# Программно-аппаратный способ построения виртуальной имитации зубочелюстной системы пациента

А.П. БОБРОВ, д.м.н., проф., зав. кафедрой пропедевтики стоматологических заболеваний СПбГМУ им. акад. И.П. Павлова
А.Г. СМИРНОВ, ген. директор ООО «Институт компьютерного моделирования биологических объектов»
П.П. БЕЛЬТЮКОВ, к.м.н., доц., каф. биологической химии СПбГМУ им. акад. И.П.Павлова
Д.П. СУСЛОВ, зав. зуботехнической лабораторией, стоматологический центр «Джулио»
А.С. НУШТАЙКИН, ведущий программист ООО «ИКМБО», Санкт-Петербург
Координаты для связи с авторами:
197022, Санкт-Петербург, ул. Льва Толстого, д. 6/8, кафедра биологической химии СПбГМУ им. акад. И.П. Павлова

# Hardware-software method of dento-maxillary system virtual simulation construction

A.P. BOBROV, A.G. SMIRNOV, P.P. BELTYUKOV, D.P. SUSLOV, A.S. NUSHTAIKIN

**Резюме**

**В статье дано обоснование необходимости разработки и схема создания имитационной модели зубочелюстной системы, создаваемой путем визуализации математической модели в форме интерактивной компьютерной трехмерной графики. Представлен краткий обзор средств компьютерного моделирования, применяемых в стоматологической практике. Приведены результаты работы над созданием способа имитации зубочелюстной системы с привлечением программно-аппаратных средств, который позволит проводить исследования виртуальной биомеханической модели зубочелюстной системы конкретного пациента с возможностью интерактивного взаимодействия с этой моделью и последующим использованием данных для выполнения несъемных ортопедических конструкций на основе CAD/CAM-технологии.**

**Ключевые слова: зубные протезы, виртуальная модель зубочелюстной системы, гнатология.**

**Abstract**

**Development of the virtual simulation of dento-maxillary system using visualization of mathematical model in the interactive computer with three-dimensional drawing is explanation in the article. The short review of computer models which use in dental practice is also given. A first result of the working out of the imitation of dento-maxillary system on the hardware-software basis allows to research virtual biomechanical model of the concrete patient and realize possibility of interaction with this model and followed using of getting data to make the fixed dental prosthesis on the basis of CAD/CAM technologies.**

**Key words: dental prosthesis, dento-maxillary virtual simulation, gnathology.**

Разработка полноценной системы имитационного моделирования зубочелюстной системы пациента имеет базовое значение для диагностики и лечения ортопедической патологии. Получение точной динамической имитации зубочелюстной системы напрямую связано с решением вопросов качества функционального анализа окклюзии и артикуляции.

Непрерывное усовершенствование механических имитационных устройств наглядно иллюстрирует актуальность данной проблемы. Современные артикуляторы снабжены приспособлениями, позволяющими настраивать механизмы по некоторым индивидуальным параметрам пациента (суставные и резцовые пути и т. д.). Однако даже при использовании таких приборов нередко наблюдаются погрешности при выполнении измерений. Анализ несоответствий контактных полей и точек на окклюзионных поверхностях моделей зубов на диагностических гипсовых моделях, закрепленных в артикуляторе и на окклюзионных поверхностях зубов-оригиналов показал, например, что полностью регулируемые артикуляторы (типа *Arcon*) допускают около 30% погрешностей [1].

Вероятно, перемещения нижней челюсти имеют более сложную, неочевидную в деталях организацию и траекторию, и механические приборы не позволяют точно имитировать топологию межзубных взаимоотношений с учетом всех индивидуальных факторов в полости рта пациента, поскольку представляют динамические (биомеханические) процессы, возникающие при артикуляции упрощенно. Определенно, ни один механический прибор не позволяет исследователю учитывать экскурсии зубов в зубоальвеолярной связке, возникающие при приложении к зубам сил в разных направлениях, поскольку в имитационной системе используются гипсовые модели, физические свойства которых не равноценны свойствам объекта оригинала.

В то же время специалисты нуждаются в объективных знаниях о контактах между зубами. Продолжаются споры по поводу числа и расположения контактных участков, необходимых для поддержания стабильности отдельного зуба. Сторонники некоторых концепций окклюзии считают, что нужно придерживаться специфической модели множественных контактов для каждого зуба [2]. При преждевременных контактах скатов бугорков зубов, смещениях зубов, отсутствии бугорков или их нерациональных наклонах нарушаются нормальные бугорково-фиссурные соотношения зубов, их устойчивость, то есть нарушается гармоничная окклюзия. Такие нарушения отражаются на сосудисто-нервных механизмах пародонта. Однако реализация подхода моделирования специфических множественных контактов для каждого зуба предполагает точность исследования гнатологических положений, которая на практике не может быть обеспечена механическими устройствами.

Очевидно, что для решения задачи разработки более адекватной имитационной модели зубочелюстной системы требуется рассмотреть способ, интерпретирующий неаналоговое моделирование.

В компьютерном моделировании, в том числе при создании виртуальных интерактивных динамических моделей вещественных объектов (систем объектов), используются цифровые потоки данных, содержащие определенные сведения о физических объектах. Такие модели удобно использовать в вычислительных экспериментах, когда эксперименты с реальными объектами затруднены из-за физических препятствий или физическая модель может содержать лишь ограниченные сведения об объекте-оригинале. Целью вычислительных экспериментов является анализ, сопоставление результатов моделирования с реальным поведением изучаемого объекта или феномена, проведение необходимых расчетов.

В широком смысле компьютерная модель включает в себя все узлы, конечные элементы, свойства материала, реальные константы, граничные условия в зависимости от преобразования пространственной конфигурации объекта (системы), которые используются для отображения (имитации) физической системы. Построение виртуальной модели в данном контексте подразумевает визуализацию математической модели реального вещественного объекта (системы) в форме интерактивной компьютерной трехмерной графики – векторной графики. Математической базой виртуальной модели являются методы векторной геометрии.

В такой модельной системе непосредственному изучению подвергается не сам интересующий объект, а вспомогательная искусственная модель, находящаяся в определенном объективном соответствии с познаваемым объектом, способная замещать его в определенных отношениях, дающая при исследовании информацию о самом объекте. То есть, как и в случае любого моделирования, компьютерная модель описывает изучаемый объект не полностью. Однако логичность и формализованность компьютерных моделей позволяет выявить основные факторы, определяющие свойства изучаемого объекта, в частности, исследовать отклик моделируемой физической системы на изменение ее параметров и начальных условий [3].

Компьютерная визуализация, как эффективный метод исследования, находит применение в имитационной технике в различных областях деятельности. Необходимость и полезность математического расчета и компьютерной визуализации закрытых от исследователя процессов в медицине подтверждают, например, попытки виртуальной имитации структурных изменений в молекулах – «моторах», имевшие место в британской *Laboratory of Muscle Biophysics* (Molecular Medicine Section, проф. Michael A. Ferenczi) и отраженные в исследовании *Application of TIRF microscopy to visualisation of structural changes in molecular motors*, а также результаты, полученные в *Waseda University* (Япония) [4].

В стоматологии исследуются возможности использования компьютерного планирования хирургических операций в челюстно-лицевой области [5], применения метода стереолитографии, построенного на расчете компьютерных моделей.

Получить статическую виртуальную модель элементов зубочелюстной системы на практике возможно, если в арсенале стоматологической клиники имеется сканирующее устройство, например дентальный томограф. Все современные томографические методы реализуются с помощью компьютерной техники, поэтому любой из таких методов можно назвать компьютерным.

Методика визуализации в томографии математически описана в преобразовании Фурье и представляет собой математическое соотношение между реальным пространством и k-пространством. Применительно к визуализации в общем виде оно интерпретируется так:

$$S(k) = \int d\mathbf{r}\rho(\mathbf{r})\exp(i\mathbf{k}\mathbf{r}), \text{ [6]}$$

где k и r могут быть одно-, двух- или трехмерными, плотность $\rho(r)$ характеризует изображение в реаль-

ном пространстве, а S(k) – в k-пространстве, k зависит от физических свойств, используемых в том или ином виде томографии. Преобразование Фурье допускает обратное преобразование k-пространства в реальное r-пространство [6].

В узком смысле под термином «компьютерная томография» чаще понимают рентгеновскую компьютерную томографию. В рентгеновском диапазоне излучения экспоненциальный закон ослабления излучения выполняется с высокой степенью точности, поэтому разработанные математические алгоритмы были впервые применены для рентгеновской компьютерной томографии. Для визуальной и количественной оценки плотности визуализируемых методом КТ структур используется шкала ослабления рентгеновского излучения Хаунсфилда [7]. Регистрацию рентгеновского излучения, прошедшего через среду, осуществляют чувствительные детекторы. Рентгеновские компьютерные томографы, реализующие эти принципы, содержат также обширные пакеты программного обеспечения, позволяющего проводить весь спектр исследований, последующую обработку и анализ КТ-изображений, в том числе с возможностью построения статических трехмерных моделей. Однако дентальные томографы не решают задачу построения динамической модели зубочелюстной системы в целом, с учетом взаимодействия и пространственного положения относительно друг друга элементов системы в динамике процесса артикуляции.

Для решения задачи адекватной реконструкции окклюзии разрабатываются методы математического моделирования и компьютерной трехмерной визуализации. Например, компанией *3D Lab Service GmbH* представлен так называемый «виртуальный артикулятор» [8]. По сути, это программное обеспечение, позволяющее интерактивно взаимодействовать на экране монитора с трехмерными моделями механического артикулятора и гипсовыми моделями челюстей. Такая система обеспечивает, по существу, визуализацию действий механических приборов, имитируя их физические возможности.

Также известны системы, включающие в себя механические артикуляторы и электронные модули для регистрации и визуального представления некоторых артикуляционных движений в форме графических символов (*Arcus digma*). В данном случае перенос информации о пространственном положении челюстей в артикулятор осуществляется с использованием специальных вспомогательных приспособлений, реализующих метод аксиографии. Положение модели фиксируется только после завершения процесса индивидуальной регистрации, настройки артикулятора и повторения гипсовыми моделями в артикуляторе всех зарегистрированных особенностей движения нижней челюсти. Результаты анализа представлены в виде проекции траектории движения нижней челюсти на три взаимно перпендикулярные плоскости. Одновременно представляются особенности движения кондиляра при перемещении челюсти вдоль горизонтальной оси (влево-вправо) в виде изменения пространственного положения кинематической оси. [9, 10]. Таким образом, анализ гнатологических показателей, полученных методом электронной аксиографии, проводится на механическом приборе и гипсовых моделях.

Выполняя НИР по проекту «Разработка виртуальных моделей челюстно-лицевой области для задач исследования развития патологии и выбора методик лечения стоматологических пациентов» (РФФИ, 07-07-00373) [11], наша группа пришла к выводу о возможности разработки системы, обеспечивающей решение задачи построения виртуальной динамической модели зубочелюстной системы конкретного пациента путем комбинации нескольких аппаратов «сбора цифровой информации», регистрирующих разные физические феномены [12]. Техническое решение оформлено в полезной модели «Программно-аппаратная система функционального анализа окклюзии и артикуляции» (патент РФ №80111, зарегистрировано 27.01.2009 г.).

**Цель разработки данной модели** – создание имитационной системы, позволяющей повысить точность функционального анализа окклюзии и артикуляции.

Суть разработки заключается в переносе цифровой информации об определенных гнатологических положениях на полигональную сетку трехмерной модели зубочелюстной системы пациента, исходя из чего можно рассчитать траекторию движений нижней челюсти при жевании, определить возникающие нагрузки на зубы, выявить контактные точки и поля на окклюзионных поверхностях зубов с учетом экскурсий зубов в зубоальвеолярном аппарате.

В ходе разработки системы использовались методы математического моделирования, статистического анализа данных, трехмерной компьютерной визуализации, техники виртуального окружения.

Метод математического моделирования динамических систем в медицине применяется с 60-х годов XX века. В работах Дещеревского В. И. [13] для моделирования мышечного сокращения предложены кинетические уравнения, базирующиеся на уравнении Хилла [14]. Дальнейшее развитие математического описания модели мышечного сокращения на основе результатов исследования конформационных изменений отдельных молекул миозина и экспериментально определенных химических констант нормы предлагают исследователи из *John Hopkins University* (США) [15]. Математические модели гнатологических концепций и положений детально разработаны Шварцем А. Д. [16].

В нашей работе метод математического моделирования применяется для расчета артикуляционных движений, исходя из цифровых данных о координатах граничных точек окклюзии, возникающих при определенных движениях нижней челюсти, переносимых затем в систему трехмерной модели челюстей.

То есть вся цифровая обработка данных происходит в системе координат трехмерной модели. Такой подход является новым применительно к гнатологическим исследованиям.

Статистический анализ данных применялся для исследования результатов серии лабораторно-клинических тестов, в результате чего выявлена рациональная последовательность действий для определения гнатологических данных, необходимых для построения динамической модели.

Оба названных метода составляют основу программно-аппаратного способа построения виртуальной динамической модели зубочелюстной системы пациента. Последующий рендеринг (визуализация) математической модели производится с использованием графической библиотеки *Open GL Performer*, которая позволяет оптимизировать процессы с применением иерархической организации данных, алгоритма стирания невидимых поверхностей и линий. Результат передается графической библиотеке *Open GL*, которая, в свою очередь, отрисовывает примитивы (треугольники, линии, точки) с учетом графических мод (освещения, текстур, прозрачности). Техники нижнего уровня (Z-буферизация, маскировка, шейдинг) реализуются в графической карте.

Обработанная информация представляется в форме расчета гнатологических данных и визуальных интерактивных сцен, представляемых на экране монитора ПК. Методы реконструкции сложных высокодетализированных трехмерных сцен за счет обработки потоков данных, получаемых от сенсоров, имеют общее название *Image Based Rendering* (IBR) [17]. Такой подход позволяет:

– значительно оптимизировать процесс генерации динамической модели, так как возникают возможности для экономии ресурсов – отпадает необходимость предварительного анализа расчетов с известными аналитическими решениями или полученными экспериментальными данными;

– добиться максимального приближения соответствия геометрических, пространственных параметров модели в разные моменты (фазы) изменений к параметрам физического прототипа.

Для полного и точного представления компьютерной имитации, моделирующей сложные артикуляционные движения, недоступные прямой экспериментальной проверке, использовались также технологии виртуального окружения или представление модели в «кибернетическом пространстве». Понятие «кибернетическое пространство» подразумевает интерактивную графику в реальном времени с трехмерными моделями, когда комбинируется специализированная технология отображения, погружающая пользователя в мир модели. Визуальное погружение осуществляется за счет создания стереоэффекта наблюдаемой искусственной сцены и визуальным экранированием реальной среды, в которой находится пользователь [18].

Способ имитации зубочелюстной системы с привлечением программно-аппаратных средств отличается тем, что предлагает потребителю (врачу, зубному технику) возможность проводить исследования виртуальной биомеханической модели зубочелюстной системы конкретного пациента с возможностью

**ЦДГ** – потоки цифровых данных о геометрии окклюзионного поля;
**ЦДО1, ЦДО2, ЦДО3** – потоки цифровых данных о точках окклюзии в разные фазы артикуляции;
**ИТДМ** – интерактивная трехмерная динамическая модель;
**Система VR** – система виртуального окружения
(дополнительный способ интерактивного взаимодействия с моделью).

*Рис. 1.* **Принципиальная схема основных этапов технологической цепочки построения виртуальной динамической модели программно-аппаратным способом**

компьютерной обработки информации и интерактивного взаимодействия с таким объектом, в том числе возможности ввода экспериментальных данных для последующих расчетов на модели.

При этом точность расчетов обеспечивается за счет:

– разрешающих возможностей сканирующих устройств, которые фиксируют геометрические параметры оригинального окклюзионного поля и граничные точки окклюзии;

– включения в систему расчетов модели параметров экскурсий зубов при различных направлениях и силе нагрузок;

– вычислительных возможностей векторной геометрии.

Рассматриваемая имитационная система включает в себя блок сбора цифровых данных и средства организации интегрированной информационной среды, объединяющей все процессы жизненного цикла полезной модели (далее – продукта).

Продукт адаптирован для применения в стоматологических клиниках на этапах анализа функциональных особенностей зубочелюстной системы пациента, планирования ортопедических несъемных конструкций, тестирования и коррекции выполняемых конструкций.

Данная система предоставляет потребителю следующие возможности:

1. Моделировать виртуальную биомеханическую модель зубочелюстной системы конкретного пациента и интерактивно взаимодействовать с ней на экране монитора ПК. При этом моделируются: (1) рельеф десен и поверхности коронковых частей зубов; (2) движения нижней челюсти сообразно специфике топографии окклюзионных поверхностей зубов; (3) экскурсии зубов в зубоальвеолярном связочном аппарате, возникающие под воздействием сил при жевании (нагрузке).

2. Проводить на компьютере вычислительные эксперименты на модели зубочелюстной системы конкретного пациента, целью которых является анализ и интерпретация данных. При этом возможно математически моделировать (просчитывать) и визуально представлять на экране монитора варианты лечения несъемными ортопедическими конструкциями при данной патологии с учетом индивидуальных особенностей.

3. Сопоставлять результаты физического моделирования (выполняемые ортопедические несъемные конструкции) с поведением компьютерной модели зубочелюстной системы. При этом возможно: (1) моделировать виртуальную модель выполняемой конструкции; (2) интегрировать виртуальную модель выполняемой ортопедической конструкции в систему компьютерной модели зубочелюстной системы пациента; (3) выполнять расчет (анализ) окклюзионного поля в процессе артикуляции с учетом геометрии участка окклюзионного поля, восстановленного выполняемой конструкцией; (4) выявлять в процессе анализа восстановленного окклюзионного поля и визуализировать физиологические межзубные контакты, контакты, препятствующие нормальной функции зубочелюстной системы, либо отсутствие необходимых контактов, обеспечивающих нормальную функцию зубочелюстной системы.

4. Рассчитывать и задавать аппаратам, реализующим CAD/CAM-технологии, геометрические параметры для выполнения несъемных ортопедических конструкций.

Программно-аппаратная система функционального анализа окклюзии и артикуляции находится на пике технологических разрешений компьютерных инструментов, ее развитие и реализация, возможно, позволит говорить о внедрении принципиально нового подхода в исследовании зубочелюстной системы. Однако пока этот способ следует рассматривать с позиций потенциала твердотельного моделирования. Вопросы моделирования и визуализации деформаций мягких тканей убедительно разрешены применительно к кинематографической анимации и на сегодняшний день все еще условны для задач научной визуализации. Математические решения, обслуживающие визуализацию деформаций мягких тканей, нуждаются в дальнейшем фундаментальном развитии. Применительно к задачам виртуального моделирования челюстно-лицевой области также существуют проблемы, связанные с измерением упругих деформаций мягких тканей: нет возможности говорить об удовлетворительном решении вопроса измерения (для последующего преобразования аналоговых данных в цифровые) степени податливости слизистой десны, что является обязательным условием для задач компьютерного имитационного моделирования при съемном протезировании. Кроме того, следует принимать в расчет, что возможная цена такого компьютерного инструмента, включающего модуль измерения и моделирования упругих деформаций, может оказаться запретительной для широкого практического распространения в близкой перспективе.

Современный уровень применения информационно-вычислительных технологий в стоматологии делает возможным прогнозировать относительно скорое развитие и внедрение на практике программно-аппаратного способа исследования зубочелюстной системы, базирующегося на обработке потоков цифровых данных таким образом, когда пользователю предоставляется возможность анализировать функцию системы на виртуальном имитаторе [19]. При этом принципиальные основы такого имитатора предполагают значительно больший вычислительный ресурс и фактическую достоверность по сравнению с аналоговыми имитационными приборами.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бобров А. П., Смирнов А. Г., Падалко Е. В., Бя С. Ч., Суслов Д. П. Применение в клинической практике артикуляторов ASA Dental, Hager Werken, SAM 3: сравнительный анализ // Институт стоматологии. 2008. №1 (38). С. 126-127.

2. Клинеберг И., Джагер Р. Окклюзия и клиническая практика. – М.: МЕДпресс-информ, 2006. – 200 с.
3. Новик И. Б. О философских вопросах кибернетического моделирования. – М., Знание, 1964.
4. Shiroguchi K., Kinosita K. Myosin V Walks by Level Action and Brownian Motion // Science. 2007. Vol. 316. P. 1208-1212.
5. Семенов М. Г., Сафонов А. А. Возможности компьютерного планирования костно-реконструктивных операций у детей с патологией лицевого черепа // Институт стоматологии. 2007. №3 (36). С. 60-61.
6. Мэнсфилд П. Быстрая магнитно-резонансная томография // Успехи физических наук. 2005. Т. 175. №10. С. 1044-1052.
7. Hounsfield G. N. Computed Medical Imaging // Nobel Lectures in Physiology or Medicine 1971-1980. – Ed. Jan Lindsten, World Scientific Publishing Co., Singapore, 1992. – P. 568-586.
8. www.3dlabservice.de.
9. www.kavo.com.
10. www.dentalsite.ru.
11. Лукьянов А. Э., Клименко С. В., Бобров А. П., Смирнов А. Г. Метод научной визуализации как инструмент исследования развития патологии челюстно-лицевой системы и прогнозирования последствий медицинских вмешательств // Институт стоматологии. 2007. №3 (36). С. 120-121.
12. Смирнов А. Г., Бобров А. П., Казанский И. П., Булгаков М. Г. Программно-аппаратный метод анализа окклюзии и артикуляции: общие контуры решения // Электронный многопредметный научный журнал «Исследовано в России» ISSN 1819-4192.-101/081013, 2008. С. 1110-1116. http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2008/101.pdf.
13. Дещеревский В. И. Математические модели мышечного сокращения. – М.: Наука, 1977. – 160 с.
14. Хилл А. Механика мышечного сокращения. Старые и новые опыты. – М.: Мир, 1972.
15. Lan G., Sun S.X. Dynamics of Myosin-Driven Skeletal Muscle Contraction: I. Steady-State Force Generation // Biophysical Journal. 2005. №88. P. 4107-4117.
16. Шварц А. Д . Биомеханика и окклюзия зубов. Монография. – Изд-во «Медицина», Ассоциация «Медицинская литература», 1994.
17. McMillan L., An image-based approach to three-dimensional computer graphics: Ph.D. Dissertation // UNC Computer Science Technical Report TR97-013. University of North Carolina. 1997. April.
18. Клименко С. В., Никитин И. Н., Никитина Л. Д. АВАНГО: система разработки виртуальных окружений. – М.: Протвино, Институт физико-технической информатики, 2006. – 252 с.
19. Смирнов А. Г. Компьютерное моделирование в стоматологии // Институт стоматологии. 2006. №1 (30). С. 24-25.

***Поступила 21.09.2009***

Ректорат СПбГМУ им. акад. И.П. Павлова, Ученый совет, сотрудники кафедры пропедевтики стоматологических заболеваний с глубоким прискорбием извещают о том, что **18 сентября 2009 года** скоропостижно скончался декан стоматологического факультета, заведующий кафедрой пропедевтики стоматологических заболеваний, директор научно-практического центра «Стоматология», вице-президент Стоматологической ассоциации Санкт-Петербурга, доктор медицинских наук, профессор **Анатолий Петрович БОБРОВ.**

Верить в это просто не хочется. Совсем недавно мы публиковали материал к его 60-летию. Но трагедия произошла, и Анатолия Петровича на этой земле с нами больше нет. Потеря велика для всех, кто так или иначе был связан с ним в жизни: для родных, для возглавляемого им факультета, для огромного количества учеников и коллег по всей стране и, конечно, для многих друзей, которых у такого человека просто не могло не быть. Столько добра, сколько сделал Анатолий Петровича всем, с кем его сводила жизнь, хватило бы на несколько очень хороших людей. Он был гораздо больше, чем педагог, врач, коллега – это был очень близкий человек, которому хотелось рассказать все сокровенное, поведать тайну и получить отцовский совет. Это был редкий человек, которого уважали и любили все, кто его знал. Сложно без него будет университету, факультету и, конечно, семье Анатолия Петровича. Заменить таких людей невозможно.

*Пусть земля тебе будет пухом, незабвенный и дорогой Анатолий Петрович.*