

თენგიზ მაგრაქველიძე, გიორგი გიგინეიშვილი, ხათუნა ლომიძე,  
ავქსენტი მიქაშავიძე, ტარიელ კობერიძე

## ვერტიკალურ ზედაპირზე ჩამომდინარე სითხის აფსკში თბოგაცემის ინტენსიფიკაცია ხელოვნური ხორკლიანობის მეთოდით

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი  
77, მ. კოსტავას ქუჩა 77, 0160, თბილისი, საქართველო

### რეზიუმე

*ვუძღვნიტ*

*ჩვენი კოლეგებისა და მეგობრების  
ვაჟა ჯამარჯაშვილის, არჩილ გომელაურისა  
და ჯონდო რუსიშვილის ხსოვნას*

### ძირითადი აღნიშვნები:

- $\alpha$  – თბოგაცემის კოეფიციენტი, ვტ / (მ<sup>2</sup> K);
- $a$  – სითხის ტემპერატურაგამტარობის კოეფიციენტი, მ<sup>2</sup>/წმ;
- $c_p$  – სითხის კუთრი სითბოტევადობა, კჯ/(კგ K);
- $\eta$  – უგანზომილებო მანძილი კედლიდან;
- $\eta_1$  – უგანზომილებო მანძილი ბლანტი ქვეშრის გარე საზღვრამდე;

$\eta_2$  – უგანზომილებო მანძილი ბუფერული ზონის გარე საზღვრამდე;  
 $F$  – თბოგამცემი ზედაპირის ფართი, მ<sup>2</sup>;  
 $G$  – თბოგამცემი ზედაპირის მორწყვის კოეფიციენტი, მ<sup>2</sup>/წმ;  
 $h$  – ორგანზომილებიანი ხორკლიანობის ელემენტების სიმაღლე, მმ;  
 $k_s$  – ნიკურამის („ქვიშისებური“) ხორკლიანობის ელემენტების სიმაღლე, მმ;  
 $L$  – მსაზღვრელი გეომეტრიული ზომა, მ;  
 $\lambda$  – სითხის თბოგამტარობის კოეფიციენტი, ვტ/(მ K);  
 $\nu$  – სითხის კინემატიკური სიბლანტის კოეფიციენტი, მ<sup>2</sup>/წმ;  
 $\xi$  – ჰიდრავლიკური წინაღობის კოეფიციენტი;  
 $q$  – ხვედრითი თბური ნაკადი, ვტ/მ<sup>2</sup>;  
 $r_0$  – მილის რადიუსი, მ;  
 $\rho$  – სითხის სიმკვრივე, კგ/მ<sup>3</sup>;  
 $s$  – ხორკლიანობის ელემენტებს შორის მანძილი (ბიჯი), მმ;  
 $s/h$  – ფარდობითი ბიჯი ხორკლიანობის ელემენტებს შორის;  
 $\tau$  – მხები ძაბვა, ნ/მ<sup>2</sup>;  
 $u$  – სითხის ნაკადის სიჩქარე, მ/წმ;  
 $u_*$  – დინამიკური სიჩქარე, მ/წმ;  
 $\varphi = \frac{u}{u_*}$  – უგანზომილებო სიჩქარე;  
 $y$  – მანძილი კედლიდან, მ.

### კრიტერიუმები:

$$Nu = \frac{\alpha L}{\lambda} \text{ – ნუსელტის კრიტერიუმი;}$$

$$Ni = k_s u_* / \nu \text{ – ნიკურამის კრიტერიუმი;}$$

$$Pr = \frac{\nu}{a} \text{ – პრანდტლის კრიტერიუმი;}$$

$$Re = \frac{u L}{\nu} \text{ – რეინოლდსის კრიტერიუმი;}$$

$Re_*$  – რეინოლდსის რიცხვი, რომლის დროსაც იწყება ხორკლიანობის სრული გამოვლინების რეჟიმი.

### ინდექსები:

$\delta$  – ბლანტი;  $gl$  – გლუვი;  $h$  – ხორკლიანი;  $t$  – ტურბულენტური.

მონოგრაფია მიძღვნილია ისეთი აქტუალური საკითხისადმი, როგორცაა ენერგეტიკულ დანადგარებში თბოგადაცემის პროცესის ინტენსიფიკაცია.

თანამედროვე დანადგარებში, როგორებიცაა, მაგალითად, თბოელექტროსადგურების ორთქლგენერატორები, კონდენსატორებისა და ელექტროგენერატორების გაცივების სისტემები, მეტალურგიული, საავიაციო, სარაკეტო, კოსმოსური ტექნიკა, გათბობის სისტემები და ა.შ., უაღრესად დიდი როლი ენიჭება თბოგადაცემის ინტენსიურობის ამაღლებას, რადგან ეს უკანასკნელი განაპირობებს დანადგარების ეფექტურ მუშაობას და, რაც ძალზე მნიშვნელოვანია, მათ კომპაქტურობას.

ვინაიდან თბოგაცემა მყარი ზედაპირიდან სითხეში (აირში) ან პირუკუ წარმოადგენს თბოგადაცემის პროცესის ერთ-ერთ ძირითად შემადგენელ საფეხურს, ცხადია, რომ მისი ინტენსიურობა დიდწილად განაპირობებს თბოგადაცემის პროცესის ინტენსიურობას. აქედან გამომდინარე, თბოგაცემის ინტენსიფიკაციის მეთოდების შესწავლას და დამუშავებას უდიდესი პრაქტიკული მნიშვნელობა ენიჭება. ამასთან ერთად, ვინაიდან თბოგაცემის ინტენსიფიკაცია განუხრელადაა დაკავშირებული სითხის ნაკადის სასაზღვრო შრეზე ზემოქმედებასთან და ამით გამოწვეულ ნაკადის სტრუქტურის შეცვლასთან, აღნიშნული პრობლემის გამოკვლევას უდიდესი თეორიული მნიშვნელობა აქვს.

მონოგრაფიაში აღნიშნულია, რომ ნებისმიერი მეთოდის გამოყენება სითხის ნაკადში თბოგაცემის ინტენსიფიკაციის მიზნით აუცილებლად იწვევს ამ სითხის მოძრაობაზე დახარჯული ენერგიის გაზრდას. ამის გამო, მნიშვნელოვან პრობლემას წარმოადგენს ინტენსიფიკაციის ისეთი მეთოდის გამოხატვა, რომელიც უზრუნველყოფს თბოგაცემის მაქსიმალურ ინტენსიფიკაციას ჰიდრავლიკური წინაღობის მინიმალურად გაზრდის პირობებში. ამის გათვალისწინებით, თბოგაცემის ინტენსიფიკაციის ერთ-ერთ,

ყველაზე ეფექტურ საშუალებად შეიძლება მივიჩნიოთ ხელოვნური ხორკლიანობის მეთოდის გამოყენება.

**მონოგრაფიის შესავალ ნაწილში** გაანალიზებულია სითხის ტურბულენტური ნაკადების ჰიდროდინამიკისა და თბოგაცემის საკითხები. გამოკვეთილია იმ მეცნიერთა ღვაწლი, რომლებმაც უდიდესი წვლილი შეიტანეს აღნიშნული საკითხების შესწავლაში.

ხორკლიან მილებში სითხის ნაკადის ჰიდროდინამიკის შესწავლას საფუძველი დაუდეს ჰ.დარსის, ჰ.ბაზინის, რ.მისის, ლ.შილერის და სხვათა გამოკვლევებმა, რომლებიც ჩატარდა მე-19 საუკუნის მეორე ნახევარში და მე-20 საუკუნის დასაწყისში.

განსაკუთრებით აღსანიშნავია ი.ნიკურაძის უდიდესი წვლილი ხორკლიანობის მქონე ზედაპირების სითხის ნაკადით გარსდენის ჰიდროდინამიკური კანონზომიერებების შესწავლაში. გამოკვლევებში, რომლებიც ჩატარდა გასული საუკუნის 30-იან წლებში გიოტინგენის კაიზერ ვილჰელმის (ამჟამად მაქს პლანკის) ინსტიტუტში, ი.ნიკურაძემ სხვა მნიშვნელოვან საკითხებთან ერთად, ექსპერიმენტულად დაადგინა ხორკლიანობის გამოვლინების სამი რეჟიმი, რომლებსაც განსაზღვრავს უგანზომილებო კომპლექსის –  $k_s u_* / \nu$ -ის მნიშვნელობა<sup>1</sup>.

ხსენებული რეჟიმებია:

1. რეჟიმი, რომელშიც საერთოდ არ გამოვლინდება ხორკლიანობა. ამ რეჟიმის დროს ხორკლიანობის ელემენტები მთლიანად არიან ჩადირული ბლანტ ქვეშრეში:

$$0 \leq Ni \leq 5.$$

---

<sup>1</sup> 2008 წელს მინსკის სითხოსა და მასის გადაცემის მე-6 საერთაშორისო ფორუმზე წიგნის ერთ-ერთი ავტორი, თ. მაგრაქველიძე ფორუმის მონაწილეთა წინაშე გამოვიდა წინადადებით იმის თაობაზე, რომ გლუვ და ხორკლიან არხებში ტურბულენტური დინების კანონზომიერებების დადგენის საქმეში ი. ნიკურაძის დიდი დამსახურების აღსანიშნავად ზემოთ ხსენებულ უგანზომილებო კომპლექსს ეწოდოს ივანე ნიკურაძის სახელი და აღინიშნოს შემდეგნაირად:  $Ni = k_s u_* / \nu$ .

ამ რეჟიმში ჰიდრავლიკური წინაღობა დამოკიდებულია რეინოლდსის რიცხვზე  $\xi = f(Re)$  და მისი აბსოლიტური მნიშვნელობა ისეთივეა, როგორც გლუვი არხების შემთხვევაში.

2. გარდამავალი, ანუ ხორკლიანობის ნაწილობრივი გამოვლინების რეჟიმი, რომლის დროსაც ხორკლიანობის ელემენტების წვეროები იმყოფებიან ბუფერულ შრეში:

$$5 \leq Ni \leq 70.$$

გარდამავალ რეჟიმში ჰიდრავლიკური წინაღობის კოეფიციენტი წარმოადგენს როგორც ხორკლიანობის ელემენტის ფარდობითი სიმაღლის, ისე რეინოლდსის რიცხვის ფუნქციას:

$$\xi = f\left(\frac{k_s}{r_0}, Re\right).$$

3. ხორკლიანობის სრული გამოვლინების რეჟიმი, რომლის დროსაც ხორკლიანობის ელემენტების წვეროები იმყოფებიან ნაკადის ტურბულენტური ბირთვის გარე საზღვარზე:

$$Ni > 70$$

ამ რეჟიმში ჰიდრავლიკური წინაღობის კოეფიციენტი დამოკიდებულია მხოლოდ ხორკლიანობის ელემენტის სიმაღლეზე -  $k_s$  (ავტომოდელური რეჟიმი).

პირველი სისტემატური გამოკვლევა, რომელშიც შესწავლილი იყო ხორკლიან მილებში ერთფაზა თბოგადამტანის ნაკადში თბოგაცემის საკითხები ჩატარდა ვ. ნუნერის მიერ მე-20 საუკუნის 50-იან წლებში იმავე გიოტინგენის ინსტიტუტში. ამ გამოკვლევაში, მრავალრიცხოვან ექსპერიმენტულ შედეგებთან ერთად, მის მიერ შემოთავაზებული იყო ხორკლიანი ზედაპირების თბოგაცემის პროცესის ფიზიკური მოდელი და მის საფუძველზე მიღებული თბოგაცემის ინტენსიურობის საანგარიშო ფორმულა.

ვ. ნუნერის ფიზიკური მოდელის მიხედვით თბოგამცემი ზედაპირის ხორკლიანობა იწვევს თბოგადამტანის ნაკადის ბირთვში დამატებით ტურბულიზაციას, და შესაბამისად, ნაკადის ბირთვის თერმული წინაღობის შემცირებას. აქედან გამომდინარე, ვ. ნუნერის მოდელის თანახმად, ხელოვნური ხორკლიანობის ეფექტი თბოგაცემაზე მნიშვნელოვანი უნდა იყოს ისეთი სითხეების შემთხვევაში, რომელთა  $Pr < 1$  (თხიერი ლითონები), რაც შემდგომ ექსპერიმენტებში არ დადასტურდა.

ვ. ნუნერის ფიზიკური მოდელის უზუსტობა მკაფიოდ იქნა დასაბუთებული აკად. ვ. გომელაურის გამოკვლევაში, რომლის თანახმად, ნუნერისაგან განსხვავებით, ხორკლიანობის ელემენტებიდან მოწყვეტილი გრიგალები ნაკადის ბირთვის ტურბულიზაციასთან ერთად, იწვევენ სასაზღვრო შრის მნიშვნელოვან შემოფოთებას (შეიძლება ითქვას გათხელებასაც კი), რაც განაპირობებს თბოგაცემის ინტენსიფიკაციას. აქედან გამომდინარე, ვ. გომელაურის მოდელის თანახმად, ხელოვნური ხორკლიანობის გავლენა თბოგაცემის ინტენსიურობაზე მნიშვნელოვანი უნდა იყოს ისეთი სითხეებისათვის, რომელთა  $Pr > 1$ . ვ. გომელაურის მიერ მიღებული იყო ხორკლიანი ზედაპირების თბოგაცემის კოეფიციენტის საანგარიშო კრიტერიული განტოლება, რომელიც კარგად აზოგადებს მრავალრიცხოვან ექსპერიმენტულ მონაცემებს. ვ. გომელაურის მიერ გამოთქმული მოსაზრებები შემდგომში სრულად დადასტურდა როგორც ვ. გომელაურისა და მისი მოწაფეების, ისე სხვა ავტორთა გამოკვლევებში.

ხელოვნური ხორკლიანობის მქონე ზედაპირების ჰიდროდინამიკისა და თბოგაცემის საკითხების თეორიული ანალიზი, რომელიც ძირითადად დამყარებულია თერმოჰიდროდინამიკურ ანალოგიაზე, მოცემულია სხვადასხვა ავტორთა შრომებში. მათ შორის შეიძლება გამოიყოს დ. დიპრისა და რ. საბერსკის გამოკვლევა, რომელშიც თერმოჰიდროდინამიკური ანალოგიის საფუძველზე მიღებული იყო ქვიშისებური ხორკლიანობის (ნიკურადის ხორკლიანობა) მქონე

ზედაპირების თბოგაცემის კოეფიციენტის საანგარიშო ფორმულა, რომელიც კარგად აზოგადებს მათსავე ექსპერიმენტულ მონაცემებს.

უნდა აღინიშნოს, რომ დ. დიპრისა და რ. საბერსკის მოდელში იგულისხმება, რომ თერმოჰიდროდინამიკური ანალოგია ხორკლიან მილებში მართებულია სრული ჰიდრავლიკური წინაღობისათვის. ამასთან, ცნობილია, რომ თერმოჰიდროდინამიკური ანალოგია მართებულია მხოლოდ ხახუნის წინაღობისათვის, ანუ სხვაგვარად რომ ვთქვათ, ხორკლიანობის ელემენტების ფორმის წინაღობა პირდაპირ გავლენას არ ახდენს თბოგაცემის პროცესზე. ამდენად, ზემოხსენებული ექსპერიმენტული მონაცემების თანხვედრა თეორიასთან გარკვეულწილად შემთხვევითობად უნდა ჩაითვალოს.

აღნიშნული შეუსაბამობა გაითვალისწინა ვ. მიგაიმ, თუმცა, უნდა ითქვას, რომ მის მიერ შემოთავაზებული სრული წინაღობიდან ხახუნის წინაღობის გამოყოფის მეთოდი ვერ ჩაითვლება სრულყოფილად. კერძოდ, ვ. მიგაის მოდელის თანახმად, ხორკლიან მილებში ფორმის წინაღობა თავს იჩენს როდესაც  $Re=5000$  და არ არის დამოკიდებული ხორკლიანობის ელემენტების სიმაღლეზე, რაც ექსპერიმენტულად არ დასტურდება.

სრული ჰიდრავლიკური წინაღობიდან ხახუნის წინაღობის გამოყოფის საინტერესო მეთოდი იყო შემოთავაზებული მონოგრაფიის ერთ-ერთი ავტორის (თ. მაგრაქველიძის) მიერ შესრულებულ გამოკვლევაში. ამ სამუშაოში ს. ქუთათელაძის მოსაზრებებზე დაყრდნობით მიღებული იყო, რომ ავტომოდელურ რეჟიმში გადასვლამდე ხახუნის წინაღობა ტოლია სრული ჰიდრავლიკური წინაღობისა, ხოლო ავტომოდელურ რეჟიმში გადასვლისთანავე თავს იჩენს ხორკლიანობის ელემენტების ფორმის წინაღობა. შემოთავაზებული იყო ავტომოდელურ რეჟიმში ხახუნის წინაღობის საანგარიშო ფორმულა.

თანამედროვე დანადგარებში თბოგაცემის პროცესი შეიძლება მიმდინარეობდეს თბოგამცემ ზედაპირზე აფსკის ჩამოდინების პირობებში. ასეთ პროცესებს ადგილი აქვს თბოელექტრო-

სადგურების კონდენსატორებში, ატომურ ელექტროსადგურებში, ქიმიურ და ტექნოლოგიურ დანადგარებში და სხვა. ამის გამო, თბოგაცემის ინტენსიფიკაცია ზედაპირზე სითხის აფსკის ჩამოდინების პირობებში უაღრესად დიდ პრაქტიკულ ინტერესს იმსახურებს.

საკითხის აქტუალურობიდან გამომდინარე, და პრობლემის არასაკმარისად შესწავლის გათვალისწინებით, მონოგრაფიის ავტორთა მიერ გადაწყდა ფართომასშტაბური ცდების ჩატარება, რისთვისაც შეიქმნა სათანადო ექსპერიმენტული დანადგარი.

**მონოგრაფიის ექსპერიმენტული ნაწილი** მიძღვნილია ზედაპირებზე ჩამოდინარე სითხის აფსკის თბოგაცემის საკვლევი ექსპერიმენტული დანადგარის აღწერის, ექსპერიმენტების ჩატარებისა და მიღებული შედეგების ანალიზისადმი.

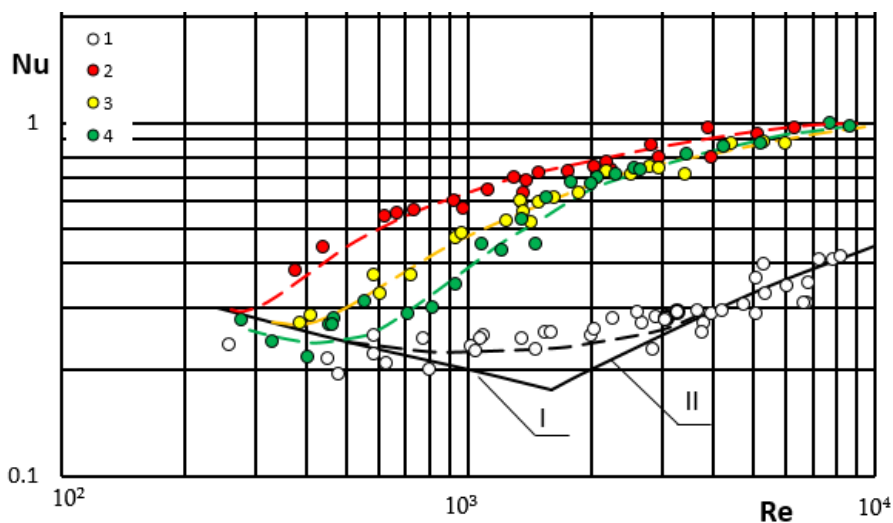
ექსპერიმენტები ჩატარდა დანადგარზე, რომელიც მუშაობდა როგორც ღია, ისე ჩაკეტილი კონტურის რეჟიმებში. ღია კონტურის პირობებში ექსპერიმენტები ჩატარდა წყალზე, ხოლო ჩაკეტილი კონტურის პირობებში – სპირტსა და წყლის დისტილატზე. ექსპერიმენტებში საცდელ უბნად გამოყენებული იყო ვერტიკალურად განთავსებული უჟანგავი ფოლადის მილი. ასევე ჩატარდა ექსპერიმენტები ვერტიკალურად განთავსებულ ფირფიტაზე. ორივე შემთხვევაში ექსპერიმენტული უბანი ხურდებოდა მასში დაბალი ძაბვის ელექტროდენის უშუალო გატარებით.

სითხის ხარჯი კონტურში, საცდელ უბანზე მიწოდებული სიმძლავრე, სითხისა და საცდელი უბნების ტემპერატურები იზომებოდა თანამედროვე, მაღალი კლასის საზომი ხელსაწყოებით. ამასთან, საცდელი მილის კედლის ტემპერატურის გასაზომად გამოყენებული იყო კარგად აპრობირებული თერმოწყვილებით გაზომვის მეთოდი, ხოლო ბრტყელი ფირფიტის კედლის ლოკალური ტემპერატურების გასაზომად კი – უკონტაქტო მეთოდი, რისთვისაც გამოყენებული იყო FLUKE-ს ფირმის Ti60+ მარკის ინფრაწითელი კამერა.



აღნიშნული ექსპერიმენტების შედეგად დადგენილია ხელოვნური ხორკლიანობის მეთოდის გამოყენებით თბოგაცემის ინტენსივიკაციის არაერთი საინტერესო საკითხი. ექსპერიმენტული მონაცემების ნაწილი ლოგარითმულ კოორდინატებში ( $Nu$ ,  $Re$ ) წარმოდგენილია 1-ლ ნახაზზე.

ამ გრაფიკზე ექსპერიმენტული მონაცემები გასაშუალებულია წყვეტილი ხაზებით. მთლიანი ხაზი I შეესაბამება კ. ჩჟუნის და რ. სეზანის ფორმულას აფსკის დინების ლამინარულ-ტალღური რეჟიმისათვის, ხოლო, ხაზი II – დ. ლაზუნცოვის ფორმულას აფსკის დინების ლამინარულ-ტალღურიდან ტურბულენტურ რეჟიმში გარდამავალი ზონისათვის. გრაფიკიდან ჩანს, რომ ექსპერიმენტული მონაცემები გლუვი ზედაპირებისათვის კარგ თანხვედრაშია კ. ჩჟუნის და რ. სეზანის და დ. ლაზუნცოვის ფორმულებთან.



ნახ.1. ხორკლიანობის ელემენტების სიმაღლის გავლენა თბოგაცემაზე,  $Pr=9-10$ :

1 - გლუვი ზედაპირი;

ხორკლიანი ზედაპირები -  $s/h=10$ : 2 -  $h=1\text{მ}$ ; 3 -  $h=0.5\text{მ}$ ; 4 -  $h=0.3\text{მ}$ ;

I - კ. ჩჟუნის და რ. სეზანის ფორმულის მიხედვით; II - დ. ლაზუნცოვის ფორმულის მიხედვით.

წარმოდგენილი მონაცემების თანახმად, ჩამოდინების ლამინარულ რეჟიმში თბოგაცემი ზედაპირის ხორკლიანობა პრაქტიკულად არ ახდენს გავლენას თბოგაცემის ინტენსიურობაზე. მაგრამ, აშკარად შეინიშნება ლამინარული აფსკის ტურბულიზაცია რეინოლდსის გაცილებით უფრო ნაკლები მნიშვნელობის დროს, ვიდრე ამას ადგილი აქვს გლუვი ზედაპირების შემთხვევაში.

ხსენებული ტურბულიზაცია ხორკლიანობის შვერილების დიდი სიმაღლის შემთხვევაში ხდება უფრო დაბალი რეინოლდსების დროს, ვიდრე შვერილების მცირე სიმაღლის შემთხვევაში. აღსანიშნავია, რომ ლამინარულიდან ტურბულენტურში გარდამავალი რეჟიმის დროს ხელოვნური ხორკლიანობა განაპირობებს თბოგაცემის ინტენსიურობის მნიშვნელოვან ზრდას. ამასთან, ინტენსიფიკაციის ხარისხი იზრდება შვერილების სიმაღლის ზრდით.

ასევე მნიშვნელოვანია ხორკლიანობის ეფექტი თბოგაცემაზე ტურბულენტურ რეჟიმში. ამ შემთხვევაში აღნიშნული ეფექტი პრაქტიკულად არ არის დამოკიდებული შვერილების სიმაღლეზე.

აღნიშნულ დანადგარზე შესწავლილია სხვადასხვა ტიპის ხორკლიანობის (პირამიდული, ორგანოზომილებიანი, ღრმულებიანი, კომბინირებული) გავლენა თბოგაცემის ინტენსიურობაზე ვერტიკალურ ზედაპირზე სითხის აფსკის ჩამოდინების პირობებში. უნდა აღინიშნოს, რომ თბოგაცემის ინტენსიფიკაციის თვალსაზრისით გამოკვლეულ ზედაპირებს შორის ყველაზე ეფექტური აღმოჩნდა ორგანოზომილებიანი და კომბინირებული ხორკლიანობის მქონე ზედაპირები.

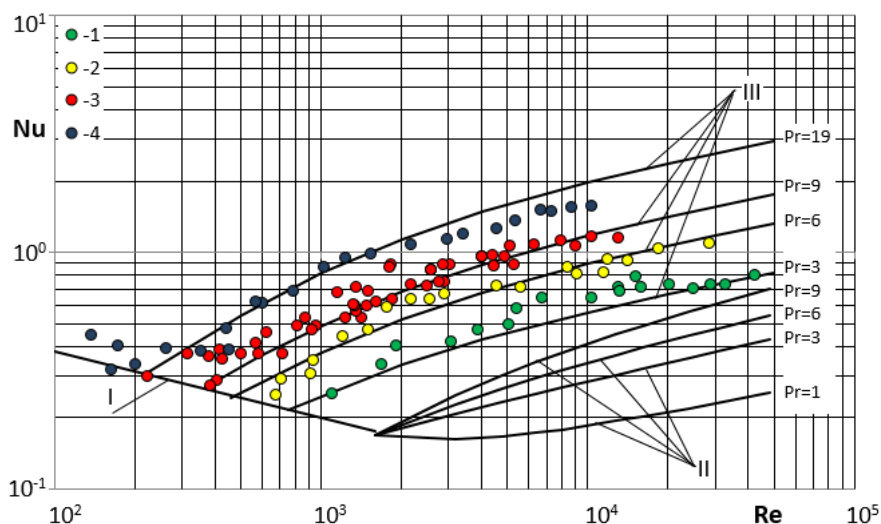
განსაკუთრებულ ყურადღებას იმსახურებს შედეგები, რომელთა თანახმად, ხელოვნური ხორკლიანობის გამოყენება სითხის აფსკის ჩამოდინების პირობებში ლამინარულიდან ტურბულენტურში გარდამავალ რეჟიმში განაპირობებს თბოგაცემის ინტენსიურობის ზრდას 3-ჯერ და მეტად.

მონოგრაფიაში წარმოდგენილი ორგანოზომილებიანი ხორკლიანობის მქონე ვერტიკალური მილის ზედაპირის თბოგაცემის

ექსპერიმენტული მონაცემების გაზოგადებისათვის ავტორთა მიერ მიღებულია თბოგაცემის ინტენსიურობის საანგარიშო ფორმულა, რომელიც დ. ლაბუნცოვის (გლუვი ზედაპირებისათვის) ცნობილი ფორმულის მოდიფიკაციას წარმოადგენს:

$$Nu = \frac{0.175 Pr^{1.2}(Re/1600)}{Pr^{0.35} + 0.9 [(Re/1600)^{0.8} Pr^{0.5} - 1]} \quad (1)$$

(1) ფორმულის შედარება ჩვენ მიერ მიღებულ ექსპერიმენტულ მონაცემებთან წარმოდგენილია მე-2 ნახაზზე.



**ნახ.2. თბოგაცემის ინტენსიურობის დამოკიდებულება რეინოლდსის რიცხვზე:**

ხორკლიანი ზედაპირები,  $h=0.5$ ,  $s/h=10$ : 1 -  $Pr = 3$ ; 2 -  $Pr = 6$ ; 3 -  $Pr = 9$ ; 4 -  $Pr = 19$ ;

I - კ. ჩჟუნის და რ. სეზანის ფორმულის მიხედვით; II - დ. ლაბუნცოვის ფორმულის მიხედვით; III - ფორმულა (1)-ის მიხედვით.

როგორც ნახაზიდან ჩანს, ფორმულა (1) კარგ თანხვედრაშია ექსპერიმენტულ მონაცემებთან, რაც იმაზე მიუთითებს, რომ

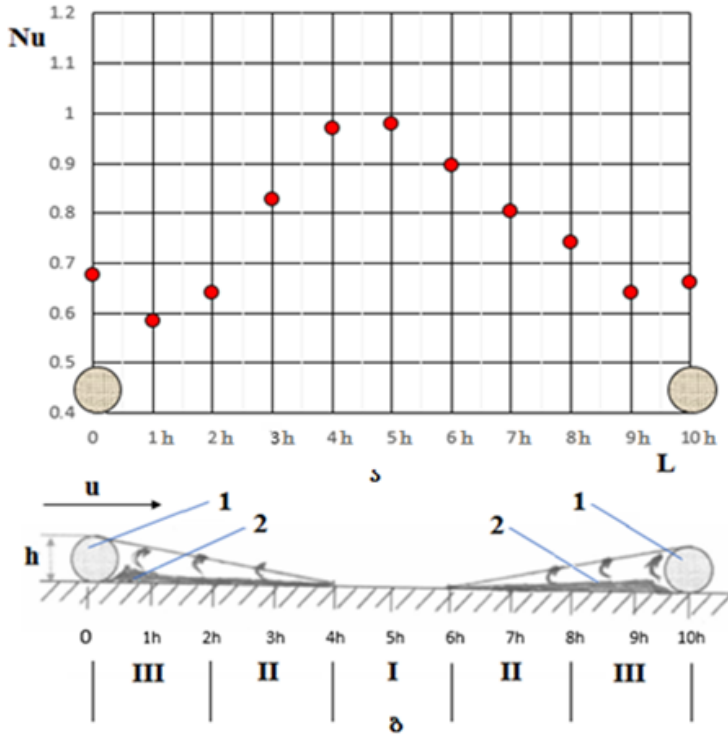
დ.ლაზუნცოვის ფორმულა, სათანადო შესწორებებით, წარმატებით შეიძლება გამოყენებულ იქნეს ხორკლიანი ზედაპირების შემთხვევაშიც.

ძალზე საინტერესო შედეგები იქნა მიღებული ვერტიკალური ფირფიტის ზედაპირზე ჩამომდინარე წყლის აფსკში თბოგაცემაზე ხელოვნური ხორკლიანობის გავლენის გამოსაკვლევად. კერძოდ, უდიდეს ინტერესს იმსახურებს ხორკლიანობის ელემენტებს შორის თბოგაცემის ინტენსიურობის ლოკალური მნიშვნელობების დადგენა, რაც შესაძლებელი გახდა თბოგამცემი კედლის ხორკლიანობის ელემენტებს შორის მრავალ წერტილში ტემპერატურების უკონტაქტო მეთოდით გაზომვით.

მე-3 ნახაზზე წარმოდგენილია თბოგაცემის ლოკალური კოეფიციენტების დამოკიდებულება ხორკლიანობის ელემენტებს შორის მანძილზე.

მიღებული შედეგები საფუძველს გვაძლევს, ჩავთვალოთ, რომ ხორკლიანობის ელემენტიდან (4-6)h ზონაში ელემენტების წვეროებიდან მოწყვეტილი გრიგალების ზემოქმედების შედეგად ბლანტი სასაზღვრო შრის ტურბულიზაციის გამო I ზონაში – თბოგაცემის ინტენსიურობა მაქსიმალურია. ამ ზონის მარცხნივ და მარჯვნივ (ზონები II) იწყება ბლანტი სასაზღვრო შრის განახლება და, შესაბამისად, თბოგაცემის ინტენსიურობის კლება. ზონებში – III (ხორკლიანობის ელემენტების წინ და უკან) გვაქვს ე.წ. “მკვდარი ზონები”, რომლებშიც თბოგაცემის ინტენსიურობა თავის მინიმუმზე დადის, თუმცა მათში მოძრაობის გრიგალური ხასიათის გამო თბოგაცემის ინტენსიურობა მაინც მაღალი რჩება გლუვ ზედაპირთან შედარებით (ნახ. 3.ბ).

მე-3 ნახაზზე წარმოდგენილ შედეგებს უაღრესად დიდი მნიშვნელობა აქვს ხორკლიანი ზედაპირების თბოგაცემის მექანიზმის დადგენის საქმეში.



**ნახ.3. თბოგაცემის ლოკალური კოეფიციენტების მნიშვნელობები ხორკლიანობის ელემენტების თავზე და მათ შორის,  $Re=1972$ :  
1 - ხორკლიანობის ელემენტი; 2 - ბლანტი ქვეშრე.**

რამდენადაც ჩვენთვის ცნობილია, პირველი ექსპერიმენტები ხორკლიანი ზედაპირების თბოგაცემის პროცესში ხორკლიანობის ელემენტებს შორის თბოგაცემის ინტენსიურობის ლოკალური მნიშვნელობების დასადგენად ჩატარებული იყო ვ. გომელაურის, რ. კანდელაკისა და მ. ყიფშიძის მიერ ჰორიზონტალურად განთავსებულ ოთხკუთხა არხში სითხის ტურბულენტური დინებისა და თბოგაცემის პირობებში. აღნიშნულ ექსპერიმენტებში თბოგამცემ ელემენტს წარმოადგენდა არხის ქვედა წახნაგზე დაწებებული უჟანგავი ფოლადის თხელი ფირფიტა, რომელიც ხურდებოდა მასში

დაბალი ძაბვის ელექტროდენის უშუალო გატარებით. ამ ექსპერიმენტებში ხორკლიანობის ელემენტებს შორის კედლის ტემპერატურისა და, შესაბამისად, თბოგაცემის ინტენსიურობის ლოკალური მნიშვნელობების დასადგენად გამოყენებული იყო კედლის ტემპერატურის თერმოწყვილებით გაზომვის მეთოდი.

ამ გამოკვლევაში მიღებულმა შედეგებმა სრულად დაადასტურეს ვ. გომელაურის მიერ შემოთავაზებული მექანიზმის სამართლიანობა. მაგრამ, ამასთან ერთად, უნდა აღინიშნოს, რომ თბოგამცემი კედლის ზედაპირზე მრავალი თერმოწყვილის განთავსება უთუოდ გამოიწვევდა თბოგამცემ კედელში ტემპერატურული ველის გარკვეულ ცვლილებას, მით უმეტეს იმ შემთხვევაში, როდესაც თბოგამცემი ელემენტი ხურდება ელექტროდენის უშუალო გატარებით. თუმცა, ისიც გასათვალისწინებელია, რომ იმ პერიოდში პრაქტიკულად არ არსებობდა თბოგამცემი კედლის ტემპერატურების გაზომვის სხვა, უფრო სრულყოფილი საშუალება.

მონოგრაფიის ავტორთა მიერ შემოთავაზებული უკონტაქტო გაზომვის მეთოდი, რომელიც ითვალისწინებს თბოგამცემი კედლის ტემპერატურის ლოკალური მნიშვნელობების გაზომვას ნებისმიერ წერტილში, ცხადია, გამორიცხავს ცდომილებას, რომელიც შეიძლება გამოწვეული იყოს გაზომვების დროს გარე შემფოთებებით.

**მონოგრაფიის თეორიული ნაწილი** ეძღვნება თერმოჰიდროდინამიკური ანალოგიის პრინციპების გამოყენებას ხორკლიანი ზედაპირების ტურბულენტური ნაკადით გარსდენისა და თბოგაცემის საკითხებს.

ხორკლიანი ზედაპირების თბოგაცემის საკითხებს არაერთი თეორიული გამოკვლევა მიეძღვნა. ეს თეორიული გამოკვლევები ამა თუ იმ ფორმით ეყრდნობა თერმოჰიდროდინამიკური ანალოგიის პრინციპებს.

როგორც ცნობილია, თერმოჰიდროდინამიკური ანალოგიის გამოყენებამ თბოგადაცემის პროცესის თეორიული ანალიზისათვის საკმაოდ კარგი შედეგი გამოიღო გლუვი ზედაპირების შემთხვევაში.

ამასთან ერთად, ხორკლიანი ზედაპირების შემთხვევისათვის ხსენებული ანალოგიის გავრცობა მეტისმეტად რთულ პრობლემებთანაა დაკავშირებული. უფრო მეტიც, ზოგი ავტორის აზრით, იმ შემთხვევაში, როდესაც ადგილი აქვს ზედაპირიდან სასაზღვრო შრის მოწყვეტას და შემდგომ მიერთებას, თერმოჰიდროდინამიკური ანალოგიის პრინციპების გამოყენება არ არის გამართლებული. ამასთან, ზოგი გამოკვლევის ავტორთა აზრით თერმოჰიდროდინამიკური ანალოგიის გამოყენება შესაძლოა გამართლებული იყოს მჭიდროდ განლაგებული ხორკლიანობის ელემენტების მქონე ზედაპირების შემთხვევაში.

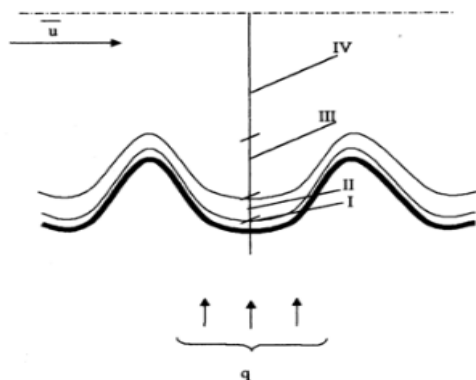
მრავალრიცხოვანი ექსპერიმენტული და თეორიული გამოკვლევების ანალიზი უჩვენა, რომ ხორკლიანი ზედაპირების გარსდენის დროს, ამ ზედაპირის გასწვრივ ყალიბდება სასაზღვრო შრე, რომლის სტრუქტურა, ზოგადად, შეიძლება განისაზღვროს იმავე პარამეტრებით, რითაც განისაზღვრება იგი გლუვი ზედაპირის გარსდენის შემთხვევაში. მაგრამ, ამასთან, მხედველობაში უნდა იქნეს მიღებული ის გარემოება, რომ ზედაპირზე ხორკლიანობის ელემენტების არსებობა განაპირობებს გრიგალების წარმოქმნას, რომლებიც წყდებიან რა ხორკლიანობის ელემენტების წვეროებიდან იწვევენ სასაზღვრო შრის შემფოთებას და, შესაბამისად, მისი სისქის შემცირებას.

ზოგადად, ხორკლიანი ზედაპირი შეიძლება განხილულ იქნეს, როგორც ბორცვებისა და ჩაღრმავებების ერთობლიობა (ნახ.3). შეიძლება დავუშვათ, რომ ასეთი ზედაპირის ტურბულენტური ნაკადით გარსდენისას, ისევე, როგორც გლუვი ზედაპირის გარსდენის შემთხვევაში, კედლის უშუალო მახლობლობაში ყალიბდება ბლანტი (კვაზილამინარული) და ბუფერული (გარდამავალი) შრეები. აღნიშნული შრეები ყალიბდება არა მხოლოდ ხორკლიანობის ელემენტებს შორის არსებულ ჩაღრმავებებში, არამედ თვით ელემენტების თავებზეც. ცხადია, რომ, აღნიშნული შრეების სისქეები არათანაბარი იქნება ზედაპირის გასწვრივ. კერძოდ, როგორც ბლანტი,

ისე ბუფერული შრეების სისქე უფრო მცირე იქნება ელემენტების წვეროებთან, ვიდრე ელემენტებს შორის ჩაღრმავებებში. მიუხედავად ამისა, ხორკლიანობის ელემენტების შედარებით მცირე სიმაღლის შემთხვევაში, შეიძლება ჩავთვალოთ, რომ მთელი ზედაპირის გასწვრივ ყალიბდება ე.წ. “ეფექტური სისქის“ მქონე ბლანტი და ბუფერული შრეები<sup>2</sup>.

შეიძლება დავუშვათ, რომ ელემენტებს შორის წარმოიქმნება, აგრეთვე, გრიგალური ბირთვი, რომლითაც დაფარულია არა მთელი თბოგადაცემი მილი, არამედ ამ ზედაპირის მხოლოდ ხორკლიანობის ელემენტებს შორის ნაწილი. აღნიშნულ მოდელში, რა თქმა უნდა, გათვალისწინებულია, აგრეთვე, ნაკადის ტურბულენტური ბირთვის არსებობაც (ნახ.4).

ვიხილავთ ტურბულენტურ დინებას ცილინდრულ მილში. სითბო გადაეცემა მილის კედლიდან სითხის ნაკადს.



**ნახ.4. ხორკლიანი ზედაპირის თბოგადაცემის პროცესის ფიზიკური მოდელის სქემა:**

I - ბლანტი შრე; II - ბუფერული (გარდამავალი) შრე; III - გრიგალური ბირთვი ხორკლიანობის ელემენტებს შორის; IV - ნაკადის ტურბულენტური ბირთვი.

<sup>2</sup> უნდა შევნიშნოთ, რომ ბლანტი და ბუფერული შრეების არსებობა ერთგვარად პირობითია და შემოღებულია ტურბულენტური დინების მექანიზმის გამარტივების მიზნით.



ხორკლიანობის შექმნით გამოწვეული ზედაპირის ფართის გაზრდის გამო:

$$\frac{F_{\beta\text{ლ}}}{F_b} = n; \quad q_b = q_{\beta\text{ლ}} n; \quad \tau_b = \tau_{\beta\text{ლ}} n, \quad (n < 1). \quad (2)$$

(2)-ის გათვალისწინებით მხები ძაბვის განტოლება, რომელიც ფაქტობრივად მოძრაობის განტოლების გამარტივებულ სახეს წარმოადგენს, ხორკლიანი ზედაპირებისათვის ასე ჩაიწერება:

$$\tau_{\beta} n (1 - y/r_0) = \rho (v + v_{\beta}) \frac{du}{dy}. \quad (3)$$

ხოლო, თბური ნაკადის განტოლებას, რომელიც ენერჯიის განტოლებიდან მიიღება, ხორკლიანი ზედაპირებისათვის ასე ჩაიწერება:

$$q_{\beta} n (1 - y/r_0) = -\rho C_p (v/Pr + v_{\beta}/Pr_{\beta}) \frac{dt}{dy}. \quad (4)$$

თუ შემოვიღებთ აღნიშვნებს:

$$u_* = \sqrt{\tau_{\beta} n / \rho}, \quad \varphi = \frac{u}{u_*} \quad \text{და} \quad \eta = \frac{\gamma u_*}{v}, \quad (5)$$

(2) და (3) განტოლებების საფუძველზე მიიღება თბოგაცემის ინტენსიურობის საანგარიშო ფორმულა, რომელსაც პრანდტლის რიცხვის ზომიერი მნიშვნელობებისთვის ასეთი სახე აქვს:

$$Nu = \frac{0.5 \sqrt{n^{-1}} \left(1 + \frac{1.75}{Pr+8}\right) Pr Re \sqrt{\xi/2}}{f(\eta_1, Pr) + \eta_1 \ln \left(1 + \frac{\eta_2 - \eta_1 Pr}{\eta_1}\right) + A_1 - 2.5 B_1}. \quad (6)$$

სადაც,

$$A_1 = \frac{K Ni Pr}{1 + 0.165 Ni Pr}; \quad B_1 = \sqrt{n^{-1}} \ln \left( \frac{Ni}{\eta_0} + \frac{\eta_2}{\eta_0} \right).$$

წარმოდგენილი მოდელის თანახმად:

$$\eta_1 = 5 (\xi_0/\xi)^{2/3}; \quad \eta_2 = 30(\xi_0/\xi)^{2/3}$$

$\xi_0$  არის ჰიდრავლიკური წინაღობის კოეფიციენტი გლუვი ზედაპირის შემთხვევაში და იანგარიშება ფორმულით:

$$\xi_0 = (\log Re)^{-2.49} \quad (7)$$

$\xi$  არის ხახუნის წინაღობის კოეფიციენტი ხორკლიანი მილისათვის.

მოდელის თანახმად, როცა  $Re < Re_*$ ,  $\xi = \xi_{სრ}$ , ხოლო ხორკლიანობის სრული გამოვლინების რეჟიმში, როცა  $Re \geq Re_*$ :

$$\xi = \xi_{სრ} \left( \frac{\log Re_*}{\log Re} \right)^{2.49}$$

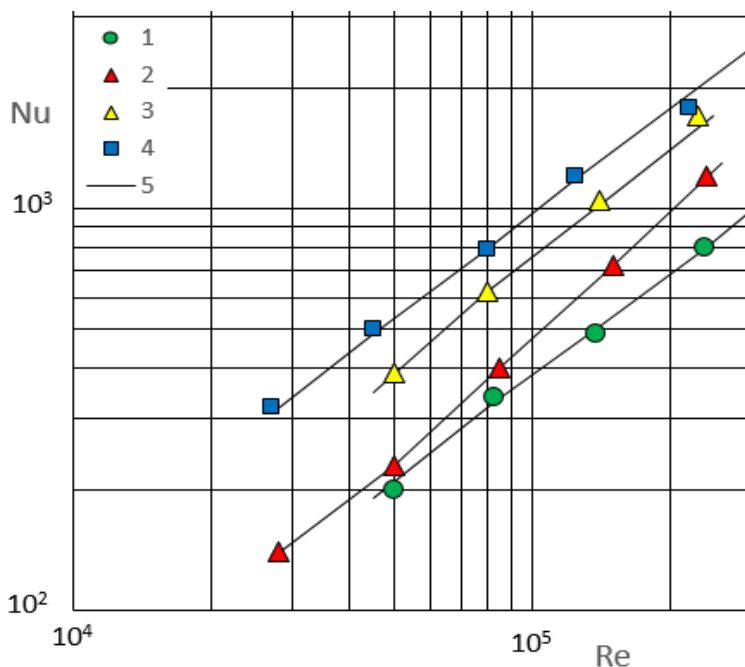
$\xi_{სრ}$  და  $Re_*$  განისაზღვრება ი. ნიკურადის ექსპერიმენტების მიხედვით.

როდესაც  $Ni = 0$ ,  $\xi = \xi_0$  (6) ფორმულა ღებულობს ბეტჩელორ-მარტინელ-კარმანის ცნობილი ფორმულის სახეს, რომელიც სამართლიანია გლუვი ზედაპირებისათვის თბოგადამტანის პრანდტლის რიცხვის ზომიერი მნიშვნელობების შემთხვევაში.

მე-5 ნახაზზე ლოგარითმულ კოორდინატებში  $Nu = f(Re)$  დამოკიდებულების სახით წარმოდგენილია (6) ფორმულის შედარება დ. დიპრესისა და რ. საბერსკის ექსპერიმენტულ მონაცემებთან გლუვი და ხორკლიანი მილებისათვის.

როგორც მე-5 ნახაზიდან ჩანს, ჩვენ მიერ მიღებული თბოგადაცემის კოეფიციენტის საანგარიშო ფორმულა (6) პრანდტლის

რიცხვის ზომიერი მნიშვნელობების შემთხვევაში კარგ თანხვედრაშია დ. დიპრისა და რ. საბერსკის ექსპერიმენტულ მონაცემებთან.



**ნახ.5. თბოგაცემის ინტენსიურობის დამოკიდებულება რეინოლდსის რიცხვზე,  $Pr=2.79$ :**

დ. დიპრისა და რ. საბერსკის ექსპერიმენტულ მონაცემები: 1 - გლუვი ზედაპირი; ხორკლიანი ზედაპირები: 2 -  $h/r_0 = 0.0048$ ; 3 -  $h/r_0 = 0.0276$ ; 4 -  $h/r_0 = 0.0976$ ; 5 - (6) ფორმულის მიხედვით.

ზემოთქმული იმაზე მიუთითებს, რომ თერმოჰიდროდინამიკური ანალოგია წარმატებით შეიძლება გამოყენებულ იქნეს ხორკლიანი ზედაპირების გარსდენისა და თბოგაცემის ფუნდამენტური საკითხების დამუშავებაში.

ავტორთა მიერ მიღებული შედეგების საფუძველზე, მონოგრაფიაში გაკეთებულია დასკვნა იმის შესახებ, რომ ხორკლიანობის მეთოდის გამოყენება ტექნიკის სხვადასხვა

დანიშნულების თბოგადამცემ დანადგარებში მნიშვნელოვნად გაზრდის ამ დანადგარების ეფექტიანობას და ამასთან ერთად, მათი კომპაქტურობიდან გამომდინარე, ხელს შეუწყობს ძვირადღირებული ლითონმასალების დაზოგვას.

**პროექტი განხორციელდა შოთა  
რუსთაველის საქართველოს ეროვნული  
სამეცნიერო ფონდის ფინანსური  
ხელშეწყობით (გრანტი FR-19-3034).**