

УДК 519.6, 14.01.24

DOI 10.17802/2306-1278-2021-10-2S-63-67

КОНЦЕПЦИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ФУНКЦИОНАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПРОТЕЗОВ КЛАПАНОВ СЕРДЦА

П.С. Онищенко, К.Ю. Клышников, М.А. Резвова, Е.А. Овчаренко

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Научно-исследовательский институт комплексных проблем сердечно-сосудистых заболеваний», Сосновский бульвар, 6, Кемерово, Российская Федерация, 650002

Цель	Разработать алгоритм автоматизированного функционального проектирования створчатого аппарата аортального клапана сердца.
Материалы и методы	Генерация геометрий створчатого аппарата аортального клапана сердца выполнена в среде программирования MATLAB (MathWorks, Массачусетс, США). Численное моделирование процесса открытия произведено с использованием программного обеспечения Abaqus/CAE (Dassault Systemes, Франция).
Результаты	Разработан алгоритм, с помощью которого получен набор моделей створчатого аппарата, восемь из которого подверглись численному моделированию напряженно-деформированного состояния. Моделирование запирающего давления продемонстрировало, что наименьшее значение напряжения по Мизесу зафиксировано у образца с большей площадью поверхности купола створки и составляет 0,422 мПа. Полученные результаты показывают, что величина радиуса кривизны в значительно большей степени влияет на поведение всего клапана, что приводит к выводу о необходимости тщательного выбора дизайна аппарата для его корректного функционирования.
Заключение	Приведено первичное подтверждение работоспособности концепта алгоритма автоматизированного функционального проектирования створчатого аппарата аортального клапана сердца.
Ключевые слова	Створчатый аппарат клапанов сердца • Разработка • Численное моделирование • Matlab • Abaqus/CAE

Поступила в редакцию: 11.06.2021; принята к печати: 20.06.2021

THE CONCEPT OF AUTOMATED FUNCTIONAL DESIGN OF HEART VALVE PROSTHESES

P.S. Onishchenko, K.Yu. Klyshnikov, M.A. Rezvova, E.A. Ovcharenko

Federal State Budgetary Institution "Research Institute for Complex Issues of Cardiovascular Diseases", 6, Sosnoviy Blvd., Kemerovo, Russian Federation, 650002

Aim	To develop an algorithm for the automated functional design of the heart valve leaflet apparatus.
Methods	The geometry of the aortic valve leaflet was designed in the Matlab programming environment (MathWorks, Massachusetts, USA). Numerical modeling of the opening process was performed using Abaqus/CAE (Dassault Systemes, France).
Results	We developed an algorithm, with the help of which a set of models of the leaflet apparatus was designed. 8 models were subjected to numerical modeling of the stress-strain state. The locking pressure simulation has shown that the smallest von Mises stress value was recorded for a sample with a larger surface area of the leaflet belly and it equals 0.422 MPa. The results obtained show that the value of the radius of curvature significantly affects the behavior of the entire valve, which leads to the conclusion that it is necessary to carefully select the design of the valve apparatus for its correct functioning.

Для корреспонденции: Павел Сергеевич Онищенко, airgone57@gmail.com; адрес: Сосновский бульвар, 6, Кемерово, Россия, 650002

Corresponding author: Pavel S. Onishchenko, airgone57@gmail.com; address: 6, Sosnoviy Blvd., Kemerovo, Russian Federation, 650002

Conclusion	The study provides the primary confirmation that the concept of the algorithm is efficient for the automated functional design of the aortic heart valve leaflet apparatus.
Keywords	Heart valve leaflet apparatus • Development • Numerical simulation • Matlab • Abaqus/CAE

Received: 11.06.2021; accepted: 20.06.2021

Список сокращений

СА – створчатый аппарат

Введение

Клапанная болезнь сердца – один из наиболее распространенных типов сердечно-сосудистых заболеваний и ежегодно поражает более 100 млн человек во всем мире. Патология является актуальной проблемой из-за сопутствующих осложнений дегенеративного характера у стареющего населения и высокой распространенности ревматической болезни сердца в развивающихся странах [1]. В большинстве случаев единственным эффективным методом лечения клапанных пороков служит протезирование – имплантация искусственного (биологического или механического) устройства [2]. Перед исследователями стоит задача создания биосовместимых и долговечных протезов клапанов сердца для сохранения естественного характера тока крови и корректности общего функционирования устройства.

Разработка протезов клапанов сердца сопровождается выбором оптимальной геометрии створчатого аппарата. Первый подход – использовать методы численного моделирования для оценки полученного прототипа с последующей подстройкой модели [3]. Данный способ основан на анализе каждой модели экспертом. Второй подход – применение методов машинного обучения как для разработки створчатого аппарата [4], так и оценки возникающих напряжений при его деформации [5]. Преимущества второго варианта в том, что надлежащим образом настроенные искусственные нейронные сети могут находить взаимосвязи там, где это не всегда очевидно, для чего необходима обучающая выборка большого размера.

Настоящая работа посвящена описанию алгоритма, позволяющего в автоматическом режиме генерировать створчатый аппарат различных геометрий в зависимости от заданных параметров.

Материалы и методы

Для построения створчатого аппарата используется следующий набор геометрических параметров (рис. 1, а):

- φ (градус) – угол отклонения верхней части створки (может быть как отрицательным, так и положительным);
- H_1 (см) – общая высота предполагаемого протеза от нижней части каркаса до верхней точки коммиссуральной стойки;
- H_2 (см) – предполагаемая высота каркаса протеза в нижней точке купола створчатого аппарата;
- R – радиус кривизны створки;
- R_{in} (см) – радиус предполагаемого протеза;
- Sec (градус) – сектор от круга, занимаемый одной створкой;
- T (см) – толщина створки.

Алгоритм построения геометрии аппарата реализован в среде MATLAB R2021a (MathWorks, Массачусетс, США). Численное моделирование проводили с использованием программного обеспечения для инженерного анализа Abaqus/CAE (Dassault Systemes, Франция) с целью исследования полного открытия и возникающих при этом напряжений по Мизесу. Модель материала задана равной физическим свойствам ксеноперикарда.

Результаты

Алгоритм построения

Разработанное программное средство функционирует следующим образом:

- построение дуги, примыкающей к каркасу с учетом высот H_1 , H_2 , величины Sec и типоразмера R_{in} ;
- построение верхней части створки с учетом угла φ ;
- создание кривой, отвечающей за кривизну створки с заданным радиусом кривизны R ;
- создание векторов от каждого элемента на поверхности створки с последующим перемещением копии построенной створки вдоль них на величину T ;
- создание поверхностной сетки на основе полученного облака точек и экспорт трехмерной фигуры.

Верификация алгоритма генерации проведена методом построения 20 тыс. уникальных створчатых аппаратов, геометрические показатели заданы случайным образом. Критерием удачного набора

геометрических параметров считали такие геометрии, которые содержали только четыре однозначно определяемые поверхности для дальнейшего задания граничных условий.

Для численного моделирования зафиксированы следующие параметры: $\text{Sec} = 119^\circ$, $R_{\text{in}} = 10$ см, $H_2 = 2$ см, $H_1 = 12,5$ см, $T = 0,5$ см (являются постоянными в данной работе), а R и φ выбраны так, чтобы составить следующие пары: (10; 10), (5; 10), (1; 10), (1; 5), (1; 0), (1; -5), (1; -10) и (0,5; 10). Полученные площади поверхности купола створки, наиболее близлежащей к фиброзному кольцу, варьировали от 200 (первая пара параметров R и φ) до 239,9 мм² (последняя, восьмая, пара соответственно).

Результаты численного моделирования динамики открытия створчатого аппарата

Для оценки корректного функционирования полученных геометрий створчатого аппарата произведено численное моделирование их поведения при придании давления 5,5 кПа к внутренней стороне экземпляра с имитацией процесса его открытия (рис. 1, *b*). Максимальное напряжение по Мизесу составило 2,05 мПа у образца № 3 (локализация в области высшей точки предполагаемой комиссуральной стойки). Из-за большей площади поверхности верхняя часть створки схлопывается к нижней половине, что приводит к невозможности дальнейшего рассмотрения такой геометрии. Аналогичные явления характерны для всех представ-

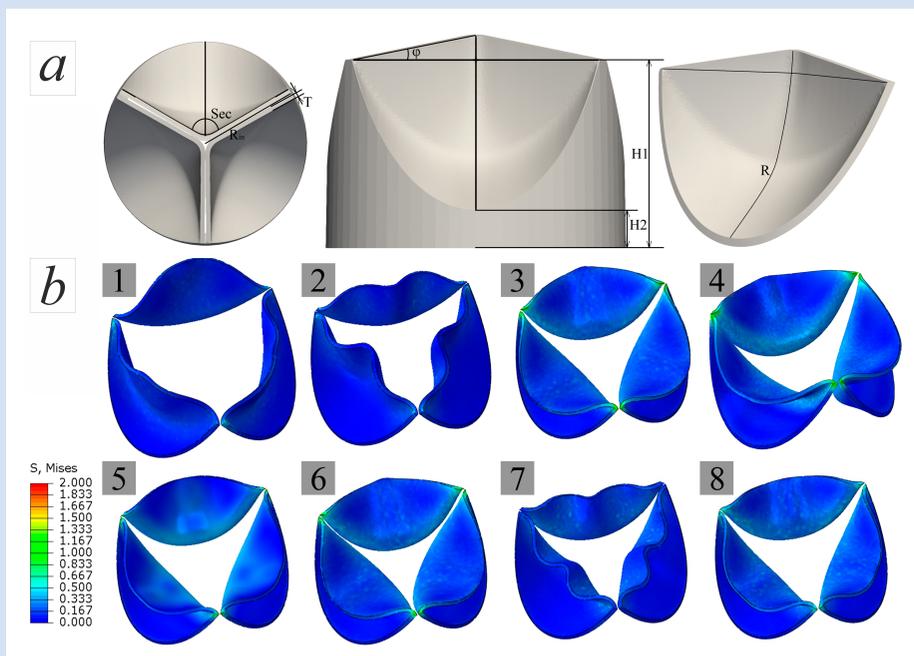
ленных геометрий кроме № 1 и 2. Наименьшее значение отмечено у образца № 8, составив 0,422 мПа. Полученные результаты показывают, что величина радиуса кривизны R в значительно большей степени, в сравнении с углом φ , влияет на поведение клапана.

Обсуждение

Данная работа является частью процесса разработки протезов клапанов сердца с оптимальным дизайном створчатого аппарата для обеспечения наиболее естественного характера течения крови и увеличения срока службы медицинского изделия за счет уменьшения возникающих в нем напряжений. Кроме того, представленные протезы учитывают такие пациент-специфические параметры, как диаметр корня аорты, высота нативного створчатого аппарата, его кривизна и другие. Проект может быть реализован несколькими путями: с использованием многомерной оптимизации или методов глубокого обучения.

Первый подход включает:

- генерацию предполагаемой геометрии;
- получение полей напряжений и перемещений;
- постановку ограничений на изменение параметров построения (например, пациент-специфические типоразмеры);
- запуск процесса оптимизации, например по критериям минимизации возникающих напряжений или увеличения площади просвета в открытом состоянии.



Визуализация результатов исследования: *a* – нанесенные обозначения геометрических параметров построения на трехмерную модель сгенерированной створки створчатого аппарата; *b* – результат численного анализа полученных геометрий створчатого аппарата. Цифрой указан номер пары параметров R и φ .

Research results visualization. *a* – Geometric parameters of the generated valve leaflet on a three-dimensional model; *b* – The result of the numerical analysis of the designed geometries of the leaflet apparatus. The number indicates the number of the pair of parameters R and φ .

Второй подход:

- создание обучающей выборки на основе сгенерированных геометрий и численного моделирования;
- обучение искусственной нейронной сети предсказывать возникающие напряжения и площади просвета в открытом состоянии и кооптации створок;
- выстраивание обученной искусственной нейронной сетью геометрии для конкретного случая, например на основе пациент-специфических параметров.

Заключение

Представленный в статье метод позволяет получать уникальные дизайны створчатого аппарата. Подтверждена состоятельность концепта генерации трехмерных моделей. Получена трехмерная модель створчатого аппарата с наименьшими по сравнению с другими рассмотренными вариантами напряжениями по Мизесу. В дальнейшем перспективным представляется совмещение автоматической генерации створчатого аппарата, численного моделирования взаимодействия потока

крови и клапана сердца (fluid-structure interaction, FSI) и методов машинного обучения для получения дизайнов с большим количеством параметров. Это позволит увеличить долговечность работы протезов клапанов сердца, а также снизить риски повторного вмешательства по причине их дисфункции.

Конфликт интересов

П.С. Онищенко заявляет об отсутствии конфликта интересов. К.Ю. Клышников заявляет об отсутствии конфликта интересов. М.А. Резвова заявляет об отсутствии конфликта интересов. Е.А. Овчаренко заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование

Работа выполнена в рамках фундаментальной темы НИИ КПССЗ № 0546-2019-0002 «Патогенетическое обоснование разработки имплантатов для сердечно-сосудистой хирургии на основе биосовместимых материалов с реализацией пациенториентированного подхода с использованием математического моделирования, тканевой инженерии и геномных предикторов».

Информация об авторах

Онищенко Павел Сергеевич, младший научный сотрудник лаборатории новых биоматериалов отдела экспериментальной медицины федерального государственного бюджетного научного учреждения «Научно-исследовательский институт комплексных проблем сердечно-сосудистых заболеваний», Кемерово, Российская Федерация; **ORCID** 0000-0003-2404-2873

Клышников Кирилл Юрьевич, научный сотрудник лаборатории новых биоматериалов отдела экспериментальной медицины федерального государственного бюджетного научного учреждения «Научно-исследовательский институт комплексных проблем сердечно-сосудистых заболеваний», Кемерово, Российская Федерация; **ORCID** 0000-0003-3211-1250

Резвова Мария Александровна, младший научный сотрудник лаборатории новых биоматериалов отдела экспериментальной медицины федерального государственного бюджетного научного учреждения «Научно-исследовательский институт комплексных проблем сердечно-сосудистых заболеваний», Кемерово, Российская Федерация; **ORCID** 0000-0002-4405-8904

Овчаренко Евгений Андреевич, кандидат технических наук заведующий лабораторией новых биоматериалов отдела экспериментальной медицины федерального государственного бюджетного научного учреждения «Научно-исследовательский институт комплексных проблем сердечно-сосудистых заболеваний», Кемерово, Российская Федерация; **ORCID** 0000-0001-7477-3979

Author Information Form

Onishchenko Pavel Yu., a junior research assistant at the Laboratory of New Biomaterials, the Department of Experimental Medicine, Federal State Budgetary Institution “Research Institute for Complex Issues of Cardiovascular Diseases”, Kemerovo, Russian Federation; **ORCID** 0000-0003-2404-2873

Klyshnikov Kirill Yu., a research assistant at the Laboratory of New Biomaterials, the Department of Experimental Medicine, Federal State Budgetary Institution “Research Institute for Complex Issues of Cardiovascular Diseases”, Kemerovo, Russian Federation; **ORCID** 0000-0003-3211-1250

Rezvova Maria A., a junior research assistant at the Laboratory of New Biomaterials, the Department of Experimental Medicine, Federal State Budgetary Institution “Research Institute for Complex Issues of Cardiovascular Diseases”, Kemerovo, Russian Federation; **ORCID** 0000-0002-4405-8904

Ovcharenko Evgey A., Candidate of Technical Sciences, Head of the Laboratory of New Biomaterials, the Department of Experimental Medicine, Federal State Budgetary Institution “Research Institute for Complex Issues of Cardiovascular Diseases”, Kemerovo, Russian Federation; **ORCID** 0000-0001-7477-3979

Вклад авторов в статью

ОПС – получение данных исследования, написание статьи, утверждение окончательной версии для публикации, полная ответственность за содержание

Author Contribution Statement

OPS – data collection, editing, approval of the final version, fully responsible for the content

ККЮ – получение данных исследования, написание статьи, утверждение окончательной версии для публикации, полная ответственность за содержание

РМА – интерпретация данных исследования, корректировка статьи, утверждение окончательной версии для публикации, полная ответственность за содержание

ОЕА – интерпретация данных исследования, корректировка статьи, утверждение окончательной версии для публикации, полная ответственность за содержание

KKYu – data collection, editing, approval of the final version, fully responsible for the content

RMA – data interpretation, editing, approval of the final version, fully responsible for the content

OEA – data interpretation, editing, approval of the final version, fully responsible for the content

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Nkomo V.T., Gardin J.M., Skelton T.N., Gottdiener J.S., Scott C.G., Enriquez-Sarano M. Burden of valvular heart diseases: a population-based study. *Lancet*. 2006;368(9540):1005-11. doi: 10.1016/S0140-6736(06)69208-8.
2. Dunning J., Gao H., Chambers J., Moat N., Murphy G., Pagano D., Ray S., Roxburgh J., Bridgewater B. Aortic valve surgery: marked increases in volume and significant decreases in mechanical valve use--an analysis of 41,227 patients over 5 years from the Society for Cardiothoracic Surgery in Great Britain and Ireland National database. *J Thorac Cardiovasc Surg*. 2011;142(4):776-782.e3. doi: 10.1016/j.jtcvs.2011.04.048.
3. Abbasi M., Barakat M.S., Dvir D., Azadani A.N. A Non-Invasive Material Characterization Framework for Bioprosthetic Heart Valves. *Ann Biomed Eng*. 2019 Jan;47(1):97-112. doi: 10.1007/s10439-018-02129-5.
4. Gulbulak U., Gecgel O., Ertas A. A deep learning application to approximate the geometric orifice and coaptation areas of the polymeric heart valves under time – varying transvalvular pressure. *J. Mech. Behav. Biomed. Mater*. 2021; 117: 104371. doi:10.1016/j.jmbbm.2021.104371
5. Liang L., Sun B. A Proof of Concept Study of Using Machine-Learning in Artificial Aortic Valve Design: From Leaflet Design to Stress Analysis. *Bioengineering (Basel)*. 2019;6(4):104. doi: 10.3390/bioengineering6040104.

Для цитирования: Онищенко П.С., Клышников К.Ю., Резвова М.А., Овчаренко Е.А. Концепция автоматизированного функционального проектирования протезов клапанов сердца. *Комплексные проблемы сердечно-сосудистых заболеваний*. 2021;10(2S): 63-67. DOI: 10.17802/2306-1278-2021-10-2S-63-67

To cite: Onishchenko P.S., Klyshnikov K.Yu., Rezvova M.A., Ovcharenko E.A. The concept of automated functional design of heart valve prostheses. *Complex Issues of Cardiovascular Diseases*. 2021;10(2S): 63-67. DOI: 10.17802/2306-1278-2021-10-2S-63-67