

Технические характеристики самораскрывающегося клапана для лечения клапанной патологии легочной артерии

Для корреспонденции: Ксения Асифовна Рзаева,
ksusha.rzaeva@yandex.ru

Поступила в редакцию 22 апреля 2022 г.
Исправлена 5 мая 2022 г. Принята к печати 11 мая 2022 г.

Цитировать: Рзаева К.А., Тимченко Т.П., Журавлева И.Ю., Архипов А.Н., Горбатов А.В., Войтов А.В., Ничай Н.Р., Богачев-Прокофьев А.В., Соинов И.А. Технические характеристики самораскрывающегося клапана для лечения клапанной патологии легочной артерии. *Патология кровообращения и кардиохирургия*. 2022;26(3):85-90. <https://dx.doi.org/10.21688/1681-3472-2022-3-85-90>

Финансирование

Работа поддержана грантом Российского научного фонда, проект № 21-75-10041.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов

Концепция и дизайн: К.А. Рзаева, Т.П. Тимченко, А.Н. Архипов, Н.Р. Ничай

Сбор и анализ данных: А.В. Войтов, Н.Р. Ничай

Написание статьи: К.А. Рзаева, А.В. Горбатов

Исправление статьи: И.Ю. Журавлева, И.А. Соинов, А.В. Богачев-Прокофьев

Утверждение окончательного варианта статьи: все авторы

ORCID ID

К.А. Рзаева, <https://orcid.org/0000-0001-7254-0733>

Т.П. Тимченко, <https://orcid.org/0000-0002-1812-2845>

И.Ю. Журавлева, <https://orcid.org/0000-0002-1935-4170>

А.Н. Архипов, <https://orcid.org/0000-0003-3234-5436>

А.В. Горбатов, <https://orcid.org/0000-0003-4017-4198>

А.В. Войтов, <https://orcid.org/0000-0003-3797-4899>

Н.Р. Ничай, <https://orcid.org/0000-0002-1763-9535>

А.В. Богачев-Прокофьев, <https://orcid.org/0000-0003-4625-4631>

И.А. Соинов, <https://orcid.org/0000-0003-3691-2848>

© Рзаева К.А., Тимченко Т.П., Журавлева И.Ю., Архипов А.Н., Горбатов А.В., Войтов А.В., Ничай Н.Р., Богачев-Прокофьев А.В., Соинов И.А., 2022



К.А. Рзаева¹, Т.П. Тимченко¹, И.Ю. Журавлева¹, А.Н. Архипов¹, А.В. Горбатов², А.В. Войтов¹, Н.Р. Ничай¹, А.В. Богачев-Прокофьев¹, И.А. Соинов¹

¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение «Национальный медицинский исследовательский центр имени академика Е.Н. Мешалкина» Министерства здравоохранения Российской Федерации, Новосибирск, Российская Федерация

² Федеральное государственное бюджетное учреждение «Национальный медицинский исследовательский центр имени В.А. Алмазова» Министерства здравоохранения Российской Федерации, Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация

Актуальность. Баллонорасширяемые транскатетерные клапаны легочной артерии в России имеют прямой каркас, из-за чего приходится выполнять предварительное стентирование нативного выходного отдела правого желудочка или клапаносодержащего кондуита во избежание периоперационных осложнений. Данная тактика увеличивает время проведения вмешательства, усложняет технику имплантации клапана, а также повышает стоимость операции.

Цель. Разработать модель транскатетерного самораскрывающегося клапана легочной артерии и подготовить ее для проведения доклинических испытаний на животных.

Методы. Разработали модель самораскрывающегося нитинолового каркаса транскатетерного легочного биопротеза. Выполнили створки и облицовку каркаса из ксеноперикарда свиньи и монтировали вручную. Провели тесты радиальных усилий каркаса и испытания загрузки клапана в систему доставки.

Результаты. Биоматериал клапана и места швов не повреждены после компрессии. В 2022 году планируется завершить первые доклинические испытания на животных с целью определения состоятельности имплантируемого клапана, а также оценки скорости обызвествления в течение 6 и 12 мес. после операции.

Заключение. Путем оптимизации конструкции опорного каркаса удалось усовершенствовать транскатетерную модель биологического клапана с удовлетворительными результатами первого этапа доклинических испытаний.

Ключевые слова: биопротез; клапан легочной артерии; нитинол; правый желудочек

Введение

Протезирование клапаносодержащим кондуитом позволяет выполнять коррекцию сложных форм врожденных пороков сердца, таких как тетрада Фалло, атрезия легочной артерии с дефектом межжелудочковой перегородки, общий артериальный ствол, транспозиция магистральных сосудов с обструкцией легочного кровотока, двойное отхождение магистральных сосудов от правого желудочка тетрадного типа, а также формирование пути оттока при процедуре Росса [1]. После имплантации клапаносодержащего кондуита в отдаленном периоде может возникнуть выраженный стеноз или легочная регургитация, сопровождающаяся значительной объемной перегрузкой правого желудочка, что вызывает расширение полости правого желудочка со снижением толерантности к физической нагрузке и аритмией. Дальнейшее лечение требует повторной торакотомии, однако операция не только технически сложна, но и сопряжена с высоким риском осложнений и летального исхода [2]. С развитием технологий интервенционная хирургия по лечению клапанной патологии существенно усовершенствовалась и получила широкое распространение в зарубежных клиниках. P. Bonhoeffer и соавт. выполнили первую транскатетерную имплантацию клапана легочной артерии в 2000 г. [3]. Позднее права на разработку клапана приобрела компания Medtronic и после небольшой модификации клапана приступила к коммерческому производству кондуита Melody Valve (Medtronic Inc., Миннеаполис, США), за ним последовал легочный клапан Edwards SAPIEN (Edwards Lifesciences, Ирвин, США). Баллонорасширяемый кондуит Melody Valve состоит из клапаносодержащего сегмента яремной вены быка, фиксированного к каркасу прямого типа, выполненному из платиноиридиевой проволоки, сваренной лазером в местах перекрещивания балок ячеек. Баллонорасширяемый клапан Edwards SAPIEN изготовлен из бычьего перикарда, фиксированного на стальном стенте прямого типа. Минимальный размер системы доставки для данных клапанов составляет 22 Fr. В ближайшем периоде после имплантации этих клапанов наблюдаются положительные результаты: отсутствие значимого возвратного градиента давления и деформации каркаса [4]. Однако в отдаленном периоде отмечаются резидуальная обструкция выходного отдела правого желудочка (ВОПЖ) за счет перелома каркаса клапана, миграция клапана из-за недостаточной фиксации в ВОПЖ. Предложена рутинная установка голометаллического стента (престентирование), чтобы обеспечить

адекватную посадочную зону, предотвратить перелом клапанного каркаса, его миграцию, а также парапротезную регургитацию, однако такая стратегия является дорогостоящей [4–6]. Кроме того, после престентирования примерно 5 % пациентов подвержены риску компрессии коронарных артерий имплантированным стентом и инфаркта миокарда. С появлением биопротезов большего диаметра для расширенного ВОПЖ деформация (сдавление) корня аорты с тяжелой аортальной регургитацией стала еще одним возможным острым осложнением (10 %) [7]. Более редкими осложнениями являются надрыв или полный разрыв кондуита после предварительной дилатации баллона (3 %); повреждение трехстворчатого клапана [8]; эпизоды острого внезапного отека легких у пациентов высокого риска с диастолической дисфункцией левого желудочка; осложнения, связанные с сосудистым доступом из-за большого диаметра системы доставки [9]. Общая частота перипроцедурной смертности составляет около 1,4 % [10].

Стремительное развитие транскатетерных технологий способствовало появлению новой генерации протезов, монтированных на самораскрывающемся каркасе из нитинола. Первым самораскрывающимся транскатетерным клапаном для протезирования ВОПЖ является VenusP-Valve (Venus MedTech Inc., Ханчжоу, Китай), разработанный в 2014 г. Расширяющиеся края клапана VenusP-Valve призваны обеспечить стабильность крепления у пациентов с широким ВОПЖ. При имплантации данного устройства не требуется подготовки посадочной зоны (предварительного стентирования), что снижает стоимость и длительность процедуры, а также дозу облучения для пациента и медицинского персонала. Позднее были разработаны другие варианты самораскрывающихся клапанов: Med-Zenith PT-Valve (Beijing Med-Zenith, Пекин, Китай), Harmony TPV (Medtronic Inc., Миннеаполис, США), Pulsta valve (TaeWoong Medical Co, Кимпхо, Республика Корея). Однако в Российской Федерации данные модификации транскатетерных самораскрывающихся клапанов не зарегистрированы, что ограничивает поток пациентов, которым показана транскатетерная имплантация клапана как альтернатива хирургической коррекции.

Разработанная нами конфигурация каркаса для транскатетерного кондуита не требует предварительного стентирования нативного ВОПЖ или клапаносодержащего кондуита, что в значительной мере сокращает время вмешательства, стоимость операции, а также развитие периоперационных

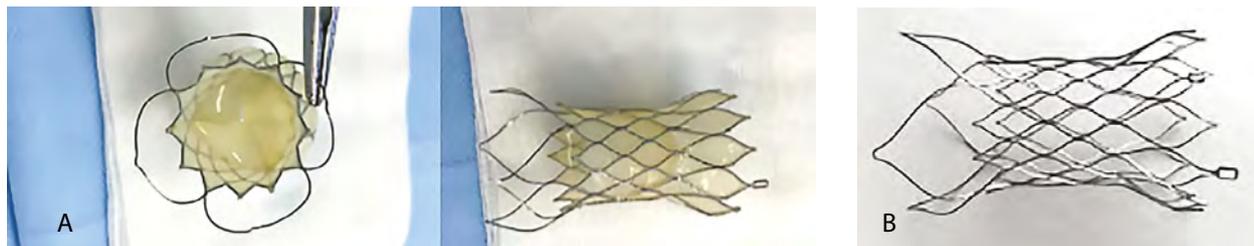


Рис. 1. Протез самораскрывающегося легочного клапана, опорный каркас: с фиксированными створками из свиного перикарда (А); без фиксации створок (В)

и отдаленных осложнений, приводящих к дисфункции клапана.

Цель — разработать модель транскатетерного самораскрывающегося клапана легочной артерии и подготовить ее для доклинических испытаний *in vitro* на изолированном свином сердце и крупных лабораторных животных.

Методы

Коллектив ученых лаборатории биопротезирования центра новых хирургических технологий НМИЦ им. ак. Е.Н. Мешалкина разработал прототип самораскрывающегося нитинолового каркаса транскатетерного легочного биопротеза. Изготовили опытные образцы каркасов методом лазерной резки на установке А-1 (Laser Precicut, Ченнаи, Индия) с электрохимической полировкой из трубы внешнего диаметра 7 мм с толщиной стенки 0,5 мм с контролем температуры фазовых превращений с использованием дифференциального сканирующего калориметра.

Изготовили опорный каркас из тонких никель-титановых трубок. После полировки и термической обработки получили необходимую конструкцию каркаса. Самораскрывающийся каркас имеет сетчатую структуру, образованную радиально замкнутыми рядами ячеек, каждая из которых ограничена ребрами, соединенными перемычками. Каркас

в виде гантелеобразной формы с прямым сегментом в средней части и двумя расширенными краями. Каждый ряд ячеек каркаса содержит 10–12 ячеек (рис. 1). Створчатый аппарат монтировали на каркасе вручную, с использованием хирургической техники, шовного материала и инструментов. Внутреннюю биологическую облицовку корпуса каркаса также выполняли из ксеноперикарда.

Антикальциевую обработку ксеногенного биоматериала проводили с использованием 2–5%-го раствора эпоксидных соединений для стабилизации и дифосфоната (Журавлева И.Ю., Барбараш Л.С., Глушкова Т.В. Способ антикальциевой обработки биологических протезов клапанов сердца. Патент на изобретение RU 2374843 С1, 10.12.2009 г. Заявка № 2008124123/15 от 16.06.2008 г.). Применение дифосфоната в качестве антикальциевого агента придает эпоксиобработанному биоматериалу дополнительную резистентность к обызвествлению, обеспечивает повышение эффективности обработки за счет снижения кальцийсвязывающей активности биологического материала.

Прототип системы доставки представляет собой катетер диаметром 18 Fr, состоящий из ручки управления, катетерной части и загрузочной капсулы. С помощью ручки управления производится контроль степени высвобождения биопротеза из загрузочной капсулы, катетерная часть придает основную длину, необходимую для доступа к месту

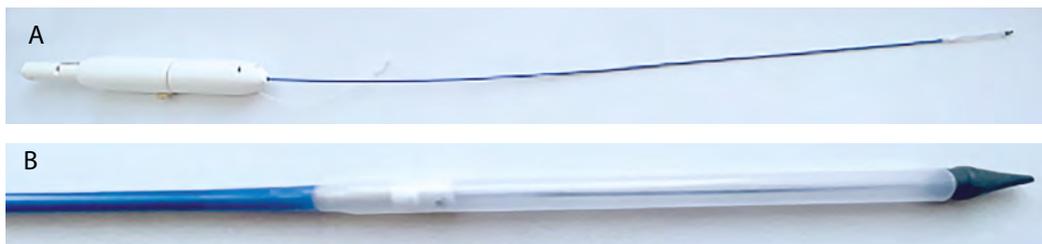
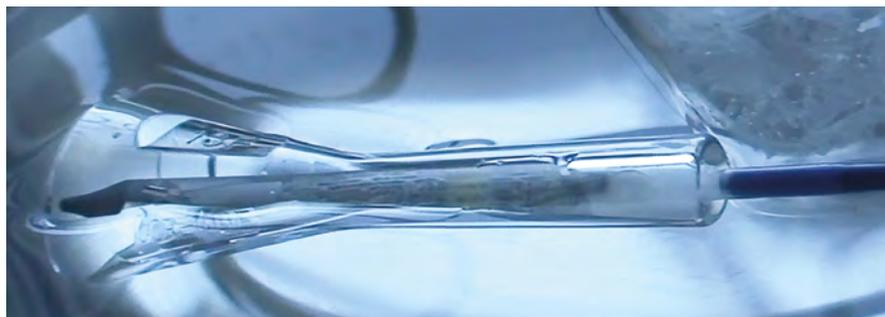


Рис. 2. Транскатетерная система имплантации биопротеза легочного клапана: система доставки (А); загрузочная капсула (В)

Рис. 3. Загрузка клапана в систему доставки



имплантации, загрузочная капсула удерживает и обеспечивает доставку биопротеза. Кроме того, система транскатетерной доставки дает возможность повторно собрать и изменить положение клапана для точной имплантации за счет немедленной обратной связи между ручкой и открытием капсулы (рис. 2).

Производительность загрузки клапана в систему доставки протестировали кримпированием биопротеза с использованием охлажденного физиологического раствора температурой 0–2 °С, который позволил сжать опорный каркас и упаковать в загрузочную капсулу системы доставки (рис. 3). Соответствующее количество воды и льда помещали в ведро со льдом для образования холодной смеси. Принципиально общепринятого объема холодной взвеси нет, однако клапан на момент загрузки в капсулу должен находиться полностью под водой. Весь продукт помещали в ведро со льдом на 10 мин. Образцы опытных каркасов с фиксированным створчатым аппаратом выдерживали в сжатом состоянии в течение 1 ч, затем извлекали биопротез клапана и визуально определяли, не вызвало ли сжатие каркаса повреждение створчатого аппарата.

Результаты

Разрабатываемый клапан — самораскрывающийся каркас из сверхэластичного нитинола со створчатым аппаратом и облицовкой из свиного перикарда. Конструкция клапана предусматривает возможность имплантации как трансюгулярным, так и (преимущественно) трансфеморальным доступом с использованием доставочной системы диаметром 18 Fr. Каркас клапана имеет гантелеобразную форму с прямым сегментом в средней части и двумя расширенными краями, что обеспечит надежную фиксацию в зоне имплантации и предотвратит периоперационные осложнения. В ходе эксперимента по загрузке клапана система доставки позволила вместить в загрузочную капсулу сжатый биопротез

без деформации створок и в дальнейшем осуществить последовательное высвобождение элементов протеза в изолированном свином сердце.

В 2022 г. мы собираемся завершить первые доклинические испытания створчатого аппарата из конского, свиного и бычьего перикардов с целью гистологической оценки степени повреждения волокон створок при компрессии и загрузке в систему доставки и сравнения с контрольным образцом. Планируем имплантировать биопротез на изолированном свином сердце и крупных лабораторных животных с целью анализа фиксации биопротеза в зоне посадки и определения состоятельности имплантируемого клапана в течение 6 и 12 мес. после операции, а также оценим скорость обызвествления за данный период наблюдения.

Обсуждение

Техническая сложность при имплантации транскатетерного легочного кондуита заключается в том, что клапан должен не только устранить дисфункцию клапана легочной артерии, но и не вызывать компрессию коронарных артерий, деформацию корня аорты, разрыв кондуита или нативного ВОПЖ, а также главных ветвей легочной артерии [11]. Следовательно, при создании конструкции опорного каркаса клапана мы учитывали все анатомические особенности ВОПЖ с использованием трехмерной модели по данным мультиспиральной компьютерной томографии. Программное обеспечение для трехмерного проектирования следует использовать с целью анализа имплантации биопротеза и определения, возможно ли избежать осложнений. В этом исследовании мы описываем внешние габаритные характеристики новой отечественной конструкции самораскрывающегося опорного каркаса легочного клапана. По сравнению с существующими транскатетерными легочными клапанами, в данном исследовании гантелеобразная конструкция каркаса позволяет избежать миграции биопротеза,

перфорации ствола или ветвей легочной артерии во время имплантации и деформации корня аорты и других более редких осложнений, что значительно снижает хирургический риск. Другие биопротезы клапанов Edwards SAPIEN и Melody Valve, зарегистрированные в Российской Федерации, имеют прямой опорный каркас и требуют предварительного стентирования нативного ВОПЖ или клапаносодержащего кондуита и могут использоваться лишь в 20 % случаев [12; 13].

Транскатетерная имплантация легочного биопротеза как метод лечения тяжелой легочной регургитации является альтернативой открытой хирургической коррекции из-за низкого риска периоперационных осложнений. Однако необходимы дополнительные исследования, направленные на создание легко имплантируемого и прочного нитинолового каркаса легочного клапана, в доклинических испытаниях которого необходимо оценить взаимодействие транскатетерного биопротеза и системы доставки, а также проконтролировать высвобождение биопротеза из загрузочной капсулы и фиксацию в зоне имплантации.

Заключение

Опытный образец первого отечественного транскатетерного легочного биопротеза на самораскрывающемся нитиноловом каркасе на начальных этапах доклинических испытаний продемонстрировал удовлетворительные характеристики. Для его использования в качестве медицинского изделия необходимы дальнейшие доклинические испытания, в частности гистологическая и гидродинамическая оценка состоятельности створчатого аппарата и имплантация крупным лабораторным животным.

Список литературы / References

1. Соинов И.А., Журавлева И.Ю., Кулябин Ю.Ю., Ни- чай Н.Р., Афанасьев А.В., Алешкевич Н.П., Богачев-Про- кофьев А.В., Караськов А.М. Клапаносодержащие конду- иты в детской кардиохирургии. *Хирургия. Журнал им. Н.И. Пирогова*. 2018;(1):75-81. <https://doi.org/10.17116/hirurgia2018175-81>
2. Soynov I.A., Zhuravleva I.Iu., Kulyabin Yu.Yu., Nichay N.R., Afanas'ev A.V., Aleshkevich N.P., Bogachev-Prokof'ev A.V., Karas'kov A.M. Valved conduits in pediatric cardiac surgery. *Khirurgiya. Zurnal im. N.I. Pirogova = Pirogov Russian Journal of Surgery*. 2018;(1):75-81. (In Russ.) <https://doi.org/10.17116/hirurgia2018175-81>
3. Bonhoeffer P, Boudjemline Y, Saliba Z, Hausse A.O., Aggoun Y, Bonnet D., Sidi D., Kachaner J. Transcatheter implantation of a bovine valve in pulmonary position: a lamb study. *Circulation*. 2000;102(7):813-816. PMID: 10942752. <https://doi.org/10.1161/01.cir.102.7.813>
4. Balzer D. Pulmonary Valve Replacement for Tetralogy of Fallot. *Methodist Debaquey Cardiovasc J*. 2019;15(2):122-132. PMID: 31384375; PMCID: PMC6668735. <https://doi.org/10.14797/mdcj-15-2-122>
5. Plessis J, Hascoët S, Baruteau A, Godart F, Le Gloan L, Warin Fresse K, Tahhan N, Riou J.-Y., Guyomarch B, Petit J, Guérin P. Edwards SAPIEN transcatheter pulmonary valve implantation: results from a French registry. *JACC Cardiovasc Interv*. 2018;11(19):1909-1916. PMID: 30219326. <https://doi.org/10.1016/j.jcin.2018.05.050>
6. Shahanavaz S., Qureshi A.M., Levi D.S., Boudjemline Y, Peng L.F., Martin M.H., Bauser-Heaton H., Keeshan B., Asnes J.D., Jones T.K., Justino H., Aboulhosn J.A., Gray R.G., Nguyen H., Balzer D.T., McElhinney D.B. Transcatheter pulmonary valve replacement with the melody valve in small diameter expandable right ventricular outflow tract conduits. *JACC Cardiovasc Interv*. 2018;11(6):554-564. PMID: 29566801. <https://doi.org/10.1016/j.jcin.2018.01.239>
7. Lindsay I., Aboulhosn J., Salem M., Levi D. Aortic root compression during transcatheter pulmonary valve replacement. *Catheter Cardiovasc Interv*. 2016;88(5):814-821. PMID: 27121036. <https://doi.org/10.1002/ccd.26547>
8. Faccini A., Butera G. Tricuspid regurgitation as a complication of Edwards Sapien XT valve implantation in pulmonary position a problem to deal with. *Catheter Cardiovasc Interv*. 2018;91(5):927-931. PMID: 29405557. <https://doi.org/10.1002/ccd.27527>
9. Hascoët S, Acar P, Boudjemline Y. Transcatheter pulmonary valvulation: current indications and available devices. *Arch Cardiovasc Dis*. 2014;107(11):625-634. PMID: 25444020. <https://doi.org/10.1016/j.acvd.2014.07.048>
10. Virk S.A., Liou K., Chandrakumar D., Gupta S., Cao C. Percutaneous pulmonary valve implantation: A systematic review of clinical outcomes. *Int J Cardiol*. 2015;201:487-489. PMID: 26313872. <https://doi.org/10.1016/j.ijcard.2015.08.119>
11. Nordmeyer J, Ewert P, Gewillig M, AlJufan M, Carminati M, Kretschmar O, Uebing A, Dähnert I, Röhle R, Schneider H, Witsenburg M, Benson L, Gitter R, Bökenkamp R, Mahadevan V, Berger F. Acute and midterm outcomes of the post-approval MELODY Registry: a multicentre registry of transcatheter pulmonary valve implantation. *Eur Heart J*. 2019;40(27):2255-2264. PMID: 31005985. <https://doi.org/10.1093/eurheartj/ehz201>
12. Levi D.S., Sinha S., Salem M.M., Aboulhosn J.A. Transcatheter native pulmonary valve and tricuspid valve replacement with the Sapien XT: Initial experience and development of a new delivery platform. *Catheter Cardiovasc Interv*. 2016;88(3):434-443. PMID: 27142960. <https://doi.org/10.1002/ccd.26398>
13. van Steenberghe M., Schubert T., Gerelli S., Bouzin C., Guiot Y., Xhema D., Bollen X., Abdelhamid K., Gianello P. Porcine pulmonary valve decellularization with NaOH-based vs detergent process: preliminary in vitro and in vivo assessments. *J Cardiothorac Surg*. 2018;13(1):34. PMID: 29695259; PMCID: PMC5918872. <https://doi.org/10.1186/s13019-018-0720-y>

Technical features of a self-expandable prosthetic valve for the treatment of pulmonary valve disease

Kseniya A. Rzaeva¹, Tatyana P. Timchenko¹, Irina Yu. Zhuravleva¹, Alexey N. Arkhipov¹, Artem V. Gorbatykh², Alexey V. Voitov¹, Nataliya R. Nichay¹, Alexander V. Bogachev-Prokophiev¹, Ilya A. Soynov¹

¹ Meshalkin National Medical Research Center, Novosibirsk, Russian Federation

² Almazov National Medical Research Centre, Saint Petersburg, Russian Federation

Corresponding author. Kseniya A. Rzaeva, ksusha.rzaeva@yandex.ru

Abstract

Background. Balloon-expandable prostheses authorized for transcatheter pulmonary valve replacement in the Russian Federation have a barrel-shaped frame, which requires pre-stenting of a native right ventricular outflow tract or a conduit. This increases procedure duration, complicates implantation technique, and increases operation costs.

Aim. To develop a self-expandable pulmonary valve model for transcatheter replacement and prepare it for preclinical trials.

Methods. The model of a self-expandable pulmonary valve bioprosthesis for transcatheter replacement made of nitinol was developed. The leaflets and the lining of the frame were made of porcine pericardium and assembled manually. Radial force testing was performed; valve loading into the delivery system was also tested.

Results. According to the results of the tests, the valve biomaterial and the suture sites were not damaged after compression. In 2022, initial preclinical tests are scheduled to determine viability of the implanted valves at 6 and 12 months after surgery, and the rate of calcification for this observation period is to be assessed as well.

Conclusion. By optimizing the design of the support frame, we improved the transcatheter model of the biological valve with satisfactory results at the initial stage of preclinical trials.

Keywords: Biocompatible Materials; Bioprosthesis; Heart Ventricles; Nitinol; Pulmonary Valve

Received 22 April 2022. Revised 5 May 2022. Accepted 11 May 2022.

Funding: This work is supported by a grant of the Russian Science Foundation (project No. 21-75-10041).

Conflict of interest: Authors declare no conflict of interest.

Contribution of the authors

Conception and study design: K.A. Rzaeva, T.P. Timchenko, A.N. Arkhipov, N.R. Nichay

Data collection and analysis: A.V. Voitov, N.R. Nichay

Drafting the article: K.A. Rzaeva, A.V. Gorbatykh

Critical revision of the article: I.Yu. Zhuravleva, I.A. Soynov, A.V. Bogachev-Prokophiev

Final approval of the version to be published: K.A. Rzaeva, T.P. Timchenko, I.Yu. Zhuravleva, A.N. Arkhipov, A.V. Gorbatykh, A.V. Voitov, N.R. Nichay, A.V. Bogachev-Prokophiev, I.A. Soynov

ORCID ID

K.A. Rzaeva, <https://orcid.org/0000-0001-7254-0733>

T.P. Timchenko, <https://orcid.org/0000-0002-1812-2845>

I.Yu. Zhuravleva, <https://orcid.org/0000-0002-1935-4170>

A.N. Arkhipov, <https://orcid.org/0000-0003-3234-5436>

A.V. Gorbatykh, <https://orcid.org/0000-0003-4017-4198>

A.V. Voitov, <https://orcid.org/0000-0003-3797-4899>

N.R. Nichay, <https://orcid.org/0000-0002-1763-9535>

A.V. Bogachev-Prokophiev, <https://orcid.org/0000-0003-4625-4631>

I.A. Soynov, <https://orcid.org/0000-0003-3691-2848>

Copyright: © 2022 Rzaeva et al.

How to cite: Rzaeva K.A., Timchenko T.P., Zhuravleva I.Yu., Arkhipov A.N., Gorbatykh A.V., Voitov A.V., Nichay N.R., Bogachev-Prokophiev A.V., Soynov I.A. Technical features of a self-expandable prosthetic valve for the treatment of pulmonary valve disease. *Patologiya krovoobrashcheniya i kardiokhirurgiya = Circulation Pathology and Cardiac Surgery*. 2022;26(3):85-90. (In Russ.) <https://dx.doi.org/10.21688/1681-3472-2022-3-85-90>

