

Повышение стабильности скорости кровотока в искусственных механических трехстворчатых клапанах сердца

Аннотация

Представлено сравнение гемодинамических характеристик искусственных механических трехстворчатых клапанов сердца. Для сравнения были взяты две модели ИКС, а именно ИКС «Трикардикс» (патент РФ № 2325874) и ИКС «МИКС» (патент РФ № 181544). Для проведения исследования были созданы 3D-модели исследуемых ИКС и эксплуатационные условия среды работы данных устройств в программном комплексе «SolidWorks». Для проведения гемодинамических расчетов было выбрано расширение «SolidWorks FlowSimulation». Критерии эффективности были составлены на основе гемодинамических показателей естественного аортального клапана сердца.

Введение

Сердечно-сосудистые заболевания (ССЗ) являются основной причиной смерти в мире, которая ежегодно забирает более десяти миллионов жизней людей. Вследствие современного ритма жизни, неправильного питания и отказа от занятий спортом ССЗ наблюдаются не только у пожилых, но и у молодых людей. Недостаточность аортального клапана сердца является одной из самых распространенных болезней сердечно-сосудистой системы, которая при отказе от лечения может привести к существенным осложнениям [1]. Для того чтобы не допустить осложнений, разрабатываются искусственные механические и биологические клапаны сердца.

Проведение операции по замене естественного клапана сердца на искусственный клапан сердца (ИКС) позволяет облегчить или полностью избавить пациента от болей. Однако после операции пациенту необходимо принимать антикоагулянты и проходить периодические обследования. В связи с этим ведутся постоянные поиски оптимальной конструкции ИКС, удовлетворяющего гемодинамическим и биохимическим требованиям [1]. Для разработки новых моделей ИКС используются программы, позволяющие создавать 3D-модели и исследовать их в условиях, близких к тем, в которых им предстоит функционировать, что значительно упрощает, ускоряет и удешевляет процесс разработки ИКС.

Моделирование биофизических процессов организма человека – это метод исследования явлений, процессов и систем, происходящих в человеческом организме, основанный на построении и изучении их математических или физических моделей. Математическое моделирование биологических объектов представляет собой описание идеализированных процессов и систем, подобных естественным процессам. Физическое моделирование основано на воспроизведении биологических структур, функций или процессов.

Моделирование органов и структур человеческого организма дает возможность разработать конструкцию изделия, предусмотреть критические отклонения модели от реального орга-

на, выяснить механизмы формирования патологий, корректировать механические свойства и характер функционирования данных биологических объектов. Это позволяет расширить сферу применения диагностических методов и устройств, являясь предпосылкой для создания автоматизированных средств диагностики. Однако для точности расчетов необходимо правильно задавать среду, в которой будет использоваться разработанная конструкция протеза. Такой подход является рациональным способом усовершенствования конструкции ИКС.

Настоящее исследование было инициировано для получения и оценки результатов применения новой конструкции ИКС, оценки точности расчетов при правильном задании среды, в которой будет использоваться разработанная конструкция ИКС. Такой подход является рациональным способом разработки новой конструкции ИКС.

Цель исследования – провести сравнительный анализ гемодинамических свойств разработанного механического искусственного клапана сердца «МИКС» и известного искусственного трехстворчатого клапана «Трикардикс» [2].

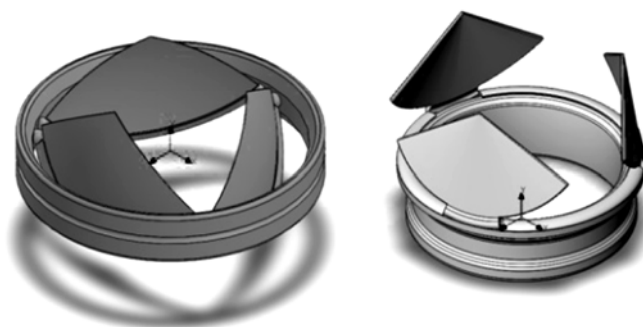


Рис. 1. 3D-модели клапанов «Трикардикс» и «МИКС» соответственно

Условия расчета

Таблица 1

Параметр	Среднее численное значение	Описание
Систолический (ударный) объем	$7 \cdot 10^{-2}$ л	Количество крови, выталкиваемое при каждом сокращении левого и правого желудочка, 60...80 мл
Вязкость крови	4,5 мПа·с	Вязкость крови в норме – 4...5 мПа·с
Плотность крови	1,062 г/м ³	Диапазон 1,055...1,065 г/см ³ , среднее значение примерно 1,062 г/см ³
Давление при выбросе крови в аорту	120 мм рт. ст.	При измерениях артериального давления фиксировалось не абсолютное давление в сосудах, а превышение артериального давления над атмосферным
Размер форменных элементов крови	$7,5 \cdot 10^{-6}$ м	Суспензия форменных элементов крови размером 2...20 мкм в плазме
Скорость потока крови при выбросе в аорту	0,5 м/с	Диапазон 0,4...0,8 м/с

Материалы и методы

Инструментом анализа был выбран программный комплекс «SolidWorks» с программным пакетом «FlowSimulation», позволяющий моделировать условия работы сердца. Расчеты в данной программе проводятся на основе уравнений Навье-Стокса и законов сохранения массы, момента и энергии. При использовании системы уравнений Навье-Стокса и точно заданных параметров среды относительная погрешность расчета составляет около 1% [3].

Для проведения расчетов была создана геометрическая модель клапанов сердца и заданы входные данные (рис. 1, табл. 1).

Все элементы клапанов «Трикардик» и «МИКС» выполнены из наноструктурированного пироуглерода, характеризующегося повышенными физико-механическими свойствами по сравнению с традиционным пироуглеродом [4], [5].

Разработанный нами ИКС «МИКС» состоит из следующих основных частей: корпуса с тремя шарнирно закрепленными створками в специально модернизированный узел крепления, позволяющий створкам концентрично вращаться по поверхности корпуса (рис. 2). Основное отличие клапана «МИКС» от «Трикардик» заключается в том, что узел крепления створок состоит из двух частей: вращающегося элемента узла крепления и запирающего элемента узла крепления, при этом створки

вынесены за контур корпуса. Корпус и торцевая поверхность сконструированы с возможностью ограничения хода створок. Вращающийся элемент узла крепления обеспечивает концентричное вращение створок по поверхности корпуса.

Результаты исследования

В качестве сравниваемых образцов взяты трехстворчатые ИКС «Трикардик» и «МИКС». После проведения расчетов были получены данные гемодинамических свойств ИКС «МИКС» и «Трикардик» (рис. 3, табл. 2, 3).

На рис. 3а представлен расчет скорости кровотока в фазу быстрого изгнания с использованием ИКС «МИКС». Гемодинамика данного клапана близка по своим характеристикам, числовым значениям и структуре кровотока к нативному клапану за счет полнопроточности и анатомической схожести. Во время выброса крови в аорту кровотоки имеют осевое вращение, что может приводить к травматизации форменных элементов крови и впоследствии к тромбозу. Особая конструкция узла крепления исследуемого клапана разработана с учетом данной особенности кровотока и способна вращать створки по поверхности корпуса под действием угловой нагрузки, тем самым снижая риск тромбоза и вероятность повреждения целостности форменных элементов крови.

На рис. 3б демонстрируются результаты исследования скорости кровотока в фазу быстрого выброса с использованием

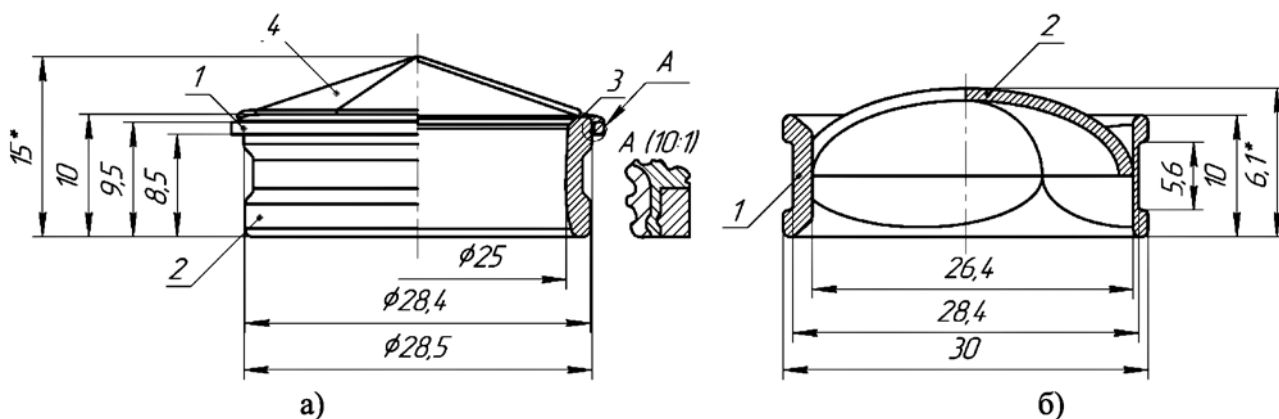


Рис. 2. Сборочные чертежи: а) ИКС «МИКС»: 1 – скользящий элемент крепления; 2 – корпус; 3 – фиксирующий элемент крепления; 4 – створка; б) ИКС «Трикардик»: 1 – корпус; 2 – створка

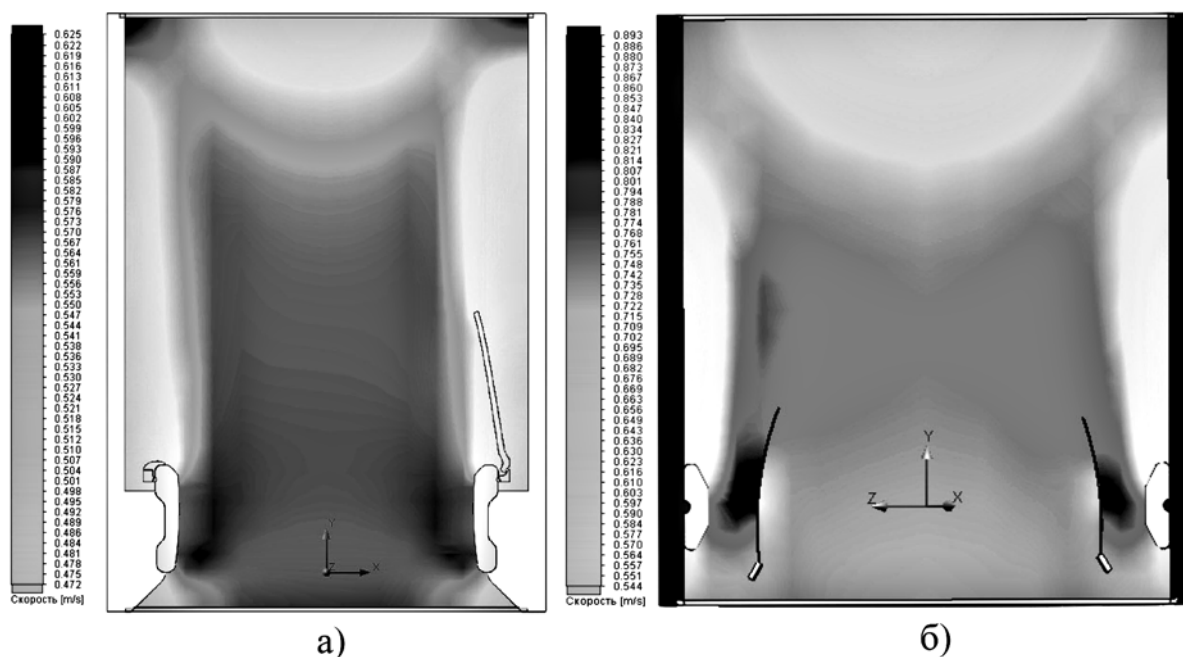


Рис. 3. Результаты исследования скорости кровотока в фазу быстрого изгнания при давлении 120 мм рт. ст.: а) разработанный ИКС «МИКС»; б) известный ИКС «Трикардик»

ИКС «Трикардикс». Основным недостатком данного ИКС является разделение кровотока на центральный и три периферийных потока, что может приводить к тромбообразованию и нарушению целостности форменных элементов крови вследствие образования турбулентного потока.

Для проведения расчетов было взято 6 точек (3 в центральном и 3 в периферийных потоках), обозначенных как: Max – максимальное, Min – минимальное, Med – среднее значения.

Таблица 2

Результаты исследования гемодинамических характеристик ИКС «МИКС» для фазы быстрого изгнания

Центральный поток					
Скорость, м/с			Давление, мм рт. ст.		
Max	Med	Min	Max	Med	Min
0,625	0,543	0,472	122,20	120,12	117,09

Таблица 3

Результаты исследования гемодинамических характеристик ИКС «Трикардикс» для фазы быстрого изгнания

Центральный поток					
Скорость, м/с			Давление, мм рт. ст.		
Max	Med	Min	Max	Med	Min
0,621	0,557	0,544	121,81	120,15	117,12
Периферийный поток					
Скорость, м/с			Давление, мм рт. ст.		
Max	Med	Min	Max	Min	Min
0,893	0,660	0,582	126,15	121,10	119,12

Анализ полученных результатов свидетельствует о близких гемодинамических показателях ИКС «МИКС» и нативного аортального клапана сердца. Однородность скорости потока крови клапана «МИКС» превышает показатели клапана «Трикардикс» на 23,7 %.

Для представления полного цикла работы сравниваемых ИКС была построена диаграмма зависимости средней скорости кровотока от фаз сердечного цикла (рис. 4).

Из полученного графика видно, что кровоток на протяжении всей систолы в ИКС «МИКС» более однороден, чем кровоток в ИКС «Трикардикс», образованный центральным и периферийным потоками. Разность скоростей на пиках составляет в среднем 0,250 м/с, что является нежелательным, так как следствием этого является образование турбулентности на границе потоков.

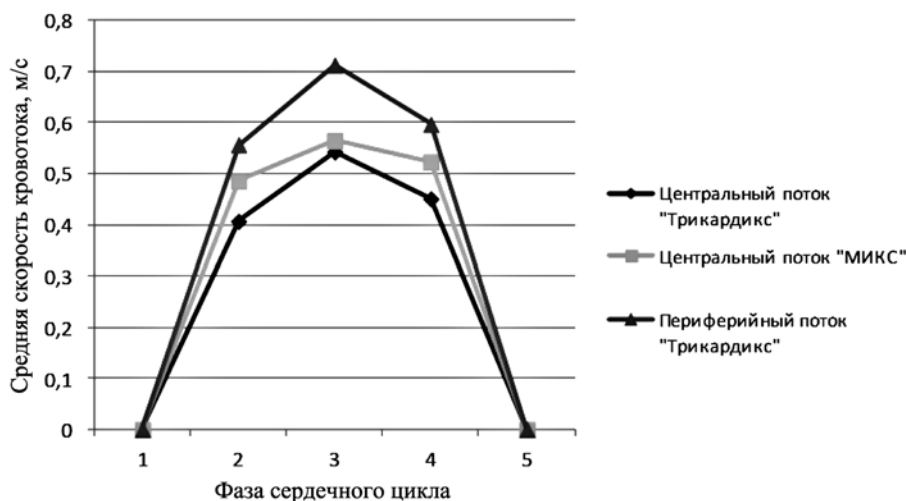


Рис. 4. Сравнительный анализ средней скорости кровотока для ИКС «Трикардикс» и «МИКС»: 1 – фаза асинхронного сокращения миокарда желудочков (0,08 с); 2 – фаза изометрического сокращения (0,03 с); 3 – фаза быстрого изгнания (0,12 с); 4 – фаза медленного изгнания (0,13 с); 5 – фаза протодиастолического периода (0,04 с)

Выводы

1. Проведен сравнительный анализ гемодинамических свойств разработанного механического ИКС «МИКС» и известного ИКС «Трикардикс».

2. Показано, что гемодинамические показатели клапана «МИКС» на 23,7 % лучше воспроизводят гемодинамику крови, чем протез клапана сердца «Трикардикс». Полученные данные позволяют рассматривать клапан «МИКС» в качестве альтернативы выбора при замене естественного клапана сердца.

Список литературы:

1. Вербовая Т.А., Гриценко В.В., Глянец С.П., Давиденко В.В., Белевитин А.Б., Свистов А.С., Евдокимов С.В., Никифоров В.С. Отечественные механические протезы клапанов сердца. Прошлое и настоящее создания и клинического применения. – СПб.: Наука, 2011. 195 с.
2. Самков А.В. Протез клапана сердца / Патент РФ на изобретение № 2325874. 04.04.2006.
3. Баутин С.П., Замыслов В.Е. Представление приближенных решений полной системы уравнений Навье-Стокса в одном случае // Вычислительные технологии. 2012. Т. 17. № 3. С. 3-12.
4. Бокерия Л.А., Евдокимов С.В., Агафонов А.В. Протез клапана сердца / Патент РФ на изобретение № 2477105. 11.07.2011.
5. Небогатиков Р.С., Анисимов А.Н., Варламов Д.А., Пичхидзе С.Я. Механический искусственный клапан сердца / Патент РФ на полезную модель № 181544. 27.02.2018.

Роман Сергеевич Небогатиков,
студент,

Сергей Яковлевич Пичхидзе,
д-р техн. наук, профессор,

кафедра «Физическое материаловедение
и биомедицинская инженерия»,

ФГБОУ ВО «Саратовский государственный
технический университет им. Гагарина Ю.А.»,

г. Саратов,

e-mail: neboatikov.r@gmail.com