



<https://doi.org/10.34883/PI.2023.12.4.034>



Никольский А.В.✉, Трофимов Н.А., Родионов А.Л., Иванов Д.С.

Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова, Чебоксары, Россия

Создание анатомической модели сердца и магистральных сосудов для симуляции операции циркулярной денервации ствола и устьев легочных артерий (PADN)

Конфликт интересов: не заявлен.

Вклад авторов: Никольский А.В. – написание первой версии; Трофимов Н.А. – критический пересмотр статьи на предмет важного интеллектуального содержания; Родионов А.Л. – существенный вклад в концепцию и дизайн исследования, получение данных, их анализ и интерпретацию; Иванов Д.С. – существенный вклад в концепцию и дизайн исследования, получение данных, их анализ и интерпретацию.

Финансирование: исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-75-10075, <https://rscf.ru/project/21-75-10075/>

Подана: 20.08.2023

Принята: 11.12.2023

Контакты: yahtingman@rambler.ru

Резюме

Цель. Создание анатомической модели сердца человека с реалистичной топографией магистральных сосудистых структур для отработки технологии эндоваскулярной и «открытой» хирургической процедуры циркулярной денервации ствола и устьев легочных артерий (pulmonary artery denervation – PADN).

Материалы и методы. 3D-модели сердца могут использоваться для создания пространственного представления о топографии структур сердца и отработки хирургических манипуляций сердечно-сосудистыми хирургами и интервенционными кардиологами. Авторами разработан симулятор сердца и магистральных венозных сосудов человека. Модель создавалась по данным, полученным с помощью компьютерной томографии сердца пациента с гипертрофической кардиомиопатией и легочной гипертензией (ЛГ). С помощью симулятора была смоделирована операция PADN. Топографическое расположение ствола и бифуркации легочной артерии (ЛА), эластичные и прозрачные стенки сосудов позволили осуществить «открытую» процедуру денервации ЛА с применением зажима-аблятора. Эндоваскулярная технология выполнения PADN была отработана на симуляторе сердца в режиме флуороскопического контроля в условиях рентген-операционной. Радиочастотная абляция выполнялась в условиях погружения симулятора сердца в водно-солевой раствор, имитирующий естественную проводимость крови и тканей организма человека, точность и длительность аппликаций радиочастотного воздействия контролировалась навигационным модулем системы Carto и отображалась соответственно на анатомической карте ЛА в режиме реального времени.

Результаты. Создана 3D-модель сердца, позволяющая отрабатывать процедуру PADN как открытым способом, так и эндоваскулярно. В результате обучения хирургической операции PADN на симуляторе время ее выполнения сократилось с $12,2 \pm 2,5$ мин. до $5,5 \pm 1,5$ мин. Благодаря отработке эндоваскулярного метода

на анатомической модели, время выполнения процедуры под контролем флуороскопии сократилось с $37,2 \pm 6,7$ мин. до $18,1 \pm 1,8$ мин. Время выполнения процедуры в условиях навигационного картирования сократилось с $28,3 \pm 2,2$ мин. до $15,5 \pm 3,0$ мин.

Заключение. Предложенная авторами анатомическая модель сердца CorView позволила отработать как хирургический, так и эндоваскулярный способы проведения PADN. Последний выполнялся как под визуальным, так и под флуороскопическим контролем. Исследование показало, что даже однократное выполнение манипуляции на модели сердца приводило к снижению затрачиваемого на выполнение процедуры времени, что в совокупности демонстрирует эффективность данного симулятора для обучения операции PADN.

Ключевые слова: симуляционное обучение, денервация легочных артерий, модель сердца, легочная гипертензия, абляция

Nikolsky A.✉, Trofimov N., Rodionov A., Ivanov D.

Chuvash State University named after I.N. Ulyanov, Cheboksary, Russia

The Development of Anatomic Heart and Major Vessels Model for Operation of Circular Denervation of the Trunk and Mouths Pulmonary Arteries (PADN) Simulation

Conflict of interest: nothing to declare.

Authors' contribution: Nikolsky A. – carried out the writing of the first version; Trofimov N. – has carried out a critical revision of the article for important intellectual content; Rodionov A. – has made a significant contribution to the concept and design of the study, data acquisition, analysis and interpretation; Ivanov D. – has made a significant contribution to the concept and design of the study, data acquisition, analysis and interpretation.

Funding: the study was supported by the Russian Science Foundation grant No. 21-75-10075, <https://rscf.ru/project/21-75-10075/>

Submitted: 20.08.2023

Accepted: 11.12.2023

Contacts: yahtingman@rambler.ru

Abstract

Purpose. To develop an anatomic heart model with realistic major vessels' topography for practicing of endovascular and "open" surgical procedures for circular denervation of the trunk and orifices pulmonary arteries (Pulmonary artery denervation – PADN).

Materials and methods. 3D heart models can be used by cardiac surgeons and interventional cardiologists to create a spatial representation of heart structures' topography and practice surgical manipulations. The authors have developed a human heart and major vessels simulator. The model was created based on data obtained using computed tomography of the heart of a patient with hypertrophic cardiomyopathy and pulmonary hypertension. PADN procedure was performed with the help of the simulator. The topographic location of the trunk and bifurcation of the pulmonary artery, elastic and transparent vessel walls made it possible to carry out an "open" surgical PADN using an ablator clamp. Endovascular PADN was worked out with the help of simulator with the fluoroscopic control in an x-ray operation rooms. Radiofrequency ablation was performed in a water-salt solution simulating the natural conductivity of blood and tissues of the



human body. The accuracy and duration of applications of radiofrequency exposure was controlled by the navigation module of the "Carto" system and displayed accordingly on the anatomical map of the pulmonary artery in real time.

Results. A 3D model of the heart has been created. It allows practicing the PADN procedure both in an open way and endovascular way. As a result of PADN surgical operation training on a simulator, its execution time was reduced from 12.2 ± 2.5 min to 5.5 ± 1.5 min. The time of the endovascular PADN procedure under the control of fluoroscopy was reduced from 37.2 ± 6.7 minutes to 18.1 ± 1.8 minutes due to training with the heart model. The procedure execution time in the conditions of navigation mapping decreased from 28.3 ± 2.2 min. to 15.5 ± 3.0 min.

Conclusion. The anatomical heart model CorView makes it possible to work out both surgical and endovascular methods of PADN. The latter was performed under both visual and fluoroscopic control. The study has shown, that even a single PADN training on a heart model has led to a decrease in the time spent on the procedure, which demonstrates the effectiveness of this simulator for teaching PADN procedure.

Keywords: simulation training, pulmonary arteries denervation, heart model, pulmonary hypertension, ablation

■ ВВЕДЕНИЕ

Симуляционные технологии стали неотъемлемой частью подготовки врачей. Они помогают формировать навыки проведения инвазивных процедур и хирургических вмешательств без угрозы для здоровья пациента. Национальное управление здравоохранения Франции сформировало тезис «в первый раз – никогда на пациенте», что подчеркивает важность использования технологий симуляционного обучения [1]. Тренажеры помогают лучше понять технику, ускорить время и качество выполнения той или иной процедуры во многих медицинских специальностях, в том числе в кардиохирургии [2, 3]. 3D-модели сердца могут использоваться для создания пространственного представления о топографии структур сердца и отработки хирургических манипуляций сердечно-сосудистыми хирургами и интервенционными хирургами [4, 5].

Особенно актуальны тренажеры для создания и внедрения технологии выполнения новых хирургических операций [6]. Таковой является операция циркулярной денервации ствола и устьев легочных артерий (pulmonary artery denervation – PADN).

Данная операция является перспективным методом лечения легочной гипертензии. Легочная гипертензия (ЛГ) – гемодинамическое и патофизиологическое состояние, которое характеризуется повышением среднего давления в легочной артерии >20 мм ст. ст. в покое, измеренного при чрезвенозной катетеризации сердца [7]. Заболевание встречается примерно у 1% населения планеты и у более чем половины пациентов с хронической сердечной недостаточностью [8]. Наиболее частой причиной развития ЛГ являются заболевания левых отделов сердца, патология легких – вторая по частоте причина развития ЛГ [9]. Однако, несмотря на различную этиологию данного состояния, в патогенезе ЛГ имеет место активация симпатического отдела вегетативной нервной системы с последующим сужением сосудов легких [10].

Консервативное лечение данной патологии является дорогостоящим и не всегда эффективным, что показывает необходимость рассмотрения новых подходов в лечении ЛГ [11].

В 2013 году Chen S.L. с соавторами предложили операцию PADN с целью лечения ЛГ [12, 13]. Авторы сообщили о снижении среднего давления в легочной артерии с 55 ± 5 мм рт. ст. до 36 ± 5 мм рт. ст. и улучшении показателей теста с 6-минутной ходьбой, значительно большем, чем при консервативной терапии. Эффект PADN достигался путем симпатической денервации легочного ствола и легочных артерий за счет демиелинизации нервных волокон симпатического отдела вегетативной нервной системы, что приводило к расслаблению гладкомышечных волокон в стенке сосудов малого круга кровообращения, и, как следствие, к снижению давления в последнем [14].

Хирургический способ коррекции легочной гипертензии – PADN – осуществляется в условиях искусственного кровообращения и заключается в радиочастотной абляции передней стенки ствола и устьев легочных артерий с применением монополярного электрода-зажима [15]. По данным литературы, среднее время, необходимое для выполнения процедуры циркулярной денервации ЛА, составляет $7,5 \pm 3,7$ минуты. Время искусственного кровообращения при проведении процедуры PADN удлинится в среднем на 10–15 минут [10]. Возможен также эндоваскулярный подход к PADN: радиочастотная денервация симпатических ганглиев в стволе и устьях легочных артерий выполняется под контролем флуороскопии или нефлуороскопического навигационного картирования [16]. Время выполнения эндоваскулярной циркулярной денервации ЛА составляет 25–30 минут [11].

Несмотря на представленные данные, в настоящее время отсутствует общепринятая технология хирургического лечения пациентов с высокой легочной гипертензией. Использование симуляторов для отработки технологии операции PADN позволит внедрить методику в клиническую практику, сократит процент возможных осложнений и время выполнения манипуляции [17].

■ ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Создание анатомической модели сердца человека с реалистичной топографией магистральных сосудистых структур для отработки технологии эндоваскулярной и «открытой» хирургической процедуры PADN.

■ МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Авторами разработан симулятор сердца и магистральных венозных сосудов человека для отработки навыков кардиохирургических вмешательств. Модель создавалась по данным, полученным с помощью компьютерной томографии сердца пациента с гипертрофической кардиомиопатией и ЛГ.

Перед авторами стояла задача выбрать оптимальный вид полимера для изготовления симуляционной модели сердца: мягкий, эластичный, обладающий рентгеноконтрастными свойствами, близкими к нативным тканям. Важным требованием к материалу была прозрачность – для визуального контроля за выполнением манипуляций и перемещением инструмента в полостях сердца. Вышеперечисленным требованиям соответствовал полиуретановый полимер с добавлением рентгеноконтрастных присадок. Первым этапом было проведено 3D-компьютерное

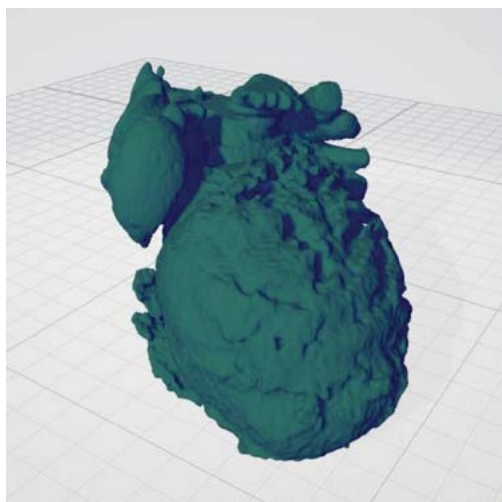


Рис. 1. Компьютерное моделирование фантома сердца по данным МСКТ сердца пациента с контрастированием

Fig. 1. Computer modelling of the heart simulator based on CT scan with contrast of the patient's heart

моделирование фантома сердца по данным мультиспиральной компьютерной томографии (МСКТ) сердца с контрастированием (рис. 1). Вторым этапом была создана пространственная модель магистральных вен, впадающих в сердце, выполнены смотровые отверстия в камерах сердца, иссечены клапаны сердца и реализованы технические решения для возможности многоразового использования модели (рис. 2). Третий этап включал создание прототипа симулятора анатомической модели сердца человека с использованием технологий 3D-фотополимерной печати. На четвертом этапе выполнялись вакуумное литье модели из полиуретанового полимера с рентгеноконтрастными присадками и финишная сборка фантома сердца и магистральных вен (рис. 3).

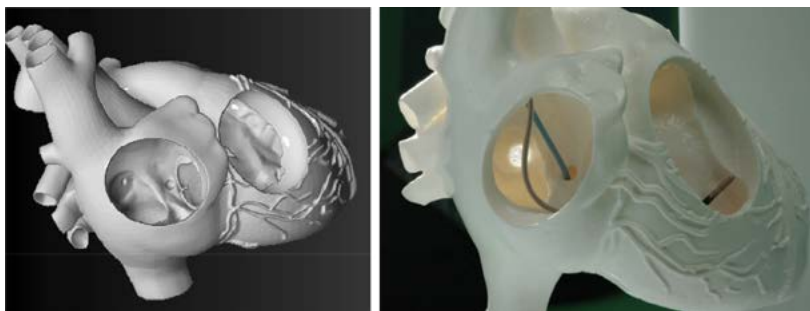


Рис. 2. Пространственная модель магистральных вен, впадающих в сердце; смотровые отверстия в камерах сердца

Fig. 2. Spatial model of main veins entering the heart; inspection holes in heart chambers



Рис. 3. Симулятор сердца и магистральных венозных сосудов человека
Fig. 3. Human heart and main veins simulator

Анатомическая модель сердца отражала пространственное взаимное расположение структур сердца человека, имела проходимый коронарный синус, проходимые устья коронарных артерий, позволяла осуществлять пункцию межпредсердной перегородки в области овальной ямки. Симулятор позволил отрабатывать навыки проведения и позиционирования имплантируемых электродов электрокардиостимуляторов, кардиовертеров-дефибрилляторов и ресинхронизирующих аппаратов, а также диагностических и абляционных катетеров. Наличие смотрового отверстия из прозрачного материала в каждой камере сердца обеспечило визуальный контроль за проводимыми эндокардиально манипуляциями.

Модель обладала флуороскопическими свойствами, сходными с тканями сердца человека, что в сочетании с использованием стандартных инструментов и расходных материалов позволяло создать условия обучения, максимально приближенные к работе с реальным пациентом в условиях рентген-операционной (рис. 4).

С помощью представленного симулятора была смоделирована операция PADN. Топографическое расположение ствола и бифуркации легочной артерии, эластичные и прозрачные стенки сосудов позволили осуществить «открытую» процедуру



Рис. 4. Модель обладает флуороскопическими свойствами, сходными с тканями сердца человека
Fig. 4. Model has fluoroscopic characteristics similar to human heart tissues

денервации ЛА с применением зажима-аблятора. Проводилось циркулярное механическое пережатие легочного ствола и устьев ЛА с последующей имитацией радиочастотного воздействия на стенки сосуда (рис. 5). Выполнялось по две линии абляционного воздействия на легочный ствол и по две линии воздействия на каждое устье ЛА, с формированием 6 линий абляции (рис. 6).

Эндоваскулярная технология выполнения PADN была отработана на симуляторе сердца в режиме флуороскопического контроля в условиях рентген-операционной доступом через бедренную вену с применением орошаемого абляционного катетера NaviStar (производство США, Biosense & Webster) и неорошаемого катетера – Mariner (производство США, Medtronic) под контролем диагностического катетера Lasso (производство США, Biosense & Webster). Также на симуляционной модели был

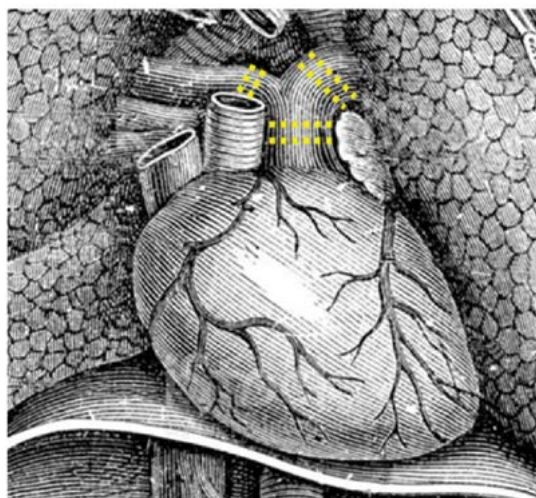


Рис. 5. Схема циркулярной денервации легочных артерий
Fig. 5. The scheme of pulmonary arteries circular denervation



Рис. 6. «Открытая» процедура денервации ЛА с применением зажима-аблятора
Fig. 6. "Open" procedure of pulmonary arteries denervation using an ablator clamp

отработан второй вариант выполнения эндоваскулярной технологии PADN с применением нефлуороскопического навигационного картирования на основе магнитной системы Carto (производство США, Biosense & Webster) с построением анатомической модели зоны абляции легочного ствола и бифуркации ЛА. Радиочастотная абляция выполнялась в условиях погружения симулятора сердца в водно-солевой раствор, имитирующий естественную проводимость крови и тканей организма человека, точность и длительность аппликаций радиочастотного воздействия контролировалась навигационным модулем системы Carto и отображалась соответственно на анатомической карте ЛА в режиме реального времени (рис. 7).

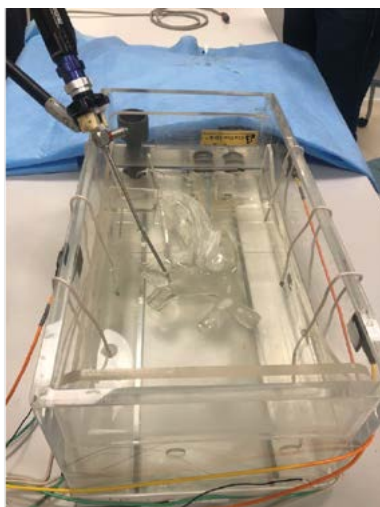


Рис. 7. Эндоваскулярная процедура денервации ЛА на симуляционной модели
Fig. 7. Endovascular PADN procedure using simulation model



Статистический анализ результатов проводился на персональном компьютере с использованием программ Excel, Statistica 10.0. Данные, полученные в ходе исследования, представлены среднеарифметическими значениями и стандартной ошибкой ($M \pm SE$). При межгрупповом анализе статистическую достоверность количественных параметров определяли при помощи критерия Манна – Уитни. Для сравнения абсолютных значений между двумя группами использовали критерий χ^2 . При анализе выборки с $n < 5$ расчет велся с использованием двустороннего критерия Фишера.

■ РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Анатомическая модель сердца позволила осуществить симуляцию технологии хирургического выполнения PADN. Модель позволила выбрать оптимальные углы наложения зажима аблятора на легочный ствол и устья ЛА, которые сводили к минимуму риск травматизации прилежащих сосудов и структур сердца. Во время симуляции была отработана оптимальная последовательность наложения линий абляции.

Обучение на симуляторе сердца и магистральных сосудов прошли 2 группы врачей-ординаторов – сердечно-сосудистых хирургов: 8 и 12 специалистов соответственно. Для каждой группы врачей были проведены занятия, посвященные методикам выполнения PADN: открытая хирургическая денервация и эндоваскулярная радиочастотная денервация ЛА. В процессе обучения проводилась отработка практических навыков на симуляторе, включавшая по три подхода к выполнению каждой из двух методик процедуры PADN. Первая манипуляция в каждой из двух серий выполнялась под контролем преподавателя. По завершении обучения проводилось итоговое – контрольное – выполнение процедуры. В качестве целевого времени выполнения PADN были взяты интраоперационные показатели по данным литературы.

В результате обучения выполнению технологии хирургической операции PADN на симуляторе время выполнения процедуры сократилось с $12,2 \pm 2,5$ мин. при первом подходе курсантов под руководством ментора до $5,5 \pm 1,5$ мин. при итоговом зачетном выполнении операции самостоятельно. В качестве целевого времени выполнения PADN был взят интраоперационный показатель по данным литературы: $7,5 \pm 3,7$ минуты [10].

Анатомическая модель также позволила осуществить симуляцию технологии эндоваскулярной методики PADN: как в условиях флуороскопического контроля, так и в условиях навигационного магнитного картирования с построением анатомической карты зоны абляции легочного ствола и ЛА. Модель позволила выбрать оптимальные по радиусу загиба, жесткости и управляемости абляционные катетеры для выполнения денервации: Mariner MC, Navistar. Эластичные стенки сосудов симулятора обеспечили обратную связь, имитацию тактильных ощущений при работе абляционным катетером в зоне легочного ствола и устьев ЛА. В ходе симуляционного обучения курсанты совершенствовали навык мануального микропозиционирования абляционного катетера «point by point» в зоне воздействия на ЛА и легочный ствол под контролем абляционного модуля навигационной системы картирования Carto.

Благодаря отработке технологии эндоваскулярной операции PADN на анатомической модели, время выполнения процедуры сократилось с $37,2 \pm 6,7$ мин. при первом

подходе курсантов к протоколу абляции под руководством ментора до $20,1 \pm 3,8$ мин. по итогам выполнения абляции ЛА на зачетном занятии. Полученные результаты соотносились с литературными данными по интраоперационным временным показателям: 25–30 минут [11].

Современные технологии медицинской визуализации: МРТ и МСКТ позволяют воссоздать персонифицированные 3D-модели сердца с любыми вариантами структурных патологий для последующей реконструкции и изготовления симуляционных моделей [6]. Материал для изготовления симуляционных анатомических моделей сердца должен удовлетворять ряду требований: быть прозрачным – обеспечивать визуальный контроль за проводимой операцией, быть рентгеноконтрастным для возможности флуороскопического контроля, не создавать магнитных возмущений при навигационном картировании.

По итогам обучения двух групп врачей-ординаторов – сердечно-сосудистых хирургов хирургической и эндоваскулярной методикам выполнения PADN на зачетных занятиях был получен удовлетворительный показатель времени выполнения операций, сопоставимый с данными реальной клинической практики, описанными в литературе.

■ ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование симуляционных технологий для освоения новых навыков сердечно-сосудистой хирургии позволяет сократить время обучения и оптимизировать время, затрачиваемое на выполнение операции.

Предложенная авторами анатомическая модель сердца позволила отработать как хирургический, так и эндоваскулярный способы проведения PADN. Последний выполнялся как под визуальным, так и под флуороскопическим контролем.

Исследование показало, что даже трехкратное выполнение манипуляции на модели сердца приводило к достоверному снижению затрачиваемого на выполнение процедуры времени, что в совокупности демонстрировало эффективность представленного симулятора для обучения операции PADN.

Применение симуляционной методики обучения для выполнения процедуры PADN выглядит перспективной учебной тактикой, с возможностью включения в симуляционный курс всего спектра катетерных аритмологических процедур и малоинвазивных хирургических вмешательств на сердце.

■ ЛИТЕРАТУРА/REFERENCES

1. Bresler L., Perez M., Hubert J., Henry J.P., Perrenot C. Residency training in robotic surgery: The role of simulation. *J Visc Surg.* 2020;157(3 Suppl 2):123–129. doi: 10.1016/j.jvisurg.
2. Ribeiro I.B., Ngu J.M.C., Lam B.K., Edwards R.A. Simulation-Based Skill Training for Trainees in Cardiac Surgery: A Systematic Review. *Ann Thorac Surg.* 2018;105(3):972–982. doi: 10.1016/j.athoracsur.2017.11.036.
3. Nikolsky A., Nemirova S., Trofimov N., Zakharov V. Simulation training in interventional cardiology using an anatomical model of the heart and main vessels "CorView". *Virtual Technologies in Medicine.* 2021;1:45–48. Available at: https://doi.org/10.46594/2687-0037_2021_1_1290 (in Russian)
4. Bagai A., O'Brien S., Al Lawati H., Goyal P., Ball W., Grantcharov T., Fam N. Mentored simulation training improves procedural skills in cardiac catheterization: a randomized, controlled pilot study. *Circ Cardiovasc Interv.* 2012;5(5):672–9. doi: 10.1161/CIRCINTERVENTIONS.112.970772.
5. Petrov V., Lebedev S., Pirova A., Nilolskiy A., et al. Cardiomodel – new software for cardiac electrophysiology simulation. In: Voevodin V., Sobolev S. (eds). *Supercomputing. RuSCDays. Communications in Computer and Information Science.* Springer, Cham: 2018;965:195–207. doi: 10.1007/978-3-030-05807-4_17
6. Vukicevic M., Mosadegh B., Min J.K., Little S.H. Cardiac 3D Printing and its Future Directions. *JACC Cardiovasc Imaging.* 2017;10(2):171–184. doi: 10.1016/j.jcmg.2016.12.001.



7. Humbert M., Kovacs G., Hoeper M.M., Badagliacca R., Berger R.M.F., Brida M., Carlsen J., Coats A.J.S., Escribano-Subias P., Ferrari P., Ferreira D.S., Ghofrani H.A., Giannakoulas G., Kiely D.G., Mayer E., Meszaros G., Nagavci B., Olsson K.M., Pepke-Zaba J., Quint J.K., Rådegran G., Simonneau G., Sitbon O., Tonia T., Toshner M., Vachieri J.L., Vonk Noordegraaf A., Delcroix M., Rosenkranz S.; ESC/ERS Scientific Document Group. 2022 ESC/ERS Guidelines for the diagnosis and treatment of pulmonary hypertension. *Eur Respir J.* 2023;61(1):2200879. doi: 10.1183/13993003.00879-2022.
8. Mandras S.A., Mehta H.S., Vaidya A. Pulmonary Hypertension: A Brief Guide for Clinicians. *Mayo Clin Proc.* 2020;95(9):1978–1988. doi: 10.1016/j.mayocp.2020.04.039.
9. Oliveira A.C., Richards E.M., Raizada M.K. Pulmonary hypertension: Pathophysiology beyond the lung. *Pharmacol Res.* 2020;151:104518. doi: 10.1016/j.phrs.2019.104518.
10. Trofimov N., Medvedev A., Babokin V., Nikolsky A., Efimova I., Plechev V., Plecheva D., Babokina S., Kashin V., Zhamlikhanov N., Egorov D. Effectiveness of the Cox Maze-IV Procedure in Cardiac Surgery Patients With Atrial Fibrillation. *Kardiologija.* 2020;60(5):991. doi: 10.18087/cardio.2020.5.n991. (in Russian)
11. Kosonogov A., Nikolskiy A., Kosonogov K., Mayorova M., Katsubo E., Pozdyshev V., et al. The first experience of performing endovascular denervation of the pulmonary trunk in a patient with high pulmonary hypertension. *Medical Almanac.* 2017;3(48):41–43. (in Russian)
12. Zhang Y.J., Li M.H., Chen S.L. Pulmonary arterial hypertension: pharmacologic therapies and potential pulmonary artery denervation treatment. *EuroIntervention.* 2013;9 Suppl R:149–54. doi: 10.4244/EIJV9SRA25.
13. Chen S.L., Zhang Y.J., Zhou L., Xie D.J., Zhang F.F., Jia H.B., Wong S.S., Kwan T.W. Percutaneous pulmonary artery denervation completely abolishes experimental pulmonary arterial hypertension in vivo. *EuroIntervention.* 2013;9(2):269–76. doi: 10.4244/EIJV9I2A43.
14. Xie Y., Liu N., Xiao Z., Yang F., Zeng Y., Yang Z., Xia Y., Chen Z., Xiao Y. The progress of pulmonary artery denervation. *Cardiol J.* 2022;29(3):381–387. doi: 10.5603/CJ.a2020.0186.
15. Zhang H., Yu W., Zhang J., Xie D., Gu Y., Ye P., Chen S.L. Pulmonary artery denervation improves hemodynamics and cardiac function in pulmonary hypertension secondary to heart failure. *Pulm Circ.* 2019;9(2):2045894018816297. doi: 10.1177/2045894018816297.
16. Zhang H., Zhang J., Chen M., Xie D.J., Kan J., Yu W., Li X.B., Xu T., Gu Y., Dong J., Gu H., Han Y., Chen S.L. Pulmonary Artery Denervation Significantly Increases 6-Min Walk Distance for Patients With Combined Pre- and Post-Capillary Pulmonary Hypertension Associated With Left Heart Failure: The PADN-5 Study. *JACC Cardiovasc Interv.* 2019;12(3):274–284. doi: 10.1016/j.jcin.2018.09.021.
17. Rothman A.M.K., Vachieri J.L., Howard L.S., Mikhail G.W., Lang I.M., Jonas M., Kiely D.G., Shav D., Shabtay O., Avriel A., Lewis G.D., Rosenzweig E.B., Kirtane A.J., Kim N.H., Mahmud E., McLaughlain V.V., Chetcuti S., Leon M.B., Ben-Yehuda O., Rubin L.J. Intravascular Ultrasound Pulmonary Artery Denervation to Treat Pulmonary Arterial Hypertension (TROPHY1): Multicenter, Early Feasibility Study. *JACC Cardiovasc Interv.* 2020;13(8):989–999. doi: 10.1016/j.jcin.2019.12.027.