურობაზე, ზიდვის მანძილსა და სხვა მრავალ ფაქტორზე პირდაპირ-პროპორციულად დამოკიდებული მაღალეკონომიკური ბაზა, რაც მნიშვნელოვან მოგებასთანაა დაკავშირებული; მით უმეტეს, რომ დიდ ყურადღებას ვუთმობთ, ხახუნის ამძრავების შექმნიდან დღემდე განვითარების კონსტრუქციული, საავტორო და თეორიული მონაცემებით წარმოდგენილ სიახლეებს, შემდგომი კრიტიკული ანალიზისა და სრულყოფის გზების ძიებით [1 - 8].

**შვეიცარიელმა მათემატიკოსმა ლეონარდ ეილერმა** ხახუნის ამძრავების საანგარიშოდ წარმოადგინა მათემატიკური ანალიზი: [1] სადაც ამძრავის წვეის ძალა  $F$  დამოკიდებულია წვეის ფაქტორზე  $e^{\mu}$  და ელასტომერის საწყის  $S_0$  დაჭიმულობაზე. ვითვალისწინებთ რა წვეის ძალის გაზრდის ნაკლებად ეფექტურ ან უშედეგო მცდელობების ნუსხას; განსახილველად და დასკვნებისათვის გამოვიყენეთ ვრცელი სახასიათო მასალა, ხოლო შემდგომ, წარმოვადგინეთ ჩვენს მიერი სიახლეები და წვეის ძალის გაზრდის ოპტიმალური გზები:

1) **ხახუნის ამძრავის** საკონტაქტო ჭვრიტეში ვაკუუმის შექმნით საჭირო და მდგრადი ხახუნის, - ჩაჭიდების კოეფიციენტის მიღება და შენარჩუნება;

2) **კნუდსენის კოეფიციენტის** მინიმუმამდე დაყვანა - ჭვრიტიდან ვაკუუმ რეციპიენტებით გაწოვილი სითხის მოლეკულების ერთი მეორეზე და რეციპიენტის (ჩვენს კონსტრუქციაში მხოლოდ ნახვრეტის) კედლებზე დაჯახებათა რიცხვების თანაფარდობაა, რომელიც მოქმედებს ჭვრიტის გაიშვიათების ხარისხზე;

3) **ზომერფელდის  $S_0$  რიცხვის** რეგულირება, (ხორციელდება მხოლოდ ჩვენი კონსტრუქციის ხახუნის ამძრავის საკონტაქტო ჭვრიტეში ([3] იხ. ს.მ. 676506). შეზეთვის კლასიკური თეორია კი მშრალ ხახუნამდე ორ რეჟიმს ითვალისწინებს: ჰიდროდინამიკურს და ზღვრულს (ჩვენს შემთხვევაში, სამივე რეჟიმს საჭიროების შესაბამისად ვარეგულირებთ). შეზეთვის თეორიაში ძირითად საანგარიშო პარამეტრს კი წარმოადგენს ზომერფელდის განზოგადებული რიცხვი  $S_0$ , რომელიც იანგარიშება ბლანტი ხახუნის ძალის შეფარდებით თხელ შემზეთ აბკზე მოქმედ წნევის ძალასთან [1, 2, 3].

$$S_0 = \frac{\mu(U \approx 0)}{pL}, \text{ ან } \frac{U(\mu \approx 0)}{pL} \approx 0$$

სადაც  $\mu$  - (მიწოდებული **სითხის**) სიბლანტეა;  $U$  - (მიწოდებული **სითხის წყალის**) ჭვრიტედან ავმ დგუშებით გაწოვის სიჩქარეა [2, 3].

საკონტაქტო ზედაპირებზე ხახუნის პროცესის სიღრმისეული შესწავლის გარეშე შეუძლებელია უმარტივესი მექანიკური მოწყობილობების მუშაობის ტექნოლოგიური პროცესის მიახლოებითი აღწერაც. კი. ფხვიერ-ნატეხოვანი ტვირთების პრიორიტეტულ სატრანსპორტო საშუალების, ლენტური კონვეიერების, ეკონომიკური მაჩვენებლები კი

მნიშვნელოვან წილად დამოკიდებულია (სათავო, შუალედურ და კუდის) ამძრავების წევით თვისებებზე, მათი ამუშავების სწორ რიგითობაზე, ავტომატიზაციის ხარისხზე და ა.შ.

**ლეონარდ ეილერის** მიხედვით ამძრავების წევის ძალები დამოკიდებულია ლენტის საწყის ( $S_p$ ) დაჭიმულობასა და დოლური ამძრავებისას წევის ( $e^{\mu\alpha}_{\text{მაკს}}=40$ ) ფაქტორზე, ხოლო შუალედური ამძრავისას საკონტაქტო ზედაპირის ფართობთან ჩაჭიდების  $\mu$  კოეფიციენტზე. ჩვენი და მრავალი მეცნიერ-მკვლევართა მიხედვით ჩაჭიდების ადჰეზიური კოეფიციენტი ხახუნის ზედაპირებით შექმნილ ჭვრიტეში საკომპოზიციო მასალებისა და საკონტაქტო პირობების (მშრალი, ზღვრული, ელასტოპიდროდინამიკური, ვაკუუმში) გათვალისწინებით **იგვლება  $\mu = 0,1 \leq 1,5$**  [1, 4, 5]. ვითვალისწინებთ რა ვაკუუმური ამძრავების ჩვენიული კვლევების შედეგებს საორიენტაციო ჩაჭიდების  $\mu$  კოეფიციენტს ვიღებთ ერთი - ერთნახევრის ტოლს და ლენტური კონვეიერის ამძრავების უპირატესი საანგარიშო სქემებისათვის ცხრილი 1-ის სახით ვადგენთ ვაკუუმური ამძრავებისათვის წევის ( $e^{\mu\alpha}$ ) ფაქტორის თეორიულ მნიშვნელობებს, (რომელთა მნიშვნელობების ლაბორატორიული შემოწმებისას, ერთდოლიანი ვაკუუმ-ამძრავებისათვის, შემოხვევის კუთხით  $180^\circ-270^\circ$  დასაშვებად თანმთხვევადა; ხოლო  $360^\circ-530^\circ$ -თვის, ლაბორატორიული სტენდების უქონლობისა და უსახსრობის გამო ვერ მოწმდება); აღსანიშნავია ის ფაქტიც, რომ ვაკუუმური ამძრავები ხასიათდება **საკუთარი წევის ფაქტორით** (ჩვენი ტერმინია), ანუ დატვირთული შტოს საყრდენ გორგოლაჭებს შორის ლენტის მინიმალური ჩალუნვის ისრის შემნარჩუნებელი დაჭიმულობისას განვითარებული წევის ძალა იანგარიშება (მისი ოპტიმალური მნიშვნელობა ჰორიზონტალური და მცირედ დახრილი დანადგარებისათვის იანგარიშება არა უმეტეს  $S_p=pRB$ ) ფორმულით

$$\frac{S_{\text{სწ}}}{pRB} = \left( e^{\mu\alpha} - \frac{e^{\mu\alpha}}{e^{\mu\delta}} \right) \sum_{k=1}^{n_{\text{ა}}} e^{-\mu(\beta+\delta)(k-1)}$$

სადაც  $k$  არის ვაკუუმური ქვეზონის ნომერი;  $p$  - ვაკუუმის მნიშვნელობა დკნ|სმ<sup>2</sup>;  $B$  - საკონვეიერო ლენტის სიგანე, მ;  $R$  - ვაკუუმ დოლის რადიუსი, მ;  $\alpha$  - დოლზე ლენტის შემოხვევის კუთხე გრ./რად.;  $b+d$  - ვაკუუმ ქვეზონის ბიჯი. საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის სამთო ტექნოლოგიების დეპარტამენტის, სატრანსპორტო მანქანის ამძრავ კვანძების, ვაკუუმში ხახუნის კვლევის ლაბორატორიაში შეიქმნა, დამზადდა, დამონტაჟდა და გამოიცადა სხვა და სხვა კონსტრუქციის ვაკუუმური ამძრავები, სტატიკაში და დინამიკაში კვლევის სპეციალურ სტენდებზე. შედეგები გამოქვეყნებულია და ავტორთა მიერ წარმოდგენილია ინტერნეტ სივრცეში და საქართველოს ინსტიტუტების მიერ მოწყობილ კონფერენციებზე. პარალელურად მიმდინარეობს კონსტრუქციული და საექსპლუატაციო პარამეტრების სრულყოფა, ამძრავის თითოეული შემადგენელი ელემენტებისა და კვანძებისათვის საექსპლუატაციო ტექნოლოგიური პროცესის გათვალისწინებით და მათთვის შესაბამისი საკომპოზიციო მასალების შერჩევით. უცილობლად აქტუალურია დიდ, რთულპროფილიან ტრასაზე ტვირთების ტრანსპორტირება ერთდგარიან საკონვეიერო დანადგარზე. ანუ ტვირთნაკადის გადატვირთვის გარეშე ტრანსპორტირება, - დატვირთვიდან გაცლის პუნქტამდე; რაც უზრუნველყოფს კონვეიერის დგარსქვეშა

ნაყარის წარმოქმნისა და მისი გაწმენდის საჭიროების ლიკვიდაციას. ყველა ზემოთქმულის სრულყოფილი განხორციელება საჭიროებს: მაღალი საიმედოობის მქონესრულყოფილი კონსტრუქციის ვაკუუმურ, -სათაოდაშუალედურამძრავებს; მათი ამუშავების სწორ რიგითობას, რაც უნდა განხორციელდეს ავტომატიზაციის მაღალი ხარისხისა და საიმედოობის უზრუნველყოფით; ახალი მასალებითა და ტექნოლოგიით შექმნილ - მცირე ფარდობითი წაგრძელებისა და ნიშანცვლად დატვირთვებზე დიდი საიმედოობის მქონე საკონვეიერო ლენტებს. მათი საშუალებით შესაძლებელი იქნება მცირე რადიუსიან მრუდწირებში შრომისუნარიანი საკონვეიერო დგარის ჩასმა; შესაბამისი საყრდენი მოწყობილობები ლენტის ცარიელ და დატვირთულ შტოებზე; ამძრავის რგოლურ და წრფივ საკონტაქტო ჭვრიტეებში ვაკუუმის შექმნითა და მისი რეგულირებით საკონტაქტო ზედაპირების ადჰეზიის ისეთი რეგულირება, რომელიც უზრუნველყოფს პეტროვ-ჟუკოვსკის ამოცანის საპირისპირო სურათს, ანუ მოისპობა ან მინიმუმამდე დაიყვანება დრეკადი სრიალი.

ცხრილი 1

ლენტური კონვეიერების საანგარიშო სქემები					
0	1	2	3	4	5
$\alpha^\circ$ რად	180°/3,14	270°/4,71	420°/7,326	480°/8,373	530°/9,245
$\mu$	$\mu\alpha$				
0,2	0,628	0,942	1,4652	1,1,6746	1,849
0,3	0,942	1,413	2,1978	2,5119	2,7735
0,4	1,256	1,884	2,9304	3,3492	3,698
0,5	1,57	2,355	3,663	4,1865	4,225
0,6	1,884	2,826	4,3956	5,0238	5,547
0,7	2,198	3,297	5,1282	5,8611	6,4715
0,8	2,512	3,768	5,8608	6,6984	7,396
0,9	2,826	4,239	6,3954	7,5357	8,3205
1,0	3,14	4,17	7,236	8,373	9,245
$\mu$	წევის ფაქტორი $e^{\mu\alpha}$				
0,2	1,87	2,558	4,309	5,309	6,317
0,3	2,558	4,09	8,945	12,234	15,88
0,4	3,498	6,542	18,568	28,19	39,91
0,5	4,784	10,463	38,549	64,957	100,32
0,6	6,542	16,733	80,0,13	149,67	252,16
0,7	8,947	26,76	166,094	344,88	633,81
0,8	12,235	42,798	344,78	794,7	1593,09
0,9	16,733	68,447	587,505	1831,16	4004,25
1,0	22,88	109,47	1485,7	4219,4	10064,7

ვაკუუმ-ამძრავის გამოყენების ახალი ტრიბოლოგიური ასპექტები საშუალებას იძლევა შევქმნათ მინიმალური საწყისი დაჭიმულობის და იაფი ტვირთმზიდი ლენტებით აღჭურვილი კონვეიერები, რომლის დგარის მეტალშემცველობა იდენტური მწარმოებლობის სერიული წარმოების კონვეიერებთან შედარებით გაცილებით ნაკლები იქნება. აღნიშნულიდან გამომდინარე მცირე იქნება ტვირთის ტრანსპორტირების (ტკმ-ის) ღირებულება, რაც მოგვცემს მწშვნელოვან ეკონომიურ ეფექტს.

## დასკვნები

1. ავტონომიურ ვაკუუმურ მექანიზმებიანი (ავმ) ვაკუუმ-ამძრავის ტექნიკური მაჩვენებლების შერჩევა-გაანგარიშება და მუშა პროექტის შედგენა ნებისმიერი საექსპლოატაციო ტექნიკური მაჩვენებლებისა და რეოლოგიური პირობებისათვის, შესრულდება შემდგომი კორექციის საჭიროების გარეშე; ვინაიდან ამძრავის მუშაობის რეჟიმი და რეოლოგიური პირობები, დაუგეგმავად არ შეიცვლება.

2. თანამედროვე (მცირე სიმძლავრისა და გრძელდგარიანი მძლავრიც) ლენტური კონვეიერების ამძრავები მუშაობენ ლეონარდ ეილერის მონაცემების მიხედვით, მნიშვნელოვნად დიდი საწყისი დაჭიმულობის, ამძრავზე ელასტომერის გაზრდილი შემოხვევის ჯამური კუთხისა და შესაბამისად, ელასტომერზე - საკონვეიერო ლენტზე დიდი ნიშანცვლადი დატვირთვის ხარჯზე; და არა ადჰეზიური ხახუნის კოეფიციენტის (იხ. ნახ. 1 და 2) და მისი ტექნოლოგიური პროცესის რეჟიმების (ელასტოჰიდროდინამიკურის, ზღვრულის და მშრალი ხახუნის) მონაცვლეობითა და საჭირო სიდიდემდის რეგულირების ხარჯზე.

## ლიტერატურა

1. Молодини Н.Ш. Разработка вакуум-барабана с автономными вакуумными механизмами, для приводов рудничных ленточных конвейеров. Дис. на соиск.уч. степ. канд. тех. наук. Тбилиси, 1980. 177 с.
2. Молодини Н.Ш. (54) Приводной барабан ленточного конвейера. Авт. Свид. СССР №543574 Бюл. изобретения № 3. 25.01.77.
3. Мухелишвили В.Л., Кутателадзе А.А., Молодини Н.Ш. Привод ленточного конвейера. Авт. Свид. СССР №676 506. Бюл. изобретения №28, 1979.
4. Мур Д. Трение и смазка эластомеров. США, 1972, пер. с англ. канд. хим. наук. Г.И. Бродского, Химия, Москва, 1977. с. 264
5. Мур. Д. Основы и применения трибоники. Пер. с англ. канд. физ. наук. С. А. Харламова. “МИР”, Москва, 1978. 488 с.
6. ვ.მუსხელიშვილი, რ. მოლოდინი, ნ. მოლოდინი. ვაკუუმ-ამძრავების საკონტაქტო ზედაპირების კონსტრუქციები. სამთო ჟურნალი № 1(12), თბილისი, 2004. გვ. 21-23.
7. ნ. მოლოდინი, რ. მოლოდინი. ჰიდროდინამიკურ რეჟიმში მომუშავე ვაკუუმ-დოლის ლენტთან საკონტაქტო ჭვრიტებში სითხის შრის სისქის განსაზღვრისათვის. სამთო ჟურნალი, № 2(15), თბილისი, 2005. გვ. 60-62.
8. ნ. მოლოდინი, რ. მოლოდინი, ვაკუუმ-ამძრავის საკონტაქტო ჭვრიტედან გაუხშობების მექანიზმამდე სითხის უწყვეტ ნაკადად გადაღინების კვლევა. სამთო ჟურნალი № 1-2 (18-19), თბილისი, 2007. გვ. 31-36.

**SCIENTISTS ABOUT FRICTION AND THE LEVEL OF IMPLEMENTATION OF THE RESULTS**

**ANNOTATION.** The article presents the main indicators of friction drives of belt conveyors: traction coefficient, operating parameters of contact surfaces, drive service life, etc. Troubles of design, improvement of manufacturing and production, which are objective with by many design, production and operating companies in many countries. According to the currently available data analysis, the need to increase the thraction factor (maximum = 40) and performance capabilities have not yet been exhausted, especially since the friction coefficient in vacuum is high and at the same time stable to rheological conditions; Based on this, the possibility of obtaining a high thraction factor ( $e^{i\dot{a}}$ ) using a vacuum drive independent of rheological conditions is being investigated.

**KEYWORDS:** rheological conditions; traction coefficient; friction transmissions; molecular mechanical theory of friction; recipient; Knudsen coefficient; Zommerfeld number; vacuum subzone; elastic sliding arc; relative rest arc; own traction factor; adhesive friction coefficient.