

მაია ჯიხვაძე

არასტაციონარულ და დრეკადკედლებიან არხებში სითხის  
მოძრაობის თავისებურებათა გამოკვლევა

წარდგენილია დოქტორის აკადემიური ხარისხის  
მოსაპოვებლად

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი  
თბილისი, 0175, საქართველო  
აპრილი, 2012

© საავტორო უფლება მაია ჯიხვაძე

# საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

## ენერგეტიკის და ტელეკომუნიკაციის ფაკულტეტი

ჩვენ, ქვემოთ ხელისმომწერი ვადასტურებთ, რომ გავეცანით მათა ჯიხვამის მიერ შესრულებულ სადისერტაციო ნაშრომს დასახელებით: ‘არასტაციონალურ და დრეკად კედლებიან არხებში სითხის მოძრაობის თავისებურებათა გამოკვლევა“ და ვაძლევთ რეკომენდაციას საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ენერგეტიკის და ტელეკომუნიკაციის ფაკულტეტის სადისერტაციო საბჭოში მის განხილვას დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად.

თარიღი

ხელმძღვანელი: \_\_\_\_\_ ე. მაჭავარიანი  
რეცენზენტი: \_\_\_\_\_  
რეცენზენტი: \_\_\_\_\_

# საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

2012 წელი

ავტორი:	მაია ჯიხვაძე
დასახელება:	არასტაციონალურ და დრეკად კედლებიან არხებში სითხის მოძრაობის თავისებურებათა გამოკვლევა
ფაკულტეტი :	ენერგეტიკა და ტელეკომუნიკაცია
აკადემიური ხარისხი:	დოქტორი
სხდომა ჩატარდა:	თარიღი

ინდივიდუალური პიროვნებების ან ინსტიტუტების მიერ ზემომოყვანილი დასახელების დისერტაციის გაცნობის მიზნით მოთხოვნის შემთხვევაში მისი არაკომერციული მიზნებით კოპირებისა და გავრცელების უფლება მინიჭებული აქვს საქართველოს ტექნიკურ უნივერსიტეტს.

---

ავტორის ხელმოწერა

ავტორი ინარჩუნებს დანარჩენ საგამომცემლო უფლებებს და არც მთლიანი ნაშრომის და არც მისი ცალკეული კომპონენტების გადაბეჭდვა ან სხვა რაიმე მეთოდით რეპროდუქცია დაუშვებელია ავტორის წერილობითი ნებართვის გარეშე.

ავტორი ირწმუნება, რომ ნაშრომში გამოყენებული საავტორო უფლებებით დაცული მასალებზე მიღებულია შესაბამისი ნებართვა (გარდა იმ მცირე ზომის ციტატებისა, რომლებიც მოითხოვენ მხოლოდ სპეციფიურ მიმართებას ლიტერატურის ციტირებაში, როგორც ეს მიღებულია სამეცნიერო ნაშრომების შესრულებისას) და ყველა მათგანზე იღებს პასუხისმგებლობას.

*ვუძღვნი ჩემი მეუღლის, თემიმურაზ ენუქიძის ნათელ ხსოვნას.*

## მადლიერება

ავტორი დიდ მადლობას უხდის დისერტაციის სამეცნიერო ხელმძღვანელს, ბატონ ევტიხ მაჭავარიანს დისერტაციის დამუშავების პროცესში გაწეული კონსულტაციებისათვის და გამოხატავს მადლიერების გრძნობას საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ენერგეტიკისა და ტელეკომუნიკაციის ფაკულტეტის თბო და ჰიდროენერგეტიკის დეპარტამენტის თანამშრომლების და განსაკუთრებით ფაკულტეტის დეკანის, ბატონ გია არაბიძის მიმართ, დოქტურანტურაში სწავლის პერიოდში გაწეული გულისხმიერებისა და თანადგომის გამო.

## რეზიუმე

ნაშრომში დასაბუთებულია არასტაციონარულ, ელასტიკურ და დრეკადკედლებიან მილებში სითხის მოძრაობის რეჟიმების კვლევის აქტუალობა, როგორც სუფთა გამოყენებითი, ასევე სამეცნიერო თვალსაზრისით. ჩატარებულია პლასტიკურ და ელასტიკურ მილებში სითხის მოძრაობის თავისებურებათა ანალიზი და გადმოცემულია ხსენებული ანალიზის შედეგები.

ნაჩვენებია, რომ არასტაციონარულ და დრეკადკედლებიან მილებში და არხებში რეალური სითხის მოძრაობას ახასიათებს მთელი რიგი თავისებურებები, რაც განაპირობებს მოვლენის ჰიდროდინამიკურ სირთულეს და მისი შემდგომი კვლევის სამეცნიერო აქტუალობას.

ჩატარებული ლიტერატურული მიმოხილვის და მისი შედეგების ანალიზის საფუძველზე დასაბუთებულია, რომ არასტაციონალური და დრეკადკედლებიანი არხების თბოტექნოლოგიურ დანადგარებში გამოყენებით შესაძლებელია, ერთი მხრივ ასეთი დანადგარების კონსტრუქციული გამარტივება და მასალატევადობის მნიშვნელოვანი შემცირება, ხოლო მეორეს მხრივ, თბოდამამუშავებელი დანადგარებისა და თბოგადამცემი აპარატების ენერგოეფექტურობის გაზრდა. ამასთან, არასტაციონალურ და დრეკად კედლებიან მილებისათვის ჰუკის კანონისა და რეალური სითხის მოძრაობის ეგრეთწოდებული ფლატერული რეჟიმის განხილვის საფუძველზე დასაბუთებულია, რომ თბოგადამცემ დანადგარებში დრეკადი და ელასტიკური პოლიმერული მასალებისაგან დამზადებული მილების გამოყენებით შეიძლება მნიშვნელოვანი და მრავალმხრივი დადებითი ეფექტების მიღწევა. ცნობილია ელასტიკურ მილებში განვითარებული დინების ფლატერულ რეჟიმი ხასიათდება მილის კედლის გარკვეული სისშირით თვითრხევით, რაც განაპირობებს მოვლენის კვლევის აქტუალობას თბოტექნოლოგიური პროცესების ეფექტურობის შესაძლო გაზრდის თვალსაზრისით.

ნაჩვენებია, რომ დრეკადკედლებიან არხებში ჰიდროდინამიკური პროცესების შესწავლის ანალიზური მეთოდები შეისწავლიან მხოლოდ იდეალური სითხის დინების კანონზომიერებებს და პრაქტიკული

გაანგარიშებებისათვის საჭირო სიზუსტით ვერ ასახავენ რეალური სითხეების დინების კანონზომიერებებს. მოვლენების შესასწავლად ჯერ კიდევ დიდი უპირატესობა კვლევის ექსპერიმენტულ მეთოდებს ენიჭება.

ნაშრომში ძირითადად ექსპერიმენტული ხასიათისაა. წარმოდგენილია სამი სხვადასხვა ექსპერიმენტული სტენდი და დამუშავებულია მათი გამოყენებით კვლევისა და მიღებულ მონაცემთა დამუშავების შესაბამისი მეთოდიკა. ექსპერიმენტული სტენდები დამუშავებულია იმ თაღსაზრისით, რომ შეიძლებოდეს მათი გამოყენება ტექნიკური უმაღლესი სასწავლებლების თბოენერგეტიკული მიმართულებების სასწავლო ლაბორატორიებში. წარმოდგენილია ლითონისა და პლასტმასის მიღების ჰიდრაულიკური წინაღობის ხარისხობრივი ურთიერთშედარებისათვის შესრულებული ექსპერიმენტული კვლევის მონაცემები. ამ მონაცემების ანალიზის საფუძველზე გამოთქმულია რეკომენდაციები შემდგომი კვლევის ჩასატარებლად.

ექსპერიმენტულად გაზომილია ცალი მხრიდან არასტაციონალური და დრეკადი კედლის მქონე ბრტყელ არხში ჰაერის დინების მიმართულებით ჩამოყალიბებული სტატიკური წნევის განაწილება და არხის სისქის მნიშვნელობები. ნახვენებია, რომ არხის დრეკადი კედელი დინების მიმართულებით იცვლის სიმრუდის რადიუსს და ამით აბალანსებს მის შიგა და გარე ზედაპირებზე მოსულ დინამიკურ ზემოქმედებას. გამოკვლეულია აეროდინამიკური საყრდენის გეომეტრიული ზომები და დინამიკური მახასიათებლები, რის საფუძველზეც დადგენილია აეროდინამიკური საყრდენის ოპტიმალური ზომები და სხვა მახასიათებლები. აღნიშნული ექსპერიმენტული მონაცემების ანალიზზე დაყრდნობით მიღებულია აეროდინამიკურ ბალიშში წნევის გასაანგარიშებელი გამოსახულება და დამუშავებულია პოლიმერული და სხვა რულონური მასალების მაღალეფექტურ თბოდამამუშავებელ დანადგარებში გამოყენების პერსპექტივის მქონე აეროდინამიკური საყრდენის ინჟინრული გაანგარიშების მეთოდიკა.

ნაშრომი შედგება შესავლის, ხუთი თავისა და დასკვნებისაგან. ციტირებული ლიტერატურის სია შეიცავს ძირითადად უცხოური წყაროების 35 დასახელებას. ნაშრომის ბოლოს მოთავსებულ დანართში მოყვანილია

თექვსმეტი სხვადასხვა სერიის ექსპერიმენტული მონაცემები, რომლებიც დამუშავებულია Microsoft Office Excel 2007 პროგრამით და წარმოდგენილია ცხრილებისა და დიაგრამების სახით.

ნაშრომის შედეგები აპრობირებულია ორ საერთაშორისო კონფერენციაზე. ნაშრომის სხვადასხვა ნაწილი გამოქვეყნებულია ოთხ სამეცნიერო სტატიაში, მათ შორის ერთი-თანაავტორების გარეშე.

## **ABSTRACT**

Actuality of research of fluid motion modes in tubes with unsteady, elastic and flexible walls has been well-founded in the thesis from the applied as well as scientific standpoint. Analysis of peculiarities of fluid motion in plastic and elastic tubes has been carried out and results of the above analysis have been presented.

It has been shown that real fluid motion in pipes and channels with unsteady and flexible walls is characterized by a number of peculiarities that stipulates hydrodynamic difficulty of the phenomenon and scientific actuality of further research of it.

Basing upon the carried out literary review and analysis of its results, it has been well-founded that constructive simplification of heat engineering plants as well as significant reduction of material capacity on the one hand and significant growth of power efficiency of heat processing plants and heat-exchange apparatuses on the other hand, is possible by using of unsteady and flexible channels in heat engineering plants. Herewith, basing upon the review of Hook's Law and so called flutter mode of real fluid motion for unsteady and flexible tubes, it has been well-founded that important and multilateral positive effects may be achieved by using of tubes made with plastic and flexible polymeric materials in heat-exchange plants. It is known that flutter mode of flow in flexible tubes is characterized by self-oscillations of the tube wall with distinct frequency that stipulates actuality of research of the phenomenon in the viewpoint of possible growth of efficiency of heat engineering processes.

It has been shown that the analytic methods of research of hydrodynamic processes in the channels with flexible walls, study regularities of ideal fluid flow only and don't show regularities of real fluid flows with the exactness required for practical calculations. Experimental methods of research are still prevailed in order to study the phenomenon;



The thesis bears experimental character on the whole. There are three different experimental stands and appropriate methodology of research and processing of received data has been processed by using of them. Experimental stands have been processed in order to be possible to use them in training laboratories of heat-power engineering fields of technical higher institutes. Experimental research data made for qualitative inter-comparison of hydraulic resistance of metal and plastic tubes has been presented. Recommendations for further research have been expressed basing upon the analysis of the above data.

Distribution of static pressure created to the direction of air flow in the flat channel with unsteady and flexible wall from the one side and values of the width of the channel have been measured experimentally. It has been shown that the flexible wall of the channel changes the curve radius to the direction of flow and balances dynamic impact to its internal and external surfaces. Geometric sizes and dynamic characteristics of aerodynamic bearing have been examined, on the basis of which optimal sizes and other characteristics of aerodynamic bearing have been specified., Methodology of engineering calculation of aerodynamic bearing having perspective of using in efficient heat processing facilities of polymeric and other roll materials, have been processed basing upon the analysis of the above experimental data.

The thesis consists of introduction, five chapters and conclusions. The list of quoted literature includes 35 titles of mainly foreign sources. Experimental data of sixteen different series have been provided in the supplement at the end of the thesis, which have been processed via Microsoft Office Excel 2007 program and presented in tables and diagrams.

The results of the thesis have been approved at two international conferences. The different parts of the thesis have been published in four scientific articles, including one - without co-authors.

## შინაარსი

	ბმ.
შესავალი . . . . .	15
თავი I. პრობლემის არსი და სამუშაოს მიზანი	
1.1. საკითხის ისტორია . . . . .	18
1.2. საკითხის დასმა . . . . .	20
1.2.1. არასტაციონარულ და დრეკადკედლებიან მიღების თბოგადამცემ დანადგარებში შესაძლო გამოყენების შესახებ . . . . .	20
1.2.2. რულონური მასალების ტექნოლოგიაში აეროდინამიკური საყრდენების გამოყენების შესახებ. . . . .	23
1.3. სამუშაოს მიზანი . . . . .	26
თავი II. ელასტიკურ და დრეკად კედლებიან მიღებში სითხის მოძრაობის თეორიული საკითხები	
2.1. არხებში სითხის მოძრაობის კვლევის ზოგადი მეთოდოლოგია. . . . .	28
2.2. ელასტიკურ და დრეკადკედლებიან არხებში სითხის მოძრაობის კანონზომიერებათა თეორიული შესწავლის შესახებ . . . . .	31
2.3. სითხის დინების თავისებურებები არასტაციონარულ და დრეკადკედლებიან მიღებში . . . . .	36
2.4. ჰუკის კანონი ელასტიკური და დრეკადი მილისათვის . . . . .	38
2.5. დრეკადკედლიან მილში სითხის დინების ფლატერული რეჟიმი. . . . .	42
2.6. არასტაციონალურ და დრეკადკედლებიან მიღებში სითხის მოძრაობის თავისებურებათა ანალიზის შედეგები . . . . .	44
თავი III. ექსპერიმენტული დანადგარები და ცდის შედეგები	
3.1. პლასტიკური და დრეკადი მიღებისა და ლითონის მიღების ჰიდრაულიკური წინაღობის შესადარებელი ექსპერიმენტული დანადგარი . . . . .	48
3.2. პლასტიკური და დრეკადი მიღებისა და ლითონის მიღების ჰიდრაულიკური წინაღობის შესადარებელი ექსპერიმენტების ჩატარების მეთოდოლოგია . . . . .	52
3.3. პლასტიკური და დრეკადი მიღებისა და ლითონის მიღების ჰიდრაულიკური წინაღობის შესადარებელი ექსპერიმენტების შედეგების დამუშავების მეთოდოლოგია . . . . .	55
3.4. პლასტიკური და დრეკადი მიღებითა და ლითონის მიღებით განხორციელებული თბოგადაცემის პროცესების ურთიერთ შესადარებელი ექსპერიმენტული დანადგარი. . . . .	57
3.5. პლასტიკური და დრეკადი მიღებითა და ლითონის მიღებით განხორციელებული თბოგადაცემის პროცესების ურთიერთ შესადარებელი ექსპერიმენტის ჩატარების მეთოდოლოგია . . . . .	60

3.6.	პლასტიკური და დრეკადი მილებითა და ლითონის მილებით განხორციელებული თბოგადაცემის პროცესების ურთიერთ შესადარებელი ექსპერიმენტების შედეგების დამუშავების მეთოდика . . . . .	62
	თავი IV. პლასტიკური, დრეკადი მილებისა და ლითონის მილების ჰიდრაულიკური წინააღმდეგობის შესადარებელი ექსპერიმენტების შედეგები	
4.1.	გამოკვლევული მილები და ჩატარებული გაზომვების შედეგები. .	65
4.2.	ცდომილებათა შეფასება . . . . .	67
4.3.	გაზომვების შედეგების დამუშავება და ანალიზი . . . . .	70
	თავი V. დრეკადი, პლასტიკური და ელასტიკური რულონური მასალის აეროდინამიკური საყრდენის ექსპერიმენტული გამოკვლევა	
5.1.	დრეკად პოლიმერულ აფსკსა და სტაციონარულ ცილინდრულ კედელს შორის მოთავსებული აეროდინამიკური საყრდენის მუშაობის პირობები. . . . .	82
5.2.	ექსპერიმენტული სტენდის აღწერა და ცდების ჩატარების მეთოდика . . . . .	87
5.3.	აეროდინამიკური საყრდენის ექსპერიმენტული გამოკვლევის შედეგები. . . . .	90
5.4.	აეროდინამიკური საყრდენის ინჟინრული გაანგარიშების მეთოდика. . . . .	93
5.4.1.	პერფორირებული მილის გარე დიამეტრის შერჩევა და საჰაერო ბალიში განვითარებული წნევის გამოთვლა . . . . .	94
5.4.2.	ერთ აეროდინამიკურ საყრდენში გამავალი ჰაერის ხარჯის გამოთვლა . . . . .	98
5.4.3.	პერფორირებულ მილში საჭირო წნევის გამოთვლა და პერფორაციის დიამეტრისა და ბიჯის შერჩევა . . . . .	99
5.4.4.	თბური დამუშავების დანადგარში მოთავსებული დასამუშავებელი მასალის სიგრძის განსაზღვრა და პერფორირებული მილების რაოდენობის დადგენა . . . . .	103
5.4.5.	ჰაერშემბერის ან კომპრესორის შერჩევა და გამახურებლის სიმძლავრის დადგენა . . . . .	104
	დასკვნა . . . . .	106
	გამოყენებული ლიტერატურა . . . . .	109
	დანართი I. . . . .	112
	დანართი II . . . . .	113
	დანართი III . . . . .	117

## ცხრილების ნუსხა

- ცხრილი 3.1.** დაკვირვებათა ცხრილი №1 სერიის ცდებისათვის.
- ცხრილი 3.2.** წყლის მოცულობითი ხარჯი სხვადასხვა დიამეტრის ლითონის მილებისათვის (ატმოსფერული წნევის პირობებში).
- ცხრილი 3.3.** წყლის მოცულობითი ხარჯი სხვადასხვა დიამეტრის პლასტიკური მილებისათვის (ჭარბი წნევის პირობებში).
- ცხრილი 3.4.** დაკვირვებათა ცხრილი პლასტიკური და დრეკადი მილებითა და ლითონის მილებით განხორციელებული თბოგადაცემის პროცესების ინტენსიურობის ურთიერთ შესადარებელი ექსპერიმენტების შედეგების შესატანად.
- ცხრილი 3.5.** ლითონისა და პლასტმასის მილებში განხორციელებული თბოგადაცემის პროცესის ინტენსიურობის ურთიერთშედარება.
- ცხრილი 4.1.** დაკვირვებათა შედეგები  $\Delta P=1520$  მმ წყ. სვ. ტოლი დაწნევისას.
- ცხრილი 4.2.** დაკვირვებათა შედეგები როცა  $\Delta P=2025$  მმ წყ. სვ. ტოლი დაწნევისას.

## ნახაზების ნუსხა

- ნახ. 1.1. პოლიმერული აფსკის დამუშავება აეროდინამიკურ საყრდენებზე გადატარებით.
- ნახ. 1.2. პლასტიკური და ელასტიკური მილის ბოლოს ჰერმეტიკული შეერთება სამილეთ ცხაურასთან.
- ნახ. 2.1. მილის დიამეტრის აბსოლუტური დეფორმაციის სიდიდე საანგარიშო Z კვეთის წინ და შემდეგ დინების მიმართულებით, სამი სხვადასხვა სიბლანტის მქონე მასალიდან დამზადებული მილებისათვის.
- ნახ. 2.2. მილის დიამეტრის ფარდობითი დეფორმაციის დამოკიდებულება წნევის იმპულსით გამოწვეული ტალღის ფრონტის გადაადგილებაზე სხვადასხვა მასალის მილებისათვის.
- ნახ. 2.3. წნევის ტალღის ამპლიტუდის ნაზრდი სხვადასხვა მასალის მილებისათვის.
- ნახ. 2.4. ელასტიკური მილის კედლის დეფორმაციები.
- ნახ. 2.5. ფლატრულ რეჟიმში მოძრავი სითხის სინქარისა და მერხვეი კვეთის ფართობის დამოკიდებულება დროზე.
- ნახ. 3.1. № 1 ექსპერიმენტული დანადგარის პრინციპული სქემა.
- ნახ. 3.2. სამილტუნე კოლექტორი.
- ნახ. 3.3. მილტუნების განლაგება სამილტუნე კოლექტორზე.
- ნახ. 3.4. № 1 ექსპერიმენტული სტენდის სქემა.
- ნახ. 3.5. პლასტიკური და დრეკადი მილებითა და ლითონის მილებით განხორციელებული თბოგადაცემის პროცესების ურთიერთ შესადარებელი ექსპერიმენტული დანადგარის გამზომი უბნის სქემა.
- ნახ. 3.6. № 2 ექსპერიმენტული სტენდი.
- ნახ. 4.1. მიმღები ჭურჭლის შევსების დროის დამოკიდებულება სხვადასხვა მასალის მილის დიამეტრზე.
- ნახ. 4.2. დაწნევის მნიშვნელობებს შორის არსებული განსხვავების შედარება შევსების დროის დაფიქსირებულ მნიშვნელობებს შორის არსებულ განსხვავებასთან.
- ნახ. 4.3. შევსების დროის დამოკიდებულება დიამეტრზე მეტალის და პოლიმერული მილებისათვის ( $\Delta P = 1520$  მმ წყ. სვ.).
- ნახ. 4.4. შევსების დროის დამოკიდებულება დიამეტრზე მეტალის და პოლიმერული მილებისათვის ( $\Delta P = 2025$  მმ წყ. სვ.).
- ნახ. 4.5. მოცულობითი სინქარის დამოკიდებულება დიამეტრზე მეტალის და პოლიმერული მილებისათვის ( $\Delta P = 1520$  მმ წყ. სვ.).
- ნახ. 4.6. მოცულობითი სინქარის დამოკიდებულება დიამეტრზე მეტალის და პოლიმერული მილებისათვის ( $\Delta P = 2025$  მმ წყ. სვ.).

- ნახ. 4.7. საზოგადოებრივი სიჩქარის დამოკიდებულება დიამეტრზე ( $\Delta P = 1520$  მმ წყ. სვ.).
- ნახ. 4.8. საზოგადოებრივი სიჩქარის დამოკიდებულება დიამეტრზე ( $\Delta P = 2025$  მმ წყ. სვ.).
- ნახ. 4.9. რეინოლდსის რიცხვის დამოკიდებულება დიამეტრზე ( $\Delta P = 1520$  მმ წყ. სვ.).
- ნახ. 4.10. რეინოლდსის რიცხვის დამოკიდებულება დიამეტრზე ( $\Delta = 2025$  მმ წყ. სვ.).
- ნახ. 5.1. აეროდინამიკური საყრდენი პოლიმერული აფსკისათვის.
- ნახ. 5.2. აეროდინამიკურ საყრდენში ჰაერის დინების შესასწავლი სტენდის სქემა.
- ნახ. 5.3. აეროდინამიკური საყრდენის პერფორირებულ მილზე წნევის გასაზომი ნახვრეტებისა და გამომყვანი კაპილარების განლაგება.
- ნახ. 5.4. აეროდინამიკური საყრდენის ღრეჩოს სისქისა და საჰაერო ბალიშში წნევის ცვლილების ტიპური სურათი.
- ნახ. 5.5. გამოსახულებით (5.7) გამოთვლილი წნევის შედარება ექსპერიმენტებით მიღებული შედეგებთან ჩატარებული ცდების რვავე სერიაში.
- ნახ. 5.6. დანადგარში მასალის მოძრაობის სქემა და პერფორირებული მილების განლაგება.

## შესავალი

საყოველთაოდ ცნობილია, რომ საერთოდ პოლიმერული მასალები და მათ შორის პლასტიკური და ელასტიკური აფსკები პოულობენ სულ უფრო ფართო გამოყენებას ტექნიკისა და ტექნოლოგიის მრავალ დარგში. ამ მხრივ აღსანიშნავია თუნდაც თბომეურნეობაში პოლიმერული მიღების გამოყენების თანამედროვე მასშტაბი.

მეორეს მხრივ ცნობილია, რომ პლასტიკურ და ელასტიკურ კედლებიან არხებში სითხეების მოძრაობა მკვეთრად განსხვავდება მყარ და სტაციონალურკედლებიან არხებში მოძრაობისაგან, ვინაიდან დრეკადი არხის კედლები თავიანთი მოძრაობით აქრობენ კედლის ზედაპირებთან წარმოქმნილ შევრიგალებებს და ხელს უწყობენ მდგრადი ლამინარული შრის არსებობას, რაც უზრუნველყოფს არხის გაცილებით ნაკლებ ჰიდრაულიკურ წინაღობას. აქედან გამომდინარე, არხის კედლების პლასტიკურობა და დრეკადობა მნიშვნელოვნად ამცირებს არხში სითხის მოცემული ხარჯის გატარებისათვის აუცილებელ წნევათა სხვაობას და, მაშასადამე შესაბამის ენერგოდანახარჯებსაც. ცნობილია, რომ ადამიანის სისხლის მიმოქცევის სისტემის ანალოგიურ, მყარი კედლების მქონე მილებიან სისტემაში იმავე რაოდენობის სისხლის საცირკულაციოდ გაცილებით მეტი დაწნევა და ტუმბოზე ენერგოდანახარჯებია საჭირო, ვიდრე ამას გული აკეთებს. ჩვენ შორს ვართ იმ აზრისაგან, რომ სისხლის მიმოქცევის სისტემაში მთავარი როლი სისხლძარღვების დრეკადობასა და ელასტიურობას ეკუთვნის, მაგრამ ფაქტია, რომ პლასტიკურ და ელასტიკურ მილებში სითხეების მოძრაობის თავისებურებებით ჯერ კიდევ გასული საუკუნის ორმოცდაათიან წლებში დაინტერესდნენ [1, 2]. ამასთან, მხოლოდ იმ თვალსაზრისით, რომ შეესწავლათ სისხლძარღვებში სისხლის მოძრაობის კანონზომიერებანი. დღემდე ამ საკითხისადმი მიძღვნილი მრავალი სამეცნიერო შრომა გამოქვეყნდა, მაგრამ მათი აბსოლუტური უმრავლესობა, როგორც წესი,

დაკავშირებულია სისხლის მიმოქცევის პრობლემებთან და ფაქტიურად მხოლოდ სამედიცინო ინტერესების სფეროს განეკუთვნება.

მცირე ნაწილი ამ ტიპის პუბლიკაციებისა ეძღვნება პლასტიკურ და ელასტიკურ მიღებში სითხეების დინების ჰიდროდინამიკური მახასიათებლების კვლევას, თუმცა მიღებული შედეგები ისევ სამედიცინო მიმართულებაზეა ორიენტირებული [3-5].

ცნობილია აგრეთვე, რომ ზოგიერთი წყლის ბინადარი, მაგალითად დელფინი, ისეთ დიდ სიჩქარეს ავითარებს წყალში მოძრაობისას, რომ იმავე ფორმის მყარი სხეულის იმავე სიჩქარით წყალში ამოძრავებას გაცილებით მეტი ენერგოდანახარჯები ესაჭიროება, ვიდრე დელფინის კუნთოვანი სისტემის მიერ გაწეული დანახარჯებია. ინტერნეტში მოპოვებული უახლესი ინფორმაციით ეს ფაქტი დელფინის ტყავის ელასტიკურობით და პლასტიკურობით აიხსნება (იხ. დანართი D).

გარდა ამისა, აუცილებელია აღინიშნოს საკითხის კიდევ ერთი მხარე, კერძოდ პლასტიკური და ელასტიკური აფსკების წარმოების თანამედროვე ტექნოლოგიურ პროცესებში ხშირად იყენებენ თერმული დამუშავებისათვის აუცილებელ ისეთ დანადგარებს რომლებშიც რულონური პოლიმერული მასალები მრავალ ურთიერთ პარალელურ ღერძებზე არიან გადადებული და ზიგზაგისებურად გადადიან ერთი მბრუნავი ღერძიდან მეორეზე. ამავე დროს ამ დანადგარებში მიეწოდება საკმაოდ დიდი რაოდენობის ცხელი ჰაერი ან სხვა გაზები მასალის შესაბამისი თერმული დამუშავებისათვის.

ჩვენი აზრით არის რეალური შესაძლებლობა იმისა, რომ ასეთ დანადგარებში მბრუნავი და მკაცრად ურთიერთპარალელური ღერძების ნაცვლად დამონტაჟდეს უძრავი აეროდინამიკური საყრდენები, რომელთა საჰაერო ბალიშებში მიწოდებული იქნება შესაბამის ტემპერატურამდე გაცხელებული ჰაერი და ამგვარად ერთდროულად და ერთი და იმავე საშუალებით მოხდება მასალების ზიგზაგისებურად სამოძრაო საყრდენების კონსტრუქციული გამარტივება და მასალაზე ენერგომიწოდების პროცესის რეალიზაცია-ინტენსიფიკაცია. ასეთი აეროდინამიკური საყრდენები ფაქტიურად წარმოადგენს ჰაერის ან რომელიმე სხვა გაზის სამოძრაო არხებს, რომლებიც ერთი მხრიდან შემოსაზღვრულია თვით პლასტიკური და ელასტიკური აფსკით და, აქედან გამომდინარე, რეალიზდება სითხის (გაზის)



ნაკადისა და პლასტიკური და ელასტიკური კედლის ურთიერთქმედება. ხსენებული ურთიერთქმედების შესწავლა მნიშვნელოვნად განავითარებს ერთის მხრივ პლასტიკური და ელასტიკური რულონური მასალებით (აფსკებით) შექმნილ არხებში სითხის მოძრაობის კანონზომიერებათა თეორიას და მეორეს მხრივ შექმნის წარმოებაში აეროდინამიკური საყრდენების ფართოდ გამოყენების და თბოდამამუშავებელი დანადგარების ენერგეტიკულ ეფექტურობის გაუმჯობესების პერსპექტივას.

ყოველივე ზემოთქმულიდან გამომდინარე, შეიძლება გავაკეთოთ დასკვნა, რომ პლასტიკურ და ელასტიკურ მილებში ანუ დრეკადკედლებიან არხებში სითხეების მოძრაობის თავისებურებებათა კვლევას აქვს როგორც თეორიული, ასევე საკმარისად მნიშვნელოვანი პრაქტიკული ინტერესი.

## თავი I

### პრობლემის არსი და სამუშაოს მიზანი

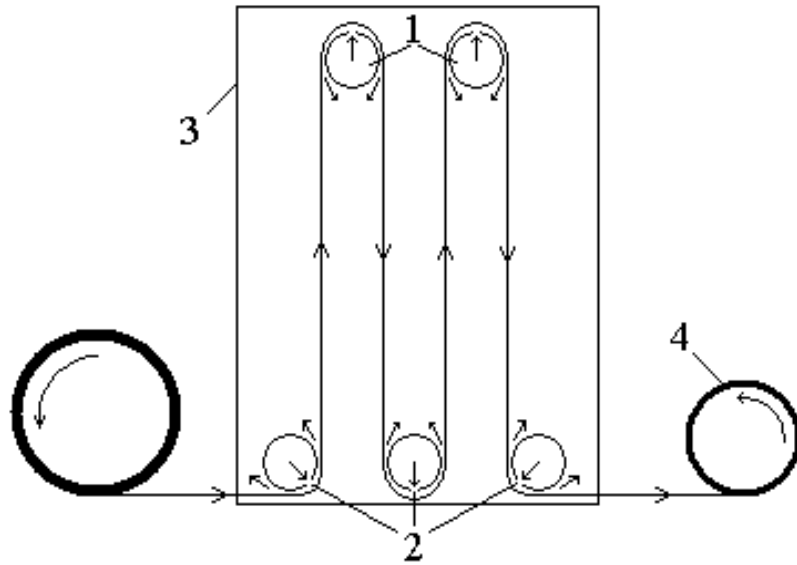
#### 1.1. საკითხის ისტორია

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ენერგეტიკის ფაკულტეტზე გასულ წლებში მიმდინარეობდა თხელი პოლიმერული, პლასტიკური და ელასტიკური აფსკების თერმული დამუშავების ოპტიმალური ტექნოლოგიის საკვლევი სამუშაოები, რომელთა საფუძველზე დადგენილი იქნა, რომ ხსენებული აფსკების დამუშავების ყველაზე ენერგოეფექტური ტექნოლოგია მიიღწეოდა აფსკების აეროდინამიკურ საყრდენებზე (ეგრეთწოდებულ საჰაერო ბალიშებზე) ზიგზაგისებურად გადატარებით და საყრდენებში მიწოდებული ჰაერის წინასწარი გათბობით აფსკის თერმული დამუშავებისათვის აუცილებელ ტემპერატურამდე. მოცემული ტემპერატურის ჰაერით პოლიმერული აფსკის თერმული დამუშავების საჭირო ხანგრძლივობა განსაზღვრავდა ჰაერის ბალიშებზე აფსკის ზიგზაგისებური მოძრაობის ნომინალურ სიჩქარეს.

1.1ნახ-ზე წარმოდგენილია რულონად დახვეული პოლიმერული აფსკის თერმული დამუშავებისათვის განკუთვნილი აეროდინამიურსაყრდენებიანი დანადგარის პრინციპული სქემა [6]. აეროდინამიკური საყრდენები წარმოადგენენ ლითონის მილებს 1, რომლებსაც ერთ მსახველზე გარკვეული ბიჯით აქვთ ხვრელები 2. ამ ხვრელებიდან გამოედინება აფსკის თერმული დამუშავებისათვის საჭირო ტემპერატურის მქონე ჰაერი და მილის მთელ სიგრძეზე ქმნის საყრდენ ბალიშს. ჰაერი წინასწარ ცხელდება ელექტროკალორიფერში და ვენტილატორის საშუალებით მიეწოდება საკოლექტორე კოლოფს 3, საიდანაც ნაწილდება კოლოფთან ცალი ბოლოთი შეერთებულ და ხისტად დამაგრებულ ლითონის მილებში. მილების მეორე ბოლოები დახშულია. აფსკის გადააგილება ხდება მიმდები რულონის 4 ღერძზე მოქმედი ამძრავი მექანიზმით.

ნაშრომში [6] ნაჩვენებია, რომ პოლიმერული აფსკის თერმული დამუშავება აეროდინამიკურ საყრდენებზე გაცილებით მაღალეფექტურია დამუშავების სხვა ტრადიციულ მეთოდებთან შედარებით. იქვე ეს ფაქტი

ახსნილია ჰაერის ბალიშზე მყოფი აფსკის თავისუფალი ვიბრაციით, რის გამოც მცირდება აფსკის ზედაპირთან მოძრავი ჰაერის ნაკადის ლამინარული სასაზღვრო შრე და იზრდება თბოგაცემის კოეფიციენტი.



ნახ. 1.1. პოლიმერული აფსკის დამუშავება აეროდინამიკურ საყრდენებზე გადატარებით

აღნიშნული სფეროში საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ენერგეტიკის და ტელეკომუნიკაციის ფაკულტეტის თბო- და ჰიდროენერგეტიკის დეპარტამენტის ენერჯის არატრადიციული და განახლებადი წყაროების მიმართულების თანამშრომელთა მიერ გაგრძელებული გამოკვლევების შედეგები [7, 8] ცხადყოფენ, რომ სითხისა და აირის დინება დრეკადკედლებიან არხებში ხასიათდება მთელი რიგი თავისებურებებით, როგორც აერო-და ჰიდროდინამიკის, ასევე თბოგაცემის პროცესების თვალსაზრისით. ამ პროცესების კვლევა ამჟამადც მიმდინარეობს.

## 1.2. საკითხის დასმა

### 1.2.1. არასტაციონარულ და დრეკადკედლებიან მილების თბოგადამცემ დანადგარებში შესაძლო გამოყენების შესახებ

ვინაიდან აფსკის თერმული დამუშავების ზემოთ აღწერილი დანადგარი ფაქტიურად სითბოგადამცემ დანადგარს წარმოადგენს, ბუნებრივად წამოიჭრა მოსაზრება რეკუპერაციულ თბოგადამცემ დანადგარში გამოყოფი კედლის როლში, პოლიმერული, პლასტიკური და ელასტიკური მასალის გამოყენების შესაძლებლობის შესახებ.

ქვემოთ წარმოვადგენთ ამ კონცეპტუალური მოსაზრების გაანალიზების შედეგებს.

რეკუპერაციულ გარსაცმშილოვან სითბოგადამცემში, როგორც წესი, ჩამონტაჟებულია სამილუ ცხაურებში ბოლოებით დამაგრებული ლითონის მილების კონა და გათვალისწინებულია ტემპერატურის ცვლილებით გამოწვეული მექანიკური დეფორმაციების საკომპენსაციო რომელიმე ტიპის მოწყობილობა. მილების კედლების გავლით ხდება თბოცვლა მილების კედლების სხვადასხვა მხარეს მოძრავ სითბოს მატარებლებს შორის. თბოგადამტანები ძირითადად მოძრაობენ ტუმბოს მეშვეობით.

აღწერილი ტიპის რეკუპერაციული სითბოგადამცემები ხასიათდებიან შემდეგი უარყოფითი მხარეებით:

1. ლითონის მილების ბოლოების სამილუ ცხაურასთან ჰერმეტიკული მიერთება წარმოადგენს რთულ, შრომატევად და ძვირ სამუშაოს.

2. ტემპერატურის ცვლილებით გამოწვეული მექანიკური დეფორმაციების საკომპენსაციო მოწყობილობა ართულებს კონსტრუქციას და აძვირებს თბოგადამცემს.

3. ხისტად დამაგრებულ მილებში და მილებს შორის სივრცეში სითბოს მატარებლების მოძრაობისას, მილების შიგა და გარე ზედაპირებთან, სითბოს მატარებლების ნაკადების გასწვრივ, ყალიბდება სტაბილური ლამინარული სასაზღვრო შრე, რომელიც ამცირებს სითბოგაცემის კოეფიციენტს მილების კედლის ორივე მხარეს და, აქედან გამომდინარე, თბოგადამცემის თბურ სიმძლავრეს.

4. ლითონის მილის შიგა ზედაპირზე წარმოქმნილი ნადები ამცირებს სითბოს მატარებლის ნაკადის ტურბულენტური გულის დიამეტრს, რის გამოც იზრდება მილის ჰიდრაულიკური წინააღმდეგობა და ენერგოდანახარჯები ტუმბოს ამძრავზე ანუ იზრდება თბოგადამცემის საექსპლუატაციო დანახარჯები.

5. ლითონის მილები განიცდიან კოროზიას და მალე გამოდიან მწყობრიდან განსაკუთრებით იმ შემთხვევებში, როდესაც სითბოს მატარებლები წარმოადგენენ აგრესიულ ნივთიერებებს.

6. ლითონის მილები ძვირია და მძიმე.

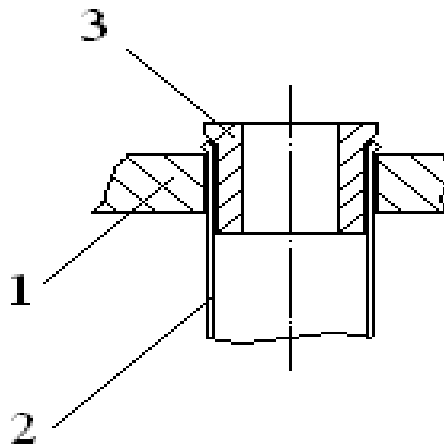
გარდა ზემოთ ჩამოთვლილისა, აღსანიშნავია აგრეთვე, რომ კვების მრეწველობაში გამოყენებულ ლითონის მილებიან თბოგადამცემებს, ეკოლოგიური მოსაზრებებიდან გამომდინარე, ამზადებენ ძვირადღირებული უჟანგავი ფოლადისაგან ან ალუმინის სპეციალური შენადნობებისაგან, რის გამოც მკვეთრად იზრდება მათი თვითღირებულება.

მოსალოდნელია, რომ შემოთავაზებული კონცეპტუალური მოსაზრების რეალიზაცია უზრუნველყოფს აღნიშნული ნაკლოვანებების აღმოფხვრას.

მოსაზრების არსია ის, რომ თბოგადამცემში ლითონის მილების ნაცვლად ჩამონტაჟებულია ელასტიკური, პლასტიკური მასალისაგან დამზადებული მილები, რის ხარჯზეც თბოგადამცემმა შეიძლება შეიძინოს ახალი თვისებები და აღარ ხასიათდებოდეს ზემოთ ჩამოთვლილი ნაკლოვანი მხარეებით.

კერძოდ, ამ წინადადების პრაქტიკული რეალიზაციის შემთხვევაში პლასტიკური და ელასტიკური მილების ბოლოების ჰერმეტიკული შეერთება სამილე ცხაურასთან შეიძლება მოხდეს 1.2 ნახაზზე წარმოდგენილი სქემის მიხედვით. ცხაურის 1 ნახვრეტებში გაყრილ პლასტიკური და ელასტიკური მილების 2 ბოლოებში პლასტმასის ცენტრალურ ხვრელიანი საცობის 3 ჩატედვა გაცილებით მარტივი, ნაკლებად შრომატევადი და იაფია, ვიდრე ჰერმეტიზაციის უზრუნველყოფა ლითონის მილების შემთხვევაში. ამასთან პლასტიკური და ელასტიკური მილები არ აყენებენ შეერთების ადგილებს რაიმე მექანიკურ დაძაბულობას და, აქედან გამომდინარე, არ საჭიროებენ თერმული დეფორმაციების მაკომპენსირებელ მოწყობილობას. გარდა ამისა, პლასტიკური მასალისაგან დამზადებული მილი გაცილებით მსუბუქი, იაფი

და კოროზიამდეგია ლითონის მიღონ შედარებით. აღნიშნულის საფუძველზე მიიღწევა თბოგადამცემის კონსტრუქციული გამარტივება, სიმსუბუქე, გაიაფება და მისი მუშაობის რესურსის გაზრდა.



ნახ. 12. პლასტიკური და ელასტიკური მილის ბოლოს ჰერმეტიკული შეერთება სამილე ცხაურასთან

გარდა აღნიშნულისა, თბოგადამცემში თბოგადამტანების მოძრაობისას, პლასტიკური და ელასტიკური მილები განიცდიან რა რხევებსა და ვიბრაციას, მათ ზედაპირებზე მუდმივად მოხდება ლამინარული სასაზღვრო შრის რღვევა-გათხელება და მილების კედლების ორივე მხრიდან მიიღწევა თბოგადამცემის კოეფიციენტების შედარებით მაღალი მნიშვნელობები, რაც იძლევა თბოგადამცემის სიმძლავრის გაზრდის საშუალებას. მილის შიგა ზედაპირზე წარმოქმნილი ლამინარული სასაზღვრო შრის გათხელებით კი გაიზრდება მილში მოძრავი თბოგადამტანის ნაკადის ტურბულენტური გულის დიამეტრი, რის გამოც შემცირდება მილის ჰიდრაულიკური წინააღობა და შესაბამისად, ენერგოდანახარჯები ტუმბოს ამძრავზე.

დამატებით უნდა აღინიშნოს, რომ მილის კედლების ვიბრაცია ხელს უშლის მის ზედაპირებზე სახვადასხვა დანალექის წარმოქმნას, რომლებიც

დროთა განმავლობაში მნიშვნელოვნად ამცირებენ თბოგაცემის კოეფიციენტს როგორც შიდა, ასევე გარე მხრიდან.

გამოთქმული კონცეპტუალური მოსაზრების ზემოთ წარმოდგენილი ანალიზის საფუძველზე უნდა აღინიშნოს, რომ ამ მოსაზრების რეალიზაციით შესაძლებელია მნიშვნელოვნად ამაღლდეს ქიმიურ და კვების მრეწველობაში გამოყენებული თბოგადამცემების ენერგოეფექტურობა და მათი რემონტამდე მუშაობის რესურსი.

დასასრულ აღსანიშნავია, რომ პლასტიკური და ელასტიკური მასალებისაგან დამზადებული სითბოგადამცემების კვების მრეწველობაში გამოყენება მნიშვნელოვნად შეამცირებს პროდუქციის (სხვადასხვა სასმელის) თვითღირებულებას და გააუმჯობესებს მათ ეკოლოგიურ მახასიათებლებს.

ზემოთ აღნიშნული კონცეპტუალური მოსაზრება და მისი გაანალიზების შედეგები მოხსენებული იქნა საერთაშორისო სამეცნიერო-ტექნიკურ კონფერენციაზე „გარემოს დაცვა და მდგრადი განვითარება“ [9] და სერიოზული ინტერესი დაიმსახურა.

## **1.2.2. რულონური მასალების ტექნოლოგიაში აეროდინამიკური საყრდენების გამოყენების შესახებ**

ცნობილია, რომ მრავალი რულონური მასალის დამზადების ტექნოლოგიური პროცესი მოიცავს მასალის თერმიულ დამუშავებასაც. თერმიული დამუშავების პროცესი წარმოადგენს თბური, დიფუზიური, ქიმიური და სხვა მოვლენების საკმაოდ რთულ კომპლექსს. ეს სირთულე განსაკუთრებით იჩენს თავს როდესაც საქმე ეხება თერმიული დამუშავების ინტენსიფიკაციას. რულონური პლასტიკური მასალების წარმოებაში მნიშვნელოვანი ადგილი უჭირავს თერმიულ დამუშავებას, რომლის დროსაც ხდება მასალის შრობა, პოლიმერიზაცია, სტრუქტურიზაცია და სხვა ფიზიკური და ქიმიური პროცესები. ცნობილია, რომ სხვადასხვა მასალების თერმიულ დამუშავებაზე იხარჯება ქიმიურ მრეწველობაში გამოყენებული სათბობისა და ელექტრონერგიის 20 %-ზე მეტი [10]. ამიტომაც თბური დამუშავების ინტენსიური პროცესების შემუშავებას და შესაბამისი, მცირე

ენერგო და მასალატევადობის აპარატურის შექმნას დიდი მნიშვნელობა ენიჭება.

სამეცნიერო ლიტერატურაში მრავლად მოიპოვება მრეწველობის მიერ გამოშვებული სხვადასხვა მასალის თბური დამუშავებისადმი მიძღვნილი სამეცნიერო შრომები და აღწერილია მრავალნაირი ტექნოლოგიური მოწყობილობა. ასეთი ნაშრომების საკმარისად სრული მიმოხილვა წარმოდგენილია [11]-ში, საიდანაც ნათლად ჩანს, რომ ტექნოლოგიური პროცესები და აპარატურა უმრავლეს შემთხვევაში მუშავდება და იქმნება ცალ-ცალკე, კონკრეტული მასალებისათვის. უფრო მეტიც, ფიზიკო-ქიმიურად ერთგვაროვანი და გეომეტრიულად თითქმის ერთნაირი სხვადასხვა მასალების თერმიული დამუშავებისათვის შექმნილია სრულიად განსხვავებული ტექნოლოგიური პროცესები და შესაბამისი აპარატურა.

მაგალითად, მონოგრაფიებში [12-14] მოყვანილია ქსოვილის, ქაღალდის, პოლიმერული აფსკების, კინოფოტომასალების, მუყაოს და სხვა ზოლოვანი და რულონური მასალების კონვექციური ტიპის საშრობი დანადგარების 30-მდე კონსტრუქციული სახეობის აღწერილობა. ეს კონსტრუქციები დამუშავებულია გარეგნული ფორმის მიხედვით პრაქტიკულად ერთნაირი მასალებისათვის და თან ერთდღაიმავე მიზნით – საკმაოდ თხელი დასამუშავებელი მასალიდან ტენის მოცილება. ამავე მიზნით ნაშრომში [15] ხისგან ანათალი თხელი ფურცლების დამუშავებისათვის წარმოდგენილია დანადგარი, რომელშიც მასალაზე თბური ენერგიის მიწოდებისათვის მას ათავსებენ მაღალი სიხშირის ელექტრული ველის რხევით კონტურში. ნაშრომებში [16, 17] აღწერილია თერმიული დამუშავების დანადგარები, რომლებშიც მასალის გადასაადგილებლად გამოყენებულია შეკუმშული ჰაერი და სითბოს მისაწოდებლად კი კონტაქტური და სხვა მეთოდები.

მასალების თბური დამუშავების ტექნოლოგიური პროცესებისა და შესაბამისი თბოდამამუშავებელი დანადგარების ასეთი მრავალფეროვნება სრულებითაც არაა გამოწვეული მხოლოდ კონკრეტული საჭიროებებით და წარმოების პირობებით ან მოთხოვნებით. უმრავლეს შემთხვევაში ეს სიტყვულე გაპირობებულია ამა თუ იმ საკვლევი თუ საპროექტო ორგანიზაციების დარგობრივი დაქვემდებარებით და ცალკეული პირების მიერ



ენერგომიწოდების პროცესის განხორციელების ამა თუ იმ მეთოდის ამოხმებით.

ძალიან ბევრი სამუშაო ეძღვნება მასალების თერმული დამუშავების პროცესების ოპტიმიზაციას მისი ენერგოტევალობის შემცირების მიზნით. ასეთი სამუშაოების მიმოხილვა წარმოდგენილია ნაშრომებში [18-20], რომელთა გაანალიზების საფუძველზე ადვილად შეიძლება იმ დასკვნის გაკეთება, რომ პრაქტიკული გადაწყვეტების და აპარატურის მრავალსახეობის ტენდენცია ამ მიმართულებითაც შენარჩუნებულია.

ყოველივე ზემოთ თქმული გვაძლევს საფუძველს დავასკვნათ, რომ მასალების თბური დამუშავების ტექნოლოგიური პროცესების და შესაბამისი აპარატურის მრავალსახეობა ამცირებს დამამუშავებელი აპარატურის მსხვილსერიული წარმოების სრული სტანდარტიზაციის შესაძლებლობას, ზრდის მატერიალურ და ფინანსურ დანახარჯებს, აუარესებს წარმოების პირობებს და ართულებს მათი ექსპლუატაციისათვის საჭირო კადრების მომზადების პროცესს.

აღნიშნულიდან გამომდინარე გამოვთქვამთ მოსაზრებას, რომ დამუშავებული იქნეს აეროდინამიურ საყრდენებიანი თბოდამამუშავებელი დანადგარი, რომელიც ვარგისი იქნება ყველა ტიპის თხელი რულონური მასალებისათვის. კერძოდ ქაღალდისათვის, პოლიმერული აფსკებისათვის, კინოფოტომასალებისათვის, უქსოვადი და მოქსოვილი ქსოვილებისათვის, მუყაოსათვის, მუშაბისათვის, ხელოვნური ტყავისათვის და სხვა.

აეროდინამიკურსაყრდენებიანი თბოდამამუშავებელი დანადგარის პრინციპული სქემა წინა პარაგრაფში იყო განხილული. აქ ავღნიშნავთ მხოლოდ იმას, რომ ის შეიძლება გამოყენებული იქნას პრაქტიკულად ყველა რულონური თხელი მასალებისთვის და გააჩნია ყველა ტექნოლოგიური პარამეტრის ცენტრალიზებული და ავტომატური რეგულირების საშუალება. კერძოდ, თერმული დამუშავების დროს ცალსახად საზღვრავს დანადგარში მასალის გატარების სიჩქარე. მასალისათვის სითბოს მიწოდება ინტენსიურია, ვინაიდან სასურველი ტემპერატურის ჰაერი მასალაზე მოქმედებს ჭავლების სახით და ორივე მხრიდან, ხოლო ჰაერის ტემპერატურა კი ადვილად რეგულირდება კალორიფერის სიმძლავრის რეგულირებით. რაც შეეხება მასალის გადასაადგილებლად საჭირო ენერგოდანახარჯს, ის მინიმალურია,

რადგან მასალა პრაქტიკულად ხახუნის გარეშე გადააგდილდება ჰაერის ბალიშებზე.

### 1.3. სამუშაოს მიზნები

ყოველივე ზემოთ აღნიშნულიდან გამომდინარე, წინამდებარე სამუშაოს ძირითადი მიზანია არასტაციონარულ და დრეკადკედლებიან არხებში სითხის მოძრაობის თავისებურებათა შესწავლა ამ თავისებურებათა ტექნიკურ მოწყობილობებში გამოყენების თვალსაზრისით.

ხსენებული მიზნით ჩვენ დაგვეგმეთ პრობლემას მივდგომოდით ერთი მხრივ, არასტაციონარულ და დრეკადკედლებიან მილების თბოგადამცემ დანადგარებში შესაძლო გამოყენების და მეორეს მხრივ, დრეკადი, პლასტიკური და ელასტიკური თხელი რულონური მასალების თერმიული დამუშავებისათვის საჭირო დანადგარებში აეროდინამიკური საყრდენების შესაძლო გამოყენების თვალსაზრისით.

აქედან გამომდინარე, სამუშაოს კონკრეტულ მიზნებს წარმოადგენს:

*1. დრეკად, პლასტიკურ და ელასტიკურ მილებში სითხის მოძრაობის თავისებურებათა შესწავლა.*

ამ მიზნით დაგვეგმილი იყო შემდეგი სამუშაოების შესრულება:

- 1.1. არხებში სითხის მოძრაობის ჰიდროდინამიკურ კანონზომიერებათა შესწავლის ზოგადი მეთოდოლოგიის გაცნობა.
- 1.2. დრეკად და პლასტიკურკედლებიან არხებში სითხის მოძრაობის თავისებურებათა გაანალიზება თბოგადამცემის შესაძლო ინტენსიფიკაციის კუთხით.
- 1.3. დრეკადი და პლასტიკურკედლებიანი არხებისათვის რეკომენდებული ანალიზური გამოსახულებების მოძიება თბოცვლის პროცესების გაანგარიშების შესაძლებლობის გამოვლენის თვალსაზრისით.
- 1.4. ლითონის მილებისა და ელასტიკური, პლასტიკური და დრეკადი მასალისაგან დამზადებული მილების ჰიდრავლიკური

წინააღმდეგობების ხარისხობრივი ურთიერთშედარების ჩასატარებელი ექსპერიმენტული დანადგარის დაპროექტება და შესაბამისი ექსპერიმენტების ჩატარების მეთოდის დამუშავება.

1.5. თბოგადამტანებს შორის მოთავსებული დრეკადი, პლასტიკური და ელასტიკური კედლის გავლით სითბოს გადაცემის პროცესის შესასწავლი ექსპერიმენტული დანადგარის დაპროექტება და ექსპერიმენტის ჩატარების მეთოდის დამუშავება.

*2. დრეკადი, პლასტიკური და ელასტიკური რულონური მასალის აეროდინამიკური საყრდენის ექსპერიმენტული გამოკვლევა.*

ამ მიზნით დაგეგმილი იყო შემდეგი სამუშაოების შესრულება:

2.1. დრეკად პოლიმერულ აფსკსა და სტაციონარულ ცილინდრულ კედელს შორის მოთავსებული აეროდინამიკური საყრდენის მუშაობის პირობების ანალიზი.

2.2. აეროდინამიკური საყრდენის ექსპერიმენტული მაკეტის შექმნა, ცდების ჩატარების მეთოდის დამუშავება და აეროდინამიკური საყრდენის საჰაერო ბალიშში წნევის განაწილების ექსპერიმენტული გამოკვლევა.

2.3. რულონური მასალების თერმული დამუშავების დანადგარებში გამოსაყენებელი აეროდინამიკური საყრდენების ინჟინრული გაანგარიშების მეთოდის დამუშავება.

*3. სამუშაოს შესრულების პროცესში შექმნილი ექსპერიმენტული დანადგარების და მათზე ჩასატარებელი გაზომვების მეთოდის იმგვარად დამუშავება, რომ მათ ბაზაზე შემდეგში დამზადებული იქნეს ლაბორატორიული დანადგარები საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ენერგეტიკისა და ტელეკომუნიკაციის ფაკულტეტის თბო და ჰიდროენერგეტიკის დეპარტამენტის მიმართულებების სასწავლო ლაბორატორიებისათვის.*

## თავი II

### ელასტიკურ და დრეკადკედლებიან მილებში სითხის მოძრაობის თეორიული საკითხები

#### 2.1. არხებში სითხის მოძრაობის კვლევის ზოგადი მეთოდოლოგია.

ცნობილია, რომ რეკუპერაციულ თბოგადამცემ დანადგარებში სითხოს გადაცემა ერთი თბოგადამტანიდან მეორე თბოგადამტანზე მიმდინარეობს. ამ თბოგადამტანების გამყოფი კედლის სხვადასხვა მხარეს ღინების პროცესში და აქედან გამომდინარე, თბოგადამტანებს შორის თბოცვლის მიმდინარეობის ინტენსიურობაზე ღინების პირობებს გადამწყვეტი მნიშვნელობა ენიჭებათ. მაგალითად, თბოცვლის პროცესების შესასწავლად გამოყენებული დიფერენციალური განტოლებების სისტემა, უშუალოდ თბოცვლისა და თბოგამტარობის დიფერენციალურ განტოლებებთან ერთად შეიცავს სითხის მოძრაობისა და უწყვეტობის დიფერენციალურ განტოლებებს და შესაბამის ცალსახობის პირობებს. ამიტომაც ნებისმიერი თბოგადამცემი დანადგარის შექმნა დაპროექტებისას აუცილებელია მისი ჰიდრავლიკური გაანგარიშება, ანუ იმ კანონზომიერებათა ცოდნა, რომლებსაც ადგილი აქვთ თბოგადამტანი სითხეების ამა თუ იმ სადენებში მოძრაობისას.

ცხადია, რომ ზემოთ გამოთქმული კონცეპტუალური მოსაზრების პრაქტიკული რეალიზაციისათვის პირველ რიგში საჭიროა იმ ჰიდრავლიკურ კანონზომიერებათა ცოდნა, რომლებიც თავს იჩენს სითხის მოძრაობისას დრეკად, პლასტიკურ და ელასტიკურ კედლებიან სადენებში.

ნებისმიერ არხში სითხის მოძრაობა გამოწვეულია სითხეზე გარკვეული ძალების ზემოქმედებით. ცნობილია [21], რომ სითხეზე მოქმედებს ორი სახის გარე ძალა: მასური და ზედაპირული. მასური ძალა მოქმედებს განსახილველ სითხეში გამოყოფილ ნებისმიერი სიდიდის მოცულობაზე, ხოლო თუ სითხე ერთგვაროვანია, მასური ძალა გამოყოფილი მოცულობის პროპორციულიც არის და ამიტომ, როცა  $\rho = \text{const}$ - მასურ ძალას მოცულობით ძალასაც უწოდებენ. ამ ძალას მიეკუთვნება გამოყოფილი მოცულობის სიმძიმის ძალა და ინერციის ძალები (სითხის მოძრაობის შემთხვევაში).

რაც შეეხება ზედაპირულ ძალებს, მათ ძირითადად მიეკუთვნება წნევის და ხახუნის ძალები. ხახუნში იგულისხმება განსახილველი სითხის გამოყოფილი მოცულობის ხახუნი მეზობლად მდებარე თვით განსახილველი სითხის მოცულობებთან ან ხახუნი არხის ზედაპირთან, როცა ამ უკანასკნელს უშუალოდ ესაზღვრება გამოყოფილი მოცულობა.

სხვადასხვა არხში სითხის მოძრაობის კანონზომიერებათა გამოსაკვლევად იყენებენ სხვადასხვა ავტორის მიერ მიღებულ ანალიზური გამოსახულებების სისტემას. ამ გამოსახულებებს მიეკუთვნება:

**ბერნულის** განტოლება, რომელიც სითხის ნაწილაკზე მოქმედ წნევას აკავშირებს ამ ნაწილაკის მოძრაობის სიჩქარესთან და მისი კედლიდან დაშორების მანძილთან.

**ლაგრანჟის** დიფერენციალური განტოლება, რომელიც კავშირს ამყარებს მოძრაობის დასაწყისში სითხის რომელიმე ნაწილაკის კოორდინატებსა (საწყის კოორდინატებს) და ამავე ნაწილაკის მიერ გარკვეული დროის შემდეგ დაკავებული ახალი მდებარეობის კოორდინატებს შორის.

**ვილერის** დიფერენციალური განტოლება, რომელიც კავშირს ამყარებს სითხის რომელიმე ნაწილაკზე მოქმედ მოცულობით ძალებსა და ამ ნაწილაკის მოძრაობის სიჩქარეს შორის.

**მოძრაობის** დიფერენციალური განტოლება, რომელიც სითხის მოცემულ ნაწილაკზე მოქმედ ძალებს აკავშირებს ამავე ნაწილაკის მოძრაობის სიჩქარესთან, კოორდინატებთან და მოძრაობის დაწყებიდან გასულ დროსთან.

**უწყვეტობის** დიფერენციალური განტოლება, რომელიც გამოყვანილია მასის შენახვის კანონზე დაყრდნობით და ერთმანეთთან აკავშირებს სითხის მოძრავი ნაწილაკის სიჩქარეს და ამ ნაწილაკის კოორდინატებს.

გარდა ჩამოთვლილისა, სითხეების დინების პროცესების ანალიზური შესწავლისას გამოიყენებენ სხვა განტოლებებსაც. მაგალითად შეიძლება დასახელდეს **სენ-ვენანის** დიფერენციალურ განტოლება.

ცნობილია ამ უკანასკნელის მიღების სხვადასხვა ანალიზური გზა. კერძოდ, სენ-ვენანის დიფერენციალური განტოლება მიიღება როგორც მოძრაობის რაოდენობის განტოლებაზე დაყრდნობით, ასევე ენერჯის

განტოლების გამოყენებითაც, ხოლო ნ. ქართველიშვილის ნაშრომში [22] მიღებულია რეინოლდსის განტოლების გამოყენებით.

ჰიდროდინამიკის პროცესების მათემატიკური ანალიზისათვის გამოყენებული ყველა განტოლება მიღებულია ფიზიკის ზოგად კანონებზე დაყრდნობით და ამიტომ სითხეების დინების მოვლენებს აღწერენ უზოგადესი სახით. ბუნებასა და ტექნიკაში მიმდინარე უამრავი ჰიდროდინამიკური მოვლენა კი ერთმანეთისაგან განსხვავდება გარკვეული, მხოლოდ ამა თუ იმ მოვლენისათვის დამახასიათებელი კერძო პირობებით. ამიტომაც, რომელიმე კონკრეტული შემთხვევის გაანალიზებისას, ზემოხსენებულ დიფერენციალურ განტოლებების ამოხსნის პროცესში ითვალისწინებენ კიდევ ეგრეთწოდებულ **ცალსახობის პირობებს**, რომლებშიც შედის უშუალოდ შესასწავლი ჰიდროდინამიური მოვლენის მახასიათებელი **გეომეტრიული, ფიზიკური, სასაზღვრო და დროითი პირობები**. ცალსახობის პირობები შეიძლება მიღებული იქნას ამა თუ იმ პარამეტრების რიცხვითი მნიშვნელობების, მათ შორის არსებული ფუნქციონალური დამოკიდებულებების, ან დიფერენციალური განტოლებების სახით.

აღსანიშნავია, რომ ჰიდროდინამიკის ზემოთ ჩამოთვლილი განტოლებები ძირითადად შედგენილია იდეალური სითხეებისათვის ანუ ისეთი წარმოსახვითი სითხეებისათვის, რომლებსაც არ გააჩნიათ სიბლანტე და, აქედან გამომდინარე, მათი მოძრაობისას ხახუნის ძალები არ წარმოიქმნება. მაგრამ რეალური სითხეების მოძრაობის პირობებში ამ ძალების უგუვებელყოფა დაუშვებელია. ლიტერატურაში არსებობს სხვადასხვა არსებში რეალური სითხის მოძრაობის აღმწერი დიფერენციალური განტოლებები, კერძოდ, **ნავიე-სტოქსის დიფერენციალური განტოლებები**, მაგრამ მათი გამოყენება რეალური ამოცანების გადაწყვეტისას პრაქტიკულად შეუძლებელია, რადგან ერთი მხრივ რეალურ ნაკადებში წარმოქმნილი ხახუნის ძალების განაწილების გათვალისწინება ძალიან რთულია და, მეორე მხრივ, განსაკუთრებით დიდი მოცულობის გამოთვლების შესრულების აუცილებლობასთან არის დაკავშირებული [23]. გარდა ამისა შეუძლებელია ცალსახობის პირობების ზუსტი დადგენა. მაგალითად, გეომეტრიული ფორმებისა და ზომების, ფიზიკური

მახასიათებლების მნიშვნელობების, დროის და სასაზღვრო პირობების რიცხვითი მნიშვნელობების დადგენისას ყოველთვის ადგილი აქვს გარკვეულ ცდომილებებს.

აღნიშნულიდან გამომდინარე, ანალიზურ მეთოდებს ჯერ კიდევ არა აქვთ გადამწყვეტი მნიშვნელობა ბუნებასა და ტექნიკაში მიმდინარე ჰიდროდინამიკური მოვლენების შესწავლის საქმეში. ამიტომ, უმრავლეს შემთხვევაში, რეალური სითხის ნაკადების გაანგარიშებას ატარებენ იდეალური სითხისათვის შექმნილი მათემატიკური გამოსახულებებით და ამ გზით მიღებული შედეგებისა და დასკვნების პრაქტიკულ ამოცანებზე გავრცელებას ახდენენ გარკვეული შემასწორებელი კოეფიციენტების გამოყენებით. ამასთან, ხსენებულ შემასწორებელ კოეფიციენტებს ადგენენ უშუალოდ ამა თუ იმ რეალური სითხის ამა თუ იმ რეალურ არხში დინების პროცესზე განხორციელებული ექსპერიმენტული დაკვირვებების საფუძველზე.

ვინაიდან წინამდებარე კვლევის მიზანს დრეკად, პლასტიკურ და ელასტიკურ კედლებიანი თბოგადამცემი დანადგარების შესაძლო ენერგოეფექტურობის თაობაზე გამოთქმული კონცეპტუალური მოსაზრების სამართლიანობის შემოწმება წარმოადგენს, ამიტომაც წინამდებარე სამუშაოში ჰიდროდინამიკის პროცესების აღმწერი არც ერთი განტოლება დაწვრილებით არ განვიხილეთ.

იგივე მიზეზით ქვემოთ შემოვიფარგლებით მხოლოდ ლიტერატურაში მოძიებული იმ ნაშრომთა ზოგადი და მოკლე განხილვით, რომლებიც უშუალოდ თხელკედლა, პლასტიკურ, ელასტიკურ და დრეკად მილებში სითხის მოძრაობის კანონზომიერებათა შესწავლას ეძღვნება.

## **2.2. ელასტიკურ და დრეკად კედლებიან არხებში სითხის მოძრაობის კანონზომიერებათა თეორიული შესწავლის შესახებ**

წინამდებარე სამუშაოს შესავალ ნაწილში ნათქვამი გვაქვს, რომ პლასტიკურ და ელასტიკურ მილებში სითხეების დინების ჰიდროდინამიკური

მახასიათებლების კვლევას ყოველწლიურად მრავალი სამეცნიერო ნაშრომი ეძღვნება და ყოველი მათგანი პრაქტიკულად სამედიცინო მიმართულებაზეა ორიენტირებული (ვინაიდან სისხლძარღვები განიხილება როგორც პლასტიკური, ელასტიკური მილები) და სისხლის მოძრაობის კანონზომიერებათა შესწავლას ემსახურება.

ყოველ შემთხვევაში ხსენებული პუბლიკაციების ანალიზი ნათლად გვაჩვენებს, თუ რაოდენ რთული ბუნებისაა პლასტიკურ და ელასტიკურ-კედლებიან მილებში ბლანტი სითხის მოძრაობა და რამდენად მრავალმხრივია სითხის დინების მახასიათებლებსა და მილის დრეკად კედლებს შორის წარმოქმნილი კავშირურთიერთობები. სწორედ ამ სირთულეებითაა გაპირობებული ის გარემოება, რომ ჯერ კიდევ არ არის დამუშავებული ხსენებული კავშირურთიერთობების ისეთი მათემატიკური მოდელი, რომლის საფუძველზეც მიღებული იქნებოდა პრაქტიკული გამოთვლებისათვის მეტნაკლებად ვარგისი საანგარიშო ანალიზური გამოსახულებები.

მაგალითისათვის შეგვიძლია განვიხილოთ მოსკოვის საინჟინრო ფიზიკური ინსტიტუტის მეცნიერთა ნაშრომი [24], რომელშიც დასაბუთებულია, რომ ელასტიკურ და დრეკად მილში სითხის მოძრაობის მათემატიკური მოდელი აღიწერება უწყვეტობის დიფერენციალური განტოლებით და ნავიე-სტოქსის ორგანზომილებიანი დიფერენციალური განტოლების ღერძული კომპონენტით შედგენილი სისტემით. ხსენებული სისტემა ასე გამოიყურება:

$$\frac{\partial(vr)}{\partial r} + \frac{\partial(ur)}{\partial x} = 0 \quad (2.1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + v \frac{\partial u}{\partial r} + u \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} = \nu_0 \left[ \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial u}{\partial r} \right) \right] \quad (2.2)$$

სადაც  $\mathbf{v} = \mathbf{v}(r, x, t)$  და  $\mathbf{u} = \mathbf{u}(r, x, t)$ - შესაბამისად არის სითხის დინების სიჩქარის რადიალური და ღერძული კომპონენტები;  $\nu_0$  – კინემატიკური



სიბლანტის კოეფიციენტი;  $\rho$  – სითხის სიმკვრივეა;  $P = P(x, t)$  – სითხის წნევა.

განტოლებათა წარმოდგენილი სისტემა ზემოთ ხსენებულ ნაშრომში რთული მათემატიკური გარდაქმნებისა და გარკვეული დაშვებების გამოყენებით დაყვანილია ერთ, მეოთხე ხარისხის განტოლებამდე, რომელიც ამოხსნილია სამი სხვადასხვა მიდგომით და სხვადასხვა დამატებითი დაშვებების გათვალისწინებით. მიღებული ამონახსნები წარმოადგენენ საკმაოდ გრძელ, რთულ მათემატიკურ გამოსახულებებს და აქ არ წარმოვადგენთ, ვინაიდან მათი დაწვრილებითი განხილვა სცილდება ჩვენი ამოცანის ფარგლებს. ავღნიშნავთ მარტო იმას, რომ ისინი ერთმანეთთან აკავშირებენ სითხეში გავრცელებული წნევის ტალღის ამპლიტუდას და ელასტიკური მილის დეფორმაციას, რომელიც წნევის ტალღითაა გამოწვეული. აღნიშნული მოვლენის სირთულის სადემონსტრაციოდ წარმოვადგენთ მხოლოდ მიღებულ ამონახსნების მიხედვით აგებულ გრაფიკებს, რომლებიც ზემოხსენებულ კავშირებს ასახავენ.

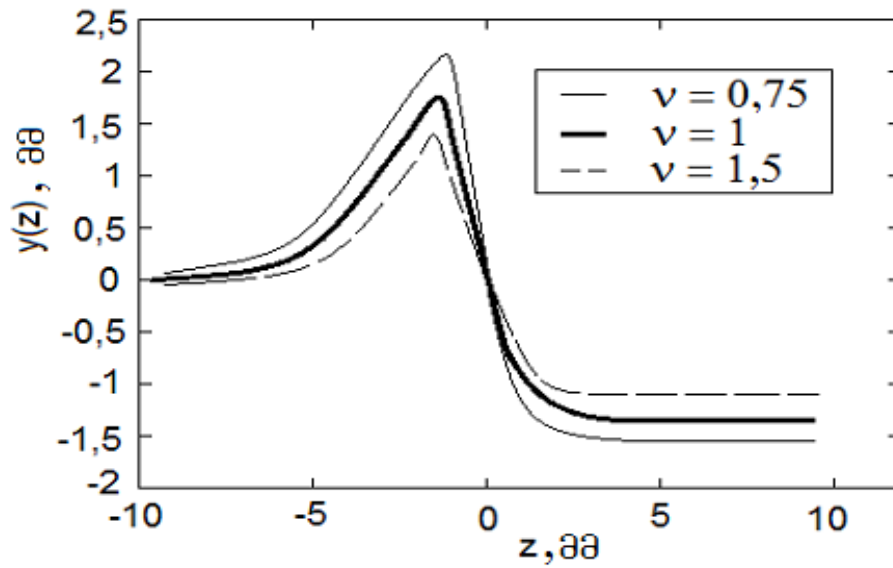
2.1 ნახაზზე წარმოდგენილია მილის დიამეტრის აბსოლუტური დეფორმაციის სიდიდე საანგარიშო  $Z$  კვეთის წინ და შემდეგ დინების მიმართულებით, სამი სხვადასხვა სიბლანტის მქონე მასალიდან დამზადებული მილებისათვის. როგორც ამ დიაგრამიდან ჩანს, რაც მეტია მილის მასალის კინემატიკური სიბლანტე, მით ნაკლებია კედლის დეფორმაცია და შესაბამისად ნაკლებია წნევის ტალღის ამპლიტუდა.

2.2 ნახაზზე ნაჩვენებია მილის დიამეტრის ფარდობითი დეფორმაციის დამოკიდებულება წნევის იმპულსით გამოწვეული ტალღის ფრონტის გადაადგილებაზე სხვადასხვა მასალის მილებისათვის. ამ დიაგრამიდან ჩანს, რომ მილის კედლის მასალის სიბლანტის ზრდასთან ერთად ხდება როგორც წნევის ტალღის ამპლიტუდის შემცირება, ასევე ტალღის ფრონტის ერთგვარი გამდოვრება. 2.3 ნახ-ზე ნაჩვენებია წნევის ტალღის ამპლიტუდის ნაზრდი პროცენტებში მილის კედლის მასალის სიბლანტესთან დამოკიდებულებაში და ტალღის მილის სიგრძეზე გავრცელების არეალი.

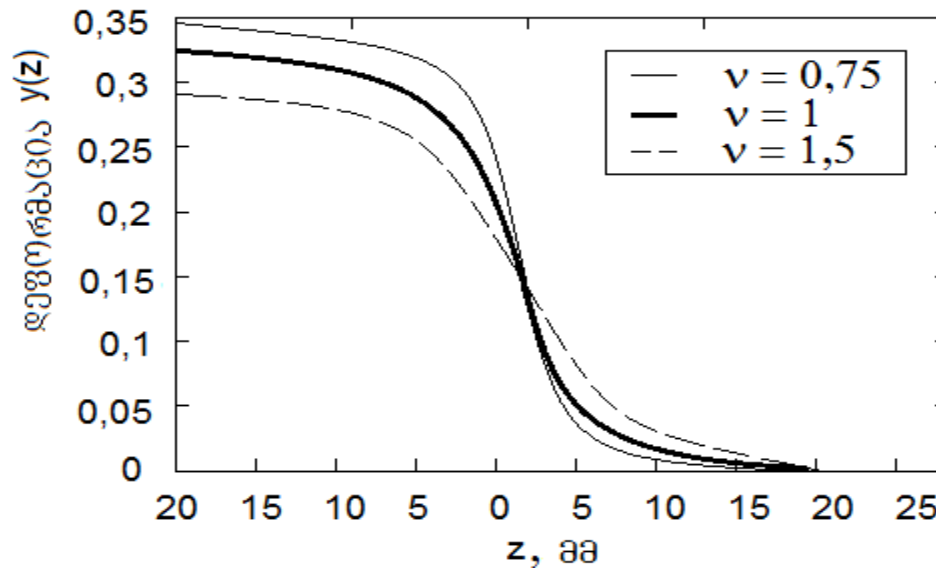
ზემოთ წარმოდგენილ დიფერენციალურ განტოლებათა სისტემის ამონახსნებით მიღებული გრაფიკები ფაქტიურად ერთიდა იგივე მოვლენას აღწერენ. მართლაც, მილის დიამეტრის აბსოლუტური დეფორმაციის სიდიდე

(ნახ. 2.1)), დიამეტრის ფარდობითი დეფორმაციის დამოკიდებულება წნევის იმპულსით გამოწვეული ტალღის ფრონტის გადაადგილებაზე (ნახ. 2.2) და ტალღის ამპლიტუდის ნაზრდი (ნახ.2.3) ერთმანეთთან პირდაპირპროპორციულ დამოკიდებულებაში არიან, ხოლო კედლის მასალის სიბლანტესთან უკუპროპორციულ დამოკიდებულებაში. ეს უკანასკნელი სავესებით ლოგიკურია, მაგრამ, სამწუხაროდ, ხსენებული სისტემის სამივე ამონახსნი მკვეთრად განსხვავდება ერთმანეთისაგან, ფუნქციების არგუმენტთან დამოკიდებულების ხასიათით. პირველ გრაფიკზე  $Z = 0$  წერტილის მახლობლობაში ფუნქციას (მილის დიამეტრის დეფორმაციას) ექსტრემუმიც ახასიათებს და საფესურებრივადაც იცვლება, მეორე შემთხვევაში  $Z = 0$  წერტილის მარცხნივ და მარჯვნივ ფარდობითი დეფორმაცია მდოვრედ იცვლება და ექსტრემუმის გარეშე, ხოლო მესამე შემთხვევაში (ტალღის ამპლიტუდის ნაზრდი)  $Z = 2$  წერტილის სიახლოვეს სიმეტრიული მაქსიმუმით ხასიათდება საფესურების გარეშე.

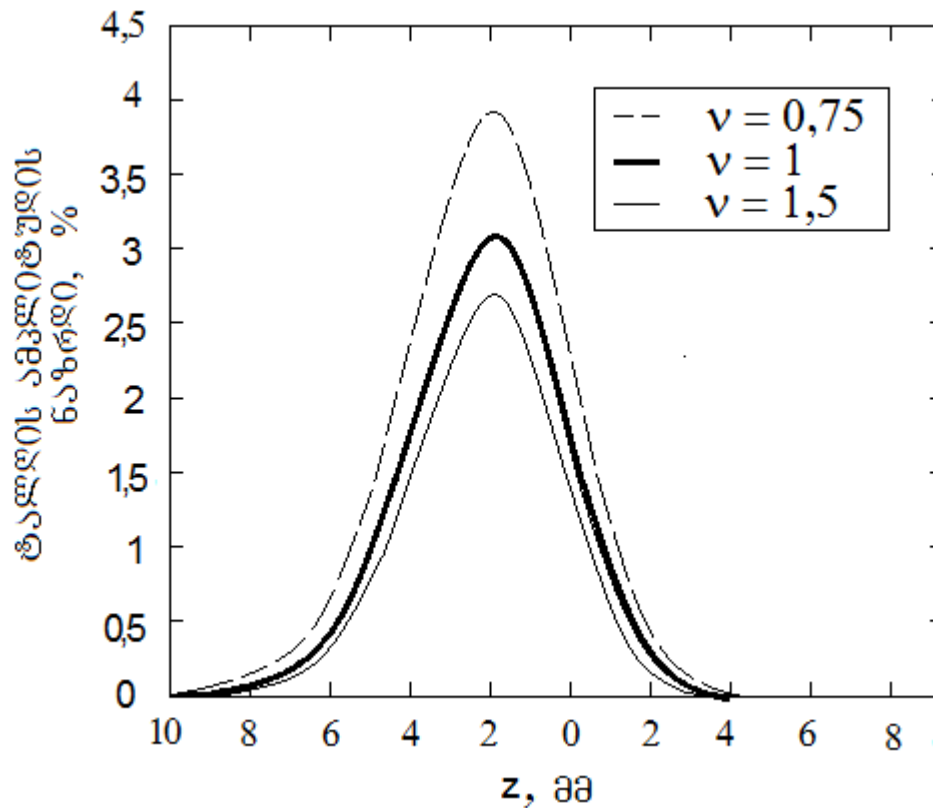
ყოველივე ზემოთ თქმული ნათლად ადასტურებს, თუ რამდენად რთულია ელასტიურ და დრეკად კედლებიან მილებში სითხის დინების მოვლენა, მისი მათემატიკური მოდელირება და პრაქტიკული გაანგარიშებებისათვის გამოსაყენებელი ანალიზური გამოსახულებების მიღება. აქედან გამომდინარე სავესებით ცხადია, რომ ანალოგიური ამოცანების შესწავლისას ექსპერიმენტული მეთოდების გამოყენებას ჯერ კიდევ დიდი უპირატესობა უნდა მივანიჭოთ.



ნახ. 2.1. მილის დიამეტრის აბსოლუტური დეფორმაციის სიდიდე საანგარიშო Z კვეთის წინ და შემდეგ დინების მიმართულებით, სამი სხვადასხვა სიბლანტის მქონე მასალიდან დამზადებული მილებისათვის.



ნახ. 2.2. მილის დიამეტრის ფარდობითი დეფორმაციის დამოკიდებულება წნევის იმპულსით გამოწვეული ტალღის ფრონტის გადაადგილებაზე სხვადასხვა მასალის მილებისათვის.



ნახ. 2.3. წნევის ტალღის ამპლიტუდის ნაზრდი სხვადასხვა მასალის მიღებისათვის

### 2.3. სითხის დინების თავისებურებები არასტაციონალურ და დრეკადკედლებიან მილებში

თხელკედლა ელასტიკურ მილებში სითხის მოძრაობის შესწავლა წარმოადგენს საინტერესო და საკმაოდ რთულ ფიზიკურ ამოცანას. მსოფლიოს სხვადასხვა ქვეყნის მეცნიერები, დაწეებული ჰიდროდინამიკური პრობლემების ცნობილ ფრანგ მკვლევარ პუაზელიდან, არაერთგზის მიმართავენ დრეკადკედლებიან მილებში სითხის მოძრაობასთან დაკავშირებულ სხვადასხვა ჰიდროდინამიკური საკითხის გამოკვლევას. ამ ამოცანებით განსაკუთრებით დაინტერესდნენ სისხლის მიმოქცევის ბიომექანიკის დარგში მოღვაწე მეცნიერები [25–27], რომელთა მიერ მიღებული იქნა საკმარისად საინტერესო შედეგები არა მარტო

ჰემოდინამიკის, არამედ უშუალოდ ჰიდროდინამიკის თვალსაზრისითაც. ყველაზე მეტი წარმატებები მიღწეული იქნა ნაკადის ჰიდროდინამიკაზე სითხის რეოლოგიური თვისებების გავლენის შესწავლისა და სხვადასხვა მოდელის ელექტროჰიდროდინამიკური ანალოგიების გამოყენების სფეროში [28–30].

ელასტიკური მასალისაგან დამზადებულ მილში სითხის მოძრაობის ჰიდროდინამიკური თავისებურებები შესწავლილია ნაშრომში [31], სადაც ამგვარი მოძრაობა დაყოფილია სამ დამოუკიდებელ მოვლენად. კერძოდ: 1) – გარკვეულ დროში, სითხის გარკვეული მოცულობითი რაოდენობის გადაადგილება მილის გასწვრივ, 2) – წნევის ტალღის გავრცელება, რომელსაც ბიომექანიკაში პულსური ტალღა ეწოდება და რომლის გავრცელების სიჩქარე ჩვეულებრივ უფრო მეტია ვიდრე თვით სითხის გადაადგილების სიჩქარე და 3) – გარკვეულ პირობებში სისტემის „ნაკადი-კედელი“ მდგრადობის დაკარგვის გამო აღძრული მაღალსიხშირული რხევები, რომელთა თანხლებით მიმდინარე დინების რეჟიმს დინების ფლატერული რეჟიმი ეწოდება.

სპეციალურ სამეცნიერო ლიტერატურაში ზემოთ ჩამოთვლილი სამივე მოვლენა დამოუკიდებლად აღიწერება უწყვეტობისა და ნავიე–სტოქსის დიფერენციალური განტოლებებიდან გამომდინარე საკმარისად რთული ანალიზური გამოსახულებებით, რომლებსაც წინამდებარე ნაშრომში არ განვიხილავთ, მით უმეტეს, რომ როგორც ეს ზემოთ იყო ნათქვამი, რეალური ამოცანების გადაწყვეტისას უპირატესი მნიშვნელობა კვლევის ექსპერიმენტულ მეთოდებს ენიჭება. თუმცა აღსანიშნავია, რომ ვინაიდან ნავიე–სტოქსის დიფერენციალური განტოლება არაწრფივია, ცხადია ხსენებული მოვლენებიდან რომელიმეს მაინც ექნება არაწრფივი ხასიათი, რაც ადასტურებს მოვლენის სირთულეს და, აქედან გამომდინარე, ამართლებს ჩვენს გადაწყვეტილებას ჯერჯერობით არ ჩაუვლრმავდეთ პრობლემის ჰიდროდინამიკურ მხარეს ყოველ შემთხვევაში მანამ, სანამ არ დადასტურდება პლასტიკურ, ელასტიკურ და არასტაციონალურკედლებიანი მილების თბოგადამცემ დანადგარებში გამოყენების მომგებიანობა, როგორც წმინდა თბოტექნიკური, ასევე ეკონომიკური, კონსტრუქციული და სხვა თვალსაზრისით.

მიუხედავად ზემოთ თქმულისა, პრობლემის სირთულის, ორიგინალობის და გარკვეულად პერსპექტიულობის უკეთ დემონსტრირების მიზნით, ქვემოთ შევეხებით დრეკად მიღებში სითხის დინების მოვლენის ანალიზთან დაკავშირებულ ორიოდ საკითხს. კერძოდ გავაანალიზებთ ჰუკის კანონს დრეკად და ელასტიურ მიღებში სითხის მოძრაობის თვალსაზრისით და განვიხილავთ ხსენებულ მიღებში სითხის დინების ფლატერულ რეჟიმს.

## 2.4. ჰუკის კანონი ელასტიკური და დრეკადი მილისათვის.

ჩვენს მიერ განსახილველ საკითხებში ჰუკის კანონის შეყვანა, განაპირობა იმ გარემოებამ, რომ როგორც ცნობილია ზოგადად ეს კანონი ამყარებს დამოკიდებულებას სხეულზე მოქმედ ძალასა და ამ ძალის ზემოქმედების შედეგად გამოწვეული დეფორმაციის სიდიდეს შორის. ვინაიდან ნებისმიერ კვეთში მილის კედლებზე მოქმედი ძალა გაპირობებულია შესაბამის კვეთში სითხის სტატიკური წნევით და ამასთანავე საქმე გვაქვს ადვილად დეფორმირებად მასალასთან, ასეთი კავშირი წნევასა და დეფორმაციის სიდიდეს შორის დამატებით გვაძლევს განტოლებას, რომელიც შესაძლებელია ყოველთვის იქნას გამოყენებული აღნიშნული ჰიდრაულიკურად რთული მოვლენის აღმწერ მრავალუცნობიან განტოლებათა სისტემაში.

მოვლენის არსის ნათლად წარმოდგენისათვის დაუშვათ, რომ გვაქვს ელასტიკური თხელკედლა მილი, რომელშიც განხორციელებულია სითხის ნაკადი და წნევის ძალის გავლენით ხდება მილის კედლის დეფორმაცია.

განვიხილოთ რამოდენიმე შემთხვევა:

1. წნევისა და სითხის სიჩქარის დაბალი მნიშვნელობების და მილის მცირე შიგა დიამეტრის შემთხვევა, როცა მოსალოდნელია, რომ მილის კვეთის ფართობი მცირე სიდიდით შეიცვლება (განსაკუთრებით ნაკლებად დრეკადი მასალების გამოყენებისას);

2. წნევისა და სითხის სიჩქარის დაბალი მნიშვნელობების, მაგრამ მილის დიდი შიგა დიამეტრის ან/და მეტად ელასტიკური მასალის შემთხვევაში მოსალოდნელია მილის კვეთის ფართობის სერიოზული ცვლილება;
3. წნევისა და სითხის სიჩქარის მაღალი მნიშვნელობების შემთხვევაში მოსალოდნელია სერიოზული დეფორმაციები.

ქვემოთ წარმოვადგენთ ჰუკის კანონის სამეცნიერო ლიტერატურაში ცნობილ იმ ფორმებს, რომლებსაც გამოიყენებენ ზემოხსენებული პრაქტიკული შემთხვევების ანალიზის პროცესში.

ჩამოთვლილთაგან პირველ შემთხვევაში გამოიყენება ჰუკის კანონი ჩვეულებრივი ფორმით, კერძოდ:

$$P = C \frac{\Delta S}{S_0}, \quad (2.3)$$

სადაც  $\Delta S = S - S_0$ ,  $S$  – არის მილის მოცემული კვეთის ფართობი და  $S_0$  კი იგივე კვეთის ფართობი ნაკადში ჭარბი წნევის,  $P$ –ს გარეშე, ანუ მილის კვეთის ფართობი თავისუფალ მდგომარეობაში.  $C$  არის მილის კედლის მასალის ელასტიკურობა. თხელი გარსების თეორიიდან ცნობილია, რომ  $C = Eh/d$ , სადაც  $E$  მილის კედლის მასალის დრეკადობის ეფექტური მოდულია,  $h$  – კედლის სისქეა და  $d$  – მილის საშუალო დიამეტრი, ანუ შიგა და გარე დიამეტრების საშუალო არითმეტიკული სიდიდე.

მეორე შემთხვევაში, როცა წნევისა და სითხის სიჩქარის დაბალი მნიშვნელობების მიუხედავად მილის კვეთის ფართობის სერიოზული დეფორმაცია ხდება, ჰუკის კანონს იყენებენ შემდეგი ფორმით:

$$dP = C \frac{ds}{S_0}, \quad (2.4)$$

რომელშიც ჭარბ  $P$  წნევასა და მასალის ფარდობით დეფორმაციას შორის დამოკიდებულება წრფივია, მაგრამ კვეთის ფართობის დამოკიდებულება ჭარბ წნევაზე ატარებს არაწრფივ, ექსპონენციალურ ხასიათს. კერძოდ, ფორმულა (2.4)-ის ამონახსნი შემდეგნაირად გამოიყურება [25]:

$$S = S_0 \exp\left(\frac{P}{c}\right). \quad (2.5)$$

ამასთან ამ უკანასკნელის მწკრივად გაშლისას პირველი წევრი ზუსტად იმეორებს ფორმულა (2.3)-ს.

წნევისა და სითხის სიჩქარის მაღალი მნიშვნელობების და მილის კედლის სერიოზული დეფორმაციების შემთხვევაში (მესამე შემთხვევა) აუცილებელია გამოყენებული იქნეს ჰუკის კანონის ისეთი ფორმა [26], რომლის გამოყენებისას ავტორების მიერ გათვალისწინებულია, რომ სითხის მოძრაობა მიმდინარეობს თხელკედლა ელასტიკურ და დრეკად მილში. ასეთი პირობებისათვის ჰუკის კანონის გამოსაყვანად იყენებენ შემდეგი სახის გამოსახულებას:

$$P = C \frac{\Delta(dV)}{dV}, \quad (2.6)$$

სადაც  $dV = SdX$  – არის მილის შიგა მოცულობის ელემენტი (იხ. ნახ. 2.4), რომელმაც შეიძლება განიცადოს ცვლილება ( $\Delta(dV)$ ) მოცემული მოცულობის ელემენტის შემომსაზღვრელი კედლის ერთდროული დეფორმაციით როგორც გრძივი (აქსიალური), ასევე განივი (რადიალური) მიმართულებით. ეს უკანასკნელი [26]-ის ავტორებს არ აქვთ გათვალისწინებული და აღნიშნულ დეფორმაციებს ცალ-ცალკე განიხილავენ. შემდეგ მიმართავენ შედეგების გასაშუალოებას, გარკვეულ დაშვებებს და არა რთული, მაგრამ საკმაოდ დიდი გარდაქმნების შემდეგ ჰუკის კანონს იღებენ შემდეგი გამოსახულების სახით:

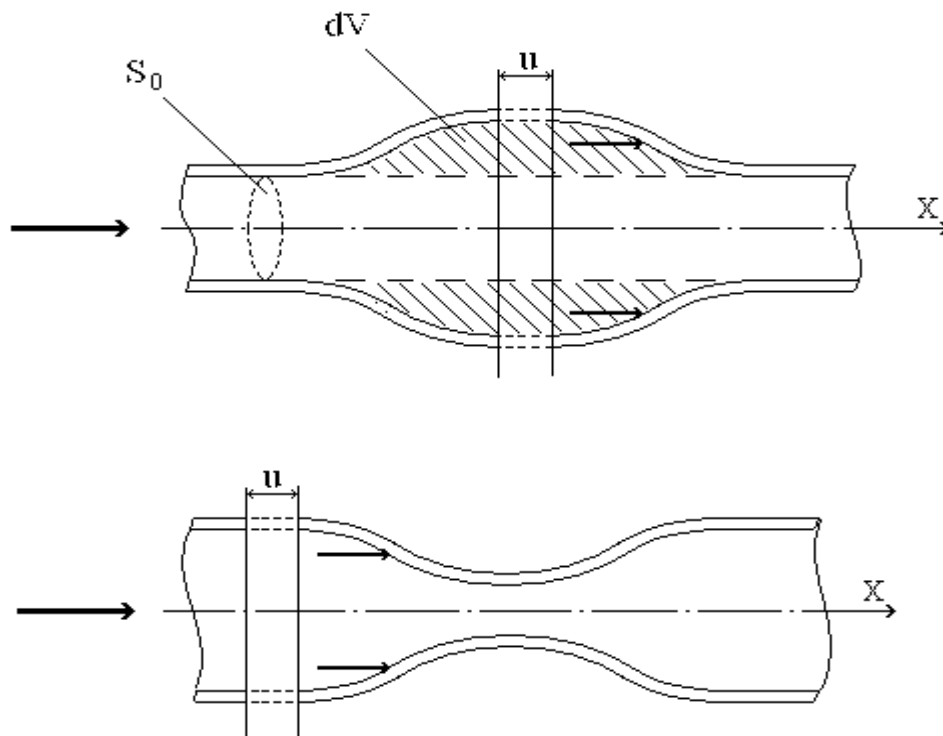
$$P = C \frac{\partial(uS)}{Sdx}, \quad (2.7)$$

სადაც  $x$  – დინების გასწვრივი კოორდინატაა და  $u$  სითხის მოცულობის ელემენტის გრძივი წანაცვლების სიდიდეა იმ წერტილთან შედარებით, რომელიც იმოძრაებდა არადეფორმირებულ მილში განვითარებული სიჩქარით.

როგორც ჰუკის კანონის აქ წარმოდგენილი ფორმებიდან ჩანს, (2.3), (2.6) და (2.7) გამოსახულებები ერთმანეთთან აკავშირებენ ნაკადში



განვითარებული ჭარბი სტატიკური წნევისა ძალებსა და დრეკადი და ელასტიკური მიღების გეომეტრიულ პარამეტრებს. თუმცა ჩანს, რომ მიღებული გამოსახულებები მიახლოებითია, ვინაიდან განმსაზღვრელი პარამეტრების ცვლილების დიდი დიაპაზონის გამო ფაქტიურად შეუძლებელია პლასტიკური და ელასტიკური მასალის ქცევის ერთ საერთო მოდელში მოთავსება და ზუსტი ანალიზი.



ნახ. 2.4. ელასტიკური მილის კედლის დეფორმაციები

აღსანიშნავია აგრეთვე, რომ პლასტიკური და ელასტიკური მილის კედლის გრძივი დეფორმაცია მჭიდროდაა დაკავშირებული რეალური სითხის ნაკადის ელემენტარული მოცულობასა და მისი შემომსაზღვრელი კედლის ზედაპირს შორის არსებულ ხახუნის ძალებთან, რაც სამწუხაროდ, ჩვენს მიერ დრომდე მოპოვებულ მასალებში ჯერჯერობით არსად არ არის გათვალისწინებული, ვინაიდან როგორც წესი, ანალიზს ატარებენ იდეალური სითხის მოძრაობის შემთხვევისათვის. ხსენებულ მასალებში მილის გრძივი დეფორმაცია განიხილება, როგორც თავდაპირველად წარმოქმნილი განივი

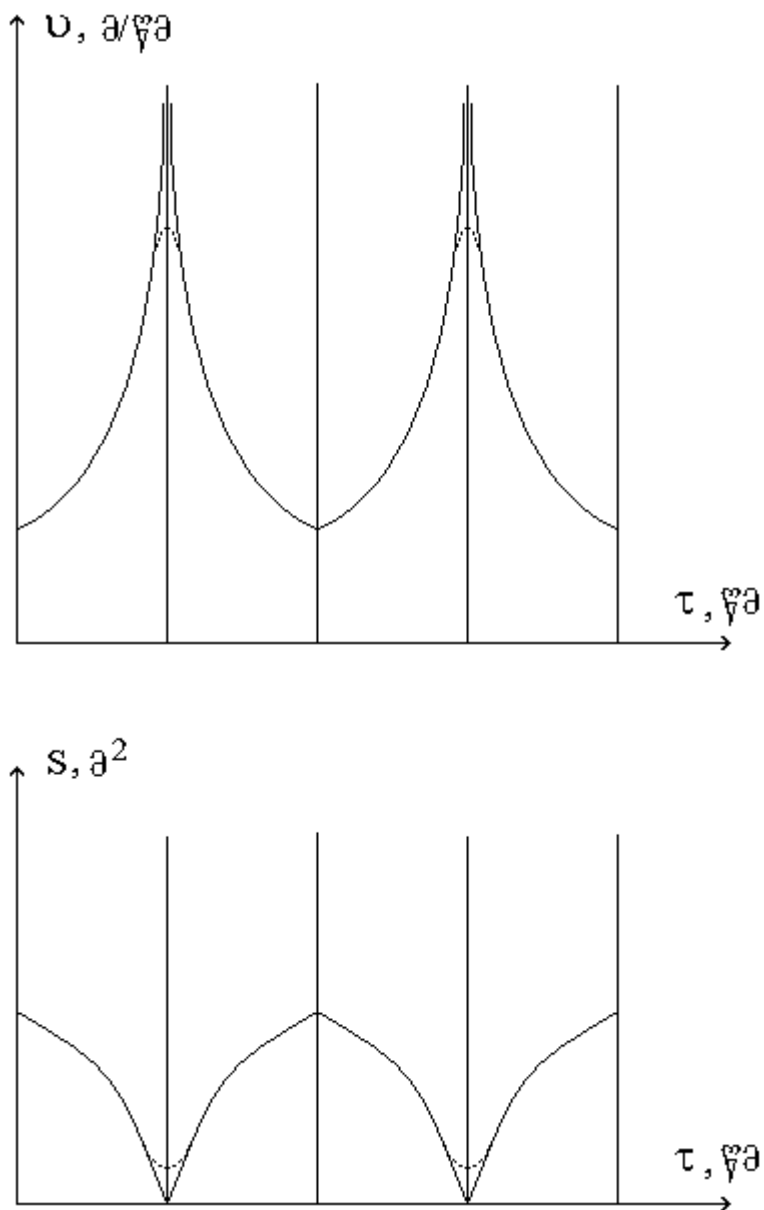
დეფორმაციის შედეგად წარმოქმნილ დიფუზორულ და კონფუზორულ უბნებზე ნაკადის დინამიკური ზემოქმედებით წარმოქმნილი დეფორმაცია, როგორც ეს 2.3 ნახ-ზეა წარმოდგენილი.

## 2.5. დრეკადკედლიან მილში სითხის დინების ფლატერული რეჟიმი.

დრეკად კედლიან მილში სითხის დინების ფლატერული რეჟიმი, როგორც ეს ზემოთ იყო აღნიშნული, დინების ისეთ რეჟიმს ეწოდება, როდესაც მილის კედელი იწვევს რხევით მოძრაობას. თავდაპირველად ელასტიკურ მილებში ასეთი რეჟიმის დამყარება დაკავშირებული იყო სისხლის მიმოქცევის სისტემაში გულის მიერ გავრცელებული პულსის ტალღის ანუ წნევის ტალღის გავლის პროცესთან. შემდეგში აღმოჩნდა, რომ ვინაიდან ელასტიკურ მილში სითხის დინება პრინციპულად არამდგრადი პროცესია, ასეთი რეჟიმი შეიძლება დამყარდეს მილში სითხის ხარჯის მუდმივობის, ანუ დაწნევის მუდმივობის შემთხვევაშიც. ნებისმიერი შემთხვევითი მიზეზით, დინების ნებისმიერ ადგილზე, სითხის რაიმე მოცულობითი ელემენტის გადაადგილების სიჩქარის სულ მცირე გაზრდა „ბერნულის ეფექტი“-ს შესაბამისად ამცირებს სტატიკურ წნევას მოცემულ კვეთში. სტატიკური წნევის შემცირება ავტომატურად იწვევს ელასტიკური მილის კვეთის ფართობის შემცირებას, რაც კიდევ უფრო ზრდის ნაკადის სიჩქარეს და ე. ი. სტატიკური წნევა კიდევ უფრო მცირდება. მოვლენა ვითარდება ზვავისებურად და იწვევს მილის კვეთის სრულ ჩაკეტვას. ვინაიდან მილზე საერთო დაწნევის ზემოქმედებით სითხის ახალი ულუფის გატარება აუცილებელია, სითხე თვითონ ხსნის მილის ჩაკეტილ ნაწილს. ამგვარად წარმოიქმნება თვითმერხევი პროცესი, ანუ დინების ფლატერული რეჟიმი.

რუსეთის ქალაქ სამარის სამედიცინო უნივერსიტეტის პროფესორ ა. ვოლობუევის, ადამიანის სისხლის მიმოქცევის სისტემის პათოლოგიის დიაგნოსტიკის მიზნით, ჰუკის კანონის და უწყვეტობისა და იმპულსების განტოლებებისაგან შედგენილი სისტემის ერთობლივი ამოხსნის საფუძველზე მიღებული აქვს ხსენებულ თვითმერხევი რეჟიმში მყოფი ელასტიკური მილის

კვეთის ფართობისა და ამ კვეთში სითხის გადაადგილების სიჩქარის საანგარიშო გამოსახულებები [3]. ამ გამოსახულებათა წინამდებარე ნაშრომში მოყვანა საჭიროებს არ მოითხოვს, მაგრამ საინტერესოა მათ საფუძველზე შესრულებული გამოთვლების შედეგების გრაფიკული წარმოდგენა, რომელიც აღებულია [3]-დან და მოცემულია ნახ. 2.5-ზე.



ნახ. 2.5. ფლატრულ რეჟიმში მოძრავი სითხის სიჩქარისა და მერხვევი კვეთის ფართობის დამოკიდებულება დროზე.

ამ გრაფიკებიდან ნათლად ჩანს, რომ მილის კვეთის ჩაკეტვის მომენტში, ანუ როცა კვეთის ფართობი ნულს უტოლდება, სითხის მოძრაობის სიჩქარის მაქსიმუმი უსასრულობისაკენ მიისწრაფის. ეს გარემოება იმასთანაა დაკავშირებული, რომ თეორიული ანალიზი ჩატარებული იყო იდეალური, ანუ ნულოვანი სიბლანტის მქონე სითხისათვის. ფიზიკის კურსიდან ცნობილია ანალოგიური თეორიული ეფექტი, როცა იძულებითი რხევის ამპლიტუდა რეზონანსის პროცესში მიისწრაფის უსასრულობისაკენ გარემოს წინააღმდეგობის არ არსებობის შემთხვევაში. ასე რომ რეალური სითხეებისათვის, რომლებიც ხასიათდება სიბლანტით და, აქედან გამომდინარე, როგორც შინაგანი, ასევე მილის კედლებთან ხახუნით, არც სითხის გადაადგილების სიჩქარე მიაღწევს უსასრულობას და არც მილის კვეთის სრული ჩაკეტვა მოხდება. ეს მომენტი გრაფიკებზე წარმოდგენილია მილის კვეთის თეორიულად ჩაკეტვის წერტილებთან დატანილი წყვეტილი ხაზებით. ამ წყვეტილი ხაზების შესაბამისი აბსოლუტური სიდიდეები, რა თქმა უნდა, დამოკიდებული იქნება ბევრ ფიზიკურ ფაქტორზე და პირველ რიგში სითხის სიბლანტეზე.

## **2.6. არასტაციონარულ და დრეკადკედლებიან მილებში სითხის მოძრაობის თავისებურებათა ანალიზის შედეგები**

ზემოთ წარმოდგენილი მასალებიდან ნათლად ჩანს, რომ არასტაციონარულ და დრეკადკედლებიან მილებში რეალური სითხის მოძრაობა არის ჰიდროდინამიკურად ფრიად რთული მოვლენა, რომლის ღრმად შესწავლა საკმაოდ რთულ სამეცნიერო პრობლემას წარმოადგენს. ვინაიდან აღნიშნული პრობლემის გადაწყვეტა მჭიდროდაა დაკავშირებული ზოგადად სისხლის მიმოქცევის სისტემის შესწავლასთან და გულ-სისხლძარღვთა დაავადებების დიაგნოსტიკის ეფექტური მეთოდების დამუშავებასთან, ელასტიკურ და დრეკადკედლებიან მილებში სითხის დინება მრავალი წლის მანძილზე წარმოადგენს როგორც ჰიდროდინამიკის, ასევე

მედიცინის და სხვა დარგების წარმომადგენელთა კვლევის საგანს. ეს კვლევა დღესაც გრძელდება.

უკვე ჩატარებული გამოკვლევების საფუძველზე გამოქვეყნებული შედეგები ადასტურებს, რომ აღნიშნული მოვლენა ხასიათდება მთელი რიგი თავისებურებებით, რომელთა შორის თბოტექნოლოგიური პროცესების ეფექტურობის შესაძლო გაზრდის თვალსაზრისით ყველაზე საინტერესოა სითხეების ელასტიკურ და პლასტიკურ მიღებში მოძრაობის ის აგრეთწოდებული ფლატერული რეჟიმები, რომელთა დამყარებისას ხდება მილის კედლის თვითრხევა, ანუ ავტომატური ვიბრაცია.

ჩვენთვის ცნობილია, რომ თბოტექნოლოგიურ პროცესებში გამოყენებულ მილებიან თბოგადამცემებში სითბოს გადაცემის ინტენსიფიკაციის მეთოდებს შორის უპირატესი მნიშვნელობა ენიჭება ისეთ მოწყობილობებს, რომლებიც იწვევენ ნაკადის ხელოვნურ ტურბულიზაციას. მაგალითად ხელოვნური ხაოიანობა, მილებში დაგრესილი ზოლების მოთავსება და ა. შ. [32]. ასეთ მოწყობილობებს მიეკუთვნება აგრეთვე სპეციალური ვიბრატორები, რომელთა ამოქმედებაზეც, რა თქმა უნდა, დამატებით იხარჯება ენერჯის გარკვეული რაოდენობა [33].

აღნიშნულიდან გამომდინარე, თბოგადამცემი მოწყობილობის მილის კედლის თვითვიბრაცია უთუოდ ხელს შეუწყობს ორივე თბოგადამტანის ნაკადის ტურბულიზაციას როგორც მილის შიგნით, ასევე მილის გარეთ ანუ მილთაშორის სივრცეში და აქედან გამომდინარე მოსალოდნელია, რომ გაზრდის თბოგადამცემი დანადგარის ენერგოეფექტურობას.

გარდა ამისა ჩვეულებრივ ტექნიკურ სისტემებში, როცა პირველადი თბოგადამტანის გასაცივებლად წყალს იყენებენ და ეს უკანასკნელი თბება ზედაპირებზე გამოლექავს სხვადასხვა მარილებსა და ჭუჭყს, რაც აუარესებს თბოგაცემის კოეფიციენტს. გამოლექვის მოვლენის საწინააღმდეგოდ ხშირად ისევ ხელოვნურ ვიბრაციას მიმართავენ [34], ხოლო თვითმერხევ სისტემებში, ცხადია, ამის საჭიროება აღარ იქნება.

არანაკლებ საინტერესოა აგრეთვე ის ფაქტი, რომ ელასტიკურ სისხლძარღვებში სისხლის მაცირკულირებელი ორგანო, გული გაცილებით ნაკლები სიმძლავრისაა, ვიდრე ეს დასჭირდებოდა ტუმბოს სისხლის მიმოქცევის სისტემის მსგავს ტექნიკურ სისტემაში სისხლის სიბლანტის

ტოლი სიბლანტის მქონე სითხის საცირკულაციოდ. აქედან გამომდინარე მოსალოდნელია, რომ დრეკადი და ელასტიკური პლასტიკური მიღებისაგან დამზადებულ ტექნიკურ სისტემებში სითხეების მაცირკულირებელი ტუმბოს ამპრავი ენერგეტიკულად უფრო ეფექტური იყოს.

დამატებით უნდა აღინიშნოს, რომ თანამედროვე ეტაპზე ძალზე მნიშვნელოვანი პრობლემაა თბოგადამცემი მოწყობილობების მასისა და გაბარიტების შემცირება, განსაკუთრებით საავიაციო და კოსმოსური ტექნიკის მოთხოვნილებებიდან გამომდინარე. ცხადია, რომ თხელკედლა, პლასტიკური და ელასტიკური მიღებით მეტალის მიღების შეცვლა მნიშვნელოვნად შეამცირებს თბოგადამცემების ხსენებულ მახასიათებლებსაც.

ჩვენ ჯერჯერობით ძალიან შორსა ვართ იმის მტკიცებისაგან, რომ თბოგადამცემებში გამოყენებული მეტალის მიღების პლასტიკური მიღებით მასიური შეცვლა უთუოდ დადებით შედეგებს გამოიღებს, მაგრამ იმის თქმა კი შეგვიძლია, რომ აუცილებელია ამ საკითხის ძირფესვიანი შესწავლა და რადგანაც თბოგადამცემების გამოყენების არეალი ძალიან ფართოა, დიდია აგრეთვე თბოგადამცემებში თბოგადამტანებად მონაწილე ნივთიერებათა რაოდენობა და გამოყენებული მიღების ასორტიმენტი (როგორც მასალების, ასევე გეომეტრიული ზომების თვალსაზრისით), ადვილი შესაძლებელია რომელიმე კონკრეტულ შემთხვევაში ჩვენს მიერ გამოთქმული მოსაზრება მეტალის მიღების პლასტიკური მიღებით შეცვლის თაობაზე გამართლებული იყოს.

ამასთან უნდა აღვნიშნოთ, რომ ამ ეტაპზე აუცილებლად მიგვაჩნია არასტაციონარულ, პლასტიკურ და ელასტიკურ მიღებში რეალური სითხის ნაკადის ჰიდრაულიკური წინააღობის და ასეთი მილის კედლის გავლით განსორციელებული თბოგადაცემის პროცესის ექსპერიმენტული შესწავლა, მით უმეტეს, რომ ვერც სპეციალურ ლიტერატურაში და ვერც ინტერნეტში, ჯერჯერობით ვერ მოვიძიეთ რაიმე ისეთი მასალა, რომელიც მიეძღვნებოდა დრეკად, პლასტიკურ და ელასტიკურ კედლებიან არხებში სითხეების მოძრაობის თანმხლები სითბოგადაცემის მოვლენის კანონზომიერებათა შესწავლას.

ყოველ შემთხვევაში ჩატარებული მიმოხილვის შედეგად შეიძლება დავასკვნათ, რომ:

1. არასტაციონარულ და დრეკადკედლებიან მიწებში რეალური სითხის მოძრაობას ახასითებს მთელი რიგი თავისებურებები, რაც განაპირობებს მოვლენის ჰიდროდინამიკურ სირთულეს და მისი შემდგომი კვლევის სამეცნიერო აქტუალობას;

2. არასტაციონარულ და დრეკადკედლებიან მიწებში რეალური სითხის მოძრაობის ის თავისებურება, რომ ახასითებს მიწის კედლის თვითრხევა, ანუ ეგრეთწოდებული ფლატერული რეჟიმი, განაპირობებს მოვლენის კვლევის აქტუალობას თბოტექნოლოგიური პროცესების ეფექტურობის შესაძლო გაზრდის თვალსაზრისით;

3. ჰიდროდინამიკური პროცესების კვლევის ანალიზური მეთოდები შეისწავლიან მხოლოდ იდეალური სითხის დინების კანონზომიერებებს და რეალური სითხეების დინების მოვლენების შესასწავლად ჯერ კიდევ დიდი უპირატესობა ენიჭება კვლევის ექსპერიმენტულ მეთოდებს;

4. ჰუკის კანონისა და არასტაციონარულ და დრეკადკედლებიან მიწებში რეალური სითხის მოძრაობის ფლატერული რეჟიმის განხილვის საფუძველზე დასაბუთებულია, რომ თბოგადამცემ დანადგარებში პლასტიკური და ელასტიკური მიწების გამოყენებამ შესაძლოა მოგვცეს მრავალმხრივი დადებითი ეფექტი.

## თავი III

### ექსპერიმენტული დანადგარები და ცდების ჩატარების მეთოდика

#### 3.1. პლასტიური და დრეკადი მილებისა და ლითონის მილების ჰიდრაულიკური წინააღმდეგობის შესადარებელი ექსპერიმენტული დანადგარი

ლითონის მილებისა და იმავე ცოცხალი კვეთის ფართობის მქონე ელასტიური, პლასტიკური და დრეკადი მასალისაგან დამზადებული მილების ჰიდრაულიკური წინააღმდეგობის ხარისხობრივი ურთიერთშედარებისათვის დამუშავებული იქნა მარტივი ექსპერიმენტული დანადგარის (შემდეგში დანადგარი № 1) პროექტი.

აღნიშნული № 1 დანადგარის პრინციპული სქემა წარმოდგენილია 3.1ნახ-ზე.

დანადგარი წარმოადგენს დაახლოებით 10 ლიტრი მოცულობის საწყის ტევადობას, რომელშიც გარკვეულ დონემდე მოთავსებული იქნება წყალი. საწყისი მოცულობის კონსტრუქცია ითვალისწინებს საჭიროების შემთხვევაში გარემოდან მის ჰერმეტიზაციას. წყლის დონის საკონტროლებლად ხსენებულ საწყის ტევადობას გააჩნია დონის მზომი მილი. საწყისი მოცულობის ქვედა არე მილგაყვანილობით და ჩამკეტი ვენტილით დაკავშირებულია წყალსადენის სისტემასთან. ასევე მილგაყვანილობით და ჩამკეტი ვენტილით საწყისი მოცულობის ზედა არე დაკავშირებულია ჰაერის ლაბორატორიულ კომპრესორთან, რომლის საშუალებით შესაძლებელი იქნება გარკვეული რაოდენობის ჰაერის ჩატუმბვა საწყის მოცულობის ზედა არეში. ასეთ შემთხვევაში საწყის მოცულობაში განვითარებული წნევის გასაზომად გათვალისწინებულია მანომეტრი. საჭიროების შემთხვევისათვის გათვალისწინებულია აგრეთვე საჰაერო მილი.

აღწერილი საწყისი მოცულობის ფსკერზე მიერთებულია სპეციალური სამილტუჩე კოლექტორი, რომელიც მეტი თვალსაჩინოებისათვის ცალკე ნახაზებზეა წარმოდგენილი (იხ. ნახ. 3.2 და 3.3).

სამილტუჩე კოლექტორი შედგება 3 სმ სიმაღლის ლითონის ცილინდრისაგან, რომელსაც აქვს ფურცლოვანი ლითონის ფსკერი და ხუფი.



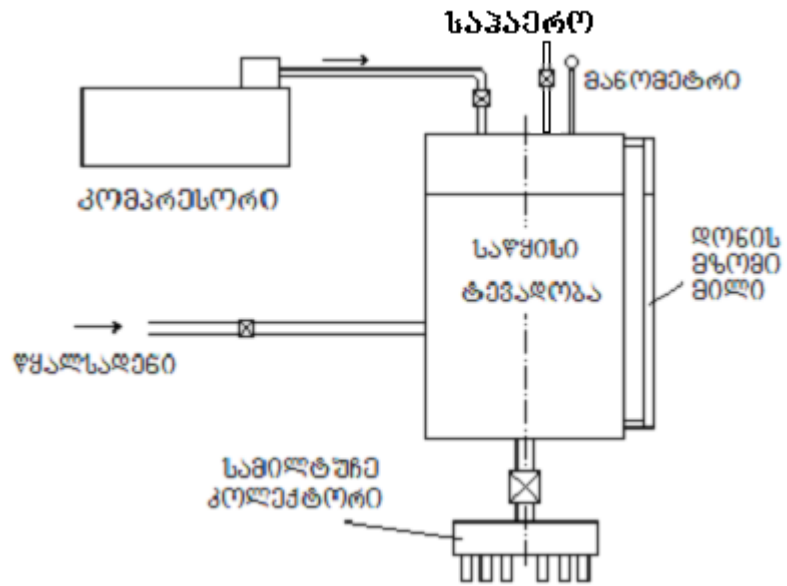
ფსკერს და ხუფს აქვთ სპეციალური წრიული ღარები, რომლებშიც მოთავსებულია საჰერმეტიზაციო სადები. კოლექტორის ცილინდრი თავსდება ზედა და ქვედა სადებებზე შორის და ფსკერისა და ხუფის გარე, პერიფერიულ ხვრელებში გაყრილი საჰერმეტიზაციო მომჭერებით ხდება კოლექტორის შიგა მოცულობის ჰერმეტიზაცია.

კოლექტორის ხუფზე მიერთებულია ერთი ცენტრალური მილი, რომლის საშუალებით კოლექტორი 3.1ნახ-ზე წარმოდგენილ საწყის ტევადობას უერთდება, ხოლო კოლექტორის ფსკერზე მიერთებულია რამოდენიმე მილტუჩი ლითონის მყარი და პლასტმასის დრეკადი გამოსაკვლევი და ურთიერთშესადარებელი მილების მისაერთებლად. ურთიერთშესადარების სიზუსტისათვის მილტუჩები კოლექტორის ცენტრიდან თანაბარ მანძილებზეა განლაგებული (იხ. ნახ. 3.3).

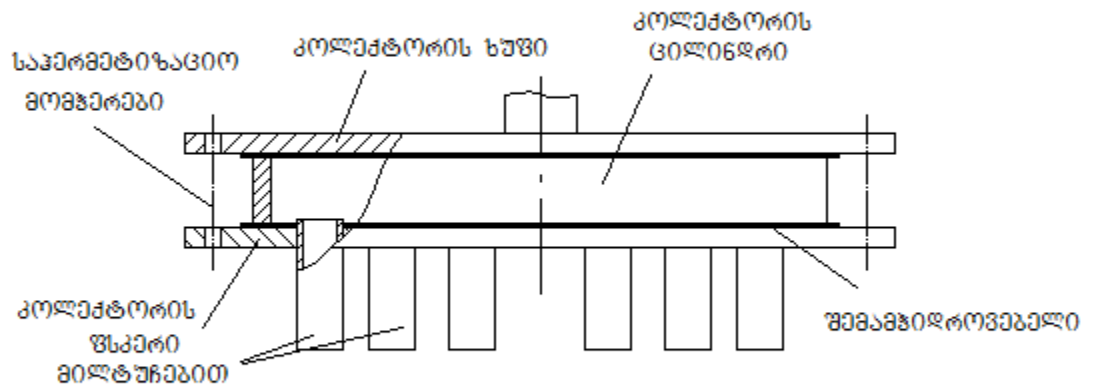
პლასტიკური და დრეკადი მილებისა და ლითონის მილების ჰიდრაულიკური წინაღობის შესადარებელი ექსპერიმენტების ჩასატარებელი ლაბორატორიული სტენდის საერთო სქემა წარმოდგენილია 3.4ნახ-ზე.

ლაბორატორიულ მაგიდაზე (1) მოთავსებულია სპეციალური სადგარი (2), რომელზეც განლაგებულია წყლის საწყისი მოცულობა (3). ამ უკანასკნელის ხუფზე მიერთებულია საწყის მოცულობაში განვითარებული წნევის გამზომი მანომეტრი (4) და „ბ“ ონკანიანი საჰერო მილი (5), ხოლო ფსკერზე – „ც“ ონკანის გავლით სამილტუჩე კოლექტორი (6). სამილტუჩე კოლექტორის მილტუჩებზე მიერთებულია ლითონისა და ელასტიკური მასალისაგან დამზადებული გამოსაკვლევი და ურთიერთშესადარებელი მილები (7), რომელთა ქვედა ბოლოები ჩაშვებულია სითხის მიმღებ და სითხის დონის მიხედვით მოცულობის მაჩვენებლებით აღჭურვილ ჭურჭლებში (8).

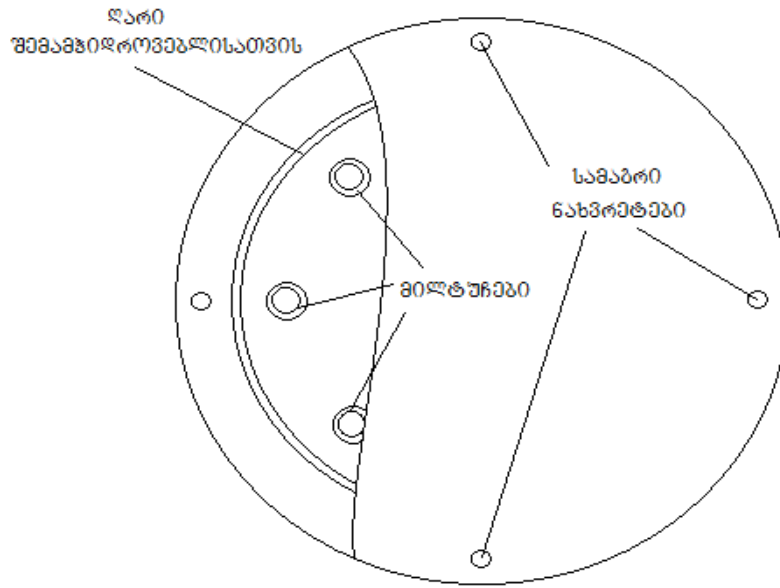
გამოსაცდელ მილებში წყლის დინების სხვადასხვა რეჟიმის დასამყარებლად საწყის მოცულობასთან „ა“ ონკანის გავლით მიერთებულია წყალსადენის მილი და „დ“ ონკანის გავლით ჰაერის ლაბორატორიული კომპრესორი (9).



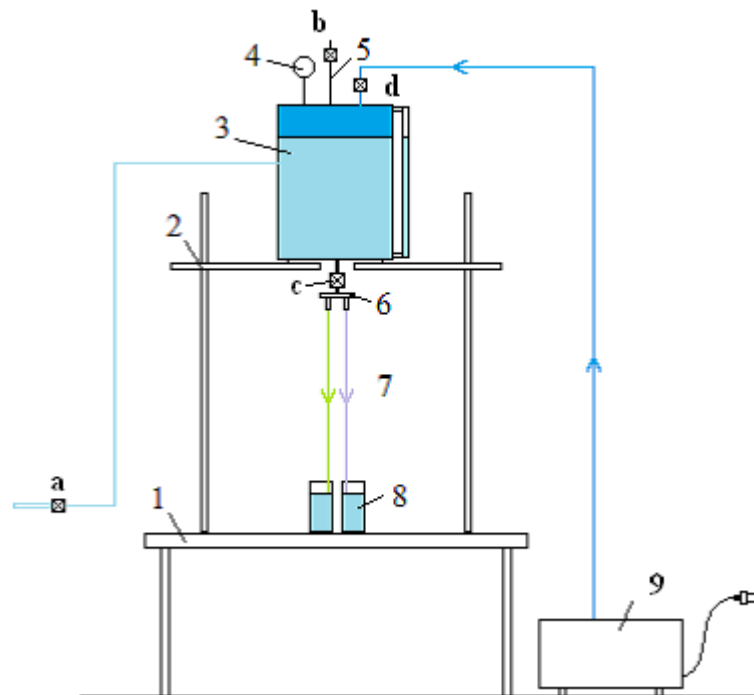
ნახ. 3.1. № 1 ექსპერიმენტული დანადგარის პრინციპული სქემა



ნახ. 3.2. სამილტუნე კოლექტორი



ნახ. 3.3. მიღტუჩების განლაგება სამიღტუჩე კოლექტორზე.



ნახ. 3.4. № 1 ექსპერიმენტული სტენდის სქემა

### 3.2. პლასტიკური და დრეკადი მილებისა და ლითონის მილების ჰიდრაულიკური წინააღმდეგობის შესადარებელი ექსპერიმენტების ჩატარების მეთოდოლოგია

პლასტიკური და დრეკადი მილებისა და ლითონის მილების ჰიდრაულიკური წინააღმდეგობის ურთიერთშესადარებლად დაგეგმილია ცდების ორი სერია: ა) თავისუფალი დინება ატმოსფერული წნევის პირობებში და ბ) იძულებითი დინება სხვადასხვა ჭარბი წნევის პირობებში. ორივე სერიაში ექსპერიმენტები უნდა ჩატარდეს ნებისმიერი შიგა და გარე დიამეტრის, მაგრამ ერთი და იგივე სიგრძის მქონე მილებზე. ამასთან ლითონის მილებისათვის კედლის სისქეს არავითარ მნიშვნელობას არ ვანიჭებთ, ხოლო პლასტიკური მასალებისაგან დამზადებული მილების კედლების სისქეები სასურველია მრავალნაირი იყოს.

განვიხილოთ ორივე სერიაში ცდების ჩატარების ჩვენს მიერ დამუშავებული მეთოდოლოგია.

ა). თავისუფალი დინების შემთხვევა.

ამ სერიის ცდების ჩატარება უნდა მოხდეს შემდეგი თანმიმდევრობით:

1. თავდაპირველად „c“ და „d“ ვენტილები (იხ. ნახ. 3.4) დაკეტილი უნდა იყოს, ხოლო „a“ და „b“ ვენტილები კი უნდა გაიღოს. წყალსადენის წყალი „a“ ვენტილიდან შევა საწყის მოცულობაში (3) ხოლო ამ მოცულობაში მყოფი ჰაერი გამოვა საჰაერო მილიდან „b“ ვენტილის გავლით. უნდა დაუკვირდით საწყის მოცულობაში მიღწეულ წყლის დონეს დონის მზომი მილის მეშვეობით და სასურველი დონის მიღწევის შემდეგ დაკეცოთ მხოლოდ „a“ ონკანი. აქვე უნდა აღინიშნოს, რომ მართალია საწყის ჭურჭელში ატმოსფერული წნევა იქნება, მაგრამ საცდელ მილებში განვითარებულ დინებაზე გარკვეულ ზეგავლენას მოახდენს ჭურჭელში თავდაპირველად არსებული წყლის დონე (სითხის სვეტის დაწნევა). ამიტომაც ყველა ცდა უნდა ჩატარდეს საწყის ჭურჭელში წყლის თავდაპირველი დონის ერთი და იგივე მნიშვნელობის დროს.

2. საწყის მოცულობაში სასურველი დონის მიღწევის შემდეგ უნდა დავიცადოთ დაახლოებით 10 წუთი, რათა მოცულობაში მყოფი წყალი

დაწინარდეს, რათა შევსების პროცესში წარმოქმნილმა მოძრაობამ სხვადასხვა ცდის დროს სხვადასხვა ზეგავლენა არ მოახდინოს საცდელ მიღებში განვითარებულ ნაკადებზე.

3. შემდეგ უნდა გავაღოთ „ც“ ონკანი და ერთდროულად დაწყებული უნდა იქნას დროის ათვლა წამსაზომის საშუალებით. საწყისი მოცულობიდან ურთიერთშესადარებელი მიღების გავლით წყალი ჩამოედინება მოცულობის გამზომი საშუალებებით აღჭურვილ ჭურჭლებში (8), რომელთა სიდიდისა და მიღების დიამეტრების სიდიდის მიხედვით ხდება მათი სხვადასხვა სიჩქარით შევსება. რომელიმე ჭურჭლის მაქსიმალურ დონემდე შევსებისას უნდა დაიკეტოს „ც“ ვენტილი და ერთდროულად დაფიქსირდეს „ც“ ვენტლის გაღებიდან დაკეტვამდე გასული  $\tau$  დროის ხანგრძლივობა.

4. შემდეგ უნდა გაიზომოს თითოეულ მიმღებ ჭურჭელში მოთავსებული წყლის მოცულობა  $v$  და ყველა მონაცემები შეტანილი უნდა იქნეს დაკვირვებათა ცხრილში, რომელშიც თითოეული მილის კედლის მასალა და გეომეტრიული პარამეტრები წინასწარ იქნება შეტანილი და ქვემოთ წარმოდგენილი სახისაა (იხ. ცხრილი 3.1).

ბ). იძულებითი დინების შემთხვევა.

ცდების ამ სერიის ჩატარება უნდა მოხდეს შემდეგი თანმიმდევრობით:

1. თავდაპირველად უნდა შევავსოთ საწყისი ჭურჭელი ზუსტად იმ თანმიმდევრობით, როგორც ცდების პირველი სერიის საწყის ეტაპზე, როგორც ეს აღწერილი იყო ა).1 და ა).2. პუნქტებში.

2. შემდეგ უნდა ჩაიკეტოს საჰაერო მილის ვენტილი „ბ“, გაიხსნას კომპრესორიდან მომავალი დამჭირხნი მილის ვენტილი „დ“ და ჩაერთოს ელექტროკვების ქსელში კომპრესორი 9 (იხ. ნახ. 3.4). ამავე დროს უნდა დაწყებული იქნას დაკვირვება საწყისი ჭურჭლის ხუფზე მიერთებულ მანომეტრზე 4 (იხ. ნახ. 3.4). საწყის ჭურჭელში განვითარებული ჭარბი წნევის სასურველი სიდიდის მიღწევის შემდეგ უნდა ჩაიკეტოს ვენტილი „დ“, გამოირთოს კომპრესორი ელექტროკვების ქსელიდან და დაკვირვებათა ცხრილში შეტანილი უნდა იქნეს მანომეტრის ჩვენება  $P$  (ჭურჭელში განვითარებული ჭარბი წნევის სიდიდე).

3. ამის შემდეგ ცდების ჩატარება უნდა მოვახდინოთ ზუსტად იმ თანმიმდევრობით, როგორც პირველ სერიაში, ანუ ა)3 და ა)4 პუნქტების მიხედვით.

მეორე სერიის ცდები უნდა გავიმეოროთ იმდენჯერ, რომ საწყის ჭურჭელში მიღწეული ჭარბი წნევების გარკვეულ დიაპაზონში ნორმალურად შეიძლებოდეს შესაძლო სხვადასხვა დამოკიდებულებების გრაფიკული აგება.

ამ სერიის ცდების შედეგები უნდა შევიტანოთ პირველი სერიის მსგავს დაკვირვებათა ცხრილში, რომელსაც დამატებული ექნება ერთი სვეტი საწყის ჭურჭელში განვითარებული ჭარბი წნევის მნიშვნელობის ჩასაწერად.

აქვე უნდა აღინიშნოს ერთი გარემოება. ჰიდრაულიკური წინააღმდეგობების ურთიერთშესადარებლად რა თქმა უნდა სასურველია ლითონისა და პლასტიკური მასალისაგან დამზადებულ მილებს ჰქონდეთ ერთი და იგივე შიგა დიამეტრი. რაც პრაქტიკულად ძალზე ძნელი განსახორციელებელია, რადგან ჩვენს კვლევებში უნდა გამოვიყენოთ უკვე დამზადებული და ბაზარზე სარეალიზაციოდ გამოტანილი მილები და მათი შიგა დიამეტრები, ცალკეული იშვიათი შემთხვევის გარდა, რა თქმა უნდა სხვადასხვა სიდიდის იქნება.

მიუხედავად აღნიშნულისა, ექსპერიმენტარულ მონაცემთა ანალიზის ჩვენს მიერ შემუშავებული მეთოდის საშუალებას იძლევა ხარისხობრივად ზუსტად შევადაროთ ერთმანეთს პლასტიკური მასებიდან და ლითონიდან დამზადებული მილების ჰიდრაულიკური წინააღმდეგობები. ამ მეთოდის კვებით ცალკე წარმოვადგენთ.

ცხრილი 3.1.

დაკვირვებათა ცხრილი №1 სერიის ცდებისათვის

ცდის №	მილის კედლის მასალა <sup>1</sup>	შიგა დიამეტრი d, მმ	გარე დიამეტრი <sup>2</sup> D, მმ	კედლის სისქე <sup>2</sup> δ, მმ	ჩამოდინების დრო τ, წმ	ჩამოდინებული მოცულობა υ, ლ	ჭარბი წნევა <sup>3</sup> P, ბარი
1							
2							
3							
...							

მითითებული შენიშვნები განმარტებულია შემდეგ გვერდზე.

### 3.1 ცხრილი-ის შენიშვნების განმარტება :

1. ლითონისაგან და პლასტიკური, დრეკადი მასალებისაგან დამზადებული მილების ჰიდრაულიკური წინააღმდეგობის ხარისხობრივი ურთიერთშედარებისათვის ჩასატარებელი ცდების ორივე სერიაში ამ სვეტში შეტანილი უნდა იქნას მხოლოდ პლასტიკური მასალებიდან დამზადებული მილების მასალების ზუსტი დასახელება, რადგან ვთვლით, რომ სხვადასხვა ლითონის მილების ჰიდრაულიკურ წინააღმდეგობებს შორის განსხვავებას ჩვენს მიერ დამუშავებული მეთოდიკით ვერ დავაფიქსირებთ დაბალი სიზუსტის გამო. ხოლო, ვინაიდან სხვადასხვა პლასტიკურ მასებისაგან დამზადებულ მილებს, სვარაუდოა, ექნებათ სხვადასხვა დრეკადობა, წელვადობა და ელასტიურობა და იმ შემთხვევაში თუ ეს მახასიათებლები რაიმე სერიოზულ გავლენას ახდენენ მილის გამტარუნარიანობაზე, მოსალოდნელია, რომ აღნიშნული მეთოდიკით მათი დაფიქსირება შესაძლებელი იქნება;
2. 1 შენიშვნა-ის ანალოგიურად ლითონის მილების გარე დიამეტრებისა და კედლის სისქეების დაფიქსირება აუცილებლობას არ წარმოადგენს;
3. ჭარბი წნევის მნიშვნელობები დაკვირვებათა ცხრილში შეიტანება მხოლოდ მეორე სერიის ცდების ჩატარებისას.

### 3.3. პლასტიკური და დრეკადი მილებისა და ლითონის მილების ჰიდრაულიკური წინააღმდეგობის შესადარებელი ექსპერიმენტების შედეგების დამუშავების მეთოდიკა

პლასტიკური და დრეკადი მილებისა და ლითონის მილების ჰიდრაულიკური წინააღმდეგობის შესადარებელი ექსპერიმენტების პირველი სერიის შესაბამის დაკვირვებათა ცხრილიდან ყოველი კონკრეტული მილისათვის ავიღებთ ჩამოღინებული წყლის  $u$ -ს მოცულობის და ჩამოღინების  $\tau$  დროის მნიშვნელობების ფარდობას  $u/\tau$ -ს და დავადგენთ ერთი და იგივე საწყისი პირობების შემთხვევაში ყოველი მილიდან განხორციელებულ მოცულობით ხარჯს:

$$V = \frac{v}{\tau}, \text{ ლ/წმ.} \quad (3.1)$$

შემდეგ შევადგენთ №2 და №3 ცხრილს, როგორც ეს ქვემოთაა წარმოდგენილი.

მართკუთხა კოორდინატა სისტემის აბსცისათა ღერძზე დავიტანთ როგორც ლითონის, ისე პლასტიკური მილების დიამეტრებს და ორდინატა ღერძზე კი მოცულობით ხარჯებს და ხსენებული ცხრილების საშუალებით დავიტანთ ცდით მიღებულ ყველა წერტილს. მხოლოდ ლითონის მილების შესაბამის წერტილებზე საშუალო კვადრატული გადახრის მეთოდით გაავტარებთ ფუნქციურ დამოკიდებულების,  $V = f(d)$  -ს შესაბამის წირს. გრაფიკები უნდა აიგოს ცალ-ცალკე ყოველი განხორციელებული წნევის მნიშვნელობებისათვის.

აღნიშნულ წირთან შედარებით სხვა წერტილების მეტნაკლებად სერიოზული გაბნევის შემთხვევაში შესაძლებელი იქნება ლითონისა და პლასტმასის მილების ჰიდრავლიკური წინაღობების ხარისხობრივი განსხვავების ანალიზი. არსებული მონაცემების საფუძველზე საჭიროების შემთხვევაში შესაძლებელი იქნება მილებში სითხის მოძრაობის სიჩქარის, დინების რეჟიმის მახასიათებელი რეინოლდსის კრიტერიუმის და სხვა მახასიათებლებისა და კავშირურთიერთობების დადგენა.

ცხრილი 3.2.

წყლის მოცულობითი ხარჯი სხვადასხვა დიამეტრის ლითონის მილებისათვის (ატმოსფერული წნევის პირობებში)

მილის ნომერი	№	1	2	3	4	5	და ასე შემდეგ (გამოცდილი მილების რაოდენობის მიხედვით)
მილის შიგა დიამეტრი	d, მმ						
წყლის მოცულობითი ხარჯი	V, ლ/წმ						



წყლის მოცულობითი ხარჯი სხვადასხვა დიამეტრის  
პლასტიკური მილებისათვის  
(ჭარბი წნევის პირობებში)

მილის ნომერი	№	1	2	3	4	5	და ასე შემდეგ (გამოცდილი მილების რაოდენობის მიხედვით)
ჭარბი წნევა	P, ბარი						
მილის შიგა დიამეტრი	d, მმ						
წყლის მოცულობითი ხარჯი	V, ლ/წმ						

**3.4. პლასტიკური და დრეკადი მილებითა და ლითონის მილებით  
განხორციელებული თბოგადაცემის პროცესების ურთიერთ  
შესადარებელი ექსპერიმენტული დანადგარი**

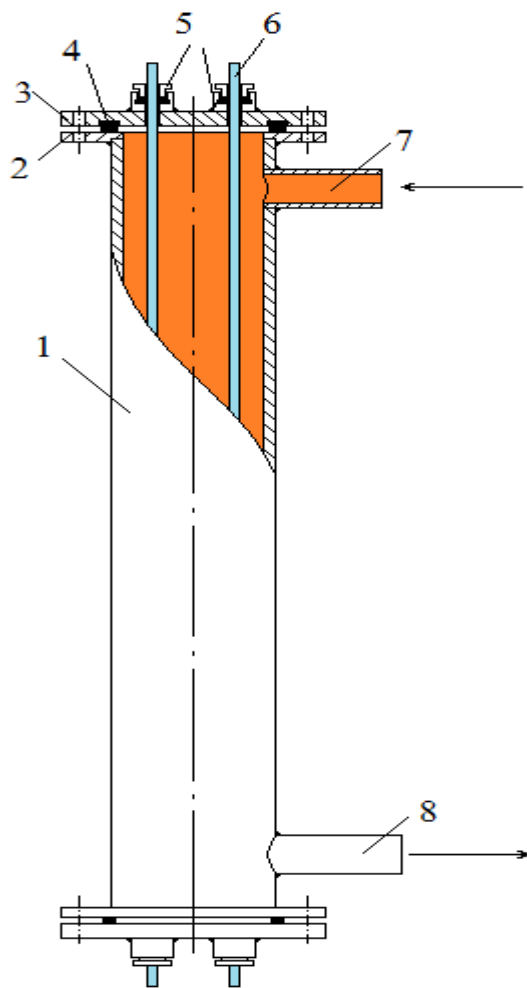
ლითონის მილებისა და ელასტიკური, პლასტიკური და დრეკადი მასალისაგან დამზადებული მილების გამოყენებით განხორციელებული სითბოგადაცემის პროცესების ინტენსიურობის ხარისხობრივი ურთიერთშედარებისათვის დამუშავებული იქნა მარტივი ექსპერიმენტული დანადგარის (შემდეგში დანადგარი № 2) პროექტი.

აღნიშნული № 2 დანადგარის საცდელი უბნის პრინციპული სქემა წარმოდგენილია 3.5 ნახ-ზე.

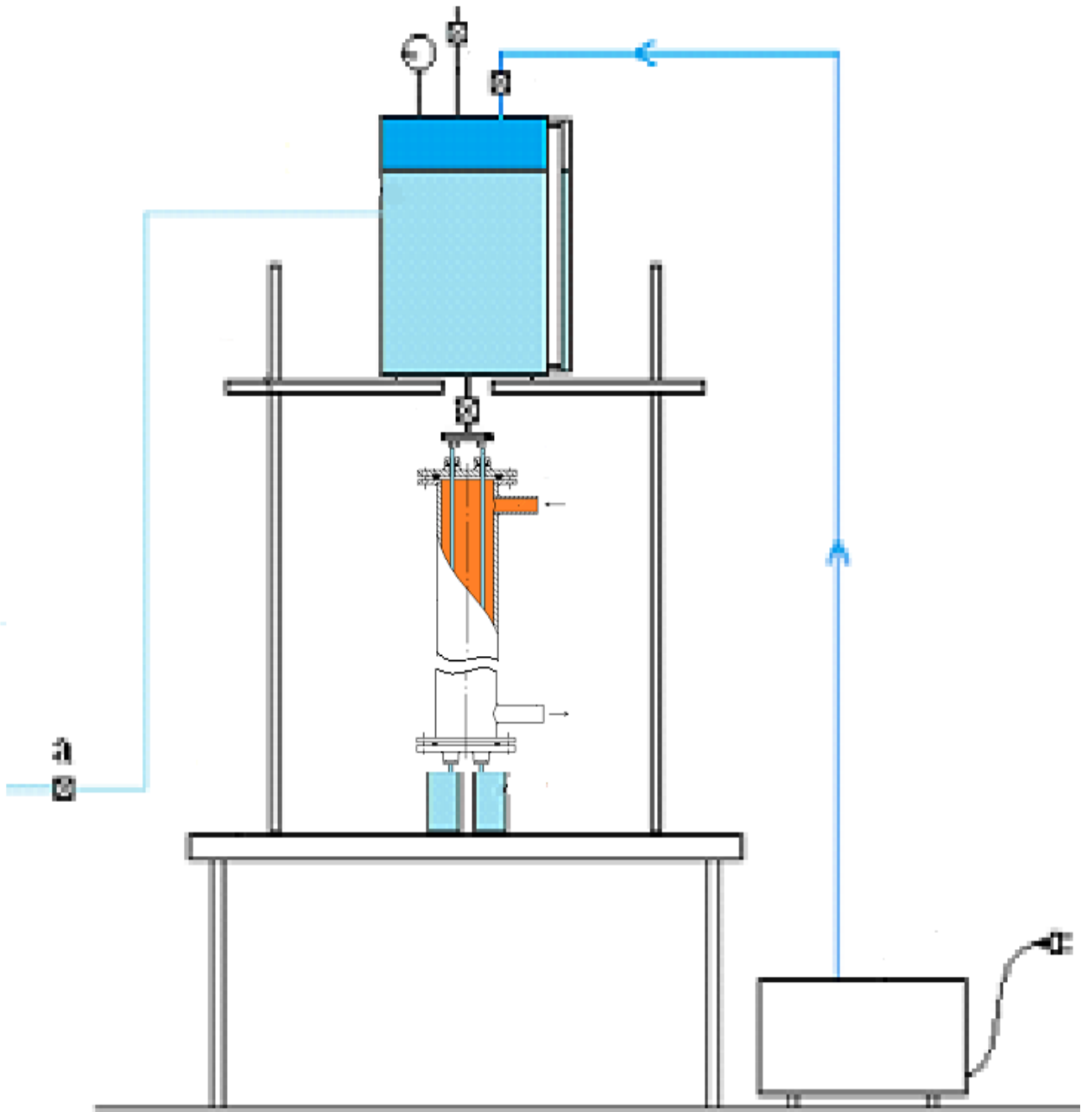
საცდელი უბანი შედგება ცილინდრული კორპუსისაგან (1), რომელსაც ორივე ბოლოზე მიდუღებული აქვს მილტუჩები (2). მილტუჩებზე ჭანჭიკებით დამაგრებულია ზედა და ქვედა ხუფები (3). მილტუჩებსა და ხუფებს შორის მოთავსებულია შემამჭიდროებელი საფენი (4). ზედა და ქვედა ხუფებზე მიდუღებულია ჰერმეტიზაციის განხორციელების უნარის მქონე შემაერთებელი კვანძები (5), რომლებშიც გაყრილია ლითონისა და პლასტმასის გამოსაცდელი მილები (6), რომელთა შორის სივრცეში ცხელი

თბოგადამტანის სამოძრაოდ საცდელი უბნის კორპუსზე მიერთებულია ორი მილი (7 და 8).

აღწერილი საცდელი უბანი თავსდება №1 ლაბორატორიული სტენდის სამილტუჩე კოლექტორის ქვეშ, რომლის მილტუჩებთანაც ხდება საცდელ უბანში გაყრილი გამოსაცდელი მილების ზედა ბოლოების მიერთება. ხსენებული გამოსაცდელი მილების ქვედა ბოლოები ჩაშვებულია სითხის მიმღებ ჭურჭლებში ისევე, როგორც ეს №1 დანადგარში იყო განხორციელებული (იხ. ნახ. 3.6).



ნახ. 3.5. პლასტიკური და დრეკადი მილებითა და ლითონის მილებით განხორციელებული თბოგადაცემის პროცესების ურთიერთ შესადარებელი ექსპერიმენტული დანადგარის გამზომი უბნის სქემა



ნახ. 3.6. № 2 ექსპერიმენტული სტენდი

### 3.5. პლასტიკური და დრეკადი მიღებითა და ლითონის მიღებით განხორციელებული თბოგადაცემის პროცესების ურთიერთ შესადარებელი ექსპერიმენტების ჩატარების მეთოდика

პლასტიკური და დრეკადი მიღებითა და ლითონის მიღებით განხორციელებული თბოგადაცემის პროცესების ინტენსიურობის ურთიერთ შესადარებელი ექსპერიმენტების ჩატარებისათვის №2 დანადგარის გამზომ „მილი-მილში“ ტიპის უბანში (იხ. ნახ. 3.5) მოთავსებული უნდა იყოს ლითონისა და პლასტიკური მასისაგან დამზადებული მიღების ერთი წყვილი და მათი ზედა და ქვედა ბოლოები მიერთებული უნდა იქნას შესაბამისად მიღტუჩებიან კოლექტორთან და წყლის მიმღებ ჭურჭლებთან.

ცდების ჩატარება უნდა მოხდეს როგორც ატმოსფერულ წნევაზე (წყლის თავისუფალი ჩამოდინებით), ისე სხვადასხვა წნევაზე (იძულებითი ჩამოდინებით).

გამზომ „მილი-მილში“ ტიპის უბანში ორგანიზებული უნდა იყოს ცხელი (ტემპერატურით  $70 \div 80$  °C) წყლის მოძრაობა თერმოსტატის გამოყენებით, ან გამზომი უბნის მილთაშორისი სივრცე შევსებული უნდა იყოს იმავე ტემპერატურის მქონე ცხელი წყლით.

მიღების ყოველი წყვილის გამოცდის დაწყების წინ უნდა დაფიქსირდეს როგორც საწყის ჭურჭელში არსებული წყლის, ასევე გამზომი უბნის მილთაშორის სივრცეში არსებული ცხელი წყლის ტემპერატურები (შესაბამისად  $t_1$  და  $t$ ).

ამის შემდეგ უნდა მოხდეს საწყისი ჭურჭლის წყალსადენის წყლით შევსება ისე, როგორც ეს აღწერილი იყო № 1 დანადგარზე ცდების ჩატარების მეთოდикаში (იხ. § 4, პუნქტი „ა“. 1 და „ა“. 2).

შემდეგ უნდა განხორციელდეს წყლის ჩამოდინება როგორც ატმოსფერულ წნევაზე, ისე სხვადასხვა ჭარბ წნევაზე იმავე თანმიდევრობებით, როგორც ეს ხდებოდა მიღების ჰიდრაულიკური წინაღობების ურთიერთ შესადარებელ ექსპერიმენტებში მხოლოდ იმ განსხვავებით, რომ ამჯერად დაკვირვებათა ცხრილში (იხ. ცხრილი 3.4) სხვა მონაცემებთან ერთად შეტანილი უნდა იყოს მიმღებ ჭურჭლებში ჩამოდინებული წყლის ტემპერატურების მნიშვნელობები.

დაკვირვებათა ცხრილი<sup>1</sup> პლასტიკური და დრეკადი მილებითა და ლითონის მილებით განხორციელებული თბოგადაცემის პროცესების ინტენსიურობის ურთიერთ შესადარებელი ექსპერიმენტების შედეგების შესატანად<sup>2</sup>

მონაცემის დასახელება	პირობითი აღნიშვნა და განზომილება	წყვილი № 1		წყვილი № 2		და ასე შემდეგ (გამოცდილი წყვილების რაოდენობის მიხედვით)
		ლითონის მილი	პლასტ. მილი	ლითონის მილი	პლასტ. მილი	
ჭარბი წნევა	P, ბარი					
ჩამოდინების დრო	$\tau$ , წმ					
ჩამოდინებული მოცულობა	v, ლ					
ჩამოდინებული წყლის ტემპერატურა	$t_2$ , °C					
მილის შიგა დიამეტრი	d, მმ					
გარე დიამეტრი	D, მმ					
კედლის სისქე	$\delta$ , მმ					
მილის კედლის მასალა <sup>3</sup>	–					
თბოგამტარობის კოეფიციენტი	$\lambda$ , ვტ/მ <sup>2</sup> .გრად.					

შენიშვნა:

1. წინამდებარე დაკვირვებათა ცხრილი უნდა შედგეს ცალ-ცალკე საწყის ჭურჭელი განხორციელებული წნევის ყოველი მნიშვნელობისათვის;
2. სასურველია, რომ სხვადასხვა ცდაში შენარჩუნებული იყოს საწყის მოცულობაში არსებული წყლისა და გამზომი უბნის მილთაშორის სივრცეში არსებული ცხელი წყლის საწყისი ტემპერატურების მუდმივი მნიშვნელობები;
3. სასურველია მილის კედლის მასალის ზუსტი დასახელების ცოდნა, რათა შემდეგ შესაძლებელი იყოს მისი თბოგამტარობის კოეფიციენტის მნიშვნელობის დადგენა სპეციალური ლიტერატურის გამოყენებით.

### 3.6. პლასტიკური და დრეკადი მიღებითა და ლითონის მიღებით განხორციელებული თბოგადაცემის პროცესების ურთიერთ შესადარებელი ექსპერიმენტების შედეგების დამუშავების მეთოდика

ისევე როგორც პლასტიკური და დრეკადი მიღებისა და ლითონის მიღების ჰიდრაულიკური წინაღობის შესადარებელი ექსპერიმენტების პირველი სერიის შესაბამის დაკვირვებათა შედეგების დამუშავებისას, თბოგადაცემის პროცესების ურთიერთ შესადარებელი ექსპერიმენტების შედეგების დამუშავებას დაიწყო მთლიანი ყოველი გამოცდილი წყვილის ორივე მილისათვის დავადგენთ ლითონის და პლასტიკური მილებიდან გამზომი უბნის გავლით განხორციელებულ მოცულობითი ხარჯების მნიშვნელობებს (შესაბამისად  $V_{\text{ლით.}}, \text{ ლ/წმ}$  და  $V_{\text{პლასტ.}}, \text{ ლ/წმ}$ ).

შემდეგ ფორმულით

$$Q = V \cdot c (t_2 - t_1) , \text{ ვტ} \quad (3.2)$$

ვიანგარიშებთ თითოეული მილის მიერ გამზომი უბნიდან დროის ერთეულში გამოტანილი სითბოს რაოდენობებს  $Q_{\text{ლით.}}$  და  $Q_{\text{პლასტ.}}$ .

ამის შემდეგ ცნობილი გამოსახულებით

$$R_{\text{თბ.}} = \frac{\delta}{\lambda} , \quad \frac{\text{მ}^2 \cdot \text{გრად.}}{\text{ვტ}} \quad (3.3)$$

გამოვთვლით ყოველი გამოცდილი მილის თბურ წინაღობებს. ამ განტოლებაში  $\delta$  მილის კედლის სისქეა მეტრებში, ხოლო  $\lambda$  – მილის მასალის თბოგამტარობის კოეფიციენტი, ვტ / მ·გრად.

ყოველი მილისთვის გამოვთვლით აგრეთვე თბოგადაცემის შიგა და გარე ზედაპირების საშუალო ფართობს  $F_{\text{საშ.}}$ . ამ გამოთვლას ვაწარმოებთ ფორმულით:

$$D_{\text{საშ.}} = \frac{d+D}{2}$$

და

$$F_{\text{საშ.}} = \pi \cdot D_{\text{საშ.}} \cdot L ,$$

სადაც  $D_{საშ.}$  და  $F_{საშ.}$  შესაბამისად არიან მილის საშუალო დიამეტრი, (მ) და კედლის საშუალო ფართობი (მ<sup>2</sup>).

როდესაც ცილინდრული კედლის შიგა და გარე დიამეტრები დიდად არ განსხვავდება ერთმანეთისაგან, მაშინ რაც მეტია ასეთი ცილინდრის თბოგაცემის საშუალო ფართობი, ზედაპირის ნორმალის მიმართულებით კედელში მით მეტი სითბო გაივლის. ამასთან ეს სითბო მით ნაკლებია, რაც მეტია ცილინდრული კედლის თბური წინაღობა. ორივე ამ ფაქტორის ერთდროული გათვალისწინებისათვის შემოვიღოთ ფარდობა

$$\varphi = \frac{F_{საშ.}}{R_{თბ.}}$$

(3.4)

რომლის სიდიდე ცალსახადაა დაკავშირებული ცილინდრულ კედელში რადიალური მიმართულებით გავლილი სითბოს რაოდენობასთან და რომელიც უნდა გავიანგარიშოთ ყოველი გამოცდილი მილისათვის. ამ ფარდობას დავარქვათ თბოგადაცემის გეომეტრიული კოეფიციენტი.

ბოლოს, ყოველი გამოცდილი მილების წყვილებისათვის უნდა ვიანგარიშოთ პროცენტული განსხვავებები როგორც თბოგადაცემის გეომეტრიულ მახასიათებლებს შორის ( $\varphi_{ლით.}$  და  $\varphi_{პლასტ.}$ ), ასევე თითოეული მილის მიერ გამზომი უბნიდან დროის ერთეულში გამოტანილი სითბოს რაოდენობებს შორის ( $Q_{ლით.}$  და  $Q_{პლასტ.}$ ). პროცენტული განსხვავებების გაანგარიშებისას ყოველ წყვილში ლითონის მილების კუთვნილ სიდიდეებს მივიღებთ 100 %-ის ტოლად.

ამის შემდეგ გაანგარიშებათა შედეგები უნდა შევიტანოთ ცხრილში (იხ. ცხრილი 5), რომელიც ქვემოთაა წარმოდგენილი. ამასთან ეს ცხრილი უნდა შედგეს ცალ-ცალკე ამასთან ეს ცხრილი უნდა შედგეს ცალ-ცალკე საწყის ჭურჭელში განხორციელებული წნევის ყოველი მნიშვნელობისათვის.

იმ შემთხვევაში თუ გამოცდილი მილების რომელიმე წყვილს აღენიშნება ზემოთხსენებულ გეომეტრიულ მახასიათებლებსა და მილების მიერ გამზომი უბნიდან გამოტანილ სითბოს რაოდენობებს შორის მკვეთრად გამოხატული სხვადასხვა პროცენტული განსხვავება, შესაძლებელი იქნება ლითონისა და პლასტმასის მილებში განხორციელებულ თბოგადაცემის

პროცესებს შორის ხარისხობრივი განსხვავების ანალიზი. არსებული მონაცემების საფუძველზე საჭიროების შემთხვევაში შესაძლებელი იქნება თბოგადაცემის კოეფიციენტისა და სხვა მახასიათებლების და კავშირურთიერთობების დადგენა.

ცხრილი 3.5

ლითონისა და პლასტმასის მიღებში განხორციელებული თბოგადაცემის პროცესის ინტენსიურობის ურთიერთშედარება

მონაცემის დასახელება	პირობითი აღნიშვნა და განზომილება	წყვილი № 1		წყვილი № 2		და ასე შემდეგ (გამოცდილი წყვილების რაოდენობის მიხედვით)	
		ლითონის მილი	პლასტ. მილი	ლითონის მილი	პლასტ. მილი		
ჭარბი წნევა	P , ბარი						
დროის ერთეულში გამოტანილი სითბო	Q , ვტ						
თბოგადაცემის გეომეტრიული მახასიათებელი	φ , $\frac{მ \cdot ვტ}{გრად}$						
პროცენტული განსხვავება გეომეტრიულ მახასიათებელში	%	100		100			
პროცენტული განსხვავება გამოტანილ სითბოში	%	100		100			



## თავი IV

### პლასტიკური, დრეკადი მილებისა და ლითონის მილების ჰიდრაულიკური წინაღობის შესადარებელი ექსპერიმენტების შედეგები

#### 4.1. გამოკვლეული მილები და ჩატარებული გაზომვების შედეგები

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ენერგეტიკის და ტელეკომუნიკაციის ფაკულტეტის ენერჯის არატრადიციული და განახლებადი წყაროების მიმართულების საცდელ ლაბორატორიულ უბანზე განხორციელებული იქნა პლასტიკური, დრეკადი მილებისა და ლითონის მილების ჰიდრაულიკური წინაღობის შესადარებელი ექსპერიმენტული დანადგარის მოქმედი მაკეტი, რომელზეც გამოკვლეული იქნა 11 სხვადასხვა მასალისა და სხვადასხვა დიამეტრის მილი. მათ შორის 5 მილი (4; 5,6; 8,4; 11 და 13 მმ-იანი დიამეტრებით) იყო სხვადასხვა მეტალის და სხვადასხვა კედლის სისქის. მათი დაწვრილებითი დახასიათება ზედმეტად მიგვაჩნია, რადგან წინამდებარე ნაშრომში ისინი განიხილება როგორც სტაციონალური ხისტკედლებიანი არხები.

დანარჩენი 6 მილი (3; 5,8; 6; 6,5; 8 და 13,5 მმ-იანი დიამეტრებით), რომლებიც ელასტიკურ და დრეკად კედლებიან არხებს უნდა მივაკუთვნოთ, აღებული გვექონდა ბაზარზე არსებული ნომენკლატურიდან. მათ შორის იყო როგორც სამედიცინო გადასხმების მილსადენები, ასევე სხვა სითხეებისათვის გამოსაყენებელი პლასტიკური მილები. სამედიცინო გადასხმის მილსადენის კედლის სისქე 0,5 მმ-ის ტოლი იყო, ხოლო დანარჩენი მილების კედლის სისქე 1 მმ-ს და მეტს შეადგენდა. ყველაზე ელასტიკური და გარეგნულად რბილი იყო 6,5 მმ-იანი დიამეტრის მქონე მილი, რომელიც მასალითაც განსხვავდებოდა სხვა პოლიმერული მილებისაგან.

ყველა გამოკვლეული მილის სიგრძე იყო ერთი და იგივე და შეადგენდა 112 სმ-ს. ყოველ მათგანში წყლის ჩამოდინებისას ზედა საწყის ჭურჭელში მოთავსებული წყლის დონე იყო ერთი და იგივე.

ცდები ჩატარებული იყო ზემოთ წარმოდგენილი მეთოდის მიხედვით. დროის ათვლა ხდებოდა ელექტრონული წამსაზომის გამოყენებით. წყლის მიმღები ქვედა ჭურჭელი წარმოადგენდა პოლიმერული მასალისაგან დამზადებულ ვიწროყელიან ქილას. დროის ათვლა იწყებოდა ხსენებულ ქილაში გამოსაცდელი მილიდან გამომავალი ნაკადის ჩაშვების მომენტში და წამსაზომის მოქმედება წყლებოდა შევსებული მიმღები ჭურჭლის ვიწრო ყელიდან სითხის გადმოღვრის მომენტში.

ცდების სიზუსტის გასაზრდელად ყოველი გამოსაცდელი მილისათვის ტარდებოდა რამოდენიმე ათეული ცდა და შევსების დრო იანგარიშებოდა როგორც მიღებული შედეგების საშუალო არითმეტიკული.

სულ ჩატარებული იქნა ცდების ორი სერია. ერთ შემთხვევაში წნევათა სხვაობა საწყის ჭურჭელსა და მილის ქვედა გამოსასვლელ კვეთს შორის შეადგენდა 1520 მმ-წყ.სვ და მეორე შემთხვევაში კი 2025 მმ-წყ.სვ.

გამოკვლევული მილების შიგა დიამეტრები და ქვედა მიმღები ჭურჭლის შევსების დროის საშუალო მნიშვნელობები წარმოდგენილია 4.1 და 4.2 ცხრილებში.

ცხრილი 4.1

დაკვირვებათა შედეგები  $\Delta P=1520$  მმ წყ. სვ. ტოლი დაწნევისას

ცდის №	მილის კედლის მასალა	შიგა დიამეტრი d, მმ	ჩამოდინების დრო $\tau$ , წმ	ჩამოდინებული მოცულობა $u$ , ლ
1	პოლიმერი	13,5	8,62	2,9 ლიტრი
2	სპილენძი	13	9,05	
3	უქ. ფოლ.	11	15,21	
4	სპილენძი	8,4	33,68	
5	პოლიმერი	8	38,15	
6	რეზინი	6,5	57,08	
7	პოლიმერი	6	75,92	
8	პოლიმერი	5,8	82,62	
9	ფოლადი	5,6	80,02	
10	უქ. ფოლ	4	178,87	
11	პოლიმერი	3	343,89	

დაკვირვებათა შედეგები როცა  $\Delta P=2025$  მმ წყ. სვ.

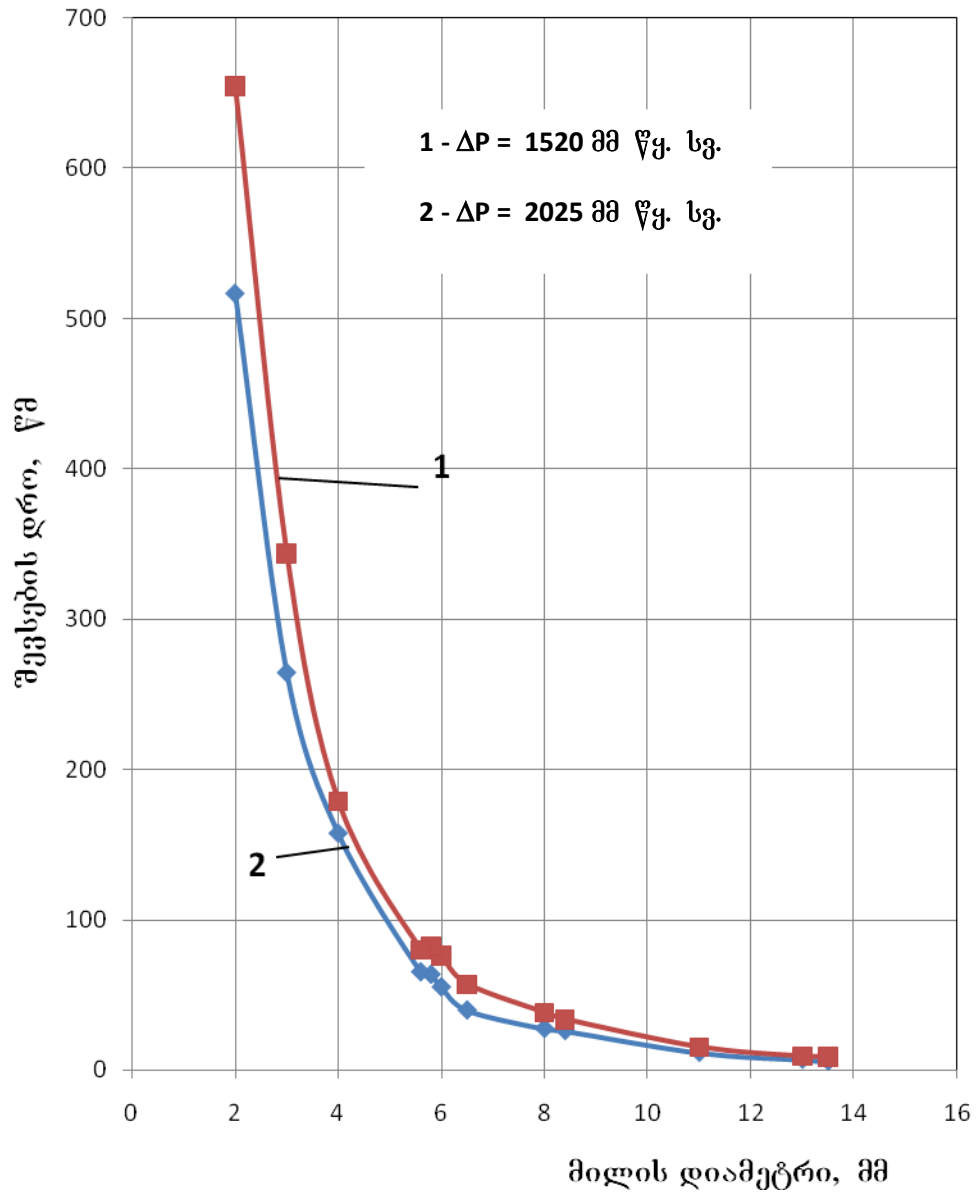
ცდის №	მილის კედლის მასალა	შიგა დიამეტრი d, მმ	ჩამოდინების დრო $\tau$ , წმ	ჩამოდინებული მოცულობა $u$ , ლ
1	პოლიმერი	13.5	5.73	2,9 ლიტრი
2	სპილენძი	13	6.96	
3	უქ. ფოლ.	11	11.61	
4	სპილენძი	8.4	26.11	
5	პოლიმერი	8	27.53	
6	რეზინი	6.5	39.81	
7	პოლიმერი	6	55.22	
8	პოლიმერი	5.8	63.54	
9	ფოლადი	5.6	65.23	
10	უქ. ფოლ	4	157.52	
11	პოლიმერი	3	264.53	

#### 4.2. ცდომილებათა შეფასება

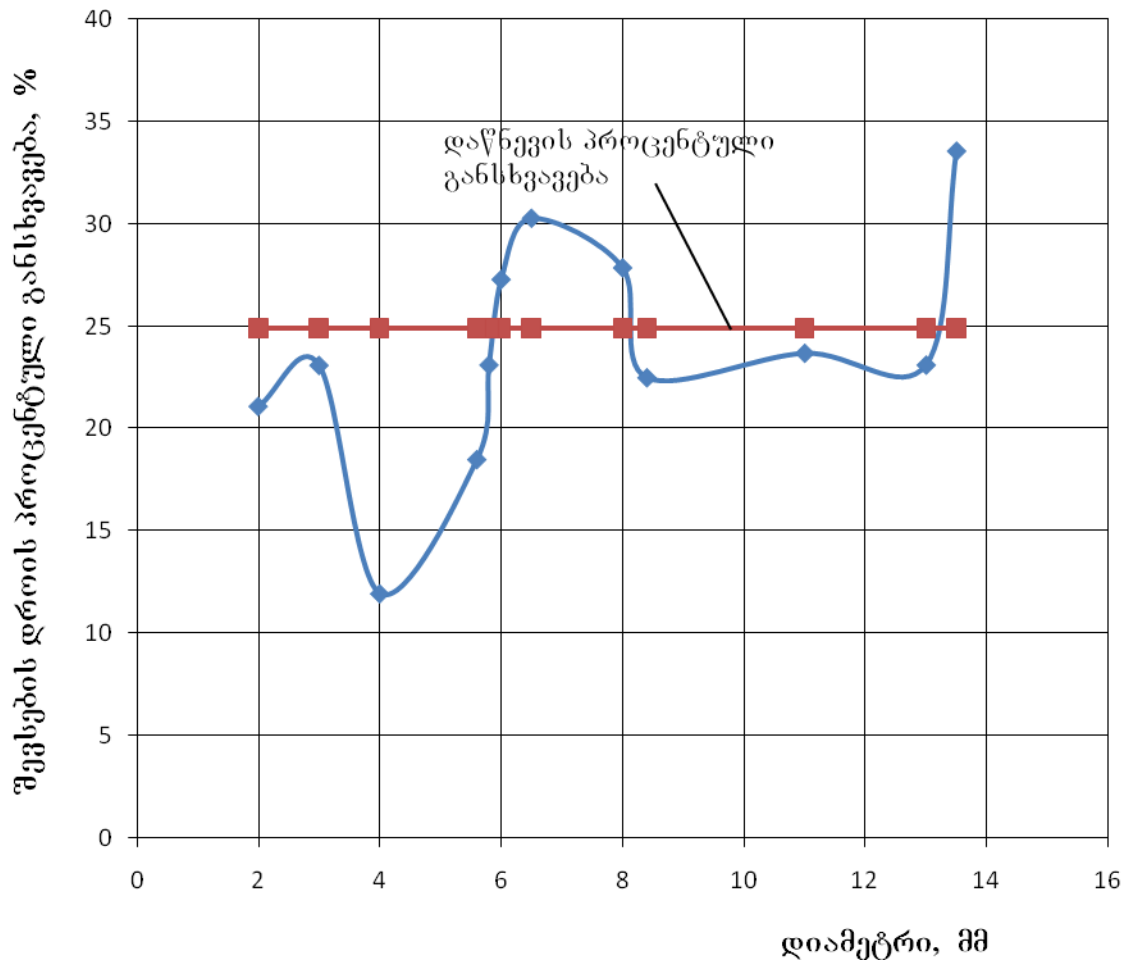
ვინაიდან ჩვენს მიზანს წარმოადგენდა მეტალისა და პოლიმერული მასალებისაგან დამზადებული მილების ჰიდრაულიკური წინააღობების ხარისხობრივი ურთიერთშედარება, ჩვენ არ მივმართეთ ცდომილებათა ანალიზის კლასიკურ მეთოდებს და შემოვიფარგლეთ მხოლოდ ცდომილებათა შეფასების მარტივი მიახლოებითი მეთოდით. კერძოდ ერთმანეთს შევადარეთ შედარებით დაბალი დაწნევის დროს სხვადასხვა მილებით ერთი და იგივე 2,91 ლ ტევადობის მიმღები ჭურჭლის შევსების

დროის ხანგრძლივობა და იგივე დროის ხანგრძლივობა იმავე ცდების განსორციელებისას შედარებით მაღალი დაწნევის პირობებში.

ამ მიზნით 4.1 და 4.2 ცხრილებში შეტანილი უშუალო გაზომვებით მიღებული მონაცემების მიხედვით ავადგეთ 4.1ნახ-ზე წარმოდგენილი მრუდები. ამ გრაფიკზე მეტალისა და პლასტმასის მიღები ერთმანეთისაგან არ არიან განცალკევებული, ვინაიდან საინტერესო იყო სხვადასხვა დაწნევის დროს გაზომილი შევსების ხანგრძლივობათა შედარება. როგორც ამ ნახაზიდან ჩანს, დაწნევის გაზრდით 1520 მმ წყ. სვ.-დან 2025 მმ წყ. სვ.-მდე თერთმეტივე გამოცდილი მილისათვის შემცირდა ერთი და იგივე მოცულობის მიმღები ჭურჭლის შევსების დრო, რაც სავსებით ლოგიკურია. მაგრამ ჩვენ შევადარეთ დაწნევის პროცენტული ცვლილება, რომელიც ყველა მილისათვის ერთი და იგივე იყო, ყოველი მილის შევსების დროის პროცენტულ ცვლილებას. ეს შედარება წარმოდგენილია 4.2ნახ-ზე, საიდანაც ჩანს, რომ ყველა მილისათვის ერთი და იგივე, დაახლოებით 25 %-ით განსხვავებული დაწნევებისას, ჩამოდინების დროის მიღებულ მნიშვნელობებს შორის განსხვავება სხვადასხვაა, მნიშვნელოვნად არის გაბნეული და მიუხედავად იმისა, რომ ცვლილება ერთი მიმართულებისაა (დაწნევის მომატებით შევსების დროის ხანგრძლივობა ყველა მილისათვის შემცირდა), იგი ხან დაწნევის პროცენტულ ცვლილებაზე მეტია (მაქსიმალურ შემთხვევაში + 8 %-ით) და ხანაც კი მასზე ნაკლები (მინიმალურ შემთხვევაში – 13 %-ით). აღნიშნული ორი წერტილის, როგორც გამონაკლისის, ამოგდებით ხსენებული ცვლილებები  $\pm 7$  %-ში ეტევა. მაშასადამე შეიძლება დავასკვნათ, რომ ჩვენს მიერ ჩატარებული გამოკვლევების ცდომილება უკეთეს შემთხვევაში  $\pm 7$  %-ია და უარეს შემთხვევაში დაახლოებით  $\pm 15$  %-ს უნდა შეადგენდეს.



ნახ. 4.1. მიმღები ჭურჭლის შეკვების დროის დამოკიდებულება სხვადასხვა მასალის მილის დიამეტრზე



ნახ. 4.2. დაწნევის მნიშვნელობებს შორის არსებული განსხვავების შედარება შეცდომის დროის დაფიქსირებულ მნიშვნელობებს შორის არსებულ განსხვავებასთან.

### 4.3. გაზომვების შედეგების დამუშავება და ანალიზი

4.1 და 4.2 ცხრილებში შეტანილი მონაცემები დავამუშავეთ მე-3 თავში წარმოდგენილი მეთოდის მიხედვით და პროგრამა Microsoft Office Excel-ის გამოყენებით. დამუშავების შედეგები მოყვანილია 3-ე დანართში მოთავსებულ ცხრილებში (3.1 ცხრილიდან 3.4 ცხრილამდე წყლის სვეტის

1520 მმ-ის ტოლი დაწნევისათვის და 3.5 ცხრილიდან 3.8 ცხრილამდე წყლის სვეტის 2025 მმ-ის ტოლი დაწნევისათვის).

ხსენებულ ცხრილებში წარმოდგენილი მონაცემების მიხედვით, იგივე Microsoft Office Excel-ის პროგრამის მეშვეობით ავაგეთ სხვადასხვა დიაგრამები, რომლებიც ნაჩვენებია ნახაზებზე 4.3 ÷ 4.10.

ნახაზებზე 4.3 და 4.4 წარმოდგენილია შევსების დროის დამოკიდებულება დიამეტრზე ცალკე ცალკე, მეტალის და პოლიმერული მილებისათვის შესაბამისად 1520 მმ.წყ.სვ-ის ტოლი და 2025 მმ.წყ.სვ-ის დაწნევისათვის. ორივე შემთხვევაში მრუდებს აქვთ ერთნაირი ხასიათი, როგორც მეტალის ისე პოლიმერული მილებისათვის და დიამეტრის მომატებით შევსების დრო ექსპონენციალურად კლებულობს, რაც ასე თუ ისე მეტყველებს გაზომვების მეტნაკლებად ნორმალურად შესრულებაზე, ხოლო რაიმე სხვა განსაკუთრებული დასკვნის გამოტანა ამ გრაფიკების მიხედვით შეუძლებელია.

ანალოგიური დასკვნის გამოტანა შეიძლება აგრეთვე მიღებულ მონაცემებზე განვითარებული ხარჯის (მოცულობითი სიჩქარის, ლ/წმ) დიამეტრზე დამოკიდებულებებიდან, რომლებიც 4.5 და 4.6 ნახაზებზეა წარმოდგენილი. აქ მოყვანილი გრაფიკების მიხედვით მეტალისა და პოლიმერული მასალის მიღები პრაქტიკულად ერთნაირ ხარჯებს ქმნის, მაგრამ ამ მხრივ მათ შორის მეტი განსხვავება შეიმჩნევა ცდების მეორე სერიაში ანუ შედარებით მეტი დაწნევის შემთხვევაში. თუმცა 8 მმ-იან და 13,5 მმ-იან პოლიმერულ მილებს შორის შუალედური წერტილის არ არსებობა ვერ გვაძლევს ამ დასკვნის თამამად გაკეთების შესაძლებლობას.

სხვადასხვა მიღებულ მონაცემებზე განვითარებული გადატანითი (წრფივხაზოვანი) სიჩქარის დამოკიდებულება დიამეტრზე წარმოდგენილია 4.7 და 4.8 ნახაზებზე. ნახ. 4.7-ზე ჩანს, რომ  $\Delta P=1520$  მმ წყ. სვ-ის ტოლი დაწნევისას, როგორც მეტალის, ასევე პოლიმერულ მილებში განვითარებული ნაკადების მოძრაობის სიჩქარეები ძირითადად ერთმანეთს ემთხვევა. მიუხედავად ამისა აშკარად ჩანს, რომ ზემოთ ხსენებულ ყველაზე ელასტიკურ მილში (დიამეტრით 6,5 მმ) წყლის მოძრაობის სიჩქარე დაახლოებით უტოლდება 8,4 მმ-იან მეტალის მილში განვითარებულ სიჩქარეს და მეტია ვიდრე 8 მმ-იან

პოლიმერულ, მაგრამ სქელკედლა და მოუხეშავ მილში განვითარებული სიჩქარე. აღნიშნული განსხვავება კიდევ უფრო დიდია  $\Delta P=2025$  მმ წყ. სვ.-ის ტოლი დაწნევის შემთხვევაში, რაც კარგად ჩანს 4.8ნახ-ზე. ამავე ნახაზიდან ჩანს, რომ პოლიმერულ მილებში განვითარებული ნაკადების სიჩქარეები აჭარბებს მეტალის მილებში განვითარებულ სიჩქარეებს, თუმცა უნდა აღინიშნოს რომ ყველა ეს განსხვავება პრაქტიკულად თავსდება ცდომილებათა ჩვენს მიერ ზემოთ მიღებული შეფასების უარესი შემთხვევის ფარგლებში, ხოლო მცირე საიმედოობით უკეთეს შემთხვევისათვის მიღებულ ცდომილებათა ფარგლებს გარეთაა.

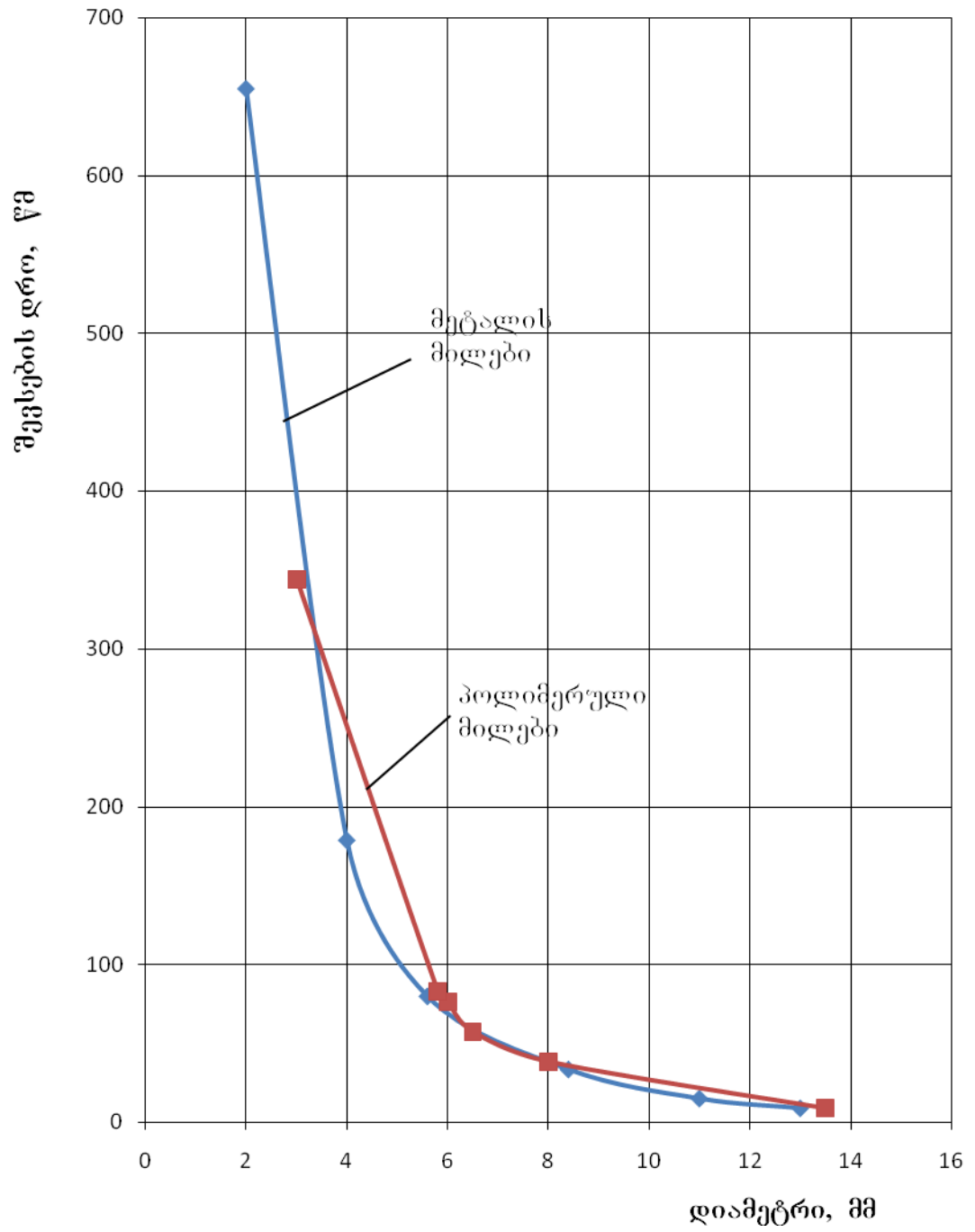
მიუხედავად ნათქვამისა აუცილებელია აღინიშნოს, რომ 4.3ნახ.-ზე და 4.4ნახ-ზე წარმოდგენილი უშუალოდ გაზომვებით მიღებული შედეგების მიხედვით ცალ-ცალკე მეტალისა და პოლიმერული მასალის მილებისათვის აგებული დამოკიდებულებების სიმდოვრე ცალსახად მეტყველებს მიღებული შედეგების გარკვეულ საიმედოობაზე.

იმის გასარკვევად თუ დინების როგორი რეჟიმები მყარდება ჩვენს მიერ გამოკვლეულ მილებში, ვიანგარიშეთ აგრეთვე რეინოლდსის რიცხვის მნიშვნელობები, რომლებიც შესაბამისი დაწნევის შემთხვევებისათვის წარმოდგენილია 4.9 და 4.10. ნახაზებზე.

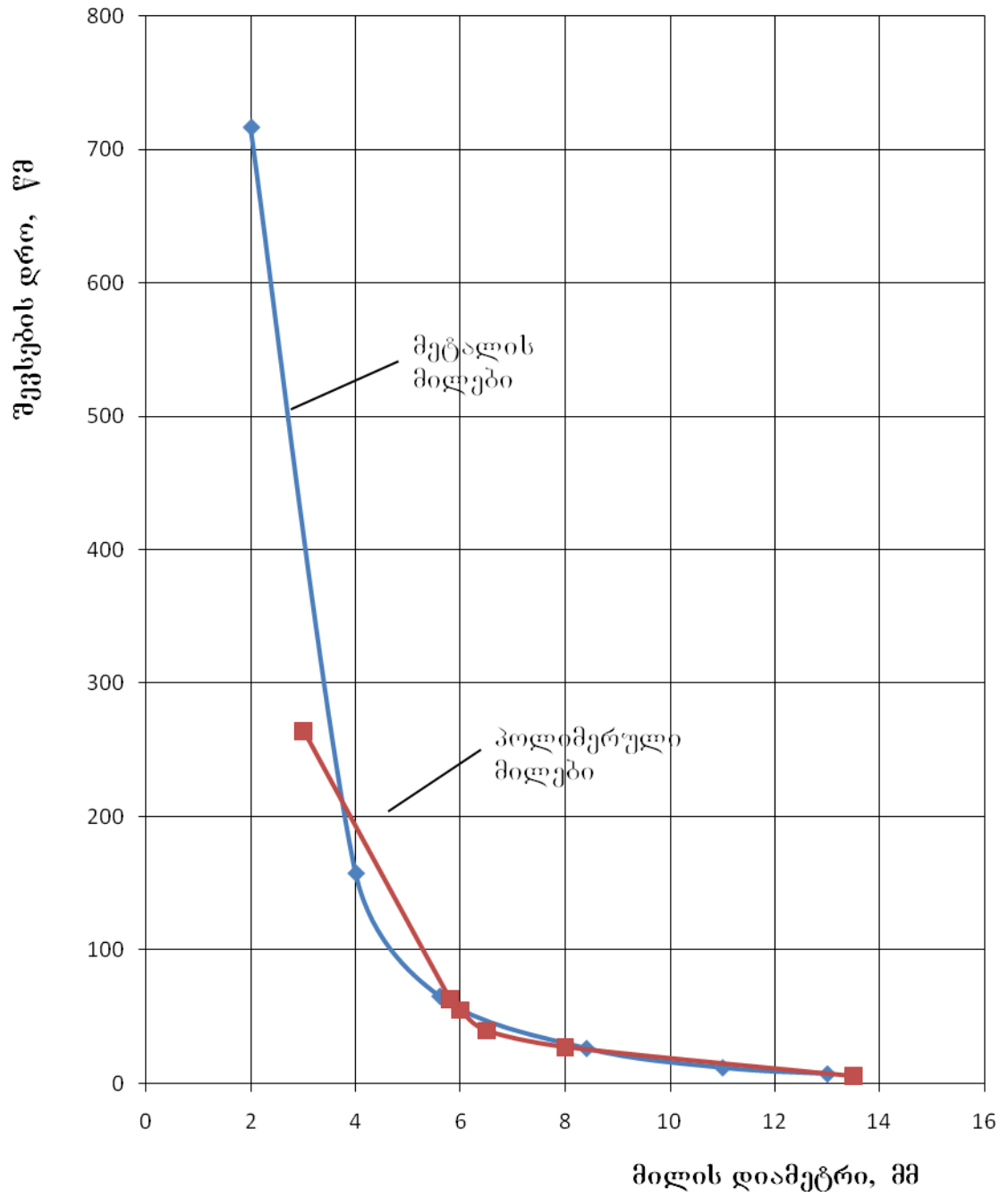
ცდებში განხორციელებული სიჩქარისა და დაწნევის ექსპერიმენტულ მონაცემებით და მილების გეომეტრიული პარამეტრებით ვიანგარიშეთ აგრეთვე მილების ჰიდრაულიკური წინააღმდეგობების მნიშვნელობები, რისთვისაც გამოვიყენებთ დარსის ცნობილი ფორმულა. ამ გაანგარიშებათა შედეგები მოყვანილია 4.11 და 4.12 ნახაზებზე.

დასასრულ უნდა აღინიშნოს, რომ ჩვენ მიერ შემუშავებული ექსპერიმენტული დანადგარის პროექტის, ექსპერიმენტებში გამოყენებული მოქმედი მაკეტის, ცდების ჩატარების და მონაცემთა დამუშავების წარმოდგენილი მეთოდის ბაზაზე შესაძლებელია საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ენერგეტიკის და ტელეკომუნიკაციის ფაკულტეტის თბო-და ჰიდროენერგეტიკის დეპარტამენტის მიმართულებებისათვის ლაბორატორიული დანადგარის შექმნა და სასწავლო პროცესში გამოყენება.

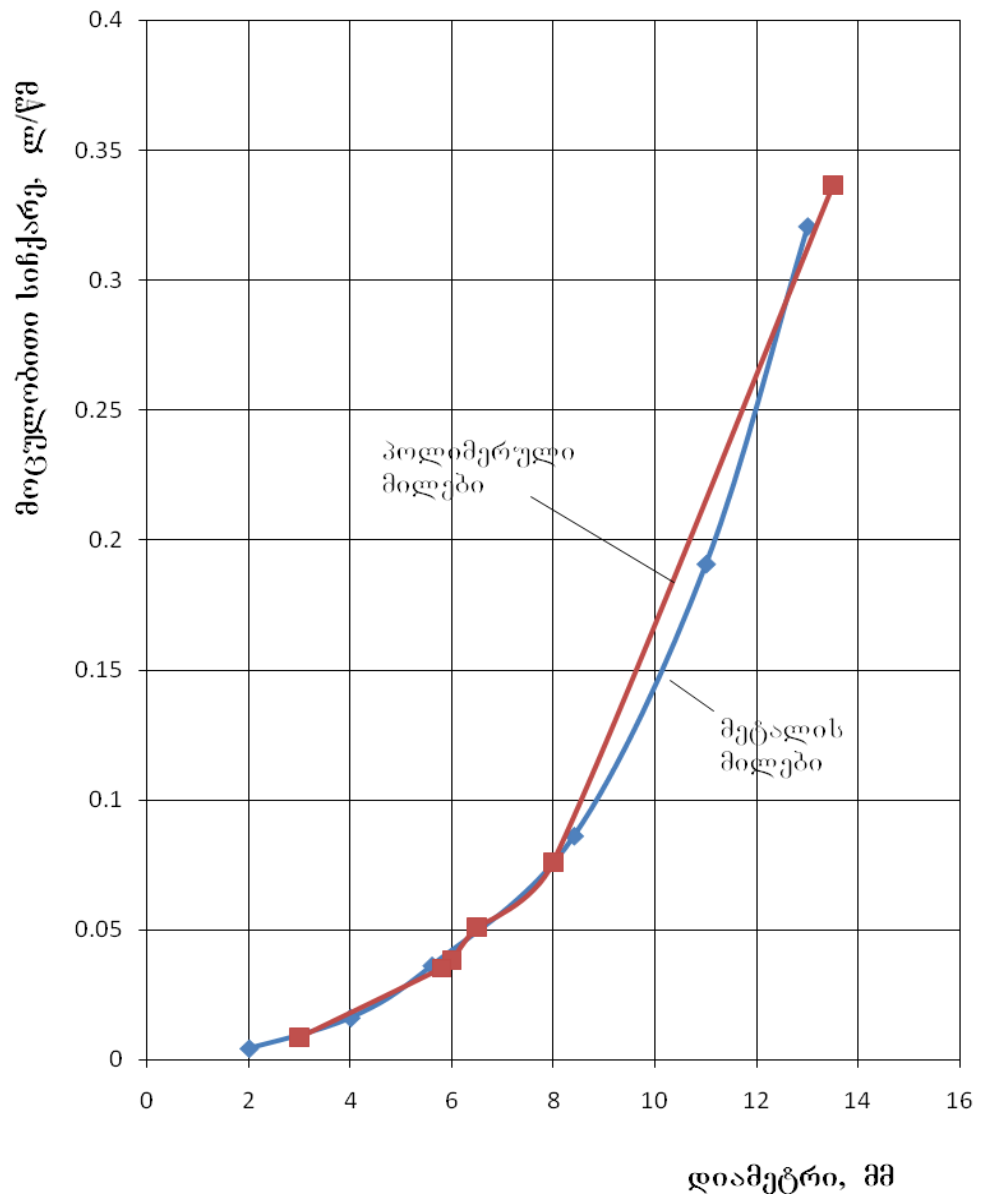




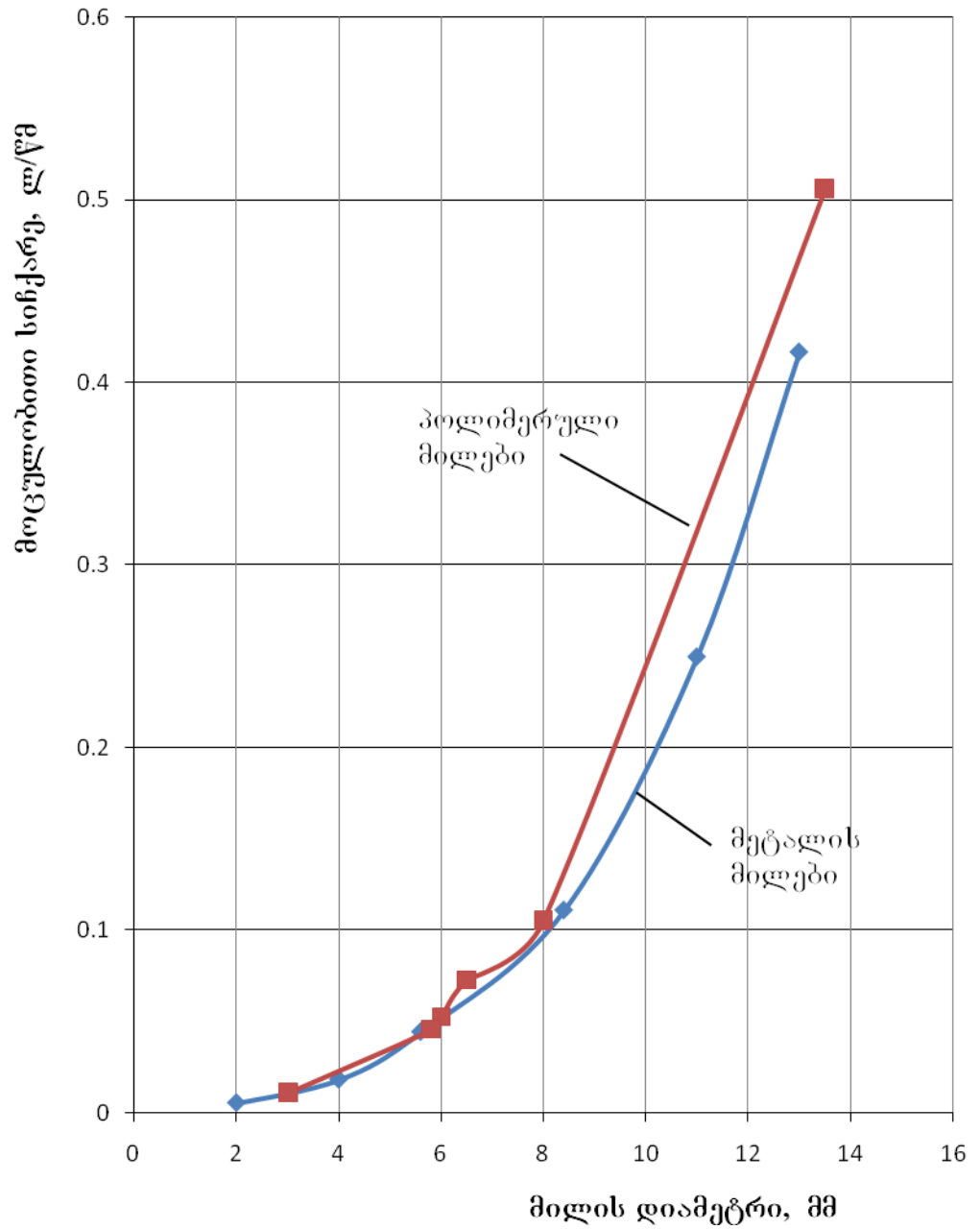
ნახ. 4.3. შეკვების დროის დამოკიდებულება დიამეტრზე  
 მეტალის და პოლიმერული მილებისათვის  
 ( $\Delta P = 1520$  მმ წყ. სვ.)



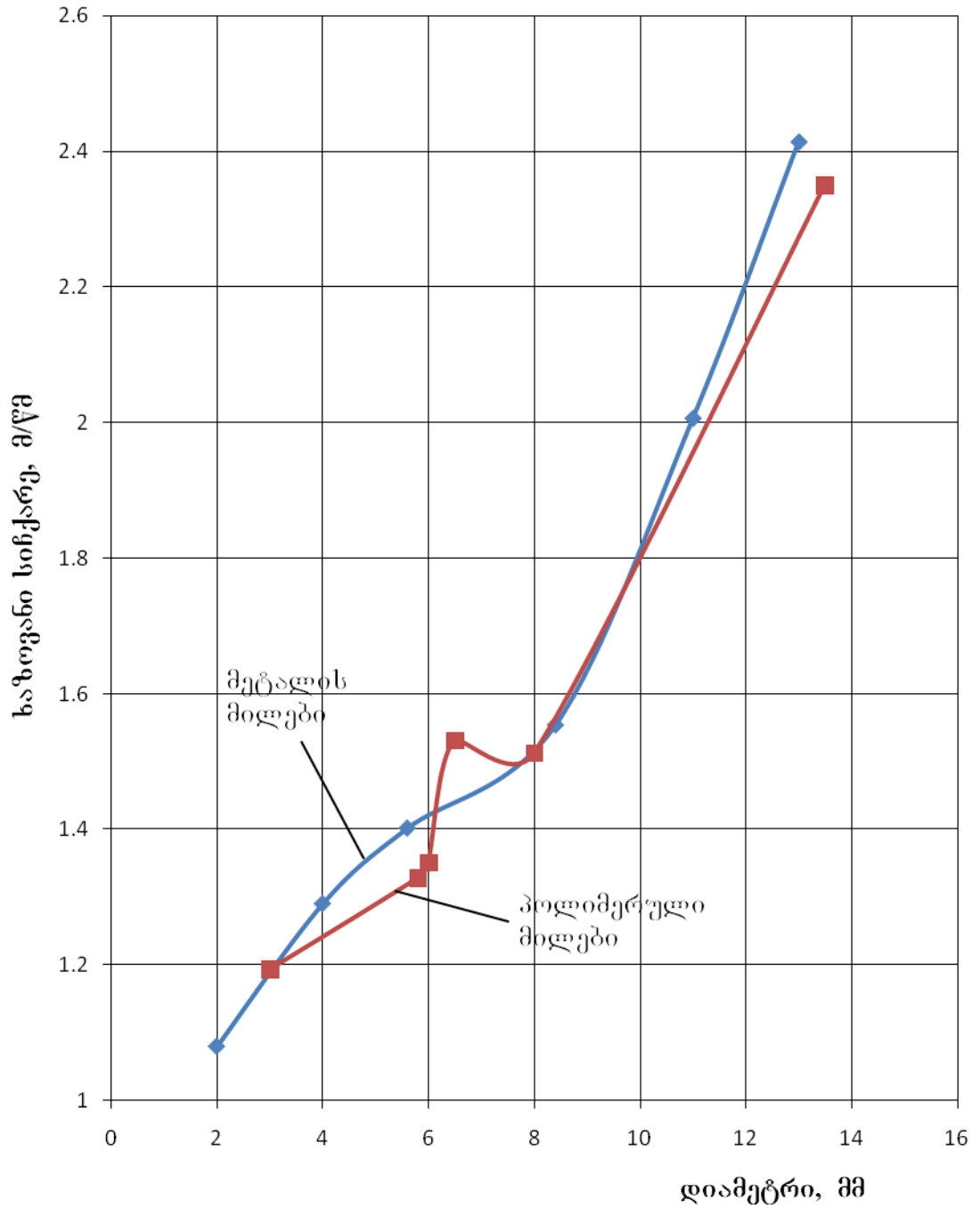
ნახ. 4.4. შეცხვის დროის დამოკიდებულება დიამეტრზე  
 მეტალის და პოლიმერული მილებისათვის  
 ( $\Delta P = 2025$  მმ წყ. სვ.)



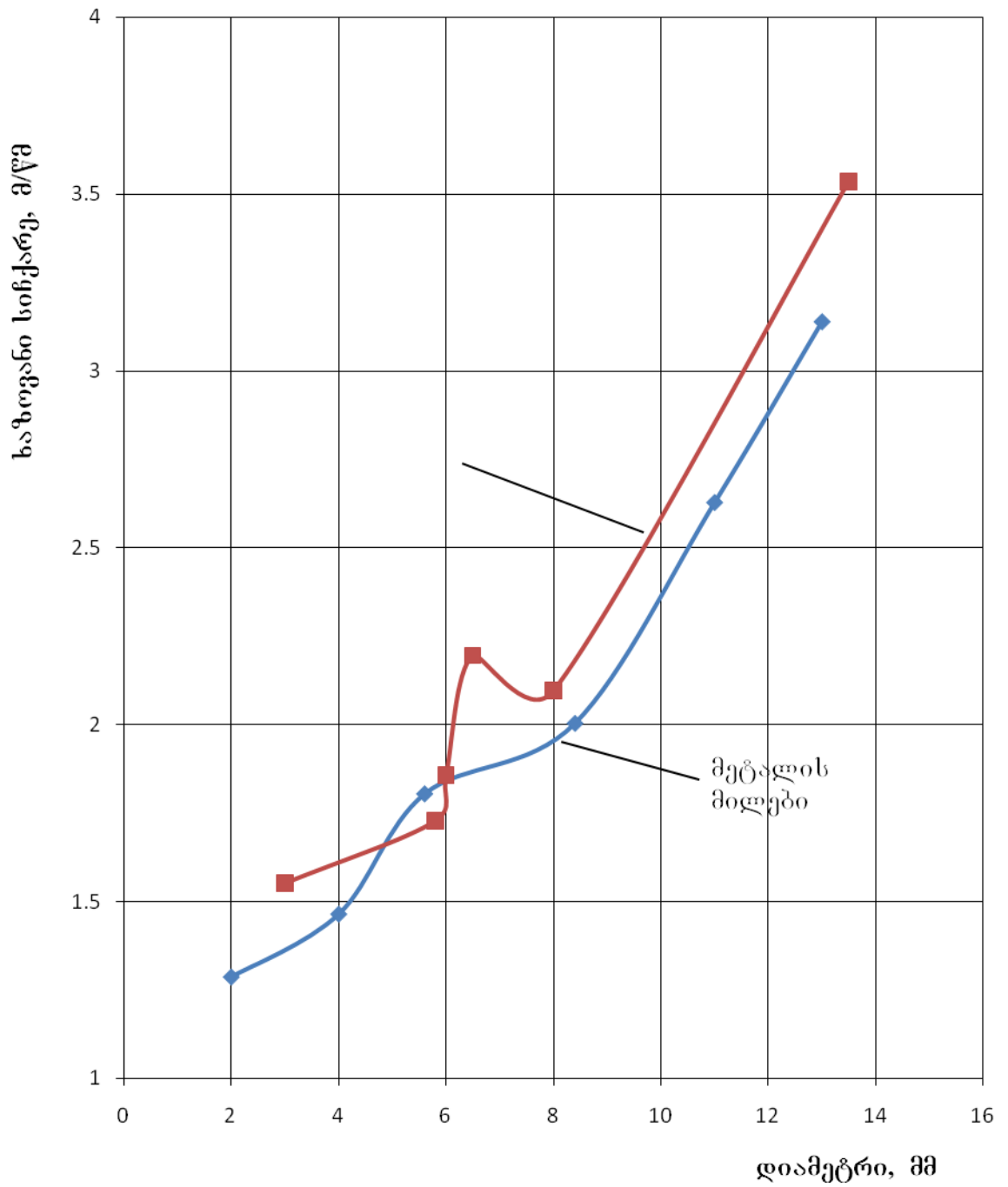
ნახ. 4.5. მოცულობითი სიჩქარის დამოკიდებულება დიამეტრზე მეტალის და პოლიმერული მიღებისათვის ( $\Delta P = 1520$  მმ წყ. სვ.)



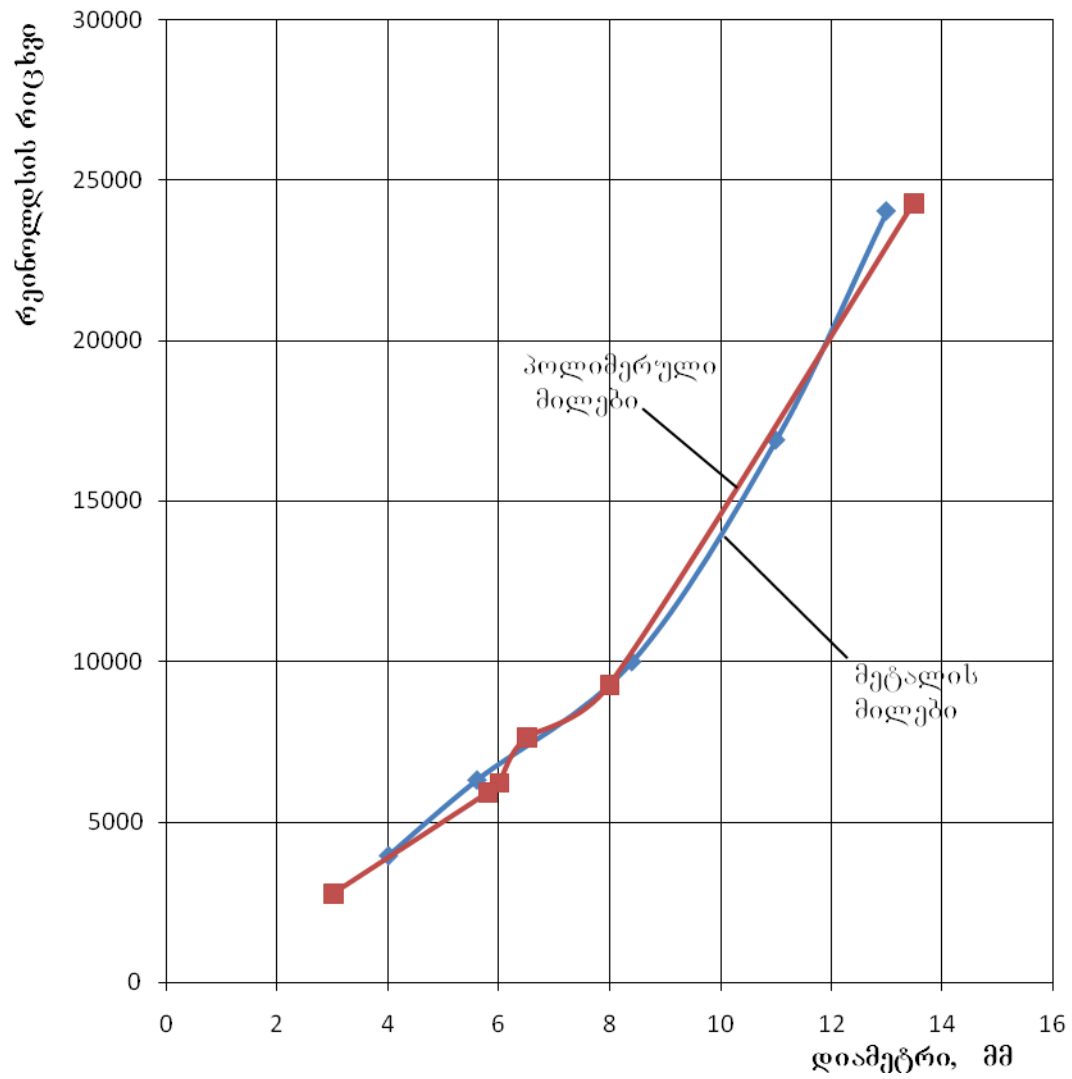
ნახ. 4.6. მოცულობითი სიჩქარის დამოკიდებულება დიამეტრზე მეტალის და პოლიმერული მილებისათვის ( $\Delta P = 2025$  მმ წყ. სვ.)



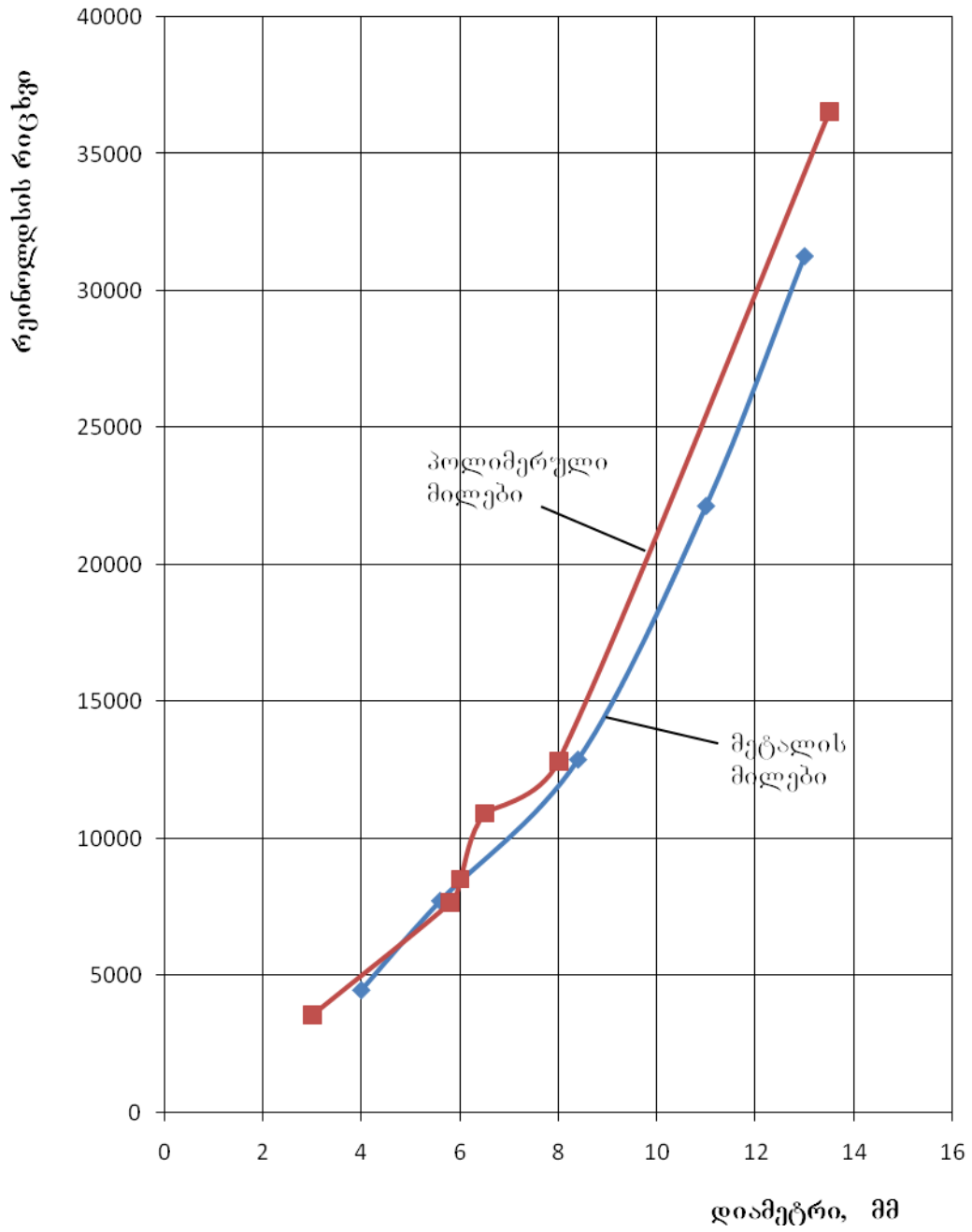
ნახ. 4.7. საზოვანი სიჩქარის დამოკიდებულება დიამეტრზე  
( $\Delta P = 1520$  მმ წყ. სვ.)



ნახ. 4.8. საზოგადო სიჩქარის დამოკიდებულება დიამეტრზე  
( $\Delta P = 2025$  მმ წყ. სვ.)

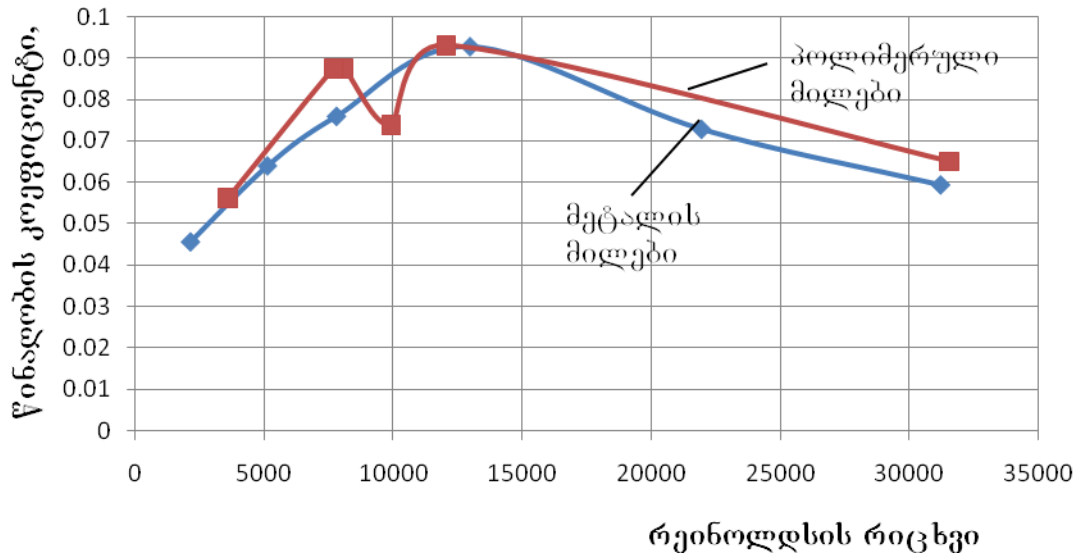


ნახ. 4.9. რეინოლდსის რიცხვის დამოკიდებულება დიამეტრზე  
( $\Delta P = 1520$  მმ წყ. სვ.)

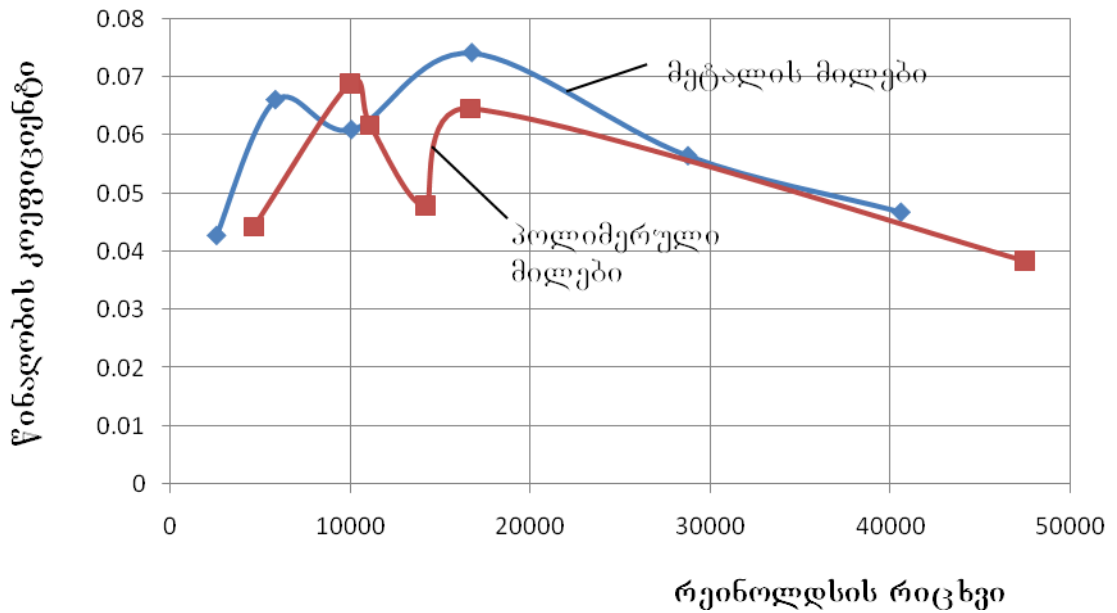


ნახ. 4.10. რეინოლდსის რიცხვის დამოკიდებულება დიამეტრზე  
( $\Delta P = 2025$  მმ წყ. სვ.)





ნახ. 4.11. რეინოლდსის რიცხვის დამოკიდებულება დიამეტრზე  
( $\Delta P = 1520$  მმ წყ. სვ.)



ნახ. 4.12. რეინოლდსის რიცხვის დამოკიდებულება დიამეტრზე  
( $\Delta P = 2025$  მმ წყ. სვ.)

## თავი V

### დრეკადი, პლასტიკური და ელასტიკური რულონური მასალის აეროდინამიკური საყრდენის ექსპერიმენტული გამოკვლევა

#### 5.1. დრეკად პოლიმერულ აფსკსა და სტაციონარულ ცილინდრულ კედელს შორის მოთავსებული აეროდინამიკური საყრდენის მუშაობის პირობები

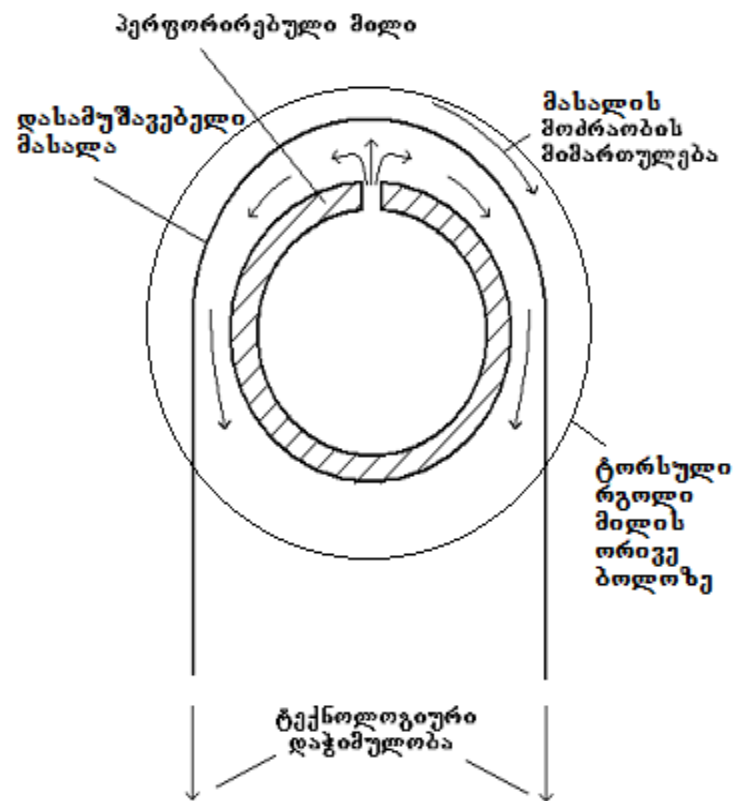
წინამდებარე ნაშრომის 1.2.2 პარაგრაფში ავლნიშნეთ, რომ აეროდინამიკური საყრდენი შეიძლება გამოყენებული იქნას პოლიმერული აფსკების რულონების სახით წარმოებაში, კერძოდ ამ აფსკების თერმული დამუშავებისათვის საჭირო დანადგარებში. გარკვეული სიგანის მქონე პოლიმერული აფსკი გადადებული უნდა იყოს რამოდენიმე აეროდინამიკურ საყრდენზე და მოძრაობდეს ზიგზაგისებურად, აფსკის გრძივი მიმართულებით. რულონური, პოლიმერული მასალების თბური დამუშავების დანადგარებში ჩვენ მიერ შემოთავაზებული აეროდინამიკური საყრდენი კონსტრუქციულად წარმოადგენს უძრავ და ერთი რომელიმე მსახველის მთელ სიგრძეზე გარკვეული ბიჯით პერფორირებულ მილს, რომელშიც ერთი ან ორივე ბოლოდან განუწყვეტლივ შედის ჰაერი. პერფორაციიდან გამომდინარე ჰაერი ექცევა თვით მილსა და მილზე გადადებულ პოლიმერული მასალის აფსკს შორის და ქმნის ეგრეთწოდებულ საჰაერო ბალიშს. ამასთან აეროდინამიკურ საყრდენში (საჰაერო ბალიშში) მოთავსებული ჰაერის წნევის მიერ საჰაერო ბალიშის არეში აფსკზე განვითარებული ძალა უნდა უზრუნველყოფდეს აფსკის სამოძრაოდ და გადასახვევად აუცილებელ ტექნოლოგიური დაჭიმულობის დაძლევას. წინააღმდეგ შემთხვევაში დასამუშავებელი მასალის აფსკი უშუალოდ პერფორირებულ მილს გადაედება, ჩაკეტავს ჰაერის გამოსასვლელებს და დაიწყებს უძრავ მილზე სრიალს, რაც კიდევ უფრო გაზრდის დაჭიმულობის ძალას და, საბოლოოჯამში, მასალის მთლიანობის დარღვევას გამოიწვევს.

იმ შემთხვევაში, როცა მიღში არსებული წნევა საკმარისია, პერფორაციიდან გამოსული ჰაერის ჭავლები გაწევენ მასალას გარკვეულ მანძილზე მილის ზედაპირიდან, რის გამოც დასამუშავებელ მასალასა და მილს შორის გაჩნდება გარკვეული სისქის ღრეო. ამ უკანასკნელში წარმოიქმნება ჰაერის ორი ურთიერთსაპირისპირო მიმართულების ნაკადი, რომელთაგან ერთი იმოძრაებს მოძრავი დასამუშავებელი მასალის შემხვედრი მიმართულებით, მილის კედლის მყარ, სტაციონარულ ცილინდრულ ზედაპირსა და აეროდინამიკურ საყრდენზე შემომავალ დასამუშავებელ მასალას შორის. ამის შემდეგ კი ჰაერი საჰაერო ბალიშიდან ატმოსფეროში გამოედინება. ანალოგიურად იმოძრაებს მეორე ნაკადი დასამუშავებელი მასალის მოძრაობის თანხვედრი მიმართულებით. აღწერილი აეროდინამიკური საყრდენი წარმოდგენილია 5.1 ნახაზზე.

განსაკუთრებით ყურადსაღებია ის ფაქტი, რომ პოლიმერული აფსკების თერმული დამუშავების შემოთავაზებული კონსტრუქცია ერთდროულად უზრუნველყოფს როგორც მასალის აბსოლუტურად ხახუნის გარეშე გადაადგილებას, რაც მნიშვნელოვნად ამადლებს დანადგარის ენერგოეფექტურობას, ასევე მასალისათვის, მისი თერმული დამუშავებისათვის აუცილებელი სითბოს რაოდენობის ინტენსიურ მიწოდებას. ამისათვის აეროდინამიკურ საყრდენში მიწოდებული ჰაერი გაცხელებული უნდა იყოს მოცემული პოლიმერული მასალის თერმული დამუშავებისათვის აუცილებელ ტემპერატურამდე. პოლიმერული აფსკის აეროდინამიკური საყრდენის არეში მოთავსებული ნაწილი კარგ თბურ კონტაქტშია გაცხელებულ ჰაერთან, რითაც უზრუნველყოფილი ხდება აფსკის გაცხელება სასურველ ტემპერატურამდე. ამასთან, ზიგზაგისებური მოძრაობის გამო, პოლიმერული აფსკი გაცხელებულ ჰაერთან კონტაქტში შედის თავის ხან ერთი და ხან მეორე ზედაპირით, რაც უზრუნველყოფს აფსკის ორივე მხრიდან თანაბარ გაცხელებას და თხელი აფსკების შემთხვევაში აფსკის განივკვეთში არსებული ტემპერატურული ველის პრაქტიკულად სრულ იზოთერმულობას.

თბურად დასამუშავებელ პოლიმერულ მასალაზე სითბოს მიწოდების აღწერილი პროცესი მიგვაჩნია ერთერთ, ყველაზე ინტენსიურ

ენერგომიწოდების პროცესად, ვინაიდან აეროდინამიკურ საყრდენში ცხელი ჰაერი შემოდის ჭავლების სახით, რომლებიც უშუალოდ მასალის ზედაპირებზეა მიმართული და როგორც ცნობილია [35], სითბოს მიმღებ ზედაპირზე თბოგადამტანის ჭავლური ზემოქმედება ხასიათდება ყველაზე მაღალი თბოგაცემის კოეფიციენტით კონვექციური თბოგაცემის სხვა შემთხვევებს შორის.



ნახ. 5.1. აეროდინამიკური საყრდენი პოლიმერული აფსკისათვის

აეროდინამიკური საყრდენის, ანუ პერფორირებული მილის სიგრძე დასამუშავებელი რულონური მასალის სიგანის ტოლი უნდა იყოს. ამასთან მილის ორივე ბოლოზე დამაგრებული უნდა იყოს ტორსული რგოლები, ერთგვარი კედლები, რომლებიც არ მისცემენ საჰაერო ბალიშში მყოფ ჰაერს გვერდებიდან, პერფორირებული მილის დერძული მიმართულებით გამოსვლის საშუალებას.

საჰაერო ბალიშიდან გამოდინებული ჰაერის რაოდენობის კომპენსაცია უნდა მოხდეს პერფორირებულ მილში შემოსული ჰაერით და მაშასადამე, გარკვეული წარმადობის, წნევისა და სიმძლავრის ჰაერშემბერის გამოყენებით.

საესებით ცხადია, რომ დასამუშავებელ მასალასა და მილის ზედაპირს შორის წარმოქმნილი ღრეჩოს (საჰაერო ბალიშის) სისქე დამოკიდებულია პერფორაციიდან გამომავალი ჰაერის ხარჯის სიდიდეზე, ხოლო ეს უკანასკნელი, ავსკის დაჭიმულობის ძალის მუდმივობის შემთხვევაში, თავის მხრივ დამოკიდებულია ჰაერშემბერის მიერ პერფორირებულ მილში განვითარებულ წნევაზე.

აქვე უნდა აღინიშნოს, რომ საჰაერო ბალიშის სისქე აეროდინამიკური საყრდენის ამა თუ იმ კვეთში მნიშვნელოვნადაა დამოკიდებული მოცემულ კვეთში განვითარებულ სტატიკურ წნევაზე და სხვადასხვა კვეთში განვითარებული ამ წნევათა ერთობლიობა განსაზღვრავს საჰაერო ბალიშზე გადადებული დასამუშავებელი მასალის ფორმას.

მარტივი ანალიზით დგინდება, რომ საჰაერო ბალიშის საწყის კვეთში, უშუალოდ პერფორაციის სიახლოვეს ნაკადის სტატიკური წნევა თავისი სიდიდით უნდა აკომპენსირებდეს როგორც მასალის მეორე ზედაპირზე მოქმედ ატმოსფერულ წნევას, ასევე მასალის ტექნოლოგიური დაჭიმულობის ძალას და დასამუშავებელ მასალასა და მილს შორის წარმოქმნილი ღრეჩოს აეროდინამიკური წინააღმდეგობის ძალას. აქედან გამომდინარე, პერფორაციის კვეთში საჭირო წნევა უნდა განესაზღვროთ, როგორც

$$P = P_{ატ} + P_{დაჭ.} + P_{ფ} \tag{5.1}$$

სადაც  $P_{ატ}$  ატმოსფერული წნევაა;  $P_{ლაჭ}$  - წნევა, რომელიც აკომპენსირებს დასამუშავებელი მასალის დაჭიმულობის ძალას;  $P_{\phi}$  - წნევა, რომელიც აუცილებელია საჰაერო ბალიშის  $\phi$  კვეთიდან ჰაერის ატმოსფეროში გამოსადევნად დასამუშავებელ მასალასა და პერფორირებული მილის კედელს შორის წარმოქმნილ ღრეჩოში.

აეროდინამიკური საყრდენის საჰაერო ბალიშში მოთავსებული ჰაერის წნევის შემადგენელი ზემოთ დასახელებული სამი კომპონენტიდან პირველი მუდმივი სიდიდეა, ანუ არ იცვლება ბალიშის მთელ ფართობზე. ჯამური წნევის მეორე და მესამე შესაკრებები კი ცვალებადია. კერძოდ მეორე შესაკრები გამოითვლება როგორც [6]

$$P_{ლაჭ} = F_1 / (R + \delta) \quad \text{ნ/მ}^2 \quad (5.2)$$

სადაც  $F_1$  - არის დასამუშავებელი მასალის ერთ განივ მეტრზე მოსული ტექნოლოგიური დაჭიმულობის ძალა, ნ;

$R$  - აეროდინამიკური საყრდენის პერფორირებული მილის რადიუსი,მ;

$\delta$  - ჰაერის ბალიშის სისქე (ღრეჩოს სიგანე) მოცემულ კვეთში, მ. სწორედ იმიტომ რომ რომ ბალიშის სისქე ცვალებადია, წნევის განხილულ კომპონენტს სხვადასხვა კვეთში სხვადასხვა მნიშვნელობა აქვს.

რაც შეეხება წნევის მესამე კომპონენტს, ანუ წნევას, რომელიც აუცილებელია საჰაერო ბალიშის  $\phi$  კვეთიდან ჰაერის ატმოსფეროში გამოსადევნად დასამუშავებელ მასალასა და პერფორირებული მილის კედელს შორის წარმოქმნილ ღრეჩოში, ის მოძრაობის მიმართულებით თანდათან კლებულობს, რადგან ბალიშიდან ჰაერის გამოსასვლელ კვეთთან მიახლოებით მცირდება არხის აეროდინამიკური წინააღმდეგობის დასაძლევად საჭირო დაწნევა.

ნათქვამიდან გამომდინარე, ცხადია, რომ აეროდინამიკური საყრდენის საჰაერო ბალიშში წნევის განაწილების თეორიული გაანგარიშება რთულია.

ამიტომ ჩვენ მივიღეთ გადაწყვეტილება ექსპერიმენტულად შეგვესწავლა ეს საკითხი. მით უმეტეს რომ წინამდებარე სადისერტაციო ნაშრომის ძირითად მიზანს დრეკად კედლებიან არხებში სითხის დინების თავისებურებათა გამოკვლევა წარმოადგენს.

## 5.2. ექსპერიმენტული სტენდის აღწერა და ცდების ჩატარების მეთოდოლოგია.

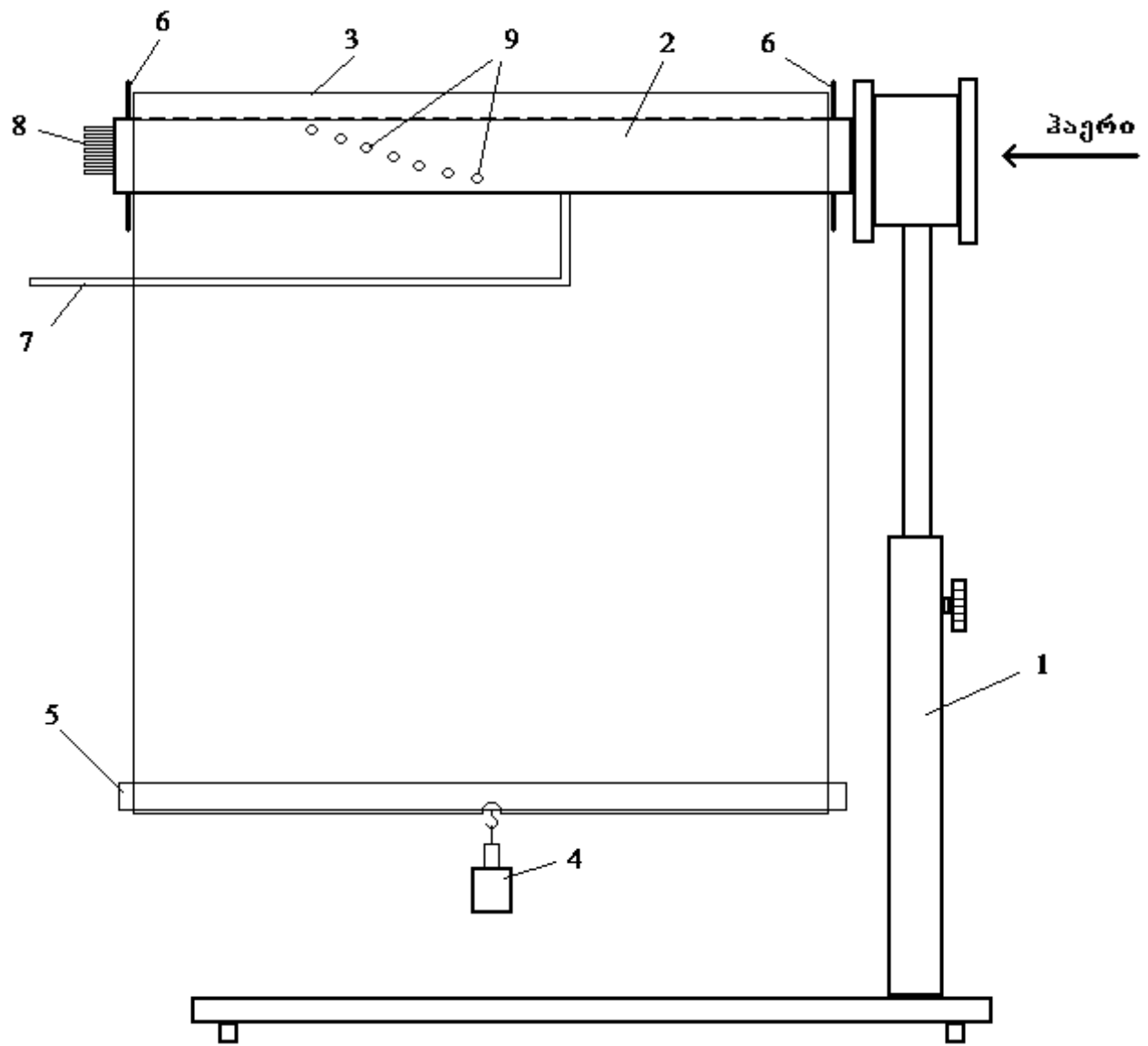
ექსპერიმენტული სტენდი წარმოდგენილია 5.2ნახაზზე. იგი შედგება დგარისაგან 1, რომელზეც დამონტაჟებულია ჰორიზონტალურ მდგომარეობაში მყოფი პერფორირებული მილი 2 დიამეტრით 51 მმ. პერფორირებულ მილზე გადაკიდებულია რულონური პოლიმერული მასალის ნაჭერი 3, რომლის ქვედა ბოლოები ერთმანეთთან შეერთებულია და მათზე ჩამოკიდებულია გარკვეული ტვირთი 4, ტექნოლოგიური დაჭიმულობის ძალის იმიტაციისათვის. პოლიმერული მასალის მთელ სიგანეზე განვითარებული დაჭიმულობის ძალის ერთგვაროვნების მისაღწევად, ტვირთი 4 ჩამოკიდებულია პოლიმერული მასალის ქვედა, ერთმანეთთან შეერთებულ ბოლოებს შორის ჩადებული სწორი ჭოკის 5 ცენტრალურ წერტილში დამაგრებულ კაუჭზე, რომლისთვისაც პოლიმერული აფსკის ქვედა შუა ნაწილში ამოწრილია ხვრელი. პერფორირებული მილის თავში და ბოლოში მილზე დამაგრებულია სპეციალური რგოლური კედლები 6, რომლებიც აეროდინამიკური საყრდენის საჰაერო ბალიშში მყოფ ჰაერს არ აძლევენ გვერდებიდან გამოსვლის საშუალებას. პერფორირებულ მილში ჰაერის მიწოდება ხდება ჰაერშემბერის მეშვეობით. მილში არსებული წნევა იზომება V-ს მაგვარი მანომეტრით მილის შიგა მოცულობასთან შეერთებული მილაკის 7 გამოყენებით. საჰაერო ბალიშში ჰაერის ნაკადის მიმართულებით წნევის განაწილების გასაზომად მილში ჰერმეტიკულად შეყვანილია წნევის გადამწოდი მილაკები 8, რომლებიც მილის შიგნიდან მიერთებულია არიან მილზე გაკეთებულ სპეციალურ ხვრელებზე 9, ხოლო მილაკების გარე ბოლოები მორიგეობით უერთდება MMH-240 ტიპის მიკრომანომეტრს. ხსენებული ხვრელები გაკეთებულია საჰაერო ბალიშში ჰაერის ნაკადის მიმართულებით სხვადასხვა ადგილზე და ერთმანეთისაგან აქსიალურად

არიან დაძრული, რათა არ მოახდინონ ერთმანეთზე რაიმე გავლენა. მეტი თვალსაჩინოებისათვის, პერფორირებულ მილზე წნევის გასაზომი ნახვრეტებისა და გამომყვანი კაპილარების განლაგება ნაჩვენებია 5.3ნახაზზე.

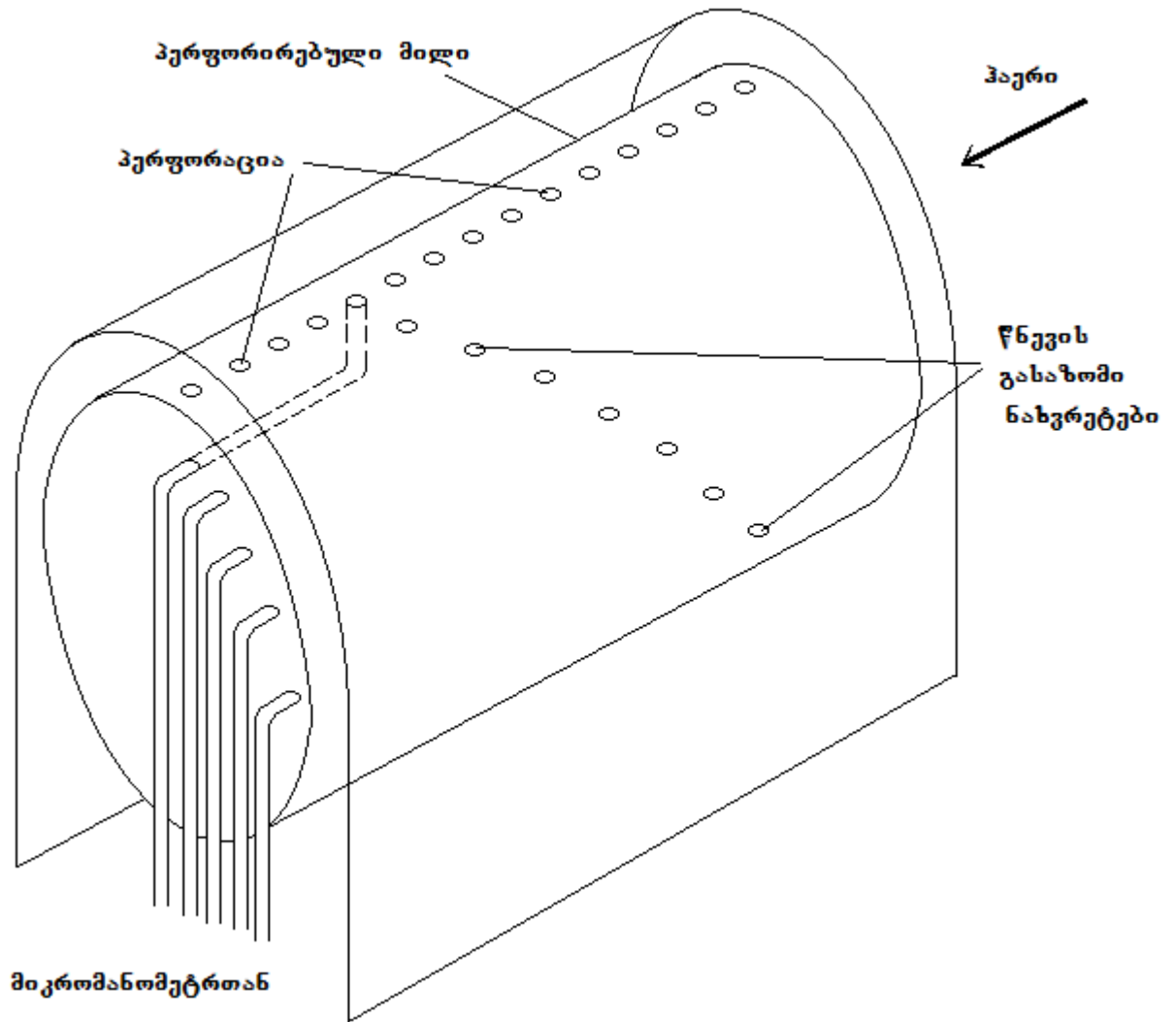
ექსპერიმენტი იწყებოდა პერფორირებულ მილში ჰაერის მიწოდებით. პერფორაციიდან გამოსული ჰაერი მიაწვებოდა რა მილზე გადაკიდებულ პოლიმერულ აფსკს, ასწევდა მას მაღლა თავის ჭოკიანად და ჭოკზე ჩამოკიდებული ტვირთიანად. რამოდენიმე წამში ხდებოდა ნაკადების სტაბილიზაცია, რის შემდეგაც სრულდებოდა გაზომვები. კერძოდ ფიქსირდებოდა წნევა თვით პერფორირებულ მილში და ჰაერსავალზე დაყენებული მრიცხველით ფიქსირდებოდა აეროდინამიკურ საყრდენში გავლილი ჰაერის წამური ხარჯი. შემდეგ იზომებოდა წნევები საჰაერო ბალიშის სხვადასხვა წერტილთან შეერთებულ ყოველ წნევის გამომყვანზე მიკრომანომეტრის მორიგეობით მიერთებით.

აეროდინამიკური საყრდენის საჰაერო ბალიშისათვის განკუთვნილი ღრეჩოს სისქე იზომებოდა მიკრომეტრის საშუალებით. ღრეჩოს ნებისმიერ წერტილში თვით პოლიმერულ აფსკზე მიკრომეტრის გამზომი ძელაკის შეხების შემდეგ მიკრომეტრი უძრავად მაგრდებოდა სპეციალურ საყრდენზე. ამის შემდეგ ხდებოდა ძელაკის დაჭერა აფსკზე იქამდე, სანამ აფსკი პერფორირებულ მილს არ შეეხებოდა. ამ დროს კი მიკრომეტრის ჩვენების მიხედვით ფიქსირდებოდა ღრეჩოს სისქე.





ნახ. 5.2. აეროდინამიკურ საყრდენში ჰაერის ღინების გამოსაკვლევი სტენდის სქემა



ნახ. 5.3. აეროდინამიკური საყრდენის პერფორირებულ მილზე წნევის გასაზომი ნახვრეტებისა და გამომყვანი კაპილარების განლაგება

### 5.3. აეროდინამიკური საყრდენის ექსპერიმენტული გამოკვლევის შედეგები

აეროდინამიკური საყრდენის საჰაერო ბალიშში წნევის განაწილების და თვით ბალიშის სისქის ექსპერიმენტული გაზომვები ჩატარდა 51 მმ-ის ტოლი გარე დიამეტრის მქონე და 60 სმ სიგრძის პერფორირებული მილის გამოყენებით ჰაერის მოცულობითი ხარჯის ორი სხვადასხვა მნიშვნელობის

შემთხვევაში. კერძოდ 9,41 ლ/წმ და 5.5 ლ/წმ-ის შემთხვევებში. გაზომვები ჩატარდა პერფორაციის ნახვრეტების სხვადასხვა დიამეტრის და მილის მსახველზე მათი განლაგების სხვადასხვა ბიჯის დროს. სულ ჩატარდა ცდების რვა სხვადასხვა სერია. 5.1 ცხრილში ნაჩვენებია პერფორაციის ნახვრეტების დიამეტრებისა და შესაბამისი ბიჯების გამოკვლეული მნიშვნელობები და მითითებულია IV დანართ-ში მოყვანილი ცხრილების ნომრები, რომლებშიც ხსენებული სერიების შესაბამისად წარმოდგენილია საჰაერო ბალიშის სისქისა და მასში წნევის განაწილების გაზომილი მნიშვნელობები. ამავე დანართში ყოველი ცხრილის ქვეშ წარმოდგენილია ცხრილის მონაცემებით აგებული დიაგრამა.

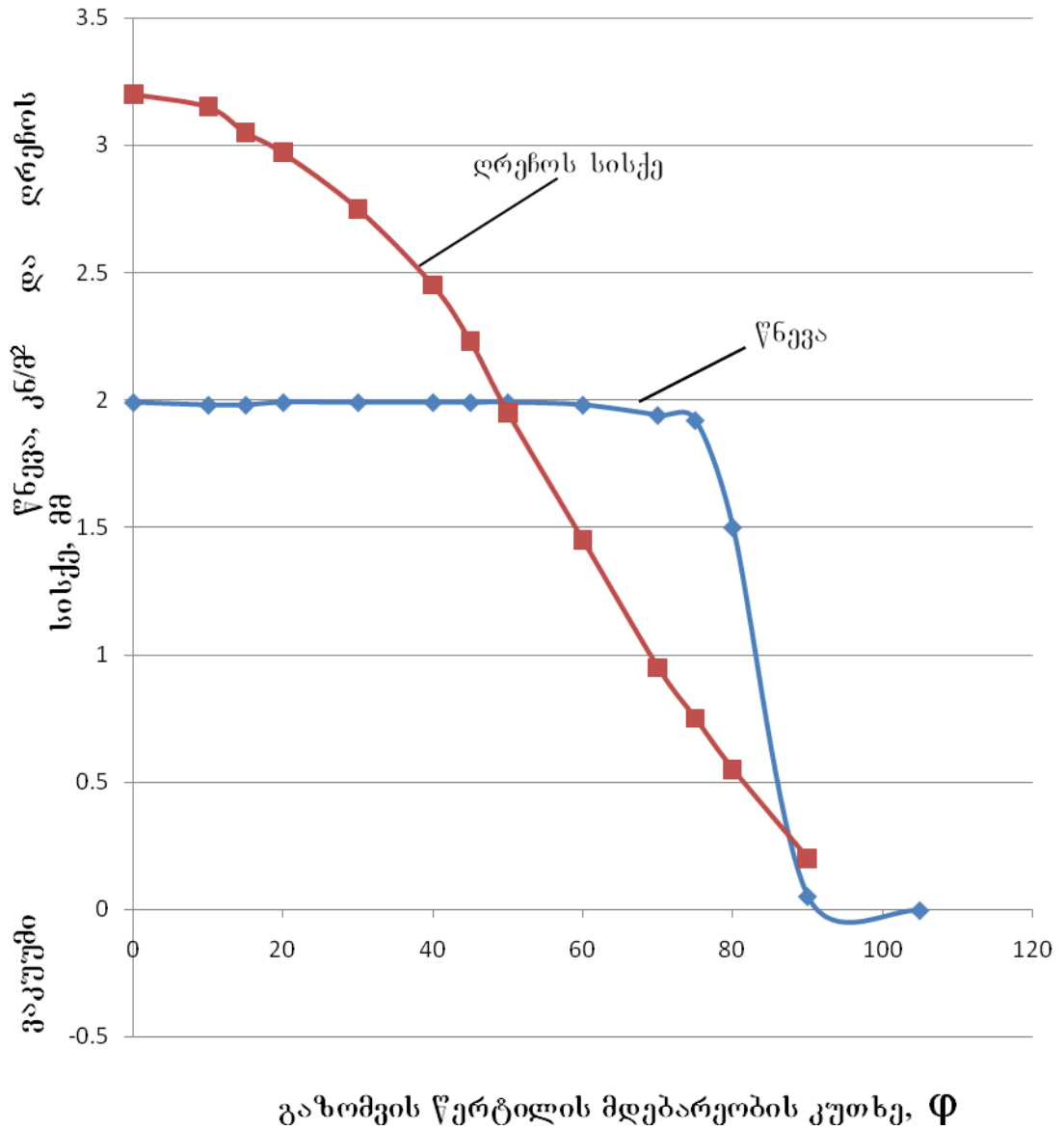
ცხრილი 5.1

პერფორაციის ნახვრეტების დიამეტრების, შესაბამისი ბიჯების და ბალიშში ჰაერის განხორციელებული ხარჯების გამოკვლეული მნიშვნელობები

ცდების სერიის ნომერი	პერფორაციის დიამეტრი, მმ	ბიჯი, მმ	ჰაერის ხარჯი საჰაერო ბალიშში, ლ/წმ	გაზომვების შედეგების ცხრილი დანართში IV
1	2	15	9,41	ცხრილი დ-4.1
2			5,5	ცხრილი დ-4.2
3	2	7,5	9,4	ცხრილი დ-4.3
4			5,5	ცხრილი დ-4.4
5	3	7,5	9,4	ცხრილი დ-4.5
6			5,5	ცხრილი დ-4.6
7	3	3,75	9,4	ცხრილი დ-4.7
8			5,5	ცხრილი დ-4.8

მეტი თვალსაჩინოებისათვის ხსენებულ დიაგრამებზე წნევა გადაზომილია კილონიუტონებში ერთ კვადრატულ მეტრზე, რადგან ამ ერთეულებში წნევის მნიშვნელობები რიცხობრივად იმავე თანრიგისაა, რაც საჰაერო ბალიშის, ანუ ღრეჩოს სისქის მილიმეტრებში გაზომილი

მნიშვნელობები ამრიგად წნევაც და ღრეხოს სისქეც ერთი და იგივე ორდინატთა ღერძზეა გადაზომილი რაც მიღებული შედეგების გასაანალიზებლად უფრო მოსახერხებელია.



ნახ. 5.4. აეროდინამიკური საყრდენის ღრეხის სისქისა და საჰაერო ბალიშში წნევის ცვლილების ტიპური სურათი

5.4 ნახაზზე წარმოდგენილია აეროდინამიკური საყრდენის ღრეჩოს სისქისა და საჰაერო ბალიშში წნევის ცვლილების ტიპური სურათი, რომელიც საერთოა ჩატარებული ცდების ყველა სერიისათვის. ამ ნახაზიდან ჩანს, რომ დინების გასწვრივ ღრეჩოს სისქე თანდათან კლებულობს. ვინაიდან ჰაერის ხარჯი დინების უველა კვეთში მუდმივია ხოლო არხის განივი კვეთის ფართობი ღრეჩოს სისქის შემცირებასთან ერთად მცირდება, ცხადია, რომ მატულობს მოძრაობის სიჩქარე. ჰიდროდინამიკის კლასიკური თეორიის მიხედვით სწორხაზოვანი დინებისას სიჩქარის მატებას თან უნდა სდევდეს სტატიკური წნევის შემცირება. ჩვენს შემთხვევაში, როგორც ეს 5.4ნახ-დან ჩანს, წნევა პრაქტიკულად მუდმივია საჰაერო ბალიშში ჰაერის მიერ გავლილი გზის თავდაპირველ 80 %-ზე და შემდეგ დარჩენილ 20 %-ზე მკვეთრად ეცემა. ამასთან უკანასკნელ 10 %-ზე კი, ჩატარებული ცდების ყველა სერიაში, უარყოფით მნიშვნელობებსაც დებულობს, ანუ ატმოსფერულზე დაბალი ხდება და გარედან მოქმედი ატმოსფერული წნევის გავლენით პოლიმერული აფსკი აეროდინამიკურ საყრდენზე 90 გრადუსიანი კუთხით შემოვლის შემდეგ, დაახლოებით  $5 \div 10$  გრადუსის ფარგლებში კიდევ ინარჩუნებს ელიფსურ ფორმას.

#### **5.4. აეროდინამიკური საყრდენის ინჟინრული გაანგარიშების მეთოდოლოგია**

როგორც ზემოთ ავღნიშნეთ რულონური პოლიმერული მასალების თერმულად დამამუშავებელ დანადგარებში აეროდინამიკური საყრდენების გამოყენება ამარტივებს დანადგარების ექსპლუატაციას, ამცირებს მათ მასალატევა-დობას და ზრდის ენერგოეფექტურობას. ამასთან ჩატარებული ექსპერიმენტული კვლევის შედეგების ანალიზმა დაგვარწმუნა რომ მიუხედავად კონსტრუქციული სიმარტივისა აეროდინამიკური საყრდენის ნორმალური მუშაობა სხვადასხვა ფაქტორზე დამოკიდებული. კერძოდ: საჰაერო ბალიშში განვითარებული წნევა, პოლი-მერული მასალის აფსკის დაჭიმულობის ძალა, საჰაერო ბალიშში გამავალი ჰაერის ხარჯი, საყრდენის პერფორირებული მილის ნახვრეტების დიამეტრი, ამ ნახვრეტების განლაგების ბიჯი და თვით პერფორირებული მილის გარე დიამეტრი. ყველა ეს პარამეტრი გარკვეულად დაკავშირებულია ერთმანეთთან და

აეროდინამიკური საყრდენის ეფექტური მუშაობისათვის აუცილებელია მათი სწორი განსაზღვრა.

ექსპერიმენტული მონაცემების ანალიზმა საშუალება მოგვცა დაგვემუშავებინა ხსენებული მასალების თერმულად დამამუშავებელი დანადგარებისათვის აეროდინამიკური საყრდენების გაანგარიშების მეთოდოლოგია.

გაანგარიშების მიზანია წარმოების კონკრეტული პირობების გათვალისწინებით გამოთვლილი იქნას პერფორირებული მილის გარე დიამეტრის (D), პერფორაციის დიამეტრისა (d) და ბიჯის (s), პერფორირებული მილების ანუ ზიგზაგისებური მოძრაობის სვლების აუცილებელი რაოდენობა (n), თბოდამამუშავებელ დანადგარში მოთავსებული დასამუშავებელი მასალის სიგრძე (L), ჰაერის გამახურებლის თბური სიმძლავრე (Q), საყრდენში შესაქმნელი წნევა (P), ჰაერის აუცილებელი წამური ხარჯი (G).

ჩამოთვლილი რვავე სიდიდე გაანგარიშებული უნდა იყოს იმგვარად, რომ უზრუნველყოს გარკვეული სიგანის (Ω) მქონე პოლიმერული მასალის თერმიული დამამუშავება მოცემული დაჭიმულობის ძალის (F), მასალის დამამუშავებისათვის აუცილებელი ტემპერატურის (t) და თერმიული დამამუშავებისათვის საჭირო ხანგრძლივობის (τ) პირობებში.

#### **5.4.1. პერფორირებული მილის გარე დიამეტრის შერჩევა და საჰაერო ბალიშში განვითარებული წნევის გამოთვლა.**

5.1ნახ-დან ჩანს, რომ დასამუშავებელი პოლიმერული მასალის შეწონილ მდგომარეობაში შესანარჩუნებლად აუცილებელია, რომ ტექნოლოგიური დაჭიმულობის ძალა (F) გაწონასწორებული იყოს საჰაერო ბალიშის მხრიდან დასამუშავებელ მასალაზე მოქმედი წნევის ძალით (F'). მაშასადამე ადგილი უნდა ჰქონდეს ტოლობას

$$F = F' \tag{5.3}$$

მარტივი დასამტკიცებელია, რომ პერფორირებულ მილზე გადადებული და მილის ზედაპირთან შეხებაში მყოფი რულონური მასალა, შეტივტივებულ მდგომარეობაში რომ გადავიდეს, წარმოქმნილ საჰაერო ბალიშიში არსებული წნევა ბალიშზე შეტივტივებული მასალის ყველა წერტილში იმოქმედებს მასალის ზედაპირის მართობულად და შეიძლება დაიშალოს ორ, ვერტიკალურად ზემოთ მიმართულ და ჰორიზონტალურ მდგენელებად. ცხადია, რომ ტექნოლოგიური დაჭიმულობის ძალა უნდა გააბათილოს ბალიშში სხვადასხვა უბანში არსებული წნევის ვერტიკალური მდგენელების ტოლქმედი წნევის ძალამ.

ბალიშის თითოეულ ელემენტარულ უბანში არსებული წნევის ვერტიკალური მდგენელი ცვალებადი სიდიდეა და კუთხის მიხედვით იცვლება გარკვეული მაქსიმუმიდან (0 გრადუსზე) ნოლამდე (90 გრადუსზე) და მისი ჯამური ტოლქმედის განსაზღვრა არც თუ რთული მათემატიკური გაამოთვლით შეიძლება.

მაგრამ ჩატარებული ცდების შედეგებიდან გამომდინარე, ჩვენ ვიცით რომ ყველა შემთხვევაში საჰაერო ბალიშში წნევა პრაქტიკულად მუდმივია ბალიშის ფართობის თითქმის 80 %-ზე. თუ დავუშვებთ, რომ ჰაერის წნევა (P) მუდმივია საჰაერო ბალიშის მთელ ფართობზე, და თუ გავითვალისწინებთ, რომ ხსენებული ვერტიკალური მდგენელების მოქმედება ხდება ფართობის უსასრულოდ ვიწრო და რულონური მასალის სიგანის ტოლი სიგრძის მქონე ელემენტარულ ჰორიზონტალურ ზოლებზე, რომელთა ჯამი მილის დიამეტრისა (D) და სიგრძის ნამრავლის ტოლია, მაშინ ტექნოლოგიური დაჭიმულობის გამაწონასწორებელი ძალა (F') მიახლოებით ასე გამოითვლება:

$$F' = P \cdot D \cdot \Omega , \tag{5.4}$$

სადაც  $\Omega$  – დასამუშავებელი მასალის სიგანეა, მ.

გამოსახულება (5.4)-ის (5.3)-ში შეტანით მივიღებთ:

$$F = P \cdot D \cdot \Omega , \tag{5.5}$$

საიდანაც გამოვთვლით მასალის შეწონილ მდგომარეობაში შენარჩუნებისათვის აუცილებელ წნევას –

$$P = \frac{F}{D \Omega} \quad (5.6)$$

აქვე უნდა აღინიშნოს, რომ წნევის მუდმივობის დაშვება საპაერო ბალიშის მთელ ფართობზე, რომლის საფუძველზეც დავწერთ (5.4) გამოსახულებას, რა თქმა უნდა გაზრდის (5.6)-ით გამოთვლილ ბალიშში გასავითარებელი წნევის მნიშვნელობას, მაგრამ ამავე დროს, გარკვეულად ზრდის მასალის შეწონილ მდგომარეობაში შეკავების გარანტიის მარაგს.

თუ გავითვალისწინებთ, რომ დასამუშავებელი მასალის სიგანე ( $\Omega$ ) და ტექნოლოგიური დაჭიმულობის ძალა ( $F$ ) ჩვეულებრივად ცნობილი სიდიდეებია, მაშინ (5.6) შეიძლება ასეც ჩაიწეროს:

$$P = \frac{F_n}{D} \quad (5.7)$$

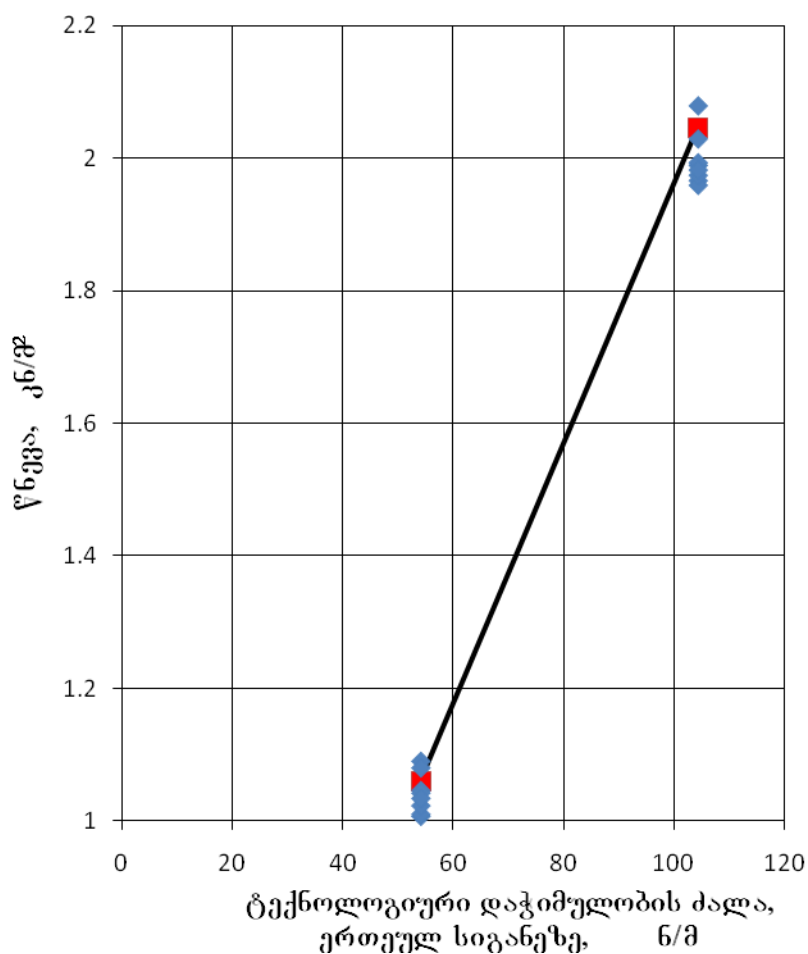
სადაც  $F_n = F / \Omega$  – არის მასალის სიგანის ერთეულზე (ერთ მეტრზე) მოსული ტექნოლოგიური დაჭიმულობის ძალა, ნ / მ.

(5.7) გამოსახულებიდან ჩანს, რომ მასალის ერთეულ სიგანეზე მოსული დაჭიმულობის ძალის ფიქსირებული მნიშვნელობის პირობებში მხოლოდ პერფორირებული მილის დიამეტრზეა დამოკიდებული. ამ გამოსახულებით გამოთვლილი წნევის მნიშვნელობები 10 %-ის სიზუსტით ემთხვევა ექსპერიმენტით მიღებულ შედეგებს დაჭიმულობის  $F_n$  ძალის ჩვენს მიერ გამოკვლეული ორი მნიშვნელობისათვის, რაც კარგად ჩანს ქვემოთ წარმოდგენილ 5.5 ნახაზზე.

ზემოთქმულიდან გამომდინარე პერფორირებული მილის დიამეტრი უნდა შეირჩეს ტექნიკურ-ეკონომიკური მოსაზრებების გათვალისწინებით. მსხვილი მილების გამოყენება იწვევს დანადგარის მასალატევადობის და ე.ი. ფასის გაზრდას, პატარა დიამეტრიანი მილების შემთხვევაში კი გაიზრდება მასალის შეწონილ მდგომარეობაში შესაკავებელი წნევა და მაშასადამე გაიზრდება გამოყენებული ჰაერშემბერის ფასი.



იმ შემთხვევაში თუ ტექნოლოგიური დაჭიმულობის ძალა მცირეა, მაგრამ დასამუშავებელი მასალა საკმაოდ სქელი და ნაკლებად ელასტიურია, მაშინ პერფორირებული მილის დიამეტრი უნდა შეირჩეს იმ თვალსაზრისითაც, რომ საყრდენზე გადაღუნვით გამოწვეული მექანიკური დაძაბულობის სიდიდემ არ გაზარდოს ენერგოდანახარჯები მთლიანად მასალის გადაადგილებაზე.



ნახ. 5.5. გამოსახულებით (5.7) გამოთვლილი წნევის შედარება ექსპერიმენტებით მიღებული შედეგებთან ჩატარებული ცდების რვავე სერიაში (გამოთვლილი სიდიდეები გამოსახულია წითელი წერტილებით)

### 5.4.2. ერთ აეროდინამიკურ საყრდენში გამავალი ჰაერის ხარჯის გამოთვლა

ჩატარებული ექსპერიმენტული კვლევის საფუძველზე ჩვენ დავადგინეთ, რომ საჰაერო ბალიშის მინიმალური სისქე (δ) მყარდება მასალის მიერ აეროდინამიკური საყრდენზე შემოხვევის პერფორირებული მსახველის ორივე მხრიდან 90 გრადუსიანი კუთხეების არეში. ცხადია, რაც უფრო დიდი იქნება ღრეჩოს მინიმალური სიდიდის მნიშვნელობა, მით უფრო გაიზრდება ღრეჩოს ერთეულში გამავალი ჰაერის აუცილებელი რაოდენობა და შესაბამისი ენერგო და ფინანსური დანახარჯები. ექსპერიმენტული გაზომვების შედეგებიდან ჩანს, რომ აეროდინამიკური საყრდენის გარანტირებული მუშაობისას იმისათვის რომ მასალა არ შეეხოს პერფორირებულ მილს და არ ისრიალოს მასზე, საკმარისია მინიმალური ღრეჩოს სისქე იმყოფებოდეს 0.3-დან 3 მმ-დე ფარგლებში მასალის სისქის, მისი დრეკადობის, ელასტიკურობის და ზედაპირის სისუფთავის გათვალისწინებით.

საჰაერო ბალიშიდან გამომავალი და ზემოთ გამოთვლილი P წნევის მქონე ჰაერი გაივლის ერთგვარ ბრტყელ (მასალის მთელ სიგანეზე) შევიწროვებად საქშენს, რომელიც ფორმირდება პერფორირებული მილის გარე ზედაპირსა და საჰაერო ბალიშზე ელიფსურად გადადებულ დასამუშავებელ მასალას შორის. ამის შემდეგ ჰაერი გამოედინება ატმოსფეროში, რომლის წნევა შეადგენს P<sub>a</sub>-ს. ასეთ შემთხვევაში შეიძლება გამოვიყენოთ იდეალური გაზის ადიაბატური გამოდინების სიჩქარის გამოსათვლელი ცნობილი გამოსახულება:

$$C = \sqrt{\frac{2k}{k-1} RT \left[ 1 - \left(\frac{P_a}{P}\right)^{\frac{k-1}{k}} \right]} \quad , \quad (5.8)$$

სადაც k – ადიაბატის მაჩვენებელია;

R – ჰაერის აირმუდმივა;

T – საჰაერო ბალიშში არსებული ჰაერის აბსოლუტური ტემპერატურა, K. მისი მნიშვნელობა მასალის თერმული დამუშავებისათვის აუცილებელი ტემპერატურის მიხედვით უნდა იყოს დადგენილი.

ვიციტ რა გამოდინების სიჩქარე, ჰაერის წამური მასური ხარჯის გამოსთვლელად გამოვიყენოთ უწყვეტობის განტოლება:

$$G_1 = \frac{f \cdot C}{v_a} \quad (5.9)$$

სადაც  $f$  – არის ჰაერის ნაკადის განივი კვეთის ფართობი საჰაერო ბალიშის მინიმალური სისქის შემთხვევაში ანუ გამოსასვლელ კვეთში, რაც პერფორირებული მილის პორიზონტალური დიამეტრის სიბრტყეშია;

$v_a$  – ატმოსფეროში გამოდინებული ჰაერის ხვედრითი მოცულობაა.

ჰაერის ნაკადის განივი კვეთის ფართობი, თუ გავითვალისწინებთ რომ გამოდინება ხდება აეროდინამიკური საყრდენის ორივე მხარეს, ტოლი იქნება:

$$f = 2 \delta \Omega \quad , \quad (5.10)$$

სადაც  $\Omega$  დასამუშავებელი მასალის სიგანეა.

რაც შეეხება ჰაერის ხვედრით მოცულობას, მას გავიანგარიშებთ ატმოსფერული წნევისა თერმიული დამუშავებისათვის საჭირო ტემპერატურის მნიშვნელობების მიხედვით იდეალური აირის მდგომარეობის მახასიათებელი განტოლების გამოყენებით.

$$v_a = \frac{RT}{P_a} \quad (5.11)$$

(5.8), (5.10) და (5.11) გამოსახულებებით მიღებული მნიშვნელობების (5.9) გამოსახულებაში შეტანის შემდეგ განვსაზღვრავთ ჰაერის წამურ მასურ ხარჯს ერთი აეროდინამიკური საყრდენის, ანუ ერთი პერფორირებული მილისათვის.

### 5.4.3. პერფორირებულ მილში საჭირო წნევის გამოთვლა და პერფორაციის დიამეტრისა და ბიჯის შერჩევა

აეროდინამიკური საყრდენის პერფორირებულ მილში საჭირო წნევის გამოსათვლელად ვიყენებთ პერფორაციიდან გამოდინებული ნაკადისათვის დაწერილ უწყვეტობის განტოლებას:

$$G_1 = \frac{f_n C_1}{v_1} \quad , \quad (5.12)$$

სადაც  $C_1$  – პერფორაციიდან გამოდინებული ჰაერის ნაკადის სიჩქარეა, მ/წმ;  $G_1$  (5.9) გამოსახულებით უკვე გამოთვლილი სიდიდეა,  $f_n$  – ერთ პერფორირებულ მილზე არსებული ყველა ნახვრეტის ჯამური განივი კვეთის ფართობია, ხოლო  $v_1$  – პერფორირებულ მილში არსებული ჰაერის კუთრი მოცულობაა, მ<sup>3</sup>/კგ. მისთვის (5.11)-ის ანალოგიურად გამოვიყენოთ იდეალური გაზის მდგომარეობის განტოლება:

$$v_1 = \frac{RT}{P_1} \quad (5.13)$$

და (5.13)-ის (5.12)-ში შეტანის შემდეგ ეს უკანასკნელი შეიძლება ასე წარმოვადგინოთ

$$P_1 = \frac{G_1 \cdot R \cdot T}{f_n \cdot C_1} \quad , \quad (5.14)$$

რომლითაც განისაზღვრება პერფორირებულ მილში არსებული წნევა. ამ გამოსახურებაში  $f_n$  და  $C_1$  უცნობი სიდიდეებია. მათი დადგენა ხდება ქვემოთ მოყვანილი მსჯელობის საფუძველზე.

აეროდინამიკური საყრდენის ექსპერიმენტული გამოკვლევის შედეგების მიხედვით დავადგინეთ, რომ სისტემის მდგრადი დინამიკური წონასწორობა მიიღწევა იმ პირობებში, როცა პერფორაციიდან გამომავალ ჰაერის ჭავლებში ნაკადის სიჩქარე –  $C_1$ , ოთხჯერ მაინც ნაკლებია ვიდრე ბალიშის ყველაზე შევიწროებული კვეთიდან ჰაერის ატმოსფეროში გამოდინების (5.8) გამოსახულებით გაანგარიშებული სიჩქარე  $C$ . ამიტომაც ამ სიჩქარეს შევირჩევთ გამოსახულებიდან:

$$C_1 = (0,2 \div 0,3) C. \quad (5.15)$$

რაც შეეხება ერთ პერფორირებულ მილზე არსებული ყველა ნახვრეტის ჯამური განივი კვეთის ფართობს ( $f_n$ ), მისი დადგენა ხდება თანდათანობითი მიახლოების მეთოდით, ქვემოთ წარმოდგენილი თანამიმდევრობით.

თავდაპირველად  $f_n$ -ის მნიშვნელობა აღებული უნდა იყოს საჰაერო ბალიშის ყველაზე შევიწროებული კვეთზე (4 ÷ 5)-ჯერ უფრო მეტი (რადგან პერფორაციის ნახვრეტებიდან გამოდინების სიჩქარეს სწორედ ამდენჯერვე ნაკლებს ვიღებთ) და  $f_n$ -ის და  $C_1$ -ის ამგვარად დადგენილი მნიშვნელობებით ვიანგარიშებთ  $P_1$ -ს (5.14) გამოსახულებით. შემდეგ დაშვებული  $f_n$ -ის და შესაბამისად (5.7) და (5.14) გამოსახულებებით დადგენილი  $P$  და  $P_1$  წნევების მნიშვნელობათა გამოყენებით იდეალური გაზის ადიაბატური გამოდინებისას დამყარებული მასური წამური ხარჯის ცნობილი განტოლებით

$$G_1 = \frac{f_n}{v} \sqrt{\frac{2k}{k-1}} R T \left[ 1 - \left( \frac{P}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] \quad (5.16)$$

ხელახლა ვიანგარიშებთ ჰერის ხარჯს, რათა მისი მნიშვნელობა შევადაროთ (5.9) გამოსახულებით გაანგარიშებულ მნიშვნელობას. ამით მოწმდება უზრუნველყოფს თუ არა მიღზე არსებული ყველა ნახვრეტის ჯამური განივი კვეთის ფართობის ჩვენს მიერ დაშვებული მნიშვნელობა ჰაერის იმავე ხარჯის გატარებას, რაც საჰაერო ბალიშის ყველაზე მცირე სისქის კვეთიდან გადის ატმოსფეროში. იმ შემთხვევაში თუ  $G_1$ -ის (5.9) და (5.16) გამოსახულებებით გაანგარიშებული მნიშვნელობები ერთმანეთს სასურველი სიზუსტით არ ემთხვევა, საჭიროა  $f_n$ -ის ახალი მნიშვნელობის აღება და გაანგარიშებების ხელახალი ჩატარება (5.14) და (5.16) გამოსახულებებით, ასე მანამ არ მოხდება სასურველი დამთხვევა.

(5.16) გამოსახულებაში მყოფი სიდიდე  $v$  – საჰაერო ბალიშში არსებული ჰაერის ხვედრითი მოცულობაა და კვლავ ადეალური გაზის მდგომარეობის მახასიათებელი განტოლებიდან გამოითვლება ცნობილი წნევისა და ტემპერატურის მიხედვით.

$$v = \frac{R \cdot T}{P} \quad (5.17)$$

მიღზე არსებული ყველა ნახვრეტის ჯამური განივი კვეთის ფართობის საბოლოო მნიშვნელობის დადგენის შემდეგ ხდება პერფორაციის

ნახვრეტის დიამეტრის დადგენა. ცხადია, რომ მიღზე არსებულმა ყველა ხვრელის განივი კვეთის ფართობის ჯამურმა მნიშვნელობამ უნდა შეადგინოს თანდათანობითი მიახლოების მეთოდით ნაკონი მნიშვნელობა, ანუ ეს უკანასკნელი მეორეს მხრივ ტოლი უნდა იყოს შემდეგი გამოსახულების

$$f_n = N \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot \Omega \quad , \quad (5.18)$$

სადაც  $N$  – პერფორირებული მილის ერთ გრძივ მეტრზე არსებული ნახვრეტების რაოდენობაა, ცალი/მ;  $d$  – პერფორაციის ხვრელის დიამეტრია და  $\Omega$  – დასამუშავებელი მასალის სიგანე, ანუ პერფორირებული მილის სიგრძეა.

მილის ერთ მეტრზე არსებული ნახვრეტების რაოდენობა დამოკიდებულია მათი ბიჯის მნიშვნელობაზე. ჩატარებული დაკვირვებების საფუძველზე დადგინდა, რომ აეროდინამიკური საყრდენის მდგრადი მუშაობა უზრუნველყოფილია იმ პირობებში, როცა ნახვრეტების ბიჯი  $(1,5 \div 5)d$  –ს ფარგლებშია. მაშინ თუ ავიღებთ, რომ ნახვრეტების ბიჯი

$$s = 4 d \quad ,$$

და თუ გავითვალისწინებთ, რომ ბიჯის შებრუნებული სიდიდე ერთ გრძივ მეტრზე მოსული ნახვრეტების რაოდენობაა, მაშინ შეგვიძლია დავწეროთ

$$N = \frac{1}{s} = \frac{1}{4 \cdot d} \quad . \quad (5.19)$$

ხოლო (5.19)-ის (5.18)-ში შეტანით და მარტივი გარდაქმნით მივიღებთ:

$$d = \frac{16 f_n}{\pi \cdot \Omega} \quad (5.20)$$

#### 5.4.4. თბური დამუშავების დანადგარში მოთავსებული დასამუშავებელი მასალის სიგრძის განსაზღვრა და პერფორირებული მილების რაოდენობის დადგენა.

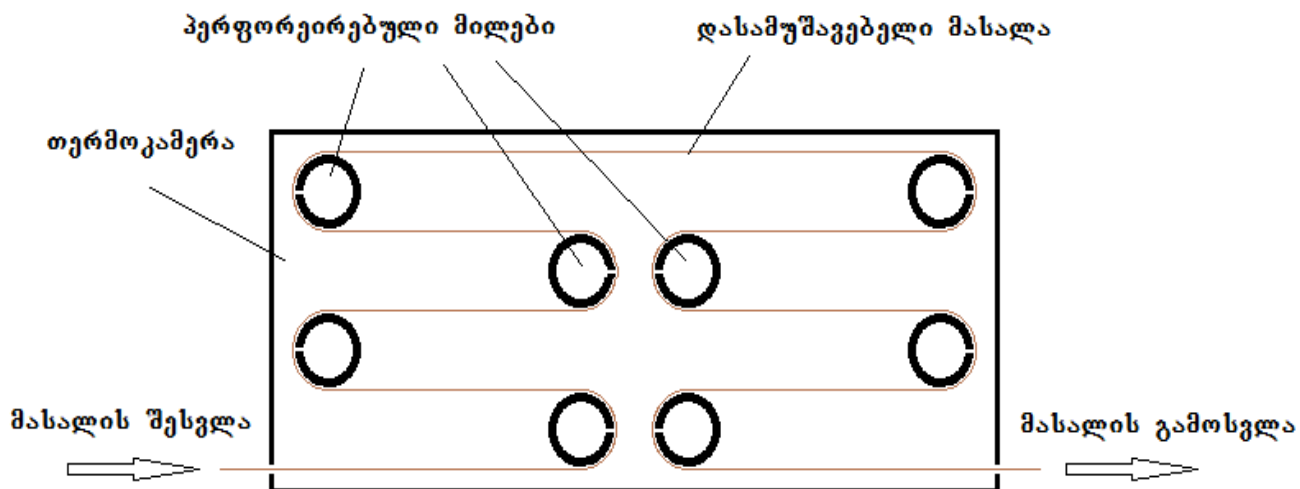
თბური დამუშავების დანადგარში მოთავსებული დასამუშავებელი მასალის სიგრძის განსაზღვრა ხდება შემდეგი გამოსახულებით:

$$L = \tau \cdot \omega, \text{ მ} \quad (5.21)$$

სადაც  $\tau$  – არის მოცემული მასალის თბური დამუშავებისათვის აუცილებელი და ტექნოლოგიური პირობებით დადგენილი დრო, წმ; ხოლო  $\omega$  – დასამუშავებელი რულონური მასალის გადადგილების სიჩქარე, მ/წმ, რომელიც განისაზღვრება მასალის უწყვეტი სერიული წარმოების სხვა ტექნოლოგიურ პროცესებთან მიმართებაში (წარმოების ნაკადური ხაზის არსებობის შემთხვევაში) ან მოცემული თბოდამამუშავებელი დანადგარის მწარმოებლურობის სასურველი მნიშვნელობით.

(5.21)-ით განსაზღვრული სიგრძის რიცხვითი მნიშვნელობა ძირითადად დანადგარში არსებული აეროდინამიკური საყრდენების (პერფორირებული მილების) რაოდენობის განსაზღვრისას. თუ  $L$  მცირე სიდიდეა (მაგალითად 0,5 მ და უფრო მოკლე), მაშინ დანადგარში შეიძლება მოთავსებული იყოს მხოლოდ ერთი აეროდინამიკური საყრდენი, ანუ ერთი პერფორირებული მილი. მაგრამ იმ შემთხვევაში, როცა  $L$  –ის მნიშვნელობა (რამოდენიმე ერთეული ან ათეული მეტრი), მაშინ პერფორირებული მილების როდენობაც მრავალი შეიძლება იყოს. ამასთან, ასეთ შემთხვევაში აუცილებელია დასამუშავებელი მასალის დანადგარში მოძრაობის სქემის შედგენა. გარდა ამისა გათვალისწინებული უნდა იყოს, რომ რადგან დასამუშავებელ მასალაზე თბური ენერგიის მიწოდება ძირითადად აეროდინამიკური საყრდენის საჰაერო ბალიშის მიდამოებში ხდება, არ არის სასურველი მასალის მოძრაობის მიმართულების მიხედვით მეზობელი საყრდენების ერთმანეთისაგან ნახევარ მეტრზე უფრო მეტ მანძილზე განლაგება. დამატებით გათვალისწინებული უნდა იყოს, რომ მასალის მოძრაობის სქემა და აეროდინამიკური საყრდენების განლაგება უზრუნველყოფდეს მასალის მიერ ყოველი პერფორირებული მილის 180 გრადუსიანი კუთხით შემოფენას.

5.6 ნახაზზე წარმოდგენილია თბოდამამუშავებელ დანადგარში მასალის მოძრაობის სქემისა და პერფორირებული მილების განლაგების მაგალითი.



ნახ. 5.6. დანადგარში მასალის მოძრაობის სქემა და პერფორირებული მილების განლაგება

#### 5.4.5. ჰაერშემბერის ან კომპრესორის შერჩევა და გამახურებლის სიმძლავრის დადგენა.

აეროდინამიკურ საყრდენებიან თბოდამამუშავებელ დანადგარში მისაწოდებელი ჰაერის საჭირო რაოდენობა განისაზღვრება, როგორც

$$G = G_1 \cdot N \quad , \quad (5.22)$$

სადაც  $G_1$  – არის (5.9) გამოსახულებით გამოთვლილი ხარჯი ერთი მილისათვის, ხოლო  $N$  – აეროდინამიკური საყრდენების რაოდენობა, რომელიც დანადგარში მასალის მოძრაობის შერჩეული სქემის მიხედვით განსაზღვრული.



საჭირო პარამეტრების ჰაერის მიმწოდებელი ჰაერშემბერის ან კომპრესორის შერჩევა უნდა მოხდეს (5.22)-ით გამოთვლილი მწარმოებლობისა და (5.14)-ით გამოთვლილი, პერფორირებული მილის შიგნით არსებული წნევის სიდიდის მოხედვით. ჰაერის წყაროს მარკა, ტიპი და კონსტრუქცია შეირჩევა ეკონომიკური, კონსტრუქციული, ეკოლოგიური და სხვა მოსაზრებების გათვალისწინებით, მაგრამ მწარმოებლობისა და განვითარებული წნევის მიხედვით ის აუცილებლად უნდა აკმაყოფილებდეს G-ს და P<sub>1</sub>-ის ხსენებული გამოსახულებებით გამოთვლილ მნიშვნელობებს.

პოლიმერული მასალის თერმიული დამუშავებისათვის აუცილებელ ტემპერატურამდე ჰაერის გასაცხელებლად გამოყენებული გამათბობელის თბური სიმძლავრე იანგარიშება ცნობილი ფორმულით:

$$Q = G c_p (T - T_0) \text{ ვტ} \quad , \quad (5.23)$$

სადაც G – ჰაერის (5.22) გამოსახულებით გაანგარიშებული საერთო რაოდენობაა, კგ/წმ; c<sub>p</sub> – ჰაერის მასური სითბოტევადობაა მუდმივი წნევის პირობებში, ჯ/კგ·გრად.; T და T<sub>0</sub> – შესაბამისად მასალის თბოდამუშავებისათვის აუცილებელი და გარემო ჰაერის ტემპერატურები.

ჰაერის გამაცხელებელი კალორიფერი შეიძლება მოქმედებდეს სხვადასხვა ენერგეტიკული წყაროებით, რის მიხედვითაც შეირჩევა მისი კონკრეტული კონსტრუქცია და ტიპი.

## დასკვნა

შესრულებული სამუშაო და მიღებული შედეგები შემდეგი დასკვნის გაკეთების საშუალებას იძლევა:

1. ჩატარებულია ლიტერატურული მიმოხილვა, რომლის საფუძველზე დადგენილია, რომ არასტაციონარულ და დრეკადკედლებიან არხებში რეალური სითხეების და გაზების მოძრაობას ახასიათებს რიგი თავისებურებები, რაც განაპირობებს მოვლენის ჰიდროდინამიკურ სირთულეს და მისი კვლევის სამეცნიერო აქტუალობას სხვადასხვა თვალსაზრისით. კერძოდ:

- 1.1. არასტაციონარულ და დრეკადკედლებიანი არხების თბოტექნოლოგიურ დანადგარებში გამოყენებით მათი ეფექტურობის გაზრდის თვალსაზრისით;
- 1.2. პოლიმერული და სხვა შემადგენლობის რულონური მასალების წარმოებაში აეროდინამიკურსაყრდენიანი მარტივი და მაღალეფექტური თბოდამამუშავებელი დანადგარების შექმნის თვალსაზრისით.

2. დამუშავებულია სამი ექსპერიმენტული სტენდი და შესაბამისი ცდების ჩატარებისა და მონაცემთა დამუშავების მეთოდიკა. კერძოდ:

- 2.1. ლითონისა და დრეკადი, ელასტიკური პოლიმერული მასალებისგან დამზადებული მილების ჰიდრაულიკური წინაღობების ხარისხობრივი ურთიერთშედარებისათვის;
- 2.2. ლითონის მილებისა და ელასტიკური, პლასტიკური და დრეკადი მასალისაგან დამზადებული მილების გამოყენებით განხორციელებული თბოგადაცემის პროცესების შესწავლისა და შედარებისათვის;
- 2.3. ელასტიკური, პლასტიკური და დრეკადი რულონური მასალების აეროდინამიკურ საყრდენში მიმდინარე თბური და აეროდინამიკური პროცესების შესწავლისათვის.

3. ჩატარებულია დიდი რაოდენობის ექსპერიმენტული სამუშაო, რომლის შედეგად მიღებული მონაცემების გაანალიზების საფუძველზე გაკეთებულია შესაბამისი დასკვნა და გამომუშავებულია რეკომენდაციები. კერძოდ:

- 3.1. დინების გამოკვლეულ რეჟიმებში მეტალის მიღების და ჩვენ მიერ გამოკვლეული დრეკადკედლებიანი პოლიმერული მიღების ჰიდრაულიკურ წინაღობათა ურთიერთშედარებით მიღებული შედეგების საფუძველზე შეგვიძლია გამოვთქვათ რეკომენდაცია იმის თაობაზე, რომ საინტერესო იქნება ანალოგიური ცდები ჩატარდეს ძალიან თხელკედლა პოლიმერული მასალებისაგან დამზადებულ არხებში სითხის მოძრაობის თავისებურებათა გამოსაკვლევად, რადგან ელასტიკურ მილში სიჩქარის მატების ჩვენს მიერ დაკვირვებული ერთეული შემთხვევა არ იძლევა სერიოზული დასკვნის გაკეთების საშუალებას;
- 3.2. წინა, პ. 3.1 დასკვნაში მოყვანილი რეკომენდაცია და გამოთქმული მოსაზრება გამყარებულია აგრეთვე იმ გარემოებით, რომ აეროდინამიკური საყრდენის ექსპერიმენტული გამოკვლევისას დაფიქსირებულია ჰაერის ბრტყელი სადინარი არხის თხელი პლასტიკური აფსკით წარმოქმნილი ცალი კედლის მიერ სხვადასხვა რეჟიმებში სხვადასხვა ზომის ელიფსური ფორმის მიღება, რაც გამოწვეულია შიგა და გარე დინამიური ზემოქმედების შედეგად აფსკის სიმრუდის რადიუსის ცვლილებით დინების სტაბილური რეჟიმის შენარჩუნების მიმართულებით.
- 3.3. ექსპერიმენტულად გაზომილია ცალი მხრიდან არასტაციონარული და დრეკადი კედლის მქონე ბრტყელ არხში ჰაერის დინების მიმართულებით ჩამოყალიბებული სტატიკური წნევის განაწილება და არხის სისქის მნიშვნელობები. გამოკვლეულია აეროდინამიკური საყრდენის გეომეტრიული ზომები და დინამიკური მახასიათებლები. აღნიშნული ექსპერიმენტული მონაცემების ანალიზზე დაყრდნობით დამუშავებულია პოლიმერული და სხვა რულონური მასალების მაღალეფექტურ

თბოღამამუშავებელ დანადგარებში გამოყენების პერსპექტივის მქონე აეროდინამიკური საყრდენის ინჟინრული გაანგარიშების მეთოდოლოგია.

4. ნაშრომში დაპროექტებული და განხორციელებული ექსპერიმენტული სტენდები შეიძლება გამოყენებული იქნეს ტექნიკური უმაღლესი სასწავლებლების თბოენერგეტიკული მიმართულების სასწავლო ლაბორატორიებში.

## გამოყენებული ლიტერატურა

1. *Womersley J. R.*, Velocity profiles of oscillating arterial flow with some calculations of viscous drag and the Reynolds number. *J Physiology*, Vol. 128, pp. 629-640. 1955.
2. *Womersley J. R.*, Oscillatory flow in arteries: the constrained elastic tube as a model of arterial flow and pulse transmission. // *Physics in Medicine and Biology*, Vol. 2, pp. 178-187, 1957.
3. Волобуев А. Н. Течение жидкости в трубках с эластичными стенками // *Успехи физ. наук*. 1995. Т. 165. № 2. С. 177–186.
4. Розанов В.В., Руденко О.В., Сысоев Н.Н. Нелинейные пульсовые волны в эластичных трубках с переменным сечением и изменяющимися упругими свойствами / *Физическая гидродинамика*. Вып. 9. Препринт физ. ф-та МГУ, 1998. № 12. С. 1–11.
5. Розанов В.В., Руденко О.В., Сысоев Н.Н. Нелинейные пульсовые волны в эластичных трубках с переменным сечением и изменяющимися упругими свойствами / *Физическая гидродинамика*. Вып. 9. Препринт физ. ф-та МГУ, 1998. № 12. С. 1–11.
6. Разработка технологических процессов и аппаратуры для интенсивной термообработки полимерных плёнок. Заключительный отчёт Грузинского политехнического института по хоздоговорной работе ТПГ-64/86. Тбилиси, 1988 г. Стр. 125. Госрегистрасиონный №
7. Шекриладзе И. Г., Гоцадзе К. Г., Мачавариანი Е. С. Распределение давления в криволинейном суживающем канале. Теплоэнергетические процессы и установки. *Научные труды Грузинского технического университетаю №6(362)*. Тбилиси. 1990 г. с. 73-75.
8. Гоцадзе К. Г., Капанадзе Б. Г., Гоголадзе М. Ш., Мачавариანი Г. А. Экспериментальные исследования эксплуатационных характеристик аэродинамической опоры. Теплоэнергетические процессы и установки. *Научные труды Грузинского технического университетаю №6(362)*. Тбилиси. 1990 г. с. 76-78.

9. მაჭავარიანი ე., ჯიხვაძე მ. პოლიმერულ მილებიანი რეკუპერაციული სითბოგადამცემი. საერთაშორისო სამეცნიერო-ტექნიკური კონფერენციის „გარემოს დაცვა და მდგრადი განვითარება“ შრომები. თბილისი, 2010 წ. გვ. 385–388.
10. Сажин Б. С. Современные методы сушки. Москва, «Знание», 1973 г. 219 с.
11. Разработка технологии структурирования полимерной плёнки на основе ПВМ и изготовление действующего макета установки для термообработки. Отчёт Груз. политехн. ин-та. Регистрационный №01840006195, 74 с.
12. Красников В. В. Конвективная сушка. М. Энергия, 1973 г., 350 с.
13. Лебедев П. Д. Теплообменные, сушильные и холодильные установки. М. Энергия, 1972 г. 320 с.
14. Борников В. Г. Основы технологии переработки пластических масс. Л-д. Химия 1983 г. 304 с.
15. Соколов П. В. Сушка древесины. М. Лесная промышленность, 1968, 364 с.
16. Муштаев В. И. Сушка в условиях пневмотранспорта. М. Химия. 1971 г. 206 с.
17. Техника сушки во взвешенном слое. Под. редакции Сажина Б. С. М., Химия, 1965 г. 254 с.
18. Лыков М. В. Сушка в химической промышленности. М. «Химия» 1970 г. 715 с.
19. Бунин О. А. Малков Ю. А. Машины для сушки и термообработки ткани. М., Машиностроение, 1972, 304 с.
20. Баумштейн В. Г. , Маизель Д. В. Автоматизация процессов сушки в химической промышленности. М., «Химия», 1970 г. 367 с.
21. პაპაშვილი ა. ჰიდრაულიკა. „განათლება“. თბილისი 1985 წ. 419 გვ.
22. Картвелишвили Н. А. Неустановившиеся открытые потоки. Л.: Гидрометеиздат, 1968.-127 с.
23. Альтшул А. Д. и др. Гидравлика и аэродинамика. М.: Стройиздат, 1987 г. 414 стр.
24. Кудряшов Н.А., Синельщиков Д.И., Чернявский И.Л. Нелинейные эволюционные уравнения для описания возмущений в вязко-эластичной трубке. НЕЛИНЕЙНАЯ ДИНАМИКА, 2008, Т. 4, №1, с. 69–86.
25. Педли Т. Гидродинамика крупных кровеносных сосудов. М.: Мир, 1983 г. 230 с.
26. Бранков Г. Основы биомеханики. М.: Мир, 1981 г. 387 с.
27. Каро К., Педли Т., Шротер Р., Сид У. Механика кровообращения. М.: Мир, 1981 г. 162 с.

28. Лайтфут Э. Явления переноса в живых системах. М.: Мир, 1977 г. 218 с.
29. Владимиров Ю. А., Рощупкин Д. И., Потапенко А. Я., Деев А. И. М.: Медицина, 1983 г. с. 152, 171.
30. Левтов В. А., Регирер С. А., Шадрин Р. Х. Реология крови. М.: Медицина, 1982 г. 198 с.
31. Волобуев А. Н., Пирогов В. П., Кошев В. И., Петров Е. С. Биофизика. **33** 675 (1988 г.).
32. Дрейцер Г.А., Дзюбенко Б.В., Якименко Р.И. Интенсификация теплообмена и анализ методов сравнения теплогидравлической эффективности теплопередающих поверхностей. //Труды Второй Российской национальной конференции по теплообмену. – М.: МЭИ. 199 Г . С .99-102.
33. Гортышов Ю.Ф., Олимпиаев В.В., Попов И.А. Эффективность промышленно эффективных интенсификаторов теплопередачи (Обзор. Анализ. Рекомендации) // Известия РАН, Энергетика. 200 № С.102-118.
34. Дрейцер Г.А. Исследования солевых отложений при течении воды с повышенной карбонатной жесткостью в каналах с дискретными турбулизаторами //Теплоэнергетика. 199 №3 С.30-35.
35. Кутателадзе С. С. Основы теории теплообмена. Новосибирск, Наука, 1970г. 659 с.

දෘඩාභිමාන I.

<http://dolphini.ru/post/11/>

## Скорость дельфина.

Дельфины очень давно переселились с суши в море и лучше других млекопитающих приспособились к жизни в воде. У дельфинов торпедовидная обтекаемая форма тела. Такая форма помогает преодолевать сопротивление воды. Главный двигатель – задняя хвостовая часть тела. Плавники, так же, как у рыб, служат рулями глубины и поворотов. Дельфины – очень быстрые животные. Они шутя перегоняют катера, которые мчатся со скоростью 40 километров в час. Учёные долго бились над загадкой – в чём же секрет такой скорости? Вода в 800 раз плотнее воздуха. Чтобы преодолеть её сопротивление, мускулы дельфина должны быть сильнее, чем у наземных животных в 10 раз. Но проверка ничего подобного не показала. Сил на 1 килограмм мышц у дельфина не более, чем у тигра или лося. Может быть секрет в коже дельфина? Кожа гасит вихревые потоки, которые возникают при его движении. Это было подтверждено с целью использования полученных данных в технике. Есть и другая точка зрения. Большие скорости движения дельфина, считают учёные, объясняются исключительно совершенством его движителя. Но уже сейчас построены опытные торпеды и корабли с упругой оболочкой, которые при той же силе машины движется в полтора раза быстрее.

### УЧЕНЫЕ НАШЛИ СЕКРЕТ СКОРОСТИ ДЕЛЬФИНА

Физики из Японии обнаружили, как поверхность кожи дельфина создает гидродинамический эффект скольжения под водой, благодаря которому они становятся великолепными и скоростными пловцами. Эти результаты могут помочь ученым проектировать быстрые и эффективные подлодки, лайнеры и катера. Результаты исследования опубликованы в журнале *Turbulence*.

Ученым давно известно, что дельфины обладают особыми органами в теле, которые помогают им уменьшать давление воды на кожу. Но до сих пор никто не знал, играет ли сама мягкая гладкая кожа дельфина также жизненную роль в придании телу оптимальной обтекаемой формы и почему они меняют свою кожу каждые 2 часа.

Чтобы попробовать роль кожи дельфинов исследователи из Киотского Института Технологий в Японии провели детальное компьютерное моделирование движения потока воды по коже дельфина. Оказалось, что 'мягкость' или 'волнистость' их кожи помогают уменьшать трение в процессе скольжения в воде. Они также обнаружили, что потеря частиц кожи по всему телу создает в процессе движения водовороты воды, которые сглаживают трение с потоком вокруг поверхности дельфина, который замедляют его движение.

Применение аналогичных дельфиньим технологий скольжения в воде при строительстве судов и субмарин, позволит значительно повысить скорость движения кораблей.



დანართი II.

მეტალისა და პოლიმერული მასალებისაგან დამზადებული მილების  
ჰიდრაულიკური წინააღმდეგობის ხარისხობრივად შესადარებელი  
ექსპერიმენტების შედეგად მიღებული მონაცემები

ცხრილი დ-3.1

( $\Delta P = 1520$  მმ წყ. სვ.)

მასალა	დიამეტრ.	შევს. წმ	მასალა	დიამეტრ.	შევსების დრო, წმ	
					მეტალები	პოლიმერები
მსხ.გამჭვ.	13.5	8.62	სპილენძი	13	9.05	
სპილენძი	13	9.05	უქ.ფოლ.	11	15.21	
უქ.ფოლ.	11	15.21	სპილენძი	8.4	33.68	
სპილენძი	8.4	33.68	რკინა	5.6	80.02	
მსხ.გამჭვ.	8	38.15	წვ.მეტალ.	4	178.87	
თეთრი	6.5	57.08	მსხ.გამჭვ.	13.5		8.62
საშ.ჭუჭყ.	6	75.92	მსხ.გამჭვ.	8		38.15
საშ.გამჭვ.	5.8	82.62	თეთრი	6.5		57.08
რკინა	5.6	80.02	საშ.ჭუჭყ.	6		75.92
წვ.მეტალ.	4	178.87	საშ.გამჭვ.	5.8		82.62
წვ.გამჭვ.	3	343.89	წვ.გამჭვ.	3		343.89

ცხრილი დ-3.2

( $\Delta P = 1520$  მმ წყ. სვ.)

მასალა	დიამეტრი	სიჩქარე, ლ/წმ		მასალა	დიამეტრი	მოცულობითი სიჩქარე, მ <sup>3</sup> /წმ	
		მეტალები	პოლიმერები			მეტალები	პოლიმერები
სპილენძი	13	0.320442		სპილენძი	13	0.00032	
უქ.ფოლ.	11	0.190664		უქ.ფოლ.	11	0.000191	
სპილენძი	8.4	0.086105		სპილენძი	8.4	8.61E-05	
რკინა	5.6	0.036241		რკინა	5.6	3.62E-05	
წვ.მეტალ.	4	0.016213		წვ.მეტალ.	4	1.62E-05	
მსხ.გამჭვ.	13.5		0.336427	მსხ.გამჭვ.	13.5		0.000336
მსხ.გამჭვ.	8		0.076016	მსხ.გამჭვ.	8		7.6E-05
თეთრი	6.5		0.050806	თეთრი	6.5		5.08E-05
საშ.ჭუჭყ.	6		0.038198	საშ.ჭუჭყ.	6		3.82E-05
სპილენძი	13		0.0351	საშ.გამჭვ.	5.8		3.51E-05
უქ.ფოლ.	11		0.008433	წვ.გამჭვ.	3		8.43E-06

ცხრილი დ-3.3  
( $\Delta P = 1520$  მმ წყ. სვ.)

მასალა	დიამეტ.	ფართობი, მმ <sup>2</sup>		მასალა	დიამეტ.	ფართობი, მ <sup>2</sup>	
		მეტალები	პოლიმერ.			მეტალები	პოლიმერ.
სპილენძი	13	132.7323		სპილენძი	13	0.000133	
უჟ.ფოლ.	11	95.03318		უჟ.ფოლ.	11	9.5E-05	
სპილენძი	8.4	55.41769		სპილენძი	8.4	5.54E-05	
რკინა	5.6	24.63009		რკინა	5.6	2.46E-05	
წვ.მეტალ.	4	12.56637		წვ.მეტალ.	4	1.26E-05	
მსხ.გამჭვ.	13.5		143.1388	მსხ.გამჭვ.	13.5		0.000143
მსხ.გამჭვ.	8		50.26548	მსხ.გამჭვ.	8		5.03E-05
თეთრი	6.5		33.18307	თეთრი	6.5		3.32E-05
საშ.ჭუჭყ.	6		28.27433	საშ.ჭუჭყ.	6		2.83E-05
საშ.გამჭვ.	5.8		26.42079	საშ.გამჭვ.	5.8		2.64E-05
წვ.გამჭვ.	3		7.068583	წვ.გამჭვ.	3		7.07E-06

ცხრილი დ-3.4  
( $\Delta P = 1520$  მმ წყ. სვ.)

მასალა	დიამეტ.	სინქარე, მ/წმ		მასალა	დიამეტ.	რეინოლ. რიცხვი	
		მეტალები	პოლიმერ.			მეტალები	პოლიმერ.
სპილენძი	13	2.414198		სპილენძი	13	24031.06	
უჟ.ფოლ.	11	2.006289		უჟ.ფოლ.	11	16898.3	
სპილენძი	8.4	1.553737		სპილენძი	8.4	9993.407	
რკინა	5.6	1.471409		რკინა	5.6	6309.259	
წვ.მეტალ.	4	1.290181		წვ.მეტალ.	4	3951.55	
მსხ.გამჭვ.	13.5		2.350354	მსხ.გამჭვ.	13.5		24295.39
მსხ.გამჭვ.	8		1.512285	მსხ.გამჭვ.	8		9263.613
თეთრი	6.5		1.531078	თეთრი	6.5		7620.222
საშ.ჭუჭყ.	6		1.350982	საშ.ჭუჭყ.	6		6206.653
საშ.გამჭვ.	5.8		1.328516	საშ.გამჭვ.	5.8		5899.997
წვ.გამჭვ.	3		1.193015	წვ.გამჭვ.	3		2740.464

ცხრილი დ-3.5

( $\Delta P=2025$  მმ წყ. სვ.)

მასალა	დიამეტრ.	შევს. წმ	მასალა	დიამეტრ.	შევსების დრო,წმ	
					მეტალები	პოლიმერები
მსხ.გამჭვ.	13.5	5.73	სპილენძი	13	6.96	
სპილენძი	13	6.96	უჟ.ფოლ.	11	11.61	
უჟ.ფოლ.	11	11.61	სპილენძი	8.4	26.11	
სპილენძი	8.4	26.11	რკინა	5.6	65.23	
მსხ.გამჭვ.	8	27.53	წვ.მეტალ.	4	157.52	
თეთრი	6.5	39.81	მსხ.გამჭვ.	13.5		5.73
საშ.ჭუჭყ.	6	55.22	მსხ.გამჭვ.	8		27.53
საშ.გამჭვ.	5.8	63.54	თეთრი	6.5		39.81
რკინა	5.6	65.23	საშ.ჭუჭყ.	6		55.22
წვ.მეტალ.	4	157.52	საშ.გამჭვ.	5.8		63.54
წვ.გამჭვ.	3	264.53	წვ.გამჭვ.	3		264.53

ცხრილი დ-3.6

( $\Delta P=2025$  მმ წყ. სვ.)

მასალა	დიამეტრი	სინქარე, ლ/წმ		მასალა	დიამეტრი	მოცულობითი სინქარე, გპ/წმ	
		მეტალები	პოლიმერები			მეტალები	პოლიმერები
სპილენძი	13	0.416667		სპილენძი	13	0.000417	
უჟ.ფოლ.	11	0.249785		უჟ.ფოლ.	11	0.00025	
სპილენძი	8.4	0.111069		სპილენძი	8.4	0.000111	
რკინა	5.6	0.044458		რკინა	5.6	4.45E-05	
წვ.მეტალ.	4	0.01841		წვ.მეტალ.	4	1.84E-05	
მსხ.გამჭვ.	13.5		0.506108	მსხ.გამჭვ.	13.5		0.000506
მსხ.გამჭვ.	8		0.10534	მსხ.გამჭვ.	8		0.000105
თეთრი	6.5		0.072846	თეთრი	6.5		7.28E-05
საშ.ჭუჭყ.	6		0.052517	საშ.ჭუჭყ.	6		5.25E-05
სპილენძი	13		0.045641	საშ.გამჭვ.	5.8		4.56E-05
უჟ.ფოლ.	11		0.010963	წვ.გამჭვ.	3		1.1E-05

ცხრილი დ-3.7  
(ΔP=2025 მმ წყ. სვ.)

მასალა	დიამეტ.	ფართობი, მმ <sup>2</sup>		მასალა	დიამეტ.	ფართობი, მ <sup>2</sup>	
		მეტალები	პოლიმერ.			მეტალები	პოლიმერ.
სპილენძი	13	132.7323		სპილენძი	13	0.000133	
უჟ.ფოლ.	11	95.03318		უჟ.ფოლ.	11	9.5E-05	
სპილენძი	8.4	55.41769		სპილენძი	8.4	5.54E-05	
რკინა	5.6	24.63009		რკინა	5.6	2.46E-05	
წვ.მეტალ.	4	12.56637		წვ.მეტალ.	4	1.26E-05	
მსხ.გამჭვ.	13.5		143.1388	მსხ.გამჭვ.	13.5		0.000143
მსხ.გამჭვ.	8		50.26548	მსხ.გამჭვ.	8		5.03E-05
თეთრი	6.5		33.18307	თეთრი	6.5		3.32E-05
საშ.ჭუჭყ.	6		28.27433	საშ.ჭუჭყ.	6		2.83E-05
საშ.გამჭვ.	5.8		26.42079	საშ.გამჭვ.	5.8		2.64E-05
წვ.გამჭვ.	3		7.068583	წვ.გამჭვ.	3		7.07E-06

ცხრილი დ-3.8  
(ΔP=2025 მმ წყ. სვ.)

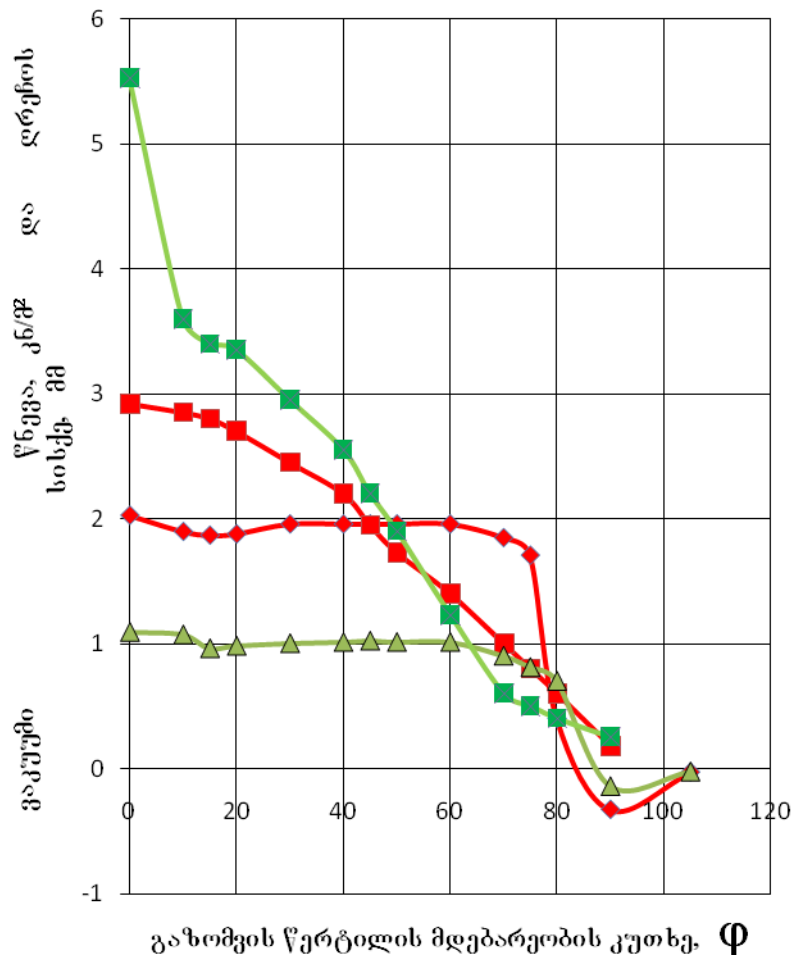
მასალა	დიამეტ.	სიხქარე, მ/წმ		მასალა	დიამეტ.	რეინოლ. რიცხვი	
		მეტალები	პოლიმერ.			მეტალები	პოლიმერ.
სპილენძი	13	3.139151		სპილენძი	13	31247.29	
უჟ.ფოლ.	11	2.628394		უჟ.ფოლ.	11	22138.08	
სპილენძი	8.4	2.004207		სპილენძი	8.4	12890.77	
რკინა	5.6	1.805031		რკინა	5.6	7739.796	
წვ.მეტალ.	4	1.46505		წვ.მეტალ.	4	4487.136	
მსხ.გამჭვ.	13.5		3.535786	მსხ.გამჭვ.	13.5		36549.09
მსხ.გამჭვ.	8		2.095665	მსხ.გამჭვ.	8		12837.15
თეთრი	6.5		2.195276	თეთრი	6.5		10925.95
საშ.ჭუჭყ.	6		1.857416	საშ.ჭუჭყ.	6		8533.305
საშ.გამჭვ.	5.8		1.727448	საშ.გამჭვ.	5.8		7671.667
წვ.გამჭვ.	3		1.550925	წვ.გამჭვ.	3		3562.614

## დანართი III

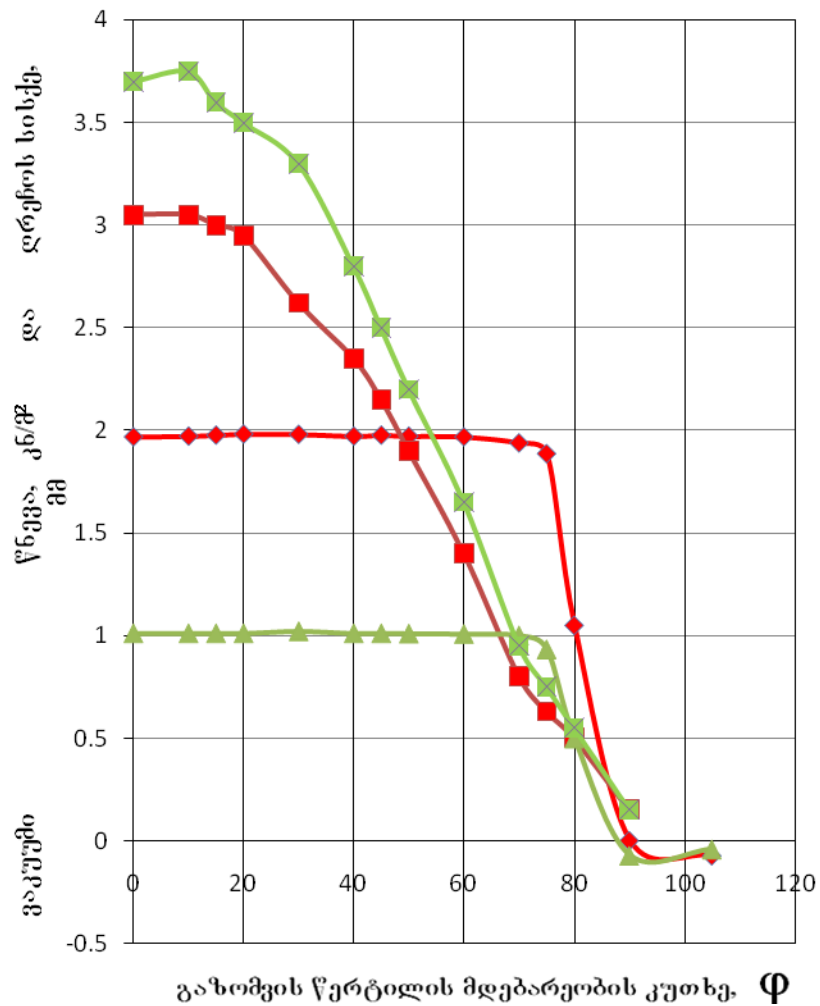
აეროდინამიკური საყრდენის ექსპერიმენტული კვლევის  
პროცესში მიღებული მონაცემები

ცხრილი დ-4.1

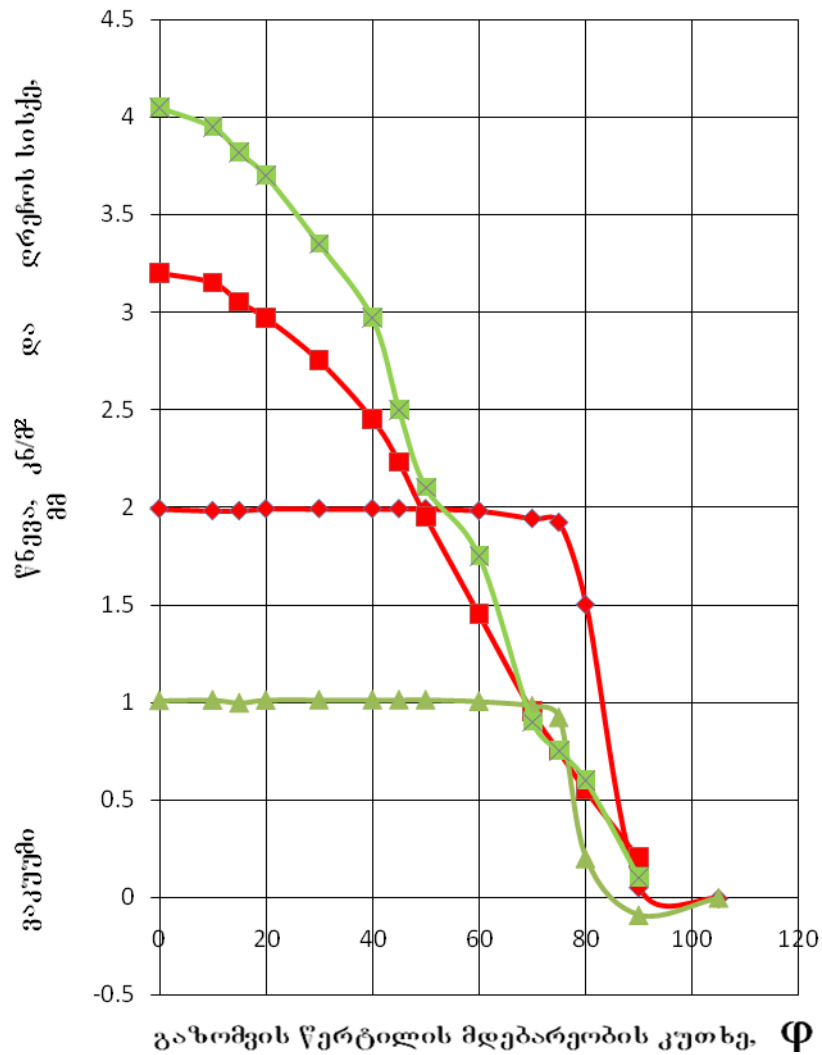
კუთხური კოორდინატი (გრადუსი)	ტექნოლ. დაჭიმ. გრძივი ძალა 104,4 ნ/მ		ტექნოლ. დაჭიმ. გრძივი ძალა 54,08 ნ/მ	
	წნევა, კნ/მ <sup>2</sup>	ღრეზოს სისქე, მმ	წნევა, კნ/მ <sup>2</sup>	ღრეზოს სისქე, მმ
0	2.03	2.92	1.09	5.53
10	1.9	2.85	1.07	3.6
15	1.87	2.8	0.96	3.4
20	1.88	2.7	0.98	3.35
30	1.96	2.45	1	2.95
40	1.96	2.2	1.01	2.55
45	1.96	1.95	1.02	2.2
50	1.96	1.73	1.01	1.9
60	1.96	1.4	1.01	1.23
70	1.85	1	0.9	0.6
75	1.71	0.8	0.81	0.5
80	0.4	0.6	0.7	0.4
90	-0.33	0.18	-0.14	0.25
105	-0.03		-0.023	



კუთხური კოორდინატი (გრადუსი)	ტექნოლ. დატვი. გრძივი ძალა 104,4 ნ/მ		ტექნოლ. დატვი. გრძივი ძალა 54,08 ნ/მ	
	წნევა, კნ/მ <sup>2</sup>	ღრეზოს სისქე, მმ	წნევა, კნ/მ <sup>2</sup>	ღრეზოს სისქე, მმ
0	2.08	2.2	1.08	2.66
10	2.05	2.18	1.05	2.75
15	1.99	2.1	1.03	2.62
20	2.05	1.9	1.05	2.5
30	2.06	1.8	1.07	2.2
40	2.06	1.65	1.07	1.9
45	2.06	1.45	1.07	1.6
50	2.05	1.25	1.07	1.3
60	2.05	0.9	1.06	0.85
70	1.98	0.5	1	0.36
75	1.94	0.3	0.94	0.3
80	0.8	0.22	0.7	0.2
90	-0.18	0.16	-0.078	0.18
105	0	0.1	-0.002	0.15



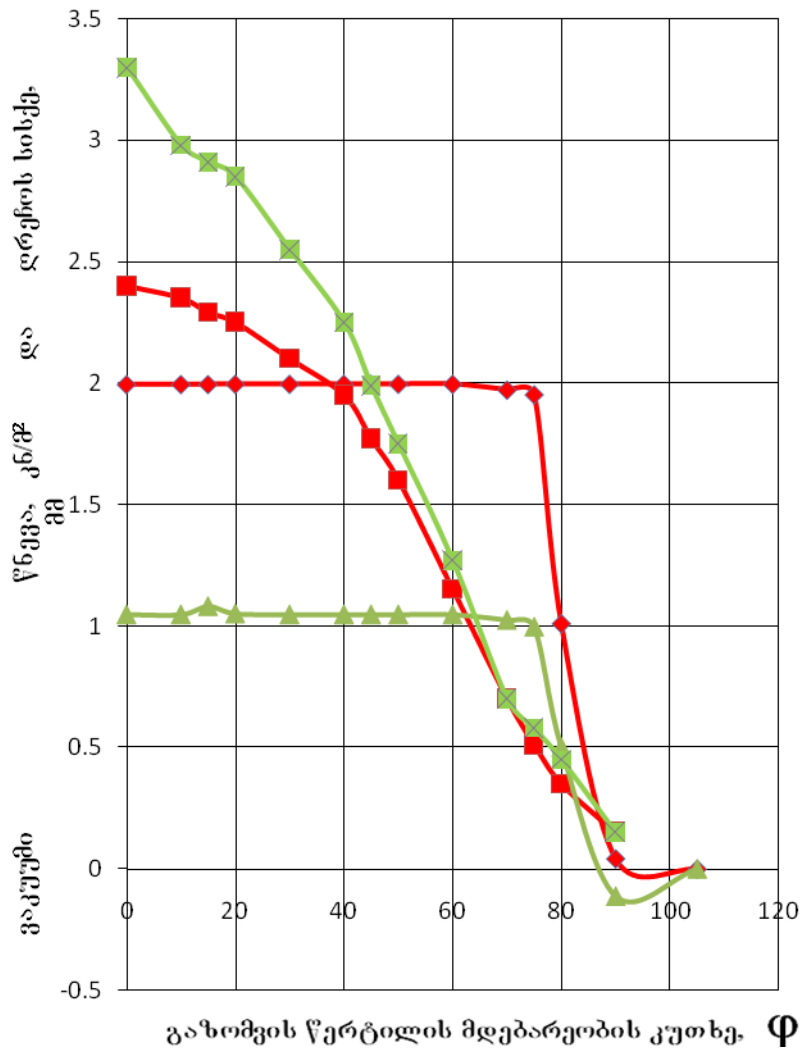
კუთხური კოორდინატი (გრადუსი)	ტექნოლ. დაჭიმ. გრძივი ძალა 104,4 ნ/მ		ტექნოლ. დაჭიმ. გრძივი ძალა 54,08 ნ/მ	
	წნევა, კნ/მ <sup>2</sup>	ღრეზოს სისქე, მმ	წნევა, კნ/მ <sup>2</sup>	ღრეზოს სისქე, მმ
0	1.99	3.2	1.007	4.05
10	1.98	3.15	1.01	3.95
15	1.98	3.05	0.995	3.82
20	1.99	2.97	1.01	3.7
30	1.99	2.75	1.011	3.35
40	1.99	2.45	1.011	2.97
45	1.99	2.23	1.011	2.5
50	1.99	1.95	1.011	2.1
60	1.98	1.45	1.003	1.75
70	1.94	0.95	0.98	0.9
75	1.92	0.75	0.921	0.75
80	1.5	0.55	0.2	0.6
90	0.051	0.2	-0.091	0.1
105	-0.004		-0.0015	



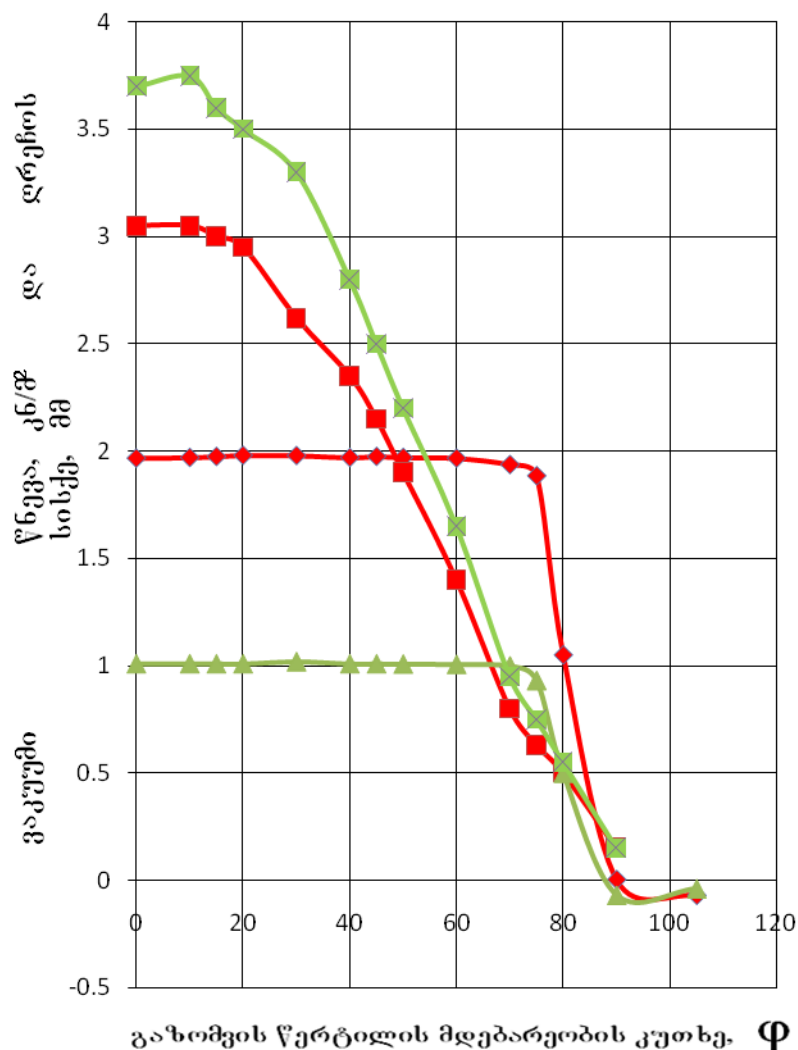


ცხრილი დ-4.4

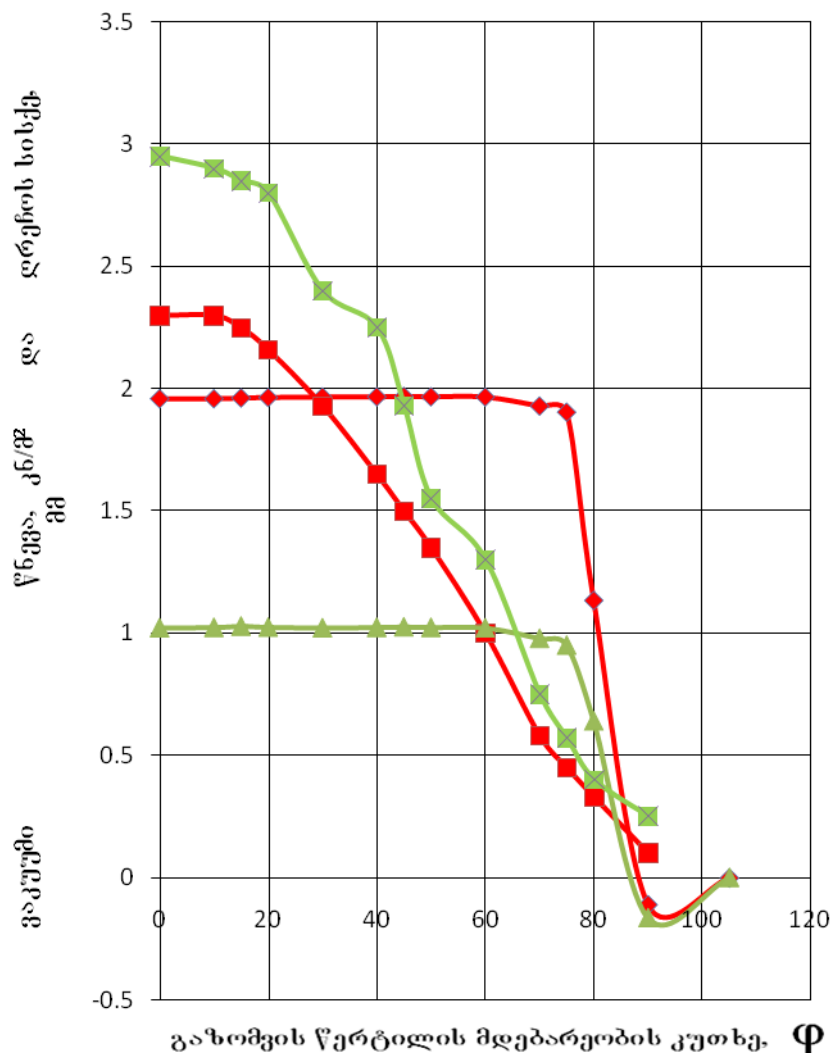
კუთხური კოორდინატი (გრადუსი)	ტექნოლ. დაჭიმ. გრძივი ძალა 104,4 ნ/მ		ტექნოლ. დაჭიმ. გრძივი ძალა 54,08 ნ/მ	
	წნევა, კნ/მ <sup>2</sup>	ღრეზოს სისქე, მმ	წნევა, კნ/მ <sup>2</sup>	ღრეზოს სისქე, მმ
0	1.994	2.4	1.046	3.3
10	1.994	2.35	1.046	2.98
15	1.994	2.29	1.08	2.91
20	1.995	2.25	1.05	2.85
30	1.995	2.1	1.046	2.55
40	1.995	1.95	1.046	2.25
45	1.995	1.77	1.046	1.99
50	1.995	1.6	1.046	1.75
60	1.995	1.15	1.046	1.27
70	1.971	0.7	1.023	0.7
75	1.952	0.51	0.995	0.58
80	1.01	0.35	0.5	0.45
90	0.043	0.15	-0.113	0.15
105	0		0	



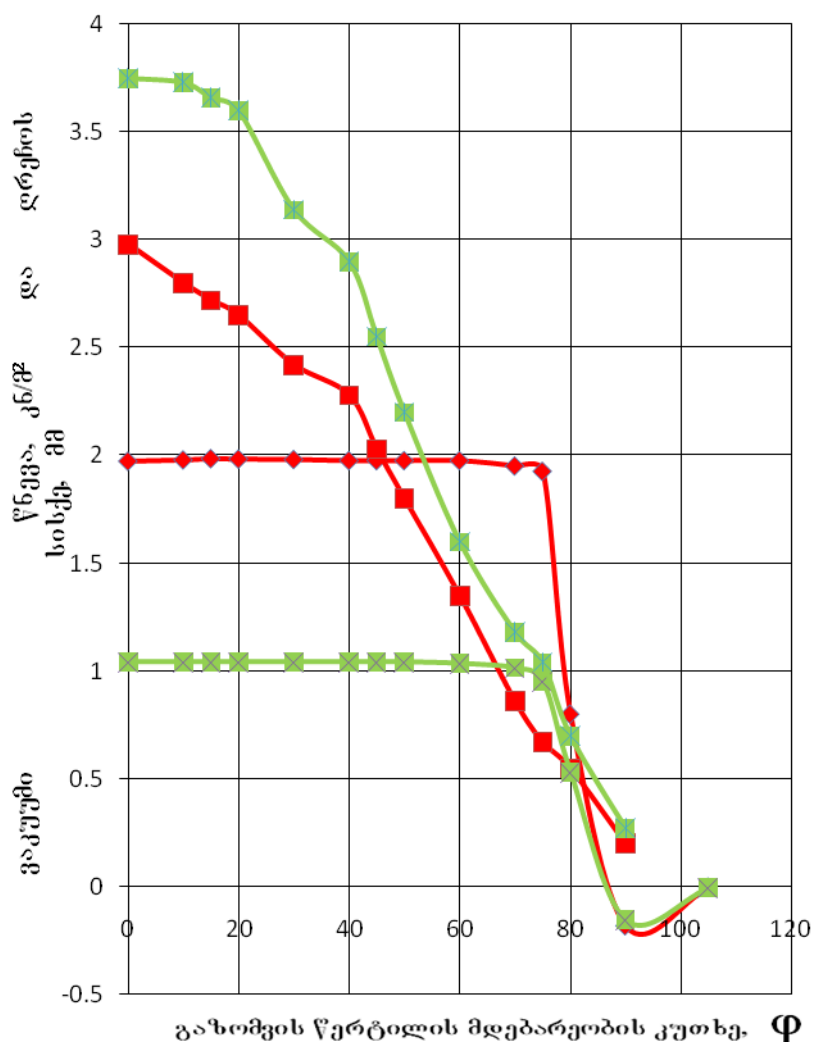
კუთხური კოორდინატი (გრადუსი)	ტექნოლ. დაჭიმ. გრძივი ძალა 104,4 ნ/მ		ტექნოლ. დაჭიმ. გრძივი ძალა 54,08 ნ/მ	
	წნევა, კნ/მ <sup>2</sup>	ღრეზოს სისქე, მმ	წნევა, კნ/მ <sup>2</sup>	ღრეზოს სისქე, მმ
0	1.967	3.05	1.01	3.7
10	1.97	3.05	1.01	3.75
15	1.975	3	1.01	3.6
20	1.98	2.95	1.01	3.5
30	1.979	2.62	1.02	3.3
40	1.97	2.35	1.01	2.8
45	1.975	2.15	1.01	2.5
50	1.97	1.9	1.009	2.2
60	1.967	1.4	1.007	1.65
70	1.937	0.8	1	0.95
75	1.885	0.63	0.932	0.75
80	1.05	0.5	0.5	0.55
90	0.00392	0.15	-0.07	0.15
105	-0.07		-0.039	



კუთხური კოორდინატი (გრადუსი)	ტექნოლ. დაჭიმ. გრძივი ძალა 104,4 ნ/მ		ტექნოლ. დაჭიმ. გრძივი ძალა 54,08 ნ/მ	
	წნევა, კნ/მ <sup>2</sup>	ღრეხოს სისქე, მმ	წნევა, კნ/მ <sup>2</sup>	ღრეხოს სისქე, მმ
0	1.96	2.3	1.023	2.95
10	1.96	2.3	1.025	2.9
15	1.963	2.25	1.03	2.85
20	1.965	2.16	1.026	2.8
30	1.967	1.93	1.023	2.4
40	1.968	1.65	1.025	2.25
45	1.969	1.5	1.027	1.93
50	1.968	1.35	1.025	1.55
60	1.967	1	1.023	1.3
70	1.93	0.58	0.98	0.75
75	1.905	0.45	0.952	0.57
80	1.135	0.33	0.642	0.4
90	-0.109	0.1	-0.164	0.25
105	0		0.001	



კუთხური კოორდინატი (გრადუსი)	ტექნოლ. დაჭიმ. გრძივი ძალა 104,4 ნ/მ		ტექნოლ. დაჭიმ. გრძივი ძალა 54,08 ნ/მ	
	წნევა, კნ/მ <sup>2</sup>	ღრეხოს სისქე, მმ	წნევა, კნ/მ <sup>2</sup>	ღრეხოს სისქე, მმ
0	1.975	2.98	1.042	3.75
10	1.981	2.8	1.042	3.73
15	1.987	2.72	1.042	3.66
20	1.985	2.65	1.042	3.6
30	1.983	2.42	1.042	3.14
40	1.978	2.28	1.042	2.9
45	1.978	2.03	1.042	2.55
50	1.978	1.8	1.042	2.2
60	1.978	1.35	1.035	1.6
70	1.953	0.86	1.014	1.18
75	1.928	0.67	0.952	1.04
80	0.8	0.55	0.53	0.7
90	-0.183	0.2	-0.157	0.27
105	-0.003		-0.0063	



კუთხური კოორდინატი (გრადუსი)	ტექნოლ. დაჭიმ. გრძივი ძალა 104,4 ნ/მ		ტექნოლ. დაჭიმ. გრძივი ძალა 54,08 ნ/მ	
	წნევა, კნ/მ <sup>2</sup>	ღრეზოს სისქე, მმ	წნევა, კნ/მ <sup>2</sup>	ღრეზოს სისქე, მმ
0	1.983	2.22	1.034	3.03
10	1.983	2.1	1.036	2.92
15	1.983	2.05	1.038	2.82
20	1.983	1.95	1.04	2.71
30	1.983	1.82	1.042	2.47
40	1.983	1.67	1.038	2.32
45	1.983	1.53	1.038	2.01
50	1.983	1.38	1.038	1.7
60	1.975	1.08	1.038	1.3
70	1.956	0.78	1.038	0.68
75	1.936	0.61	0.987	0.52
80	1.002	0.42	0.45	0.35
90	-0.062	0.3	-0.148	0.2
105	-0.0001		-0.004	

