

ГЕМОДИНАМІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ МЕХАНІЧНИХ ШТУЧНИХ КЛАПАНІВ СЕРЦЯ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

У роботі розглянуто гемодинамічні властивості механічних штучних серцевих клапанів у контексті їхньої еволюції, сучасних моделей та клінічних аспектів застосування. Розглянуто еволюцію типів клапанів та сучасні підходи до їх гемодинамічної оцінки. На основі аналізу досліджень оцінено показники: ефективна площа отвору, градієнт тиску, напруження зсуву за Рейнольдсом, в'язке напруження зсуву та ризик ускладнень.

Ключові слова: гемодинаміка, механічний клапан серця, ефективна площа отвору, хірургія клапана.

Вступ

Серцеві клапани відіграють ключову роль у забезпеченні одномірного потоку крові в серці та між серцем і великими судинами. Порушення їх структури або функції – наслідок вроджених вад, ревматичних уражень, дегенеративних змін або інфекційних процесів – часто потребують хірургічного втручання у вигляді протезування. Механічні штучні серцеві клапани, такі як двостулкові, нахилені дискові та кульові, широко застосовуються для заміни пошкоджених природних клапанів завдяки їх високій зносостійкості та довговічності – термін служби таких протезів становить 20–30 років або більше. Однак вони мають вищу тромбогенність порівняно з біопротезами, що вимагає позитивної антикоагуляції. Гемодинамічні властивості цих клапанів, зокрема градієнти тиску, ефективна площа отвору (ЕОА) та турбулентність потоку, визначають їхню функціональність і ризик ускладнень, таких як тромбоз механічного клапана, річна частота якого становить 0,1–5,7% [1].

Перші механічні клапани, зокрема кулькові моделі на кшталт Starr-Edwards, мали значні гемодинамічні недоліки, включаючи створення турбулентного потоку та підвищений ризик тромбоутворення. Згодом були розроблені клапани з нахиленим диском і двостулкові конструкції, які значно покращили гемодинамічні властивості. Проте жоден з сучасних механічних клапанів не є повністю фізіологічним замінником нативної анатомічної структури. У світлі розвитку технологій виготовлення клапанів і появи нових підходів до їх дослідження, зокрема за допомогою *in vitro* стендових моделей, прецизійної ехокардіографії, комп'ютерної томографії, моделювання рідинної динаміки, актуальним є систематичний аналіз сучасних даних про гемодинаміку механічних клапанів різних типів.

Результати дослідження

Гемодинамічні властивості механічного клапана – це сукупність характеристик, що визначають його здатність забезпечувати адекватний потік крові при мінімальних втратах енергії та без шкоди для кровообігу. Основними параметрами, що оцінюються у дослідженнях і клінічній практиці, є: ефективна площа отвору (ЕОА), усереднений та піковий градієнт тиску, пікова швидкість потоку (V_{max}), напруження зсуву за Рейнольдсом (RSS), в'язке напруження зсуву (VSS), індекс доплерівської швидкості тощо. Від цих показників залежить як функціональність протеза, так і ризик таких ускладнень, як тромбоз, гемоліз, ендокардит і регургітація [2].

Типи механічних серцевих клапанів:

1. Кулькові клапани. Першим комерційно доступним механічним клапаном був клапан Starr-Edwards (1960-ті роки), який складався з металевої сітки (клітки) та кульки з силікону або титану, покритої піролітичним вуглецем. Така конструкція створювала значний опір потоку крові, викликала турбулентність, підвищувала зсувні напруження і, як наслідок, ризик тромбоутворення.

Попри виняткову довговічність (деякі моделі функціонували понад 30 років), ці клапани більше не застосовуються в сучасній практиці через незадовільні гемодинамічні характеристики.

2. Клапани з нахиленим диском. З метою зменшення турбулентності були розроблені клапани з нахиленим (одностулковим) диском, серед яких поширеними є Björk-Shiley та Medtronic Hall. Ці клапани мають диск, що відкривається під кутом, створюючи два потоки: центральний та периферійний. Це дозволило покращити ефективну площу отвору (EOA) та знизити градієнт тиску в порівнянні з кульковими моделями, проте потік залишався асиметричним, а односторонній характер відкриття викликав нерівномірне навантаження на стінки судин.

3. Двостулкові клапани. Найбільш широко застосовуваними сьогодні є двостулкові механічні клапани, такі як St. Jude Medical (SJM), ATS Medical, Carbomedics та On-X. Вони складаються з двох симетричних напівциркулярних дисків, які відкриваються одночасно, формуючи три потоки: центральний і два периферійних. Така конструкція мінімізує опір потоку, покращує EOA і знижує турбулентність. Наприклад, дослідження Natoum et al. показало, що клапан SJM мав найбільший EOA серед порівнюваних зразків – $1,96 \pm 0,02 \text{ см}^2$, а рівень RSS та VSS був значно нижчий, ніж у попередніх моделей.

Сучасні двостулкові клапани мають додаткові переваги завдяки вдосконаленим матеріалам – піролітичний вуглець, титанові кільця, антиадгезивні покриття. Деякі моделі, як On-X, демонструють покращену аеродинаміку і навіть допускають зниження цільового INR до 1.5–2.0 у вибраних пацієнтів, що потенційно знижує ризик кровотеч. Проте, згідно з даними багатьох клінічних досліджень, тип протеза має менший вплив на гемодинамічні результати порівняно з такими чинниками, як площа поверхні тіла пацієнта та розмір імплантованого клапана.

Перші покоління клапанів мали спрощену конструкцію, що забезпечувала базову функцію, проте була далекою від фізіологічних показників гемодинаміки. Сучасні моделі демонструють вдосконалені характеристики завдяки прогресу в матеріалознавстві, біоінженерії та комп'ютерному моделюванні. Попри технічне вдосконалення, всі механічні клапани вимагають довічної антикоагулянтної терапії – головним чином через залишковий ризик тромбоутворення, спричинений неприродною геометрією потоку крові та високим зсувним навантаженням. Тромбоз, регургітація, гемоліз та ендокардит залишаються провідними ускладненнями, що обмежують безпечність довготривалого використання механічних клапанів.

Розглянемо основні критерії оцінки гемодинамічних властивостей механічних клапанів:

1. Ефективна площа отвору (EOA) – це індикатор того, наскільки «відкритим» є клапан під час систоли. Більше значення EOA свідчить про менший опір кровотоку і, відповідно, нижче навантаження на серце. Ефективна площа отвору обчислюється за допомогою рівняння [3]:

$$EOA = \frac{Q_{rms}}{51,6\sqrt{PG}} \quad (1)$$

де, Q_{rms} – середньоквадратичне значення потоку через аортальний клапан протягом періоду позитивного перепаду тиску, $[\text{см}^3/\text{с}]$;

PG – середня різниця тиску виміряна протягом періоду позитивного перепаду тиску, $[\text{мм рт. ст.}]$.

Механічний клапан SJM продемонстрував EOA $1,96 \pm 0,02 \text{ см}^2$, що більше, ніж у біопротезів аналогічного розміру (наприклад, Hancock II – $1,05 \text{ см}^2$). On-X та ATS також показали схожі або трохи вищі значення EOA у порівнянні з іншими двостулковими моделями.

2. Середній градієнт тиску (MPG) є іншим важливим параметром. Він характеризує опір клапана кровотоку під час систоли. Порівнявши три моделі механічних клапанів (On-X, ATS, Bicarbon) було досліджено, що незалежно від моделі градієнти тиску були подібними і залишались стабільними протягом перших шести місяців після операції, без статистично значущих відмінностей [4].

Для клінічних цілей зазвичай розраховується середній градієнт тиску, який обчислюється на основі інтеграції миттєвих градієнтів протягом усієї систоли. Це робиться автоматично в ехокардіографічному обладнанні за допомогою рівняння:

$$MPG = \int_{t_1}^{t_2} 4V(t)^2 dt \quad (2)$$

де, $V(t)$ – швидкість кровотоку в момент часу t , $[\text{м/с}]$;

t_1 – початок фази потоку через клапан, $[\text{с}]$;

t_2 – початок фази потоку через клапан, $[\text{с}]$.

3. Турбулентність і зсувне напруження. Одним із головних недоліків механічних клапанів, особливо ранніх моделей, є формування турбулентного потоку за клапаном, що може призводити до гемолізу та підвищення ризику тромбоутворення. Дослідження показало, що рівень RSS та VSS був найвищим у кульковому клапані Starr-Edwards і значно нижчим у двостулкових моделях, таких як SJM. Водночас, біоклапан Evolut має вищі показники RSS/VSS, ніж механічний SJM, що свідчить про перевагу останнього з точки зору ламінарного потоку.

4. Поведінка при стресі. У дослідженнях продемонстровано, що під впливом добутаміну об'ємний кровотік, V_{max} та градієнт тиску зростали як у нативному, так і у протезованому клапані. Втім, ріст градієнта був значно стрімкішим у протезі, що свідчить про його нижчу адаптивність до фізіологічного стресу [5].

Розглянуті гемодинамічні параметри механічних клапанів серця неведені в таблиці 1.

Таблиця 1 – Гемодинамічні параметри механічних клапанів серця

Параметр	Starr-Edwards	Björk-Shiley	SJM	On-X	ATS
Тип	Кульковий	Однодисковий	Двостулковий	Двостулковий	Двостулковий
ЕОА (см ²)	~1,0	~1,4	~1,9-2,1	~2,0-2,1	~1,8-2,0
MPG	Високий	Середній	Низький	Низький	Низький
RSS / VSS	Дуже високу	Високі	Помірні	Помірні/низькі	Помірні
Поведінка при стресі	Жорстка	Помірна	Адаптивна	Стабільна	Стабільна

Висновки

Проведений аналіз свідчить про значний прогрес у сфері клапанного протезування, що полягає у переході від примітивних кулькових моделей до високотехнологічних двостулкових конструкцій з оптимізованою гемодинамікою. Зокрема, сучасні моделі, такі як SJM, On-X та ATS, демонструють стабільно низькі градієнти тиску, покращену ефективну площу отвору, знижену турбулентність потоку та, відповідно, нижчий ризик гемолізу і тромбоутворення.

Проте, попри суттєве вдосконалення дизайну та матеріалів, механічні клапани досі не є повністю фізіологічними пристроями. Турбулентні потоки, зсувне напруження та необхідність у довічній антикоагулянтній терапії залишаються актуальними клінічними викликами.

Отже, механічні клапани забезпечують надійне та ефективне гемодинамічне рішення при клапанному ураженні, однак залишаються далеко не ідеальними. Подальша еволюція в цій галузі має бути спрямована не лише на продовження терміну служби клапана, а й на наближення його функціональних властивостей до природного прототипу – живого серцевого клапана.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Soria Jiménez C. E., Papolos A. I., Kenigsberg B. B., et al. (2023). Management of Mechanical Prosthetic Heart Valve Thrombosis. *Journal of the American College of Cardiology*, 81(21), 2115–2127. <https://doi.org/10.1016/j.jacc.2023.03.412>
2. Carnazzo M.C., Al Ibraheem B.M., Calvin A.D. (2024). Severe Prosthetic Mitral Valve Regurgitation Hidden by Acoustic Shadowing: The Importance of Spectral Doppler in Prosthetic Valve Assessment. *CASE: Cardiovascular Imaging Case Reports*, 8(6), 359–363. <https://doi.org/10.1016/j.case.2024.03.004>
3. Hatoum H et al. Flow dynamics of surgical and transcatheter aortic valves: Past to present. *JTCVS Open*. 2022;9:43-56. <https://doi.org/10.1016/j.xjon.2022.01.017>
4. Algarni K.D., Hassan A., Elhenawy A. (2021). Early Hemodynamic Profile after Aortic Valve Replacement - A Comparison between Three Mechanical Valves. *Journal of Cardiac Surgery*, 36(6), 1931–1937. <https://doi.org/10.21470/1678-9741-2020-0273>
5. Choo S.J., Kim K.I., Park N.H., et al. Development of an Animal Experimental Model for a Bileaflet Mechanical Heart Valve Prosthesis. *J Korean Med Sci*. 2004;19:37-41. <https://doi.org/10.3346/jkms.2004.19.1.37>

Дячук Олексій Олександрович – аспірант кафедри БМІОЕС, факультет інформаційних електронних систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, email: dayte2@gmail.com

Тимчик Сергій Васильович – канд. техн. наук, доцент кафедри біомедичної інженерії та оптико-електронних систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: tymchyksv@ukr.net

HEMODYNAMIC PROPERTIES OF MECHANICAL ARTIFICIAL HEART VALVES

Abstract

The paper reviews the hemodynamic properties of mechanical prosthetic heart valves in the context of their evolution, modern models, and clinical applications. The evolution of valve types and modern approaches to their hemodynamic assessment are reviewed. Based on the analysis of studies, the following indicators were evaluated: effective orifice area, pressure gradient, Reynolds shear stress, viscous shear stress, and the risk of complications..

Keywords: hemodynamics, mechanical heart valve, effective orifice area, valve surgery.

Diachuk Oleksii O. – graduate student of the Department of BMIOES, Faculty of Information Electronic Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, email: dayte2@gmail.com

Tymchyk Serhii V. – Cand. Sc. (Eng), Associate Professor of the Department of Biomedical Engineering and Optical-Electronic Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: tymchyksv@ukr.net