

*На правах рукописи*

Кокушин  
Дмитрий Николаевич

**ХИРУРГИЧЕСКОЕ ЛЕЧЕНИЕ ДЕТЕЙ С ВРОЖДЕННЫМИ  
ДЕФОРМАЦИЯМИ ГРУДНОГО И ПОЯСНИЧНОГО ОТДЕЛОВ  
ПОЗВОНОЧНИКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИЙ  
3D-МОДЕЛИРОВАНИЯ И ПРОТОТИПИРОВАНИЯ**

3.1.8. Травматология и ортопедия

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора медицинских наук

Санкт-Петербург  
2024

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном учреждении «Национальный медицинский исследовательский центр детской травматологии и ортопедии имени Г.И. Турнера» Министерства здравоохранения Российской Федерации.

**Научный консультант:**

член-корреспондент РАН, доктор медицинских наук, профессор  
**Виссарионов Сергей Валентинович**

**Официальные оппоненты:**

**Губин Александр Вадимович** - доктор медицинских наук профессор, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет», Клиника высоких медицинских технологий им. Н.И. Пирогова, заместитель директора по медицинской части (травматология и ортопедия);

**Кулешов Александр Алексеевич** - доктор медицинских наук, ФГБУ «Национальный медицинский исследовательский центр травматологии и ортопедии им. Н.Н. Приорова» Минздрава России, 14 травматолого-ортопедическое отделение (вертебрологии), заведующий;

**Новиков Вячеслав Викторович** - доктор медицинских наук, ФГБУ «Новосибирский научно-исследовательский институт травматологии и ортопедии им. Я.Л. Цивьяна» Минздрава России, научно-исследовательское отделение детской и подростковой вертебрологии, начальник;

**Ведущая организация** – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Саратовский государственный медицинский университет им. В.И. Разумовского» Министерства здравоохранения Российской Федерации.

Защита состоится 25 марта 2025 года в \_\_\_\_\_ часов на заседании объединенного диссертационного совета 99.0.008.02 в ФГБУ «Национальный медицинский исследовательский центр травматологии и ортопедии имени Р.Р. Вредена» Минздрава России (195427, Санкт-Петербург, ул. акад. Байкова, дом 8).

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГБУ «НМИЦ ТО им. Р.Р. Вредена» Минздрава России и на сайте <http://dissovet.niito.ru/>

Автореферат разослан «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2025 г.

Ученый секретарь диссертационного совета 99.0.008.02  
доктор медицинских наук



Денисов А.О.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы исследования.

Частота встречаемости врожденных пороков развития позвоночника в общей структуре аномалий костно-мышечной системы составляет 2,8% - 3,2% (Залетина А.В. с соавт., 2018). Среди всех деформаций позвоночного столба врожденные искривления составляют от 2% до 11% (Виссарионов С.В. с соавт., 2014, 2023). Пороки развития позвонков, приводящие к тяжелой и грубой деформации позвоночника, более чем в 50% наблюдений расположены в зоне грудопоясничного перехода и в поясничном отделе (Виссарионов С.В., 2008, 2023; Михайловский М.В., Дюбуссе Ж.Ф., 2020).

Врожденную деформацию позвоночника (ВДП) грудной и поясничной локализации у детей относят к наиболее тяжелой патологии осевого скелета, которая обуславливает возникновение и дальнейшее бурное прогрессирование его деформации, приводит к грубым нарушениям биомеханики позвоночного столба и баланса туловища. (Рябых С. О., 2014; Виссарионов С. В., с соавт. 2023; Crostelli M. et al. 2014; Frank S. et al., 2023). Одним из наиболее серьезных и тяжелых осложнений является возникновение неврологических нарушений, формирующихся в результате вертебро-медуллярного конфликта (Кулешов А.А. с соавт., 2016; Новиков В.В. с соавт., 2016, 2018; Kontautas E. 2004; Javouhey E., 2006).

По мере развития детской вертебрыологии разработаны различные варианты хирургических вмешательств и тактических подходов, направленных на коррекцию врожденного искривления при помощи многоопорных спинальных систем. В последние годы появились исследования, посвященные оценке результатов коррекции ВДП при различных подходах и сравнительному анализу их эффективности, как среди отечественных, так и зарубежных авторов (Рябых С.О. с соавт, 2017; Мушкин А.Ю. с соавт., 2018; Виссарионов с соавт., 2023; Debnath U. et al., 2010; Chang D.G. et al., 2015; Frank S. et al., 2023).

Одновременно с этим необходимо подчеркнуть, что остается открытым вопрос протяженности металлофиксации при различных вариантах хирургического подхода в лечении детей с врожденными искривлениями позвоночника. Одни авторы считают, что коррекцию ВДП необходимо проводить, фиксируя минимальное количество позвоночно-двигательных сегментов и стабилизируя только смежные с аномальным позвонки (Виссарионов С.В. с соавт., 2012, 2013, 2023; Chang D.G. et al., 2015). Другие исследователи утверждают, что исправление ВДП необходимо осуществлять многоопорной металлоконструкцией с фиксацией позвонков, расположенных на протяжении нескольких позвоночно-двигательных сегментов выше и ниже относительно порочного позвонка (Li S. et al., 2015).

В последнее время при хирургическом лечении пациентов детского возраста с деформациями позвоночника все большее распространение получает использование аддитивных технологий (Губин А.В. с соавт., 2016; Бурцев А.В. с соавт., 2018; Кулешов А.А. с соавт., 2018, 2022; Косулин А.В. с соавт., 2022; Liu K. et al., 2017; Pan Y. et al., 2018; Vissarionov S.V., et al. 2020).

В настоящее время отсутствует какой-либо научно обоснованный консенсус профильных специалистов относительно применения технологий 3D-моделирования и прототипирования при хирургическом лечении детей с ВДП грудной и поясничной локализации, особенно при множественных пороках развития позвоночника.

#### **Степень разработанности темы исследования.**

Использование метода транспедикулярной фиксации (ТПФ) по сравнению с ламинарной и гибридной системами с позиций биомеханики обладает рядом преимуществ. Однако он, несет в себе риск возможной мальпозиции транспедикулярных винтов (ТВ), обусловленный прежде всего структуральными изменениями позвонков на фоне аномалий развития позвоночника (Кулешов А.А. с соавт., 2012, Новиков В.В. с

соавт., 2024). В связи с этим, важной составляющей в хирургическом лечении пациентов с врожденным сколиозом является контроль и обеспечение корректной установки транспедикулярных опорных элементов. Основным, достаточно широко распространенным методом установки ТВ при хирургическом лечении пациентов с патологией позвоночника в целом, и у пациентов детского возраста с врожденными деформациями, является метод «свободной руки» с последующим рентгенологическим контролем корректности положения транспедикулярных опорных элементов (Губин А.В. с соавт., 2015). В зарубежной литературе имеются единичные исследования, в которых авторы проводят анализ корректности положения ТВ, установленных детям с ВДП при помощи интраоперационного компьютерного томографа (O-arm) и системы активной оптической навигации (Larson A.N. et al., 2012). При этом необходимо отметить, что данные технологии применяются у пациентов старшей возрастной группы в связи с крупными размерами используемого инструментария. В последнее время все большее распространение получает использование шаблонов-направителей (ШН) для установки ТВ при различных заболеваниях и деформациях позвоночного столба (травма позвоночника, дегенеративно-дистрофические и воспалительные заболевания, патология кранио-verteбральной области, идиопатический сколиоз и др.). Данные этих публикаций показывают достаточно высокую точность и корректность положения ТВ, установленных в костные структуры позвонков в различных его анатомических отделах (Lu S. et al., 2009; Hu Y. et al., 2016; Putzier M. et al., 2017; Zhang Y., et al, 2024). Однако, публикации, посвященные вопросам использования ШН для установки ТВ при врожденных сколиозах у пациентов детского возраста, носят единичный характер и касаются в основном детей школьного возраста с изолированными пороками развития позвонков (Lu C., 2023).

В настоящее время в хирургическом лечении детей с ВДП, обусловленными множественными пороками развития позвоночника достаточно широко используются технологии «растущих» металлоконструкций. При этом, применение такого подхода не позволяет получить радикальной коррекции деформации позвоночника, требует проведение многочисленных этапных хирургических вмешательств на протяжении всего периода роста и развития ребенка, отличается большим количеством инфекционных и неврологических осложнений (Bess S. et al., 2010; Garg S. et al., 2014; Waldhausen J.H. et al., 2016). Применение системы VERTR связано с весьма высокой частотой развития осложнений, достигающей до 72 - 77% (Lucas G. et al., 2013). Данные осложнения представлены преимущественно нарушением заживления послеоперационной раны, присоединением инфекционного процесса, ранением плевры, миграцией опорных элементов, дестабилизацией металлоконструкции, повреждением плечевого сплетения. Однако, целенаправленного анализа причин данных осложнений и попыток научного осмысления полученных результатов авторы в своих исследованиях не предпринимали, констатируя их наличие, по сути дела, как неизбежное фактическое явление, характерное для технологии коррекции деформаций позвоночника с применением системы VERTR (Garg S. et al., 2014; Waldhausen J.H. et al., 2016).

Необходимо отметить, что данной ситуации способствует объединение группы заболеваний различной этиологии, приводящих к деформации позвоночника, в общую группу, определяемую зарубежными авторами как «сколиозы с ранним началом» (early onset scoliosis). Авторами по умолчанию подразумевается, что у данной категории пациентов, сходных лишь только по времени возникновения деформации позвоночника (дети младше 10 лет), необходимо использовать различные варианты «растущих» спинальных систем, с обязательным проведением

этапных хирургических вмешательств или неинвазивных этапных дистракций (Johnson A.N. et al., 2024).

Попытки создать алгоритм хирургического лечения пациентов с ВДП на фоне множественных аномалий развития и разработать подходы к хирургической коррекции в программе «Surgimar Spine» основаны на данных анализа двухмерного плоскостного рентгенологического исследования позвоночника, что не позволяет учесть особенности пространственных взаимоотношений его костных структур (Рябых С.О., 2014).

В специальной литературе имеется достаточно большое количество работ, где авторами рассматриваются и анализируются вопросы моделирования нагрузок на позвоночный столб в целом, проводится биомеханическое твердотельное моделирование нагрузок на отдельные позвонки и межпозвонковые диски шейного, грудного и поясничного отделов позвоночника, моделирование силовых воздействий на позвоночник и его сегменты различных спинальных устройств и металлоконструкций, предназначенных для коррекции и стабилизации деформированных сегментов позвоночника, в том числе и с использованием транспедикулярной фиксации (Chen S.H. et al., 2012; Wang Y. et al., 2017; Nakashima D. et al., 2018; Hammer N. et al., 2019; Ren J. et al., 2019; Sang D. et al., 2019; Ma L. et al., 2024; Xu C. et al., 2024). Однако, данные работы посвящены вопросам биомеханического анализа патологии позвоночника у больных с завершенным костным ростом и пациентов старшей возрастной категории. Работы, посвященные вопросам биомеханического моделирования позвоночника и использования транспедикулярных винтов у детей, носят единичный характер и не имеют системного научного обоснования (Абдалиев С.С. с соавт., 2021; Cobetto N. et al., 2018; Clin J. et al., 2019; Bao B.X. et al., 2024).

С учетом имеющихся проблем и вопросов были определены цель и задачи настоящего диссертационного исследования.

**Цель исследования:** разработать и обосновать систему хирургического лечения детей с врожденными деформациями грудного и поясничного отделов позвоночника с использованием технологий 3D-моделирования и прототипирования.

**Задачи исследования:**

1. Создать стенд испытательно-калибровочный полифункциональный и динамометрический блок для определения величины нагрузок опорных элементов спинальных систем на позвонки и корригирующих усилий в ходе хирургического вмешательства у детей с врожденными деформациями позвоночника.

2. Создать твердотельную модель сегмента позвоночника ребенка дошкольного возраста с изолированной аномалией развития позвонков и определить предел прочности костной ткани при моносегментарной транспедикулярной фиксации.

3. Создать твердотельную модель низкопрофильной реберно-позвоночной системы и определить критические величины осевых нагрузок в зависимости от вариантов используемых типоразмеров ее элементов.

4. Создать компьютерную программу-планировщик, предназначенную для предоперационного планирования выбора оптимальных типоразмеров и положения опорных элементов спинальной системы, 3D-моделирования и прототипирования зоны и объема корригирующих остеотомий позвоночника у детей с врожденной деформацией грудного и поясничного отделов позвоночника.

5. Провести сравнительный анализ результатов хирургического лечения детей с врожденными деформациями позвоночника при изолированных пороках развития позвонков с использованием технологий 3D-моделирования и прототипирования и методом «свободной руки».

6. Провести сравнительный анализ результатов хирургического лечения детей с врожденной деформацией позвоночника при



множественных пороках развития позвонков с применением аддитивных технологий и методом «свободной руки».

7. Провести сравнительный анализ результатов хирургического лечения пациентов с врожденной деформацией позвоночника и синостозом ребер с применением низкопрофильных реберно-позвоночных систем с использованием технологий 3D-моделирования и прототипирования и методом «свободной руки».

8. Разработать и доказать эффективность алгоритмов хирургического лечения детей с врожденными деформациями грудного и поясничного отделов позвоночника с использованием аддитивных технологий и процессов 3D-моделирования.

#### **Научная новизна исследования:**

1. Разработан стенд испытательно-калибровочный полифункциональный для спинальных систем (заявка на международное изобретение (ЕАРО) № 202300060, приоритет от 27.09.2023) и блок динамометрический для контракции и дистракции при хирургическом лечении деформаций позвоночника (Патент РФ на полезную модель №227005, 01.07.2024).

2. На основании компьютерного твердотельного моделирования нагрузок на костную ткань позвонков при моносегментарной транспедикулярной фиксации определены оптимальные типоразмеры, вид и компоновка опорных элементов металлоконструкции, допустимые нагрузки при проведении коррекции деформации позвоночника у детей дошкольного возраста с врожденными сколиозом на фоне нарушения формирования позвонков.

3. На основании компьютерного моделирования критических осевых нагрузок тестовых образцов трехмерных математических моделей низкопрофильной реберно-позвоночной конструкции обоснован выбор оптимальных вариантов ее компоновки у детей с тяжелыми врожденными

деформациями позвоночника и грудной клетки (Базы данных РФ №2023623833, 08.11.2023; №2023623835, 08.11.2023; №2023623834, 08.11.2023; №2023624050, 20.11.2023).

4. Разработана программа-планировщик «Платформа для планирования и моделирования хирургических операций на позвоночнике» (Свидетельство РФ о государственной регистрации программы для ЭВМ №2022618828, 18.05.2022).

5. Разработаны отечественные спинальные системы для коррекции врожденных деформаций позвоночника у детей:

- устройство для коррекции врожденной деформации позвоночника и грудной клетки при одностороннем нарушении сегментации позвонков грудного отдела позвоночника и синостоза ребер у детей (евразийский патент на изобретение №040285, 17.05.2022);

- устройство корригирующее при хирургическом лечении врожденного кифосколиоза грудного и поясничного отделов позвоночника на фоне нарушения формирования позвонков у детей до трех лет (Патент РФ на полезную модель №203215, 31.05.2021);

- устройство для моносегментарной коррекции тяжелой формы врожденного кифосколиоза на фоне изолированного полупозвонка грудной и поясничной локализации у детей до трёх лет (Патент РФ на изобретение №2815218, 12.03.2024);

- устройство для моносегментарной коррекции тяжелой формы врожденного кифосколиоза на фоне изолированного полупозвонка грудной и поясничной локализации у детей дошкольного и младшего школьного возраста (Патент РФ на изобретение №2818070, 23.04.2024);

- транспедикулярно-ламинарный эндокорректор позвоночника (евразийский патент на изобретение №047488, 26.07.2024).

6. Разработаны новые методы хирургического лечения детей с врожденными деформациями позвоночника:

- способ переднего спондилодеза при хирургическом лечении врожденной деформации позвоночника на фоне заднебокового полупозвонка у детей (Патент РФ на изобретение № 2687655, 15.05.2019);

- способ ориентированной установки транспедикулярных винтов при коррекции врожденной деформации позвоночника у детей с изолированным нарушением формирования позвонка (Патент РФ на изобретение №2701782, 01.10.2019)

- способ коррекции врожденной деформации позвоночника при нарушении формирования позвонков у детей (Патент РФ на изобретение №2736318, 13.11.2020).

7. Впервые проведен сравнительный анализ корректности и стабильности установки транспедикулярных винтов в тела позвонков у детей с врожденными деформациями грудного и поясничного отделов позвоночника методом «свободной руки», с применением системы активной оптической 3D-КТ навигации и программы-планировщика «Платформа для планирования и моделирования хирургических операций на позвоночнике» на основе балльной градации по шкале SLIM+V.

8. Впервые проведен сравнительный анализ результатов хирургического лечения пациентов с врожденной деформацией позвоночника и синостозом ребер с использованием усовершенствованных технологий 3D-моделирования и прототипирования.

9. В результате проведенных исследований разработан новый методологический подход и оригинальная система хирургического лечения детей с врожденными деформациями грудного и поясничного отделов позвоночника с применением технологий 3D-моделирования и прототипирования.

#### **Практическая значимость исследования:**

1. Выявленные в ходе исследования возможности оригинального стенда испытательно-калибровочного полифункционального для

спинальных систем по определению величин и диапазона нагрузок, возникающих на опорных элементах испытываемых металлоконструкций, позволяют использовать полученные данные для определения напряжений на позвонки и элементы спинальных систем при проведении твердотельного моделирования и повысить клиническую эффективность проведения коррекции ВДП у детей.

2. По результатам компьютерного твердотельного моделирования нагрузок на позвонки у детей дошкольного возраста с ВДП на фоне изолированных пороков развития определены оптимальные для клинического применения варианты типоразмеров и дизайн опорных элементов спинальных систем.

3. Проведенное изучение критических осевых нагрузок методом конечных элементов на твердотельные модели при различных вариантах компоновок низкопрофильных реберно-позвоночных систем позволяет исключить развитие дестабилизации металлоконструкции при хирургическом лечении детей с тяжелыми врожденными деформациями позвоночника и грудной клетки.

4. Практическое использование разработанной программы-планировщика «Платформа для планирования и моделирования хирургических операций на позвоночнике» позволяет проводить рациональное планирование операций с учетом полученных прочностных характеристик позвонков у детей с ВДП и спинальных систем, что обеспечит улучшение результатов хирургического лечения.

5. Внедрение в клиническую практику оригинального транспедикулярно-ламинарного эндокорректора позвоночника при коррекции ВДП у пациентов с изолированными пороками развития позвонков позволяет сократить количество фиксируемых ПДС и будет способствовать улучшению клинических исходов хирургического лечения.

6. Применение в ходе коррекции деформации позвоночника оригинального устройства «Блок динамометрический для контракции и

дистракции при хирургическом лечении деформаций позвоночника» позволяет исключить возникновения чрезмерных усилий, приводящих к разрушению костной ткани в области опорных элементов и дестабилизации спинальной системы у детей с врожденной деформацией позвоночника.

7. Предложенный системный подход, основанный на алгоритмизированном применении технологий 3D-моделирования и прототипирования у детей с ВДП грудной и поясничной локализации при изолированных и множественных пороках развития позвонков, при ВДП грудной/грудопоясничной локализации и синостозе ребер, способствует улучшению ряда изученных интраоперационных показателей, позволяет сократить количество осложнений и улучшить результаты лечения.

#### **Методология и методы исследования.**

Настоящее диссертационное исследование носило клинико-экспериментальный характер и состояло из нескольких этапов. Вначале были разработаны оригинальный испытательно-калибровочный стенд и блок динамометрический для контракции и дистракции при хирургическом лечении деформаций позвоночника, проведены стендовые испытания по определению нагрузок и корригирующих усилий спинальных систем, используемых для коррекции ВДП грудной и поясничной локализации у детей. В ходе выполнения данного этапа была решена первая задача исследования.

В ходе второго этапа исследования проведена отработка физико-механической модели позвонков у детей преддошкольного и дошкольного возраста с ВДП с учетом возникающих нагрузок на позвоночно-двигательный сегмент при его фиксации транспедикулярными опорными элементами и твердотельное моделирование критических осевых нагрузок на низкопрофильную реберно-позвоночную систему при различных комбинациях типоразмеров ее компонентов с использованием метода

конечных элементов. Таким образом, были решены вторая и третья задачи исследования. Полученные данные первого и второго этапов послужили основой для проведения третьего и четвертого этапов диссертационного исследования.

На третьем этапе была разработана оригинальная программа-планировщик «Платформа для планирования и моделирования хирургических операций на позвоночнике» для проведения 3-D моделирования и 3-D прототипирования методов хирургической коррекции и усовершенствованных спинальных систем для лечения детей с ВДП грудной и поясничной локализации, тем самым, была решена четвертая задача.

Четвертый этап исследования включал в себя несколько частей и представлял собой проведение сравнительного анализа результатов хирургического лечения 225 детей с ВДП грудной и поясничной локализации. В рамках этого этапа проводили решение 5, 6, 7 и 8 задач диссертационного исследования.

Для решения пятой задачи было проведено сравнение технологий 3D-моделирования и прототипирования и применение метода «свободной руки» при лечении 120 детей с изолированными пороками развития грудного и поясничного отделов позвоночника. Пациенты были распределены на 2 группы в зависимости от примененной методики: Гр-1 - 60 пациентов, оперированных с применением технологий 3D-моделирования и прототипирования; Гр-2 - 60 детей, оперированных с применением метода «свободной руки».

Для решения шестой задачи был проведен сравнительный анализ результатов лечения у 80 пациентов с ВДП грудной и поясничной локализации на фоне множественных пороков развития позвонков. В зависимости от примененной методики пациенты были распределены на 3 группы: Гр-1 - 20 детей, оперированных с применением ШН; Гр-2 - 30 детей, оперированных с применением системы активной оптической 3D-

КТ навигации; Гр-3, 30 детей, оперированных с применением метода «свободной руки».

Для решения седьмой задачи был проведен сравнительный анализ результатов лечения 25 детей с врожденными деформациями грудного и груднопоясничного отделов позвоночника на фоне множественных пороков развития позвонков и синостоза ребер. Пациентов разделили на 2 группы в зависимости от примененной методики: Гр-1 - 10 детей, оперированных с применением усовершенствованной низкопрофильной реберно-позвоночной системы с использованием технологий 3D-моделирования и прототипирования; Гр-2 - 15 детей, коррекция ВДП выполнялась с применением реберно-позвоночных систем без использования технологий 3D-моделирования и прототипирования.

На основании разработанных методов и алгоритмов хирургического лечения детей с ВДП грудной и поясничной локализации с использованием технологий 3D-моделирования и прототипирования выполнено решение 8 задачи настоящего диссертационного исследования.

#### **Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Использование оригинального стенда испытательно-калибровочного полифункционального для спинальных систем с возможностью определения физических величин и диапазона нагрузок является необходимой фундаментальной основой для проведения моделирования методом конечных элементов требуемых нагрузок на испытываемые твердотельные модели позвонков и спинальных систем.

2. Корректная установка ребенку дошкольного возраста ТВ с диаметром резьбовой части равной 4.5 мм, с учетом объема костных структур позвонка, прилегающих к давящей поверхности ТВ, и направленности корригирующих усилий, значительно снижает нагрузку и уменьшает разрушающий эффект резьбовой части на фиксируемый позвонок, увеличивает надежность моносегментарной ТПФ по сравнению с ТВ с диаметром резьбовой части 3,5 мм.

3. Использование оригинальной программы-планировщика «Платформа для планирования и моделирования хирургических операций на позвоночнике» у детей с ВДП грудной и поясничной локализации позволяет планировать и создавать индивидуальные спинальные системы, учитывающие анатомические особенности аномальных позвонков, их прочностные характеристики и рациональное распределение корригирующих усилий на фиксируемые сегменты позвоночника.

4. Применение «метода ретроспективной реконструкции», основанного на сравнительном анализе результатов лечения пациентов ретроспективной группы исследования с результатами моделирования лечения новым, разрабатываемым методом (способом), базирующимся на использовании аддитивных технологий (*in vitro*) и технологий компьютерного 3D-моделирования (*in silico*), является дополнительной доказательной базой эффективности предлагаемых новых методов лечения детей с ВДП грудной и поясничной локализации.

5. Использование моносегментарных ШН для установки ТВ при изолированных пороках развития позвоночника и многоуровневых ШН при множественных пороках развития позвоночника с расширенной зоной контакта на поперечных отростках позвонков в грудном отделе и с расширенной зоной контакта на остистых отростках позвонков в поясничном отделе позвоночника обеспечивает надежный стабильный контакт поверхности ШН с дорсальными костными структурами позвонков и достижение высокой степени корректности положения имплантируемых транспедикулярных опорных элементов конструкции.

6. Применение оригинального транспедикулярно-ламинарного эндокорректора позвоночника при хирургическом лечении детей дошкольного возраста с ВДП грудной и поясничной локализации на фоне изолированных пороков развития позвонков исключает дестабилизацию имплантированной металлоконструкции при моносегментарной фиксации за счет выведения значения нагрузок на костную ткань опорного позвонка



из критической зоны напряжений и обеспечивает уменьшение протяженности металлофиксации.

### **Соответствие диссертации паспорту научной специальности.**

Содержание и выводы диссертации полностью соответствуют паспорту научной специальности 3.1.8. Травматология и ортопедия.

### **Личный вклад автора.**

Настоящее диссертационное исследование является самостоятельным трудом, основанным на личном опыте проведения экспериментальных исследований и результатах сбора и анализа клинико-рентгенологических данных хирургического лечения детей с врожденными деформациями позвоночника. Автором самостоятельно выполнен аналитический обзор литературы по теме диссертационного исследования, осуществлен сбор материала, изучены и проанализированы данные медицинской документации и лучевых методов исследований, выполнены оперативные вмешательства и проведена оценка результатов лечения, осуществлена статистическая обработка полученных данных и интерпретация основных результатов проведенных исследований, сформулированы выводы и практические рекомендации, написаны все главы диссертационного исследования и его автореферат.

### **Апробация диссертационной работы.**

Материалы диссертационного исследования доложены на Ежегодных научно-практических конференциях с международным участием «Вреденовские чтения» (Санкт-Петербург, 2021, 2022, 2024), «Турнеровские чтения» (Санкт-Петербург, 2020, 2021, 2023, 2024) и «Илизаровские чтения» (Курган, 2021); на научно-практической конференции с международным участием «Аддитивные технологии в медицине: от 3D-планирования до биопечати» (Санкт-Петербург, 2020); на

XII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Цивьяновские чтения» (Новосибирск, 2021); на Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, посвященной 75-летию юбилею Новосибирского НИИТО им.Я.Л.Цивьяна "Цивьяновские чтения" (Новосибирск, 2021); на Евразийском ортопедическом форуме (Москва, 2021); на XII Всероссийском съезде травматологов-ортопедов (Москва, 2022); на научном симпозиуме "Комплексное лечение детей с деформациями позвоночника" (Санкт-Петербург, 2022); на XI Всероссийском научно-практическом форуме с международным участием "Неотложная детская хирургия и травматология" (Москва, 2023); на XII съезде Российской Ассоциации хирургов-вертебрологов (RASS) (Москва, 2023).

По теме диссертационного исследования опубликовано 34 научные работы, из них 1 монография, 18 работ в журналах, рекомендованных ВАК РФ для публикаций результатов диссертационных исследований, 1 статья в журнале, индексируемом в наукометрической базе Scopus, получено 2 евразийских патента, 7 патентов РФ на изобретения и полезные модели, регистрационное удостоверение на компьютерную программу, 4 свидетельства на базы данных.

### **Реализация результатов исследования.**

Результаты диссертационного исследования внедрены в клиническую работу отделения патологии позвоночника и нейрохирургии ФГБУ «НМИЦ детской травматологии и ортопедии им. Г.И. Турнера» МЗ РФ, Санкт-Петербург; детского травматолого-ортопедического отделения ФГБУ "ФЦТОЭ" МЗ РФ, г. Чебоксары; травматолого-ортопедического отделения для детей ГУ «РНПЦ травматологии и ортопедии» МЗ Республики Беларусь, г. Минск; отделения ортопедии №6 «Национальный научный центр травматологии и ортопедии имени академика Батпенкова Н.Д.» МЗ Казахстана, г. Астана.

Материалы диссертационного исследования используются при чтении лекций и проведении семинаров для специалистов, проходящих усовершенствование по программе дополнительного профессионального образования на кафедре детской травматологии и ортопедии ФГБОУ ВО «СЗГМУ им. И.И. Мечникова» Минздрава России и на базе ФГБУ «НМИЦ детской травматологии и ортопедии им. Г.И. Турнера» Минздрава России.

### **Объем и структура диссертации.**

Диссертационное исследование изложено на 333 страницах машинописного текста и состоит из введения, обзора литературы, описания материалов и методов исследования, пяти глав собственных исследований, заключения, выводов, практических рекомендаций, приложения и списка литературы, включающего 81 работу отечественных и 191 – зарубежных авторов. В диссертации имеются 157 рисунков и 50 таблиц.

### **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи диссертационного исследования, освещены его научная новизна и практическая значимость, изложены основные положения, выносимые на защиту, представлены сведения о реализации и апробации работы, объеме и структуре диссертации.

**В первой главе** в ходе анализа значительного массива данных современной отечественной и зарубежной литературы продемонстрировано многообразие методик и подходов, применяемых при хирургии ВДП грудной и поясничной локализации у детей, показан достаточно высокий процент осложнений, встречающийся при лечении пациентов данной категории. Анализ современного состояния вопросов стендовых испытаний, проводимых для оценки различных нагрузок, и использования метода конечных элементов в хирургии позвоночника,

показал отсутствие структурированных данных, связанных с проблематикой хирургического лечения детей с ВДП. Не получено точных сведений относительно особенностей использования технологии шаблонов-направителей у детей с врожденными сколиозами. В литературе отсутствуют четкие и общепризнанные алгоритмы выбора оптимальной методики технологий 3D-моделирования и прототипирования при хирургическом лечении детей с ВДП грудной и поясничной локализации. Комплекс описанных выше факторов обусловил актуальность настоящего исследования.

**Во второй главе** представлены материалы и методы диссертационного исследования.

Настоящая работа была спланирована и выполнена в несколько этапов. Первый, второй и третий этапы работы составили экспериментальную часть исследования, посвященную вопросам разработки технологий 3D-моделирования и прототипирования. Четвертый этап являлся клиническим исследованием применения разработанных технологий при хирургическом лечении детей с врожденными деформациями позвоночника грудной и поясничной локализации.

Первый этап заключался в создании испытательного калибровочного стенда, блока динамометрического для контракции и дистракции при хирургическом лечении деформаций позвоночника и проведении стендовых испытаний по определению нагрузок и корригирующих усилий спинальных систем, используемых для коррекции ВДП грудной и поясничной локализации у детей. Полученные результаты в ходе выполнения данного этапа явились основой для выполнения второго, третьего и четвертого этапов исследования.

Второй этап представлял собой разработку физико-механической модели позвонков у детей преддошкольного и дошкольного возраста с врожденной деформацией позвоночника с учетом возникающих нагрузок на позвоночно-двигательный сегмент при его фиксации

транспедикулярными опорными элементами и твердотельное моделирование критических осевых нагрузок на низкопрофильную реберно-позвоночную систему при различных комбинациях типоразмеров ее компонентов с использованием метода конечных элементов. Данные второго этапа послужили основой для проведения третьего и четвертого этапов диссертационного исследования.

Третий этап заключался в создании программы-планировщика «Платформа для планирования и моделирования хирургических операций на позвоночнике» для проведения 3-D моделирования и 3-D прототипирования методов хирургической коррекции и усовершенствованных спинальных систем при лечении детей с ВДП грудной и поясничной локализации и позволил последовательно реализовать заключительный клинический этап.

Четвертый этап исследования включал в себя проведение сравнительного анализа результатов хирургического лечения 225 детей с ВДП грудной и поясничной локализации, включавших в себя: 120 детей с изолированными пороками развития грудного и поясничного отделов позвоночника (Гр-1 - 60 пациентов, оперированных с применением технологий 3D-моделирования и прототипирования; Гр-2 - 60 детей, оперированных с применением метода «свободной руки»), 80 пациентов с ВДП грудной и поясничной локализации на фоне множественных пороков развития позвонков (Гр-1 - 20 детей, оперированных с применением ШН; Гр-2 - 30 детей, оперированных с применением системы активной оптической 3D-КТ навигации; Гр-3, 30 детей, оперированных с применением метода «свободной руки») и 25 детей с врожденными деформациями грудного и грудопоясничного отделов позвоночника на фоне множественных пороков развития позвонков и синостоза ребер (Гр-1 - 10 детей, оперированных с применением усовершенствованной низкопрофильной реберно-позвоночной системы с использованием технологий 3D-моделирования и прототипирования; Гр-2 - 15 детей,

коррекция ВДП выполнена с применением реберно-позвоночных систем без использования технологий 3D-моделирования и прототипирования).

В ходе выполнения четвертого этапа исследования разработаны и научно обоснованы алгоритмы хирургического лечения детей с врожденными деформациями грудного и поясничного отделов позвоночника с применением технологий 3-D моделирования и прототипирования

На всех этапах диссертационной работы использовались стендовый метод, компьютерное моделирование методом конечных элементов и моделирование «in silico», метод «ретроспективной реконструкции», метод 3D-прототипирования, хронометрический метод, клинико-лучевые и разнообразные статистические методы исследования в профессиональном программном пакете Statistica (v. 10.0).

**В третьей главе** для решения первой задачи для решения первой задачи были разработаны оригинальные стенд испытательно-калибровочный полифункциональный для спинальных систем (заявка на международное изобретение (ЕАРО) № 202300060, приоритет от 27.09.2023) и блок динамометрический для контракции и дистракции при хирургическом лечении деформаций позвоночника (Патент РФ на полезную модель №227005, 01.07.2024).

При проведении стендовых испытаний по определению нагрузок и корригирующих усилий спинальных систем, используемых для коррекции ВДП грудной и поясничной локализации у детей, на позвоночном блоке испытательно-калибровочного полифункционального стенда установлена усредненная величина нагрузки (12,7 кг), оказываемой транспедикулярными опорными элементами диаметром 3,5 мм и длиной 30 мм при проведении контракции при выполнении коррекции ВДП у детей дошкольного возраста. Данное значение использовано в последующем для твердотельного моделирования нагрузок методом

конечных элементов у детей дошкольного возраста с моносегментарной ТПФ при изолированных пороках развития позвоночника.

Проведенные стендовые испытания низкопрофильных реберно-позвоночных систем при помощи позвоночного и реберного дистракторов, оснащенных тензодатчиками, позволили определить величину усилий, возникающих на опорных элементах низкопрофильной реберно-позвоночной системы при осуществлении дистракции. Установлено, что усредненное максимальное значение в целом для всех типоразмеров пластин составило 31,2 кг. Необходимо отметить, что данные показатели имеют важное значение при сопоставлении с результатами исследования прочностных характеристик низкопрофильных реберно-позвоночных систем методом конечных элементов. Установлено, что применение позвоночного дистрактора для дистракции реберной части низкопрофильной реберно-позвоночной системы за счет эффекта «заклинивания» выдвигной пластины в основании реберной части приводит к снижению развиваемой силы давления опорными элементами конструкции по сравнению с реберным дистрактором ( $p < 0,05$ ) на 34,2% (20,2 кг), что необходимо учитывать в ходе хирургического вмешательства (рис. 1).

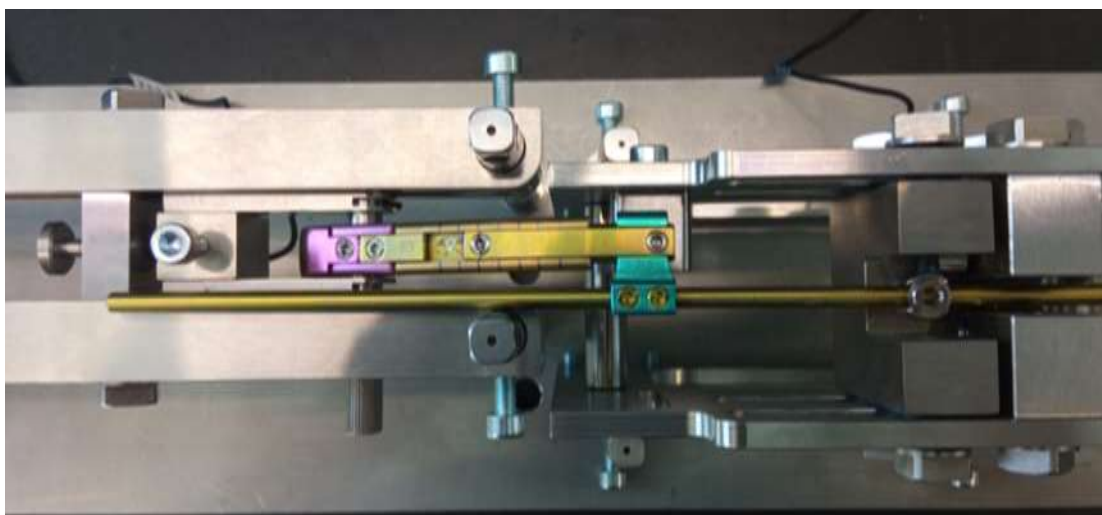


Рисунок 1. Фотография стенда с установленной реберно-позвоночной системой 5,0, вид сверху

Созданный в ходе исследования оригинальный блок динамометрический для контракции и дистракции при хирургическом лечении деформаций позвоночника позволил объективизировать величину прилагаемых сил к опорным элементам спинальных систем и осуществлять дозированную контролируемую нагрузку. Динамометрический контрактор был откалиброван в диапазоне от 0 до 20 кг, динамометрический дистрактор - в диапазоне от 0 до 30 кг. Полученные результаты стендовых исследований легли в основу последующего твердотельного моделирования методом конечных элементов (рис. 2).

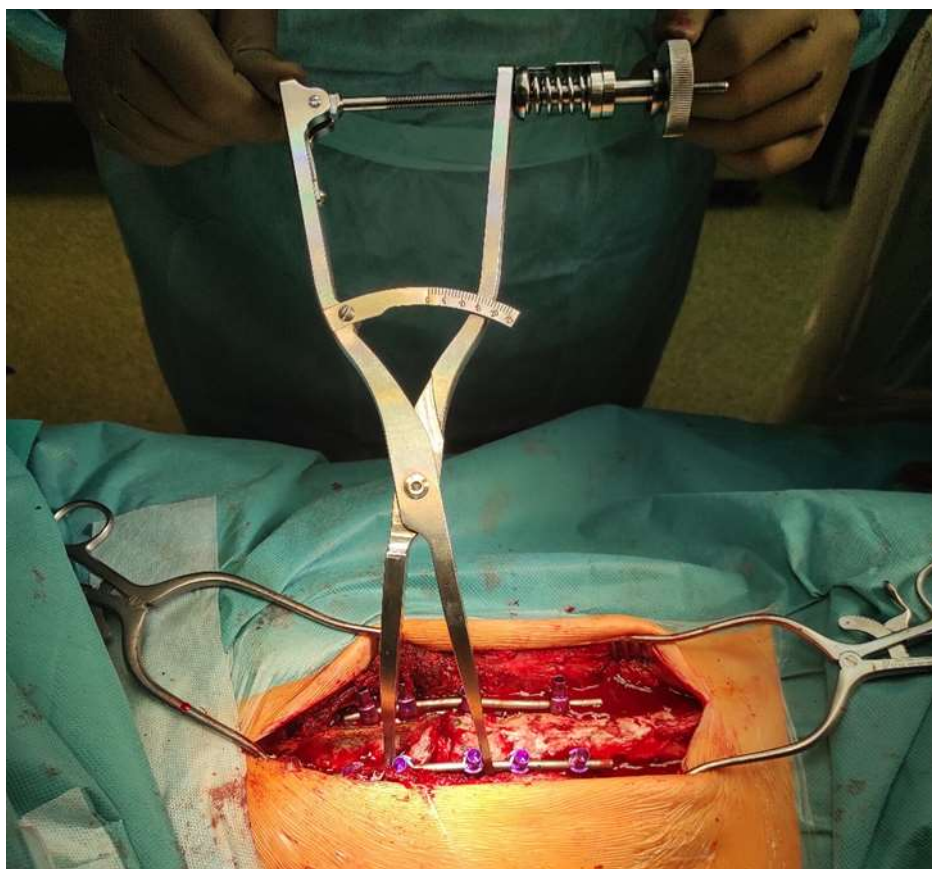


Рисунок 2. Интраоперационное измерение усилий при помощи динамометрического контрактора (Патент РФ на полезную модель №227005, 01.07.2024)

**В четвертой главе** проведен анализ и решены вторая и третья задачи диссертационного исследования.



В ходе решения второй задачи на основании физико-механической модели позвонков у детей преддошкольного и дошкольного возраста с ВДП с учетом возникающих нагрузок на позвоночно-двигательный сегмент при его фиксации ТВ методом конечных элементов было установлено, что основание дуги и тело позвонка у детей до 3-х лет имеют меньший предел прочности  $\sigma_i$  по сравнению с детьми школьного возраста, предел прочности основания дуги позвонка составил 6.8 МПа против 17 МПа, соответственно. Для достижения предела прочности в основаниях дуг позвонков у ребенка в возрасте до 3-х лет достаточно нагрузки величиной в 13,3 кг, в младшем школьном возрасте - предел прочности в основании дуги позвонков достигался при нагрузке порядка 20,4 кг при использовании ТВ с диаметром резьбовой части 3.5 мм. Данные результаты согласуются с клиническими данными, так как дестабилизация в виде проминания костной ткани позвонка транспедикулярным винтом при моносегментарной ТПФ и радикально выполненной коррекции врожденной деформации позвоночника на фоне изолированного порока развития встречается значительно чаще у детей дошкольного возраста.

При «свободном» ходе ТВ не выявлено взаимосвязи между увеличением диаметра резьбовой части ТВ и снижением напряжений в костной ткани позвонка. Выявлен эффект повышения напряжений при использовании винта диаметром 4,5 мм по сравнению с винтом 3,5 мм в зоне вхождения ТВ в костную ткань позвонка. При ходе винта по штанге перераспределение напряжений меняется и обретает линейную зависимость – чем больше диаметр винта, тем меньше напряжение в костной ткани позвонка. Причем, наибольшую нагрузку как при «свободном» ходе ТВ, так и по штанге оказывают транспедикулярные опорные элементы с диаметром резьбовой части 3.0 мм (рис. 3).

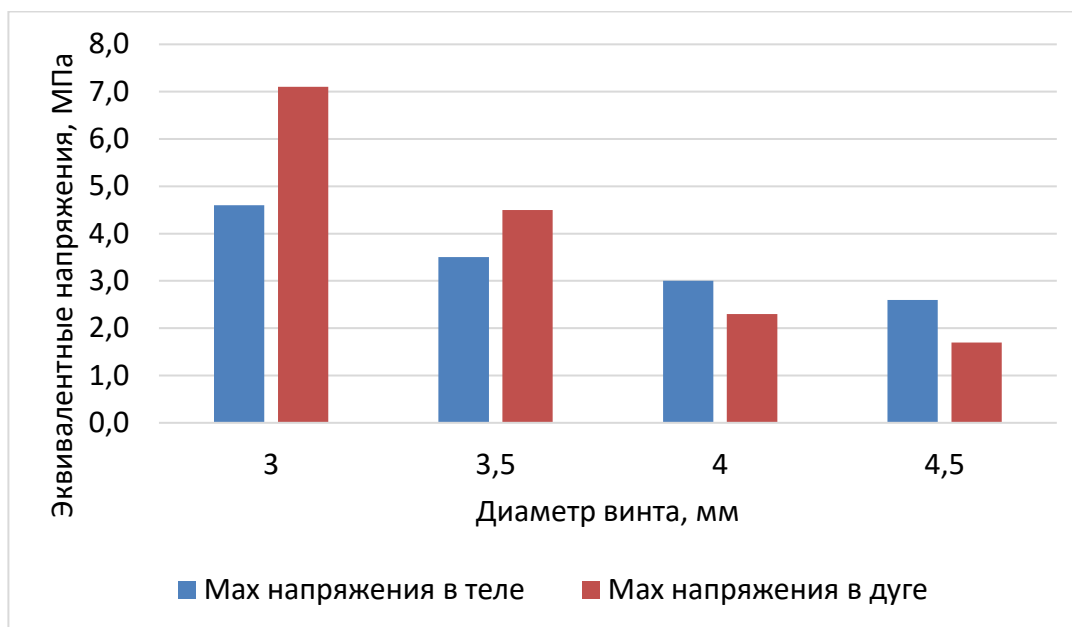


Рисунок 3. Максимальные значения эквивалентных напряжений в теле позвонка и основании дуги с учетом штанги, в МПа

При контракции по выпуклой стороне, моделирующей окончательный этап коррекции деформации позвоночника, при всех четырёх вариантах типоразмеров винтов (3.0 мм, 3.5 мм, 4.0 мм, 4.5 мм) практически не происходит превышения предела прочности костной ткани позвонков. Однако, при повышенной нагрузке (имитация активного мышечного напряжения и вертикализации ребенка в послеоперационном периоде) отмечено превышение установленных пределов прочности для тел и оснований дуг позвонков. Использование транспедикулярно-ламинарного опорного элемента в модели моносегментарной фиксации после экстрипации полупозвонка у детей дошкольного возраста при диаметрах резьбовой части ТВ 3,5 мм и 3,0 мм позволяет вывести значения нагрузок из критической зоны напряжений в костной ткани позвонка. При моделировании изолированного напряжения в костной ткани позвонка ребенка дошкольного возраста установлено, что ТВ с диаметром резьбовой части 4.5 мм положительно влияет на минимально допустимую величину костной массы, находящейся между давящей поверхностью резьбовой

части ТВ и кортикальным слоем позвонка (замыкательная пластинка тела позвонка и кортикал основания дуги) по сравнению с ТВ 3.5 мм.

Углубленное исследование на трещиностойчивость показало значительное преимущество в снижении нагрузки на костную ткань позвонка ребенка дошкольного возраста при использовании ТВ диаметром 4,5 мм по сравнению с ТВ диаметром 3,5 мм. При повышенной нагрузке в 290 Н (имитация активного мышечного напряжения и вертикализации ребенка в послеоперационном периоде) роста трещины не происходит, что свидетельствует о повышении надежности фиксации и уменьшения разрушающего эффекта резьбовой части ТВ диаметром 4.5мм на фиксируемый позвонок (табл. 1).

Таблица 1

Интенсивности напряжений в трещинах для модели  
транспедикулярного винта диаметром 4.5 мм (в МПа · мм<sup>0.5</sup>)

Величина нагрузки на ТВ	Верхняя трещина	Нижняя трещина
Стандартная нагрузка (124.46 Н)	0.6	0.0
Удвоенная нагрузка (250 Н)	1.2	0.0
Повышенная нагрузка (290 Н)	1.4	0.0

В ходе решения третьей задачи было проведено масштабное твердотельное моделирование критических осевых нагрузок на низкопрофильные реберно-позвоночные системы при различных комбинациях типоразмеров ее компонентов с использованием метода конечных элементов. В расчетах были приняты варианты компоновки основаниями длиной 40 мм, 50 мм, 60 мм и 70мм с соответствующими пластинами; со штангами диаметром 3.5, 4.0, 4.5 и 5.0 мм и длиной 100мм и 200мм. Выявленная однотипность зоны вероятной локализации усталостного перелома низкопрофильной реберно-позвоночной металлоконструкции, а именно, в области позвоночного стержня над

проксимальным транспедикулярным винтом, достигнутая в ходе разработки и корректировки конструктивных особенностей данной спинальной системы позволяет проводить профилактику усталостных переломов путем подбора необходимого диаметра стержня на основе запланированной предоперационно компоновки металлоконструкции и с учетом величины корригирующего усилия, достигаемого интраоперационно в ходе distraction.

По результатам, полученным при моделировании, были составлены сводные таблицы применимости тех или иных комбинаций реберно-позвоночных конструкций в зависимости от величины осевой нагрузки для соотношения полученных значений с массой пациента при выборе компоновки и прогнозирования устойчивости низкопрофильной реберно-позвоночной металлоконструкции при проведении предоперационного планирования и 3D-моделирования хода хирургического вмешательства в программе-планировщике «Платформа для планирования и моделирования хирургических операций на позвоночнике» (табл. 2).

Таблица 2

Тестовые образцы со штангой диаметром 4.0мм и длиной 100мм,  
критическая осевая нагрузка, Н

Расстояние от адаптора до ТВ	Длина основания, мм	Предел прочности, Н	Предел текучести, Н
1/3L	40	259	217,6
1/3L	40+20	240	201,6
2/3L	40	329	276,4
2/3L	40+20	243	204,1
1/3L	50	264	221,8
1/3L	50+30	287	241,1
2/3L	50	255	214,2
2/3L	50+30	183	153,7
1/3L	60	243	204,1
1/3L	60+40	189	158,8
2/3L	60	189	158,8
2/3L	60+40	154	129,4

Необходимо отметить, что полученные средние значения напряжений (198.5 Н - 270.5 Н) в реберно-позвоночных системах с наиболее частыми применяемыми комбинациями типоразмеров ее элементов свидетельствуют о возможности использования данных компоновок у детей дошкольного и младшего школьного возраста с врожденными деформациями позвоночника на фоне множественных пороков развития позвоночника и синостоза ребер.

**В пятой главе** для решения четвертой задачи настоящего диссертационного исследования была разработана оригинальная программа-планировщик «Платформа для планирования и моделирования хирургических операций на позвоночнике» (ППМХОП) (свидетельство РФ о государственной регистрации программы для ЭВМ №2022618828, 18.05.2022) для проведения 3-D моделирования и 3-D прототипирования методов хирургической коррекции и усовершенствованных спинальных систем для лечения детей с ВДП грудной и поясничной локализации.

ППМХОП представлена следующими блоками:

- А - блок диагностики и 3D-прототипирования предоперационной модели позвоночника;
- В - блок 3D-планирования объема и характера хирургических вмешательств на костных структурах позвоночника в пространстве с использованием средств 3D-графики;
- С - блок 3D-планирования и прототипирования опорных элементов, стержней и других компонентов индивидуальной металлоконструкции;
- Д - блок 3D-планирования и прототипирования оценки конечного результата предполагаемого оперативного вмешательства.

ППМХОП позволила осуществить персонифицированный подход к выбору оптимального метода хирургического лечения с возможностью использования ШН и индивидуальных спинальных металлоконструкций в зависимости от клинико-лучевой картины врожденной деформации позвоночника.

В ходе выполнения работы был создан алгоритм работы в ППМХОП при планировании хирургического лечения детей с тяжелыми врожденными деформациями, основанный на использовании созданных блоков А, В, С и D с возможностью моделирования объема хирургического вмешательства и применяемой металлоконструкции как на этапе *in silico* (3D-моделирование), так, при необходимости, на этапе *in vitro* (3D-прототипирование).

ППМХОП позволила осуществить 3D - моделирование и 3D-прототипирование образцов усовершенствованных спинальных систем, что послужило основанием для разработки линейки спинальных систем, защищенных патентами РФ и евразийскими патентами: низкопрофильная реберно-реберная и реберно-позвоночная конструкция, транспедикулярные спинальные системы для детей дошкольного и младшего школьного возраста, транспедикулярно-ламинарный эндокорректор позвоночника (рис. 4).



а

Рисунок 4. Транспедикулярно-ламинарный эндокорректор позвоночника (евразийский патент на изобретение №047488, 26.07.2024): а – вид сверху



б

Рисунок 4 (продолжение). Транспедикулярно-ламинарный эндокорректор позвоночника (евразийский патент на изобретение №047488, 26.07.2024):

б – вид сбоку

Необходимо отметить, что в настоящее время в ФГБУ «НМИЦ детской травматологии и ортопедии имени Г.И. Турнера» Минздрава России для хирургического лечения детей с ВДП применяются разработанные в клинике спинальная система ВЕК 3,5, предназначенная для хирургического лечения детей с патологией позвоночника в возрасте до 3-х лет, и спинальная система ВЕК 4,5, предназначенная для хирургического лечения детей с патологией позвоночника дошкольного и младшего школьного возраста.

Использование разработанного подхода и технологии проведения опорных элементов металлоконструкции позволило получить возможность индивидуального подхода к хирургической коррекции деформации у детей с тяжелыми врожденными искривлениями позвоночника различной локализации с учетом варианта аномалий позвоночного столба, анатомо-антропометрических параметров костных структур тел позвонков, их пространственных взаимоотношений и прочностных характеристик.

**В рамках шестой главы** для решения пятой и восьмой задач были проанализированы результаты лечения 120 детей дошкольного возраста с ВДП грудной и поясничной локализации с изолированными пороками развития (полупозвонки и бабочковидные позвонки) в 2-х группах. Всем пациентам выполняли экстирпацию или резекцию аномального позвонка из комбинированного или дорсального доступов с последующей коррекцией и стабилизацией достигнутого результата многоопорной дорсальной металлоконструкцией. В первой группе (60 пациентов) при хирургическом лечении применялись технологии 3D-моделирования и прототипирования, во второй группе сравнения (60 детей) операции были выполнены с применением метода «свободной руки» (табл. 3).

Таблица 3

## Характеристика пациентов в группах

<b>Характеристика</b>	<b>Группа 1 (N-60)</b>	<b>Группа 2 (N-60)</b>
Возраст	3г. 6м. (2г. 1м. – 6л. 5м.)	3г. 4м. (2г. 3м. – 6л. 11м.)
Пол (мальчики/девочки)	28/32	27/33
Локализация аномального позвонка (Th/L)	26/34	31/29
Локальный сколиотический компонент, градусы по Cobb	38 (18-62)	36 (20-53)
Локальный кифотический компонент, градусы по Cobb	24 (8-54)	22 (6-48)

В ходе выполнения исследования были определены особенности применения технологий 3D-моделирования и прототипирования при хирургическом лечении детей с ВДП. На этапе интраоперационной работы было установлено, что оптимальным дизайном ШН является



моноsegmentарный с площадью контакта, включавший в себя грани остистого отростка, дугу и поперечные отростки позвонка (рис. 5).



Рисунок 5. Втулка для ШН: а – 3D-модель, б – ШН с металлическими втулками, установленный на дорсальную поверхность позвонка

При анализе достигнутой величины коррекции ВДП у пациентов первой и второй групп статистически достоверных различий получено не было. Однако, имелись различия по протяженности фиксации металлоконструкцией и количеству повторных вмешательств, обусловленных дестабилизацией транспедикулярных систем в раннем послеоперационном периоде у пациентов. В ходе выполнения работы был создан алгоритм хирургического лечения детей с изолированными ВДП с использованием технологий 3D-моделирования и прототипирования.

Применение данного алгоритма позволило, в целом, в первой группе по сравнению со второй уменьшить протяженность металлоконструкции - 2,3 позвонка versus 3,4 ( $p < 0,05$ ), уменьшить временные затраты на установку транспедикулярных опорных элементов - 31,3 секунд versus 112,9 секунд ( $p < 0,05$ ), снизить интраоперационную лучевую нагрузку – 0,18 mZv versus 0,54 mZv ( $p < 0,05$ ), достичь высокой точности и корректности имплантации ТВ в позвонки - 97,9% versus 78,8% ( $p < 0,05$ ) и полностью исключить дестабилизацию металлоконструкции в случае выполнения моноsegmentарной ТПФ.

**В рамках седьмой главы** были решены шестая, седьмая и восьмая задачи диссертационного исследования, которые подразумевали оценку

Для решения шестой задачи были проанализированы результаты лечения 80 детей с ВДП грудной и поясничной локализации на фоне множественных пороков развития позвонков в трёх группах. Пациентам выполняли корригирующие вертебротомии из комбинированного или дорсального доступов с последующей коррекцией и фиксацией многоопорной дорсальной металлоконструкцией. Дети были разделены на 3 группы: в первой группе (20 пациентов) при хирургическом лечении применялись ШН; вторую группу составили 30 детей, оперированных с применением системы активной оптической 3D-КТ навигации; и третья группа - 30 детей, оперированных с применением метода «свободной руки». Первая и вторая группы являлись основными, третья – контрольной группой исследования (табл. 4).

Таблица 4

## Характеристика пациентов в группах

<b>Характеристика</b>	<b>Группа 1 (N-20)</b>	<b>Группа 2 (N-30)</b>	<b>Группа 3 (N-30)</b>
Возраст, лет	6,8 (3-16)	7,4 (3-17)	7,9 (3-17)
Пол (мальчики/девочки)	11/9	13/17	16/14
Протяженность дуги искривления ВДП	8 (5-14)	9 (4-15)	7 (6-13)
Величина сколиотической деформации, градусы по Cobb	43,2 (24-92)	38,2 (28-88)	41,5 (26-90)
Величина кифотический деформации, градусы по Cobb	38,7 (5-88)	40,8 (7-82)	39,4 (4-86)

В ходе выполнения исследования были определены особенности применения технологий 3D-моделирования и прототипирования при хирургическом лечении детей с ВДП при множественных пороках развития позвонков. Так, при использовании ШН по функциональному назначению было выделено два типа: ШН для выполнения корригирующей вертебротомии и ШН для установки ТВ. Установлено, что использование полисегментарного ШН с ограниченной адресной площадью контакта с дорсальной поверхностью позвоночника обеспечивает надежное «сцепление» между ШН и позвонками, достигая при этом корректной установки ТВ в заданном направлении. Определены критерии возможности и целесообразности применения ШН при множественных пороках развития позвоночника (рис. 6).

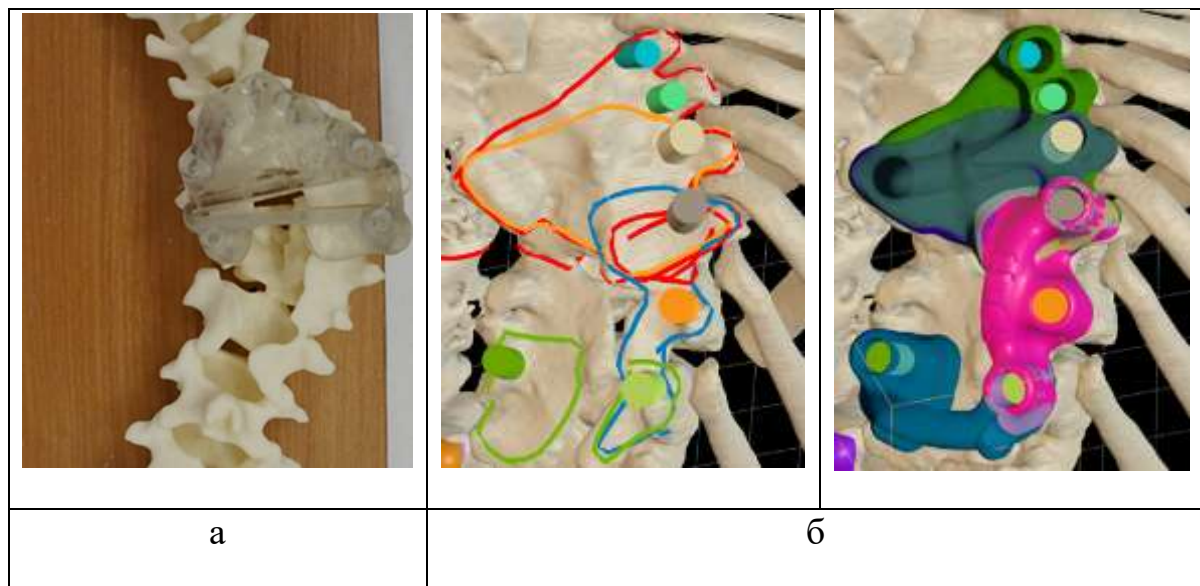


Рисунок 6. Типы ШН: а - для выполнения корригирующей вертебротомии, б - проектирование моделей ШН (метод «перехлёста») с дублирующей зоной контакта для установки ТВ

В ходе выполнения работы был обоснован алгоритм хирургического лечения детей с ВДП при множественных пороках развития позвонков с использованием технологий 3D-моделирования и прототипирования. Применение данного алгоритма позволило достичь большей величины коррекции ВДП (сколиотический компонент в среднем: Гр-1 – 88% и Гр-2 – 82% versus Гр-3 – 61,2%,  $F=21,1$ ,  $p<0,001$ ; кифотический компонент в

среднем: Гр-1 – 82% и Гр-2 – 80% versus Гр-3 – 58%,  $F=18,1$ ,  $p<0,001$ ), сократить временные затраты на установку транспедикулярных опорных элементов (в среднем для Гр-1 - 34 секунды и Гр-2 – 74 секунды versus Гр-3 - 118 секунд,  $F=18,8$ ,  $p<0,001$ ), достичь высокой точности и корректности имплантации ТВ в позвонки (в Гр-1 - 94,3% и в Гр-2 – 91,5% versus Гр-3 - 73,5%,  $H=52,3$ ,  $p<0,001$ ).

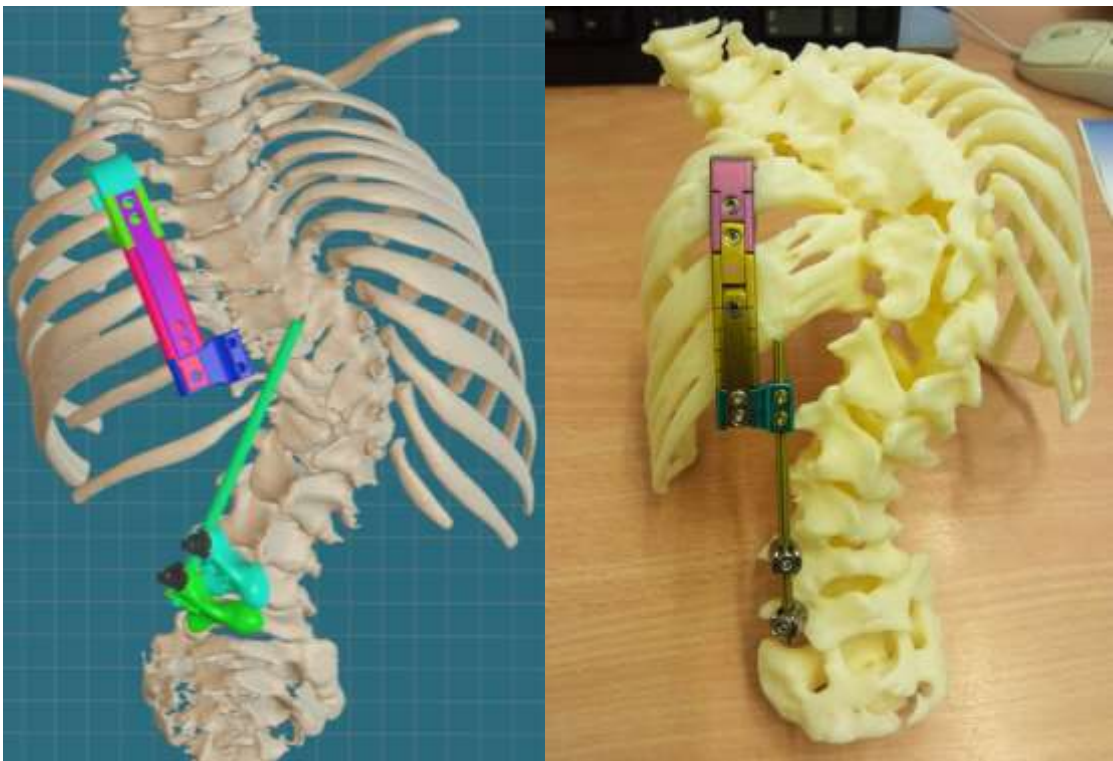
Для решения седьмой задачи был проведен сравнительный анализ результатов лечения 25 детей с врожденными деформациями грудного и грудопоясничного отделов позвоночника на фоне множественных пороков развития позвонков и синостоза ребер. Пациенты были разделены на 2 группы: первая группа (10 наблюдений) - дети, оперированные с применением низкопрофильной реберно-позвоночной системы с использованием технологий 3D-моделирования и прототипирования; вторая контрольная группа (15 наблюдений) - дети, у которых коррекцию деформацию позвоночника выполняли с применением реберно-позвоночных систем без использования технологий 3D-моделирования и прототипирования (табл. 5).

Таблица 5

## Характеристика пациентов в группах

Характеристика	Группа 1 (N-10)	Группа 2 (N-15)
Возраст, лет	4 (2-8)	5 (3-9)
Пол (мальчики/девочки)	4/6	6/8
Протяженность дуги искривления ВДП	6,5 (5-10)	6 (4-9)
Величина сколиотической деформации, градусы по Cobb	72 (48-102)	62 (30-90)
Величина кифотической деформации, градусы по Cobb	45 (5-70)	38 (14-62)

Выбор оптимальных вариантов компоновки реберно-позвоночной системы у детей первой группы проводили на основании компьютерного моделирования критических осевых нагрузок тестовых образцов трехмерных математических моделей низкопрофильной реберно-позвоночной конструкции, что обеспечивало достижение максимально эффективного исправления ВДП у данной категории пациентов за счет оптимального распределения корригирующих усилий между опорными элементами низкопрофильной реберно-позвоночной системы. При коррекции ВДП и грудной клетки использовали оригинальный динамометрический дистрактор, позволяющий контролировать и предотвращать избыточные осевые нагрузки на установленную реберно-позвоночную систему (рис. 7).



а

б

Рисунок 7. Этап предоперационного планирования установки реберно-позвоночной системы: а - моделирование критических осевых нагрузок и ШН, б - 3D-прототипирование позвоночника и грудной клетки, моделирование установки реберно-позвоночной системы

В ходе выполнения работы был предложен алгоритм хирургического лечения детей с множественными пороками развития позвоночника и синостозом ребер с использованием оригинальной разработанной низкопрофильной реберно-позвоночной системы, основанный на технологиях 3D-моделирования и прототипирования, что позволило достичь большей величины коррекции ВДП в основной группе по сравнению с контрольной (коррекция сколиотического компонента - 42,7% versus 20,7%,  $p < 0,05$ ; коррекция кифотического компонента 24,3% versus 13,4%,  $p < 0,05$ ) и предотвратить дестабилизацию металлоконструкции в основной группе исследования (0% versus 33,3%,  $p < 0,05$ ).

На основании разработанных методов и алгоритмов хирургического лечения детей с ВДП грудной и поясничной локализации с использованием технологий 3D-моделирования и прототипирования выполнено решение 8 задачи настоящего диссертационного исследования.

**В заключении** подведены общие итоги проведенной работы, представлены сведения по решению всех восьми задач диссертационного исследования и кратко обсуждены полученные результаты.

## **ВЫВОДЫ**

1. На основании проведенных исследований на испытательно-калибровочном полифункциональном стенде установлена усредненная величина нагрузки при выполнении коррекции ВДП у детей дошкольного возраста – 12,7 кг (11,7-12,9), определен диапазон максимальных величин усилий на опорных элементах низкопрофильной реберно-позвоночной системы при distrакции - 27,4 кг - 32,9 кг. Установлено, что разработанный динамометрический блок для контракции и distrакции во время выполнения хирургических манипуляций обеспечивает объективизацию величины прилагаемых сил к опорным элементам конструкции и дозированную контролируемую нагрузку на позвоночник.

2. На основании твердотельной модели сегмента позвоночника ребенка дошкольного возраста с изолированной ВДП при моносегментарной ТПФ с ТВ d 3.5 мм установлено, что костная ткань позвонка имеет меньший предел прочности по сравнению с позвонками у детей школьного возраста (основание дуги позвонка - 6.8 МПа versus 17 МПа, достижение предела прочности - 13.3 кг versus 20.4 кг,  $p < 0,05$ ). ТВ d 4.5 мм значительно снижает нагрузку на костную ткань позвонка по сравнению с ТВ d 3,5 мм, выдерживая повышенную нагрузку в 29,6 кг. Использование транспедикулярно-ламинарной системы с диаметрами ТВ 3,5 мм и 3,0 мм позволяет вывести значения нагрузок из критической зоны напряжений.

3. На основании компьютерного моделирования критических осевых нагрузок твердотельных моделей низкопрофильной реберно-позвоночной конструкции установлена однотипность зоны вероятной локализации дестабилизации конструкции (область позвоночного стержня над проксимальным ТВ), что позволяет предотвратить усталостные переломы путем подбора необходимого диаметра стержня и длины реберной пластины. Полученные средние значения напряжений (198.5 Н - 270.5 Н) в реберно-позвоночных системах с наиболее частыми применяемыми комбинациями типоразмеров ее элементов свидетельствуют о возможности использования данных компоновок у детей дошкольного и младшего школьного возраста.

4. Разработанная программа-планировщик «Платформа для планирования и моделирования хирургических операций на позвоночнике» позволяет проводить предоперационное планирование рациональных типоразмеров и положения ТВ, определять зону и объем корригирующих вертебротомий, создавать необходимые варианты ШН и индивидуальных спинальных систем с учетом биомеханических свойств позвонков пациентов детского возраста и критических осевых нагрузок на элементы конструкции, осуществлять прототипирование спинальных

систем для хирургического лечения детей с ВДП на фоне различных вариантах пороков развития позвонков и синостоза ребер.

5. Применение технологий 3D-моделирования и прототипирования при хирургическом лечении детей с ВДП грудной и поясничной локализации при изолированных пороках развития позвонков в сравнении с методом «свободной руки» уменьшает протяженность металлоконструкции (2,3 versus 3,4 позвонка,  $p < 0,05$ ), сокращает время установки транспедикулярных винтов (31 секунда versus 112 секунд,  $p < 0,05$ ), снижает интраоперационную лучевую нагрузку (0,18 mZv versus 0,54 mZv,  $p < 0,05$ ), обеспечивает высокую точность и корректность имплантации ТВ в позвонки (97,9% versus 78,8%,  $p < 0,05$ ) и полностью исключает (100%) дестабилизацию конструкции при моноsegmentарной ТПФ ( $p < 0,05$ ).

6. При хирургическом лечении детей с ВДП на фоне множественных пороков развития позвонков использование технологий 3D-моделирования и прототипирования обеспечивает достижение большей величины коррекции деформации позвоночника (сколиотический компонент - 88% versus – 61,2%, кифотический компонент - 82% versus 58%,  $p < 0,001$ ), сокращает время установки ТВ (34 секунды versus 118 секунд  $p < 0,001$ ), обеспечивает высокую точность и корректность установки ТВ в позвонки (94,3% versus 73,5%,  $p < 0,001$ ) в сравнении с методом «свободной руки».

7. Использование разработанной индивидуальной низкопрофильной реберно-позвоночной системы при хирургическом лечении детей с множественными пороками развития позвонков и синостозом ребер с применением технологий 3D-моделирования и прототипирования обеспечивает большую величину коррекции ВДП (сколиотический компонент - 42,7% versus 20,7%, кифотический компонент – 24,3% versus – 13,4%,  $p < 0,05$ ) и исключает дестабилизацию металлоконструкции (0% versus 33,3%,  $p < 0,05$ ).



8. Разработанные алгоритмы хирургического лечения детей с ВДП грудной и поясничной локализации с использованием технологий 3D-моделирования и прототипирования обосновывают оптимальный выбор их применения у пациентов изученного профиля, что достоверно увеличивает величину коррекции деформации позвоночника на 27% ( $p < 0,001$ ), сокращает протяженность металлофиксации на 1,4 сегмента ( $p < 0,05$ ), уменьшает время в 3,6 раза ( $p < 0,05$ ) и повышает корректность установки ТВ с 78,8% до 97,9% ( $p < 0,05$ ), предотвращает развитие дестабилизации спинальных систем.

### **ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ**

1. Для прототипирования моделей позвоночника и элементов спинальных систем рационально использовать FDM-технологию 3D – печати УФ-устойчивым материалом ASA, для печати шаблонов-направителей – биологически инертный и термостойкий материал ULTEM 1010.

2. С целью выбора типоразмеров и траектории установок опорных элементов спинальной системы, определения зоны и объема корригирующих остеотомий позвоночника рационально использовать программу-планировщик «Платформа для планирования и моделирования хирургических операций на позвоночнике».

3. Оптимальным дизайном шаблонов-направителей при изолированных пороках развития позвоночника является моносегментарный вариант с расширенной зоной контакта на поперечные отростки позвонка в грудном отделе и с расширенной зоной контакта на остистом отростке позвонка в поясничном отделе позвоночника.

4. Оптимальным дизайном шаблонов-направителей при множественных пороках развития позвоночника является многоуровневый вариант с использованием техники «перехлеста» с расширенной зоной контакта на поперечных отростках позвонков в

грудном отделе и с расширенной зоной контакта на остистых отростках позвонков в поясничном отделе позвоночника.

5. При формировании костных каналов в телах позвонков у детей с ВДП грудной и поясничной локализации для установки ТВ с диаметром резьбовой части 3,5 мм рационально использовать сверло диаметром – 2,7 мм, для установки ТВ с диаметром резьбовой части 4,5 мм - сверло диаметром – 3,2 мм, при диаметре резьбовой части 5,0 – 5,5 мм – сверло диаметром – 3,4 мм.

6. Для минимизации риска дестабилизации металлоконструкции при моносегментарной и бисегментарной фиксации у детей дошкольного возраста с ВДП грудной и поясничной локализации при установке ТВ с диаметром резьбовой части 3,0 мм рационально использование транспедикулярно-ламинарной спинальной системы.

7. С целью контроля корригирующих усилий и исключение дестабилизации спинальных систем у детей с ВДП грудной и поясничной локализации в ходе хирургического вмешательства рационально использовать разработанное устройство «Блок динамометрический для контракции и дистракции при хирургическом лечении деформаций позвоночника» (Патент РФ на полезную модель №227005).

## **ОСНОВНЫЕ ПЕЧАТНЫЕ РАБОТЫ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

**1. Виссарионов С.В., Кокушин Д.Н., Картавенко К.А., Ефремов А.М. / Хирургическое лечение детей с врожденной деформацией поясничного и пояснично-крестцового отделов позвоночника // Хирургия позвоночника. – 2012. – № 3. – С. 33-37.**

**2. Виссарионов С.В., Кокушин Д.Н., Белянчиков С.М., Мурашко В.В., Картавенко К.А / Оперативное лечение врожденной деформации грудопоясничного отдела позвоночника у детей // Ортопедия, травматология и восстановительная хирургия детского возраста. – 2013. – Т. 1, № 1. – С. 10-15.**

3. Виссарионов С.В., Хусаинов Н.О., Кокушин Д.Н. / Анализ результатов хирургического лечения детей с множественными аномалиями развития позвонков и грудной клетки с использованием внепозвоночных металлоконструкций // Ортопедия, травматология и восстановительная хирургия детского возраста. - 2017. - Т. 5. № 2. - С. 5-12.

4. Хусаинов Н.О., Виссарионов С.В., Кокушин Д.Н. / Хирургическое лечение детей с врожденными деформациями позвоночника на фоне множественных пороков развития: обзор литературы // Хирургия позвоночника. - 2017. - Т. 14. № 2. - С. 14-20.

5. Виссарионов С.В., Картавенко К.А., Кокушин Д.Н., Баиндурашвили А.Г., Белянчиков С.М., Хусаинов Н.О., Овечкина А.В. / Хирургическое лечение детей с врожденной деформацией поясничной локализации: экстирпация или частичная резекция полупозвонка? // Травматология и ортопедия России. - 2017. - Т. 23. № 4. - С. 18-28.

6. Кокушин Д.Н., Виссарионов С.В., Баиндурашвили А.Г., Овечкина А.В., Познович М.С. / Сравнительный анализ положения транспедикулярных винтов у детей с врожденным сколиозом: метод "свободной руки" (in vivo) и шаблоны-направители (in vitro) // Травматология и ортопедия России. - 2018. - Т. 24. № 3. - С. 53-63.

7. Виссарионов С.В., Картавенко К.А., Кокушин Д.Н. / Естественное течение врожденной деформации позвоночника у детей с изолированным нарушением формирования позвонка в поясничном отделе // Хирургия позвоночника. - 2018. - Т. 15. № 1. - С. 6-17.

8. Виссарионов С.В., Хусаинов Н.О., Баиндурашвили А.Г., Кокушин Д.Н., Картавенко К.А. / Сравнительный анализ этапного хирургического лечения детей с врожденной деформацией грудного отдела позвоночника на фоне множественных пороков развития позвонков (предварительные результаты) // Современные проблемы науки и образования. - 2018. - № 2. <https://science-education.ru/ru/article/view?id=27440>

9. Виссарионов С.В., Баиндурашвили А.Г., Хусаинов Н.О., Кокушин Д.Н., Барт В.А., Белецкий А.В. / Особенности лучевой картины у детей с врожденной деформацией грудного отдела позвоночника на фоне нарушения сегментации боковых поверхностей тел позвонков // Травматология и ортопедия России. - 2018. - Т. 24. № 2. - С. 41-48.

10. Виссарионов С.В., Сюндюков А.Р., Кокушин Д.Н., Хусаинов Н.О., Хардигов М.А. / Сравнительный анализ хирургического лечения детей дошкольного возраста с врожденной деформацией позвоночника при изолированных полупозвонках из комбинированного и дорсального доступов // Ортопедия, травматология и восстановительная хирургия детского возраста. - 2019. - Т. 7. № 4. - С. 5-14.

11. Кокушин Д.Н., Виссарионов С.В., Хардигов М.А., Хусаинов Н.О., Филиппова А.Н., Ильин В.В. / Анализ причин дестабилизации металлоконструкции при коррекции врожденной деформации позвоночника у детей младшей возрастной группы // Ортопедия, травматология и восстановительная хирургия детского возраста. - 2020. - Т. 8. № 1. - С. 15-24.

12. Кокушин Д.Н., Виссарионов С.В., Баиндурашвили А.Г., Овечкина А.В., Хусаинов Н.О., Познович М.С., Залетина А.В. / Применение шаблонов-направителей при хирургическом лечении детей дошкольного возраста с врожденным сколиозом грудной и поясничной локализации // Ортопедия, травматология и восстановительная хирургия детского возраста. - 2020. - Т. 8. № 3. - С. 305-316.

13. Vissarionov S.V., Kokushin D.N., Khusainov N.O., Kartavenko K.A., Avila-Rodriguez M.F., Somasundaram S.G., Kirkland C.E., Tarasov V.V., Aliev G. / Comparing the treatment of congenital spine deformity using freehand techniques in vivo and 3d-printed templates in vitro (prospective–retrospective single-center analytical single-cohort study) // *Advances in Therapy*. - 2020. - 37(1). P.402-419.

14. Виссарионов С.В., Кокушин Д.Н., Филиппова А.Н., Хусаинов Н.О., Абдалиев С.С. / Хирургическая коррекция деформации позвоночника у детей с врожденным кифосколиозом // *Современные проблемы науки и образования*. - 2020. - № 4. <https://science-education.ru/ru/article/view?id=29970>

15. Кокушин Д.Н., Хардигов М.А., Виссарионов С.В., Соколова В.В., Хусаинов Н.О., Залетина А.В. / Сравнительный анализ качества жизни детей с врожденным сколиозом после хирургического лечения: экстирпация полупозвонка из дорсального и комбинированного доступов // Ортопедия, травматология и восстановительная хирургия детского возраста. - 2021. - Т. 9. № 2. - С. 153-162.

16. Виссарионов С.В., Асадулаев М.С., Орлова Е.А., Тория В.Г., Картавенко К.А., Рыбинских Т.С., Мурашко Т.В., Хардигов М.А.,

**Кокушин Д.Н. / Оценка состояния респираторной системы у детей с врожденным сколиозом методом импульсной осциллометрии и компьютерной томографии (предварительные результаты) // Ортопедия, травматология и восстановительная хирургия детского возраста. - 2022. - Т. 10. № 1. - С. 33-42.**

**17. Виссарионов С.В., Филиппова А.Н., Кокушин Д.Н., Хардигов М.А., Рыжиков Д.В., Шабунин А.С., Сериков В.В. / Сравнительный анализ результатов хирургического лечения детей дошкольного и младшего школьного возраста с врожденной деформацией позвоночника при изолированном полупозвонке // Ортопедия, травматология и восстановительная хирургия детского возраста. - 2022. - Т. 10. № 2. - С. 121-128.**

**18. Виссарионов С.В., Асадулаев М.С., Орлова Е.А., Иванова П.А., Шабунин А.С., Мурашко Т.В., Хардигов М.А., Тория В.Г., Рыбинских Т.С., Родионова К.Н., Кокушин Д.Н. / Оценка эффективности лечения детей с врожденным сколиозом при несегментированном стержне и синостозе ребер // Ортопедия, травматология и восстановительная хирургия детского возраста. - 2022. - Т. 10. № 3. - С. 211-221.**

**19. Виссарионов С.В., Михайловский М.В., Губина Е.В., Кокушин Д.Н., Филиппова А.Н., Хусаинов Н.О. Хирургия врожденных деформаций позвоночника. – Санкт-Петербург: Общество с ограниченной ответственностью "Издательство "СпецЛит", 2023. – 183 с.**

**20. Асадулаев М.С., Виссарионов С.В., Шабунин А.С., Родионова К.Н., Новосад Ю.А., Тория В.Г., Кокушин Д.Н., Хусаинов Н.О., Филиппова А.Н., Рыжиков Д.В. / Анализ результатов применения вертебротомии в лечении детей с аномалией развития позвоночника и грудной клетки // Ортопедия, травматология и восстановительная хирургия детского возраста. – 2024. - Т. 12. № 3. - С. 293–306.**

**21. Евразийский патент № 040285 Евразийское патентное ведомство, А61В 17/56 (2006.01), А61В 17/70 (2006.01). Устройство для коррекции врожденной деформации позвоночника и грудной клетки при одностороннем нарушении сегментации позвонков грудного отдела позвоночника и синостоза ребер у детей: № 202091117: заявлено 28.03.2018: опубликовано 17.05.2022 / Виссарионов С.В., Баиндурашвили А.Г., Кокушин Д.Н., Хусаинов Н.О., Амельченя А.С.; патентообладатель: ФГБУ «НМИЦ детской травматологии и ортопедии им. Г.И. Турнера» Минздрава России. – 5с.**

22. Евразийский патент № 047488 Евразийское патентное ведомство, А61В 17/70 (2006.01). Транспедикулярно-ламинарный эндокорректор позвоночника: № 202300053: заявлено 29.08.2023: опубликовано 26.07.2024 / Кокушин Д.Н., Виссарионов С.В., Амельчя А.С., Амельчя П.А.; патентообладатель: ФГБУ «НМИЦ детской травматологии и ортопедии им. Г.И. Турнера» Минздрава России. – 7с.

23. Патент № 2701782 Российская Федерация, МПК А61В 17/00 (2006.01). Способ ориентированной установки транспедикулярных винтов при коррекции врожденной деформации позвоночника у детей с изолированным нарушением формирования позвонка : № 2017147160: заявлено 29.12.2017: опубликовано 01.10.2019/Виссарионов С.В., Баиндурашвили А.Г., Хусаинов Н.О., Кокушин Д.Н.; патентообладатель: ФГБУ «НМИЦ детской травматологии и ортопедии им. Г.И. Турнера» Минздрава России. – 7с.

24. Патент № 2687655 Российская Федерация, МПК А61В 17/56 (2006.01). Способ переднего спондилодеза при хирургическом лечении врожденной деформации позвоночника на фоне заднебокового полупозвонка у детей: № 2018110761: заявлено 26.03.2018: опубликовано 15.05.2019/Кокушин Д.Н., Виссарионов С.В., Картавенко К.А., Мурашко В.В.; патентообладатель: ФГБУ «НМИЦ детской травматологии и ортопедии им. Г.И. Турнера» Минздрава России. – 8с.

25. Патент № 2736318 Российская Федерация, МПК А61В 17/70 (2006.01). Способ коррекции врожденной деформации позвоночника при нарушении формирования позвонков у детей : № 2019113392: заявлено 29.04.2019: опубликовано 13.11.2020/Хардииков М.А., Виссарионов С.В., Кокушин Д.Н.; патентообладатель: ФГБУ «НМИЦ детской травматологии и ортопедии им. Г.И. Турнера» Минздрава России. – 7с.

26. Патент № 2815218 Российская Федерация, МПК А61В 17/70 (2006.01). Устройство для моносегментарной коррекции тяжелой формы врожденного кифосколиоза на фоне изолированного полупозвонка грудной и поясничной локализации у детей до трех лет : № 2023111786: заявлено 04.05.2023: опубликовано 12.03.2024/Кокушин Д.Н., Виссарионов С.В., Мушников Н.С., Лунев Ю.К., Грушевский Н.В., Рахманов Д.В.; патентообладатель ФГБУ «НМИЦ детской травматологии и ортопедии им. Г.И. Турнера» Минздрава России. – 9с.

27. Патент № 2818070 Российская Федерация, МПК А61В 17/70 (2006.01). Устройство для моносегментарной коррекции тяжелой формы врожденного кифосколиоза на фоне изолированного полупозвонка грудной и поясничной локализации у детей дошкольного и младшего школьного возраста : № 2023112484: заявлено 11.05.2023: опубликовано 23.04.2024/Кокушин Д.Н., Виссарионов С.В., Мушников Н.С., Лунев Ю.К., Грушевский Н.В., Рахманов Д.В.; патентообладатель ФГБУ «НМИЦ детской травматологии и ортопедии им. Г.И. Турнера» Минздрава России. – 6с.

28. Патент № 203215 Российская Федерация, МПК А61В 17/70 (2006.01). Устройство корригирующее при хирургическом лечении врожденного кифосколиоза грудного и поясничного отделов позвоночника на фоне нарушения формирования позвонков у детей до трех лет : № 2020133218: заявлено 08.10.2020: опубликовано 31.05.2021/Кокушин Д.Н., Виссарионов С.В., Баиндурашвили А.Г., Хусаинов Н.О., Амельченя А.С.; патентообладатель: ФГБУ «НМИЦ детской травматологии и ортопедии им. Г.И. Турнера» Минздрава России. – 8с.

29. Патент № 227005 Российская Федерация, МПК А61В 17/56 (2006.01), А61В 17/70 (2006.01). Блок динамометрический для контракции и дистракции при хирургическом лечении деформаций позвоночника : № 2023128147: заявлено 30.10.2023: опубликовано 01.07.2024/Кокушин Д.Н., Виссарионов С.В., Янушкевич В.Н., Амельченя А.С., Амельченя П.А.; патентообладатель: ФГБУ «НМИЦ детской травматологии и ортопедии им. Г.И. Турнера» Минздрава России. – 7с.

30. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2022618828 Российская Федерация. Платформа для планирования и моделирования хирургических операций на позвоночнике : № 2022614417: заявлено 22.03.2022: опубликовано 18.05.2022 / Кокушин Д.Н., Виссарионов С.В., Дженжера Г.Е., Кузьмичев А.А., Шленов Д.С.; патентообладатель: ФГБУ «НМИЦ детской травматологии и ортопедии им. Г.И. Турнера» Минздрава России. – 1с.

31. База данных № 2023623833 Российская Федерация. База данных критических осевых нагрузок низкопрофильной реберно-позвоночной конструкции 3.5: № 2023623629: заявлено 30.10.2023: опубликовано 08.11.2023 / Кокушин Д.Н., Виссарионов С.В., Янушкевич В.Н.; патентообладатель: ФГБУ «НМИЦ детской

травматологии и ортопедии им. Г.И. Турнера» Минздрава России. – 1с.

32. База данных № 2023623835 Российская Федерация. База данных критических осевых нагрузок низкопрофильной реберно-позвоночной конструкции 4.5: № 2023623631: заявлено 30.10.2023: опубликовано 08.11.2023 / Кокушин Д.Н., Виссарионов С.В., Янушкевич В.Н.; патентообладатель: ФГБУ «НМИЦ детской травматологии и ортопедии им. Г.И. Турнера» Минздрава России. – 1с.

33. База данных № 2023623834 Российская Федерация. База данных критических осевых нагрузок низкопрофильной реберно-позвоночной конструкции 5.0: № 2023623630: заявлено 30.10.2023: опубликовано 08.11.2023 / Кокушин Д.Н., Виссарионов С.В., Янушкевич В.Н.; патентообладатель: ФГБУ «НМИЦ детской травматологии и ортопедии им. Г.И. Турнера» Минздрава России. – 1с.

34. База данных № 2023624050 Российская Федерация. База данных критических осевых нагрузок низкопрофильной реберно-позвоночной конструкции 4.0: № 2023623591: заявлено 30.10.2023: опубликовано 20.11.2023 / Кокушин Д.Н., Виссарионов С.В., Янушкевич В.Н.; патентообладатель: ФГБУ «НМИЦ детской травматологии и ортопедии им. Г.И. Турнера» Минздрава России. – 1с.