

УДК 616.712-007.29-053.2-16:611.1

DOI: <https://doi.org/10.17816/PTORS635318>

Научный обзор



Влияние воронкообразной деформации грудной клетки на сердечно-легочную систему (обзор литературы)

А.М. Ходоровская, Д.В. Рыжиков, Б.Х. Долгиев

Национальный медицинский исследовательский центр детской травматологии и ортопедии имени Г.И. Турнера, Санкт-Петербург, Россия

АННОТАЦИЯ

Обоснование. Воронкообразная деформация грудной клетки — наиболее распространенный порок развития грудной клетки. В настоящее время у хирургов и исследователей данной проблемы отсутствует единое мнение относительно того, является ли воронкообразная деформация грудной клетки исключительно эстетической проблемой, или воронкообразная деформация грудной клетки нарушает функцию сердечно-легочной системы.

Цель — проанализировать публикации, посвященные влиянию воронкообразной деформации грудной клетки на сердечно-легочную систему, а также функциональным особенностям сердечно-легочной системы у пациентов с воронкообразной деформацией грудной клетки после торакопластики.

Материалы и методы. Поиск данных осуществляли в базах научной литературы PubMed, Google Scholar, Cochrane Library, Crossref, eLibrary без языковых ограничений. В процессе написания статьи использовали метод анализа и синтеза информации. Большая часть работ, включенных в анализ, опубликована за последние 20 лет.

Результаты. У пациентов с воронкообразной деформацией грудной клетки выраженность дисфункции сердечно-легочной системы зависит от степени деформации грудной клетки. Согласно данным проанализированной литературы при исследовании функции внешнего дыхания у пациентов с воронкообразной деформацией грудной клетки в большинстве случаев выявляли рестриктивный тип нарушения дыхания (сформированная жизненная емкость <80 % нормы с нормальным соотношением форсированного выдоха за минуту к форсированной емкости легких), а при проведении эхокардиографии в большинстве случаев определялась компрессия правых камер сердца. Сравнительный анализ исследования параметров сердечно-легочной системы в до- и послеоперационном периоде в большинстве случаев свидетельствовал об их улучшении и адаптации сердечно-легочной системы к нагрузке после хирургического вмешательства.

Заключение. Воронкообразная деформация грудной клетки не только представляет эстетическую проблему, но и при выраженной степени деформации приводит к нарушению механики дыхания и дисфункции сердечно-сосудистой системы. Хирургическое восстановление объема ретростернального пространства позволяет улучшить функциональные возможности сердца и легких.

Ключевые слова: воронкообразная деформация грудной клетки; кардиореспираторный синдром; функция внешнего дыхания; эхокардиография; нагрузочное кардиопульмональное тестирование.

Как цитировать

Ходоровская А.М., Рыжиков Д.В., Долгиев Б.Х. Влияние воронкообразной деформации грудной клетки на сердечно-легочную систему (обзор литературы) // Ортопедия, травматология и восстановительная хирургия детского возраста. 2024. Т. 12. № 3. С. 401–411. DOI: <https://doi.org/10.17816/PTORS635318>

DOI: <https://doi.org/10.17816/PTORS635318>

Review

Impact of pectus excavatum deformity on the cardiopulmonary function: a literature review

Alina M. Khodorovskaya, Dmitry V. Ryzhikov, Bahauddin H. Dolgiev

H. Turner National Medical Research Center for Children's Orthopedics and Trauma Surgery, Saint Petersburg, Russia

ABSTRACT

BACKGROUND: Pectus excavatum deformity is the most common chest wall malformation. Currently, surgeons and researchers of this problem have no consensus on whether pectus excavatum is a purely aesthetic problem or whether pectus excavatum disturbs the function of the cardiopulmonary system.

AIM: To analyze publications on the effect of pectus excavatum on the cardiorespiratory system and the functional features of the heart and lung after thoracoplasty in patients with pectus excavatum.

MATERIALS AND METHODS: Data were searched in the scientific databases PubMed, Google Scholar, Cochrane Library, Crossref, and eLibrary without language limitation. In this article, the method of analysis and synthesis of information was used. Most of the studies included in the analysis were published in the last 20 years.

RESULTS: In patients with pectus excavatum, severity of cardiorespiratory dysfunction depends on the degree of chest deformity. According to obtained data, the pulmonary function test in patients with pectus excavatum in the majority of cases revealed restrictive pattern (formed vital capacity <80% of the norm, with normal ratio of forced expiratory volume in 1 minute to forced lung capacity). In most cases, echocardiography showed compression of the right heart chambers. Comparative analysis of the pre- and postoperative study of cardiorespiratory system in most cases indicated improvement and adaptation of the cardiopulmonary system to stress after surgical intervention.

CONCLUSIONS: Funnel chest is an aesthetic problem wherein a severe degree of deformity leads to impaired respiratory mechanics and dysfunction of the cardiovascular system. Surgical restoration of the volume of the retrosternal space allows improvement of the functional capabilities of the heart and lungs.

Keywords: pectus excavatum; cardio-pulmonary syndrome; pulmonary function test; echocardiography; cardio-pulmonary exercise testing.

To cite this article

Khodorovskaya AM, Ryzhikov DV, Dolgiev BH. Impact of pectus excavatum deformity on the cardiopulmonary function: a literature review. *Pediatric Traumatology, Orthopaedics and Reconstructive Surgery*. 2024;12(3):401–411. DOI: <https://doi.org/10.17816/PTORS635318>

Received: 21.08.2024

Accepted: 09.09.2024

Published online: 23.09.2024

ОБОСНОВАНИЕ

Воронкообразная деформация грудной клетки (ВДГК) составляет около 90 % всех деформаций грудной клетки в зависимости от изучаемой популяции [1–3]. Данная патология может быть изолированным диспластическим заболеванием или входить в симптомокомплекс различных генетических синдромов, например синдромов Марфана, Элерса – Данлоса [4], Поланда – Мебиуса [5] и других наследственных заболеваний. У родственников примерно каждого второго пациента с ВДГК также отмечается деформация грудной клетки. В большинстве генетических исследований семейных случаев было продемонстрировано многофакторное наследование с неизвестными атрибутивными факторами [6].

ВДГК выявляют у мужчин в 3–5 раз чаще, чем у женщин. Прямой расовой предрасположенности определено не было, однако ВДГК чаще обнаруживают у представителей европеоидной расы, чем у афроамериканцев, латиноамериканцев или азиатов [7, 8]. По данным литературы, данную патологию выявляют в 4–8 случаев на 1000 рожденных детей [8, 9]. Однако истинная заболеваемость и распространенность ВДГК точно не установлены и могут быть намного выше, поскольку не проводилось крупномасштабных популяционных исследований [10]. Из-за отсутствия четкого определения критериев ВДГК (наличие пограничных, комбинированных деформаций) и исходя из того, что ключевым моментом в первичной диагностике является визуальный осмотр, зависящий от профессионального опыта диагностики деформаций передней грудной стенки ортопеда, обоснованная оценка распространенности деформации не совсем простая задача [11].

В настоящее время все еще ведутся споры о том, представляет ли ВДГК исключительно эстетическую проблему или ВДГК нарушает функцию сердечно-легочной системы; можно ли улучшить функцию сердечно-легочной системы у пациентов с ВДГК путем торакопластики или торакопластика не влияет на сердечно-легочную систему [12–14]; обусловлены ли жалобы пациентов на одышку, боль в груди, нарушение ритма сердца психологическими проблемами и не может ли быть достаточным применение методов эстетической медицины, например, способом, предложенным M. Dupuis и соавт., — устранением деформации грудной клетки с помощью силиконовых имплантатов [15].

Цель — проанализировать публикации, посвященные влиянию воронкообразной деформации грудной клетки на сердечно-легочную систему, а также функциональным особенностям сердечно-легочной системы у пациентов с воронкообразной деформацией грудной клетки после торакопластики.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Поиск данных осуществляли в базах научной литературы PubMed, Google Scholar, Cochrane Library, Crossref,

eLibrary без языковых ограничений. Были использованы следующие ключевые слова: «воронкообразная деформация грудной клетки», «торакопластика», «функция внешнего дыхания», «эхокардиография», «нагрузочное кардиопульмональное тестирование», funnel chest, chest wall deformity pectus excavatum, pulmonary function testing, cardiac imaging, cardiopulmonary exercise testing, exercise stress testing, echocardiography, thoracoplasty, Minimally Invasive Repair of Pectus Excavatum, Nuss procedure, Ravitch procedure. В процессе написания статьи использовали метод анализа и синтеза информации. Большая часть работ, включенных в анализ, опубликована за последние 20 лет.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Исследования функции сердечно-сосудистой системы у пациентов с ВДГК проводили в течение последних 90 лет. В 1932 г. J. Eideken и С.С. Wolferth впервые представили описание электрокардиографии у пациентов с ВДГК [16]. Согласно данным литературы у пациентов с ВДГК наблюдаются отклонения на электрокардиограмме, наиболее значимые из которых — неполная и полная блокада правой ножки пучка Гиса, плохая прогрессия зубца R, изменения морфологии зубца P и признаки, характерные для синдрома Бругада [17, 18]. Однако эти изменения неспецифичны, а у детей и подростков с ВДГК в большинстве случаев изменения на электрокардиограмме отсутствуют [9]. Эхокардиография — более специфичный метод, чем электрокардиография, что одними из первых продемонстрировали R. Mucchegiani и соавт. По сравнению с показателями обследованных добровольцев у пациентов с ВДГК по данным эхокардиографии выявлены характерные для этой патологии изменения — компрессия правых отделов сердца и значительное сужение отводящего тракта правого желудочка (с уменьшением конечной диастолической и систолической площадей правого желудочка) [19]. По мнению D.E. Jaroszewski, деформация ребер и грудины приводит к сдавлению правых камер сердца, снижению заполнения предсердий кровью, уменьшению венозного возврата крови к сердцу, а в дальнейшем — к диастолической дисфункции и снижению минутного объема кровообращения [20].

На выраженность компрессии сердца влияет степень деформации грудной клетки (глубина западения грудной клетки на вершине деформации), что было указано Z. Chu и соавт. Более того, авторы выявили, что глубина сдавления грудной клетки коррелирует с углом разворота легочных вен и сердца в целом [21]. F.C. Sarioglu и соавт. показали, что угол поворота сердца коррелирует с индексом Галлера [22]. Следует отметить, что смещение сердца влево при прогрессировании ВДГК происходит нередко с формированием правосторонней асимметричной ВДГК и данный вариант деформации типичный [20].

M.H. Malek и соавт. на основании метаанализа результатов до- и послеоперационного обследования 169 паци-

ентов, которым выполняли коррекцию ВДГК (радикальная и малоинвазивная торакопластика), пришли к выводу, что после операции отмечается статистически значимое улучшение функции сердечно-сосудистой системы. Это опровергало утверждение, что торакопластика при ВДГК носит в первую очередь косметический характер и обеспечивает минимальное физиологическое улучшение [23]. W.G. Guntheroth и P.S. Spiers полагали, что в метаанализе были допущены методологические ошибки. Более строгий отбор статей позволил авторам прийти к заключению, что в изученной литературе недостаточно данных для выводов об улучшении параметров сердечно-сосудистой системы после операции [24]. Однако дальнейшие исследования влияния ВДГК на функцию сердца подтвердили выводы М.Н. Malek и соавт. [9, 25, 26].

Анализ данных компьютерной томографии до и после операции показал, что в течение первого месяца после торакопластики сердце смещается вправо и впереди, и величина смещения в этих направлениях была статистически значимой [27].

Е. Coln и соавт. при изучении данных эхокардиографии (до и после торакопластики по методике D. Nuss) 123 пациентов, средний возраст которых составил 13 лет, продемонстрировали, что сдавление сердца отмечалось у 95 % пациентов ВДГК, а в послеоперационном периоде у 93 % обследованных признаки компрессии сердца отсутствовали. Более того, авторы выявили, что в послеоперационном периоде незначительный пролапс митрального клапана существовал только у 7 из 54 пациентов, у которых аномалия митрального клапана обнаружена по данным предоперационной эхокардиографии [28].

Следует отметить, что у пациентов с ВДГК значительно чаще, чем в популяции в целом, диагностируют пролапс митрального клапана [29]. Причиной пролапса митрального клапана, по мнению A. Laín и соавт., служит компрессия сердца деформированной грудной клеткой, а устранение компрессии приводит к регрессу пролапса. Для подтверждения своего предположения авторы провели интраоперационную чреспищеводную эхокардиографию у пациентов детского возраста с ВДГК и выявили, что форма клапанов сердца изменяется интраоперационно уже на этапе подъема грудной клетки при устранении ВДГК по методике D. Nuss [30].

Согласно многим авторам, в послеоперационном периоде по данным эхокардиографии увеличивается ударный объем правого желудочка, а также сердечный выброс правого желудочка [31, 32]. Увеличение фракции выброса правого желудочка уже через 2 нед. после операции по методу D. Nuss было подтверждено данными магнитно-резонансной томографии, а также в ходе исследования было установлено, что фракция выброса левого желудочка, хотя была в пределах нормы до операции, через год увеличилась [33].

Улучшение фракции выброса левого желудочка по данным чреспищеводной эхокардиографии у 17 пациентов

с ВДГК, средний возраст которых составил 28 лет, выявили T. Krueger и соавт. [34]. Однако, по данным других авторов, параметры левого желудочка у пациентов с ВДГК не ухудшаются на фоне компрессии сердца [20, 35].

По сравнению с правым желудочком, левый желудочек расположен более кзади и обладает более толстой мышечной стенкой. Это обуславливает то, что левый желудочек более защищен от компрессии деформированной передней грудной стенки, что, вероятно, объясняет незначительные изменения левого желудочка после операции — по данным большинства авторов [36]. Если нарушение функции сердца у пациентов при ВДГК и ее восстановление отмечают большинство авторов [20, 26, 37], то возможность улучшения функции дыхательной системы после операции стало предметом длительной дискуссии в связи с опубликованными противоречивыми результатами оценки функции дыхательной системы как до, так и после операции, а также с использованием неоднородных диагностических критериев и применяемых методов, разработанных для определения дисфункции легких [12, 14, 38].

При выраженной ВДГК у детей младшего возраста сдавление легких не вызывает сомнения: у этих детей отмечается «парадоксальное дыхание», проявляющееся западением грудины и ребер на вдохе. При данном типе дыхания снижается подвижность грудной клетки, легкие при вдохе расширяются незначительно и в основном за счет верхних долей. В итоге пациенты страдают частыми респираторными заболеваниями с затяжным течением. Сдавление легких, нарушение дыхания, застой мокроты в бронхах приводят к одышке, навязчивому кашлю. Клинически это проявляется картиной трахеита, бронхита, пневмонии, чаще в нижних отделах легких [39].

Однако в большинстве случаев у детей младшего возраста деформация грудной клетки выражена незначительно и ВДГК не обуславливает какой-либо симптоматики вследствие лучшей податливости грудной клетки, чем у взрослых, ВДГК прогрессирует медленно, примерно в 22 % случаев эту проблему замечают до 10 лет [40]. По мере взросления эластичность и податливость грудной клетки постепенно снижаются, что приводит к дисфункции сердечно-легочной системы, которая проявляется в виде снижения переносимости физических нагрузок, одышки, боли в груди, нарушения ритма сердца [31, 41, 42]. Появление или нарастание клинической симптоматики в основном происходило в подростковом возрасте на фоне усугубления деформации передней грудной стенки [43].

S. Ramadan и соавт. указали, что 13,3 % пациентов с ВДГК в возрасте $13,8 \pm 2$ года сообщили об одышке при физической нагрузке и 20 % этой же группы — о боли в груди в покое [44], что совпадало с данными других авторов [37, 45].

При исследовании показателей функции внешнего дыхания (ФВД) S. Ramadan и соавт. выявили рестриктивный тип нарушения дыхания (сформированная жизненная емкость <80 % нормы с нормальным соотношением

форсированного выдоха за минуту к форсированной емкости легких) у 23 % пациентов с ВДГК, но авторы не провели корреляции между наличием вышеуказанных жалоб и снижением параметров ФВД [44] по сравнению с референтными значениями [46]. Действительно, у большинства пациентов с ВДГК не обнаруживают хронические легочные заболевания [38]. ВДГК не влияет на дыхательные пути или легочную паренхиму, за исключением механического сжатия, что приводит к снижению эффективности вентиляции легких [9, 27, 47].

Анализируя результаты обследования 31 пациента детского возраста с ВДГК, O. Katrancioglu и соавт. выявили, что значение индекса Галлера обратно коррелировало с объемом форсированного выдоха за первую секунду и с форсированной жизненной емкостью легких [45], что совпадало с данными многоцентрового исследования, проведенного R.E. Kelly Jr и соавт. [38]. У пациентов с индексом Галлера >7 в четыре раза чаще наблюдался рестриктивный тип нарушения дыхания [45].

Для объективизации таких симптомов, как затрудненное дыхание и ощущение невозможности осуществления глубокого вдоха, R.E. Redlinger Jr и соавт. провели оптоэлектронную плетизмографию 119 пациентов (63 обследуемых с ВДГК, 56 — контрольная группа). Результаты исследования свидетельствовали о снижении подвижности грудной стенки в области деформации передней грудной стенки, а также об усилении брюшного дыхания у пациентов с ВДГК по сравнению с пациентами контрольной группы. На уровне пупка у пациентов с ВДГК экскурсия маркера наблюдалась на 147 % больше по сравнению с показателями контрольной группой ($p < 0,01$) [48]. Это исследование стало важным этапом для понимания патогенеза дыхательных нарушений у пациентов с ВДГК.

V. Binazzi и соавт. проанализировали результаты оптоэлектронной плетизмографии 13 пациентов после коррекции ВДГК по методике D. Nuss и установили, что среднее увеличение объема грудной клетки на 11 % было обеспечено за счет верхней части грудной клетки ($p = 0,0001$) и в меньшей степени за счет области живота и нижней части грудной клетки [49].

Однако результаты исследования ФВД у больных после устранения ВДГК, по данным литературы, также весьма противоречивы и зависят от многих факторов, например, таких, как выраженность дефекта ВДГК, тип хирургического вмешательства, однородность анализируемой группы, сроки проведения контрольных обследований [36, 50, 51].

Так, M.H. Malek и соавт. на основании метаанализа утверждали об отсутствии значительного улучшения легочной функции после восстановления ВДГК [14], но в этом исследовании были объединены результаты торакопластики, которую выполняли как по методу M.M. Ravitch, так и по методу D. Nuss.

Результаты анализа параметров ФВД, свидетельствующие об ухудшении функции легких или отсутствии

какой-либо динамики после операции, в большинстве случаев основывались на небольших выборках и получены в ранние сроки после операции. Так, например, D.L. Sigalet и соавт. представили предварительные результаты анализа параметров ФВД 11 пациентов с ВДГК в возрасте $13,5 \pm 3,1$ года через 3 мес. после торакопластики по D. Nuss, указывающие на значимое снижение форсированной жизненной емкости легких и жизненной емкости легких после операции [52]. J.Y. Jeong и соавт. [53], анализируя результаты исследования ФВД 18 пациентов младше 18 лет с ВДГК до и через 4–6 мес. после операции, пришли к тем же выводам, что и D.L. Sigalet и соавт. [52].

D. Borowitz и соавт. на основании исследования указывали, что через 6–12 мес. у пациентов после торакопластики по D. Nuss функциональное состояние легочной системы не ухудшалось, однако улучшения также не отмечалось [54].

Ухудшение функции легких в ранние сроки после хирургической коррекции ВДГК, по мнению M. Jukić и соавт., может быть связано с длительным болевым синдромом после операции, авторы указывают, что 81,5 % пациентов нуждались в анальгетиках в течение от 1 дня до 6 мес. после операции [55].

M. Noguchi и соавт. считают, что снижение показателей ФВД после устранения ВДГК обусловлено уменьшением использования дыхательных мышц. На основании исследования авторы продемонстрировали, что с помощью ранней респираторной реабилитации можно значимо улучшить объем вдоха через 3 мес. после устранения ВДГК по методике по D. Nuss не только по сравнению с объемом вдоха пациентов, которым не проводилось восстановительного лечения, а также по сравнению с данными предоперационного обследования этих пациентов [56].

Тем не менее установка корригирующей пластины (одной или двух) создает дополнительный фактор снижения мобильности грудной стенки. Более того, уменьшение эластичности грудной клетки может усугубляться с ростом пациента и невозможностью ее удаления в течение нескольких лет [57]. Впрочем, данные крупных когортных исследований свидетельствуют о значительном улучшении функции легких после удаления металлоконструкции по сравнению с предоперационными данными [58, 59]. И большинство авторов полагают, что сравнительный анализ до- и послеоперационных результатов исследования ФВД целесообразно выполнять после удаления металлоконструкции [27, 36, 60].

J. O'Keefe и соавт. наблюдали значительное увеличение жизненной емкости легких, форсированной жизненной емкости легких, общей емкости легких, а также объема форсированного выдоха за первую секунду маневра форсированного выдоха через 3–6 мес. после удаления металлоконструкции у пациентов, средний возраст которых составил $13,9 \pm 2,3$ года [35]. S. Szydlík и соавт. выявили, что после удаления металлоконструкции, по сравнению с данными до торакопластики по D. Nuss,

отмечается статистически значимое увеличение таких параметров ФВД, как объем форсированного выдоха за первую секунду маневра и форсированная жизненная емкость легких. В то же время авторы не обнаружили статистически значимых различий между величиной исходной деформации грудной клетки и улучшением спирометрических показателей. Не было выявлено и статистически значимых корреляций между возрастом, ростом и весом пациента в исследуемой группе и улучшением спирометрических показателей [57]. Это совпадает с данными метаанализа Q. Wang, которые также не отметили значимой корреляции между средним возрастом пациентов на момент операции и восстановлением легочных функций [61]. Однако на эти результаты могло повлиять то, что возраст пациентов был схожим во всех 13 работах, включенных в метаанализ. Возраст в 13 исследованиях составлял от 10,4 до 16,9 года, а в 6 из 13 исследований — от 13 до 14 лет.

C. Dreher и соавт. опубликовали результаты анализа таких параметров ФВД, как общее сопротивление дыхательных путей, общее удельное сопротивление дыхательных путей 114 пациентов до и после операции. Было показано, что после удаления металлоконструкции данные показатели нормализуются, в том числе у тех пациентов, у которых в предоперационном периоде выявлены обструктивные и эмфизематозные дыхательные паттерны [61].

ФВД обычно исследуют в состоянии покоя, но основные жалобы пациентов с ВДГК возникают на фоне физических нагрузок. Исследования отдельно сердечной и отдельно легочной системы в состоянии покоя не могут дать четкого физиологического объяснения улучшенной переносимости физических нагрузок. Кардиопульмональное нагрузочное тестирование предоставляет более значимую диагностическую и прогностическую информацию о состоянии сердечно-легочной системы, чем исследования, проведенные в состоянии покоя, и служит признанным клиническим инструментом для оценки способности переносить физическую нагрузку, обеспечивает анализ комплексных реакций на физическую нагрузку со стороны легочной, сердечно-сосудистой и скелетно-мышечной систем [31, 36]. Результаты сравнительного анализа нагрузочного кардиопульмонального тестирования у пациентов с ВДГК до и после операции достаточно неоднородны в связи с отличающейся методологией проведения, малыми группами включенных разновозрастных пациентов, различными сроками выполнения исследования после операции [50, 62].

Анализируя результаты нагрузочного кардиопульмонального тестирования до и после торакопластики у пациентов детского возраста с ВДГК, S.R. Wynn и соавт. [63], C. Castellani и соавт. не нашли значимых различий в параметрах нагрузочного кардиопульмонального тестирования [64]. Однако M. Maagaard и соавт. на основании результатов кардиопульмонального тестирования 49 подростков

с ВДГК и 26 добровольцев (контрольная группа) до и после торакопластики показали, что сердечный индекс был статистически значимо снижен у пациентов с ВДГК по сравнению с контрольной группой, а через 3 года после операции сердечный индекс статистически значимо увеличился и не отличался от этого параметра в контрольной группе, однако значимого различия в максимальном потреблении кислорода между пациентами с ВДГК и контрольной группой выявлено не было [51]. В то же время результаты многоцентрового исследования R.E. Kelly и соавт. свидетельствовали об увеличении максимального потребления кислорода на 10,1 % ($p = 0,015$), а ударного объема сердца на 19 % ($p = 0,007$) в послеоперационном периоде [38]. Данные R.E. Kelly совпадали с результатами B.V. Das [65] и соавт., а также D.L. Sigalet и соавт. [52].

Сердечно-сосудистая и дыхательная системы тесно взаимосвязаны, и воздействие на одну из них будет влиять на другую [20]. Однако, по мнению большинства авторов, изменение паттерна дыхания у пациентов с ВДГК после удаления металлоконструкции не объясняет улучшения толерантности к физическим нагрузкам [9, 20, 50]. C.M. Humphries и соавт. предложили следующее объяснение: во время физической нагрузки требуется дополнительный сердечный выброс, а сдавленный правый желудочек не может обеспечить увеличения ударного объема из-за ограничения диастолического наполнения. Это приводит к компенсаторному увеличению частоты сердечных сокращений для обеспечения потребности организма в кислороде. Как только достигается максимальная частота сердечных сокращений, дальнейшего увеличения сердечного выброса не происходит и у пациента с ВДГК возникает одышка и, следовательно, ограничение переносимости физической нагрузки. Устранение сдавления правого желудочка приводит к увеличению его объема [66], как это продемонстрировано во многих исследованиях [58, 60, 65].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

За последние десятилетия произошла эволюция взглядов от восприятия ВДГК как исключительно эстетической проблемы. Появились доказательства компрессии деформированной грудной клеткой сердца и изменения биомеханики дыхания. Сравнительный анализ параметров ФВД и эхокардиографии в до- и послеоперационном периоде, исследованных в состоянии покоя, в большинстве случаев свидетельствует об улучшении функции сердечно-легочной системы после хирургического вмешательства. Важным моментом при анализе результатов хирургического лечения, по данным этих исследований, являются сроки их проведения, особенно это касается анализа параметров спирометрии. Результаты нагрузочного кардиопульмонального тестирования после коррекции ретростернального пространства, представленные в литературе, малочисленны и весьма неоднородны, однако эти

исследования свидетельствуют об улучшении адаптации сердечно-легочной системы к нагрузке после хирургического вмешательства. Таким образом, хирургическое восстановление объема ретростерального пространства позволяет улучшить функциональные возможности сердца и легких.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Источник финансирования. Исследование выполнено в рамках темы НИР «Комплексное лечение детей с врожденной деформацией грудной клетки, позвоночника

и нестабильностью грудино-реберного комплекса» (регистрационный номер 1023021600029-8-3.2.10).

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Вклад авторов. Все авторы внесли существенный вклад в проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией.

Наибольший вклад распределен следующим образом: *А.М. Ходоровская* — написание текста статьи, поиск и анализ литературных источников; *Д.В. Рыжиков* — дизайн исследования, окончательное редактирование; *Б.Х. Долгиев* — поиск и анализ литературных источников.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Fokin A.A., Steuerwald N.M., Ahrens W.A., et al. Anatomical, histologic, and genetic characteristics of congenital chest wall deformities // *Semin Thorac Cardiovasc Surg.* 2009. Vol. 21, N 1. P. 44–57. doi: 10.1053/j.semtcvs.2009.03.001
2. Goretzky M.J., McGuire M.M. Complications associated with the minimally invasive repair of pectus excavatum // *Semin Pediatr Surg.* 2018. Vol. 27, N 3. P. 151–155. doi: 10.1053/j.sempedsurg.2018.05.001
3. Westphal F.L., Lima L.C., Lima N., et al. Prevalence of pectus carinatum and pectus excavatum in students in the city of Manaus // *Brazil J Bras Pneumol.* 2009. Vol. 35, N 3. P. 221–226. doi: 10.1590/s1806-37132009000300005
4. Billar R.J., Manoubi W., Kant S.G., et al. Association between pectus excavatum and congenital genetic disorders: a systematic review and practical guide for the treating physician // *J Pediatr Surg.* 2021. Vol. 56, N 12. P. 2239–2252. doi: 10.1016/j.jpedsurg.2021.04.016
5. Ходоровская А.М., Агранович О.Е., Савина М.В., и др. Синдром Поланда – Мёбиуса (клинический случай и обзор литературы) // *Ортопедия, травматология и восстановительная хирургия детского возраста.* 2024. Т. 12, № 1. С. 53–64. EDN: MJXMHT doi: 10.17816/PTORS623349
6. Creswick H.A., Stacey M.W., Kelly R.E. Jr., et al. Family study of the inheritance of pectus excavatum // *J Pediatr Surg.* 2006. Vol. 41, N 10. P. 1699–1703. doi: 10.1016/j.jpedsurg.2006.05.071
7. Fonkalsrud E.W. Current management of pectus excavatum // *World J Surg.* 2003. Vol. 27, N 5. P. 502–508. doi: 10.1007/s00268-003-7025-5
8. Koumbourlis A.C., Stolar C.J. Lung growth and function in children and adolescents with idiopathic pectus excavatum // *Pediatr. Pulmonol.* 2004. Vol. 38, N 4. P. 339–343. doi: 10.1002/ppul.20062
9. Kelly R.E. Jr., Obermeyer R.J., Nuss D. Diminished pulmonary function in pectus excavatum: from denying the problem to finding the mechanism // *Ann Cardiothorac Surg.* 2016. Vol. 5, N. 5. P. 466–475. doi: 10.21037/acs.2016.09.09
10. Biavati M., Kozlitina J., Alder A. C., et al. Prevalence of pectus excavatum in an adult population-based cohort estimated from radiographic indices of chest wall shape // *PLoS One.* 2020. Vol. 15, N. 5. doi: 10.1371/journal.pone.0232575
11. Skrzypczak P., Kamiński M., Pawlak K., et al. Seasonal interest in pectus excavatum and pectus carinatum: a retrospective analysis of Google Trends data // *J Thorac Dis.* 2021. Vol. 13, N. 2. P. 1036–1044. doi: 10.21037/jtd-20-2924
12. Jayaramakrishnan K., Wotton R., Bradley A., et al. Does repair of pectus excavatum improve cardiopulmonary function? // *Interact Cardiovasc Thorac Surg.* 2013. Vol. 16, N. 6. P. 865–870. doi: 10.1093/icvts/ivt045
13. Долгиев Б.Х., Рыжиков Д.В., Виссарионов С.В. Хирургическое лечение детей с асимметричной воронкообразной деформацией грудной клетки (обзор литературы) // *Ортопедия, травматология и восстановительная хирургия детского возраста.* 2022. Т. 10. № 4. С. 471–479. EDN: VCVCLZ doi: 10.17816/PTORS112043
14. Malek M.H., Berger D.E., Marelich W.D., et al. Pulmonary function following surgical repair of pectus excavatum: a meta-analysis // *Eur J Cardiothorac Surg.* 2006. Vol. 30, N 4. P. 637–643. doi: 10.1016/j.ejcts.2006.07.004
15. Dupuis M., Daussy L., Noel-Savina E., et al. Impact of pectus excavatum on pulmonary function and exercise capacity in patients treated with 3D custom-made silicone implants // *Ann Chir Plast Esthet.* 2024. Vol. 69, N 1. P. 53–58. doi: 10.1016/j.anplas.2023.01.002
16. Eideken J., Wolferth C.C. The heart in funnel chest // *Am J M Sci.* 1932. Vol. 84. P. 445–452.
17. Pimenta J., Vieira A., Henriques-Coelho T. Ventricular arrhythmia solved by surgical correction of pectus excavatum // *Interact Cardiovasc Thorac Surg.* 2018. Vol. 26, N 4. P. 706–708. doi: 10.1093/icvts/ivx397
18. Landtman B. The heart in funnel chest; pre- and postoperative studies of seventy cases // *Ann Paediatr Fenn.* 1958. Vol. 4, N 3. P. 181–190.
19. Mocchegiani R., Badano L., Lestuzzi C., et al. Relation of right ventricular morphology and function in pectus excavatum to the severity of the chest wall deformity // *Am J Cardiol.* 1995. Vol. 76, N 12. P. 941–946. doi: 10.1016/s0002-9149(99)80266-5
20. Jaroszewski D.E., Velazco C.S., Pulivarthi V.S.K.K., et al. Cardiopulmonary function in thoracic wall deformities: what do we really know? // *Eur J Pediatr Surg.* 2018. Vol. 28, N 4. P. 327–346. doi: 10.1055/s-0038-1668130
21. Chu Z., Yu J., Yang Z. et al. Correlation between sternal depression and cardiac rotation in pectus excavatum: evaluation with helical CT // *AJR.* 2010. Vol. 195, N 1. P. W76–W80. doi: 10.2214/AJR.09.3199
22. Sarioglu F.C., Gezer N.S., Odaman H., et al. Lung density analysis using quantitative computed tomography in children with pectus excavatum // *Pol J Radiol.* 2021. Vol. 86. P. 372–e379. doi: 10.5114/pjr.2021.107685
23. Malek M.H., Berger D.E., Housh T.J., et al. Cardiovascular function following surgical repair of pectus excavatum: a meta-analysis // *Chest.* 2006. Vol. 130, N 2. P. 506–516. doi: 10.1378/chest.130.2.506

24. Guntheroth W.G., Spiers P.S. Cardiac function before and after surgery for pectus excavatum // *Am J Cardiol.* 2007. Vol. 99, N 12. P. 1762–1764. doi: 10.1016/j.amjcard.2007.01.064
25. Liu C., Wen Y. Research progress in the effects of pectus excavatum on cardiac functions // *World J Pediatr Surg.* 2020. Vol. 3, N 2. doi: 10.1136/wjps-2020-000142
26. Chao C.J., Jaroszewski D.E., Kumar P.N., et al. Surgical repair of pectus excavatum relieves right heart chamber compression and improves cardiac output in adult patients – an intraoperative transesophageal echocardiographic study // *Am J Surg.* 2015. Vol. 210, N 6. P. 1118–1124. doi: 10.1016/j.amjsurg.2015.07.006
27. Jeong J.Y., Park H.J., Lee J., et al. Cardiac morphologic changes after the Nuss operation for correction of pectus excavatum // *Ann Thorac Surg.* 2014. Vol. 97, N 2. P. 474–478. doi: 10.1016/j.athoracsur.2013.10.018
28. Coln E., Carrasco J., Coln D. Demonstrating relief of cardiac compression with the Nuss minimally invasive repair for pectus excavatum // *J Pediatr Surg.* 2006. Vol. 41, N 4. P. 683–686. doi: 10.1016/j.jpedsurg.2005.12.009
29. Karabulut M. Increased incidence of mitral valve prolapse in children with pectus chest wall deformity // *Pediatr Int.* 2023. Vol. 65, N 1. P. 15582. doi: 10.1111/ped.15582
30. Lain A., Giralt G., Giné C., et al. Transesophageal echocardiography during pectus excavatum correction in children: what happens to the heart? // *J Pediatr Surg.* 2021. Vol. 56, N 5. P. 988–994. doi: 10.1016/j.jpedsurg.2020.06.009
31. Jaroszewski D.E., Farina J.M., Gotway M.B. et al. Cardiopulmonary outcomes after the nuss procedure in pectus excavatum // *J Am Heart Assoc.* 2022. Vol. 11, N 7. doi: 10.1161/JAHA.121.022149
32. Chao C.J., Jaroszewski D., Gotway M., et al. Effects of pectus excavatum repair on right and left ventricular strain // *Ann Thorac Surg.* 2018. Vol. 105, N 1. P. 294–301. doi: 10.1016/j.athoracsur.2017.08.017
33. Töpper A., Polleichtner S., Zagrosek A., et al. Impact of surgical correction of pectus excavatum on cardiac function: insights on the right ventricle. A cardiovascular magnetic resonance study // *Interact Cardiovasc Thorac Surg.* 2016. Vol. 22, N 1. P. 38–46. doi: 10.1093/icvts/ivv286
34. Krueger T., Chassot P.G., Christodoulou M., et al. Cardiac function assessed by transesophageal echocardiography during pectus excavatum repair // *Ann Thorac Surg.* 2010. Vol. 89, N 1. P. 240–243. doi: 10.1016/j.athoracsur.2009.06.126
35. O’Keefe J., Byrne R., Montgomery M. Longer term effects of closed repair of pectus excavatum on cardiopulmonary status // *Journal of Pediatric Surgery.* 2013. Vol. 48, N 5. P. 1049–1054. doi: 10.1016/j.jpedsurg.2013.02.024
36. Obermeyer R.J., Cohen N.S., Jaroszewski D.E. The physiologic impact of pectus excavatum repair // *Semin Pediatr Surg.* 2018. Vol. 27, N 3. P. 127–132. doi: 10.1053/j.sempedsurg.2018.05.005
37. Tang M., Nielsen H.H., Lesbo M., et al. Improved cardiopulmonary exercise function after modified Nuss operation for pectus excavatum // *Eur J Cardiothorac Surg.* 2012. Vol. 41, N 5. P. 1063–1067. doi: 10.1093/ejcts/ezr170
38. Kelly Jr R.E., Mellins R.B., Shamberger R.C., et al. Multicenter study of pectus excavatum, final report: complications, static/exercise pulmonary function, and anatomic outcomes // *J Am Coll Surg.* 2013. Vol. 217, N 6. P. 1080–1089. doi: 10.1016/j.jamcollsurg.2013.06.019
39. Рузикулов У.Ш. Клинические проявления воронкообразной деформации грудной клетки у детей различного возраста // *Журнал теоретической и клинической медицины.* 2014. № 2. С. 110–112. EDN: ZBLVFB
40. Nuss D., Obermeyer R.J., Kelly R.E. Pectus excavatum from a pediatric surgeon’s perspective // *Ann Cardiothorac Surg.* 2016. Vol. 5, N 5. P. 493–500. doi: 10.21037/acs.2016.06.04
41. Jaroszewski D.E. Physiologic implications of pectus excavatum // *J Thorac Cardiovasc Surg.* 2017. Vol. 153, N 1. P. 218–219. doi: 10.1016/j.jtcvs.2016.09.045
42. Kelly R.E.Jr., Obermeyer R.J., Goretsky M.J., et al. Recent modifications of the Nuss procedure: the pursuit of safety during the minimally invasive repair of pectus excavatum // *Ann Surg.* 2022. Vol. 275, N 2. P. e496–e502. doi: 10.1097/SLA.0000000000003877
43. Sarwar Z.U., DeFlorio R., O’Connor S.C., et al. Pectus excavatum: current imaging techniques and opportunities for dose reduction // *Semin Ultrasound CT MR.* 2014. Vol. 35, N 4. P. 374–381. doi: 10.1053/j.sult.2014.05.003
44. Ramadan S., Wilde J., Tabard-Fougère A., et al. Cardiopulmonary function in adolescent patients with pectus excavatum or carinatum // *BMJ Open Respir Res.* 2021. Vol. 8, N 1. doi: 10.1136/bmjresp-2021-001020
45. Katrancioğlu O., Karadayı Ş.U.L.E., Kutanoglu N. Outcomes of the minimally invasive Nuss procedure for pectus excavatum // *Medicine Science.* 2024. Vol. 13, N 1. P. 126–130. doi: 10.5455/medscience.2023.12.229
46. Culver B.H., Graham B.L., Coates A.L., et al. Recommendations for a standardized pulmonary function report. an official American Thoracic Society technical statement // *Am J Respir Crit Care Med.* 2017. Vol. 196, N 11. P. 1463–1472. doi: 10.1164/rccm.201710-1981ST
47. LoMauro A., Pochintesta S., Romei M., et al. Rib cage deformities alter respiratory muscle action and chest wall function in patients with severe osteogenesis imperfecta // *PLoS One.* 2012. Vol. 7, N 4. doi: 10.1371/journal.pone.0035965
48. Redlinger R.E. Jr, Kelly R.E., Nuss D., et al. Regional chest wall motion dysfunction in patients with pectus excavatum demonstrated via optoelectronic plethysmography // *J Pediatr Surg.* 2011. Vol. 46, N 6. P. 1172–1176. doi: 10.1016/j.jpedsurg.2011.03.047
49. Binazzi B., Innocenti Bruni G., Coli C., et al. Chest wall kinematics in young subjects with Pectus excavatum // *Respir Physiol Neurobiol.* 2012. Vol. 180, N 2–3. P. 211–217. doi: 10.1016/j.resp.2011.11.008
50. Janssen N., Coorens N.A., Franssen A.J.P.M., et al. Pectus excavatum and carinatum: a narrative review of epidemiology, etiopathogenesis, clinical features, and classification // *J Thorac Dis.* 2024. Vol. 16, N 2. P. 1687–1701. doi: 10.21037/jtd-23-957
51. Maagaard M., Tang M., Ringgaard S., et al. Normalized cardiopulmonary exercise function in patients with pectus excavatum three years after operation // *Ann Thorac Surg.* 2013. Vol. 96, N 1. P. 272–278. doi: 10.1016/j.athoracsur.2013.03.034
52. Sigalet D.L., Montgomery M., Harder J. Cardiopulmonary effects of closed repair of pectus excavatum // *J Pediatr Surg.* 2003. Vol. 38, N 3. P. 380–385. doi: 10.1053/jpsu.2003.50112
53. Jeong J.Y., Ahn J.H., Kim S.Y., et al. Pulmonary function before and after the Nuss procedure in adolescents with pectus excavatum: correlation with morphological subtypes // *J Cardiothorac Surg.* 2015. Vol. 10. P. 37. doi: 10.1186/s13019-015-0236-7
54. Borowitz D., Cerny F., Zallen G., et al. Pulmonary function and exercise response in patients with pectus excavatum after Nuss repair // *J Pediatr Surg.* 2003. Vol. 38, N 4. P. 544–547. doi: 10.1053/jpsu.2003.50118
55. Jukić M., Mustapić I., Šušnjar T., et al. Minimally invasive modified Nuss procedure for repair of pectus excavatum in pediatric patients: single-centre retrospective observational study // *Children (Basel, Switzerland).* 2021. Vol. 8, N 11. P. 1071. doi: 10.3390/children8111071

56. Noguchi M., Hoshino Y., Yaguchi K., et al. Does aggressive respiratory rehabilitation after primary Nuss procedure improve pulmonary function? // *J Pediatr Surg.* 2020. Vol. 55, N 4. P. 615–618. doi: 10.1016/j.jpedsurg.2019.05.023

57. Szydlak S., Jankowska-Szydlak J., Zwaruń D. et al. An effect of Nuss procedure on lung function among patients with pectus excavatum // *Pol Przegl Chir.* 2013. Vol. 85, N 1. P. 1–5. doi: 10.2478/pjs-2013-0001

58. Zens T.J., Casar Berazaluce A.M., Jenkins T.M., et al. The severity of pectus excavatum defect is associated with impaired cardiopulmonary function // *Ann Thorac Surg.* 2022. Vol. 114, N 3. P. 1015–1021. doi: 10.1016/j.athoracsur.2021.07.051

59. Del Frari B., Blank C., Sigl S., et al. The questionable benefit of pectus excavatum repair on cardiopulmonary function: a prospective study // *Eur J Cardiothorac Surg.* 2021. Vol. 61, N 1. P. 75–82. doi: 10.1093/ejcts/ezab296

60. Dreher C., Reinsberg, M., Oetmann von Sochaczewski C. Changes in pulmonary functions of adolescents with pectus excavatum throughout the Nuss procedure // *J Pediatr Surg.* 2023. Vol.58, N 9. P. 1674–1678. doi: 10.1016/j.jpedsurg.2023.02.057

61. Wang Q., Fan S., Wu C., et al. Changes in resting pulmonary function testing over time after the Nuss procedure: a systematic review

and meta-analysis // *J Pediatr Surg.* 2018. Vol. 53, N 11. P. 2299–2306. doi: 10.1016/j.jpedsurg.2018.02.052

62. Walsh J., Walsh R., Redmond K. Systematic review of physiological and psychological outcomes of surgery for pectus excavatum supporting commissioning of service in the UK // *BMJ Open Respir Res.* 2023. Vol. 10, N 1. doi: 10.1136/bmjresp-2023-001665

63. Wynn S.R., Driscoll D.J., Ostrom N.K., et al. Exercise cardiorespiratory function in adolescents with pectus excavatum. Observations before and after operation // *J Thorac Cardiovasc Surg.* 1990. Vol. 99, N 1. P. 41–47.

64. Castellani C., Windhaber J., Schober P.H., et al. Exercise performance testing in patients with pectus excavatum before and after Nuss procedure // *Pediatr Surg Int.* 2010. Vol. 26, N 7. P. 659–663. doi: 10.1007/s00383-010-2627-0

65. Das B.B., Recto M.R., Yeh T. Improvement of cardiopulmonary function after minimally invasive surgical repair of pectus excavatum (Nuss procedure) in children // *Ann Pediatr Cardiol.* 2019. Vol. 12, N 2. P. 77–82. doi: 10.4103/apc.APC_121_18

66. Humphries C.M., Anderson J.L., Flores J.H., et al. Cardiac magnetic resonance imaging for perioperative evaluation of sternal eversion for pectus excavatum // *Eur J Cardiothorac Surg.* 2013. Vol. 43, N 6. P. 1110–1113. doi: 10.1093/ejcts/ezs662

REFERENCES

1. Fokin AA, Steuerwald NM, Ahrens WA, et al. Anatomical, histologic, and genetic characteristics of congenital chest wall deformities. *Semin Thorac Cardiovasc Surg.* 2009;21(1):44–57. doi: 10.1053/j.semctvs.2009.03.001

2. Goretsky MJ, McGuire MM. Complications associated with the minimally invasive repair of pectus excavatum. *Semin Pediatr Surg.* 2018;27(3):151–155. doi: 10.1053/j.sempedsurg.2018.05.001

3. Westphal FL, Lima LC, Lima Neto JC, et al. Prevalence of pectus carinatum and pectus excavatum in students in the city of Manaus, Brazil. *J Bras Pneumol.* 2009;35(3):221–226. doi: 10.1590/s1806-37132009000300005

4. Billar RJ, Manoubi W, Kant SG, et al. Association between pectus excavatum and congenital genetic disorders: a systematic review and practical guide for the treating physician. *J Pediatr Surg.* 2021;56(12):2239–2252. doi: 10.1016/j.jpedsurg.2021.04.016

5. Khodorovskaya AM, Agranovich OE, Savina MV, et al. Poland-Mebius syndrome: a clinical case and review of the literature. *Pediatric Traumatology, Orthopaedics and Reconstructive Surgery.* 2024;12(1):53–64. EDN: MJXMHT doi: 10.17816/PTORS623349

6. Creswick HA, Stacey MW, Kelly RE Jr, et al. Family study of the inheritance of pectus excavatum. *J Pediatr Surg.* 2006;41(10):1699–1703. doi: 10.1016/j.jpedsurg.2006.05.071

7. Fonkalsrud EW. Current management of pectus excavatum. *World J Surg.* 2003;27(5):502–508. doi: 10.1007/s00268-003-7025-5

8. Koumbourlis AC, Stolar CJ. Lung growth and function in children and adolescents with idiopathic pectus excavatum. *Pediatr Pulmonol.* 2004;38(4):339–343. doi: 10.1002/ppul.20062

9. Kelly RE Jr, Obermeyer RJ, Nuss D. Diminished pulmonary function in pectus excavatum: from denying the problem to finding the mechanism. *Ann Cardiothorac Surg.* 2016;5(5):466–475. doi: 10.21037/acs.2016.09.09

10. Biavati M, Kozlitina J, Alder AC, et al. Prevalence of pectus excavatum in an adult population-based cohort estimated from radiographic indices of chest wall shape. *PLoS One.* 2020;15(5). doi: 10.1371/journal.pone.0232575

11. Skrzypczak P, Kamiński M, Pawlak K, et al. Seasonal interest in pectus excavatum and pectus carinatum: a retrospective analysis of Google Trends data. *J Thorac Dis.* 2021;13(2):1036–1044. doi: 10.21037/jtd-20-2924

12. Jayaramkrishnan K, Wotton R, Bradley A, et al. Does repair of pectus excavatum improve cardiopulmonary function? *Interact Cardiovasc Thorac Surg.* 2013;16(6):865–870. doi: 10.1093/icvts/ivt045

13. Dolgiev BH, Ryzhikov DV, Vissarionov SV. Surgical treatment of children with asymmetric pectus excavatum: literature review. *Pediatric Traumatology, Orthopaedics and Reconstructive Surgery.* 2022;10(4):471–479. EDN: VCVCLZ doi: 10.17816/PTORS112043

14. Malek MH, Berger DE, Marelich WD, et al. Pulmonary function following surgical repair of pectus excavatum: a meta-analysis. *Eur J Cardiothorac Surg.* 2006;30(4):637–643. doi: 10.1016/j.ejcts.2006.07.004

15. Dupuis M, Daussy L, Noel-Savina E, et al. Impact of pectus excavatum on pulmonary function and exercise capacity in patients treated with 3D custom-made silicone implants. *Ann Chir Plast Esthet.* 2024;69(1):53–58. doi: 10.1016/j.anplas.2023.01.002

16. Eideken J, Wolferth CC. The heart in funnel chest. *Am J M Sci.* 1932;84:445–452.

17. Pimenta J, Vieira A, Henriques-Coelho T. Ventricular arrhythmia solved by surgical correction of pectus excavatum. *Interact Cardiovasc Thorac Surg.* 2018;26(4):706–708. doi: 10.1093/icvts/ivx397

18. Landtman B. The heart in funnel chest; pre- and postoperative studies of seventy cases. *Ann Paediatr Fenn.* 1958;4(3):181–190.

19. Mocchegiani R, Badano L, Lestuzzi C, et al. Relation of right ventricular morphology and function in pectus excavatum to the severity of the chest wall deformity. *Am J Cardiol.* 1995;76(12):941–946. doi: 10.1016/s0002-9149(99)80266-5

20. Jaroszewski DE, Velazco CS, Pulivarthi VSKK, et al. Cardiopulmonary function in thoracic wall deformities: what do we really know? *Eur J Pediatr Surg.* 2018;28(4):327–346. doi: 10.1055/s-0038-1668130

21. Chu ZG, Yu JQ, Yang ZG, et al. Correlation between sternal depression and cardiac rotation in pectus excavatum: evaluation with helical CT. *AJR Am J Roentgenol.* 2010;195(1):W76–W80. doi: 10.2214/AJR.09.3199
22. Sarioglu FC, Gezer NS, Odaman H, et al. Lung density analysis using quantitative computed tomography in children with pectus excavatum. *Pol J Radiol.* 2021;86:372–e379. doi: 10.5114/pjr.2021.107685
23. Malek MH, Berger DE, Housh TJ, et al. Cardiovascular function following surgical repair of pectus excavatum: a meta-analysis. *Chest.* 2006;130(2):506–516. doi: 10.1378/chest.130.2.506
24. Guntheroth WG, Spiers PS. Cardiac function before and after surgery for pectus excavatum. *Am J Cardiol.* 2007;99(12):1762–1764. doi: 10.1016/j.amjcard.2007.01.064
25. Liu C, Wen Y. Research progress in the effects of pectus excavatum on cardiac functions. *World J Pediatr Surg.* 2020;3(2). doi: 10.1136/wjps-2020-000142
26. Chao CJ, Jaroszewski DE, Kumar PN, et al. Surgical repair of pectus excavatum relieves right heart chamber compression and improves cardiac output in adult patients – an intraoperative transesophageal echocardiographic study. *Am J Surg.* 2015;210(6):1118–1125. doi: 10.1016/j.amjsurg.2015.07.006
27. Jeong JY, Park HJ, Lee J, et al. Cardiac morphologic changes after the Nuss operation for correction of pectus excavatum. *Ann Thorac Surg.* 2014;97(2):474–478. doi: 10.1016/j.athoracsur.2013.10.018
28. Coln E, Carrasco J, Coln D. Demonstrating relief of cardiac compression with the Nuss minimally invasive repair for pectus excavatum. *J Pediatr Surg.* 2006;41(4):683–686. doi: 10.1016/j.jpedsurg.2005.12.009
29. Karabulut M. Increased incidence of mitral valve prolapse in children with pectus chest wall deformity. *Pediatr Int.* 2023;65(1). doi: 10.1111/ped.15582
30. Lain A, Giralt G, Giné C, et al. Transesophageal echocardiography during pectus excavatum correction in children: what happens to the heart? *J Pediatr Surg.* 2021;56(5):988–994. doi: 10.1016/j.jpedsurg.2020.06.009
31. Jaroszewski DE, Farina JM, Gotway MB, et al. Cardiopulmonary outcomes after the nuss procedure in pectus excavatum. *J Am Heart Assoc.* 2022;11(7). doi: 10.1161/JAHA.121.022149
32. Chao CJ, Jaroszewski D, Gotway M, et al. Effects of pectus excavatum repair on right and left ventricular strain. *Ann Thorac Surg.* 2018;105(1):294–301. doi: 10.1016/j.athoracsur.2017.08.017
33. Töpper A, Polleichtner S, Zagrosek A, et al. Impact of surgical correction of pectus excavatum on cardiac function: insights on the right ventricle. A cardiovascular magnetic resonance study. *Interact Cardiovasc Thorac Surg.* 2016;22(1):38–46. doi: 10.1093/icvts/ivv286
34. Krueger T, Chassot PG, Christodoulou M, et al. Cardiac function assessed by transesophageal echocardiography during pectus excavatum repair. *Ann Thorac Surg.* 2010;89(1):240–243. doi: 10.1016/j.athoracsur.2009.06.126
35. O’Keefe J, Byrne R, Montgomery M, et al. Longer term effects of closed repair of pectus excavatum on cardiopulmonary status. *J Pediatr Surg.* 2013;48(5):1049–1054. doi: 10.1016/j.jpedsurg.2013.02.024
36. Obermeyer RJ, Cohen NS, Jaroszewski DE. The physiologic impact of pectus excavatum repair. *Semin Pediatr Surg.* 2018;27(3):127–132. doi: 10.1053/j.sempedsurg.2018.05.005
37. Tang M, Nielsen HH, Lesbo M, et al. Improved cardiopulmonary exercise function after modified Nuss operation for pectus excavatum. *Eur J Cardiothorac Surg.* 2012;41(5):1063–1067. doi: 10.1093/ejcts/ezr170
38. Kelly RE Jr, Mellins RB, Shamberger RC, et al. Multicenter study of pectus excavatum, final report: complications, static/exercise pulmonary function, and anatomic outcomes. *J Am Coll Surg.* 2013;217(6):1080–1089. doi: 10.1016/j.jamcollsurg.2013.06.019
39. Ruzikulov USh. Clinical manifestations of funnel chest deformity in children of different ages. *Journal of Theoretical and Clinical Medicine.* 2014;(2):110–112. EDN: ZBLVFB (In Russ.)
40. Nuss D, Obermeyer RJ, Kelly RE Jr. Pectus excavatum from a pediatric surgeon’s perspective. *Ann Cardiothorac Surg.* 2016;5(5):493–500. doi: 10.21037/acs.2016.06.04
41. Jaroszewski DE. Physiologic implications of pectus excavatum. *J Thorac Cardiovasc Surg.* 2017;153(1):218–219. doi: 10.1016/j.jtcvs.2016.09.045
42. Kelly RE Jr, Obermeyer RJ, Goretsky MJ, et al. Recent modifications of the Nuss procedure: the pursuit of safety during the minimally invasive repair of pectus excavatum. *Ann Surg.* 2022;275(2):e496–e502. doi: 10.1097/SLA.0000000000003877
43. Sarwar ZU, DeFlorio R, O’Connor SC. Pectus excavatum: current imaging techniques and opportunities for dose reduction. *Semin Ultrasound CT MR.* 2014;35(4):374–381. doi: 10.1053/j.sult.2014.05.003
44. Ramadan S, Wilde J, Tabard-Fougère A, et al. Cardiopulmonary function in adolescent patients with pectus excavatum or carinatum. *BMJ Open Respir Res.* 2021;8(1). doi: 10.1136/bmjresp-2021-001020
45. Katrancioglu O, Karadayi ŞULE, Kutanoglu N. Outcomes of the minimally invasive Nuss procedure for pectus excavatum. *Medicine Science.* 2024;13(1):126–130. doi: 10.5455/medscience.2023.12.229
46. Culver BH, Graham BL, Coates AL, et al. Recommendations for a standardized pulmonary function report. an official American Thoracic Society technical statement. *Am J Respir Crit Care Med.* 2017;196(11):1463–1472. doi: 10.1164/rccm.201710-1981ST
47. LoMauro A, Pochintesta S, Romei M, et al. Rib cage deformities alter respiratory muscle action and chest wall function in patients with severe osteogenesis imperfecta. *PLoS One.* 2012;7(4). doi: 10.1371/journal.pone.0035965
48. Redlinger RE Jr, Kelly RE, Nuss D, et al. Regional chest wall motion dysfunction in patients with pectus excavatum demonstrated via optoelectronic plethysmography. *J Pediatr Surg.* 2011;46(6):1172–1176. doi: 10.1016/j.jpedsurg.2011.03.047
49. Binazzi B, Innocenti Bruni G, Coli C, et al. Chest wall kinematics in young subjects with Pectus excavatum. *Respir Physiol Neurobiol.* 2012;180(2–3):211–217. doi: 10.1016/j.resp.2011.11.008
50. Janssen N, Coorens NA, Franssen AJPM, et al. Pectus excavatum and carinatum: a narrative review of epidemiology, etiopathogenesis, clinical features, and classification. *J Thorac Dis.* 2024;16(2):1687–1701. doi: 10.21037/jtd-23-957
51. Maagaard M, Tang M, Ringgaard S, et al. Normalized cardiopulmonary exercise function in patients with pectus excavatum three years after operation. *Ann Thorac Surg.* 2013;96(1):272–278. doi: 10.1016/j.athoracsur.2013.03.034
52. Sigalet DL, Montgomery M, Harder J. Cardiopulmonary effects of closed repair of pectus excavatum. *J Pediatr Surg.* 2003;38(3):380–385. doi: 10.1053/jpsu.2003.50112
53. Jeong JY, Ahn JH, Kim SY, et al. Pulmonary function before and after the Nuss procedure in adolescents with pectus excavatum: correlation with morphological subtypes. *J Cardiothorac Surg.* 2015;10:37. doi: 10.1186/s13019-015-0236-7
54. Borowitz D, Cerny F, Zallen G, et al. Pulmonary function and exercise response in patients with pectus excavatum after Nuss repair. *J Pediatr Surg.* 2003;38(4):544–547. doi: 10.1053/jpsu.2003.50118
55. Jukić M, Mustapić I, Šušnjar T, et al. Minimally invasive modified Nuss procedure for repair of pectus excavatum in pediatric patients:

single-centre retrospective observational study. *Children (Basel)*. 2021;8(11):1071. doi: 10.3390/children8111071

56. Noguchi M, Hoshino Y, Yaguchi K, et al. Does aggressive respiratory rehabilitation after primary nuss procedure improve pulmonary function? *J Pediatr Surg*. 2020;55(4):615–618. doi: 10.1016/j.jpedsurg.2019.05.023

57. Szydlak S, Jankowska-Szydlak J, Zwaruń D, et al. An effect of Nuss procedure on lung function among patients with pectus excavatum. *Pol Przegl Chir*. 2013;85(1):1–5. doi: 10.2478/pjs-2013-0001

58. Zens TJ, Casar Berazaluze AM, Jenkins TM, et al. The severity of pectus excavatum defect is associated with impaired cardiopulmonary function. *Ann Thorac Surg*. 2022;114(3):1015–1021. doi: 10.1016/j.athoracsur.2021.07.051

59. Del Frari B, Blank C, Sigl S, et al. The questionable benefit of pectus excavatum repair on cardiopulmonary function: a prospective study. *Eur J Cardiothorac Surg*. 2021;61(1):75–82. doi: 10.1093/ejcts/ezab296

60. Dreher C, Reinsberg M, Oetzmann von Sochaczewski C, et al. Changes in pulmonary functions of adolescents with pectus excavatum throughout the Nuss procedure. *J Pediatr Surg*. 2023;58(9):1674–1678. doi: 10.1016/j.jpedsurg.2023.02.057

61. Wang Q, Fan S, Wu C, et al. Changes in resting pulmonary function testing over time after the Nuss procedure: a systematic

review and meta-analysis. *J Pediatr Surg*. 2018;53(11):2299–2306. doi: 10.1016/j.jpedsurg.2018.02.052

62. Walsh J, Walsh R, Redmond K. Systematic review of physiological and psychological outcomes of surgery for pectus excavatum supporting commissioning of service in the UK. *BMJ Open Respir Res*. 2023;10(1). doi: 10.1136/bmjresp-2023-001665

63. Wynn SR, Driscoll DJ, Ostrom NK, et al. Exercise cardiorespiratory function in adolescents with pectus excavatum. Observations before and after operation. *J Thorac Cardiovasc Surg*. 1990;99(1):41–47.

64. Castellani C, Windhaber J, Schober PH, et al. Exercise performance testing in patients with pectus excavatum before and after Nuss procedure. *Pediatr Surg Int*. 2010;26(7):659–663. doi: 10.1007/s00383-010-2627-0

65. Das BB, Recto MR, Yeh T. Improvement of cardiopulmonary function after minimally invasive surgical repair of pectus excavatum (Nuss procedure) in children. *Ann Pediatr Cardiol*. 2019;12(2):77–82. doi: 10.4103/apc.APC_121_18

66. Humphries CM, Anderson JL, Flores JH, et al. Cardiac magnetic resonance imaging for perioperative evaluation of sternal eversion for pectus excavatum. *Eur J Cardiothorac Surg*. 2013;43(6):1110–1113. doi: 10.1093/ejcts/ezs662

ОБ АВТОРАХ

* **Алина Михайловна Ходоровская;**

адрес: Россия, 196603, Санкт-Петербург, Пушкин,
ул. Парковая, д. 64–68;
ORCID: 0000-0002-2772-6747;
eLibrary SPIN: 3348-8038;
e-mail: alinamyh@gmail.com

Дмитрий Владимирович Рыжиков, канд. мед. наук;

ORCID: 0000-0002-7824-7412;
eLibrary SPIN: 7983-4270;
e-mail: dryjikov@yahoo.com

Багауддин Хавашевич Долгиев;

ORCID: 0000-0003-2184-5304;
eLibrary SPIN: 2348-4418;
e-mail: dr-b@bk.ru

AUTHOR INFORMATION

* **Alina M. Khodorovskaya,** MD;

address: 64–68 Parkovaya str.,
Pushkin, Saint Petersburg, 196603, Russia;
ORCID: 0000-0002-2772-6747;
eLibrary SPIN: 3348-8038;
e-mail: alinamyh@gmail.com

Dmitry V. Ryzhikov, MD, PhD, Cand. Sci. (Medicine);

ORCID: 0000-0002-7824-7412;
eLibrary SPIN: 7983-4270;
e-mail: dryjikov@yahoo.com

Bahauddin H. Dolgiev, MD;

ORCID: 0000-0003-2184-5304;
eLibrary SPIN: 2348-4418;
e-mail: dr-b@bk.ru

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author