

## ბუნებრივ წყალზე ჰიბრიდული ნაკადის განხორციელების გზით ტანგენციალური ბარომემბრანული პროცესის თეორიული კვლევები და ექსპერიმენტების შედეგები

გიორგი ბიბილეიშვილი<sup>1</sup>, ლიანა ყუფარაძე<sup>2</sup>, ზაზა ჯავაშვილი<sup>3</sup>, მზია კეჟერაშვილი<sup>4</sup>, ელენე  
კაკაბაძე<sup>5</sup>

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის მემბრანული ტექნოლოგიების საინჟინრო ინსტიტუტი  
<sup>1</sup>ქიმიური და ბიოლოგიური ინჟინერიის დოქტორი, მთავარი მეცნიერი თანამშრომელი

email: 75bibileishvili@gmail.com ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0003-7712-2436>

<sup>2</sup>აკადემიური დოქტორი, მთავარი მეცნიერი თანამშრომელი email [LianaKuparadze@gmail.com](mailto:LianaKuparadze@gmail.com) ORCID ID:  
<https://orcid.org/0009-0002-6786-5669>

### რეზიუმე

ნაშრომში წარმოდგენილია ბარომემბრანული გაყოფის პროცესების განსახორციელებლად შექმნილ მოწყობილობებში ბუნებრივ წყალზე ჰიბრიდული ნაკადის განხორციელების გზით თეორიული კვლევები. ჰიდროდინამიკური მახასიათებლების თეორიული ანგარიშისათვის გამოყენებულია რეინოლდსის რიცხვი, თეორიული კვლევებით დადგინდა ჰიბრიდული ნაკადის რეჟიმული პარამეტრები. სადაწნეო საკნის სიმაღლის განსხვავებული მნიშვნელობებისათვის განისაზღვრა სიჩქარის კრიტიკული მნიშვნელობები, ლამინარული და ტურბულენტური დინების სიჩქარეთა დიაპაზონი. სადაწნეო საკანში წყლის ნაკადის ჩვეულებრივი რეჟიმულ პარამეტრების შედარებამ ჰიბრიდული ნაკადის რეჟიმულ პარამეტრებთან გვიჩვენა, რომ ჰიბრიდული რეჟიმის პირობებში, ერთი და იგივე ხარჯის მიწოდებისას განვითარებული წყლის სიჩქარე აღემატება ჩვეულებრივი ნაკადის სიჩქარეს, ხოლო ექსპერიმენტების შედეგებით კი ჰიბრიდული ნაკადის პირობებში ხვედრითი წარმადობა მნიშვნელოვნად აღემატება ჩვეულებრივი დინებით მიღებულ ხვედრით წარმადობას.

ამგვარად ლაბორატორიულ დანადგარზე ჩატარებული ექსპერიმენტული შედეგებით ჩანს ჰიბრიდული რეჟიმის უპირატესობა, რომელიც საწინდარია მემბრანული დანადგარების მაღალეფექტურობის და რაც მთავარია, ხელს შეუწყობს სამამულო წარმოების საწარმოო მემბრანული დანადგარების დამუშავებასა და შექმნას.

**საკვანძო სიტყვები:** ჰიბრიდული ნაკადი, ლამინარული და ტურბულენტური დინება, ხვედრითი წარმადობა.

ადამიანის ჯანმრთელობისა და სასურსათო უსაფრთხოების უზრუნველსაყოფად უპირველეს ყოვლისა აუცილებელია სასმელი წყლის ISO-ს სტანდარტის ნორმების დაცვა. ეს კი უშუალო კავშირშია მემბრანული ტექნიკის და ტექნოლოგიების თანამედროვე ნაწარმების დამუშავებასა და ათვისებასთან [4,5]. მემბრანული აპარატების ხვედრითი წარმადობის ასამაღლებლად და მასში ბარომემბრანული პროცესების ეფექტური წარმართვისათვის აქტუალურია შეიქმნას ისეთი მოდელების მემბრანული დანადგარები, რომელშიც შექმნილმა სადაწნეო საკნის კონსტრუქციამ, ჰიდროდინამიურმა და მასაგადატანის პროცესებმა უნდა უზრუნველყონ დაყოფის პროცესის ეფექტურობა და ექსპლოატაციის მაღალი ტექნიკურ-ეკონომიური მაჩვენებლები [1,2,3].

ამ მიზნით მემბრანულ აპარატებში უნდა განხორციელდეს ისეთი ჰიდრავლიკური რეჟიმები, რომ ერთის მხრივ ნაკადის სიჩქარე არ უნდა აღემატებოდეს კრიტიკულს, მეორეს მხრივ, დანადგარი უნდა მუშაობდეს დაბალ წნევაზე, რაც განაპირობებს ნაკლებ ენერგოდანახარჯებს. ამისათვის ჩვენს მიერ ჩატარდა როგორც თეორიული, ასევე ექსპერიმენტული კვლევები ჰიბრიდული ნაკადის პირობებში.

## მეთოდი

ჰიდრავლიკური რეჟიმული პარამეტრების დასადგენად ჩატარდა ლაბორატორიული დანადგარის მუშა კვანძისათვის წყლის ნაკადის პარამეტრების თეორიული გათვლა ჰიბრიდული რეჟიმის პირობებში რეინოლდსის რიცხვის დახმარებით  $Re = \frac{v d}{\nu}$ , სადაც  $\nu$ -სიჩქარეა,  $d$ -ჰიდრავლიკური დიამეტრია,  $\nu$ -სითხის კინემატიკური სიბლანტეა.

ლაბორატორიული მუშა კვანძის- სადაწნეო საკნის გეომეტრიული ზომებია: სიგანე  $B=9\text{მმ}=9 \times 10^{-3}\text{მ}$ ; სიგრძე  $l = 30\text{მმ} = 30 \times 10^{-3}\text{მ}$ ; სიმაღლეები:  $h = 1 \text{ მმ} = 1 \times 10^{-3}\text{მ}$  და  $h = 0,6\text{მმ} = 0,6 \times 10^{-3}\text{მ}$ ; წყლის კინემატიკური სიბლანტის კოეფიციენტი  $20^{\circ}\text{C}$ -ზე შეადგენს  $\nu = 1,004 \text{ მმ}^2/\text{წმ} = 1,004 \times 10^{-6} \text{ მ}^2/\text{წმ}$ . ცხრილში 1. მოყვანილია ჰიბრიდული რეჟიმის პირობებში მუშა კვანძის სხვადასხვა სიმაღლისათვის ჰიდრავლიკური მახასიათებლები,  $Re$  რიცხვის მნიშვნელობები წყლის სიჩქარეებისთვის: 0,5 მ/წმ; 1,3333 მ/წმ; 1,5 მ/წმ; 2მ/წმ; 2,075მ/წმ; 2,541მ/წმ; 6 მ/წმ; 6,83 მ/წმ და შესასვლელ კვეთში წყლის ხარჯი  $Q$ : ასევე ჩეულეზბრივი რეჟიმის პირობებში სადაწნეო საკნისათვის სიმაღლით  $h = 0,6\text{მმ} = 0,6 \times 10^{-3}\text{მ}$  –თვის.

ცხრილი1-ის თეორიული გაანგარიშების მონაცემებით სადაწნეო საკანში ჰიბრიდული რეჟიმის პირობებში ლამინარული დინებას ადგილი აქვს : როდესაც  $h= 1\text{მმ}$   $v \leq v_{gr}=2,541 \text{ მ/წმ}$  და  $h = 0,6\text{მმ} = 0,6 \times 10^{-3}\text{მ}$   $v \leq v_{gr}=6,83 \text{ მ/წმ}$ . როგორც ცხრილი 1-დან ჩანს ხარჯის  $Q=2,7 \times 10^{-6} \text{ მ}^3/\text{წმ}$  მიწოდებით (ცხრილში აღნიშნულია დახრილი შრიფტით) საკანში ჩეულეზბრივი დინებით ვითარდება  $v=0,5 \text{ მ/წმ}$  სიჩქარე, ხოლო ჰიბრიდულის შემთვევაში  $v=1,333 \text{ მ/წმ}$ .

ცხრილი 1. თეორიული ანგარიშის შედეგები ჰიბრიდული და ჩვეულებრივი რეჟიმებისათვის.

|                                                                                                                                                                                                                                                                       |                             |                            |                            |                            |                            |                            |                           |                            |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|---------------------------|----------------------------|
| $v$<br>(მ/წმ)                                                                                                                                                                                                                                                         | 0,5                         | 1.3333                     | 1,5                        | 2                          | 2,075                      | 2,541                      | 6                         | 6,83                       |
| სადაწნეო საკანი ჰიბრიდული რეჟიმით                                                                                                                                                                                                                                     |                             |                            |                            |                            |                            |                            |                           |                            |
| $h=100$ , $F=5,62500^2 = 5,625 \times 10^{-6} \text{ მ}^2$ $\chi=24,500=24,5 \times 10^{-3}$ ;<br>$R=\frac{F}{\chi}=\frac{5,625}{24,5} \approx 0,229500=0,2295 \times 10^{-3}$ ; $d=4 \times R = 4 \times 0,229500=0,91836 \times 10^{-3}$ ;                          |                             |                            |                            |                            |                            |                            |                           |                            |
| $v \times d$<br>(მ <sup>2</sup> /წმ)                                                                                                                                                                                                                                  | 0,4591<br>$\times 10^{-3}$  | 1,2244<br>$\times 10^{-3}$ | 1,3775<br>$\times 10^{-3}$ | 1,8367<br>$\times 10^{-3}$ | 1,9055<br>$\times 10^{-3}$ | 2,3335<br>$\times 10^{-3}$ | 5,51<br>$\times 10^{-3}$  | 6672<br>$\times 10^{-3}$   |
| $Re$                                                                                                                                                                                                                                                                  | 457                         | 1219                       | 1372                       | 1829                       | 1898                       | 2324                       | 5488                      | 6247                       |
| $Q$ (მ <sup>3</sup> /წმ)                                                                                                                                                                                                                                              | 2,812<br>$\times 10^{-6}$   | 7,4981<br>$\times 10^{-6}$ | 11,25<br>$\times 10^{-6}$  | 11,25<br>$\times 10^{-6}$  | 11,671<br>$\times 10^{-6}$ | 14,293<br>$\times 10^{-6}$ | 33,75<br>$\times 10^{-6}$ | 37,735<br>$\times 10^{-6}$ |
| $h=0,600$ , $F=2,02500^2 = 2,025 \times 10^{-6} \text{ მ}^2$ $\chi=23,700=23,7 \times 10^{-3}$ ;<br>$R=\frac{F}{\chi}=\frac{2,025}{23,7} \approx 0,0854400=0,08544 \times 10^{-3}$ ; $d=4 \times R = 4 \times 0,0854400=0,34177 \times 10^{-3}$ ;                     |                             |                            |                            |                            |                            |                            |                           |                            |
| $v \times d$<br>(მ <sup>2</sup> /წმ)                                                                                                                                                                                                                                  | 0,17028<br>$\times 10^{-3}$ | 0,4556<br>$\times 10^{-3}$ | 0,5126<br>$\times 10^{-3}$ | 0,6835<br>$\times 10^{-3}$ | 0,7094<br>$\times 10^{-3}$ | 0,868<br>$\times 10^{-3}$  | 2,050<br>$\times 10^{-3}$ | 2,334<br>$\times 10^{-3}$  |
| $Re$                                                                                                                                                                                                                                                                  | 170                         | 453                        | 510                        | 681                        | 706                        | 865                        | 2042                      | 2325                       |
| $Q$ (მ <sup>3</sup> /წმ)                                                                                                                                                                                                                                              | 1,0125<br>$\times 10^{-6}$  | 2,699<br>$\times 10^{-6}$  | 3,032<br>$\times 10^{-6}$  | 4,05<br>$\times 10^{-6}$   | 4,201<br>$\times 10^{-6}$  | 4,201<br>$\times 10^{-6}$  | 12,15<br>$\times 10^{-6}$ | 13,83<br>$\times 10^{-6}$  |
| სადაწნეო საკანი ჩვეულებრივი რეჟიმით                                                                                                                                                                                                                                   |                             |                            |                            |                            |                            |                            |                           |                            |
| $h=0,600$ , $F=B \times h = 9 \times 0,6 = 5,400^2 = 5,4 \times 10^{-6} \text{ მ}^2$ ; $\chi=2B+2h=18+1,2=19,2$ $\text{მ}=19,2 \times 10^{-3}$ მ;<br>$R=\frac{F}{\chi}=\frac{5,4}{19,2} = 0,28125 \times 10^{-3}$ მ; $d=4 \times R = 1,12500=1,125 \times 10^{-3}$ მ; |                             |                            |                            |                            |                            |                            |                           |                            |
| $v \times d$<br>(მ <sup>2</sup> /წმ)                                                                                                                                                                                                                                  | 0,5627<br>$\times 10^{-3}$  | 1,05<br>$\times 10^{-3}$   | 1,6875<br>$\times 10^{-3}$ | 2,25<br>$\times 10^{-3}$   | 2,3343<br>$\times 10^{-3}$ | 2,8586<br>$\times 10^{-3}$ | 6,75<br>$\times 10^{-3}$  | 7,683<br>$\times 10^{-3}$  |
| $Re$                                                                                                                                                                                                                                                                  | 560                         | 1494                       | 1680                       | 2241                       | 2325                       | 2847                       | 6723                      | 7653                       |
| $Q$ (მ <sup>3</sup> /წმ)                                                                                                                                                                                                                                              | 2,7<br>$\times 10^{-6}$     | 7,19<br>$\times 10^{-6}$   | 8,1<br>$\times 10^{-6}$    | 10,8<br>$\times 10^{-6}$   | 11,205<br>$\times 10^{-6}$ | 12,721<br>$\times 10^{-6}$ | 32,4<br>$\times 10^{-6}$  | 36,882<br>$\times 10^{-6}$ |

**ექსპერიმენტული ნაწილი.** ლაბორატორიულ დანადგარზე ჩატარდა ექსპერიენტები როგორც ჩვეულებრივი დინებით, ასევე ჰიბრიდულით ლამინარული რეჟიმის პირობებში გამოხდომილ წყალზე მემბრანაზე ფორის ზომით 2 მკმ წნევა  $P=1$  ატ ისე, რომ შესასვლელ კვეთში წყლის ხარჯი იყო  $Q=2,7 \times 10^{-6}$  მ<sup>3</sup>/წმ. ცდების შედეგები მოცემულია ცხრილში 2.

ცხრილი 2.ექსპერიმენტების შედეგები

| წნევა P ატ | ხარჯი Q მ <sup>3</sup> /წმ | T C° | J ლ/(სთ მ <sup>2</sup> )            |                                     |
|------------|----------------------------|------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| 1          | $2,7 \times 10^{-6}$       | 20   | ჩვეულებრივი<br>სიჩქარე $v=0,5$ მ/წმ | ჰიბრიდული<br>სიჩქარე $v=1,333$ მ/წმ |
|            |                            |      | 2000                                | 2500                                |

ექსპერიმენტებით მიღებული ხვედრითი წარმადობის მნიშვნელობა ჰიბრიდულ რეჟიმის დროს გაცილებით ბევრად მეტია ვიდრე ჩვეულებრივი რეჟიმის დროს. ეს იმდენად საშუალებას გვაძლევს შემდეგი დასკვნა: თანაბარი ენერგეტიკული დანახარჯების პირობებში უპირატესობა ენიჭება ჰიბრიდულ რეჟიმს. ასევე ჩატარებულ იქნა ექსპერიმენტები ლაბორატორიულ დანადგარზე ჰიბრიდული რეჟიმის პირობებში მემბრანაზე ფორის ზომით 2 მკმ  $P=0,5$  ატ  $\nu=1$ მ/წმ გამოხდილ წყალზე სიმღვრივით 0,03 NTU და კრანის წყალზე სიმღვრივით 0,75 NTU. ექსპერიმენტების შედეგები მოყვანილია ცხრილში 3.

ცხრილი 3. ექსპერიმენტების შედეგები

| წნევა P ატ | ტემპერატურა T C° | სიჩქარე $\nu$ მ/წმ | ხვედრითი წარმადობა J ლ/(სთ მ²) |             |              |             |
|------------|------------------|--------------------|--------------------------------|-------------|--------------|-------------|
|            |                  |                    | გამოხდილი წყალი                |             | კრანის წყალი |             |
|            |                  |                    | 0,03 NTU                       |             | 0,75 NTU     |             |
|            |                  |                    | ჰიბრიდული                      | ჩვეულებრივი | ჰიბრიდული    | ჩვეულებრივი |
| 0,5        | 20               | 1                  | 2900                           | 2000        | 1700         | 1200        |

როგორც ცხრილი 3-დან ჩანს ექსპერიმენტებით მიღებული ხვედრითი წარმადობების მნიშვნელობები ბევრად აღემატება ჰიბრიდული რეჟიმის პირობებში, ვიდრე ჩვეულებრივი რეჟიმის დროს.

**განსჯა.** ამრიგად, ჰიბრიდული რეჟიმის პირობებში მემბრანული დანადგარის სადაწნეო საკნის სიმაღლის განსხვავებული მნიშვნელობისათვის, დადგენილია ლამინარული და ტურბულენტური რეჟიმების სიჩქარეთა დიაპაზონი. ლაბორატორიულ დანადგარზე ჩატარებულმა ექსპერიმენტების შედეგებმა დაგვანახა ჰიბრიდული რეჟიმის უპირატესობა, რომელიც საწინდარია მემბრანული დანადგარების მაღალეფექტურობის, და რაც მთავარია ხელს შეუწყობს სამამულო წარმოების საწარმოო მემბრანული დანადგარების დამუშავებასა და შექმნას.

## ლიტერატურა

1. ბილიეშვილი გ.ვ., ყუფარაძე ლ.პ., კეჟერაშვილი მ.გ., გოგესაშვილი ნ.ნ., ებანოიძე ლ.ო. “სადაწნეო საკანში წყლის ნაკადის ტურბულენტური რეჟიმის თეორიული დახასიათება“. საქართველოს საინჟინრო სიახლენი, №1 ტ. 97, 2023, გვ.111-114. ISSN 1512-0287
2. ბიბილეშვილი გ.ვ., კეჟერაშვილი მ. გ., ყუფარაძე ლ.პ., ჯავაშვილი ზ.დ. „მიკროფილტრაციული პროცესში ნაკადის ჰიდროდინამიკის კვლევა მემბრანული სისტემების სადაწნეო საკნის ოპტიმალური გეომეტრიული კონფიგურაციის შესწავლისათვის.“. საქართველოს საინჟინრო სიახლენი, №2 ტ. 98, 2023, გვ 87. ISSN 1512-0287
3. ბიბილეშვილი გ.ვ., ყუფარაძე ლ.პ., კეჟერაშვილი მ.გ. “წყლის ნაკადის დინების თეორიული და ექსპერიმენტული კვლევა სადაწნეო საკნის განსხვავებული გეომეტრიისათვის კვლევა“. საქართველოს საინჟინრო სიახლენი, №2 ტ.98, 2023, გვ 51. ISSN 1512-0287

4. Belfort, G. (1976), Cleaning of reverse osmosis membranes in wastewater renovation, in Water 75, published by AIChE, NY, 76-81.
5. Venkiteshwaran A. and Belfort, G. (2010) process optimization diagrams for membrane microfiltration, J. Membrane Science, 357 (1-2) 105-108

## **Theoretical studies and experimental results of tangential baromembrane process through hybrid flow implementation on natural water.**

**George Bibileishvili<sup>1</sup>, Liana Kuparadze<sup>2</sup>, Zaza Javashvili<sup>3</sup>, Mzia Kezherashvili<sup>4</sup>, Elene Kakabadze<sup>5</sup>**

Engineering Institute of Membrane technologies of Georgian Technical University

### **abstract**

The paper presents theoretical studies on the implementation of hybrid flow in natural water in devices designed to implement baromembrane separation processes. The Reynolds number is used for the theoretical calculation of hydrodynamic characteristics, and the regime parameters of the hybrid flow were determined through theoretical studies. Critical velocity values, laminar and turbulent flow velocity ranges were determined for different values of the pressure cell height. In addition, a comparison of the water flow regime parameters in the pressure cell with the hybrid flow regime parameters showed that under the hybrid regime, the velocity developed when delivering the same flow rate exceeds the water flow velocity, and according to the experimental results, under the hybrid flow conditions the specific permeability significantly exceeds the specific permeability obtained with conventional flow. Thus, the results of experiments conducted on a laboratory device show the advantage of the hybrid mode, which is a prerequisite for the high efficiency of membrane devices and, most importantly, will facilitate the development and creation of domestically produced industrial membrane devices.

**Keywords:** hybrid flow, laminar and turbulent flow, specific permeability.