

*На правах рукописи*



Никитин Владислав Николаевич

**БИОМЕХАНИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОРРЕКЦИИ  
ПРИКУСА ЗУБОЧЕЛЮСТНОЙ СИСТЕМЫ ЧЕЛОВЕКА**

Специальность 01.02.08 – «Биомеханика»

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Пермь – 2017

Работа выполнена на кафедре теоретической механики и биомеханики федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет».

Научный руководитель: заслуженный деятель науки РФ, доктор технических наук, профессор  
Няшин Юрий Иванович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, доцент  
Маслов Леонид Борисович (федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»)

кандидат физико-математических наук  
Джалалова Маргарита Васильевна  
(Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова»)

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Смоленский государственный медицинский университет» Министерства здравоохранения Российской Федерации

Защита состоится \_\_ декабря 2017 года в 14:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.243.10 на базе ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского» по адресу: 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, 83, 9 учебный корпус, ауд. 18.

С диссертацией можно ознакомиться в Зональной научной библиотеке им. В.А. Артисевич и на официальном сайте ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского».

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2017 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
к.ф.-м.н.



Р.А. Сафонов

## Общая характеристика работы

**Актуальность работы.** С точки зрения биомеханики состояние и функционирование зубочелюстной системы определяется усилиями в системе и ее элементах (Ю.И. Няшин, Е.Ю. Симановская, В.М. Тверье (2003, 2005, 2006, 2007)). Рассмотрение зубочелюстной системы как многоблочной, включающей костные и мягкотканые блоки, позволяет раскрыть взаимовлияние ее элементов и их совместное функционирование (А.Н. Еловикова, В.Н. Никитин, Ю.И. Няшин, Л.Ф. Оборин, Е.Ю. Симановская, В.М. Тверье (2005, 2006, 2007, 2008, 2014)).

Современный подход в рамках концепции виртуального физиологического человека (VPH), направленный на построение взаимосвязей между системами и процессами в организме человека, позволяет сказать, что состояние и правильное функционирование зубочелюстной системы определяет процессы питания, глотания, дыхания, речи, слуха и т.д. (J.B. Costen, J.C. Posnick, R. Slavicek, S. Sato, A.M.C. Fransson, A. Tegelberg, A. Johansson, B. Wenneberg (1934, 2002, 2004, 2008, 2014), а также влияет на другие системы (опорно-двигательную, пищеварительную, нервную, сердечно-сосудистую, дыхательную и т.д.) (J.B. Costen, A. Michelotti, G. Buonocore, P. Leone, P. Manzo, A. Baldini, A. Nota, D. Tripodi, S. Longoni, P. Cozza, G. Perinetti, L. Contardo (1936, 2005, 2008, 2009, 2013)).

Одним из основных параметров, определяющих состояние и правильное функционирование зубочелюстной системы, является прикус. Прикус отвечает за взаимное положение челюстей при их смыкании, характеризуется максимальным количеством контактирующих зубов и влияет на вышеуказанные процессы и системы. Отметим влияние изменений прикуса на кровоснабжение головного мозга, которые могут приводить к патологиям, в частности к инсульту (Y. Matuura, T. Taniguchi, A. Sugiura, M. Miyaо, H. Takada, A.A.Q. Valencia (2012)).

Прикус отвечает за положение, состояние и функционирование височно-нижнечелюстного сустава, образованного поверхностями нижней челюсти и височной кости. Изменение положения сустава приводит к его дисфункции, связанной с изменением суставной реакции и со смещением суставного диска относительно его поверхностей, что приводит к появлению дивертикула (выпячивания). В медицинской литературе выдвинута гипотеза влияния этого выпячивания на кровоснабжение головного мозга по внутренней сонной артерии ввиду ее близкого расположения с капсулой сустава (Т.Д. Миллер, Л.Ф. Оборин, А.А. Шутов, Е.С. Патлусова (1975, 1993, 1997, 2009). Количественных оценок этого влияния не производилось. Височно-нижнечелюстной сустав и внутренняя сонная артерия входят в области компетенций различных медицинских специалистов. При этом современные неинвазивные методы не позволяют одновременно оценить состояние диска и внутренней сонной артерии.

При изменении прикуса, связанного с потерей зубов, повышенной стираемостью зубов и т.д., происходят изменения в состоянии и функционировании элементов зубочелюстной системы, которые часто сопровождаются головными болями, головокружениями, нервозностью, являющимися также признаками нарушений мозгового кровоснабжения. Вышеуказанные изменения могут привести к дисфункциям жевательных мышц и височно-нижнечелюстного сустава, перераспределяющих усилия (напряжения) в зубочелюстной системе. Это влияет на состояние и функционирование костной ткани нижней челюсти и суставного диска, а также возможность возникновения процессов резорбции в костной ткани и нарушение питания диска височно-нижнечелюстного сустава.

На данный момент в литературе производится оценка состояний и моделирование либо отдельных элементов зубочелюстной системы (нижней или верхней челюстей, отдельных зубов, диска височно-нижнечелюстного сустава и т.д.), либо рассматривается какая-либо их комбинация. Все работы, посвященные определению усилий в элементах зубочелюстной системы, не затрагивали анализ состояния и функционирования ее элементов при изменении прикуса.

При различных патологиях стоматолог корректирует прикус, придерживаясь существующей методики, в основе которой лежит анализ стоматологических параметров, полученных на основе рентгеновских снимков, и оценка напряженности поверхностных жевательных мышц, доступных применению методов пальпации или электромиографии. Рентгеновские методы не дают информации о состоянии мягких тканей и диска височно-нижнечелюстного сустава. Такую информацию можно получить с помощью магнитно-резонансной томографии. Для параметров, определяющих прикус, установлены опытным путем физиологические диапазоны. Количество анализируемых параметров достигает нескольких десятков, а исследуемых реперных точек – сотни. Полученные значения параметров выбираются в рамках их физиологических значений таким образом, чтобы избежать случаев перенапряженности пальпируемых мышц. Их количество меньше половины от всех, участвующих в жевании.

Невозможность оценки усилий всех жевательных мышц, по мнению автора, приводит к частым случаям обращений за дополнительными манипуляциями, связанными с изменением соотношения челюстей в рамках физиологических значений стоматологических параметров, а также перенапряженностью жевательных мышц, болевыми ощущениями в них и в области височно-нижнечелюстного сустава. При этом речь идет о тех мышцах, которые не должны быть напряжены при сжатых челюстях, т.е. мышцах-открывателях (мышцах-опускателях) нижнюю челюсть.

Вариабельность диапазонов параметров прикуса связана с индивидуальными особенностями строения зубочелюстной системы. При изменении параметров, отвечающих за прикус, усилия жевательных мышц

и суставная реакция значительно меняются (Н.Г. Аболмасов, М.Д. Гросс, В.Н. Копейкин, Дж.Д. Мэтьюс, В.А. Хватова, М.М. Ash, Р.Е. Dawson, U. Posselt, S.P. Ramfjord (1968, 1971, 1982, 1986, 1989, 1993, 1996, 2000, 2006)). Невозможность оценки усилий во всех жевательных мышцах при коррекции прикуса может привести к распределению напряжений в костной ткани нижней челюсти и диске височно-нижнечелюстного сустава, при которых могут развиваться патологические изменения в них.

Таким образом, к моменту начала исследований, результаты которых представлены в данной диссертации, не существовало постановки задачи оценки коррекции назначенного стоматологом прикуса, связанной с количественным определением усилий жевательных мышц, напряжениями в нижней челюсти и дисках височно-нижнечелюстных суставов, влияющих на появление в них патологических процессов, выбором значений параметров прикуса на основе индивидуальных параметров зубочелюстной системы пациента.

**Цель диссертационной работы.** Разработать методику коррекции прикуса зубочелюстной системы человека, основанную на решении задачи биомеханического управления параметрами прикуса, заданного стоматологом, в рамках их физиологических диапазонов с оценкой нагрузок в нижней челюсти и дисках височно-нижнечелюстных суставов, и выступающую в качестве пособия стоматологу в выборе конкретных значений параметров прикуса.

Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие **задачи**:

1. Обосновать использование магнитно-резонансной томографии для получения индивидуальных данных пациента о геометрии костных структур, расположении диска височно-нижнечелюстного сустава, а также о координатах точек крепления и размерах жевательных мышц.

2. Определить усилия жевательных мышц и реакции височно-нижнечелюстных суставов из решения статически неопределимой задачи равновесия нижней челюсти при заданной силе сжатия челюстей, вызванной максимальными изометрическими усилиями жевательных мышц, развиваемые при статическом положении нижней челюсти.

3. Определить напряженно-деформированные состояния диска височно-нижнечелюстного сустава и костной ткани нижней челюсти при предложенном стоматологом положении прикуса на основе существующей методики коррекции и при его уточнении.

4. Поставить задачу управления прикусом с учетом ограничений на напряжения, возникающие в нижней челюсти и суставном диске, в рамках физиологических диапазонов значений параметров прикуса.

5. Создать алгоритм коррекции назначенного стоматологом прикуса на основе решения вышеупомянутых задач для оптимизации положения прикуса в физиологических диапазонах значений параметров прикуса.

6. Уточнить существующую методику коррекции прикуса на основе биомеханического моделирования и дать рекомендации по коррекции назначенного стоматологом прикуса на примере симметричного прикуса.

***Научная новизна:***

1. Обосновано применение магнитно-резонансной томографии в процессе коррекции прикуса на основе влияния индивидуальных данных пациента о геометрии нижней челюсти и параметров жевательных мышц на состояние зубочелюстной системы и оценки влияния на кровоснабжение головного мозга по внутренней сонной артерии.

2. Поставлена задача коррекции прикуса, назначенного стоматологом, в физиологическом диапазоне на основе анализа усилий, возникающих в элементах зубочелюстной системы.

3. На основе поставленной задачи разработана биомеханическая модель определения усилий в зубочелюстной системе человека с учетом напряженно-деформированного состояния диска височно-нижнечелюстного сустава и нижней челюсти.

4. Разработана методика коррекции в физиологических диапазонах значений параметров прикуса на основе количественных результатов с помощью биомеханического моделирования.

***Положения, выносимые на защиту:***

1. Постановка задачи управления прикусом на основе анализа взаимосвязей зубочелюстной системы с другими системами в рамках концепции виртуального физиологического человека (VPH).

2. Биомеханический анализ патологических последствий коррекции прикуса зубочелюстной системы и их влияния на качество жизни.

3. Уточненная существующая методика коррекции прикуса, алгоритм коррекции прикуса и медицинские рекомендации по коррекции прикуса в физиологическом диапазоне на основе решения задачи управления.

***Апробация работы.*** Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались:

– на XVII, XX Зимних школах по механике сплошных сред (Пермь, 2011, 2017);

– на Всероссийском конгрессе «Стоматология Большого Урала. Инновационные технологии в стоматологии» (Пермь, 2011);

– на XX, XXI, XXV Всероссийских научных школах-конференциях молодых ученых и студентов «Математическое моделирование в естественных науках» (Пермь, 2011, 2012, 2016);

– на Всероссийских научных школах-семинарах «Методы компьютерной диагностики в биологии и медицине - 2011; 2012; 2013» (Саратов, 2011–2013);

– на IX, X Всероссийских конференциях с международным участием по биомеханике «Биомеханика – 2014; 2016» (Пермь, 2014, 2016);

- на XI Всероссийском съезде по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики (Казань, 2015);
- на XII Международной конференции студентов и молодых ученых «Перспективы развития фундаментальных наук» (Томск, 2015);
- на Российской конференции с международным участием «Экспериментальная и компьютерная биомедицина», посвященной памяти члена-корреспондента РАН В.С. Мархасина (Екатеринбург, 2016);
- на научных семинарах в Пермском национальном исследовательском политехническом университете.

Результаты работы апробированы и рекомендованы к внедрению в практику на кафедре ортопедической стоматологии Пермского государственного медицинского университета им. академика Е.А. Вагнера.

Реализация вычислений проводилась в разработанных пакетах программ, на которые получены два свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ, находящиеся в приложениях в диссертации.

**Публикации по теме диссертации.** Основные положения диссертационной работы отражены в 18 печатных работах, в том числе в восьми публикациях в журналах, рекомендованных ВАК [1–8]. Библиография приведена в списке литературы.

**Личный вклад автора.** Задача управления прикусом с учетом ограничений на напряжения, возникающие в нижней челюсти и диске височно-нижнечелюстного сустава в рамках физиологического диапазона значений параметров прикуса в норме поставлена лично автором в сотрудничестве с В.М. Тверье, доцентом кафедры теоретической механики и биомеханики Пермского национального исследовательского политехнического университета. Построение биомеханических моделей нижней челюсти и диска височно-нижнечелюстного сустава, создание алгоритма коррекции прикуса в физиологическом диапазоне значений параметров прикуса и конечно-элементные расчеты, произведенные с использованием биомеханических моделей, методика и рекомендации по коррекции прикуса, величины параметров которого выбраны стоматологом, проведены автором лично и самостоятельно. Постановка задач и обсуждение полученных результатов проводились совместно с научным руководителем.

**Практическая значимость.** Обосновано применение магнитно-резонансной томографии для индивидуализации к подходу коррекции прикуса. Получены зависимости между величинами стоматологических параметров, отвечающих за положение нижней челюсти, и величинами жевательных мышечных усилий и реакций в височно-нижнечелюстных суставах, изучено их влияние на напряжения в нижней челюсти и суставном диске. На основе результатов работы предложена методика коррекции прикуса, уточняющая выбранный стоматологом вариант на

основе биомеханического моделирования и учитывающая индивидуальные особенности зубочелюстной системы пациента, и которая может использоваться в качестве пособия стоматологу в медицинских учреждениях.

**Достоверность полученных результатов** основывается на том, что созданная биомеханическая модель базируется на использовании строгих математических методов при построении поставленных задач и их анализе, апробированных моделей, качественном и количественном согласовании полученных результатов с результатами близких по тематике исследований других авторов и клиническими данными.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация содержит введение, 5 глав, заключение и список литературы. Работа содержит 161 страниц машинописного текста, 68 иллюстраций, 3 таблицы и библиографический список из 162 наименований.

## **Краткое содержание работы**

**Во введении** проведен обзор литературы, касающейся исследований в изучаемой предметной области, обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи, сформулирована научная новизна, показана практическая значимость полученных результатов.

**В первой главе** рассмотрена биомеханика функционирования зубочелюстной системы человека.

Биомеханический подход к описанию функционирования зубочелюстной системы позволяет рассмотреть зубочелюстную систему как многоблочную структуру, включающую костные и мягкотканые блоки (Ю.И. Няшин, Е.Ю. Симановская, В.М. Тверье (2004, 2005, 2006, 2007)). К основным рассматриваемым элементам костных блоков относятся: нижняя и верхняя челюсти (верхняя челюсть жестко связана с черепом, т.е. рассматривается случай сформированной зубочелюстной системы), Многоблочный подход позволил проиллюстрировать тесную связь блоков и протекающих в них процессов при их функционировании (Ю.И. Няшин, Е.Ю. Симановская, В.М. Тверье (2004, 2005, 2006, 2007)). Данный подход в рамках концепции виртуального физиологического человека позволил при проведении литературного обзора выявить взаимовлияние изменений зубочелюстной системы и ее элементов на состояние и механизмы взаимодействия с другими системами на примере прикуса (Ю.И. Няшин, А.Н. Еловилова, В.Н. Никитин (2011)).

Прикус (положение нижней челюсти по отношению к верхней (черепу)) является одним из важнейших факторов правильного функционирования зубочелюстной системы. На данный момент мы видим клинические случаи, когда образуется дивертикул (выпячивание) диска височно-нижнечелюстного сустава и изменяется геометрия внутренней сонной артерии, ведущая к нарушению кровоснабжения головного мозга



(зачастую приводящее к инсульту) (Л.Ф. Оборин, Ю.И. Няшин, Е.С. Патлусова, В.Н. Никитин (2009, 2010)).

Височно-нижнечелюстной сустав является тем элементом зубочелюстной системы, который обеспечивает процессы дыхания, глотания, питания, речи и т.д. Неправильное функционирование сустава может стать причиной его дисфункции, вызванной как изменением усилий во всей зубочелюстной системе, так и вариацией положения диска относительно суставных поверхностей при изменении положения нижней челюсти. Это влияет на состояние, функционирование зубочелюстной системы и распределение усилий в ней и ее элементах (Е.Ю. Симановская, А.Н. Еловицова, Ю.И. Няшин, В.М. Тверье (2004, 2005, 2006, 2014, 2015)).

В работе выдвинуто предположение, что медиальное (в сторону позвоночника) смещение диска, вызванное дисфункцией височно-нижнечелюстного сустава, может вызвать сужение внутренней сонной артерии при раздражении нервных окончаний, пронизывающих ее стенку и окружающие ткани.

Это предположение проверено на примере, использующем задачу Буссинеска – Фламана (А. Ляв (1935)). Показано, что напряжения на расстоянии 10–12 мм в норме между капсулой сустава и стенкой артерии сопоставимы с напряжениями, при которых еще не происходит схлопывание капилляров (6–10 кПа). Напряжения вызваны действием сосредоточенной нагрузки, величина которой сопоставима с величиной суставной реакции. Уменьшение указанного расстояния приводит к увеличению напряжений до значений, сопоставимых с диастолическим и систолическим давлениями в артерии, при которых возможно схлопывание самой артерии в фазы диастолы и/или систолы. Компенсаторные механизмы действуют таким образом, чтобы увеличить расстояние между капсулой сустава и стенкой артерии и нормализовать кровоснабжение головного мозга, при котором зачастую могут появиться изгибы и петлистости.

Анализ современных методов диагностики (K.W. Lai, D.E. Ostorina Dewi (2015)) зубочелюстной системы показал, что широко применяемые рентгеновские методы не дают информации о состоянии, положении и размерах ее мягкотканых элементов (жевательных мышцах и диске височно-нижнечелюстного сустава). Методы ультразвуковой диагностики могут только сказать о состоянии элементов, которые не закрыты костными структурами, т.е. позволяют оценить размеры только поверхностных тканей. Магнитно-резонансная томография позволяет определить состояние, положение и размеры всех ее элементов, в том числе суставного диска.

Анализ методов также показал, что диск височно-нижнечелюстного сустава и внутренняя сонная артерия, как правило, не исследуются совместно. Это связано с тем, что их лечение входит в области

деятельности различных медицинских специалистов, а также тем, что современные неинвазивные методы не позволяют одновременно оценить состояние таких структур. В диссертации приведен пример совмещения двух изображений магнитно-резонансной томографии (общего и сосудистого режимов): височно-нижнечелюстного сустава и внутренней сонной артерии и выбора режимов отображения изображений.

Литературный обзор показал, что на данный момент широко распространен подход к рассмотрению элементов зубочелюстной системы в отдельности (зубы, погруженные в периодонт, связанный с альвеолярным отростком некоторой небольшой области верхней или нижней челюсти; диск височно-нижнечелюстного сустава, заключенный между мыщелком и височной костью и т.д.) или же рассматриваются конструкции (протезы, имплантаты, каппы и т.д.), восполняющие или нормализующие прикус. В этих задачах проводится сравнение полученных значений напряжений с предельно допустимыми, но не ставится задача о возможности управления полученными распределениями напряжений (усилий). Автор считает, что задача управления усилиями в зубочелюстной системе и ее элементах позволила бы более объективно подходить к назначению конкретных величин параметров прикуса в процессе коррекции, а также давала бы возможность проанализировать все варианты, предлагаемые стоматологом.

**Вторая глава** посвящена определению усилий жевательных мышц и реакций височно-нижнечелюстных суставов зубочелюстной системы с помощью биомеханического моделирования в процессе сжатия челюстей для прикуса, назначенного стоматологом и описываемого рядом независимых стоматологических параметров.

Стоматолог изменяет прикус при различных патологиях зубочелюстной системы (перенапряженность мышц, болевые ощущения в мышцах и в области височно-нижнечелюстного сустава и т.д.), пользуясь существующей методикой коррекции прикуса (R. Slavicek, В.А. Хватова (2002, 2005)). При анализе прикуса количество анализируемых реперных точек достигает нескольких сотен, а количество параметров доходит до ста в зависимости от используемой методики расшифровки рентгеновских снимков и фотографий (R. Slavicek, 2002). Назначение конкретных значений параметров для пациента при коррекции прикуса связано с субъективными оценками усилий поверхностных жевательных мышц методами пальпации или электромиографии (R. Slavicek, 2002).

В данной работе выделены независимые стоматологические параметры, которые определяют положение нижней челюсти относительно верхней (черепа), количество которых равно шести при несимметричном прикусе. Остальные, анализируемые стоматологом, параметры также важны и отвечают за аспекты смыкания зубов и состояние мягких тканей. От этих стоматологических параметров однозначно можно перейти

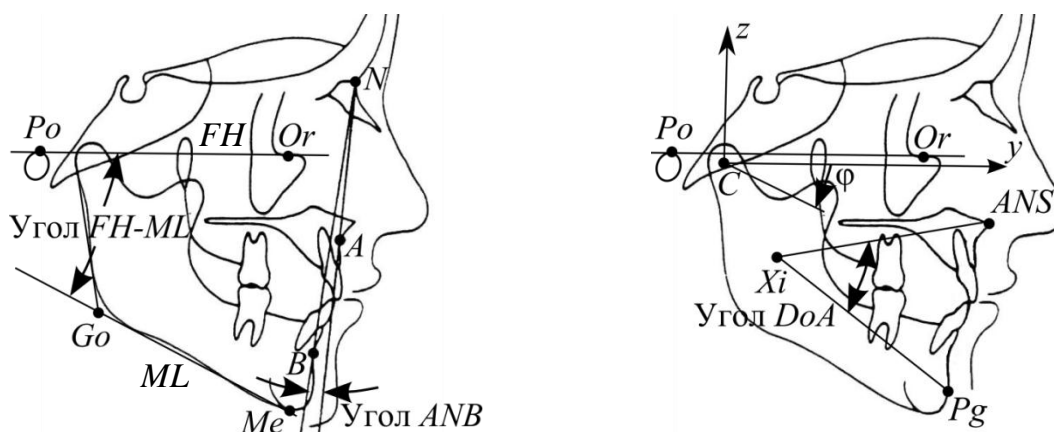


Рис. 1. Независимые стоматологические ( $\angle ANB$ ,  $\angle DoA$ ,  $\angle FH-ML$ ) и математические ( $x_c$ ,  $u_c$ ,  $\varphi$ ) параметры для плоского случая (симметричный прикус) (в стоматологии принято ряд точек обозначать двумя (например,  $Pg$ ) или тремя буквами (например,  $ANS$ ))

к независимым математическим (трем координатам полюса и трем углам поворота вокруг ортогональных координатных осей). В диссертации результаты приведены для плоского случая (симметричного прикуса), когда количество независимых математических параметров равно трем (двум координатам полюса и углу поворота вокруг полюса). Также приведено доказательство о том, что от этих трех математических параметров можно перейти к трем независимым стоматологическим ( $\angle ANB$ ,  $\angle DoA$ ,  $\angle FH-ML$ ). Данные углы имеют физиологические диапазоны ( $\angle ANB = 0...4^\circ$ ,  $\angle DoA = 42...45^\circ$ ,  $\angle FH-ML = 20...25^\circ$ ) (рис. 1). Угол  $ANB$  образован пересечением прямых  $AN$  и  $BN$ ; угол  $DoA$  – прямых  $ANS-Xi$  и  $Pg-Xi$ ; угол  $FH-ML$  – пересечением прямых  $FH$  (франкфуртская горизонталь) и  $ML$  (основание нижней челюсти).

Невозможность оценки усилий глубоких жевательных мышц порождает повторные обращения пациентов за дополнительными коррекциями, связанными с перенапряженностью указанных мышц.

Для определения усилий всех жевательных мышц составляются уравнения, описывающие статическое равновесие нижней челюсти под действием усилий жевательных мышц, реакций височно-нижнечелюстных суставов и равнодействующей максимальной силы сжатия челюстей. Величина силы (600 Н) и положение точки приложения (между вторым премоляром и первым моляром на нижней челюсти) были взяты из литературных данных (R. Ogura, H. Kato, D. Okada, R.M. Foxton, M. Ikeda, H. Miura, A. Waltimo, M. Könönen, J.H. Koolstra, T.M. van Eijden (1992, 1994, 1997, 2012)).

Неизвестные мышечные усилия  $F_i$  сбалансированы силой сжатия челюстей и суставными реакциями  $R_j$ . Условия статического равновесия нижней челюсти для симметричного прикуса можно записать в виде системы уравнений (1):

$$\sum_{i=1}^N \mathbf{F}_i + \sum_{j=1}^2 \mathbf{R}_j + \mathbf{F}_b = 0, \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^N \mathbf{M}_o(\mathbf{F}_i) + \sum_{j=1}^2 \mathbf{M}_o(\mathbf{R}_j) + \mathbf{M}_o(\mathbf{F}_b) = 0,$$

где  $N$  – число рассматриваемых мышц,  $i = \overline{1, N}$  ( $N = 28$ );  $\mathbf{R}_j$  – реакции в височно-нижнечелюстных суставах,  $j = 1, 2$ ;  $\mathbf{F}_b$  – сила сжатия челюстей.

Шести уравнений статического равновесия челюсти недостаточно, чтобы найти все неизвестные величины: мышечные усилия (28 мышц) и сопутствующие им суставные реакции (6 компонент). Получена статически неопределенная задача. Для раскрытия этой неопределенности вводится критерий оптимизации.

Из литературных данных (Ж.А. Kieser, В.М. Зациорский, Б.И. Прилуцкий (1985, 1987, 1992)) известно, что для определения усилий в жевательных мышцах наилучшим образом подходит критерий минимакса (обеспечивает наиболее равномерное вовлечение в действие всей группы жевательных мышц):

$$\max \left( F_1/F_{1 \max}, F_2/F_{2 \max}, \dots, F_N/F_{N \max} \right) \rightarrow \min_{\mathbf{X} \in \Omega}, \quad (2)$$

где  $F_i$  – величина усилия  $i$ -й мышцы,  $i \in [1, 2, \dots, N = 28]$ ;  $F_{i \max}$  – величина максимальной силы  $i$ -й мышцы,  $F_{i \max} = K A_i$  ( $K$  – удельная мышечная сила,  $K = 37 \text{ Н} \cdot \text{см}^{-2}$  (Ж.Н. Koolstra, Т.М.Г. van Eijden, W.A. Weijs, М. Naeije (1988));  $A_i$  – площадь поперечного сечения  $i$ -й мышцы);  $\mathbf{X} = \{F_1, F_2, \dots, F_N\}$  – вектор значений усилий мышц из множества  $\Omega$ , образованного векторами усилий мышц  $\mathbf{X}$  и реакций височно-нижнечелюстных суставов, удовлетворяющих уравнениям равновесия (1).

В диссертации проанализирована работоспособность критерия путем сравнения с другими, приведенными в литературе (В.М. Зациорский, Б.И. Прилуцкий, Ж.Н. Koolstra, Т.М.Г. van Eijden, W.A. Weijs, М. Naeije, J.W. Osborn, F.A. Baragar (1985, 1988, 1992, 1996, 1988)).

Из вида соотношения (2) следует, что необходимо осуществлять поиск минимума среди континуума максимальных значений, в котором целевая функция является дискретной функцией номеров мышц. Введем новую переменную  $\mu = \max \left( F_1/F_{1 \max}, F_2/F_{2 \max}, \dots, F_N/F_{N \max} \right)$ , имеющую смысл верхней границы для значений  $F_i/F_{i \max}$ ,  $i = \overline{1, N}$  ( $N = 28$ ), (Гилл Ф., Мюррей У., Райт М. (1985)) и принадлежащей ограниченной области  $0 \leq \mu \leq 1$ . Соответственно, получающаяся в результате эквивалентная (2) задача формулируется так:  
найти

$$\mu \rightarrow \min_{\mathbf{X} \in \Omega} \quad (3)$$

при ограничениях

$$0 \leq F_i \leq F_{i \max}, \quad i \in [1, 2, \dots, 28], \quad (4)$$

$$F_i / F_{i \max} \leq \mu, \quad i \in [1, 2, \dots, 28], \quad (5)$$

$$0 \leq F_i / F_{i \max} \leq 1, \quad i \in [1, 2, \dots, 28], \quad (6)$$

включающих также уравнения равновесия (1).

Такая задача является классической для линейного программирования и имеет единственное решение в виду линейности ограничений и ограниченности области поиска  $\mu \in [0, 1]$  линейной функции  $\mu$  (Дж. Данциг, В.Г. Карманов (1966, 2004)). Задача может быть решена симплекс-методом. В результате находятся усилия мышц  $\mathbf{X}^* = \{F_1^*, F_2^*, \dots, F_N^*\}$ ,  $i = \overline{1, N}$  ( $N = 28$ ), и реакции, которые соответствуют заданному положению челюсти, которое меняется при коррекции прикуса.

Для верификации решения в данной главе представлен анализ решения известной в литературе задачи о равновесии трех стержней (один раз статически неопределимая система), моделирующей нагружение голеностопа (пяточной кости) под действием усилий мышц, с анализом применяемых четырех способов разрешения статической неопределенности, включающих три критерия оптимизации: 1) метод совместности деформаций; 2) сумма квадратов усилий мышц стремится к минимуму; 3) сумма квадратов отношений усилий мышц к их максимуму, который они способны развить, стремится к минимуму; 4) максимальное значение отношений усилий мышц к их максимумам, которые они способны развить, стремится к минимуму (минимакс).

Показано, что наиболее равномерному распределению усилий в стержнях соответствует критерий минимакса. Он с физиологической точки зрения подразумевает, что организм пытается избежать случая, когда одна или несколько мышц будут сильно напряжены и усилия в них будут приближаться к максимальным значениям.

Следует упомянуть, что при изменении прикуса будут меняться не только усилия жевательных мышц и суставные реакции, но и напряжения в костной ткани нижней челюсти и диске, т.е. от прикуса будет зависеть возможность появления перегрузки костной ткани и суставного диска.

**Третья глава** посвящена анализу биомеханических нагрузок в зубочелюстной системе, влияющих на состояния костной ткани нижней челюсти и дисков височно-нижнечелюстных суставов.

На данный момент в существующей методике не оценивается влияние положения диска височно-нижнечелюстного сустава относительно суставных поверхностей (рис. 2, а) на усилия жевательных мышц и реакции, точки приложения которых зависят от положения челюсти, изменяющееся при коррекции прикуса, и определяются как принято в стоматологической литературе (В.А. Хватова (2005)).

Согласно медицинскому опыту точка приложения реакции принадлежит поверхности контакта мышелка с диском (рис. 2, б) и отрезку, который берет начало из данной точки и отсчитывается по нормали в самом узком месте суставной щели (В.А. Хватова (2005)). Это расстояние определяется по боковому рентгеновскому снимку. Положение этой точки может меняться при изменении положения челюсти относительно черепа.

Невозможность оценки упомянутых величин приводит к тому, что стоматолог не способен, хотя бы даже в отдаленной перспективе, сказать, как скажется коррекция прикуса на состоянии костной ткани и диска.

В диссертации показано, что с помощью задачи (3)–(5) при переднем смещении точки приложения реакции височно-нижнечелюстного сустава усилия мышц-закрывателей уменьшаются, а мышц-открывателей практически не изменяются, реакция височно-нижнечелюстного сустава сначала уменьшается, а затем возрастает. При заднем смещении усилия мышц-закрывателей увеличиваются, усилия мышц-открывателей практически не изменяются, а реакция сустава возрастает. При физиологическом положении диска (в первой координатной четверти) суставная реакция принимает наименьшие значения, а распределение усилий мышц по отношению к их максимальным значениям приближается к оптимальному (минимакс принимает наименьшие значения) (рис. 2, в).

Таким образом, каждый вектор усилий всех жевательных мышц, реакций височно-нижнечелюстных суставов и координат точек их приложения при определенном положении нижней челюсти определяет значение минимакса, т.е. усилия (напряжения) в нижней челюсти и суставном диске соответствуют значению минимакса.

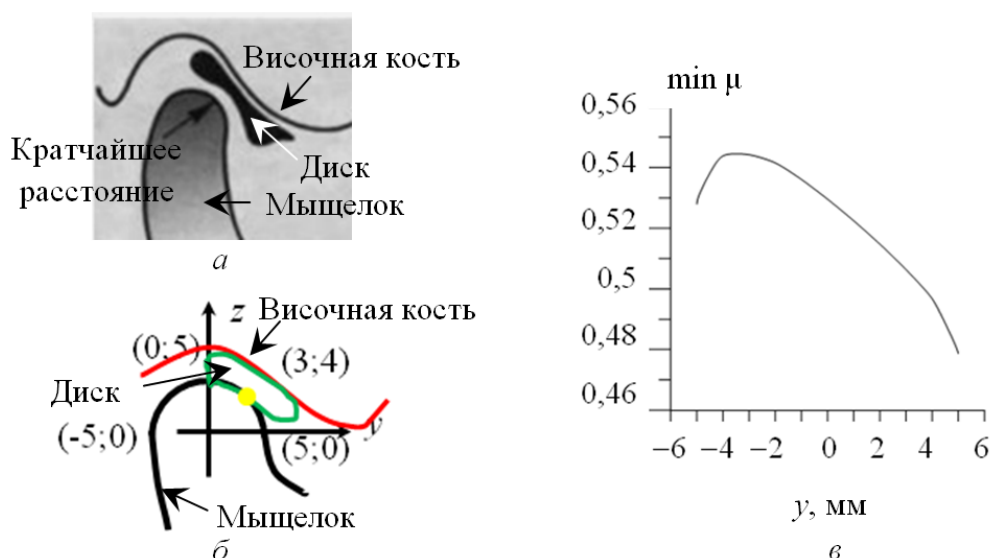


Рис. 2. Влияние точки приложения реакции на равномерность распределения усилий мышц по отношению к их максимальным значениям: а – положение точки приложения реакции (отмечено стрелочкой) (кратчайшее расстояние между суставными поверхностями); б – координаты точки приложения реакции (желтая точка); в – значение минимакса при изменении координаты точки приложения вдоль оси  $y$

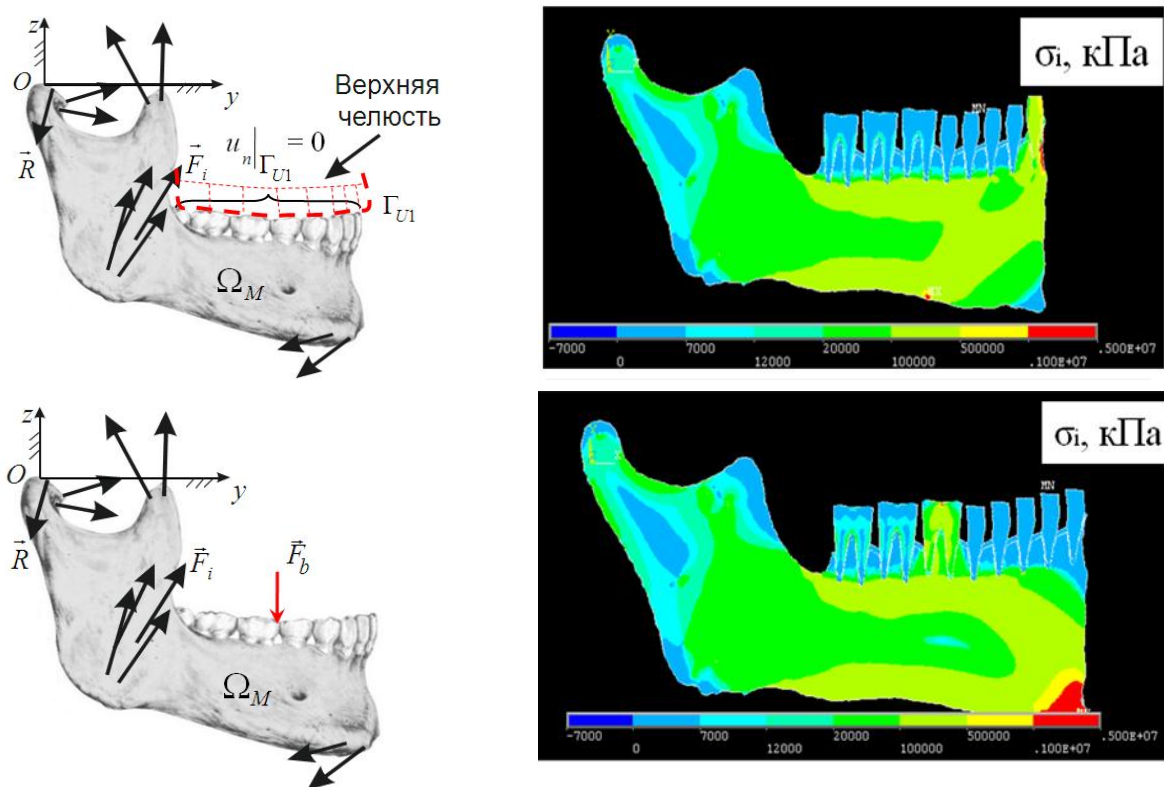


Рис. 3. Влияние граничных условий на распределение напряжений в теле нижней челюсти:  $\vec{F}_i$  – усилия жевательных мышц

Для анализа напряжений ставятся две задачи по определению напряженно-деформированных состояний челюсти и диска, где костная ткань, периодонт, зубы и диск рассматривались как линейно-упругие и изотропные тела (Е. Tanaka, Т. van Eijden (2003); Ki-Nam Kima (2012)).

При сравнении результатов в задаче об упругом напряженно-деформированном состоянии нижней челюсти, где заданы кинематические граничные условия на поверхности контакта зубов, а также усилия жевательных мышц и реакция височно-нижнечелюстного сустава, определенные при максимальной силе сжатия челюстей, показано, что на расстоянии приблизительно 2 см от точки приложения силы сжатия отличие распределений напряжений для силовых граничных условий (приложена равнодействующая, соответствующая максимальной силе сжатия челюстей) на зубах от кинематических составляет менее 5 %, что количественно характеризует выполнение принципа Сен-Венана (рис. 3).

Таким образом, распределение напряжений в области мышелка не зависит от вида вышеупомянутых граничных условий. Полученные величины напряжений в области мышелка и суставного диска сравниваются с допустимыми для анализа возникновения патологических изменений в них (Е. Tanaka, Т. van Eijden (2003); Ki-Nam Kima (2012)).

Следует упомянуть, что напряжения получены для конкретного положения нижней челюсти. Соответственно, при изменении прикуса

меняется распределение напряжений, влияющих на появление патологических изменений в нижней челюсти и диске височно-нижнечелюстного сустава, так как они зависят от меняющихся с положением челюсти усилий жевательных мышц и суставных реакций.

**Четвертая глава** посвящена постановке и решению задачи биомеханического управления коррекцией прикуса.

Задача управления связана с выбором конкретных значений стоматологических параметров, описывающих положение нижней челюсти и определяющих усилия всех жевательных мышц и суставных реакций, с учетом ограничений на напряжения в теле челюсти и суставном диске.

Для прикуса, используя магнитно-резонансную томографию, получены геометрия нижней челюсти, суставных поверхностей и диска, координаты крепления мышц к челюсти и черепу, а также их размеры.

В процессе анализа состояния прикуса и зубочелюстной системы, а также назначения прикуса, стоматолог, используя пальпацию мышц или электромиографию, оценивает состояние напряженности этих мышц и выбирает параметры как можно ближе к середине физиологического диапазона. Когда стоматолог назначает положение прикуса, тогда, согласно изложенному выше, определены конкретные значения  $\mathbf{U} \in \Pi_m$ , принадлежащие диапазону физиологической нормы ( $\angle ANB = 0 \dots 4^\circ$ ,  $\angle DoA = 42 \dots 45^\circ$ ,  $\angle FH-ML = 20 \dots 25^\circ$ ) для данного пациента, где  $\Pi_m$  –  $m$ -мерный параллелепипед, а  $m$  – число независимых параметров ( $m = 6$  – для пространственного случая,  $m = 3$  – для плоского (симметричного) случая).

Так как стоматологу не представляется возможным оценить усилия во всех жевательных мышцах и реакции височно-нижнечелюстных суставов, а также напряжения в костной ткани нижней челюсти и суставном диске для назначенного стоматологом прикуса, то нельзя быть в полной мере уверенным, что данный вариант прикуса является оптимальным для данного пациента и что он не вызовет патологических изменений. Для анализа выбранного стоматологом прикуса необходимо поставить задачу коррекции прикуса в рамках физиологических диапазонов значений стоматологических параметров и воспользоваться методами биомеханического моделирования.

Каждому набору параметров  $\mathbf{U}$  соответствует решение статически неопределенной задачи вычисления усилий мышц  $\mathbf{X}^* = \{F_1^*, F_2^*, \dots, F_N^*\}$ ,  $i = \overline{1, N} = 28$ , и реакций височно-нижнечелюстных суставов со значением целевой функции, равному  $M^*$  и отражающему напряженность всех жевательных мышц,

$$M^* = \mu(\mathbf{X}^*), \quad (7)$$

где  $M^* \in M = [0, 1]$ . Каждое значение  $M^*$ , соответствующее значению целевой функции (2), характеризует конкретное положение нижней



челюсти. Каждый найденный вектор усилий мышц  $\mathbf{X}^*$  определяет величину  $M^*$ , т.е. в случае полной симметрии прикуса при плоском рассмотрении движения нижней челюсти  $M^*$  зависит от трех стоматологических углов ( $\angle ANB$ ,  $\angle DoA$ ,  $\angle FH-ML$ ), соответствующих трем математическим переменным: двум координатам полюса ( $y_C, z_C$ ) и углу поворота вокруг полюса  $\varphi$ ) (рис. 1). При изменении управляющих параметров  $\mathbf{U}$  строится множество  $M$ , что и позволяет в дальнейшем найти  $\Phi = \min_{\mathbf{U} \in \Pi_m} M^*$ , и, тем самым, решить задачу управления (8), (9)–(11).

Будем искать такой набор параметров прикуса  $\mathbf{U}^*$ , при котором достигается минимум значений целевой функции

$$\Phi = \min_{\mathbf{U} \in \Pi_m} M^* \quad (8)$$

при ограничениях

$$\sigma_i < \sigma_{res}, r \in \Omega_M; \quad (9)$$

$$\text{если } \exists \sigma_k < 0 (k = \overline{1,3}), \text{ то } \max(|\sigma_1|, |\sigma_2|, |\sigma_3|) < \sigma_{col}, r \in \Omega_D; \quad (10)$$

$$\sigma_i < \sigma_{des}, r \in \Omega_D. \quad (11)$$

Здесь  $\sigma_i$  – интенсивность напряжений;  $\sigma_{res}$  – максимальная интенсивность напряжений, при которых не наблюдается резорбция костной ткани в мышелке нижней челюсти (область  $\Omega_M$ ) (70 МПа) (Е. Tanaka, Т. van Eijden (2003));  $\sigma_k (k = \overline{1,3})$  – главные напряжения в диске височно-нижнечелюстного сустава (область  $\Omega_D$ ) ( $\sigma_{col}$  – максимальная допустимая величина напряжений на краях диска височно-нижнечелюстного сустава, при которой не происходит схлопывание капилляров, питающих диск (6–10 кПа);  $\sigma_{des}$  – максимальная допустимая интенсивность напряжений в средней (центральной) зоне диска, при которой не происходит резорбция диска (14 МПа) (Е. Tanaka, Т. van Eijden (2003)). Ограничения (8)–(9) позволяют неявно учесть действия реакции и ее точки приложения на напряжения в диске и нижней челюсти, влияющих на их правильное функционирование. Формулировка критерия для напряженно-деформированного состояния нижней челюсти и диска является отдельной задачей, требующей моделирования их питания (например, учет диска как пороупругого тела), процесса резорбции и т.д.

В данной работе рассматривается симметричный случай окклюзии. На рис. 4 приведены зависимости усилий жевательных усилий и реакции височно-нижнечелюстного сустава от значений стоматологических параметров при индивидуальных данных о жевательных мышцах (максимальные площади поперечных сечений и координаты точек крепления к нижней челюсти и черепу), которые показывают, что при увеличении углов  $ANB$  и  $DoA$  величины усилий мышц и реакций

увеличиваются примерно на 5 % и 20 % соответственно, а при увеличении угла  $FH-ML$  они уменьшаются в той же пропорции.

Определены диапазоны стоматологических параметров, при которых выполняются ограничения на напряжения в теле нижней челюсти и диске височно-нижнечелюстного сустава для заданной геометрии (рис. 5).

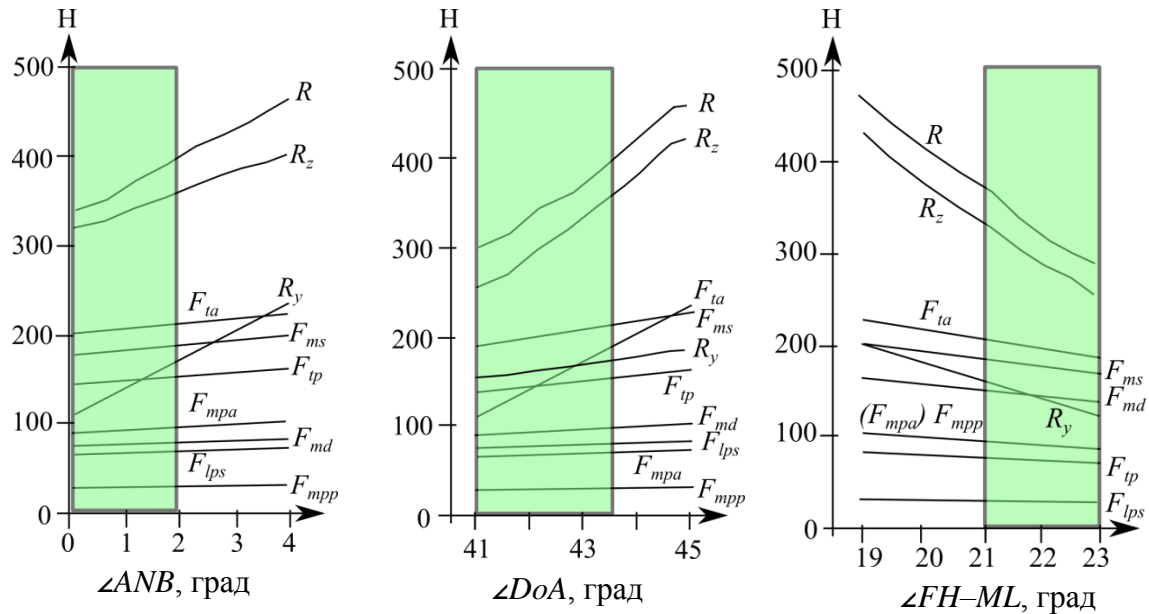


Рис. 4. Влияние стоматологических параметров в физиологическом диапазоне на усилия мышц и реакцию височно-нижнечелюстного сустава. Обозначения:  $F_{ms}$  и  $F_{md}$  – поверхностная и глубокая жевательная;  $F_{ta}$  и  $F_{tp}$  – передняя и задняя височная;  $F_{mpa}$  и  $F_{mpp}$  – передняя и задняя медиальная крыловидная;  $F_{lps}$  – поверхностная латеральная крыловидная;  $R$ ,  $R_y$  и  $R_z$  – величины реакций и проекций реакции височно-нижнечелюстного сустава на оси  $y$  и  $z$  (рис. 3, б) (области, в которых выполняются ограничения на напряжения выделены зеленым цветом)

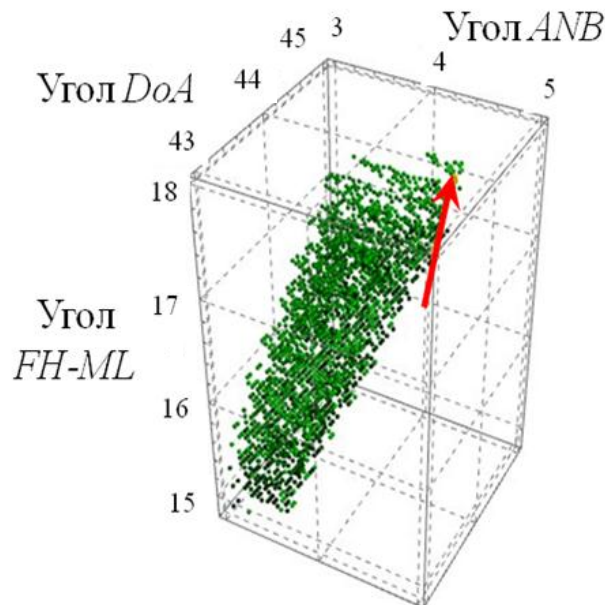


Рис. 5. Геометрический образ множества  $M$  (красная стрелочка характеризует минимальное значение)

Полученные зависимости значения целевой функции (7) от значений стоматологических углов, при которых выполняются вышеуказанные ограничения на напряжения, позволяют построить геометрический образ множества  $M$  (рис. 5). Каждому вектору, состоящему из усилий всех жевательных мышц, компонент реакций височно-нижнечелюстных суставов и координат их точек приложения, а также распределений напряжений в нижней челюсти и суставном диске, положения которых определяются значениями независимых стоматологических параметров ( $\angle ANB$ ,  $\angle DoA$ ,  $\angle FH-ML$ ), соответствует элемент множества  $M$ . Среди всех элементов множества  $M$  выбирается наименьшее значение, которому соответствуют величины стоматологических углов, являющиеся оптимальными для данного случая (рис. 5, красная стрелочка).

**В пятой главе** работы приведена практическая реализация методики коррекции прикуса зубочелюстной системы.

К существующим этапам лечения, проводимым стоматологом, относятся: 1) пальпация жевательных мышц; 2) рентгеновские методы; 3) оценка стоматологических параметров путем применения методов расшифровки полученных снимков; 4) сравнение значений параметров с их физиологическими диапазонами; 5) установка временных или постоянных конструкций для изменения прикуса. Вышеупомянутые действия проводятся на основании пальпации мышц.

К этапам, которые выполняются на данный момент стоматологом, в работе при коррекции предлагается добавить 2 этапа: 1) магнитно-резонансную томографию до коррекции стоматологом (позволяет оценить состояние и положение диска височно-нижнечелюстного сустава и наличие его патологий); 2) магнитно-резонансную томографию после коррекции с проведением биомеханического моделирования, что позволяет получить индивидуальные параметры пациента и провести коррекцию прикуса, назначенного стоматологом.

При наличии головных болей, болей в области височно-нижнечелюстного сустава или нарушениях мозгового кровоснабжения ввиду изменений состояния внутренней сонной артерии предлагается назначить магнитно-резонансную томографию в сосудистом режиме (магнитно-резонансную ангиографию). Совместно с общим режимом представляется возможным оценить взаимное расположение как сонной артерии, так и элементов височно-нижнечелюстного сустава.

В качестве примера приведена модельная задача, в которой за отправную точку взят прикус, назначенный стоматологом, исходя из анализа напряженности пальпируемых мышц, минимизации проводимых изменений на основе удовлетворения величин стоматологических параметров их физиологическим диапазонам.

Рассматривались три варианта прикуса:

1. Прикус, назначенный стоматологом без применения биомеханических методов. В данном случае для данного пациента он характеризуется углом наклона окклюзионной плоскости в  $6^\circ$  (линия 1, рис. 6).

2. Уточненный вариант прикуса с применением методики биомеханического моделирования (найден из решения задачи (8)–(10)) (линия 2, рис. 6), которому соответствует угол наклона окклюзионной плоскости в  $7,8^\circ$ .

3. Прикус, который характеризуется углом наклона окклюзионной плоскости в  $9^\circ$  (линия 3, рис. 6). Это среднестатистическое значение угла наклона окклюзионной плоскости для рассматриваемых в данном примере пола и возраста.

Для всех вариантов прикуса вычислены величины усилий жевательных мышц и реакций височно-нижнечелюстных суставов, представленные на рис. 7. Усилия мышц для уточненного варианта прикуса уменьшились по сравнению с вариантом, выбранным стоматологом, а также для случая со среднестатистическим значением угла наклона окклюзионной плоскости (R. Slavicek, 2002)). Полученные усилия мышц характеризуют то, что их величины в уточненном варианте прикуса приближаются к прямо пропорциональной зависимости величины от

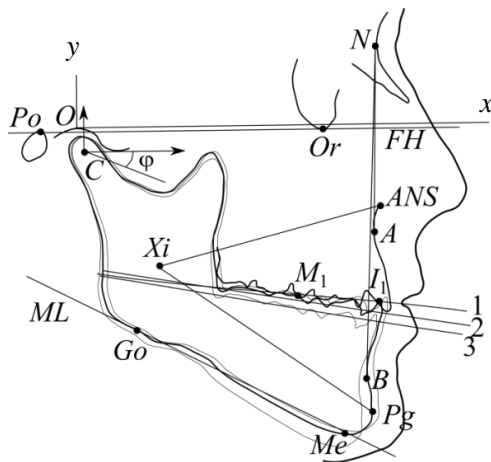


Рис. 6. Положение нижней челюсти, определяющее прикус, назначенный стоматологом и определяемый рядом конкретных значений параметров с соответствующим углом наклона окклюзионной плоскости: линия 1 –  $6^\circ$  (назначенный стоматологом вариант прикуса); линия 2 –  $7,8^\circ$  (уточненный вариант); линия 3 –  $9^\circ$  (среднестатистический вариант)

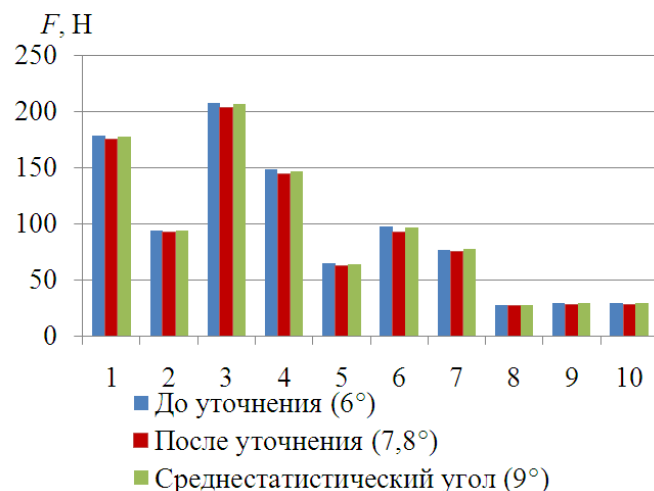


Рис. 7. Величины усилий мышц для прикуса выбранного стоматологом и уточненного варианта ( $F_i, i = \overline{1, N} (N = 14)$ ): 1 и 2 – поверхностная и глубокая жевательная; 3 и 4 – передняя и задняя височная; 5 и 6 – передняя и задняя медиальная крыловидная; 7 – наружная латеральная крыловидная; 8 – подбородочно-подъязычная; 9 и 10 – передняя и задняя челюстно-подъязычная. Усилия внутренней латеральной крыловидной, передней и задней двубрюшной и шило-подъязычной мышц равны нулю

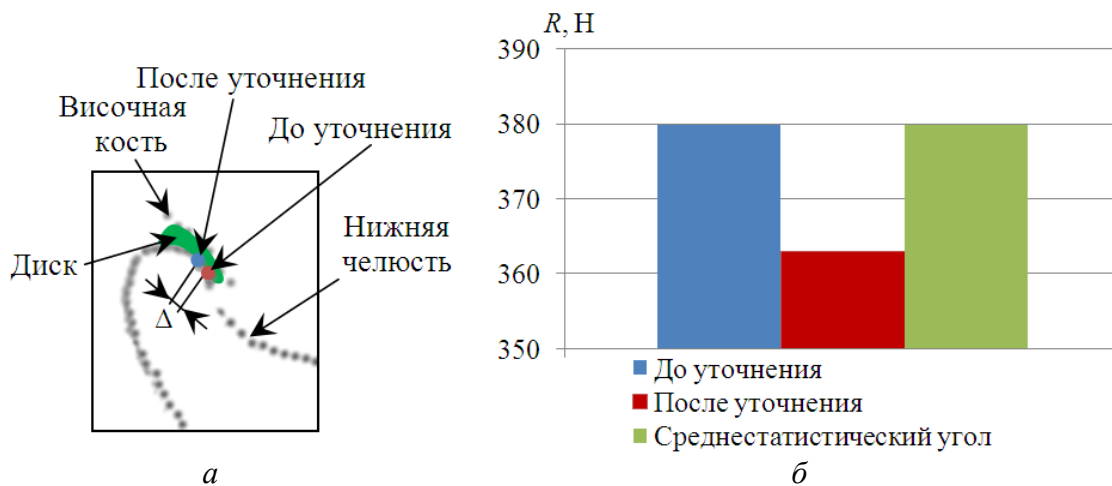


Рис. 8. Реакция височно-нижнечелюстного сустава: *а* – изменение точки приложения реакции, определяемой согласно гипотезе, принятой в медицинской литературе; *б* – изменение величины реакции височно-нижнечелюстного сустава

площади поперечного сечения мышцы, что не противоречит литературным данным (J.A. Kieser, В.М. Зациорский, Б.И. Прилуцкий (1985, 1987, 1992)).

Следует отметить, что для данного пациента во всем диапазоне физиологических значений параметров прикуса удалось лишь уменьшить значения усилий подбородочно-подъязычной, передней челюстно-подъязычной, задней челюстно-подъязычной мышц (в среднем на 2 %), которые относятся к мышцам-открывателям, которые в норме должны работать только при открывании (Т.М.Г. van Eijden, J.A.M. Korfage, P. Brugman (1997)).

На рис. 8, *а* представлено изменение положения точки приложения реакции кзади на  $\Delta \approx 1$  мм. Она приблизилась к центральной зоне диска, которая должна в норме принимать на себя наибольшую долю нагрузки. Величина реакции уменьшилась на 4,5 % при изменении положения челюсти кзади и вниз на 1 мм с поворотом по часовой стрелке, соответствующим увеличению угла наклона окклюзионной плоскости на  $1,8^\circ$  (рис. б).

Введение количественных результатов биомеханического моделирования, учитывающих усилия в зубочелюстной системы, в существующую методику позволяет уменьшить количество повторных обращений за дополнительной коррекцией прикуса, объективизировав ее путем введения методики определения усилий жевательных мышц, реакций височно-нижнечелюстных суставов, напряжений в костной ткани нижней челюсти и суставном диске и дать прогноз о долгосрочном состоянии этих элементов.

## Основные результаты и выводы

1. Проведен анализ возможностей применения существующих методов лучевой диагностики зубочелюстной системы и показана необходимость применения магнитно-резонансной томографии для построения геометрии нижней челюсти и определения положения и состояния диска височно-нижнечелюстного сустава.

2. Определены независимые параметры, характеризующие прикус, необходимые для постановки задачи биомеханического управления на основе применяемых методик в стоматологии.

3. Одним из результатов работы является методика биомеханического управления коррекцией прикуса на основе количественных параметров, характеризующих усилия в нижней челюсти и диске височно-нижнечелюстного сустава:

а) определение усилий жевательных мышц и реакции височно-нижнечелюстного сустава как функции параметров, характеризующих прикус  $F_i(\angle ANB, \angle DoA, \angle FH-ML)$ ;

б) решение задачи коррекции прикуса с целью получения оптимальных значений параметров прикуса для индивидуального пациента.

4. Поставлена задача биомеханического управления прикуса с учетом усилий, возникающих в нижней челюсти и диске височно-нижнечелюстного сустава, и решена на примере симметричного прикуса.

5. Результаты работы апробированы и приняты к внедрению в практику на кафедре ортопедической стоматологии Пермского государственного медицинского университета им. академика Е.А. Вагнера, на основании чего имеются соответствующие акты.

## Основные публикации по теме диссертации

1. Оборин Л.Ф., Няшин Ю.И., Никитин В.Н., Райков А.В. О механизме влияния биомеханических стоматологических факторов на качество и продолжительность жизни людей // Российский журнал биомеханики. – 2010. – Т. 14, № 4. – С. 70–86 (перечень ВАК).
2. Няшин Ю.И., Еловинова А.Н., Коркодинов Я.А., Никитин В.Н., Тотьмянина А.В. Взаимодействие зубочелюстной системы с другими системами человеческого организма в рамках концепции виртуального физиологического человека // Российский журнал биомеханики. – 2011. – Т. 15, № 3. – С. 8–26 (перечень ВАК).
3. Тверье В.М., Няшин Ю.И., Никитин В.Н. Биомеханическая модель определения усилий мышц и связок в зубочелюстной системе человека // Российский журнал биомеханики. – 2013. – Т. 17, № 2. – С. 8–20 (перечень ВАК).
4. Тверье В.М., Няшин Ю.И., Никитин В.Н., Оборин Л.Ф. Механическое давление как основа биомеханического моделирования зубочелюстной системы человека // Российский журнал биомеханики. – 2014. – Т. 18, № 1. – С. 24–35 (перечень ВАК).
5. Никитин В.Н., Тверье В.М., Няшин Ю.И., Оборин Л.Ф. Реакция височно-нижнечелюстного сустава и усилия жевательных мышц // Российский журнал биомеханики. – 2014. – Т. 18, № 2. – С. 194–207 (перечень ВАК).

6. Тверье В.М., Никитин В.Н. Задача коррекции прикуса в зубочелюстной системе человека // Российский журнал биомеханики. – 2015. – Т. 19, № 4. – С. 344–358 (перечень ВАК).
7. Никитин В.Н. Реализация методики коррекции прикуса человека // Российский журнал биомеханики. – 2016. – Т. 20, № 1. – С. 48–57 (перечень ВАК).
8. Тверье В.М., Никитин В.Н., Кротких А.А. Уточнение прикуса на основе биомеханического моделирования // Российский журнал биомеханики. – 2017. – Т. 21, № 1. – С. 41–50 (перечень ВАК).
9. Спицин А.П., Оборин Л.Ф., Никитин В.Н. Влияние однократного жевания жевательной резинки на показатели центральной гемодинамики // Вятский медицинский вестник. – 2012. – № 3. – С. 32–34 (РИНЦ).
10. Спицин А.П., Оборин Л.Ф., Никитин В.Н. Влияние однократного жевания жевательной резинки на вариабельность сердечного ритма // Вятский медицинский вестник. – 2012. – № 2. – С. 41–44 (РИНЦ).
11. Антонова А.А., Никитин В.Н. Влияние патологий зубочелюстной системы на мозговое кровоснабжение // Masters Journal. – 2012. – № 2. – С. 145–151 (РИНЦ).
12. Никитин В.Н. Влияние биомеханической нагрузки на усилия в зубочелюстной системе человека // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная математика и механика. – 2014. – № 1. – С. 13–26. (РИНЦ).
13. Никитин В.Н., Няшин Ю.И. Биомеханическое взаимодействие височно-нижнечелюстного сустава и внутренней сонной артерии // Прикладная математика и механика: тез. докл. науч.-техн. конф. (г. Пермь, 21–27 мая 2012 г.) / Перм. нац. исслед. политехн. ун-т. – Пермь: Изд-во ПНИПУ, 2012.
14. Никитин В.Н., Няшин Ю.И. Влияние изменений зубочелюстной системы на другие системы организма в рамках концепции виртуального физиологического человека // Методы компьютерной диагностики в биологии и медицине – 2011: материалы ежегод. Всерос. науч. шк.–семинара, 25–27 окт. 2011 г. / Саратов. гос. ун-т им. Н.Г. Чернышевского. – Саратов, 2011.
15. Никитин В.Н., Няшин Ю.И. Биомеханическая взаимосвязь изменений височно-нижнечелюстного сустава и внутренней сонной артерии // Математическое моделирование в естественных науках: тез. докл. XX Всерос. шк.-конф. молодых учен. и студентов / Перм. гос. мед. акад. им. Е.А. Вагнера. – Пермь: Изд-во ПНИПУ, 2011.
16. Никитин В.Н., Оборин Л.Ф. Оценка взаимодействия костных и мягкотканых структур ВНЧС и височной кости по данным МРТ // Стоматология Большого Урала. Инновационные технологии в стоматологии: материалы Всерос. конгр., [г. Пермь, 2011 г.] / Перм. гос. мед. акад. им. Е.А. Вагнера. – Пермь, 2011.
17. Няшин Ю.И., Тверье В.М., Лохов В.А., Никитин В.Н. Моделирование зубочелюстной системы человека в рамках проекта «Виртуальный физиологический человек» // Стоматология Большого Урала. Инновационные технологии в стоматологии: материалы Всерос. конгр., [г. Пермь, 2011 г.] / Перм. гос. мед. акад. им. Е.А. Вагнера. – Пермь, 2011.
18. Тверье В.М., Няшин Ю.И., Никитин В.Н. Биомеханическое моделирование формирования и развития зубочелюстной системы человека // XVII Зимняя школа по механике сплошных сред: тез. докл., [г. Пермь, 28 февр. – 3 марта 2011 г.]. – Пермь, 2011.