

*На правах рукописи*

ЖУМАГАЗИЕВ

Саян Елемесьевич

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИК АРТРОДЕЗА ГОЛЕНОСТОПНОГО  
СУСТАВА ПРИ ЛЕЧЕНИИ ПАЦИЕНТОВ С ДЕФОРМИРУЮЩИМ АРТРОЗОМ  
(КЛИНИКО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ)

3.1.8. Травматология и ортопедия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата медицинских наук

Санкт-Петербург

2023

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном военном образовательном учреждении высшего образования «Военно-медицинская академия им. С.М. Кирова» Министерства обороны Российской Федерации

**Научный руководитель:**

доктор медицинских наук профессор **Хомянец Владимир Васильевич**

**Официальные оппоненты:**

**Ахтямов Ильдар Фуатович** – доктор медицинских наук профессор, ФГБОУ ВО «Казанский государственный медицинский университет» Минздрава России, кафедра травматологии, ортопедии и хирургии экстремальных состояний, заведующий;

**Ратьев Андрей Петрович** – доктор медицинских наук, доцент, ФГАОУ ВО «Российский национальный исследовательский медицинский университет имени Н.И. Пирогова» Минздрава России, кафедра травматологии, ортопедии и военно-полевой хирургии Педиатрического факультета, профессор.

**Ведущая организация** – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Первый Санкт-Петербургский государственный медицинский университет имени академика И.П. Павлова» Министерства здравоохранения Российской Федерации.

Защита состоится «19» сентября 2023 года в 13.00 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, д. 8).

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

Автореферат разослан «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2023 г.

Ученый секретарь диссертационного совета 99.0.008.02  
кандидат медицинских наук



Денисов А.О.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность темы исследования**

Одной из актуальных проблем современной травматологии и ортопедии является лечение пациентов с деформирующим артрозом голеностопного сустава (Egloff C. et al., 2013; Grunfeld R. et al., 2014; Veljkovic A.N. et al., 2019; Bendall S. et al., 2022). В настоящее время около 1% населения всей планеты страдают данной патологией (Valderrabano V. et al., 2009; Barg A. et al., 2013). При этом, в отличие от заболеваний других суставов, в 70–78% случаев артроз голеностопного сустава носит посттравматический характер (Saltzman C.L. et al., 2005; Valderrabano V. et al., 2009). Повреждения в области голеностопного сустава являются распространенными и по данным В.R. Waterman и соавт. (2010) составляют около 20% всех травм опорно-двигательного аппарата. Частота возникновения посттравматического артроза голеностопного сустава варьирует от 15 до 60% случаев, который при III–IV стадии заболевания является причиной инвалидизации (Тихилов Р.М. и др., 2009; Яременко Д.А. и др., 2012; Омельченко Т.Н., 2013; Горбатов Р.О. и др., 2016; Stufkens S.A. et al., 2010; Lübbecke A. et al., 2012; Segal A.D. et al., 2012; Da Cunha R.J. et al., 2018). Другой наиболее распространенной причиной развития артроза служит ревматоидный артрит (до 12% случаев). Частота первичного деформирующего артроза голеностопного сустава составляет 7–9% (Saltzman C.L. et al., 2005).

Артродез голеностопного сустава по-прежнему остается «золотым стандартом» в лечении пациентов с терминальными стадиями деформирующего артроза голеностопного сустава (Prissel M.A. et al., 2017; Maenohara Y. et al., 2018; Ferguson Z. et al., 2019; Manke E. et al., 2020; Suo H. et al., 2020). За последнее десятилетие отмечается тенденция к увеличению количества выполненных операций артродезирования голеностопного сустава (Novoa-Parra C.D. et al., 2021; Milstrey A. et al., 2021).

За более чем 140-летний период существования операции артродеза голеностопного сустава в качестве метода лечения деформирующего артроза разработано и предложено множество методик и способов его выполнения, а также большое количество имплантатов для фиксации большеберцовой и таранной костей. Именно жесткая фиксация указанных костей создает возможность для формирования анкилоза голеностопного сустава в оптимальные сроки. Наиболее полно этому критерию отвечает применение винтов и пластин, обеспечивающих достаточную стабильность и оптимальную компрессию между анкилозируемыми поверхностями большеберцовой и таранной костей (Prissel M.A. et al., 2017; Heuvel S.B.M. et al., 2021; Teramoto A. et al., 2020). Однако, по последним данным, частота несостоятельности

артродеза большеберцово-таранного сочленения достигает 15% (Kim H.J. et al., 2017; Maffulli N. et al., 2017; Lawton C.D. et al., 2020). В связи с этим поиск оптимального имплантата, позволяющего обеспечить плотный костный контакт между большеберцовой и таранной костями и стабильную их фиксацию до полного сращения, продолжается, а проблема надежности фиксации голеностопного сустава при артродезе требует новых решений.

### **Степень разработанности темы исследования**

Артродез голеностопного сустава остается наиболее часто применяемым способом хирургического лечения пациентов с поздними стадиями деформирующего артроза (Maenohara Y. et al., 2018; Ferguson Z. et al., 2019; Manke E. et al., 2020; Milstrey A. et al., 2021). Повышение эффективности при данной операции достигается плотным костным контактом между артродезируемыми поверхностями и стабильной их фиксацией до образования анкилоза большеберцово-таранного сочленения. Для этого предложены и разработаны различные внутренние фиксаторы (винты, пластины, интрамедуллярные стержни), аппараты внешней фиксации (Илизарова, Ассоциации остеосинтеза (АО), Taylor и др.), а также их комбинации. При этом на сегодняшний день наиболее распространенными и обоснованными с точки зрения последующего восстановления функции являются винты (Prissel M.A. et al., 2017; Heuvel S.B.M. et al., 2022; Teramoto A. et al., 2020). Однако следует отметить, что при применении винтов у пациентов с остеопорозом были отмечены более высокие показатели несращения голеностопного сустава (Thordarson D.V. et al., 1992). К тому же M.M. Betz и соавт. (2013) и P.M. Mitchell и соавт. (2017) утверждают, что фиксация голеностопного сустава винтами не обеспечивает достаточной жесткости и первичной стабильности при выраженных деформациях сустава, плохом качестве кости и остеопорозе. Кроме того, в биомеханических исследованиях доказаны преимущества фиксации большеберцовой и таранной костей пластиной и спонгиозными винтами по сравнению с фиксацией только пластиной или только спонгиозными винтами (Clifford C. et al., 2015). Таким образом, проблема фиксации голеностопного сустава при артродезе требует дальнейшего изучения и совершенствования характеристик жесткости и надежности в системе «кость — имплантат». Данную проблему можно решить применением для артродеза голеностопного сустава передней пластины в комбинации со спонгиозными винтами, однако в настоящее время отсутствует экспериментально-клиническое обоснование использования данной комбинации фиксаторов. Отмеченные положения определили цель и задачи настоящего исследования.

### **Цель исследования**

На основании экспериментальных биомеханических и клинических исследований определить предпочтительный способ артрореза голеностопного сустава у пациентов с деформирующим артрозом III–IV стадии.

### **Задачи исследования**

1. Провести анализ результатов лечения пациентов с деформирующим артрозом голеностопного сустава III–IV стадии после его артрореза тремя спонгиозными винтами.
2. Разработать специальную пластину и предложить другой способ артрореза голеностопного сустава на основании биомеханического моделирования, изучения напряжения и деформации, возникающих в системе «имплантаты — большеберцовая и таранная кости» при опорных нагрузках.
3. Провести сравнительное исследование прочности фиксации голеностопного сустава предложенными способами путем биомеханических испытаний, выполненных на высокоточных виртуальных моделях и специальных стендах.
4. Провести клиническую апробацию нового способа артрореза пластиной и двумя спонгиозными винтами при лечении пациентов с деформирующим артрозом голеностопного сустава III–IV стадии и оценить его эффективность.

### **Научная новизна исследования**

1. Разработан способ выполнения артрореза голеностопного сустава с использованием трех спонгиозных винтов (патент РФ на изобретение № 2633945).
2. Исследована и внедрена в клиническую практику новая оригинальная пластина для артрореза голеностопного сустава (патент РФ на полезную модель № 216491).
3. Впервые на основании биомеханического моделирования изучены напряжения и деформации, возникающие в системе «имплантаты — большеберцовая и таранная кости» при опорных нагрузках.
4. Впервые произведен сравнительный биомеханический анализ стабильности фиксации при артрорезе голеностопного сустава тремя спонгиозными винтами, передней пластиной серийного производства и разработанной пластиной, комбинируемой с двумя спонгиозными винтами, методом конечных элементов.
5. На основе полученных данных разработаны предложения по совершенствованию операционной техники и способа артрореза голеностопного сустава.
6. Проведено сравнительное исследование прочности фиксации голеностопного сустава предложенными способами путем биомеханических испытаний, выполненных на модели с изучением относительной деформации на стендах.

### **Практическая значимость работы**

1. Разработанные способы артродеза голеностопного сустава при лечении пациентов с поздними стадиями деформирующего артроза позволяют улучшить результаты за счет одномоментной компрессии между замыкаемыми поверхностями сустава и последующего надежного удержания таранной кости в заданном положении.

2. Оригинальная передняя пластина за счет своих конструктивных особенностей позволяет добиться достаточной степени фиксации и компрессии большеберцовой и таранной костей, а анатомически заданный угол между длинным и коротким плечами пластины дает возможность установить таранную кость в правильное для артродеза положение.

3. Биомеханические испытания моделей различных вариантов фиксации голеностопного сустава при артродезе, проведенные при помощи испытательных машин и специальных программных пакетов, позволили изучить прочностные свойства разработанного имплантата при разных нагрузках и определить оптимальный вариант фиксации большеберцовой и таранной костей.

4. При клинической апробации предложенного способа фиксации голеностопного сустава для артродеза установлено, что при его применении статистически значимо сокращаются время хирургического вмешательства и продолжительность работы с электронно-оптическим преобразователем.

### **Методология и методы исследования**

Проведенное исследование включало две последовательные и взаимосвязанные части: экспериментальную и клиническую.

Методология диссертационной работы на первом этапе предусматривала изучение медицинской литературы, посвященной проблеме артродезирования голеностопного сустава при лечении пациентов с поздними стадиями деформирующего артроза. В результате были выделены перспективные современные способы и имплантаты, применяемые для фиксации большеберцовой и таранной костей, что позволило определить цель и задачи исследования, дизайн научного поиска и методы его реализации.

На следующем этапе собственных исследований были проведены биомеханические эксперименты методом конечных элементов на модели артродеза голеностопного сустава с использованием различных вариантов его фиксации: тремя спонгиозными винтами, четыре варианта фиксации предложенной пластиной в комбинации с двумя спонгиозными винтами, а также пластиной серийного производства. В ходе этих экспериментов оценивали в сравнительном плане наибольшие поля перемещений,

максимальные эквивалентные напряжения в имплантатах и костях, наибольшее контактное давление на границе большеберцовой и таранной костей. Полученные данные позволили сделать вывод о преимуществах разработанной пластины, комбинируемой с двумя спонгиозными винтами с точки зрения биомеханики.

В ходе третьего этапа диссертационного исследования были произведены сравнительные стендовые испытания на моделях артродеза голеностопного сустава, фиксированных тремя спонгиозными винтами и разработанной пластиной в комбинации с двумя спонгиозными винтами. Сравнивали смещение на границе большеберцовой и таранной костей в условиях статической и циклической осевых нагрузок, создаваемых испытательными машинами. Результаты проведенного эксперимента позволили сделать вывод о биомеханических преимуществах фиксации пластины, комбинируемой с двумя спонгиозными винтами.

На завершающих этапах работы было проведено сравнительное клиническое исследование в двух группах пациентов. В первую (основную) группу были включены 14 пациентов, которым была выполнена операция артродеза голеностопного сустава пластиной и двумя спонгиозными винтами. Оценку результатов лечения проводили с использованием балльных шкал ВАШ (визуальная аналоговая шкала) и AOFAS (American Orthopaedic Foot and Ankle Society), изучали частоту и сроки формирования анкилоза, частоту инфекционных и неинфекционных осложнений, а также время хирургического вмешательства и продолжительность работы с электронно-оптическим преобразователем. Во вторую клиническую группу (сравнения) были включены 36 пациентов, которым были выполнены операции артродеза голеностопного сустава тремя спонгиозными винтами. Функциональные исходы у этих пациентов оценивали по аналогичной с первой группой методике. Затем был выполнен сравнительный анализ полученных показателей в каждой из групп. Также с учетом данных экспериментальной части настоящего исследования разработана новая пластина для артродеза голеностопного сустава. Биомеханические свойства, обеспечиваемые новой конструкцией, в сравнении с тремя спонгиозными винтами и современным аналогом (пластина серийного производства) изучены в эксперименте. Разработанная оригинальная пластина для артродеза голеностопного сустава была апробирована в клинике, доказав свою эффективность.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Разработанная оригинальная пластина для артродеза голеностопного сустава (патент РФ на полезную модель № 216491) по результатам компьютерного моделирования и данным клинической апробации является эффективным фиксатором при лечении пациентов с деформирующим артрозом в терминальной стадии.

2. Использованная биомеханическая модель артродеза голеностопного сустава более устойчива к осевым статическим и циклическим нагрузкам при фиксации пластиной и двумя спонгиозными винтами по сравнению с вариантом фиксации тремя спонгиозными винтами. Так, при статической нагрузке наибольшая амплитуда смещений на границе большеберцовой и таранной костей в случае применения трех спонгиозных винтов составила 0,289 мм, пластины и двух спонгиозных винтов — 0,111 мм, а относительная деформация — 1,2 и 0,42%, соответственно. При циклической нагрузке амплитуда смещения составила 0,106 мм при фиксации голеностопного сустава тремя спонгиозными винтами и 0,03 мм — пластиной и винтами.

3. Практическое применение предложенных способов артродеза голеностопного сустава тремя спонгиозными винтами и пластиной, комбинируемой с двумя спонгиозными винтами, позволяет добиться у профильных пациентов хороших и удовлетворительных функциональных исходов лечения, а при фиксации вторым вариантом сокращаются время хирургического вмешательства и продолжительность работы с электронно-оптическим преобразователем по сравнению с первым ( $p < 0,05$ ).

### **Степень достоверности и апробация результатов исследования**

По теме диссертационного исследования опубликовано 10 печатных работ, в том числе 3 статьи в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК РФ и 2 патента РФ: патент РФ на изобретение № 2633945 «Способ выполнения артродеза голеностопного сустава с использованием трех спонгиозных винтов», патент РФ на полезную модель № 216491 «Пластина для артродеза голеностопного сустава».

Результаты диссертационной работы доложены на Ежегодной научно-практической конференции с международным участием «Вреденовские чтения» (Санкт-Петербург, 2021 г.), Седьмом Всероссийском конгрессе с международным участием «Медицинская помощь при травмах. Новое в организации и технологиях. Вопросы профессионального медицинского образования в России» (Санкт-Петербург, 2022 г.), Всероссийской конференции молодых ученых «Вреденовские игры» (Санкт-Петербург, 2022 г.).

Результаты диссертационного исследования внедрены в практику работы клиники военной травматологии и ортопедии Военно-медицинской академии им. С.М. Кирова, а также используются при обучении ординаторов, адъюнктов (аспирантов) и травматологов-ортопедов, проходящих усовершенствование по программам дополнительного образования.

### **Личное участие автора в получении результатов**

Тема и план диссертации, ее основные идеи и содержание разработаны совместно с научным руководителем. Автор самостоятельно осуществил аналитический обзор отечественной и зарубежной медицинской литературы. В результате анализа сформулировал проблемные задачи и, таким образом, аргументировал актуальность темы настоящего исследования, определил цель, задачи, предмет и методические принципы исследования. Непосредственно принимал участие в построении компьютерной модели для анализа методом конечных элементов, а также в конструировании моделей для проведения эксперимента на специальных испытательных машинах. Участвовал в большинстве оперативных вмешательств по теме исследования, осуществил сбор первичных данных, обработку с использованием методов системного анализа и статистических методов. Автором были сформулированы выводы, практические рекомендации и основные положения, выносимые на защиту, подготовлен текст диссертационной работы. Помимо этого, диссертант принимал непосредственное участие в подготовке статей, тезисов на конференции и заявок на изобретения, а также выступал с научными докладами по результатам проведенных исследований.

### **Объем и структура диссертации**

Материалы диссертации представлены на 189 страницах. Диссертация состоит из введения, обзора литературы, описания материала и методик исследования, двух глав собственных исследований, заключения, выводов, практических рекомендаций, списка литературы и приложения. Работа содержит 13 таблиц, 45 рисунков. Список литературы включает 272 источника, из них 40 отечественных и 232 иностранных авторов.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Диссертационная работа состояла из экспериментальной и клинической частей (рисунок 1).

Во **введении** обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи 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.

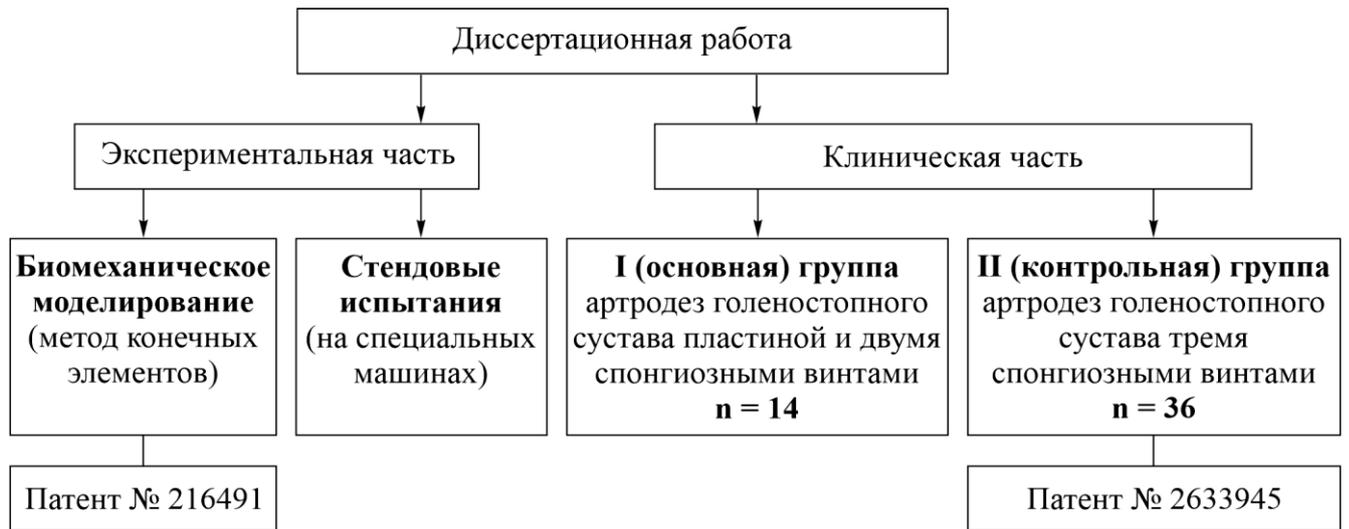


Рисунок 1 — Схема диссертационной работы

В **первой главе** диссертации представлен анализ профильной отечественной и зарубежной литературы, изучены исторические аспекты эволюции операции артродеза голеностопного сустава при лечении пациентов с терминальными стадиями деформирующего артроза. Проанализированы и выделены преимущества и недостатки современных имплантатов, применяемых при артродезе голеностопного сустава. По результатам изучения научной литературы выявлено, что в настоящее время для фиксации большеберцово-таранного сочленения применяются преимущественно винты. Однако, по мнению ряда авторов научных публикаций, фиксация голеностопного сустава только винтами не обеспечивает достаточной жесткости и первичной стабильности при выраженных деформациях сустава, плохом качестве кости и остеопорозе. Помимо этого, на основании изученной литературы констатирована недостаточность достоверных данных, касающихся биомеханических характеристик системы «имплантат — кость» при фиксации голеностопного сустава пластиной и двумя спонгиозными винтами, а также отмечено отсутствие информации в отношении продолжительности операции и длительности рентгеновского излучения. На основании анализа медицинской литературы была обоснована необходимость совершенствования методик артродеза голеностопного сустава и разработки оригинального имплантата для его выполнения.

Во **второй главе** представлены материалы и методы диссертационного исследования. Сотрудниками кафедры военной травматологии и ортопедии Военно-медицинской академии совместно с компанией «Остеомед» разработана оригинальная пластина для артродеза голеностопного сустава (патент РФ на полезную модель № 216491).

При помощи программных пакетов созданы математические модели дистального отдела большеберцовой кости и таранной, спонгиозных винтов диаметром 6,5 мм с неполной резьбой и длиной резьбовой части 16 мм, кортикальных винтов диаметром 3,5 мм, винтов с угловой стабильностью диаметром 3,5 мм, разработанной пластины для артродеза голеностопного сустава на три и четыре отверстия в длинном плече, а также пластины серийного производства. Далее были построены 6 вариантов биомеханических моделей артродеза голеностопного сустава. Первый вариант — артродез голеностопного сустава с применением трех спонгиозных винтов. Второй вариант — разработанной пластиной в сочетании с двумя спонгиозными винтами, проксимальный винт — кортикальный. Третий вариант — фиксация с применением пластины в комбинации с двумя спонгиозными винтами, при этом использовали проксимальный винт с угловой стабильностью. Четвертый вариант — фиксация длинной пластиной и двумя спонгиозными винтами, проксимальный винт — кортикальный. Пятый вариант аналогичен четвертому, за исключением винта, введенного в проксимальное отверстие длинного плеча пластины, здесь использовали винт с угловой стабильностью. Шестой вариант — фиксация большеберцово-таранного сочленения пластиной серийного производства. Изучены напряжения и деформации всех моделей при приложении различных видов нагрузок: вальгусная нагрузка, варусная нагрузка, тыльное сгибание, подошвенное сгибание, инверсия, эверсия с силой 400 Н, а также нагрузка при ходьбе. Проанализированы наибольшие поля перемещений, максимальные эквивалентные напряжения в костях и имплантатах, а также наибольшее контактное давление на границе большеберцовой и таранной костей.

Проведены стендовые эксперименты, направленные на сравнение стабильности фиксации голеностопного сустава 3-мя спонгиозными винтами (1-я модель) и разработанной пластиной в комбинации с 2-мя спонгиозными винтами (2-я модель). Исследуемые модели были протестированы при статической и динамической (циклической) осевой нагрузке. При проведении статической осевой нагрузки образцы устанавливали в испытательную машину Shimadzu EZ Test 5 kN и нагружали вертикально вдоль механической оси большеберцовой кости до 800 Н со скоростью 1 мм/мин. Для проведения динамической нагрузки на образцы вертикально вдоль механической оси большеберцовой кости, проходящей через центр кости, прикладывали циклические нагрузки от 20 до 800 Н с частотой 2 Гц ступенями через каждые 5600 циклов: 20–200 (250), 20–400, 20–600, 20–800 Н.

Клиническая часть настоящей работы представляет собой наблюдательное когортное исследование. Она основана на результатах артродезирования 50 пациентов с

деформирующим артрозом голеностопного сустава III и IV стадий (по классификации Kellgren–Lawrence). Пострадавшие были разделены на две сравниваемые группы. В первую, основную, группу вошли 14 пострадавших с деформирующим артрозом голеностопного сустава III и IV стадий, которым был выполнен артрорез с применением передней пластины в комбинации с 2-мя спонгиозными винтами. Вторую группу (группу сравнения) составили 36 пациентов с деформирующим артрозом голеностопного сустава III и IV стадий, оперированные 3-мя спонгиозными винтами. Изучали следующие показатели: продолжительность операции; время работы с использованием электронно-оптического преобразователя; сроки начала осевой нагрузки на конечность; сроки анкилозирования после операций; частоту возникновения случаев замедленной консолидации. В сроки до оперативного лечения, 6, 12, 24 мес. и на контрольном осмотре после артрореза проводили анкетирование по шкалам AOFAS и ВАШ и опрос пациентов по телефону. Всем пациентам выполняли рентгенографию обоих голеностопных суставов в прямой и боковой проекциях с захватом стопы стоя с полной нагрузкой на конечности. Рентгенологическое исследование проводили перед оперативным вмешательством, на следующие сутки после оперативного вмешательства, через 6 и 10 недель, 6, 12, 24 мес. и на контрольном осмотре. При анализе рентгенограмм пациентов перед оперативным вмешательством оценивали стадию деформирующего артроза голеностопного сустава по рентгенологической классификации J.H. Kellgren и J.S. Lawrence (1957), фронтальный медиальный большеберцово-таранный угол (БТУ) на обоих голеностопных суставах, сагиттальный большеберцово-таранный угол на здоровой конечности. При анализе рентгеновских снимков пациентов в послеоперационном периоде оценивали следующие показатели: 1) признаки костного анкилоза голеностопного сустава; 2) сагиттальный большеберцово-таранный угол на оперированной конечности; 3) суммарную подвижность суставов среднего отдела стопы в сагиттальной плоскости.

**В третьей главе** представлены результаты экспериментальных исследований.

При анализе эквивалентных напряжений, возникающих в имплантатах, выявлено, что при фиксации большеберцовой и таранной костей стандартной (3-й вариант) и длинной пластиной и проксимальным винтом с угловой стабильностью (5-й вариант) максимальные значения данного показателя составляют 331 и 337 МПа, соответственно. Эти значения превышают допустимое напряжение, равное 323 МПа, при превышении которого может произойти усталостный перелом металлоконструкции. Наибольшие напряжения в 3-м варианте обнаружены при тыльном сгибании стопы в области проксимального винта, фиксирующего пластину к большеберцовой кости, а в 4-м — при тыльном сгибании стопы в зоне дистальных винтов, фиксирующих пластину к таранной кости (рисунок 2).

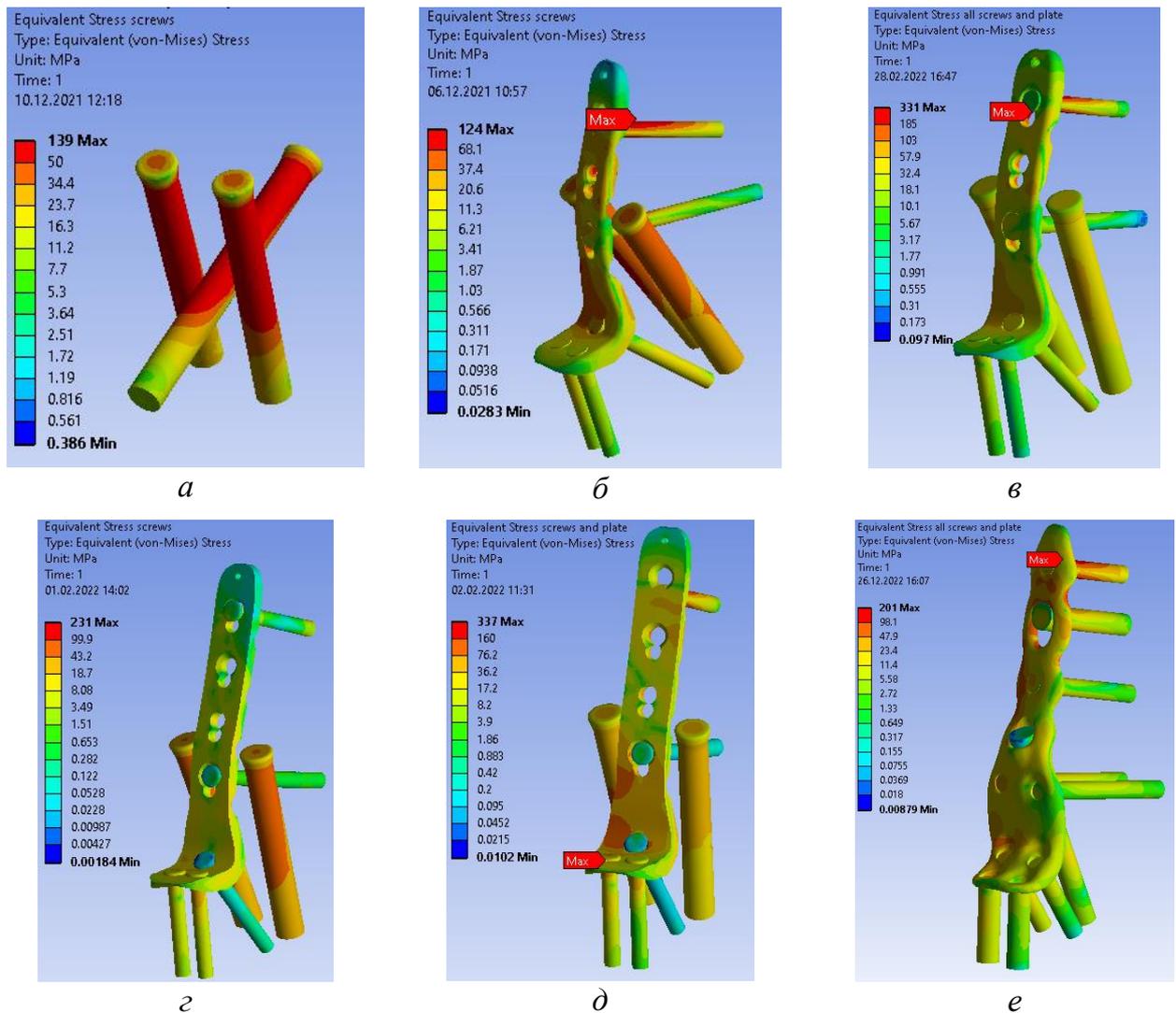


Рисунок 2 — Поля эквивалентных напряжений (в МПа) при фиксации голеностопного сустава: *a* — 1-й вариант; *б* — 2-й вариант; *в* — 3-й вариант; *г* — 4-й вариант; *д* — 5-й вариант; *е* — 6-й вариант

При сравнении полученных в ходе компьютерного моделирования результатов напряжений по Мизесу установлено, что при фиксации большеберцовой и таранной костей пластиной в комбинации с двумя спонгиозными винтами и проксимальным кортикальным винтом (2-й вариант) максимальное напряжение при статических видах нагружений в 2,3 раза ниже по сравнению с 3-м и 5-м вариантами фиксации, в 2,1 раза ниже по сравнению с 6-м вариантом, в 1,4 раза ниже по сравнению с 4-м вариантом и в 1,2 раза ниже по сравнению с 1-м вариантом. Показательными являются результаты максимальных эквивалентных напряжений, полученные при воздействии нагрузки, имитирующей тыльное сгибание стопы. Так, во 1-м варианте эти значения достигают 139 МПа, во 2-м варианте — 124 МПа, в 3-м варианте — 331 МПа, в 4-м варианте — 231 МПа, в 5-м варианте — 337 МПа, в 6-м варианте — 201 МПа (рисунок 3).

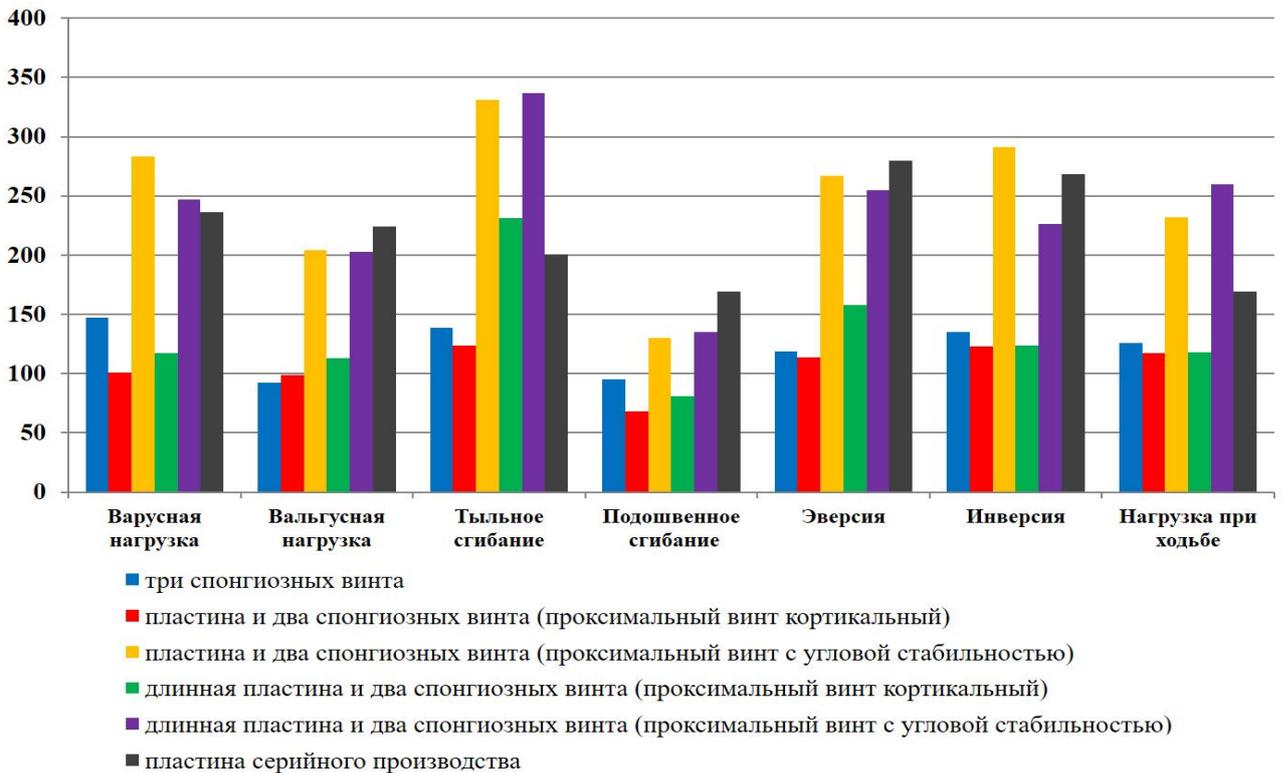


Рисунок 3 — Максимальные эквивалентные напряжения в исследуемых имплантатах (в МПа) при различных видах нагрузок на голеностопный сустав

Следует также подчеркнуть, что при нагрузке, имитирующей ходьбу, максимальные напряжения при 2-м варианте были меньшими, чем при других вариантах. Так, во 1-м варианте они составляют 126 МПа, во 2-м варианте — 117 МПа, в 3-м варианте — 232 МПа, в 4-м варианте — 118 МПа, в 5-м варианте — 260 МПа, в 6-м варианте — 169 МПа.

Для большей наглядности сравнения полученных результатов МЭН в имплантатах были построены диаграммы с медианой их значений при всех видах нагрузок (рисунок 4). Как видно из рисунка 4, наименьшее значение медианы МЭН выявлено при 2-м варианте фиксации (114 [99; 123] МПа) против 126 [95; 139] МПа при 1-м варианте, 267 [204; 291] МПа при 3-м варианте, 118 [113; 158] МПа при 4-м варианте, 247 [203; 260] МПа при 5-м варианте и 224 [169; 268] МПа при 6-м варианте.

Таким образом, сопоставляя результаты исследований по распределению напряжений, можно заключить, что вариант фиксации голеностопного сустава предложенной пластиной в комбинации с двумя спонгиозными винтами и проксимальным кортикальным винтом (2-й вариант), с точки зрения прочности имплантатов, оказался более предпочтительным при всех видах нагружений.



Рисунок 4 — Медианы максимальных эквивалентных напряжений в исследуемых имплантатах (в МПа) при различных видах нагрузок на голеностопный сустав

При сравнении результатов эквивалентных напряжений в таранной кости отмечено, что последняя оказалась менее нагруженной в случае фиксации голеностопного сустава передней пластиной, комбинированной с двумя спонгиозными винтами, и верхним кортикальным винтом (2-й вариант) в сравнении с другими моделями (рисунок 5). Так, медиана эквивалентных напряжений в таранной кости при

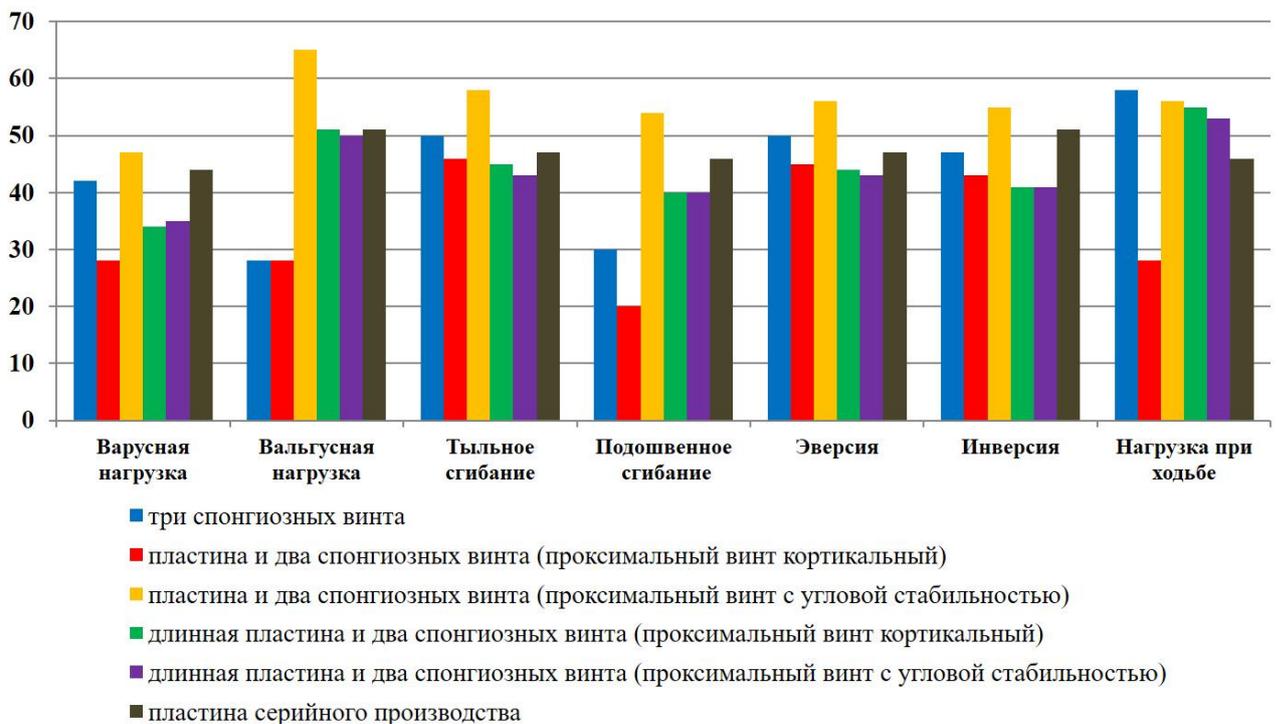


Рисунок 5 — Максимальные эквивалентные напряжения в таранной кости (в МПа) при использовании различных вариантов фиксации и нагрузок на голеностопный сустав

2-м варианте составила 28 [28; 45] МПа, при 1-м варианте — 47 [30; 50] МПа, при 3-м варианте — 56 [54; 58] МПа, при 4-м варианте — 44 [40; 51] МПа, при 5-м варианте — 43 [40; 50] МПа и при 6-м варианте — 47 [46; 51]. Необходимо подчеркнуть, что напряжения в таранной кости при нагрузке, имитирующей ходьбу, во 2-м варианте фиксации голеностопного сустава оказались в 2 раза меньшими, чем при других вариантах фиксации, а при приложении варусной нагрузки и подошвенного сгибания стопы в 1,5 раза меньшими, чем при других вариантах фиксации.

Эквивалентные напряжения в большеберцовой кости оказались ниже, чем в таранной кости при соответствующих нагрузках (рисунок 6). Установлено, что статические нагружения обуславливают наименьшие напряжения при фиксации голеностопного сустава тремя спонгиозными винтами (1-й вариант), а динамические — при фиксации пластиной серийного производства (6-й вариант). Наибольшие напряжения при статических нагрузках зафиксированы в модели фиксации голеностопного сустава пластиной в комбинации с двумя спонгиозными винтами и проксимальным винтом с угловой стабильностью (3-й вариант), а при динамической

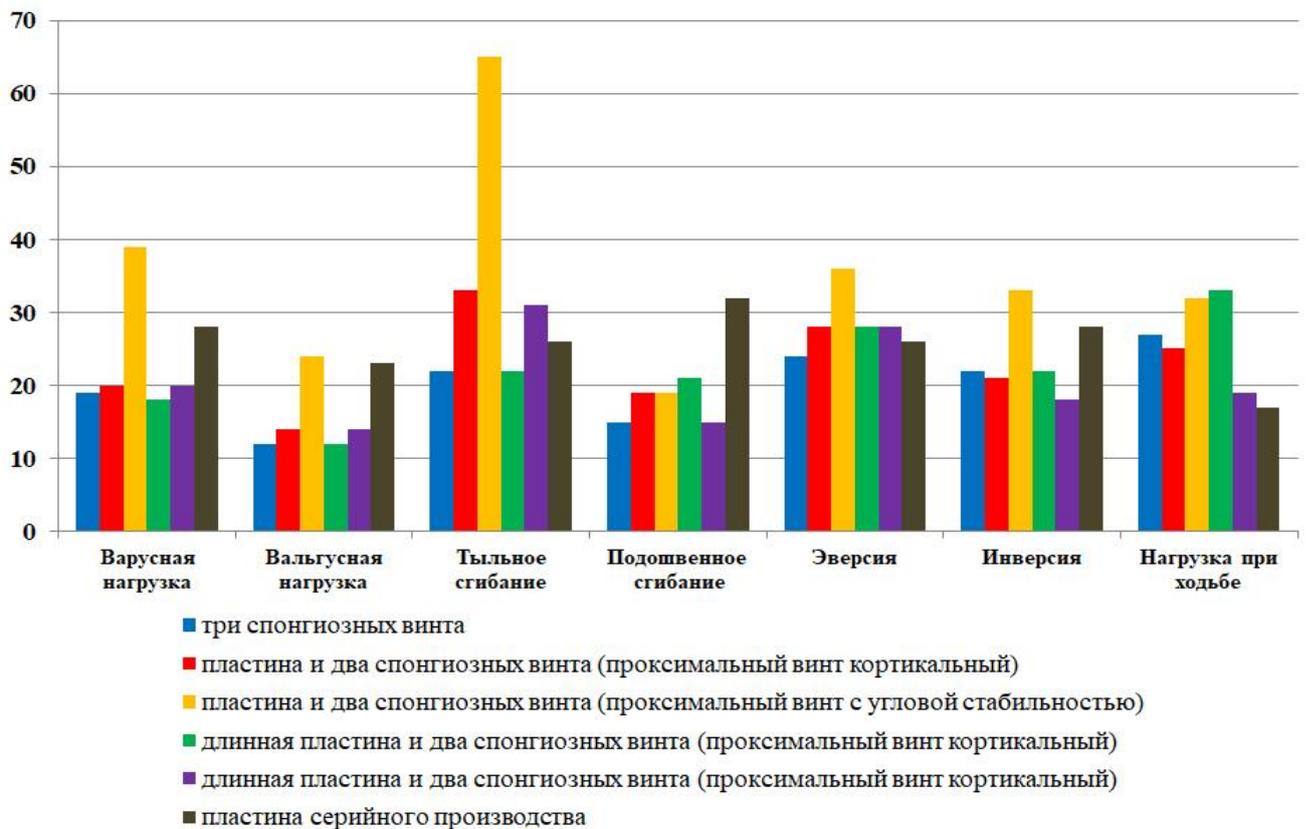


Рисунок 6 — Максимальные эквивалентные напряжения в большеберцовой кости (в МПа) при использовании различных вариантов фиксации и нагрузок на голеностопный сустав

нагрузке — при фиксации длинной пластиной в комбинации с двумя спонгиозными винтами и проксимальным кортикальным винтом (4-й вариант). Стоит также отметить, что при рассмотрении всех вариантов фиксации голеностопного сустава пластинами выявлено, что отверстие в большеберцовой кости под проксимальный винт, фиксирующий пластину к ней, испытывает наибольшие напряжения в сравнении с другими областями кости. Этот вывод справедлив для всех рассмотренных видов нагрузок. Так, во втором варианте оно составило 33 МПа, в третьем — 65 МПа, в четвертом — 22 МПа, в пятом — 31 МПа и в шестом — 32 МПа.

Полученные сравнительные результаты наибольшего контактного давления на границе большеберцовой и таранной костей свидетельствуют, что данный параметр при фиксации всеми исследуемыми имплантатами был практически одинаков. Наибольшие значения контактного давления при всех вариантах фиксации голеностопного сустава были выявлены при варусной нагрузке. Так, при первом варианте фиксации оно составило 34 МПа, при втором, третьем и пятом — 31 МПа, а в четвертом — 32 МПа, в шестом — 30 МПа. Тем не менее, модели фиксации голеностопного сустава при 2-м и 5-м вариантах показали несколько лучшие биомеханические характеристики для большинства видов нагрузок по сравнению остальными вариантами фиксации.

Таким образом, сопоставляя результаты сравнительного исследования по напряженно-деформированному состоянию системы «кость — имплантат», можно заключить, что вариант фиксации голеностопного сустава предложенной пластиной в комбинации с двумя спонгиозными винтами, с точки зрения биомеханики, оказался более предпочтительным.

Результаты проведенного стендового эксперимента свидетельствуют, что оба варианта изученных имплантатов обеспечивают стабильную фиксацию голеностопного сустава в заданном положении. Однако при сравнении результатов наибольших смещений на границе большеберцовой и таранной костей при статической нагрузке силой 800 Н отмечено, что модель артродеза голеностопного сустава пластиной в комбинации с двумя спонгиозными винтами является более стабильной. Так, при статической нагрузке наибольшая амплитуда смещений на границе большеберцовой и таранной костей в случае применения трех спонгиозных винтов составила 0,289 мм, пластины и двух спонгиозных винтов — 0,111 мм, а относительная деформация — 1,2 и 0,42%, соответственно. При проведении циклической осевой нагрузки установлено, что при фиксации голеностопного сустава тремя спонгиозными винтами амплитуда смещений на границе большеберцовой и таранной костей во всех нагрузочных диапазонах была значимо больше по абсолютным значениям, чем при фиксации

пластиной в комбинации с двумя спонгиозными винтами. Так, в 1-й модели амплитуда смещений при нагрузке силой 200 Н больше в 1,5 раза, при нагрузке силой 400 Н — в 3,4 раза, при нагрузке силой 600 Н — в 5,5 раза, при нагрузке силой 800 Н — в 3,5 раза, чем во 2-й модели (таблица 1).

Таблица 1 — Смещение на границе большеберцовой и таранной костей моделей артродеза голеностопного сустава при проведении динамической осевой нагрузки, мм

Нагрузка, кгс	Три спонгиозных винта			Пластина и два спонгиозных винта		
	при $F_{\min}$	при $F_{\max}$	амплитуда	при $F_{\min}$	при $F_{\max}$	амплитуда
2–20	0,020	0,045	0,012	0,004	0,020	0,008
2–40	0,187	0,269	0,041	0,005	0,029	0,012
2–60	0,138	0,293	0,078	0,009	0,038	0,014
2–80	0,050	0,261	0,106	0,011	0,072	0,030

В четвертой главе описаны хирургические техники предложенных способов артродеза голеностопного сустава, представлены результаты лечения после артродеза с применением трех спонгиозных винтов и пластиной в комбинации с двумя спонгиозными винтами, а также сравнительный анализ результатов лечения обеих клинических групп.

Практическое применение предложенного способа артродеза голеностопного сустава тремя спонгиозными винтами осуществлено при хирургическом лечении 36 пациентов с поздними стадиями деформирующего артроза голеностопного сустава. Сращение аутотрансплантата с таранной и большеберцовой костями было достигнуто в среднем через  $12,1 \pm 3,7$  недель, при этом в 2-х (5,6%) случаях отмечена замедленная консолидация сроком 24 недели. При сравнении сагиттального большеберцово-таранного угла оперированной конечности, измеренной на следующий день после операции, с показателем данного угла здорового голеностопного сустава было выявлено, что разница данного параметра у 3 (8,3%) пациентов составила  $5^\circ$ . А при сравнительном анализе значений сагиттального большеберцово-таранного угла прооперированной конечности через 6 месяцев и на следующие сутки после операции отмечено, что в 2-х (5,6%) наблюдениях произошло его увеличение более чем на  $5^\circ$ . Таким образом, у этих пациентов произошла потеря корректного положения стопы. Среднее значение амплитуды движений в суставах среднего отдела стопы в сроки

12 месяцев после операции составило  $15,8^{\circ} \pm 5,9^{\circ}$ , при этом в 20 (71,4%) наблюдениях она была  $15^{\circ}$  и более, что позволило пациентам возобновить практически нормальную походку в послеоперационном периоде.

Доли хороших и удовлетворительных результатов по результатам анкетирования по шкале AOFAS составили 69,4% и 30,6%, соответственно; неудовлетворительных результатов отмечено не было, что позволило достичь статистически достоверное улучшение функциональных исходов ( $p < 0,05$ ). Статистически достоверное снижение интенсивности болевого синдрома по шкале ВАШ в послеоперационном периоде также свидетельствует об эффективности данной операции.

Однако для введения третьего винта с заднего или заднемедиального отдела метаэпифиза большеберцовой кости необходимо выполнить одно из следующих действий. Первое — повернуть пациента из положения на спине в положение на бок, затем выполнить фиксацию голеностопного сустава третьим винтом. После этого вернуть пациента в исходное положение. Второе — поднять ногу кверху и удерживать ее в этом положении в течение определенного времени, необходимого для введения направляющей спицы, выполнения канала канюлированным сверлом, подбора по размеру и введения спонгиозного винта. Необходимость выполнения этих действий увеличивает как продолжительность хирургического вмешательства, так и длительность работы с электронно-оптическим преобразователем. Таким образом, при введении третьего спонгиозного винта возникают определенные неудобства в работе хирургической бригады.

Анкилоз голеностопного сустава у пациентов первой группы был достигнут в среднем через  $11,4 \pm 1,9$  недель. В результате сравнительного анализа времени формирования сращения большеберцовой и таранной костей между исследуемыми группами было выявлено, что статистически значимые различия отсутствовали ( $p > 0,05$ ). Отметим, что у 2 (5,6%) пациентов из второй группы формирование анкилоза было замедленным и проходило в течение 24 недель. В первой группе пациентов наибольший срок формирования анкилоза составил 14 недель.

Среднее значение сагиттального большеберцово-таранного угла у пациентов первой группы составило  $110,8^{\circ} \pm 2,9^{\circ}$ . При этом у 5 (35,7%) пациентов разница данного параметра между здоровой и прооперированной конечностями составила  $3^{\circ}$ , у 5 (35,7%) —  $2^{\circ}$ , у 2 (14,3%) —  $1^{\circ}$ , у 2 (14,3) пациентов разницы не было. Было установлено, что во второй группе значения разницы данных углов были более выраженными по сравнению с первой. Так, у 3 пациентов из второй группы выявлена разница в  $5^{\circ}$ , в то время как в первой группе таких пациентов не было. Доля же

пациентов, у которых сагиттальный БТУ был практически идентичен значению такового на здоровой конечности, была в 2 раза больше в первой группе.

После этого в исследуемых группах сравнили показатели сагиттального большеберцово-таранного угла через 6 месяцев после операции с показателями, полученными сразу после операции, что позволило оценить степень прогрессирования эквинусной деформации с течением времени. Было выявлено, что у 2-х пациентов, которым выполнен артродез голеностопного сустава 3-мя спонгиозными винтами, значение сагиттального БТУ увеличилось на  $5^\circ$  и более. В первой клинической группе показатели данного параметра были идентичными ранее полученным значениям. Вместе с тем отсутствие изменения сагиттального БТУ со временем свидетельствует о большей стабильности фиксации пластиной в комбинации с двумя спонгиозными винтами, а также о подтверждении данных экспериментальных исследований на практике.

В послеоперационном периоде суммарная амплитуда движений в суставах среднего отдела стопы у пациентов первой группы в среднем составила  $16,1^\circ \pm 6,2^\circ$ . При этом объем движений более  $15^\circ$  отмечен в 9 (64,3%) наблюдениях.

Интенсивность болевого синдрома по шкале ВАШ на контрольном осмотре уменьшилась с  $8,2 \pm 0,9$  до  $1,5 \pm 1,0$  баллов. Сравнение показателей по шкале ВАШ в до- и послеоперационных периодах демонстрирует статистическое достоверное снижение интенсивности болевого синдрома ( $p < 0,01$ ). В послеоперационном периоде хорошие функциональные результаты достигнуты в 10 (71,4%) случаях, удовлетворительные — в 4 (28,6%). Средний показатель по шкале AOFAS составил  $80,1 \pm 10,6$  баллов. В ходе оценки функциональных результатов лечения пациентов по анкете AOFAS была выявлена статистически значимая разница ( $p < 0,01$ ). Результаты же сравнительного анализа данных опросников, проведенного между группами, не позволили выявить статистически достоверные различия ( $p > 0,05$ ).

В ходе сравнения длительности хирургического вмешательства в исследуемых группах была выявлена статистически значимая разница ( $p < 0,05$ ). Наименьший показатель данного параметра отмечен в группе фиксации голеностопного сустава пластиной и двумя спонгиозными винтами и равнялся  $125,7 \pm 23,8$  мин. Что касается наибольшего результата, то он составил  $148,5 \pm 27$  мин в группе фиксации голеностопного сустава тремя спонгиозными винтами.

Статистически достоверное уменьшение времени работы с электронно-оптическим преобразователем выявлено при выполнении артродеза голеностопного сустава с применением пластины и двух спонгиозных винтов по сравнению с фиксацией тремя

спонгиозными винтами ( $p < 0,05$ ). Средняя продолжительность рентгеновского облучения в первой группе составила  $76,3 \pm 25,6$  с, а во второй —  $99,2 \pm 25,3$  с.

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

## ВЫВОДЫ

1. Проведенный анализ результатов лечения пациентов с деформирующим артрозом голеностопного сустава III–IV стадии показал, что артродез голеностопного сустава тремя спонгиозными винтами является эффективным и позволяет добиться анкилоза в 100% случаев в среднем через  $12,1 \pm 3,7$  недель, обеспечивает статистически значимое уменьшение интенсивности болевого синдрома ( $p < 0,01$ ), а также способствует достижению хороших (69,4%) и удовлетворительных (30,6%) результатов.

2. Разработанная оригинальная передняя пластина для артродеза голеностопного сустава с заданным анатомическим углом способствует установке таранной кости в оптимальное положение, а ее минимальный профиль позволяет избежать возникновения конфликта между пластиной и сухожилиями разгибателей стопы. Предложенный способ фиксации голеностопного сустава пластиной и спонгиозными винтами для артродеза осуществляется из одного переднего доступа в удобном положении пациента лежа на спине. Проведенное биомеханическое моделирование данного способа фиксации показало, что максимальные эквивалентные напряжения в имплантатах не превышают допустимое напряжение титанового сплава и составляют от 68 до 124 МПа.

3. Проведенное сравнительное исследование изучаемых способов фиксации голеностопного сустава при артродезе показало, что наименьшие уровни напряженно-деформированного состояния модели «имплантат — большеберцовая и таранная кости» выявлены при применении предложенной пластины в комбинации с двумя спонгиозными винтами и фиксации ее к диафизу большеберцовой кости проксимальным кортикальным винтом. Медиана наибольшего эквивалентного напряжения при данном способе фиксации составила 114 [99; 123] МПа против 126 [95; 139] МПа. Анализ стабильности фиксации голеностопного сустава в эксперименте продемонстрировал показатели механических характеристик: наибольшая амплитуда смещения на границе большеберцовой и таранной костей при статической нагрузке в случае применения трех спонгиозных винтов составила 0,289 мм, пластины и двух спонгиозных винтов — 0,111 мм, а при циклической нагрузке — 0,106 и 0,03 мм, соответственно.

4. Клиническая апробация способа артрореза голеностопного сустава пластиной и двумя спонгиозными винтами показала его высокую эффективность. Продолжительность хирургического вмешательства уменьшилась и составила  $125,7 \pm 23,8$  мин, а время работы с электронно-оптическим преобразователем —  $76,3 \pm 25,6$  с по сравнению с артрорезом тремя спонгиозными винтами —  $148,5 \pm 27$  мин и  $99,2 \pm 25,3$  с, соответственно ( $p < 0,05$ ). Анкилоз достигнут у всех пациентов в среднем через  $11,4 \pm 1,9$  недель, и получены лучшие статистически значимые ( $p < 0,01$ ) результаты лечения по шкалам ВАШ и AOFAS.

## ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ

1. При проведении стендовых испытаний на искусственных моделях костей с целью достижения характеристик нативной кости рекомендуется применять послойное нанесение на их поверхность стеклоткани, пропитанной эпоксидной смолой. Критерием достаточности являются значения параметров жесткости при четырехточечном изгибе  $182\text{--}217 \text{ Н/м}^2$ .

2. При выполнении артрореза голеностопного сустава тремя спонгиозными винтами первые два винта следует вводить параллельно с переднего края дистального метаэпифиза большеберцовой кости в блок таранной кости, а третий — через заднемедиальный или задний отдел дистального метаэпифиза большеберцовой кости в шейку таранной кости. При этом необходимо использовать винты диаметром 6,5 мм с неполной резьбой и длиной резьбовой части 16 или 32 мм.

3. При артрорезе голеностопного сустава тремя спонгиозными винтами для введения третьего винта через заднемедиальный отдел дистального метаэпифиза большеберцовой кости в шейку таранной кости необходимо удерживать оперированную конечность в приподнятом положении, а через задний отдел — повернуть пациента из положения на спине в положение на бок.

4. При артрорезе голеностопного сустава разработанной пластиной, комбинируемой с двумя спонгиозными винтами, следует использовать кортикальный винт диаметром 3,5 мм, введенный в проксимальное отверстие пластины с фиксацией ее к большеберцовой кости, по причине возникновения в нем эквивалентного напряжения, не превышающего его допустимого значения для титанового сплава.

5. При предоперационном планировании следует ориентироваться на значение сагиттального большеберцово-таранного угла, измеренного по рентгенограмме

здорового голеностопного сустава в боковой проекции, выполненной в положении пациента стоя.

6. Использование электронно-оптического преобразователя при выполнении артродеза голеностопного сустава является обязательным, так как позволяет правильно позиционировать имплантаты и таранную кость относительно большеберцовой.

## **СПИСОК ПЕЧАТНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

1. Хомянец, В.В. Результаты артродеза голеностопного сустава с применением трех спонгиозных винтов / В.В. Хомянец, С.В. Михайлов, Д.А. Шакун, С.Е. Жумагазиев // *Материалы научно-практической конференции с международным участием «Илизаровские чтения»*. — Курган, 2016. — С. 385–386.

2. Хомянец, В.В. Артродез голеностопного сустава тремя спонгиозными винтами у больных с посттравматическим артрозом / В.В. Хомянец, С.В. Михайлов, Д.А. Шакун [и др.] // *Материалы научно-практической конференции с международным участием «Илизаровские чтения» и IV съезда травматологов и ортопедов Уральского федерального округа*. — Курган, 2017. — С. 235.

3. Жумагазиев, С.Е. Артродезирование голеностопного сустава с применением трех спонгиозных винтов / С.Е. Жумагазиев // *Материалы Итоговой конференции Военно-научного общества слушателей Факультета руководящего медицинского состава Военно-медицинской академии имени С.М. Кирова*. — Санкт-Петербург : ВМедА, 2017. — 432 с.

4. Хомянец, В.В. Артродезирование голеностопного сустава с использованием трех спонгиозных винтов / В.В. Хомянец, С.В. Михайлов, Д.А. Шакун [и др.] // *Травматология и ортопедия России*. — 2018. — № 24 (2). — С. 117–126.

5. Хомянец, В.В. Особенности хирургического лечения пациентов с неинфекционными осложнениями переломов лодыжечного сегмента (научный обзор) / В.В. Хомянец, С.В. Михайлов, А.В. Щукин [и др.] // *Профилактическая и клиническая медицина*. — 2021. — № 2 (79). — С. 82–91.

6. Хомянец, В.В. Биомеханическая оценка применения передней пластины, комбинируемой двумя спонгиозными винтами, для артродеза голеностопного сустава / В.В. Хомянец, С.В. Михайлов, С.Е. Жумагазиев // *XII всероссийский съезд травматологов-ортопедов : сб. тезисов*. — Санкт-Петербург, 2022. — С. 956–957.

7. Хоминец, В.В. Сравнительный биомеханический анализ способов артродезирования голеностопного сустава: экспериментальное исследование / В.В. Хоминец, С.В. Михайлов, С.Е. Жумагазиев [и др.] // Травматология и ортопедия России. — 2022. — № 28 (4). — С. 136–147.

8. Хоминец, В.В. Исследование прочности фиксации при артродезе голеностопного сустава / В.В. Хоминец, С.В. Михайлов, С.Е. Жумагазиев // VIII всероссийский конгресс с международным участием. Медицинская помощь при травмах. Новое в организации и технологиях. Фактор травмы в современном мире. Травматические эпидемии и борьба с ними. К 100-летию со дня рождения член-корреспондента АМН СССР С.С. Ткаченко : сб. тезисов. — Санкт-Петербург, 2023. — С. 183.

9. Патент № 2633945 С1 Российская Федерация, МПК А61В 17/00 (2006.01). Способ выполнения артродеза голеностопного сустава с использованием трех спонгиозных винтов : № 2016123678 : заявл. 4.06.2016 : опубл. 19.10.2017 Бюл. № 29 / В.В. Хоминец, С.В. Михайлов, Д.А. Шакун, С.Е. Жумагазиев ; заявитель Федеральное государственное бюджетное военное образовательное учреждение высшего образования Военно-медицинская академия им. С.М. Кирова Министерства обороны Российской Федерации (ВМедА). — 12 с. : ил. — Текст : непосредственный.

10. Патент на полезную модель № 216491 U1 Российская Федерация, МПК А61В 17/56 (2006.01), А61В 17/80 (2006.01). Пластина для артродеза голеностопного сустава : № 2022123335 : заявл. 31.08.2022 : опубл. 09.02.2023 Бюл. № 4 / В.В. Хоминец, С.В. Михайлов, Д.А. Шакун, С.Е. Жумагазиев, А.В. Щукин ; патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью «Остеомед-М». — 15 с. : ил. — Текст : непосредственный.