



УДК 004.925.8:616.31

А. Г. СМИРНОВ, науч. сотр.<sup>1</sup>, аспирант кафедры системной интеграции и менеджмента<sup>2</sup>

**ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ МАТЕМАТИЧЕСКОГО  
МОДЕЛИРОВАНИЯ, КОМПЬЮТЕРНОЙ ГРАФИКИ ДЛЯ ЗАДАЧ  
РАСЧЕТА ГЕОМЕТРИИ ОККЛЮЗИОННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ЗУБОВ**

<sup>1</sup>ООО «Институт компьютерного моделирования биологических объектов»

Россия, 195030, г. Санкт-Петербург, ул. Химиков, д. 26, лит. А. Тел.: (812) 291-04-67;

эл. почта: eport77@mail.ru

<sup>2</sup>ГОУ ВПО «Московский физико-технический институт (государственный университет)»

Россия, 141700, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский переулок, д. 9.

Тел.: (495) 408-45-54; факс: (495) 408-42-54; эл. почта: bugrova@mail.mipt.ru

*Ключевые слова:* математическое моделирование, вычислительный эксперимент, виртуальная модель, имитация.*Key words:* mathematical modeling, computing experiment, virtual model, imitation.

*Разработка систем виртуальной имитации биомеханики биологических объектов является перспективным направлением в развитии лечебно-диагностических комплексов с применением технологии математического моделирования и вычислительного эксперимента. В представленной работе освещаются вопросы, связанные с разработкой виртуальной модели зубочелюстной системы в программно-аппаратном комплексе, реализующем возможности оптического сканирования.*

*System engineering of virtual imitation of biomechanics of biological objects is a perspective direction in development of medical-diagnostic complexes with application of technology of mathematical modeling and computing experiment. The article addresses issues connected with working out a virtual model of a dental-jaw system in a hardware-software complex, using optical scanning capabilities.*

Проблемой математического моделирования движений нижней челюсти, контактов между зубами при окклюзии и компьютерной визуализацией биомеханических процессов в зубочелюстной системе математики интересуются давно. В 1995 году в статье «Evaluation of human jaw articulation [computer animation]» [1] рассматривались аспекты структуры топологических изменений контактных полей, возникающих между зубами в динамике жевания (при окклюзии). Ряд других работ [2, 3] касается вопросов реализации численных методов и алгоритмов для задач трехмерной визуализации как отдельных элементов зубочелюстной системы, так и артикуляционных движений.

Для изучения перемещений нижней челюсти, контактов зубов в разные фазы жевательных движений применяют механические имитационные приборы – артикуляторы. Недостаточная объективность механических (аналоговых) приборов в части имитации динамических процессов в зубочелюстной системе [4] подводит к идее разработки цифровых имитационных комплексов для решения задач расчета на компьютере артикуляционных движений, окклюзии и планирования лечебных конструкций на виртуальной модели [5, 6].

Цель разработки комплекса виртуальной имитации зубочелюстной системы – повышение точности анализа окклюзии и артикуляции.

Основная задача – применение численных методов для решения проблемы проведения на виртуальной модели расчетов функциональных свойств зубочелюстной системы.

Поэтапные задачи:

– комплексное исследование научных, технических, фундаментальных и прикладных проблем, связанных с применением компьютерной технологии моделирования и вычислительного эксперимента для задач анализа окклюзии и артикуляции;

– реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде проблемно-ориентированной программы для проведения вычислительного эксперимента на виртуальной модели зубочелюстной системы.

Решение основной задачи подразумевает необходимость генерации виртуальной модели зубочелюстной системы. Методика компьютерной визуализации математически описана в преобразовании Фурье. Применительно к визуализации в общем виде оно интерпретируется так:

$$S(k) = \int dr\rho(r)\exp(ikr) ,$$

где  $k$  и  $r$  могут быть одно-, двух- или трехмерными; плотность  $\rho(r)$  характеризует изображение в реальном пространстве, а  $S(k)$  – в  $k$ -пространстве;  $k$  зависит от физических свойств, используемых в том или ином виде сканирования [7].

На первом этапе работ [8] было проведено комплексное исследование фундаментальных и прикладных проблем, связанных с применением компьютерной технологии моделирования и вычислительного эксперимента для задач анализа окклюзии и артикуляции.



Граничные точки окклюзии, зафиксированные на опытной гипсовой модели

На основе данных натурального эксперимента были определены биомеханические показатели и анатомо-топографические критерии, необходимые для расчета динамики нижней челюсти и зубов в зубоальвеолярной связке на виртуальной модели.

Успешно апробирован метод оптического сканирования. Тестировался лазерный 3D сканер, тип Konica Minolta VI-910, – точность измерения поверхностей по осям: от 0,10 до 0,22 мм.

**Процесс генерации виртуальной модели зубочелюстной системы в среде Occlusion Navigator**

Стадии генерации модели (моделирование)	Основные события	Компоненты среды Occlusion Navigator, участвующие в событии
Адаптация данных сканирования	Конвертация формата сканирования STL в индексированный формат	Подсистема адаптации данных сканирования
Пространственное позиционирование моделей челюстей	Ручная маркировка точек соответствия на сетке сканирования и на фототекстуре Вычисление проекционной матрицы методом ресекции Наложение фототекстуры на сетку сканирования Идентификация точек окклюзии на трехмерной модели Совмещение челюстей по точкам окклюзии в положении центральной окклюзии	Инструментарий пользовательского интерфейса Компонент пространственного позиционирования челюстей
Моделирование артикуляционного цикла	Расчет подводящих и отводящих движений н/ч по математической модели, описывающей траекторию по фигурам Posselt Расчет окклюзионных движений н/ч методом интерполяции между контрольными точками окклюзии Визуализация сцен артикуляционного цикла	Подсистема численного моделирования жевательных движений н/ч, реакций зубов на силы, прилагаемые при окклюзии  Графическая библиотека OpenGL
Моделирование артикуляционного цикла	ской модели, описывающей траекторию по фигурам Posselt Расчет окклюзионных движений н/ч методом интерполяции между контрольными точками окклюзии Визуализация сцен артикуляционного цикла	моделирования жевательных движений н/ч, реакций зубов на силы, прилагаемые при окклюзии  Графическая библиотека OpenGL
Моделирование ответных реакций зубов при окклюзии	Сегментация трехмерной сетки на потоки цифровых данных, соответствующие отдельным зубам  Расчет ответных реакций зубов по математической модели Шварца  Визуализация сцен экскурсий зубов	Компонент пространственного позиционирования челюстей  Подсистема численного моделирования жевательных движений н/ч, реакций зубов на силы, прилагаемые при окклюзии  Графическая библиотека OpenGL

Разработана модель зубочелюстной системы, позволяющая рассчитывать на компьютере как артикуляционные движения нижней челюсти, так и микроэкскурсии зубов при окклюзии.

На основе фигур Posselt [9] разработана модель артикуляционных и окклюзионных движений нижней челюсти.



На основе биомеханической концепции Шварца [10] разработана модель микроэкскурсий зубов при окклюзии.

Был разработан метод генерации виртуальной динамической модели зубочелюстной системы.

Суть метода заключается в переносе цифровой информации об определенных гнатологических положениях, фиксируемых оптическим сканером (цифровая камера) (см. рисунок) на трехмерную модель зубочелюстной системы пациента, полученную при помощи 3D лазерного сканера.

На практике это выглядит, как наложение (проецирование) фотографической текстуры на трехмерную модель объекта. Используя синтезированные таким образом данные, при помощи алгоритмов твердотельного моделирования можно рассчитать и визуализировать траекторию движений нижней челюсти при жевании, выявить контактные точки и поля на окклюзионных поверхностях зубов с учетом микроэкскурсий зубов [11].

Для реализации приведенного выше метода была разработана полезная модель «Программно-аппаратная система анализа окклюзии и артикуляции» (патент РФ № 80111).

На втором этапе решались вопросы реализации численных методов и алгоритмов в виде проблемно-ориентированной программы Occlusion Navigator для проведения вычислительного эксперимента на виртуальной модели зубочелюстной системы [12]. Программное обеспечение разрабатывалось в среде Microsoft Visual Studio 2008 на языке программирования C++/CLI с использованием функциональности .NET Framework 3.5. В качестве обеспечения базы данных применялся Microsoft SQL Server 2008. В таблице представлены основные действия при генерации виртуальной модели в среде Occlusion Navigator.

Виртуальная модель в Occlusion Navigator отличается тем, что рассчитывает артикуляционный цикл нижней челюсти и микроэкскурсии зубов в любой момент окклюзии.

Новизна подходов, реализованных в Occlusion Navigator, заключается в разработке оригинальных алгоритмов сегментации моделей челюстей и расчетов на виртуальной модели микроэкскурсий зубов при окклюзии.

Практическая ценность программно-аппаратного комплекса анализа окклюзии и артикуляции заключается в том, что создаются условия для проведения более точной диагностики стоматологической патологии.

Разработчики программно-аппаратного комплекса анализа окклюзии и артикуляции выражают благодарность за поддержку исследований ИФТИ и лично профессору С. В. Клименко.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Evaluation of human jaw articulation [computer animation] / T. L. Kunii, K. Myszkowski, O. Okunev, H. Nishida, Y. Shinagawa, M. Ibusuki // Proceedings Computer Animation. – 1995. – P. 163–167.
2. Gdkbay, U. A movable jaw model for the human face [Электронный ресурс] / U. Gdkbay // Journal Computers and Graphics. – 1997. – Vol. 21, № 5 (september). – Режим доступа : <http://portal.acm.org>.
3. Okubo, Y. The development of threedimensional analyzing system of occlusal tooth contacts / Y. Okubo // J. Japanese Prosthodont Soc. – 1992. – № 36 (1). – P. 53–63.



4. Применение в клинической практике артикуляторов ASA Dental, Hager Werken, SAM 3 - сравнительный анализ /А. П. Бобров [и др.] // Институт стоматологии. – 2008. – № 1 (38). – С. 126–127.
5. A virtual reality interface to an intelligent dental care system / J. Herder, K. Myszkowski, T. Kunii, M. Ibuski // Proceedings of the Medicine Meets Virtual Reality 4 : Health Care in the Information Age / H. Sieburg [and edit.]. – San Diego : IOS Press : Ohmsha, 1996.
6. Weingärtner, T. Dynamic simulation of the jaw and chewing muscles for maxillofacial surgery / T. Weingärtner, S. Haßfeld, R. Dillmann // Proceedings of the IEEE Nonrigid and Articulated Motion Workshop (NRAMW'97), June 1997. – Puerto Rico, 1997.
7. Мэнсфилд, П. Быстрая магнитно-резонансная томография / П. Мэнсфилд // Успехи физических наук. – 2005. – Т. 175, № 10. – С. 1044–1052.
8. Разработка виртуальных моделей челюстно-лицевой области для исследования развития патологии и выбора методик лечения стоматологических пациентов / А. Э. Лукьянов [и др.] // Грант РФФИ 07-07-00373 : завершающий отчет по проекту 07-07-00373-а.
9. Окклюзия и клиническая практика : пер. с англ. / под ред. И. Клинеберга, Р. Джагера. – М. : МЕДпрессИнформ, 2006. – 200 с.
10. Шварц, А. Д. Биомеханика и окклюзия зубов / А. Д. Шварц. – М. : Медицина, 1994. – 208 с.
11. Пат. 80111 Российская Федерация, МПК А 61 С 7/00. Программно-аппаратная система функционального анализа окклюзии и артикуляции / А. Г. Смирнов. – № 2008138078/22 ; заявл. 24.09.2008 ; опубл. 27.01.2009, Бюл. № 3.
12. Смирнов, А. Г. Комплекс виртуальной имитации зубочелюстной системы / А. Г. Смирнов, С. В. Клименко, Д. А. Ростков // ГрафиКон'2010 = GraphiCon'2010 : тр. 20-й Междунар. конф. по компьютер. графике и зрению (20–24 сент. 2010, Санкт-Петербург). – СПб., 2010. – С. 292–299.