

DOI <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2026-26-2-10>

УДК 621.039.58

С. В. Гулієнко, канд. техн. наук, доц.

ORCID: 0000-0002-9042-870X

В. В. Ясеньчук, аспірант

ORCID: 0009-0006-1012-9475

*Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»*

e-mail: 1vitaliy10@ukr.net

## ВПЛИВ КУТА ОРІЄНТАЦІЇ КРУГЛОГО ТА ТРИКУТНОГО СПЕЙСЕРА НА ГІДРАВЛІЧНИЙ ОПІР

*Анотація.* У статті представлено результати досліджень впливу кута орієнтації круглого та трикутного спейсера на гідравлічний опір у каналах зворотного осмосу. Метою роботи було проведення чисельного моделювання гідродинаміки процесу і порівняння втрат тиску для стандартних спейсерів із круглими нитками та нового запропонованого спейсера з трикутним перерізом за кутів  $90^\circ$  та  $45^\circ$ . Наукова новизна полягає у вперше системному аналізі взаємного впливу форми поперечного перерізу спейсера та кута розташування ниток на гідродинаміку каналу.

Доведено, що трикутний профіль знижує перепад тиску на 20–30 % порівняно з круглим аналогом. Кут  $45^\circ$  для обох типів генерує вищий опір, ніж  $90^\circ$ , проте різниця між кутами для трикутних ниток менша, що свідчить про часткову компенсацію гідравлічних втрат завдяки оптимізованому обтіканню та зменшенню зон рециркуляції. Практична цінність дослідження полягає у запропонованому підході до розділення параметрів проектування: геометрія перерізу використовується для мінімізації  $\Delta P$ , а кут орієнтації – для регулювання інтенсивності перемішування та стійкості до забруднення. Встановлено, що спейсер із трикутними нитками під  $45^\circ$  дозволяє зберегти переваги діагональної конфігурації щодо пригнічення концентраційної поляризації без критичного зростання енерговитрат. Отримані результати створюють теоретичну та інженерну основу для впровадження енергоефективних спейсерів у промислові мембранні модулі опріснення та очищення води.

*Ключові слова:* зворотний осмос, геометрія ниток, круглий переріз, трикутний переріз, кут орієнтації, перепад тиску, CFD-моделювання, енергоефективність, концентраційна поляризація.

*Постановка проблеми.* Однією з ключових проблем, з якими стикається людство, є забезпечення доступу до питної води. Ефективним шляхом її розв'язання є мембранне опріснення, серед якого технологія зворотного осмосу посідає провідне місце завдяки високій селективності та модульності [1–2].

Однак основним стримуючим фактором масового впровадження цієї технології залишається висока енергоємність процесу, значна частина якої витрачається на подолання гідравлічного опору живильного каналу. Ключовим елементом, що формує цей опір, є спейсер, який не лише забезпечує структурну цілісність мембранного пакета, але й ініціює гідродинамічні збурення для зменшення концентраційної поляризації та забруднення поверхні [3–4].

Попри десятиліття інженерної оптимізації, традиційні спейсери з круглими нитками демонструють обмежену ефективність через інтенсивний відрив потоку та утворення зон застою, що призводить до надмірних втрат тиску. Актуальність дослідження зумовлена нагальною потребою у зниженні питомої енерговитрати мембранних систем.

Наукова новизна полягає у комплексному підході до дослідження параметрів спейсера, а саме в роботі проаналізовано як вплив форми стандартного спейсера з круглим поперечним перерізом та раніше запропонованого модернізованого спейсера з трикутним поперечним перерізом [5], так і кута їх орієнтації  $90^\circ$  та  $45^\circ$  відносно вектора потоку.



*Аналіз останніх досліджень.* Упродовж останніх років інтенсифікація досліджень у галузі гідродинаміки спейсерних каналів зосереджувалася на пошуку оптимального балансу між масопереносом та гідравлічними втратами. Численні експериментальні та CFD-дослідження підтвердили, що кут орієнтації ниток є визначальним фактором [6–7]: конфігурація  $45^\circ$  забезпечує інтенсивніше перемішування, вищі дотичні напруження на мембрані та краще пригнічення концентраційної поляризації, але генерує вищий перепад тиску порівняно з ортогональною структурою  $90^\circ$ . Паралельно розвивалися підходи до модифікації геометрії спейсерів – досліджувалися овальні, гофровані, асиметричні та 3D-друковані профілі, які у окремих випадках демонстрували потенціал до зниження опору потоку, однак економічність виготовлення цих конфігурацій під питанням [8–9]. Відсутні системні дані щодо поведінки ниток з трикутним перерізом, теоретично здатних мінімізувати опір завдяки спрямованому обтіканню та локалізації відриву потоку біля гострих ребер. Саме ця прогалина – відсутність кількісної оцінки взаємодії геометрії перерізу та кута орієнтації у контексті гідравлічного опору – визначає предмет даної роботи та обґрунтовує необхідність спеціалізованого симуляційного дослідження, присвяченого розв'язанню цього питання.

*Мета статті* – є порівняння гідравлічного опору спейсерів із круглими та трикутними нитками при орієнтації  $90^\circ$  і  $45^\circ$ , кількісне визначення переваг трикутного профілю щодо зниження втрат тиску та обґрунтування оптимальної конфігурації для мінімізації енерговитрат у мембранних системах зворотного осмосу.

*Основна частина.* У даній роботі чисельне моделювання гідродинамічних процесів у каналах зі спейсерами виконувалося із застосуванням відкритого програмного забезпечення OpenFOAM-v2212, яке реалізує метод скінченних об'ємів для розв'язання задач механіки суцільних середовищ у наукових дослідженнях. Доцільність використання цього програмного комплексу для моделювання мембранних процесів підтверджена численними публікаціями [10–11], де продемонстровано його здатність адекватно відтворювати структуру турбулентних течій у складних геометріях та коректно прогнозувати гідравлічні втрати в каналах зі спейсерами. Побудова геометричних моделей досліджуваних конфігурацій спейсерів здійснювалася у FreeCAD 1.0.1, що дозволило з високою точністю задати параметри двох типів поперечного перерізу ниток (круглий та трикутний). Візуалізація та аналіз полів швидкостей, здійснювалися за допомогою ParaView 5.10.1. Використання цього інструменту дозволило виконати детальний якісний та кількісний аналіз структури течії, ідентифікувати зони відриву потоку, рециркуляції та локальні піки тиску, а також забезпечити наочне представлення отриманих даних.

Дослідження виконано для періодичного фрагмента міжмембранного каналу спіральнo-згорнутого мембранного модуля. Розрахункова область включала характерну комірку каналу з урахуванням геометрії нитки спейсера та поверхонь мембрани. Такий підхід є загальноприйнятним у CFD-аналізі регулярних структур і дозволяє коректно відтворити локальні гідродинамічні ефекти, що визначають інтегральний гідравлічний опір [12]. У межах роботи було змодельовано чотири базові конфігурації спейсерів, що зображені на рисунку 1.

Гідродинамічні дослідження гідравлічних характеристик спейсерів дозволили встановити чіткі закономірності впливу геометрії ниток та кута їхньої орієнтації на опір потоку в каналі. Отримані дані узагальнено на графічній залежності (рис. 2) та в табличній формі (табл. 1, 2), що дає змогу провести детальний порівняльний аналіз.

Загальна характеристика гідродинамічного опору Як видно з графіка (рис. 2), для всіх чотирьох досліджуваних конфігурацій спостерігається монотонне зростання гідравлічного опору зі збільшенням витрати живильного розчину. Ця залежність є нелінійною, що свідчить про перехід від ламінарного до перехідного та турбулентного режимів течії в діапазоні витрат 0,2–2,0 л/год. При цьому криві чітко розділяються на дві групи залежно від кута орієнтації

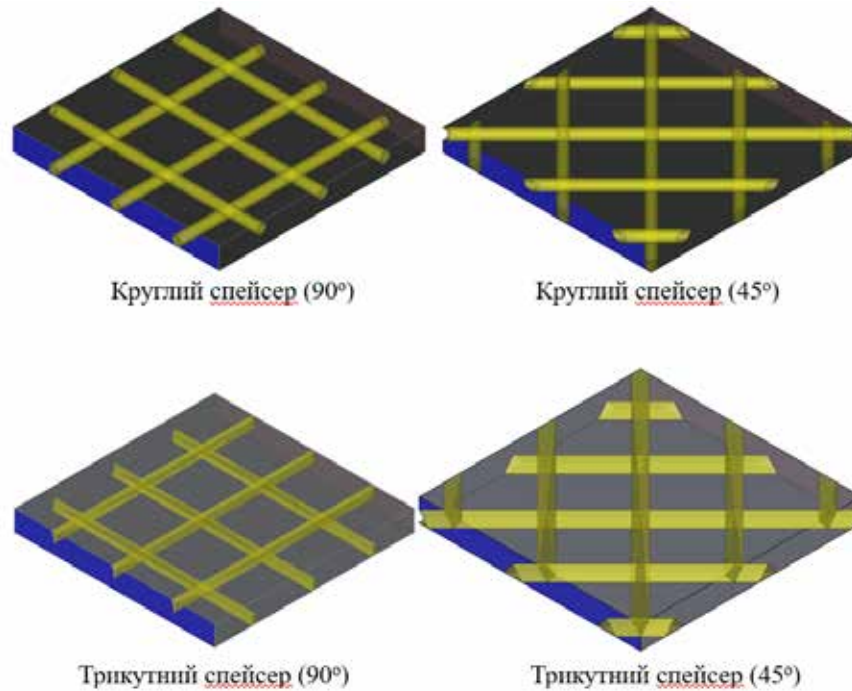


Рис. 1. Конфігурації досліджуваних спейсерів

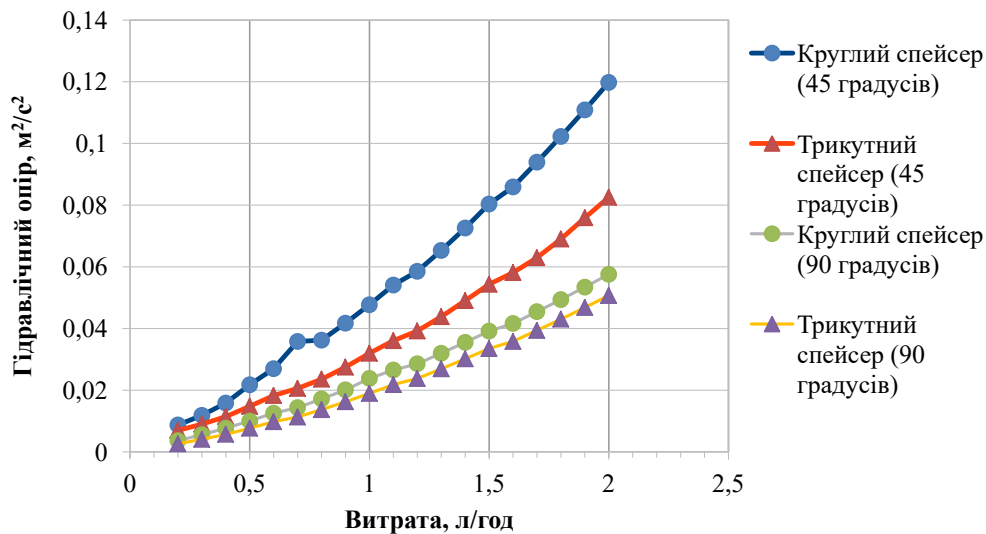


Рис. 2. Графік залежності гідрравлічного опору від витрати

ниток: конфігурації під кутом 45° (синя та червона лінії) демонструють значно вищий опір порівняно з конфігураціями під кутом 90° (сіра та жовта лінії). Порівняння кутів 90° та 45° підтверджує відомі гідродинамічні ефекти [13]. При куті 45° потік рідини змушений долати більшу кількість перешкод на одиницю довжини каналу, а траєкторія руху стає більш звивистою. Це призводить до інтенсифікації вихроутворення та збільшення шляху тертя, що і фіксується у вигляді вищого гідрравлічного опору. Наприклад, при витраті 2,0 л/год гідрравлічний опір круглого спейсера під 45° майже вдвічі перевищує гідрравлічний опір аналогічного спейсера під 90°. Це узгоджується з літературними даними про те, що діагональне розташування забезпечує краще перемішування ціною зростання витрат енергії на прокачування.



Таблиця 1

## Гідрравлічний опір спейсерів при куті орієнтації ниток 45°

Витрата, л/год	Гідрравлічний опір при куті 45°, м <sup>2</sup> /с <sup>2</sup>		Відносна різниця, %
	Кругла конфігурація	Трикутна конфігурація	
0,2	0,008745253	0,006975952	20,23
0,3	0,01186524	0,0089887	24,24
0,4	0,015840583	0,011433502	27,82
0,5	0,021777298	0,014804183	32,02
0,6	0,026963259	0,018296189	32,14
0,7	0,035822145	0,020593347	42,51
0,8	0,036240707	0,023560661	34,99
0,9	0,041753287	0,02748982	34,16
1	0,047696327	0,031975853	32,96
1,1	0,054106316	0,03606174	33,35
1,2	0,058543763	0,03921653	33,01
1,3	0,065315394	0,043817863	32,91
1,4	0,072568487	0,049031594	32,43
1,5	0,080370023	0,054358681	32,36
1,6	0,085923179	0,058136188	32,34
1,7	0,093944724	0,062963388	32,98
1,8	0,102273875	0,068991348	32,54
1,9	0,110869201	0,075916481	31,53
2	0,119769104	0,08256529	31,06

Таблиця 2

## Гідрравлічний опір спейсерів при куті орієнтації ниток 90°

Витрата, л/год	Гідрравлічний опір при куті 90°, м <sup>2</sup> /с <sup>2</sup>		Відносна різниця, %
	Кругла конфігурація	Трикутна конфігурація	
0,2	0,003666941	0,002604621	28,97
0,3	0,005571541	0,004083623	26,71
0,4	0,007692416	0,005705789	25,83
0,5	0,009998798	0,007669261	23,30
0,6	0,012569462	0,009798855	22,04
0,7	0,014365227	0,011307715	21,28
0,8	0,017172907	0,013700198	20,22
0,9	0,020110737	0,016248763	19,20
1	0,023807332	0,018953158	20,39
1,1	0,02655454	0,021810348	17,87
1,2	0,028571869	0,023795727	16,72
1,3	0,03197557	0,026925517	15,79
1,4	0,035527248	0,030154846	15,12
1,5	0,039159049	0,033508432	14,43
1,6	0,041648542	0,035820119	13,99
1,7	0,045467927	0,039385523	13,38
1,8	0,049383997	0,043023507	12,88
1,9	0,053421108	0,046805216	12,38
2	0,057571956	0,050688515	11,96

Ключовим результатом роботи є виявлення суттєвої переваги трикутного профілю ниток над традиційним круглим. Для обох кутів орієнтації (45° та 90°) криві опору трикутного спейсера розташовані нижче за відповідні криві круглого спейсера. Фізичне обґрунтування цього явища полягає в аеродинаміці обтікання тіл, яке можна побачити на рисунку 3 з зображеними полями швидкостей.

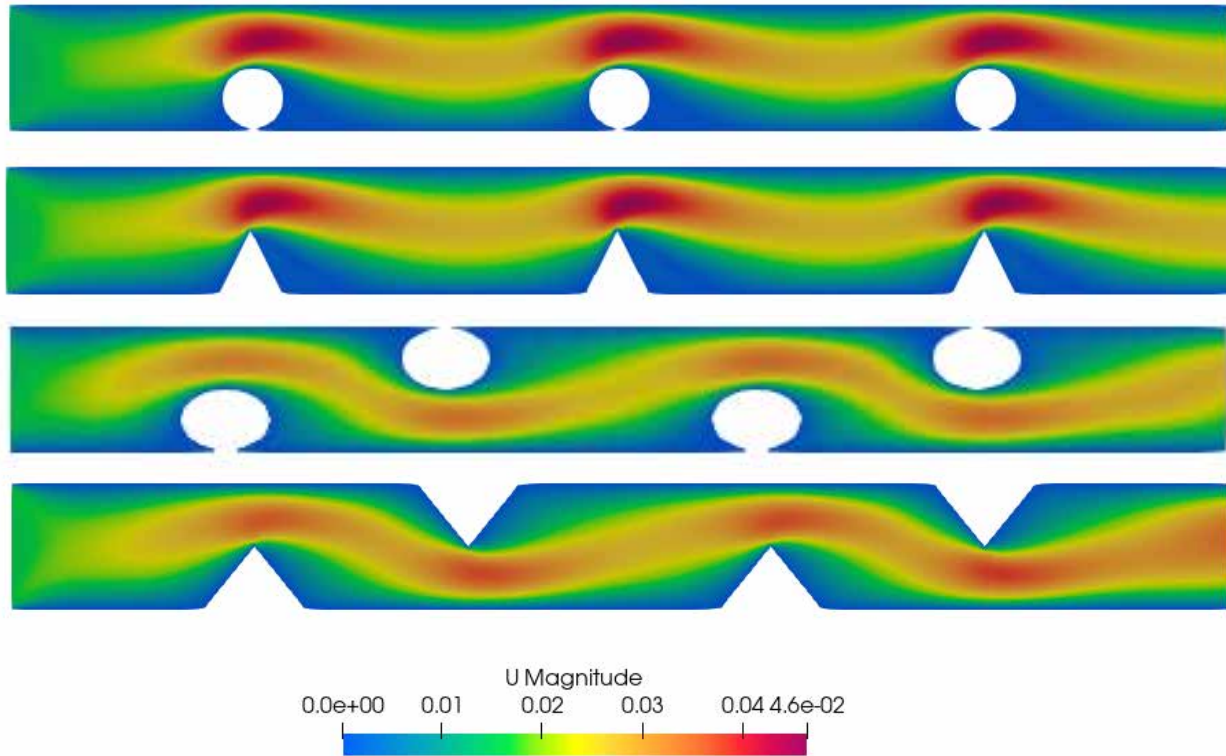


Рис. 3. Поля швидкостей досліджуваних спейсерів

Дані таблиць дозволяють кількісно оцінити вигравш від використання трикутної геометрії: Для кута  $45^\circ$ : Використання трикутних ниток забезпечує стабільне зниження гідравлічного опору на 30–35 % у всьому діапазоні витрат. Навіть при максимальній витраті (2,0 л/год) економія опору залишається високою – 31,06 %. Це свідчить про те, що трикутна форма ефективно працює як у перехідному, так і у розвиненому турбулентному режимі для діагональних спейсерів. Для кута  $90^\circ$ : Ефект від трикутного профілю також є позитивним, але має іншу динаміку. При малих витратах (ламінальний/перехідний режим) зниження опору є максимальним – 28,97 % (при 0,2 л/год). Однак зі збільшенням витрати відносно зниження опору дещо зменшується, досягаючи 11,96 % при 2,0 л/год.

*Висновки.* У результаті проведеного чисельного моделювання вперше системно оцінено вплив форми круглого та трикутного поперечного перерізу ниток спейсера під різними кутами їхньої орієнтації ( $90^\circ$  та  $45^\circ$ ) на гідравлічний опір каналу. Доведено, що трикутний профіль ниток забезпечує статистично значуще зниження перепаду тиску на 12–35% порівняно з традиційним круглим аналогом за ідентичних геометричних параметрів. Підтверджено, що для обох типів перерізу орієнтація ниток під кутом  $45^\circ$  генерує вищий гідравлічний опір порівняно з конфігурацією  $90^\circ$ , що пояснюється збільшенням ефективної фронтальної площі перешкоди, частішим перетином потоку з нитками та інтенсифікацією вторинних течій. Однак встановлено важливу закономірність: абсолютна та відносна різниця в опорі між кутами  $45^\circ$  та  $90^\circ$  для трикутних ниток є меншою, ніж для круглих. Це свідчить про те, що оптимізація форми перерізу частково компенсує негативний гідродинамічний вплив діагонального розташування, дозволяючи зберегти переваги кута  $45^\circ$  щодо інтенсифікації масопереносу без пропорційного зростання енерговитрат.

В подальшому планується проведення експериментальних досліджень для подальшої верифікації отриманих даних та виведення критеріальних рівнянь ефективності трикутного спейсера з кутовою орієнтацією.

**Список використаних джерел**

1. Alkaisu A., Mossad R., Sharifian-Barforoush A. A Review of the Water Desalination Systems Integrated with Renewable Energy. *Energy Procedia*. 2017. Vol. 110. P. 268–274. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.138>.
2. Advances in Membrane Technologies for Heavy Metal Removal from Polluted Water: A Comprehensive Review / M. Dawam et al. *Water, Air, & Soil Pollution*. 2025. Vol. 236, no. 7. <https://doi.org/10.1007/s11270-025-08035-6>.
3. Gu B., Adjiman C. S., Xu X. Y. The effect of feed spacer geometry on membrane performance and concentration polarisation based on 3D CFD simulations. *Journal of Membrane Science*. 2017. Vol. 527. P. 78–91. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2016.12.058>.
4. The evolution of feed spacer role in membrane applications for desalination and water treatment: A critical review and future perspective / N. Sreedhar et al. *Desalination*. 2023. Vol. 554. P. 116505. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2023.116505>.
5. Huliienko S., Yasenchuk V., Gatilov K. Preliminary assessment of the performance of novel design of the spacer for the membrane module. *Матеріали міжнародної науково-практичної конференції «Екологія Людина Суспільство»*. 2025. P. 148–151.: <https://doi.org/10.20535/ehs2710-3315.2025.330194>.
6. Gu B., Adjiman C. S., Xu X. Y. The effect of feed spacer geometry on membrane performance and concentration polarisation based on 3D CFD simulations. *Journal of Membrane Science*. 2017. Vol. 527. P. 78–91. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2016.12.058>.
7. Feed spacer mesh angle: 3D modeling, simulation and optimization based on unsteady hydrodynamic in spiral wound membrane channel / K. K. Lau et al. *Journal of Membrane Science*. 2009. Vol. 343, no. 1–2. P. 16–33. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2009.07.001>.
8. Haidari A. H., Heijman S. G. J., van der Meer W. G. J. Optimal design of spacers in reverse osmosis. *Separation and Purification Technology*. 2018. Vol. 192. P. 441–456.
9. Novel spacer geometries for membrane distillation mixing enhancement / A. A. Ibrahim et al. *Desalination*. 2024. P. 117513. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2024.117513>.
10. Designing Centrifugal Membrane Filters with Uniform-Pressure for UF/NF/RO separations / V. Geraldes et al. *Journal of Membrane Science*. 2024. P. 122752. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2024.122752>.
11. Huliienko S. V., Yasenchuk V. V., Protsiuk M. O. Refined Assessment of the Impact of Membrane Module Channel Curvature on Pressure Drop. *Journal of Applied Membrane Science & Technology*. 2025. Vol. 29, no. 1. P. 55–72. <https://doi.org/10.11113/jamst.v29n1.310>.
12. Spacer Designs for Improved Hydrodynamics and Filtration Efficiency in Sea Water Reverse Osmosis / S. Kerdi et al. *Membranes*. 2025. Vol. 15, no. 1. P. 32. <https://doi.org/10.3390/membranes15010032>.
13. Determining effects of spacer orientations on channel hydraulic conditions using PIV / A. H. Haidari et al. *Journal of Water Process Engineering*. 2019. Vol. 31. P. 100820. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2019.100820>.

Дата першого надходження статті до видання: 22.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 14.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 25.05.2026

Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)



**S. Huliienko, V. Yasenchuk**

*National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”*

## **INFLUENCE OF THE ORIENTATION ANGLE OF CIRCULAR AND TRIANGULAR SPACERS ON PRESSURE DROP**

### *Summary*

The article presents the results of a study on the influence of the orientation angle of circular and triangular spacers on hydraulic resistance in reverse osmosis channels. The aim of the work was to perform numerical modeling of the process hydrodynamics and to compare pressure losses for standard spacers with circular filaments and a novel proposed spacer with a triangular cross-section at angles of 90° and 45°. The scientific novelty lies in the first



systematic analysis of the mutual influence of the spacer filament cross-sectional shape and the filament orientation angle on the channel hydrodynamics.

It was demonstrated that the triangular profile reduces the pressure drop by 20–30% compared to the circular counterpart. The 45° angle generates higher hydraulic resistance than 90° for both types of spacers. However, the difference between the angles is smaller for triangular filaments, indicating partial compensation of hydraulic losses due to optimized flow streamlining and reduced recirculation zones. The practical value of the study lies in the proposed approach to separating design parameters: the cross-sectional geometry is used to minimize  $\Delta P$ , while the orientation angle is used to control the intensity of mixing and fouling resistance. It was established that the spacer with triangular filaments at 45° allows maintaining the advantages of the diagonal configuration in terms of concentration polarization suppression without a critical increase in energy consumption. The obtained results provide a theoretical and engineering basis for the implementation of energy-efficient spacers in industrial membrane modules for desalination and water treatment.

*Keywords:* reverse osmosis, filament geometry, circular cross-section, triangular cross-section, orientation angle, pressure drop, CFD modeling, energy efficiency, concentration polarization.