

На правах рукописи



ДУБИНИН АЛЕКСЕЙ ЛАВРЕНТЬЕВИЧ

**БИОМЕХАНИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ НАЧАЛЬНОЙ СТАДИИ
ОРТОДОНТИЧЕСКОГО ЛЕЧЕНИЯ**

Специальность 01.02.08 – Биомеханика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Пермь – 2017

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»

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

Официальные оппоненты: **Бауэр Светлана Михайловна**
доктор физико-математических наук, профессор,
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет», профессор кафедры теоретической и прикладной механики

Босяков Сергей Михайлович
кандидат физико-математических наук, доцент,
Белорусский государственный университет,
доцент кафедры теоретической и прикладной механики

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

Защита состоится __ декабря 2017 г. в 12 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
Д 212.243.10, к.ф.-м.н.

Сафонов Роман Анатольевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. С позиций биомеханики человеческий организм рассматривается как единый комплекс взаимодействующих друг с другом многоуровневых систем (зубочелюстная, костная, мышечная, дыхательная, кровеносная, нервная и др.). Почти всегда нарушения функционирования одной из систем ведут к некоторым расстройствам в работе других, а иногда и к общему ослаблению организма.

В непосредственной близости к ротовой полости проходит внутренняя сонная артерия, которая снабжает кровью большую часть головы, в частности головной мозг. Вследствие наличия зубочелюстных аномалий (в частности, неправильного прикуса, смещения диска височно-нижнечелюстного сустава) ширина просвета сосуда может уменьшаться. Это очень опасное явление, которое влечет за собой временное нарушение кровообращения мозга и может стать причиной инсульта. Инсульт является вторым по смертности заболеванием в мире. Ежегодно регистрируется около 6 миллионов случаев, из них 450 тысяч в России. Также ввиду наличия зубочелюстных аномалий возможны нарушения эстетики лица, дыхания, осанки, мимики, произношения слов, пищеварения и пр.

Исправление зубочелюстных аномалий заключается в перемещении зубов в «правильное» положение (соответствующее физиологическому прикусу) под действием ортодонтической нагрузки. Сам процесс перемещения зубов является довольно сложным. На его ход влияет множество факторов: свойства живых тканей, физиологические процессы, параметры ортодонтической конструкции. Поэтому врачу бывает довольно трудно учесть их влияние, опираясь лишь на свою интуицию и клинический опыт. Ввиду отсутствия количественных критериев оценки данных параметров достаточно трудно ответить на один из основных вопросов ортодонтии «куда, как и какой величины необходимо приложить силу, чтобы переместить зуб желаемым образом?».

В то же время согласно современной концепции здравоохранения «4П-медицина» лечение должно быть персонализированным, предсказательным, превентивным, партнерским. Поэтому необходимо уметь обеспечивать индивидуальный подход к лечению пациентов, прогнозировать результаты лечения, используя современные компьютерные методы количественной оценки параметров и предотвращать развитие аномалий на ранней стадии, а также оптимизировать и объективизировать существующие методики лечения.

В связи с этим очевидна необходимость биомеханического подхода к изучению процесса ортодонтического лечения. Данный подход основывается на знаниях и методах анатомии, физиологии, механики, математического моделирования, что позволяет глубже исследовать данный вопрос.

Таким образом, настоящая работа является актуальной научной задачей.

Цель исследования заключается в разработке биомеханического подхода к исследованию движения зуба на начальной стадии ортодонтического лечения.

Для достижения главной цели исследования были поставлены следующие основные **задачи**:

- разработка биомеханической модели движения зуба на начальной стадии лечения;
- анализ ортодонтического движения зуба в частных случаях;
- верификация разработанной методики посредством натурального эксперимента, сравнения с результатами работ других авторов;
- постановка и решение задачи определения оптимальной ортодонтической нагрузки с учетом ограничения на напряжения в периодонтальной связке.

Научная новизна

В работе создан новый биомеханический подход для исследования перемещений зуба, включающий в себя новое фундаментальное понятие «область сопротивления зуба», исследованы свойства данного понятия, дана классификация видов области сопротивления, определена зависимость ее вида от геометрических и механических параметров системы «зуб–периодонт». Впервые в задаче определения оптимальной ортодонтической нагрузки использованы понятия «центра/области сопротивления зуба». Получены количественные значения данной системы сил, которые позволяют объективизировать эмпирические методы ортодонтии.

Практическая значимость

Практическая значимость работы определяется

- разработкой методики, алгоритма и программной реализацией для определения положения и вида области сопротивления зуба в зависимости от индивидуальных параметров (механических свойств, геометрии) системы «зуб–периодонт», что позволяет исследовать перемещение зуба в рамках костной лунки;
- созданием методики определения свойств податливости периодонтальной связки;
- теоретическим обоснованием настройки и установки ортодонтического аппарата (расчет места приложения, направления, оптимальной величины нагрузки к коронке зуба).

Работа проводилась в рамках Межвузовского научно-исследовательского центра «Современные проблемы медицинской биомеханики», созданного специалистами Пермского национального исследовательского политехнического университета и Пермского государственного медицинского университета и внедрена в практику

подготовки специалистов обоих университетов (специальности «Компьютерная биомеханика» и «Ортопедическая стоматология»).

Достоверность полученных результатов работы обеспечивается применением апробированных моделей, строгостью используемых математических методов при построении решения поставленных задач; проведенным натурным экспериментом; согласованием полученных теоретических и экспериментальных результатов с результатами работ других авторов.

Апробация работы

Материалы диссертации докладывались на следующих Международных и Всероссийских научных конференциях:

- Зимняя школа по механике. – Пермь, 2013;
- Математическое моделирование в естественных науках. – Пермь, 2014;
- II-ая Всероссийская научно-техническая интернет-конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Прикладная математика, механика и процессы управления». – Пермь, 2014;
- XI Всероссийская конференция с международным участием и школа-семинар по биомеханике «Биомеханика – 2014». – Пермь, 2014;
- Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Фундаментальные и прикладные проблемы механики, математики, информатики». – Пермь, 2015;
- 5th Eurosummer School on Biorhology & Symposium on Micro and Nano Mechanics and Mechanobiology of Cells, Tissues and Systems. – Sofia, 2015;
- XI Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики. – Казань, 2015;
- Russian Conference with International Participation in Memory of Professor Vladimir S. Markhasin "Experimental and Computational Biomedicine" dedicated to corresponding member of RAS V.S. Markhasin. – Екатеринбург, 2016;
- VII Белорусский конгресс по теоретической и прикладной механике «МЕХАНИКА-2016». – Минск, 2016;
- XII Всероссийская конференция с международным участием и школа-семинар по биомеханике «Биомеханика – 2016». – Пермь, 2016.

Также полученные результаты неоднократно докладывались на семинарах кафедры теоретической механики и биомеханики, кафедры математического моделирования систем и процессов факультета прикладной математики и механики Пермского национального исследовательского политехнического университета в 2013-2017 гг. На протяжении всего срока выполнения работа постоянно обсуждалась с доктором медицинских наук, практикующим ортодонтом, доцентом А.Н. Еловиковой.

Гранты.

Работа, представленная в диссертации, выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ №15-01-04932 А «Управление перемещением зубов при их ортодонтическом лечении с помощью нахождения центра сопротивления или области сопротивления».

Результаты диссертационной работы использованы при выполнении научно-исследовательской работы в рамках проекта Министерства образования и науки (№ 19.7286.2017/8.9) «Государственное задание 2017–2019».

На защиту выносятся следующие положения:

- новое понятие «область сопротивления зуба», которое является естественным обобщением понятия «центр сопротивления»;
- классификация видов области сопротивления и установление связи между этими видами и геометрическими и механическими параметрами системы «зуб–периодонт»;
- методика применения разработанной теории движения зуба в частных случаях (определение свойств податливости периодонтальной связки, определение вида и положения области сопротивления зуба);
- верификация разработанной методики на основе натурального эксперимента и сопоставления с результатами работ других авторов;
- введение критерия оптимальности при ограничениях на напряжения в периодонте: разница между запланированным начальным перемещением зуба и рассчитываемым должна быть минимальной;
- количественные значения оптимальной ортодонтической нагрузки для перемещения зуба в рамках костной лунки, позволяющие сформулировать рекомендации по настройке и установке ортодонтического аппарата.

Публикации.

Материалы диссертации опубликованы в 14 научных работах, из них 5 статей в журналах из перечня рецензируемых научных журналов и изданий ВАК, 7 – в тезисах и сборниках материалов конференций, 2 – в прочих изданиях.

Личный вклад автора.

Результаты, связанные с введением нового понятия «область сопротивления», развитием методики определения вида и положения области сопротивления, проведением натуральных и численных экспериментов, введением критерия оптимальности, результаты численного моделирования, получение количественных значений ортодонтической нагрузки, изложенные в диссертационной работе, получены автором лично и самостоятельно. Постановка задач, обсуждение полученных результатов проводились совместно с научным руководителем.

Диссертация соответствует паспорту специальности 01.02.08 «Биомеханика» по пункту 5 «Изучение механических основ и проявлений регуляции (управления) в биологических объектах» и по пункту 6 «Разработка на основе методов механики средств для исследования свойств и явлений в живых системах, для направленного воздействия на них и их защиты от влияния внешних факторов».

Структура и объем диссертации.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка цитированной литературы. Материал работы изложен на 127 страницах, содержит 46 рисунков и 2 таблицы. Список цитированной литературы содержит 148 наименований.

Во введении сформулирована актуальность темы разработки биомеханического сопровождения для исправления зубочелюстных аномалий, приведена степень научной разработанности проблемы, поставлены цель и задачи исследования, определены научная новизна и практическая значимость результатов, дано краткое содержание работы.

Первая глава содержит сведения об анатомии и физиологии зубочелюстной системы, в частности описаны строение и свойства зубов и периодонтальной связки (тонкая прослойка, окружающая корень зуба, которая соединяет его с костью) (рис. 1). Дано подробное описание проблемы наличия зубочелюстных аномалий. Приведена информация о нормальном и патологических видах прикуса, причинах формирования аномалий, влиянии на функционирование всего человеческого организма и возможных последствиях.

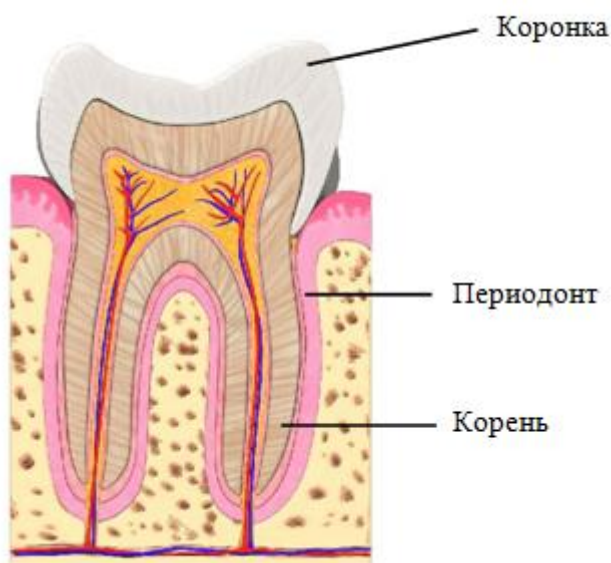


Рис. 1. Элемент зубочелюстной системы

Исправление зубочелюстных аномалий осуществляется путем приложения нагрузки к зубу посредством ортодонтического аппарата (брекет-система, эластопозиционер). Под действием системы сил зуб начнет перемещаться. В зависимости от ее величины, места приложения и направления зуб может перемещаться на определенное расстояние определенным образом (поступательно, вращательно, сложно) в определенном направлении.

Исследуя процесс перемещения зуба, традиционно выделяются две стадии: начальная и длительная. В данной работе исследуется именно начальная стадия движения, которая подразумевает мгновенное перемещение зуба в рамках костной лунки (до начала перестройки костной ткани). Это ответственная стадия ортодонтического лечения, на которой существует опасность чрезмерного нагружения зуба, что может вызвать серьезные осложнения, вплоть до повреждения периодонта. Приводятся имеющиеся немногочисленные экспериментальные данные со значениями величин рекомендуемой нагрузки для перемещения зуба с учетом различных факторов пациентов (возраст, топография зуба, вид движения).

Процесс перемещения зуба, как и любой другой процесс, связанный с живыми системами, является достаточно сложным, на ход которого влияет множество факторов таких, как индивидуальные параметры пациента (пол, возраст, реакция тканей, способность к росту, физиологические особенности перестройки тканей), характеристики и особенности ортодонтического аппарата. Для их учета не обойтись без биомеханического анализа, без элементов компьютерного моделирования и количественной оценки параметров, характеризующих процесс. Полагаясь на собственный опыт, стандартные рекомендации и интуицию, врачу бывает достаточно трудно выбрать оптимальное лечение.

Вторая глава посвящена описанию биомеханического подхода в ортодонтии. Внимание уделяется современной концепции здравоохранения «4П–медицина». Ее суть емко формулируется в четырех пунктах, начинающихся с буквы «П»:

- персонализация (индивидуальный подход к каждому пациенту);
- предсказательность (выявление предрасположенности к развитию данного заболевания);
- превентивность (предотвращение или снижение риска развития болезни);
- партнерство (активное участие самого пациента в процессе лечения).

Реализация данных положений может быть осуществлена с помощью развития биомеханического подхода к анализу живых систем и процессов (например Virtual Physiological Human).

Был проведен обзор литературы (1917–2015 г.г.) на предмет существующих биомеханических принципов, используемых в ортодонтии, среди которых особое внимание уделено понятию «центр сопротивления зуба». Для него сформулированы свойства, условия существования, в общем виде даны формулы для его нахождения [Osipenko et al., 1999].

Центром сопротивления зуба и периодонта, в который зуб погружен, называется точка, удовлетворяющая условиям:

а) если нагрузка приводится к паре сил с моментом равным главному моменту системы сил \vec{M} , то зуб поворачивается вокруг центра сопротивления;

б) если нагрузка приводится к равнодействующей внешних сил \vec{R} , линия действия которой проходит через центр сопротивления, то зуб перемещается поступательно (рис. 2).

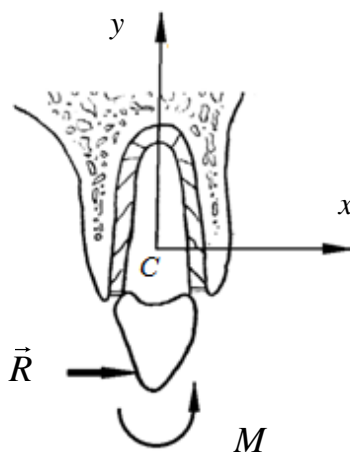


Рис. 2. Схематичное изображение системы «зуб–периодонт», где C – центр сопротивления

Неудобство использования понятия «центр сопротивления» состоит в том, что он существует не всегда, а лишь при наличии у системы «зуб–периодонт» элементов симметрии (плоскости симметрии или оси симметрии). Однако ясно, что данное условие соответствует скорее некоторой идеализации, нежели отражает реальную природу. В общем случае центр сопротивления не существует.

В связи с вышеописанными положениями в настоящей работе сформулирована необходимость введения нового, более универсального объекта, задаваемого общим определением, который бы существовал в большем количестве случаев и сохранял основные свойства центра сопротивления.

Построена биомеханическая модель движения зуба под действием ортодонтической нагрузки (на начальной стадии) (рис. 3). На примере однокоренного зуба рассматривается малое (мгновенное) перемещение зуба в рамках костной лунки (без учета перестройки костной ткани) под действием системы сил, создаваемой корректирующим аппаратом. Зуб принимается за абсолютно твердое тело, так как его модуль Юнга приблизительно в 30000 раз больше, чем модуль Юнга периодонта. Сам периодонт принимается линейно-упругой средой. Кость в данную модель не входит, а учитывается лишь таким образом, что исключаются перемещения по внешней границе периодонта.

Считается, что ортодонтические силы малы и действуют достаточно долго (более 10–20 секунд), чтобы процессы перераспределения периодонтальной жидкости прекратились.

\vec{R}, \vec{M} – вектор-столбцы, которые содержат компоненты главного вектора и главного момента системы внешних сил относительно полюса соответственно; $\vec{\varphi}$ – вектор-столбец компонент малого поворота вокруг полюса; $\vec{\rho}$ – вектор-столбец компонент перемещения полюса.

Ввиду линейной упругости рассматриваемой системы, связь между перемещениями и силами описывается следующими соотношениями

$$\begin{pmatrix} \vec{\rho} \\ \vec{\varphi} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \hat{\alpha} & \hat{\gamma} \\ \hat{\gamma}^T & \hat{\beta} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \vec{R} \\ \vec{M} \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где матрицы $\hat{\alpha}, \hat{\beta}, \hat{\gamma}$ характеризуют свойства податливости периодонта.

При постановке краевой задачи считаем, что область обозначена как V , ее граница S , их объединение: $\bar{V} = V \cup S$. Уравнения, описывающие поведение упругой среды, следующие

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{\sigma} = 0, \quad \vec{x} \in V, \quad (2)$$

$$\vec{\sigma} = \tilde{C} \cdot \tilde{\varepsilon}, \quad \vec{x} \in \bar{V}, \quad (3)$$

$$\tilde{\varepsilon} = \frac{1}{2} (\vec{\nabla} \vec{u} + \vec{\nabla} \vec{u}^T), \quad \vec{x} \in \bar{V}. \quad (4)$$

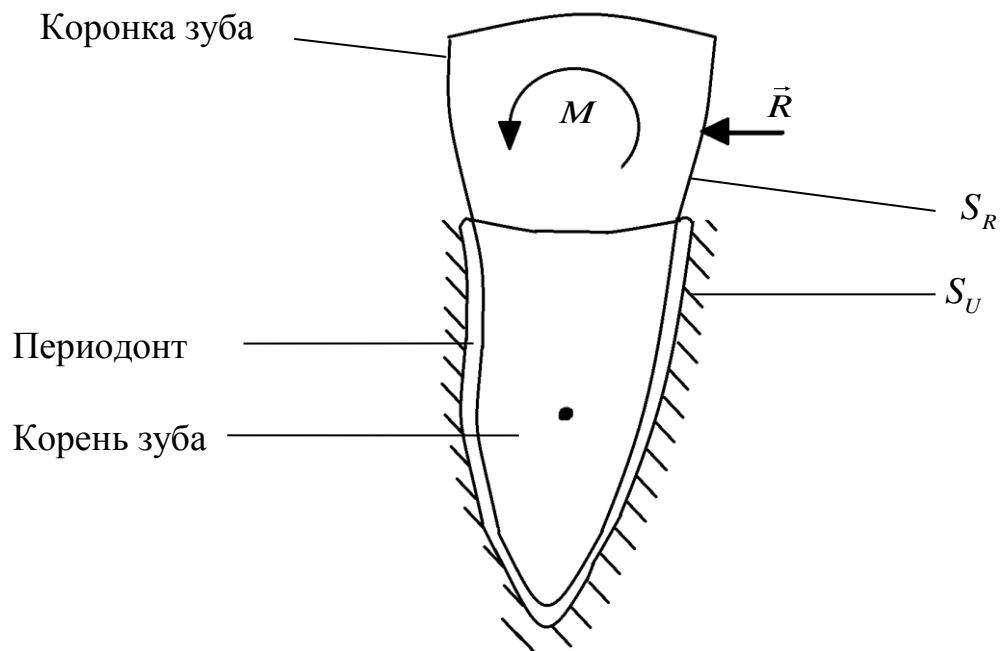


Рис. 3. Схема модели системы «зуб–периодонт»

Граничные условия:

1. Система ортодонтических сил осуществляется благодаря корректирующей конструкции, которая может быть прикреплена к коронке зуба $\vec{R}|_{S_R} = \vec{R}, \vec{M}|_{S_R} = \vec{M}$.
2. Внешняя граница периодонта считается закрепленной (данное условие моделирует соединение с костью): $\vec{u}|_{S_U} = 0$ (см. рис. 3).

В третьей главе введено новое понятие «область сопротивления зуба». Для удобства дальнейшего повествования даны вспомогательные термины. *Прямая поступательного воздействия* – линия действия силы, заставляющей зуб перемещаться поступательно (рис. 4.1). *Ось поворота парой* – прямая, вокруг которой поворачивается зуб под действием пары сил (рис. 4.2).

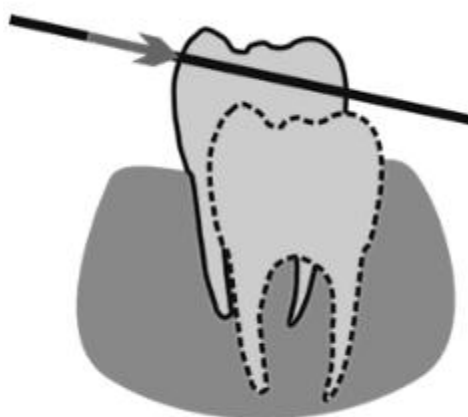


Рис. 4.1. Изображение прямой поступательного воздействия

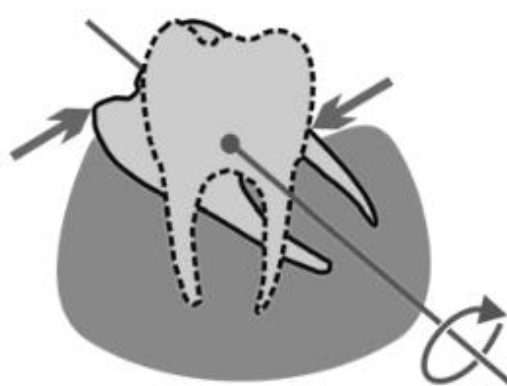


Рис. 4.2. Изображение оси поворота парой

Согласно условиям существования центра сопротивления матрица $\hat{\gamma}\hat{\beta}^{-1}$ должна быть антисимметрична. Тогда все прямые поступательного воздействия и оси поворота парой пересекаются в этой точке. На практике данное условие реализуется при наличии у системы «зуб–периодонт» элементов симметрии (плоскости или оси симметрии).

Введем следующие обозначения: $\hat{\delta}$ – симметричная часть матрицы $\hat{\gamma}\hat{\beta}^{-1}$; $\hat{\epsilon}$ – антисимметричная часть матрицы $\hat{\gamma}\hat{\beta}^{-1}$; $\vec{\epsilon}$ – вектор, соответствующий матрице $\hat{\epsilon}$ ($\hat{\epsilon}\vec{V} = \vec{\epsilon} \times \vec{V}$ для любого вектора \vec{V}). Тогда справедливо следующее утверждение: центр сопротивления существует, если и только если $\hat{\delta} = 0$, а его координатами являются компоненты вектора $\vec{\epsilon}$.

В общем случае при $\hat{\delta} \neq 0$ (т.е. $\hat{\gamma}\hat{\beta}^{-1}$ не антисимметрична) центра сопротивления не существует. Например, когда рассматриваемая модель системы «зуб–периодонт» приближена к реальной форме аналога. В данном случае прямые поступательного воздействия и оси поворота парой не будут пересекаться в одной точке, а будут расположены некоторым образом.

Поэтому естественно предложить новое понятие, обобщающее «центр сопротивления» и которое будет зависеть от набора прямых поступательного воздействия и осей поворота парой.

В настоящей диссертации подобное понятие введено – «область сопротивления зуба». Область сопротивления зуба – набор точек, имеющий следующие свойства:

а) всякая прямая поступательного воздействия проходит через эту область, и через всякую точку этой области проходит прямая поступательного воздействия;

б) всякая ось поворота парой проходит через эту область, и через всякую точку этой области проходит ось поворота парой.

Анализируя соотношения (1) между системой сил и перемещениями, введена теоретическая классификация видов области сопротивления. Полученные результаты коррелируют с результатами, публикуемыми другими авторами [Geiger, 2013; Burstone et al., 2014; Босьяков и др., 2015].

В четвертой главе описана разработка методики применения развитой теории области сопротивления в частных случаях. Одним из шагов является определение компонентов матриц $\hat{\alpha}$, $\hat{\beta}$, $\hat{\gamma}$ (характеризующих свойства податливости периодонтальной связки). С помощью полученных значений могут быть определены положение и вид области сопротивления зуба.

Для получения аналитического решения, упругая среда (периодонт) рассматривается как набор пружин (рис. 5), ориентированных в пространстве подобно расположению пучков коллагеновых волокон периодонта и имеющих одинаковую жесткость на растяжение/сжатие.

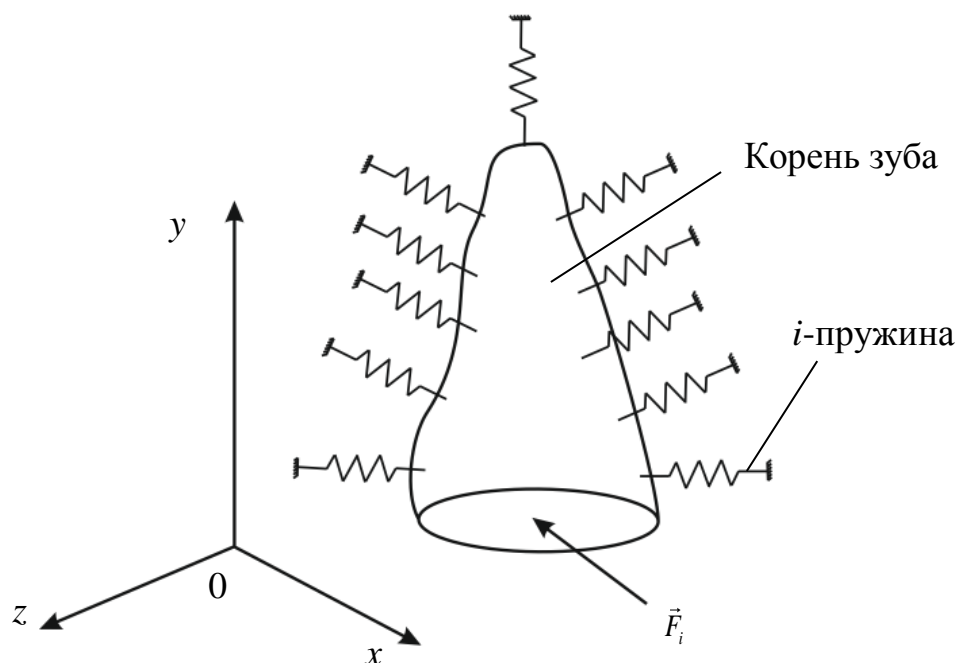


Рис. 5. Схематичное изображение тела, погруженного в упругую среду (набор пружин)

С помощью вариационного принципа возможных перемещений, который заключается в том, что сумма виртуальных работ внешних сил равна сумме виртуальных работ напряжений $\sum \delta A^e = \sum \delta A_\sigma$ определяются компоненты матрицы системы (1) $\hat{\alpha}$, $\hat{\beta}$, $\hat{\gamma}$.

На следующем шаге разработанный алгоритм был запрограммирован в программе *Matlab*. Был проведен ряд численных экспериментов по нахождению прямых поступательного воздействия и осей поворота парой в зависимости от параметров модели (геометрия, механические свойства). Их наборы определили различные виды области сопротивления, согласующиеся с теоретической классификацией, введенной в третьей главе.

Далее был проведен натурный эксперимент в целях верификации рассматриваемых положений. На рис. 6 представлены модель кости (1), модель корня зуба (2), модель периодонта (3). Чтобы удовлетворить целям эксперимента, достаточно качественного наблюдения, т.е. геометрическая форма корня зуба не имела значения. Коронка в модели зуба не учитывается, так как важна лишь его погруженная в периодонт часть (корень зуба). Для упрощения в плоской постановке выбрана прямоугольная форма модели корня зуба. Модель периодонта осуществлена набором пружин одинаковой жесткости.

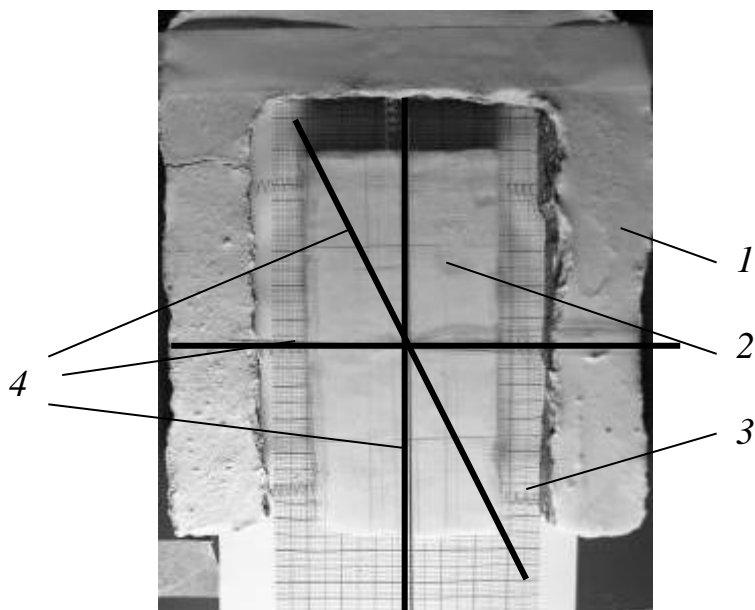


Рис. 6. Экспериментальная модель системы «зуб–периодонт–кость» в плоской постановке: 1 – модель кости, 2 – модель корня зуба, 3 – модель периодонта, 4 – прямые поступательного воздействия

Ход эксперимента: из определения центра сопротивления следует, что все прямые поступательного воздействия пересекаются в одной точке. Таким образом, к разным точкам зуба прикладывались силы в различных направлениях. Далее производилась съемка положения зуба до и после приложения нагрузки. Сравнивая снимки путем наложения друг на друга,

оценивался вид движения, совершаемый зубом. Если при приложении силы, зуб совершал поступательное движение, то ее линия действия фиксировалась и изображалась на рисунке (рис. 6). В плоской постановке при выявлении набора таких прямых поступательного воздействия была найдена точка их пересечения. Это соответствует понятию «центр сопротивления в плоскости».

Аналогичным образом был осуществлен натурный эксперимент в трехмерной постановке, в ходе которого было определено положение и вид области сопротивления, присущего данной модели. В данном случае центра сопротивления не существует, а полученный результат соответствует теоретической классификации видов области сопротивления введенной ранее.

В пятой главе приводится постановка задачи управления перемещением зуба на начальной стадии ортодонтического лечения.

Рассматривается типичная ситуация, когда пациент с зубочелюстной аномалией обращается к врачу для ее исправления. На начальном этапе планирования лечения задачами ортодонта являются определение вида зубочелюстной аномалии, механизма ее формирования, возможности организма к росту. Далее врач планирует, в каком положении должны быть расположены зубы, чтобы сформировать «правильный прикус».

Приступая к осуществлению плана лечения, встают следующие вопросы: как зубы переместить в это желаемое положение, т.е. «куда и как необходимо приложить нагрузку к зубу?», «какая нагрузка будет оптимальной?». Под оптимальной в данном случае понимается максимальная нагрузка, не приводящая к перенапряженности тканей, окружающих зуб.

Таким образом, для исследования начальной стадии перемещения зуба используется разработанный подход на основе понятий «центра/области сопротивления зуба».

Допустимые уровни перемещения зуба: при поступательном движении $h = 0,07$ мм; допустимый угол поворота зуба $\mu = 2^\circ$.

Вводится критерий оптимизации в соответствии со следующей формулировкой: разница между запланированным начальным перемещением зуба $\vec{u}^*(\vec{r})$ и рассчитываемым $\vec{u}(\vec{r})$ должна быть минимальна:

$$\Phi = \int [\vec{u}^*(\vec{r}) - \vec{u}(\vec{r})]^2 dV \rightarrow \min, \quad \vec{r} \in V, \quad (5)$$

$$\vec{u}^*(\vec{r}) = \vec{\rho}^* + \vec{\varphi}^* \times \vec{r}, \quad \vec{r} \in V, \quad (6)$$

$$\vec{u}(\vec{r}) = \vec{\rho} + \vec{\varphi} \times \vec{r}, \quad \vec{r} \in V, \quad (7)$$

где V – область, занимаемая корнем зуба; $\vec{\rho}^*$ – вектор запланированного перемещения полюса, $\vec{\rho}^* = \{x^*, y^*, z^*\}^T$; $\vec{\varphi}^*$ – вектор запланированного малого угла поворота зуба вокруг полюса, $\vec{\varphi}^* = \{\varphi_x^*, \varphi_y^*, \varphi_z^*\}^T$; $\vec{\rho}$ – вектор

рассчитываемого перемещения полюса, $\vec{\rho} = \{x, y, z\}^T$; $\vec{\varphi}^*$ – вектор рассчитываемого малого угла поворота зуба вокруг полюса, $\vec{\varphi} = \{\varphi_x, \varphi_y, \varphi_z\}^T$.

На величину оптимальной нагрузки накладываются такие ограничения, чтобы напряжения в периодонте σ_i , возникающие в результате действия данной системы сил, не превышали кровяного давления в капиллярах периодонта σ_i^{don}

$$\sigma_i < \sigma_i^{don}, \quad \forall \vec{r}. \quad (8)$$

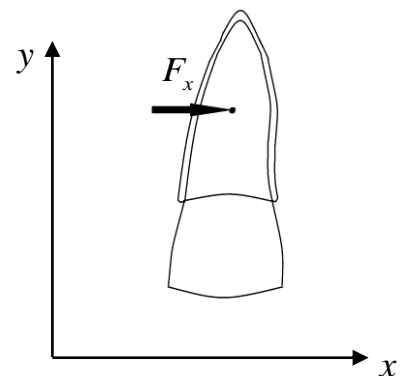
Решение данной задачи было проведено на трех примерах, соответствующих клиническим случаям: устранение диастемы, исправление экстррузии зуба, исправление конвергенции зубов. В результате получены значения равнодействующей ортодонтической нагрузки и момента пары сил, необходимых для запланированного перемещения в рамках костной лунки.

Решение задачи на примере исправления диастемы

Диастема – это зубочелюстная аномалия, при которой имеется промежуток между двумя первыми верхними резцами (рис. 7, а). Исправление достигается путем поступательного смещения резцов друг к другу (вдоль оси x). Для обеспечения подобного перемещения необходимо, чтобы линия действия равнодействующей ортодонтической нагрузки проходила через центр/область сопротивления, т.е. соответствовала прямой поступательного воздействия (рис. 7, б). Положение и вид области сопротивления рассчитывается по разработанной методике.



а



б

Рис. 7. Диастема: а – изображение аномалии; б – схема

Учитывая, что формулы (6), (7) в данном случае принимают вид $u^*(r) = \rho^* = x^*$ и $u(r) = \rho = \alpha_{11} F_x$ соответственно, то после подстановки их в (5) целевая функция принимает вид

$$\Phi = \int [x^* - \alpha_{11} F_x]^2 dV \rightarrow \min.$$

При подстановке индивидуальных значений толщины $x^* = h = 0,07$ мм и соответствующего рассматриваемому перемещению вдоль оси x коэффициента податливости периодонта $\alpha_{11} = 0,053$ мм/Н (который определяется по разработанному в главе 4 алгоритму) величина силы получается равной $F_x = 1,3$ Н, $F_y = 0$, $M = 0$.

Далее в программе, реализующей метод конечных элементов (ANSYS), проверяется условие (8). Моделируется система «зуб–периодонт» и прикладывается рассчитанная нагрузка в той же точке и направлении (рис. 8). Получаемые значения интенсивности напряжений в периодонте σ_i не должны превышать допустимого значения (т.е. кровяного давления в капиллярах периодонта σ_i^{don}). В противном случае нагрузка должна быть уменьшена во столько раз, во сколько полученные напряжения превышают допустимые (в виду линейности задачи).

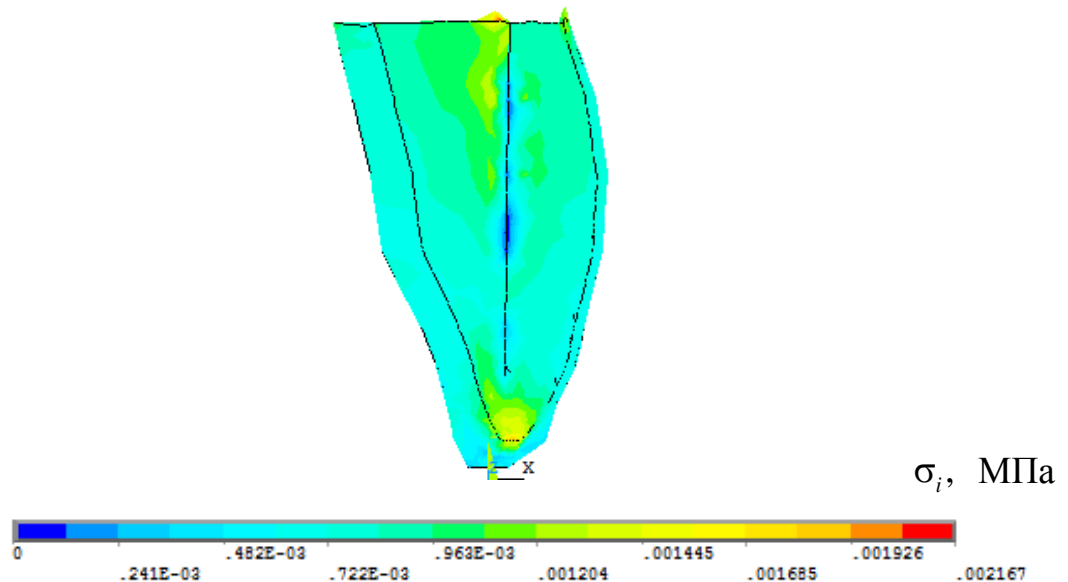


Рис. 8. Поле интенсивности напряжений в периодонте

Решение задачи на примере исправления экстрезии зуба

Рассматривается ситуация, когда зуб недостаточно погружен в альвеолярный отросток (экстрезия) (рис. 9, а). Необходимо его углубить в кость, поступательно перемещая вдоль продольной оси (ось y), избежав поворота (рис. 9, б). Для этого линия действия равнодействующей системы сил должна проходить через центр/область сопротивления.

Учитывая, что формулы (6), (7) в данном случае принимают вид $u^*(r) = \rho^* = y^*$ и $u(r) = \rho = \alpha_{22}F_y$ соответственно, то после подстановки их в (5) целевая функция принимает вид

$$\Phi = \int [y^* - \alpha_{22}F_y]^2 dV \rightarrow \min.$$

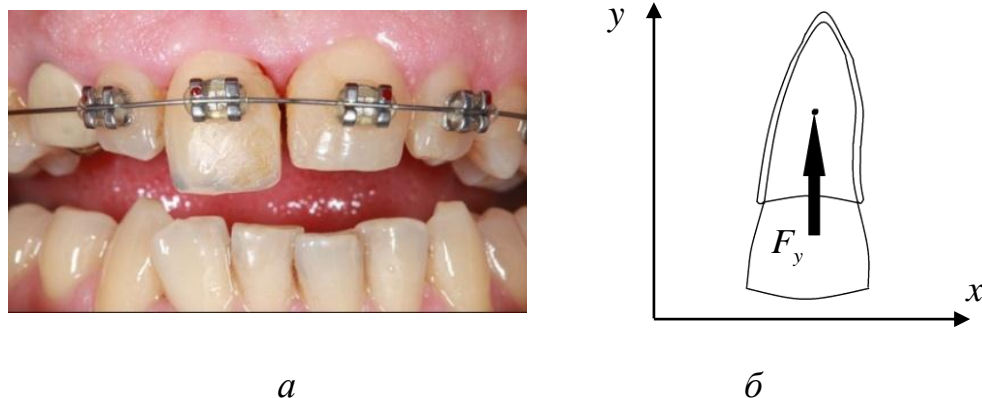


Рис. 9. Экструзия зуба: *a* – изображение аномалии; *б* – схема

При подстановке индивидуальных значений толщины $y^* = h = 0,07$ мм и, соответствующего рассматриваемому перемещению вдоль оси y , коэффициента податливости периодонта $\alpha_{22} = 0,148$ мм/Н (который определяется по разработанному в главе 4 алгоритму) величина силы получается равной $F_y = 0,47$ Н, $F_x = 0$, $M = 0$.

Далее в программе, реализующей метод конечных элементов (ANSYS), проверяется условие (8) (рис. 10).

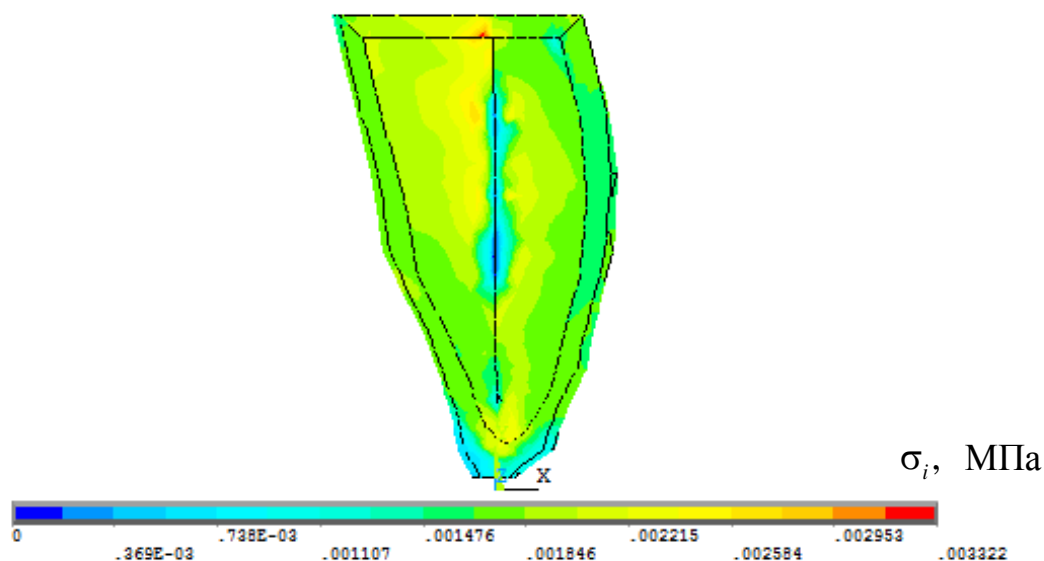


Рис. 10. Поле интенсивности напряжений в периодонте

Решение задачи на примере исправления конвергенции зубов

Еще одна частая зубочелюстная аномалия – наклон зуба (в результате неправильно сформировавшегося прикуса, травмы, проявления синдрома Попова–Годдона), т.е. конвергенции зубов (рис. 11, *a*). Для ее исправления осуществляется поворот зуба. Пользуясь свойствами центра/области сопротивления, этот тип движения может быть обеспечен путем приложения

пары сил. Таким образом тело будет совершать вращение вокруг оси поворота (рис. 11, б).

Учитывая, что формулы (6), (7) в данном случае принимают вид $u^*(r) = \varphi^* r$ и $u(r) = \varphi r = \beta_{33} M r$, соответственно, то после подстановки их в (5) целевая функция принимает вид

$$\Phi = \int [(\varphi^* - \beta_{33} M) r]^2 dV \rightarrow \min.$$

При подстановке индивидуальных значений поворота зуба $\varphi_z^* = \mu = 0,035$ рад и соответствующего рассматриваемому повороту в плоскости xu коэффициента податливости периодонта $\beta_{33} = 0,0786$ рад/Н·см (который определяется по разработанному в главе 4 алгоритму) величина момента пары сил получается равной $M = 0,44$ Н·см, $F_x = F_y = 0$.

Далее в программе, реализующей метод конечных элементов (ANSYS), проверяется условие (8) (рис. 12)

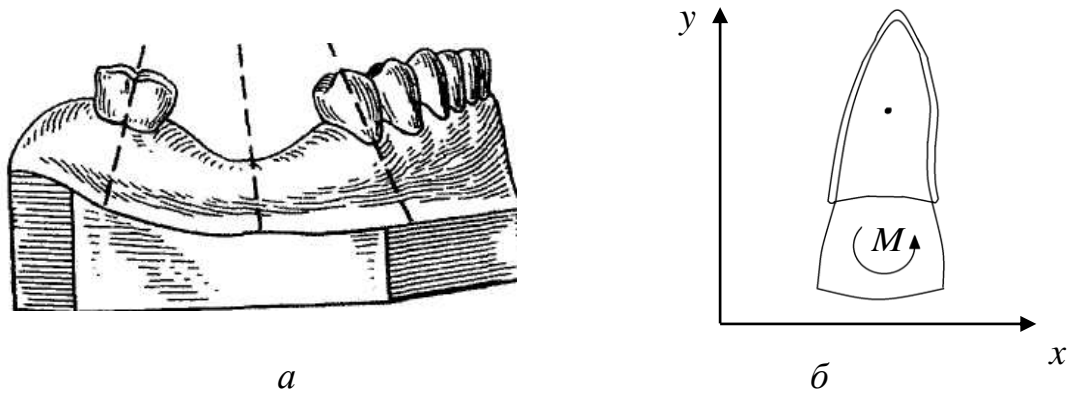


Рис. 11. Конвергенция зубов: а – изображение аномалии; б – схема

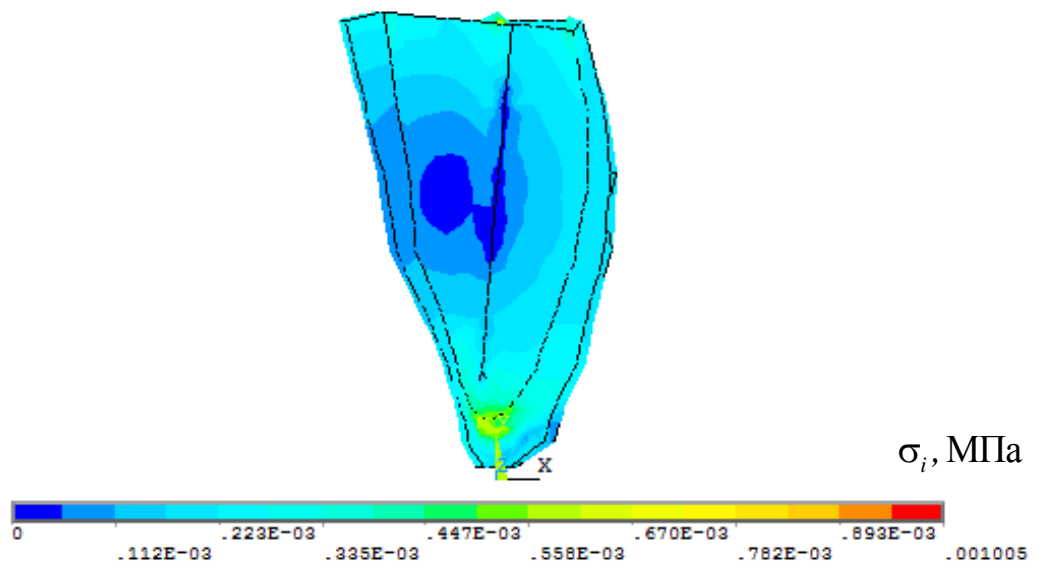


Рис. 12. Поле интенсивности напряжений в периодонте

Заключение

1. Анализ литературных источников позволил сформулировать идею необходимости разработки биомеханического сопровождения ортодонтического лечения зубочелюстных аномалий. Данная работа является шагом в направлении развития этой идеи, а именно исследована начальная стадия движения зуба (в рамках костной лунки), на которой существует опасность перегрузки окружающих его тканей.

2. Введено новое фундаментальное понятие «область сопротивления зуба», классификация ее видов, изучены свойства нового понятия, создана методика определения вида и положения области сопротивления в зависимости от геометрических и механических параметров системы «зуб–периодонт». На основе этого нового понятия разработана биомеханическая модель движения зуба.

3. Верификация разработанной модели на основании проведенного натурального эксперимента, сравнение с результатами работ других авторов и анализа клинических данных позволяют судить о ее достоверности.

4. Осуществлена постановка задачи определения оптимальной системы сил, пользуясь понятиями «центра/области сопротивления». Сформулирован критерий оптимизации и получено решение на трех примерах, соответствующих случаям из клинической практики.

5. Разработанный подход, методика и программная реализация биомеханического моделирования процесса перемещения зуба на основе «центра/области сопротивления» позволяют объективизировать эмпирические методы ортодонтии, а именно теоретически обосновать выбор оптимального варианта приложения ортодонтической нагрузки с количественной оценкой ее величины с учетом формы, положения, топографии зуба. Это необходимо для контролируемого перемещения зубов и возможности прогнозирования результатов лечения, избежания нежелательных эффектов.

6. Практическая ценность диссертации подтверждена актом внедрения разработанной методики в практику подготовки специалистов Пермского государственного медицинского университета (специальность «Ортопедическая стоматология»).

Список работ, отражающих основное содержание диссертации

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Осипенко М.А., Няшин Ю.И., Няшин М.Ю., Дубинин А.Л. Область сопротивления зуба: определения и свойства // Российский журнал биомеханики. – 2013. – Т. 17, № 2. – С. 31–38.

2. Дубинин А.Л., Няшин Ю.И., Осипенко М.А. Анализ развития понятия «центр сопротивления зуба» // Российский журнал биомеханики. – 2014. – Т. 18, № 4. – С. 452–470.

3. Дубинин А.Л. Область сопротивления зуба: экспериментальное определение // Российский журнал биомеханики. – 2015. – Т. 19, № 1. – С. 79–89.

4. Nyashin Y., Nyashin M., Osipenko M., Lokhov V., Dubinin A., Rammerstorfer F., Zhurov A. Centre of resistance and centre of rotation of a tooth: experimental determination, computer simulation and the effect of tissue nonlinearity // Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering. – 2016. – Vol. 3. – P. 229–239.

5. Дубинин А.Л., Няшин Ю.И., Осипенко М.А., Еловицова А.Н., Няшин М.Ю. Оптимизация ортодонтического перемещения зубов // Российский журнал биомеханики. – 2016. – Т. 20, № 1. – С. 37–47.

Тезисы и статьи в сборниках трудов и материалах научных конференций

1. Дубинин А.Л., Осипенко М.А., Няшин Ю.И., Туктамышев В.С. Понятие центра сопротивления и области сопротивления зуба // Математическое моделирование в естественных науках. – Пермь, 2014. – С. 91–93.

2. Дубинин А.Л., Няшин Ю.И., Осипенко М.А., Туктамышев В.С. Исследование ортодонтического перемещения зубов с помощью понятия «центр сопротивления зуба» // Прикладная математика, механика и процессы управления. – Пермь, 2014, – С. 29–31.

3. Дубинин А.Л., Няшин Ю.И., Осипенко М.А., Туктамышев В.С. Ортодонтическое перемещение зубов. Понятие центра сопротивления и области сопротивления зуба // XI Всероссийская конференция с международным участием и школа-семинар по биомеханике «Биомеханика – 2014». – Пермь, 2014. – Т. 1. – С. 35.

4. Дубинин А.Л. Обобщение понятия центр сопротивления зуба // Материалы XI Всероссийского съезда по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики. – Казань, 2015. – С. 1232–1234.

5. Dubinin A.L., Nyashin Y.I., Osipenko M.A. Development of the biomechanical approach to tooth movement under the orthodontic treatment // Abstract Book of Russian Conference with International Participation in Memory of Professor Vladimir S. Markhasin "Experimental and Computational Biomedicine" dedicated to corresponding member of RAS V.S. Markhasin. – Yekaterinburg, 2016. – P. 31.

6. Няшин Ю.И., Осипенко М.А., Дубинин А.Л. Оптимизация начального перемещения зубов с помощью понятия «центр сопротивления зуба» // Актуальные вопросы машиноведения. Сборник научных трудов. – 2016. – Выпуск 5. – С. 314–317.

7. Дубинин А.Л., Няшин Ю.И., Осипенко М.А. Биомеханическое управление начальным перемещением зубов при лечении зубочелюстных аномалий // XII Всероссийская конференция с международным участием и школа-семинар по биомеханике «Биомеханика – 2016». – Пермь, 2016. – С. 41.

Прочие издания

1. Dubinin A.L., Nyashin Y.I., Osipenko M.A. Development of biomechanical theory of tooth movement at orthodontical treatment // Series of Biomechanics. – 2016. – Vol. 30, No. 1. – P. 48–56.

2. Дубинин А.Л., Няшин Ю.И., Еловицова А.Н., Осипенко М.А., Няшин М.Ю. Понятия центра и области сопротивления зуба: биомеханические принципы в ортодонтии // Ортодонтия. – 2016. – № 1. – С. 27–33.