

DOI: <https://doi.org/10.51922/2616-633X.2025.9.1.2447>

ВИРТУАЛЬНОЕ СТЕНТИРОВАНИЕ КАК СПОСОБ ОПТИМИЗАЦИИ СТЕНТИРОВАНИЯ ВЫХОДНОГО ОТДЕЛА ПРАВОГО ЖЕЛУДОЧКА ПЕРЕД ПРОВЕДЕНИЕМ РАДИКАЛЬНОЙ КОРРЕКЦИИ ТЕТРАДЫ ФАЛЛО У ДЕТЕЙ

П. Ф. Черноглаз, П. К. Мараховская, Ю. И. Линник, К. В. Дроздовский

ГУ «РНПЦ детской хирургии», г. Минск, Беларусь
chernoglaz@gmail.com

УДК 616.12-089-7:612.42

Ключевые слова: тетрада Фалло, стентирование ВОПЖ, виртуальное стентирование, компьютерная томография.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ. П. Ф. Черноглаз, П. К. Мараховская, Ю. И. Линник, К. В. Дроздовский. Виртуальное стентирование как способ оптимизации стентирования выходного отдела правого желудочка перед проведением радикальной коррекции тетрады фалло у детей. *Неотложная кардиология и кардиоваскулярные риски*, 2025, Т. 9, № 1, С. 2447–2453.

Цель. Оценить эффективность стентирования выносящего отдела правого желудочка (ВОПЖ) с использованием технологии виртуального стентирования (ВС) для оптимизации результатов у детей с тетрадой Фалло и тетрадоподобными врожденными пороками сердца (ВПС).

Материалы и методы. Проведен анализ 22 случаев стентирования ВОПЖ у пациентов в возрасте 2,36 [0,73–3,07] месяца (2018–2024 гг.). В 8 случаях планирование стентирования выполнялось на основе КТ-ангиографии с применением технологии виртуального стентирования.

Результаты. Процедурный успех составил 95%. Сатурация кислорода увеличилась с 80 [71–88]% до 95 [92–98]% ($p < 0,001$), градиент систолического давления (ГСД) снизился с 70 [41–80] до 30 [21–39] мм рт. ст. Применение ВС повысило точность позиционирования стента до 95% (против 78% без ВС) и сократило число реинтервенций (1 случай против 4).

Заключение. Стентирование ВОПЖ с использованием технологии виртуального моделирования демонстрирует высокую клиническую эффективность, обеспечивая значительное улучшение показателей оксигенации и гемодинамики, а также снижая частоту повторных интервенционных процедур.

VIRTUAL STENTING AS A METHOD FOR OPTIMIZING RIGHT VENTRICULAR OUTFLOW TRACT STENTING PRIOR TO RADICAL CORRECTION OF TETRALOGY OF FALLOT IN CHILDREN

P. Charnahla, P. Marakhovskaya, Yu. Linnik, K. Drozdovski

Republican Scientific and Practical Center for Pediatric Surgery, Minsk, Belarus

Key words: tetralogy of Fallot, RVOT stenting, virtual stenting, computed tomography angiography.

FOR REFERENCES. P. Charnahla, P. Marakhovskaya, Yu. Linnik, K. Drozdovski. Virtual stenting as a method for optimizing right ventricular outflow tract stenting prior to radical correction of tetralogy of fallot in children. *Neotlozhnaya kardiologiya i kardiovaskulyarnye riski* [Emergency cardiology and cardiovascular risks], 2025, vol. 9, no. 1, pp. 2447–2453.

Objective. To evaluate the efficacy of right ventricular outflow tract (RVOT) stenting using virtual stenting (VS) technology in children with tetralogy of Fallot and Fallot-type congenital heart defects (CHD).

Materials and methods. We analyzed 22 cases of RVOT stenting in patients aged 2.36 [0.73–3.07] months (2018–2024). In 8 cases, stenting planning was performed using CT angiography and VS technology.

Results. The procedural success rate was 95%. Oxygen saturation increased from 80 [71–88]% to 95 [92–98]% ($p < 0.001$), and the

systolic pressure gradient (SPG) decreased from 70 [41–80] mmHg to 30 [21–39] mmHg. VS implementation improved stent positioning accuracy to 95% (vs 78% without VS) and reduced reinterventions (1 vs 4 cases).

Conclusion. RVOT stenting using virtual modeling technology demonstrates high clinical efficacy, significantly improving oxygenation and hemodynamic parameters while reducing the need for repeat interventions.

Введение

Тетрада Фалло (ТФ) представляет собой врождённый порок сердца с дуктус-зависимым лёгочным кровотоком, характеризующийся выраженной лёгочной гипоперфузией при закрытии открытого артериального протока (ОАП), что обуславливает высокие показатели заболеваемости и смертности в неонатальном периоде [1, 2]. Хотя первичная радикальная хирургическая коррекция остаётся методом выбора у большинства пациентов, обеспечивая значительное улучшение оксигенации крови и способствуя нормальному развитию выводного отдела правого желудочка (ВОПЖ), ствола и ветвей лёгочной артерии, у определённой категории больных проведение такого вмешательства сопряжено с существенными рисками. В группу высокого операционного риска входят недоношенные новорождённые, пациенты с низкой массой тела при рождении, сложными анатомическими вариантами порока, гипоплазией лёгочной артерии и её ветвей, а также наличием сопутствующих инфекционных процессов или экстракардиальной патологии, у которых радикальная коррекция характеризуется повышенной вероятностью периоперационной летальности и развития осложнений. [3]. Несмотря на значительный прогресс в хирургии врождённых пороков сердца, паллиативные вмешательства сохраняют свою актуальность при коррекции тетрады Фалло (ТФ). Наложение модифицированного шунта Блэока-Тауссига (МБТШ) остаётся наиболее распространённым методом паллиативной помощи, однако данная процедура характеризуется значительным риском летальности, составляющим 7,2% [4]. Согласно данным Общества торакальных хирургов, 30-дневная летальность после наложения МБТШ сохраняется на высоком уровне (до 7%) даже с учётом современных достижений кардиохирургии. Основными причинами столь высоких показателей являются феномен коронарного обкрадывания и связанный с ним риск внезапной сердечной смерти [5]. Наиболее перспективной альтернативой хирургическому этапу паллиативной коррекции тетрады Фалло (ТФ) в настоящее время является стентирование ВОПЖ. Проведенные к настоящему времени исследования показали, что важным преимуществом стентирования ВОПЖ является значительное сокращение продолжительности паллиативного этапа лечения (в среднем на 23 дня, $p < 0,01$) [6–8]. Полученные данные свидетельствовали о том, что стентирование ВОПЖ может рассматриваться как эффективная альтернатива МБТШ, особенно у пациентов с высоким операционным риском [9–14].

Однако, несмотря на высокую эффективность, стентирование ВОПЖ сопряжено с риском осложнений (до 26%), частота которых

варьирует в зависимости от анатомических особенностей, возраста пациентов и технического оснащения. Крупные осложнения включают миграцию стента (до 5%), легочное кровоотечение, транзиторные аритмии и, в редких случаях, летальные исходы, не всегда связанные с процедурой. Частота повторных вмешательств при стентировании ВОПЖ варьирует от 21% до 60% и зависит от соматического роста пациента, характеристик стента и анатомических особенностей ВОПЖ. Основными причинами реинтервенций являются рестеноз внутри стента, неполное покрытие мышечной части ВОПЖ, нарастающая гипертрофия мышечной части ВОПЖ и необходимость увеличения зоны стентирования в связи с ростом пациента для увеличения легочного кровотока [15–17]. Всё вышеуказанное определяет актуальность проблемы детской кардиохирургии сложных врожденных пороков и явилось мотивацией проведенного исследования.

Цель исследования

Оценить эффективность стентирования ВОПЖ с использованием технологии ВС для оптимизации результатов у детей с тетрадой Фалло и тетрадоподобными ВПС.

Материалы и методы

Объект настоящего исследования – пациенты детского возраста с установленным диагнозом тетрады Фалло, двойного отхождения магистральных сосудов от правого желудочка на фоне комбинированного стеноза легочной артерии, транспозиция магистральных сосудов с подклапанно-клапанным стенозом легочной артерии, которым выполнялось стентирование ВОПЖ в качестве паллиативного этапа перед радикальной коррекцией в РНПЦ детской хирургии в период с 2018 по 2024 гг. 14 пациентам стентирование ВОПЖ выполнялось по описанной ранее методике [18], при этом выбор диаметра стента определялся исходя из диаметра наиболее узкого места ВОПЖ (либо клапанного кольца легочной артерии в случае его стентирования) в фазу диастолы, диаметр стента превышал его на 1–2 мм. Длина стента определялась протяженностью зоны стенозирования ВОПЖ, а при наличии выраженного надклапанного стеноза легочной артерии последний также учитывался. Восемью пациентам на этапе планирования вмешательства выполнялась мультиспиральная двухтрубчатая КТ-ангиография.

КТ-ангиография проводилась для оценки четырех зон: проксимальной, средней и дистального отдела стенозированного ВОПЖ, а также надклапанного отдела легочного ствола. Для каждого сегмента измерялись мак-

симальный и минимальный диаметры, площадь поперечного сечения в криволинейной проекции, а также эффективный диаметр в систолу и диастолу. Дополнительно определялись протяженность зоны стеноза, расстояние от начала стеноза до бифуркации легочного ствола, а также расстояния от ТК до зоны стеноза и бифуркации в обе фазы сердечного цикла. На основе сегментации контрастированных полостей сердца создавались объемные модели, учитывающие трабекулярность правого желудочка и анатомию легочных артерий. Учитывая смешанное контрастирование из-за дефекта межжелудочковой перегородки, выполнялась одномоментная сегментация всех камер с ручным выделением правых отделов. Систолические и диастолические полые модели отображали анатомически корректные размеры внутреннего просвета, индивидуальные для каждого пациента (рис. 1).

Обращает на себя внимание гипертрофия правого желудочка (ПЖ, трабекула у выходного отдела отмечена стрелкой), с выраженной систолической обструкцией (*) просвета выходного отдела правого желудочка (ВОПЖ). ЛС – легочный ствол, ЛП – левое предсердие, ПП – правое предсердие, ЛЖ – левый желудочек, АО – аорта. В. Полые модели того же пациента, включающие правый желудочек, выходной отдел, легочный ствол, правую и левую лёгочные артерии.

Виртуальная имплантация проводилась с использованием программ 3D slicer (<https://www.slicer.org/>), Autodesk Meshmixer (RRID: SCR_015736). Основные этапы включали:

1. **Предоперационное планирование:** подбор стента на основе систолических и диастолических измерений, моделирование сценариев имплантации с учетом динамики сердечного цикла.

2. **Оптимизация параметров стента:** виртуальная имплантация стентов различной длины (12, 18, 26 мм) и диаметра (например, 5 мм для надклапанной зоны), оценка покрытия стенозированного участка и прогнозирование технических сложностей (рис. 2).

На основании измерения надклапанного отдела лёгочного ствола подобран диаметр стента лёгочной артерии 5 мм. В систолическую (А) и диастолическую (В) полые модели виртуально позиционирован стент 5×26 мм, покрывающий выходной отдел правого желудочка, клапан легочной артерии и надклапанную зону.

Для оценки влияния КТ-ангиографии на выбор длины стента использовалось отношение шансов (OR). Отрицательным исходом считались случаи повторного стентирования из-за недостаточного покрытия ВОПЖ или резидуального стеноза. Корреляционная карта связывала фактический диаметр стента с КТ-измерениями, а множественная линейная регрессия определяла ключевые

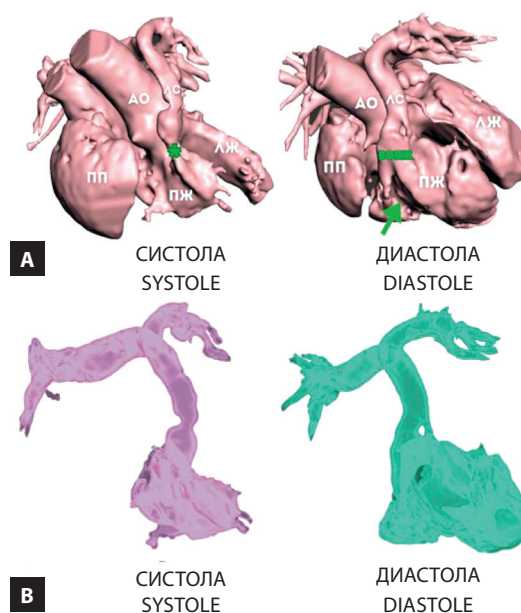


Рисунок 1.
А. Анатомические модели полостей сердца 4-месячного пациента с тетрадой Фалло

Figure 1.
Cardiac chamber models in a 4-month-old infant with Tetralogy of Fallot

параметры. Тест Краскела-Уоллиса и тест Данна-Бонферрони применялись для сравнения протяженностей зон имплантации и длин стентов. Уровень значимости принимался как $p < 0,05$.

Измерения надклапанного отдела легочной артерии	Dmax сист	Dmin сист	Deff сист	Dmax сист	Dmin сист	Deff сист
мм	6,5	4	5,2	5,5	4	4,8

Size X	5 mm
Size Y	26 mm

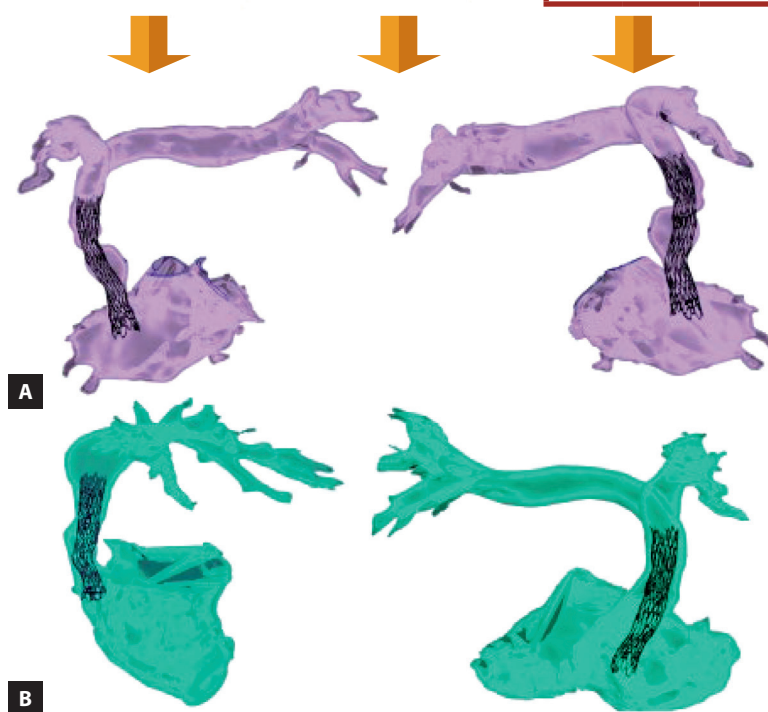


Рисунок 2. Виртуальная имплантация стента в позицию выходного отдела правого желудочка – лёгочный ствол

Figure 2. Virtual stent implantation in the position Right Ventricular Outflow Tract (RVOT)-pulmonary trunk

Таблица 1.
Демографические
и клинические
характеристики
пациентов

Table 1.
Patient demographic
and clinical
characteristics

Показатель Parameter	Стентирование ВОПЖ (n = 22) RVOT stenting
Возраст, мес Age, months	2,36 [0,73÷3,07]
Вес, кг Weight, kg	3,90 [2,88÷5,40]
Пол Sex	
Мужской, n (%) Male	9 (41)
Женский, n (%) Female	13 (59)
Диагноз Diagnosis	
ТФ, n (%) TF	16 (73)
ДОМС от ПЖ стенозом ВОПЖ, n (%) DORV with RVOT stenosis	4 (18)
ТМС со стенозом ВОПЖ, n (%) TGA with RVOT stenosis	1 (4,5)
SpO₂, %	80,0 [71,5÷88,0]
Маск. ГСД в ВОПЖ, (мм рт.ст.) Max. SPG in RVOT (mm Hg)	70,0 [41,0÷80,0]

Примечание: значения величин указаны в формате «медиана [верхний квартиль ± нижний квартиль]», ДОМС от ПЖ стенозом ВОПЖ – двойное отхождение магистральных сосудов от правого желудочка со стенозом ВОПЖ, ТМС со стенозом ВОПЖ – транспозиция магистральных сосудов со стенозом ВОПЖ, SpO₂ – сатурация кислорода. ГСД – градиент систолического давления.

Note: the values of the values are indicated in the format “median [upper quartile ± lower quartile]”, DORV with RVOT stenosis – double outlet right ventricle with RV stenosis, TGA with RVOT stenosis – transposition of the great arteries with RVOT stenosis, SpO₂ – oxygen saturation. SPG – the systolic pressure gradient.

Результаты и обсуждение

В период 2018–2024 годы процедура стентирования ВОПЖ была выполнена 22 пациентам. Медиана возраста составила 2,36 [0,73÷3,07] месяца, медиана веса 2,9 [2,5–3,5] кг. 13 пациентов (59%) – женского пола. Самым распространенным диагнозом была ТФ. Шестнадцать пациентов (73%) весили менее 3 кг, при этом 6 детей весили менее 2,5 кг. Данные пациентов представлены в таблице 1. В двух случаях (9 %) пациенты были оперированы на фоне крайне тяжелого исходного состояния, один из которых на фоне проведения экстракорпоральной мембранной оксигенации. В таблице 1 представлены демографические и клинические характеристики пациентов, включенных в настоящее исследование.

Непосредственный технический успех составил 95% (21/22). Интраоперационной летальности не было. Сатурация кислорода увеличилась с медианы 80 [71–88]% до 95 [92–98] % (p < 0,001). ГСД снизился с 70 [41–80] до 30 [21–39] мм рт.ст. Время пребывания в отделении интенсивной терапии составило 5 [1–11,5] дней. Всего пациентам было имплантировано 28 стентов (1,18 на пациента). Ха-

рактеристика стентов представлена в таблице 2. Шести пациентам (27%) было имплантировано 2 стента в индексную процедуру. В одном случае прошла дислокация имплантированных стентов в полость ПЖ, что потребовало проведения экстренного хирургического вмешательства. В одном случае развился гемоперикард, выполнено дренирование перикарда, хирургической коррекции не потребовалось. В одном случае развилась стойкая брадикардия устойчивая к медикаментозной терапии, что потребовало использования временной кардиостимуляции, ритм восстановлен. Во время госпитализации одному пациенту (4,5%) потребовалось экстренное хирургическое вмешательство на фоне нарастающей гипоксемии, четырем пациентам (18%) потребовалось повторное эндоваскулярное вмешательство. Повторная госпитализация потребовалась трем пациентам (14,2%).

В таблице 2 представлены результаты вмешательств с указанием осложнений и процедуральных аспектов.

Несмотря на очевидные преимущества стентирования ВОПЖ, данная методика не лишена недостатков и ограничений. Согласно данным литературы, частота неудачных вмешательств и реинтервенций может варьировать от 2 до 17% в зависимости от центра, где выполнялось вмешательство [30, 31]. К наиболее значимыми осложнениям стентирования ВОПЖ относятся миграция стента, желудочковые аритмии, перелом или коллапс стента, а также рестеноз [19–21]. Стент, имплантированный слишком глубоко в полость ПЖ (в его приточную часть), может вызывать повреждение ТК, приводя к регургитации. Позиционирование стента в мышечной части ВОПЖ с полным покрытием зоны стенозирования является непременным условием выполнения безопасной и эффективной процедуры. Ключевым моментом является выбор оптимального стента по длине и диаметру, что позволяет минимизировать возможные осложнения во время имплантации и уменьшить риски повторных вмешательств. При выборе стента необходимо учитывать данные ЭХОКГ и ангиографии. Рекомендуются, чтобы длина стента была несколько избыточной и превышала измеренную длину из-за возможного укорочения в стандартных ангиографических проекциях [22–23]. В нашей серии повторные эндоваскулярные вмешательства потребовались 6 пациентам (28%). При этом четырем пациентам (20%) на фоне нарастающей десатурации потребовались повторные вмешательства в ранние сроки после первичного стентирования ВОПЖ: в день операции, на 4-е, 9-е и 18-е сутки послеоперационного периода. В двух из четырех случаев (50%) повторное вмешательство выполнялось в связи с неполным захватом в зону стентирования мышечной части стенозированного ВОПЖ. Еще в одном случае повторное вмешательство вы-

полнялось в связи с неадекватным захватом стенозированного клапана легочной артерии. Повторное стентирование у всех пациентов сопровождалось хорошим клиническим эффектом. В одном случае причиной повторного вмешательства стал перелом стента. Зона перелома с целью предотвращения тромбоза либо рестеноза была дополнительно армирована по методике «стент-в-стент». У двух пациентов повторное вмешательство выполнялось в отдаленные сроки после индексной процедуры: на 54 сутки на фоне прогрессирующей десатурации было выявлено нарастание стенозирования проксимальнее ранее имплантированного стента и выполнено эффективное стентирование; через 150 дней установлена эффективная постдилатация ранее установленного стента баллоном большего диаметра. Таким образом, наиболее частой причиной повторных вмешательств является неполное покрытие мышечного компонента стеноза ВОПЖ.

Стентирование ВОПЖ представляет собой технически сложное интервенционное вмешательство, сложность которого определяется комплексом анатомо-функциональных и технических факторов. В нашем исследовании 73% пациентов имели массу тела менее 3 кг, что существенно повышает риск интрапроцедурных осложнений, включая повреждение внутрисердечных структур и сосудистые осложнения. Особую сложность представляет анатомия зоны вмешательства, объединяющая стенозированный отдел ВОПЖ, подклапанную область, клапанный аппарат легочной артерии и ее ствол, при этом выраженная динамичность морфологических изменений в течение сердечного цикла и тесная анатомическая взаимосвязь с элементами ТК создают дополнительные технические сложности. Ключевые ограничения методики включают: трудности оптимального подбора параметров стента, обусловленные компрессией гипертрофированного миокарда и риском миграции импланта; недостаточную информативность стандартной вентрикулографии для оценки полноты покрытия стенозированного сегмента; отсутствие специализированного инструментария, адаптированного для неонатальных вмешательств.

В нашей серии 8 пациентам перед имплантацией стента проводилась мультиспиральная двухтрубчатая КТ-ангиография (Siemens Somatom Drive 2018, Германия) в обе фазы сердечного цикла, в двух случаях с ретроспективной ЭКГ-синхронизацией и на этапе планирования имплантация стентов различной длины.

Для определения наиболее значимого измерения, необходимого для выбора диаметра стента, была составлена ретроспективная корреляционная карта, связывающая фактический диаметр имплантированного стента

Таблица 2. Результаты проведенного стентирования ВОПЖ

Table 2. Results of Right Ventricular Outflow Tract (RVOT) stenting

Показатель Parameter	Стентирование ВОПЖ (n = 22) RVOT stenting
Длительность пребывания в АПО, сут. Duration of stay in A&R unit, days	5,0 [1,0÷11,5]
Процедуральный успех n (%) Procedural success	21 (95)
Процедуральные осложнения n (%) Procedural complications	3 (13,6)
Гемоперикард n (%) Hemopericardium	1(4,5)
Брадикардия n (%) Bradycardia	1(4,5)
Дислокация стентов потребовавшая конверсии n (%) Dislocated stents subject to conversion	1(4,5)
Конверсия в текущую госпитализацию n (%) Conversion during current hospital stay	1(4,5)
Реинтервенция в текущую госпитализацию n (%) Reintervention during current hospital stay	4 (18)
Реинтервенции в периоде наблюдения n (%) Reintervention during follow-up	3(14)
Длина стента, мм Stent length, mm	18 [15–26]
Диаметр стента, мм Stent diameter, mm	5.0 диапазон 3.5–10
Количество стентов на 1 пациента Number of stents per 1 patient	1.18
Тип стента, количество Stent type, number	Balton Chopin 2 (5), Balton Flexus (11), Medtronic Onyx Resolute (7), iVascular Restorer (4), Abbott Omnilink Elite (1)
Летальность, % Mortality, %	0

Примечание: значения величин указаны в формате «медиана [верхний квартиль ± нижний квартиль]».

Note: the values of the values are indicated in the format "median [upper quartile ± lower quartile]".

с измерениями, полученными при КТ-ангиографии. Карта корреляции показала положительную связь между размерами стента и минимальными диастолическими диаметрами стенозированного ВОПЖ, но только эффективный диастолический диаметр по площади легочного ствола был выбран в качестве независимой переменной в множественной линейной регрессии. Тест Краскела-Уоллиса выявил, что между фактическим диаметром стента и вычисленным на основе эффективного диастолического диаметра легочной артерии нет значительных различий ($p = 0,673$). Это подтверждает надежность метода измерения и указывает, что надклапанный эффективный диастолический диаметр точно определяет будущий диаметр стента.

Для определения зоны имплантации производилось сравнение между имплантированными стентами и всеми измеряемыми протяженностями, с применением теста Краскела-

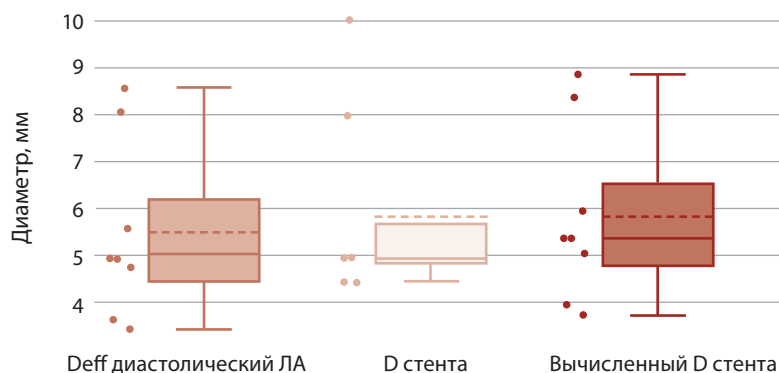


Рисунок 3. Гистограмма сравнения диаметров имплантированного стента, эффективного диастолического диаметра надклапанного отдела легочной артерии и вычисляемого диаметра стента

Figure 3. Histogram of implanted stent diameter, supravalvular pulmonary artery diastolic diameter, and calculated stent diameter

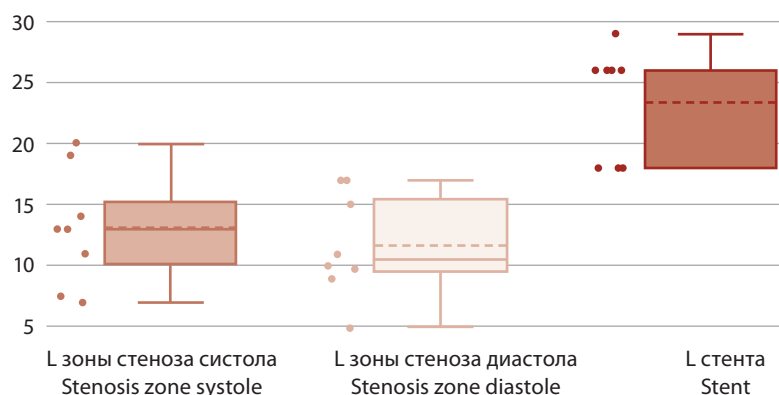


Рисунок 4. Гистограмма сравнения длин имплантированного стента, протяженностей зон стеноза в обе фазы сердечного цикла

Figure 4. Histogram comparing the lengths of the implanted stent and the stenotic zone lengths during both phases of the cardiac cycle

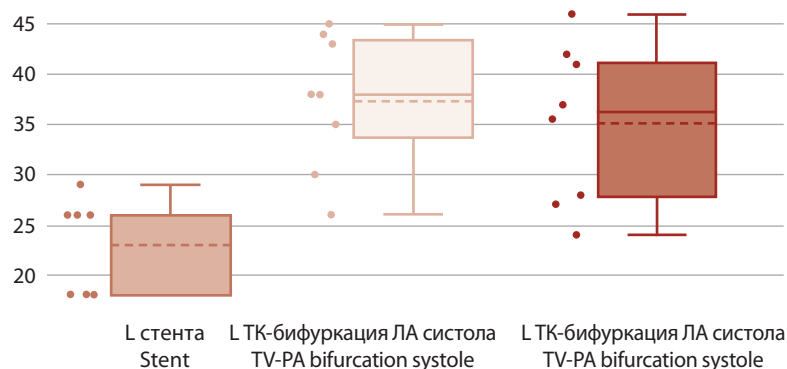


Рисунок 5. Гистограмма сравнения длин имплантированного стента, расстояний от ТК до бифуркации лёгочного ствола в обе фазы сердечного цикла. ТК-трикуспидальный клапан, ЛА – лёгочная артерия

Figure 5. Histogram comparing the lengths of the implanted stent and the distances from the tricuspid valve (TV) to the pulmonary trunk bifurcation during both phases of the cardiac cycle. TV – tricuspid valve, PA – pulmonary artery

Уоллиса. Тест Данна-Бонферрони применялся для попарного сравнения групп с целью определения, какая из них имеет статистически значимые отличия. Тест Данна-Бонферрони показал, что попарные сравнения систолической длины стеноза – длины имплантированного стента ($p = 0,009$) и диастолической длины – длины имплантированного стента ($p = 0,011$) имеют скорректированное значение p менее 0,05.

Аналогично попарные сравнения длины имплантированного стента и расстояния от ТК до бифуркации легочной артерии в обе фазы имеют значение p менее 0,05 (рис. 5).

Статистический анализ показал, что длина имплантированного стента высоко коррелирует с разницей между расстоянием от ТК до бифуркации и зоной стеноза ($r = 0,88$, $p = 0,008$), что подтверждается применением уравнения регрессии ($F = 17,62$, $p = 0,004$, $R^2 = 0,78$) (рис. 6).

Измерения, полученные при КТ-ангиографии, были сопоставлены с фактическими размерами имплантированных стентов, что дало возможность определить ключевые параметры для выбора диаметра и длины стента:

- Ключевым параметром для подбора диаметра стента является эффективный диаметр надклапанной зоны лёгочной артерии, что подтверждает необходимость ее покрытия при имплантации стента.

- Оптимальный размер стента должен быть больше зоны стеноза, но меньше расстояния от ТК до бифуркации лёгочного ствола.

- Статистический анализ показал, что длина имплантированного стента высоко коррелирует с разницей между расстоянием от ТК до бифуркации и зоной стеноза ($r = 0,88$, $p = 0,008$).

Методика виртуального стентирования позволяет индивидуально подбирать оптимальные параметры стента для каждого пациента благодаря комплексной оценке полноты покрытия стенозированным участком, моделированию различных вариантов длины стента и учету индивидуальных анатомических особенностей (рис. 7). Ключевыми преимуществами данной технологии являются возможность предоперационной оценки анатомической совместимости, трехмерная визуализация зоны вмешательства и точный подбор длины и диаметра стента. Особую ценность виртуальное моделирование представляет при сложных анатомических вариантах, таких как аномалии коронарных артерий, гипоплазия легочного ствола или комбинированные пороки развития, поскольку позволяет не только оптимально подобрать параметры стента, но и заранее смоделировать процесс его имплантации, что значительно повышает безопасность и эффективность вмешательства.

Заключение

Стентирование ВОПЖ демонстрирует высокую процедурную эффективность, обеспечивая значительное улучшение сатурации кислорода и гемодинамических показателей. Однако частота осложнений и реинтервенций остается значимой проблемой, особенно у новорожденных с низкой массой тела и сложной анатомией. Виртуальное стентирование, основанное на 3D-реконструкции и компьютерном моделировании, позволяет минимизировать риски за счет прецизионного планирования и оптимизации выбора стента. Сравнительный анализ показывает, что виртуальный подход превосходит традиционный по всем ключевым параметрам: точности позиционирования, частоте осложнений и необходимости реинтервенций.

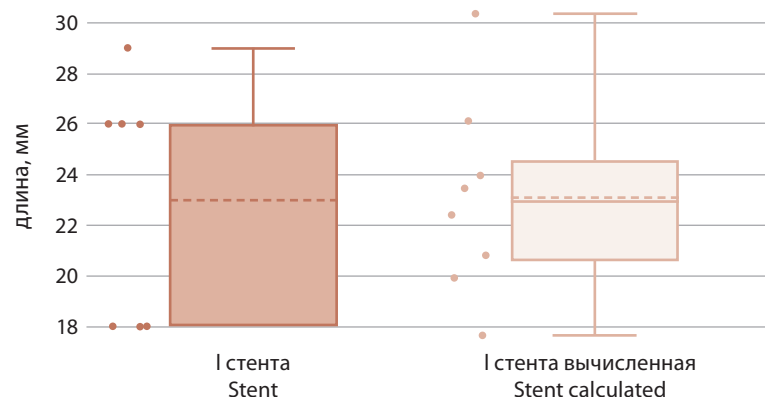


Рисунок 6. Гистограмма сравнения длин имплантированного стента и длины стента, вычисленной на основании разницы между расстоянием от ТК клапана до бифуркации и зоной стеноза ($r = 0,88$, $p = 0,008$) измеренными в диастолу

Figure 6. Histogram comparing the implanted stent lengths and calculated stent lengths (TV-to-bifurcation distance minus stenotic zone length) during diastole ($r = 0.88$, $p = 0.008$)

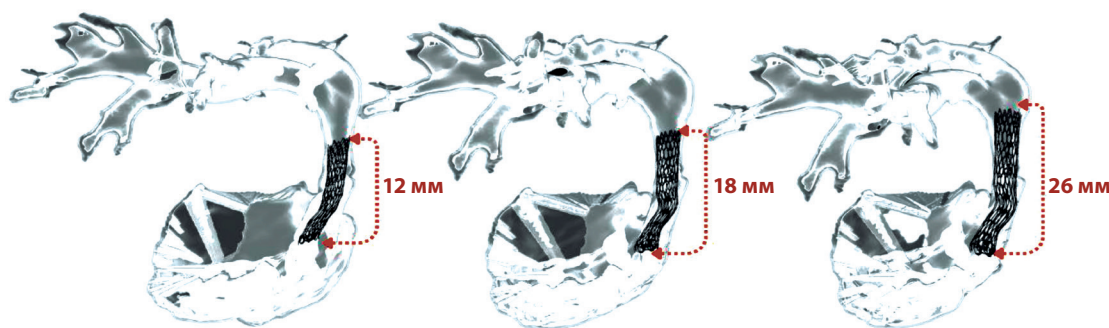


Рисунок 7. Виртуальная имплантация стентов различной длины (12, 18, 26 мм) в полую виртуальную модель выходного отдела правого желудочка и легочных артерий

Figure 7. Virtual stent implantation (12, 18, 26 mm) into a hollow RVOT-pulmonary artery model

REFERENCES

- Kirklin J.W., Barratt-Boyes B. G. *Cardiac Surgery*. 3rd ed. New York : Churchill Livingstone, 2003. 1632 p.
- van der Linde D., Konings E. E., Slager M. A. et al. Birth prevalence of congenital heart disease worldwide: A systematic review and meta-analysis. *Journal of the American College of Cardiology*, 2011, vol. 58(21), pp. 2241–2247. doi: 10.1016/j.jacc.2011.08.025.
- Van Arsdell G.S., Maharaj G.S., Tom J. et al. What is the Optimal Age for Repair of Tetralogy of Fallot? *Circulation*, 2000, vol.102(19 Suppl 3), pp. 123–9. doi: 10.1161/01.cir.102.suppl_3.iii-123.
- Fermanis G.G., Ekanagi A.K., Salmon A.P. et al. Twelve year experience with the modified Blalock-Taussig shunt in neonates. *European Journal of Cardio-Thoracic Surgery*, 1992, vol. 6(11), pp. 586–589. doi: 10.1016/1010-7940(92)90131-g.
- Petrucci O., O'Brien S. M., Jacobs M. L. et al. Risk factors for mortality and morbidity after the neonatal Blalock-Taussig shunt procedure. *Annals of Thoracic Surgery*, 2011, vol. 92(2), pp. 642–651; discussion 651–2. doi: 10.1016/j.athoracsurg.2011.02.030.
- Gibbs J.L., O. Uzun, Blackburn M.E. et al. Right ventricular outflow stent implantation: An alternative to palliative surgical relief of infundibular pulmonary stenosis. *Heart*, 1997, vol. 77(2), pp. 176–179. doi: 10.1136/hrt.77.2.176.
- Dohlen G., Chaturvedi R.R., Benson L.N. et al. Stenting of the right ventricular outflow tract in the symptomatic infant with tetralogy of Fallot. *Heart*, 2009, vol. 95(2), pp. 142–147. doi: 10.1136/hrt.2007.135723.
- Quandt D., Ramchandani B., Penford G. et al. Right ventricular outflow tract stent versus BT shunt palliation in Tetralogy of Fallot. *Heart*, 2017, vol. 103(24), pp. 1985–1991. doi: 10.1136/heartjnl-2016-310620.
- Quandt D., Ramchandani B., Stickley J. et al. Stenting of the Right Ventricular Outflow Tract Promotes Better Pulmonary Arterial Growth Compared With Modified Blalock-Taussig Shunt Palliation in Tetralogy of Fallot—Type Lesions. *JACC Cardiovascular Interventions*, 2017, vol. 10(17), pp. 1774–1784. doi: 10.1016/j.jcin.2017.06.023.
- Abumehdi M., Nasef M.A., Mehta C. et al. Short to medium term outcomes of right ventricular outflow tract stenting as initial palliation for symptomatic infants with complete atrioventricular septal defect with associated tetralogy of Fallot. *Catheterization and Cardiovascular Interventions*, 2020, vol. 96(7), pp. 1445–1453. doi: 10.1002/ccd.29306.
- Valderrama P., Garay F., Springmüller D. et al. Initial Experience in Chile with Stent Implantation in the Right Ventricle Outflow Tract in High-Risk Patients with Tetralogy of Fallot. *Pediatric Cardiology*, 2020, vol. 41(5), pp. 837–842. doi: 10.1007/s00246-020-02321-2.
- Chernoglaz P.F., Linnik Yu.I., Bashkevich A.V. et al. Advantages of stenting of the right ventricular outlet in comparison with applying a modified blalock-Taussig anastomosis before performing a radical correction of the Fallot tetrad in children. *Emergency cardiology and cardiovascular risks*, 2019, vol. 3(1), pp. 532–538. (in Russian).
- Morsina M.G., Pursanov M.G., Soyнов I.A. et al. Critical form of tetralogy of fallot: right ventricular outflow tract stenting or modified blalock-taussig shunt? *Russian journal of cardiology and cardiovascular surgery*, 2023, vol. 16(6), pp. 575–581. doi: 10.17116/kardio202316061575. (in Russian).
- Chernoglaz P.F., Linnik Yu.I., Bashkevich A.V. et al. Radical correction of the Fallot tetrad in children after stenting of the right ventricular outlet. *Emergency cardiology and cardiovascular risks*, 2019, vol. 3(2), pp. 734–738. (in Russian).
- Smith S.C. et al. Stent angioplasty of narrowed right ventricular outflow conduits and pulmonary arteries consistently reduces right ventricular systolic pressures. *J Invasive Cardiol*, 2018, vol. 30(4), pp. 150–156.
- Morgan G.J., et al. Right ventricular outflow tract stenting is a safe and effective bridge to definitive repair in symptomatic infants with tetralogy of Fallot. *JACC Cardiovasc Interv*, 2023, vol. 16(5), pp. 567–575.
- Abu Zahra H., et al. Right ventricular outflow tract stenting during neonatal and infancy periods: A multi-center, retrospective study. *Pediatr Cardiol*, 2018, vol. 39(6), pp. 1184–1190.
- Chernoglaz P.F., Linnik Yu.I., Bashkevich A.V. et al. Stenosis of the right ventricular outlet as a step-by-step palliative intervention before radical correction of the Fallot tetrad in children. *Emergency cardiology and cardiovascular risks*, 2018, vol. 2(1), pp. 230–236. (in Russian).
- Bertram H., Emmel M., Ewert P. et al. Stenting of native right ventricular outflow tract obstructions in symptomatic infants. *J Interv Cardiol*, 2015, vol. 28(3), pp. 279–287. doi: 10.1111/joic.12198.
- Glatz A.C., Petit C.J., Goldstein B.H. et al. Comparison between patent ductus arteriosus stent and modified Blalock-Taussig shunt as palliation for infants with ductal-dependent pulmonary blood flow: insights from the congenital catheterization research collaborative. *Circulation*, 2018, vol. 137(6), pp. 589–601. doi: 10.1161/CIRCULATIONAHA.117.029987.
- Bentham J.R., Zava N.K., Harrison W.J. et al. Duct stenting versus modified Blalock-Taussig shunt in neonates with duct-dependent pulmonary blood flow: associations with clinical outcomes in a multicenter national study. *Circulation*, 2018, vol. 137(6), pp. 581–588. doi: 10.1161/CIRCULATIONAHA.117.028972.
- Valderrama P., Garay F., Springmüller D. et al. Initial experience in chile with stent implantation in the right ventricle outflow tract in high-risk patients with tetralogy of Fallot. *Pediatr Cardiol*, 2020, vol. 41(4), pp. 837–842. doi: 10.1007/s00246-020-02321-2.
- Peirone A., Contreras A., Guadagnoli A.F. et al. Right ventricular outflow tract stenting in severe tetralogy of Fallot: an option to the Blalock-Taussig shunt. *Rev Argent Cardiol*, 2019, vol. 87, pp. 125–130.
- Stumper O., Ramchandani B., Noonan P. et al. Stenting of the right ventricular outflow tract. *Heart*, 2013, vol. 99(21), pp. 1603–1608. doi: 10.1136/heartjnl-2013-304155.

Послупила 11.02.2025