

УДК 62-408.7:62-531.6:62-512

## Математическое моделирование в зубопротезировании

Гаврюшин Сергей Сергеевич

gss@bmstu.ru

Полякова Татьяна Викторовна

tpolyakova@bmstu.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

*Современная стоматологическая система в рамках концепции Индустрии 4.0 представляет собой сложный набор множества технологических инструментов, приложений и целых научных областей. К ним относятся традиционное компьютерное 3D-проектирование, подразделения моделирования CAD/CAM/CAE, а также системы с открытым исходным кодом, связанные с моделированием зубных протезов, имплантатов, коронок, мостов и многого другого. В работе описаны постановка задачи и основные подходы к моделированию несъемных временных зубных протезов при проблемах конвергенции зубов, временной имплантации, а также рассмотрены протезы «сэндвич». Получены и проанализированы картины полей напряжений и деформаций в конструкциях, позволяющие обосновать концепцию принятия решения врачом-стоматологом по выбору вариантов ортопедического лечения с учетом индивидуальных особенностей строения зубочелюстной системы.*

**Ключевые слова:** МКЭ, КЭМ, протезирование, временный имплантат, Индустрия 4.0 в стоматологии

**Введение.** Современный этап развития САПР характеризуется динамичным расширением предметных областей их применения. В проблеме дальнейшего развития автоматизированного проектирования существенную роль играет создание новых проблемно-ориентированных систем сложных объектов (CAS) заданного целевого направления, в частности, востребованной областью приложения автоматизированного проектирования является решение задачи выбора стоматологического лечения пациента с учетом индивидуальных особенностей состояния зубочелюстной системы.

Цель работы — разработка математических моделей, алгоритмов и методов построения элементов проектирования биомеханических конструкций, обеспечивающих повышение эффективности стоматологического лечения.

Научная новизна состоит в разработке методов проектирования, алгоритмов и комплексного подхода при численном моделировании в протезировании в рамках концепции Индустрии 4.0 [1–3], позволяющем с использованием современных систем CAD/CAM/CAE, программ с открытым исходным кодом и написанного специализированного ПО провести трехмерное моделирование биомеханической конструкции от начального этапа обработки КТ-снимков, подготовки геометрической модели, МКЭ-анализа, до обработки данных КЭ-расчета с визуализацией данных расчета на трехмерной модели, а также применение аддитивных технологий на финальном этапе работы с моделью.

**Материалы и методы.** На первом этапе проектирования, в рамках предварительного биомеханического анализа [4, 5] мы строим упрощенную, каноническую модель, по которой можно выбрать рациональный вариант конструкции для исследования НДС в рамках глубокого механического анализа модели по данным томографического снимка [5]. На этом этапе мы работаем с гибридными моделями. Наконец, на финальном этапе оценки данных расчетов, например, в задачах оптимизации, нужно подготовить динамическую модель, идентичную гибридной.

Как правило, мы имеем множество контрольных точек в пространстве, по которым можно построить триангуляцию. Поверхность границы областей в общем случае определяется неявно заданной функцией. Для нее может быть получена триангуляция, сгенерированная одним из ячеечных методов. По оптимизированной триангуляции замкнутой однородной оболочки строится NURBS-поверхность для каждого тела. Затем создается сборочная единица, которая описывается множеством вставок и множеством отдельных тел.

В процессе получения оболочечной геометрии есть необходимые требования к качеству поверхностных сеток. Сетка должна быть максимально схожей с исходными данными изображения компьютерной томограммы. Необходимо оценивать погрешности отклонения геометрии по поверхности и объему по сравнению с исходными данными томограммы. При генерации объемной сетки нужно оценить отклонение полученного на заданной сетке решения от точного решения задачи, т.е. отклонение тетраэдров в глобальной системе координат от идеального единичного тетраэдра в параметрической системе координат. Оценить эту характеристику позволяют вводимые критерии качества объемной сетки.

Наконец, оценить работоспособность и качество построенной конструкции можно по критериям прочности теории разрушения Шлейхера — Надаи, критерию Мора — Кулона или Губера — Мизеса.

**Геометрическое моделирование несъемных временных зубных протезов-прототипов.** Зачастую при восстановлении дефекта зубного ряда зубы имеют определенный наклон в сторону дефекта в челюсти, и предлагаемая методика препарирования делает возможным сохранить часть коронки зуба, не проводя депульпирования, в виде препарирования культи зуба под особым углом. В работе проведено сравнение функционального нагружения классического протеза с вертикальной фиксацией коронки с конструкцией с горизонтальным способом фиксации. Рассчитаны основные типы нагружения для конструкции и максимальные выдерживаемые протезом нагрузки.

**Исследование покрывного протеза «сэндвич»: интерактивное отображение полигональной трехмерной модели и расчет НДС конструкции.** Для разработки виртуальной модели покрывного протеза нами был применен пакет Blender и технология WebGL. Расчеты напряженно-деформированного состояния конструкции были выполнены в среде прикладного программного конечно-элементного комплекса ANSYS Ansys Mechanical APDL. Отдельно оценены напряжения в десне (рис. 1).

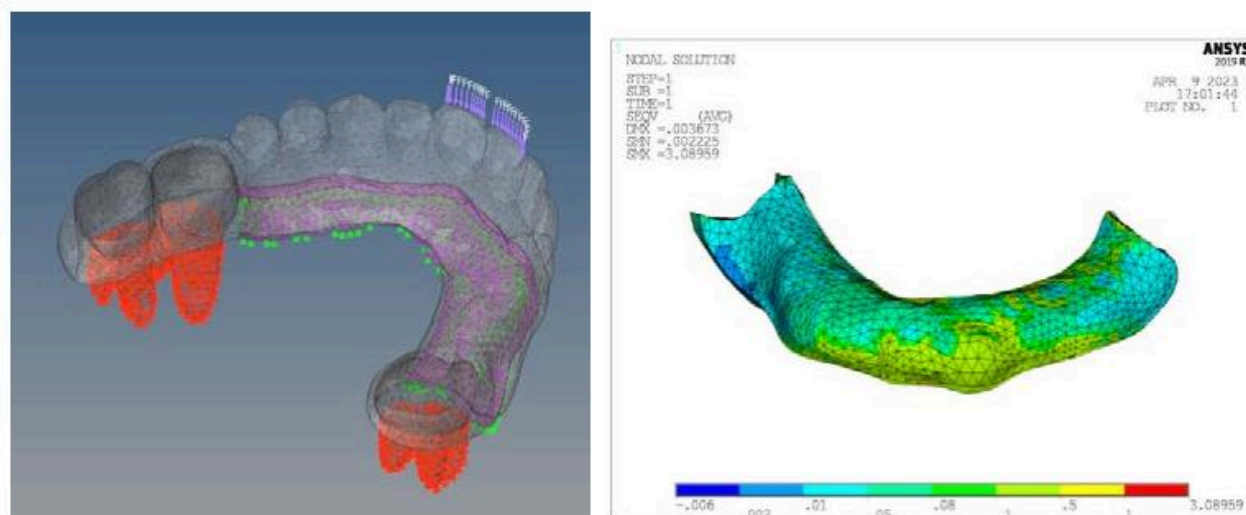


Рис. 1. Задание граничных условий и поля напряжений по Мизесу в десне

### Моделирование установки временных внутрикостных имплантатов.

Было рассмотрено две модели мостовидных протезов для концевых дефекта зубного ряда: временный мостовидный протез, имеющий ножки, и случай, когда временный мостовидный протез из полимерного материала опирается на «десневую маску» — специального вида покрывной протез, изготовленный под определенный тип расстановки имплантатов (рис. 2).

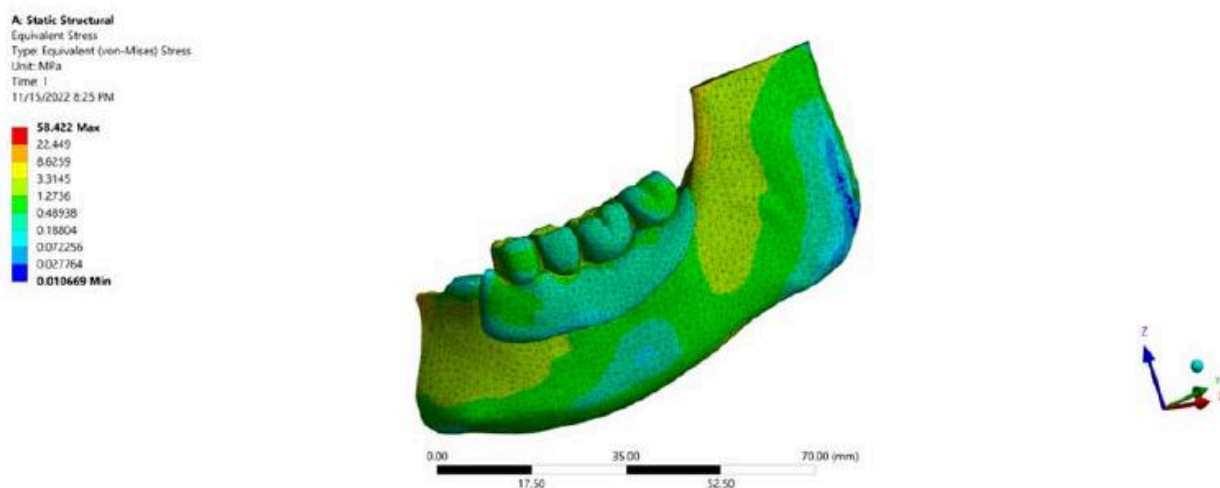


Рис. 2. Эквивалентные напряжения по Мизесу

Для возможности оптимизации конструкции рассматривается упрощенная параметрическая модель с использованием мультиагентного подхода. Для части конструкции — временного имплантата, зафиксированного в челюсти, была написана программа на языке Python, позволяющая оценить НДС конструкции, основные нагрузки на имплантат, а также задать точное позиционирование имплантата в челюсти.

**Заключение.** В рамках работы были созданы математические модели протезов, разработаны алгоритмы принятия решения по выбору вариантов ортопедического лечения с учетом индивидуальных особенностей строения костных тканей зубочелюстного сегмента нижней челюсти и планируемой конфигурацией искусственных включений.

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] Dovramadjiev T. Advanced creating of 3d dental models in blender software. International Scientific Journal Machines. Technologies. Materials, 2016, vol. 10 (12), pp. 24–25.
- [2] Mrugalska B., Dovramadjiev T., Pavlova D., Filchev R., Stoeva M., Bozhikova V., Dimova R. Open source systems and 3D computer design applicable in the dental medical engineering Industry 4.0 — sustainable concept. Procedia Manufacturing, 2021, vol. 54, pp. 296–301.
- [3] Blenderfordental (B4D). Dental CAD Plugins for Blender Software. URL: <https://www.blenderfordental.com/> (accessed October 24, 2024).
- [4] Шварц А.Д. *Основные принципы конструирования цельнолитых бюгельных зубных протезов*. Автореф. дис. ... канд. мед. наук. Москва, 1968, 16 с.
- [5] Чуйко А.Н., Угрин М.М., Левандовский Р.А., Калиновский Д.К., Алымбаев Р.С. *Биомеханика и компьютерные технологии в челюстно-лицевой ортопедии и дентальной имплантологии*. Льво, ГалДент, 2014, 350 с.

## Mathematical modeling in dental prosthetics

Gavriushin Sergei S.

gss@bmstu.ru

Poliakova Tatiana V.

tpolyakova@bmstu.ru

BMSTU, Moscow, Russia

The modern dental system within the framework of the Industry 4.0 concept is a complex set of many technological tools, applications and entire scientific fields. These include traditional 3D computer aided design, CAD/CAM/CAE modeling divisions, as well as open source systems related to the modeling of dentures, implants, crowns, bridges and more. The paper describes the formulation of the problem and the main approaches to modeling fixed temporary dentures for problems of tooth convergence, temporary implantation, and also considers “sandwich” dentures. Pictures of stress and deformation fields in structures were obtained and analyzed, allowing one to substantiate the concept of decision-making by a dentist regarding the choice of orthopedic treatment options, taking into account the individual characteristics of the structure of the dental system.

**Keywords:** FEM, prosthetics, temporary denture, transitional implant, Industry 4.0 in dentistry