



Naumovich S.S.,
Naumovich S.A.

Modern possibilities and the practical application of mathematical modeling in dentistry

СОВРЕМЕННЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ И ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В СТОМАТОЛОГИИ

Наумович С.С., канд. мед. наук, доцент кафедры ортопедической стоматологии БГМУ
Наумович С.А., доктор мед. наук, профессор, зав. кафедрой ортопедической стоматологии БГМУ

Современный уровень оказания стоматологической помощи предъявляет врачу повышенные требования при лечении и реабилитации пациентов. Сегодня уже недостаточно просто поставить пломбу или изготовить зубной протез, даже если они будут полностью соответствовать всем критериям качества и удовлетворять пациента. Необходимо оценивать все возможные риски и последствия любого врачебного вмешательства в организм человека. В отличие от многих других областей медицины в стоматологии показания и противопоказания к различным способам лечения предполагают выбор. Очень наглядно это проявляется в ортопедической стоматологии, где на одну и ту же клиническую ситуацию может быть составлено несколько вариантов протезирования, позволяющих восстановить морфологическую целостность и функцию. Выбор метода лечения зачастую основывается на клиническом опыте врача-стоматолога и предпочтениях пациента, однако не всегда выбранный вариант протезирования будет наиболее оптимальным для зубочелюстной системы. Негативное влияние протезов может иметь различные проявления, но одним из наиболее важных следует считать перегрузку естественных зубов и тканей протезного ложа. В конечном итоге она приведет к преждевременной потере зубов, сокращению сроков пользования протезами и их низкой функциональности.

Для решения подобных проблем давно и успешно применяются *методы биомоделирования*. Суть их заключается в возможности спрогнозировать и оценить влияние врачебного вмешательства на зубочелюстную систему. В некоторой степени к биомоделированию можно отнести и эксперименты, проводимые на животных при испытаниях новых методов

лечения в медицине. Ведь целью морфологического эксперимента является выработка критериев применения нового метода и прогнозирование результатов его применения у конкретного пациента.

Развитие науки дало возможность использовать в медицине новые, не совсем традиционные методы исследования. Так, в стоматологии активно стали применяться *методы физического и математического моделирования*. Наиболее точные и достоверные результаты при решении любых научных и практических задач дают именно физические эксперименты, проведение которых в медицине проблематично по многим причинам, главной из которых является отсутствие возможности «заглянуть» во время эксперимента внутрь исследуемого органа при существующем уровне развития техники. Поэтому развитие получили в основном физические модельные эксперименты, проводимые при соблюдении геометрических пропорций и размеров исследуемых объектов, но на других материалах, например с использованием метода фотоупругости либо голографической интерферометрии.

Принципиально новые возможности для прорыва в медицине, за счет возможности прогнозирования и оценки рисков в будущем, открывают достижения прикладной математики и информатики. Благодаря широкому внедрению *методов математического моделирования* при решении многих сложных задач и проблем отпала или значительно снизилась роль экспериментальной медицины [1]. Внедрение в сферу научно-медицинских исследований методов моделирования позволяет избавить многие тысячи животных от неизбежных страданий и гибели во время экспериментов, что имеет большое нравственное значение. Освободившись финансовые средства можно более

продуктивно использовать для развития новых научных направлений. В то же время *математическое моделирование не исключает полностью эксперимент, как неотъемлемую часть научных исследований, – достоверность и точность построенных моделей может и должна проверяться экспериментально.* Кроме этого, в некоторых случаях построить модель не представляется возможным, и лишь проведение эксперимента позволяет получить искомым результат.

Активное применение методов математического моделирования в различных отраслях науки в последнее десятилетие объясняется колоссальным развитием вычислительной техники и информационных технологий, что позволило получить реальные результаты расчетов сложных математических моделей биологических объектов. До эры персональных компьютеров метод зачастую ограничивался построением модели, которая представляет собой набор математических формул и не дает конкретной информации. Сейчас появилась возможность использовать метод с учетом его классической сущности, которая заключается в триаде «*математическая модель – алгоритм – компьютерная программа*».

Построение математических моделей в различных областях медицины преследует разные цели и основывается на различных законах физики: так, моделирование деятельности сердца описывается электрическими законами, движения крови в сосудах – законами гидродинамики, а движения в суставах и мышцах – биомеханическими законами. Зубочелюстная система человека наиболее точно может быть описана именно законами биомеханики, что объясняется превалированием в ней костно-мышечных компонентов: челюстные кости, зубы, жевательные мышцы и т.д. Актуальность использования методов математического моделирования в стоматологии не ограничивается описанием биомеханики только интактной зубочелюстной системы. Значительный интерес представляют математические модели при патологии органов и тканей полости рта, а также при наличии любых искусственных элементов: пломб, зубных протезов, ортодонтических аппаратов. Исследования в этих случаях могут проводиться как в направлении моделирования деформаций и напряжений, возни-

кающих в твердых тканях зубов и опорном аппарате, так и в самих зубных протезах и пломбах. Однако, учитывая значительное превалирование в прочностных свойствах искусственных материалов, составляющих основу зубных протезов, очевидно, что наиболее подвержены негативному влиянию собственные ткани и органы пациента: периодонтальная связка, десна, костная ткань челюсти.

В литературе описано большое количество исследований по математическим моделям различных компонентов зубочелюстной системы. Количество публикаций растет, что объясняется в первую очередь развитием компьютерных технологий с появлением большого количества программных пакетов по моделированию [4]. Однако полученные результаты чаще сфокусированы на чисто научных задачах и не всегда имеют практическое применение, потому что за основу создания модели берется не зубочелюстная система конкретного пациента, а усредненная модель. Т.е. результаты математического моделирования стандартных клинических ситуаций переносятся на всех пациентов. На наш взгляд, такой подход имеет право на жизнь, однако активное развитие информационных технологий, различных методов диагностики позволяют приблизить данную технологию непосредственно к врачу.

В промышленности результаты моделирования можно достаточно объективно переносить на разрабатываемые детали и агрегаты, так как в будущем все выпускаемые в производстве образцы будут иметь одинаковые геометрические параметры, состоять из одних и тех же материалов и находиться в сходных условиях эксплуатации. Любой биологический объект, к которым относится и человеческий организм, индивидуален по своим свойствам, необходимым для моделирования. Особенно актуально это для зубочелюстной системы, которая имеет до 32 зубов с произвольной ориентацией в пространстве и различными размерами. Очевидно, что переносить усредненные результаты научных исследований на любого пациента не всегда корректно.

Применение моделирования в практической деятельности врачей-стоматологов ограничено рядом причин, основной из которых является отсутствие специального программного обеспечения для

этих целей. Большинство описываемых в литературе математических моделей различных компонентов зубочелюстной системы построены в прикладных программных пакетах для конечно-элементного анализа, работа с которыми требует наличия специальных навыков и знаний и обязательного привлечения специалистов математического профиля, что невозможно в рамках клинического приема. Также подобные программные комплексы нацелены на решение очень широкого спектра задач механики, что значительно увеличивает их стоимость. Поэтому очень актуальна разработка специализированных денальных программных комплексов, позволяющих смоделировать биомеханические изменения в зубочелюстной системе непосредственно врачом. Полученные результаты можно использовать на различных этапах оказания всех видов стоматологической помощи.

В стоматологии исследование напряжений и деформаций зубочелюстной системы наибольший интерес представляет для ортодонтии и ортопедической стоматологии [3]. Интересный факт: большинство статей в зарубежных научных журналах по математическому моделированию в стоматологии связано именно с ортодонтией, а на постсоветском пространстве данный метод чаще использовался в исследованиях при конструировании протезов. Применение моделей в ортодонтии в основном сконцентрировано на правильном распределении ортодонтических сил при лечении зубочелюстных аномалий, что позволяет получить максимально положительный результат в минимальные сроки. Зоны повышенного напряжения в клинике будут соответствовать участкам резорбции костной ткани, а зоны с минимальным давлением – участкам формирования новой костной ткани. Ортопедическая стоматология использует математические модели для выбора правильной конструкции протеза, так как любое протезирование сопровождается риском перегрузки опорных элементов, которого можно избежать, правильно распределив нагрузки и спрогнозировав напряжения, возникающие в процессе пользования протезами.

Главная проблема при моделировании любой биомеханической системы – это корректная и адекватная постановка задачи, отражающая суть проблемы,

учитывающая все основные особенности и ограничения. На современном этапе развития науки попытки создать всеобъемлющую модель бесперспективны и нереальны, нужно уметь выделить суть, зерно. В этом состоит цель сотрудничества механика-математика и стоматолога [2]. Причем это сотрудничество не ограничивается только этапом работы над математической моделью, но продолжается при оценке полученных результатов, которые необходимо правильно понять и сделать соответствующие прогнозы. При построении математической модели любой биологической системы сложно определить, какие из анатомических образований, входящих в систему, необходимы для получения наиболее точного результата, а какие компоненты могут не учитываться без искажения модели и сохранения ее адекватности.

Например, если необходимо определить напряжение, возникающие в опорных тканях при протезировании мостовидными протезами, то модель вполне может быть ограничена наличием периодонтальной связки и челюстной кости. В случае применения любых типов съемных протезов невозможно получить адекватный реальности результат без включения в модель слизистой оболочки полости рта. После выбора компонентов математической модели необходимо определить общие подходы к рассмотрению каждого компонента и определить уровень сложности модели и ее приближенность к реальности с точки зрения анатомического строения и выполняемых функций. Так, при включении в модель костной ткани челюсти она может рассматриваться как сплошной однородный массив с линейными изотропными свойствами, т.е. вне зависимости от прикладываемой нагрузки кость одинаково деформируется во всех направлениях прямо пропорционально прикладываемой силе. Однако возможен вариант рассмотрения в подобной ситуации нелинейной модели костной ткани с учетом наличия кортикальной и губчатой костных составляющих челюсти с различными участками минеральной плотности.

Выбор модели и будущего результата в каждой конкретной ситуации должен основываться на стоящих перед исследователями задачах и, что немаловажно, на возможностях их решить [9]. Анализ трехмерных объектов со сложной геомет-

рической формой требует значительных компьютерных ресурсов, которыми может располагать крупный научно-исследовательский центр, но они не всегда есть у врача на рабочем месте. Поэтому в некоторых ситуациях даже двухмерные упрощенные модели, которые учитывают геометрические размеры, свойства материалов и другие факторы, характеризующие биологическую систему, способны дать вполне адекватные результаты. Однако такие модели дают достаточное представление о биомеханике периодонтального комплекса только вблизи зуба. Если необходимо оценивать напряжения на расстоянии от зуба, например в трабекулярной костной ткани, то следует использовать сложные трехмерные численные модели. Важно также наличие в модели соседних зубов. Данным моментом нельзя пренебрегать, так как упрощенные модели, описывающие одиночные зубы (имплантаты), не включенные в участок челюсти, могут иметь лишь сравнительную ценность [5].

Для построения математической модели зубочелюстной системы механику-математику необходимы входные параметры, которые можно условно разделить на три группы (рисунок). Первая характеризует геометрические свойства объектов: размеры зубов, их пространственное взаиморасположение, размеры и положение периодонтальной связки, компактной и губчатой костной ткани и т.д. Вторая груп-

па параметров описывает механические свойства тканей, в случае рассмотрения упругих моделей к ним относятся модуль упругости (модуль Юнга) и коэффициент Пуассона. Эти величины являются математической интерпретацией особенностей гистологического строения органов человека. К третьей группе относятся внешние нагрузки, действующие на зубочелюстную систему. Каждая группа параметров может рассматриваться в упрощенном виде либо с учетом всех особенностей анатомического строения и физиологии.

С каждым годом подходы в моделировании системы «зуб – периодонт – кость» меняются в сторону усложнения базовых принципов. В зубах учитываются не только послойно расположенные эмаль, дентин, цемент, пульпа, но и различные искусственные элементы в виде пломб и коронок. В течение нескольких десятилетий модель периодонтальной связки эволюционировала от упругой прослойки равномерной толщины с линейными свойствами между зубом и внутренней стенкой альвеолы до морфологического образования волоконного строения, пропитанного межклеточным веществом с нелинейной деформацией [7]. Данные литературы свидетельствуют о том, что хотя нелинейные модели периодонта и позволяют более точно описать напряженно-деформированное состояние при действии на зуб различных жевательных



Общая схема построения математической модели в стоматологии

либо ортодонтических нагрузок, но при этом существенно усложняют расчеты даже для одного зуба. *Расчет нелинейной волоконной модели для всего зубного ряда может в настоящее время быть осуществлен только на суперкомпьютерах.* Костная ткань челюсти в моделях должна быть разделена на участки в зависимости от особенностей гистологического строения: внутренняя и наружная компактные пластинки и губчатая часть.

Важный момент в построении любой биомеханической системы с ее последующим анализом – правильное моделирование нагрузки, которая падает на зубы и далее на периодонтальную связку и челюсть во время жевания [10]. Ключевым является определение не только величины жевательного давления, но и места его приложения и направления действия. К сожалению, чаще всего в моделях используют статические нагрузки, хотя в реальности в процессе жевания точка приложения нагрузки постоянно перемещается по зубам с изменением величины и направления. Однако пока не существует технологий, дающих возможность в режиме реального времени измерять все параметры внешних сил, что позволило бы имитировать динамические модели.

Информацию о величине механических параметров можно получить из нескольких источников. Для этих целей широко используются данные научных статей и книг. Однако анализ литературы показывает, что даже для модуля упругости периодонтальной связки (а это основной параметр, необходимый в расчетах) существует внушительная разбежка в значениях. Также исследователи могут столкнуться с проблемой при поиске некоторых величин в случае построения очень сложной модели, так как не все особенности морфологического строения тканей описаны соответствующими параметрами.

На наш взгляд, самым точным методом определения механических свойств объектов является эксперимент. По его результатам можно определить необходимые величины, которые затем могут использоваться другими исследователями при открытом доступе в печати. Именно благодаря результатам экспериментальных исследований механических свойств периодонтальной связки был установлен ее нелинейный характер де-

формации и наличие вязкоэластических свойств [8]. К сожалению, экспериментальные исследования пока не получили широкого распространения из-за сложности проведения и дороговизны, однако есть основания полагать, что в будущем большинство математических моделей будет основываться именно на экспериментальных данных. Данные литературы также показывают, что у каждого человека большинство механических параметров имеет индивидуальное значение, при этом механические свойства всех компонентов зубочелюстной системы зависят также от величины и направления нагрузки, от возраста пациента и групповой принадлежности зуба.

Если механические свойства органов и тканей колеблются в небольших пределах у всех людей и включение в расчетную модель усредненных величин мало отразится на результате, то ввод геометрических размеров и пространственных координат зубов и окружающих тканей значительно осложнен из-за их индивидуальных особенностей [6]. Для решения этой задачи чаще всего используют либо изображения, полученные при проведении компьютерной томографии, либо результаты сканирования гистологических срезов удаленных зубов. Неоспоримым преимуществом этих методов является практически не искажаемое отображение реальных размеров зубов и челюстей. До последнего времени компьютерная томография была недоступна в практической работе врача-стоматолога, поэтому ее применение было ограничено только научными исследованиями. Это объясняется несколькими причинами. Во-первых, существовали аппараты для проведения только спиральной компьютерной томографии. Аппараты дорогие и потому нерентабельны в стоматологии. Во-вторых, при рентгенологическом исследовании на спиральных томографах пациент получал несоизмеримо большую лучевую нагрузку по сравнению со стандартными методиками исследования, что для стоматологических вмешательств не оправдано. Однако в последнее десятилетие в стоматологии появилась новая технология – конусно-лучевая компьютерная томография. Получаемая пациентом лучевая нагрузка при проведении исследования сопоставима, а иногда и меньше, чем при проведении ортопантомографии.

Внедрение в систему оказания стоматологической помощи компьютерных томографов позволило существенно повысить качество диагностики. В отличие от старых систем и поколений рентгеновского оборудования, позволяющих врачу проводить лишь визуальную оценку полученных изображений, современные компьютерные томографы предоставляют много возможностей по дальнейшей обработке изображений. Наиболее интересным с точки зрения практической работы врача-стоматолога может быть *построение и последующий анализ трехмерных моделей зубочелюстной системы.* Данная опция включена в программное обеспечение почти всех томографов, как спиральных, так и конусно-лучевых. Однако построение объемных моделей на основе программного обеспечения, поставляемого в комплектах с рентгеновским оборудованием, не дает возможности их последующего биомеханического анализа без специальной обработки. Также данные трехмерные модели зачастую имеют много искажений и не позволяют проводить исследование объектов изнутри. В настоящее время на рынке представлено большое количество программных продуктов по обработке компьютерных томограмм пациентов. Но и они, в силу своей универсальной направленности для организма в целом, не всегда эффективны в стоматологии. Из-за близости параметров оптической плотности костной ткани челюстей и твердых тканей зубов стандартные алгоритмы обработки изображений не распознают границы между ними.

Развитие технологий, появление новых методов диагностики будут способствовать дальнейшему активному внедрению методов математического моделирования в стоматологии. Наиболее перспективными направлениями с точки зрения науки и практики следует считать:

- разработку сложных физико-математических моделей зубочелюстной системы, учитывающих все особенности морфологического строения и функционирования органов и тканей;
- экспериментальное исследование механо-прочностных свойств всех тканей челюстно-лицевой области для определения параметров моделирования;
- разработку методов трехмерной реконструкции зубочелюстной системы на

основе изображений, полученных при проведении конусно-лучевой компьютерной томографии;

- разработку систем, позволяющих оценить нагрузки, возникающие во время функции в зубочелюстной системе с последующим динамическим анализом в математических моделях;

- интеграцию модулей по математическому анализу, обработке компьютерных томограмм и вводу внешних нагрузок в

единые программные комплексы, которые могут использоваться непосредственно в клинической практике врачей-стоматологов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Матус П.П., Рычагов Г.П. Математическое моделирование в биологии и медицине. – Минск: Бел. наука, 1997. – 207 с.
2. Наумович С.А., Крушевский А.Е. Биомеханика системы зуб–периодонт. – Минск, 2000 – 168 с.
3. Чуйко А.Н., Бережная Е.О., Батурицкий Н.Ю. // Стоматолог. – 2001. – № 1–2. – С. 36–41.

4. Jaroslav M. // Comput. Methods Biomech. Biomed. Engin. – 2004. – Vol. 7. – P. 277–303.
5. Provatidis C.G. // Comput. Methods. Biomech. Biomed. Engin. – 2003. – Vol. 6, № 5–6. – P. 347–352.
6. Clement R., Schneider J., Geiger M. et al. // Computer Methods and Programs in Biomedicine. – 2004. – Vol. 73, № 2. – P. 135–144.
7. Toms S.R., Dakin G.J., Lemons J.E., Eberhardt A.W. // J. Biomech. – 2002. – Vol. 35, № 10. – P. 1411–1415.
8. Rees J.S. // J. Oral Rehabil. – 2001. – Vol. 28, № 5. – P. 425–432.
9. Tajima K. et al. // Dent. Materials J. – 2009. – Vol. 28, № 2. – P. 219–226.
10. Toms S.R., Eberhardt A.W. // Am. J. Orthod. Dentofac. Orthop. – 2003. – Vol. 123, № 6. – P. 657–665.

Поступила 28.02.2011



Стоматологические установки Fimet

Финская компания-производитель стоматологического оборудования Fimet Oy известна на рынке 30 лет. За эти годы продукция Fimet получила признание во всем мире, выгодно выделяясь на общем фоне благодаря качеству, уникальной эргономике, долговечности и безотказности. Ряд функций этого оборудования является уникальным, а соотношение цены и качества – лучшим на рынке.

Fimet предлагает три базовые модели: Mondo, Europa и Prime. Одна из самых надежных стоматологических установок на мировом рынке F1 Mondo уже успела стать бестселлером в своем классе, и это неудивительно: надежность, отличная эргономика, безотказность и сбалансированность всех систем и механизмов – вот далеко не полный список конкурентных преимуществ установки. Гармоничная и надежная установка F1 Europa выгодно выделяется на общем фоне за счет уникальной технологии дистанционного управления креслом и инструментами. Универсальная беспроводная педаль, многофункциональная, имеющая износостойкую конструкцию, позволяет забыть о проводах на полу и значительно улучшить эргономику рабочего пространства. Установка обеспечивает европейский уровень комфорта для стоматолога и для пациента. Удобное, широкое кресло с регулируемым расстоянием между спинкой и сиденьем, с изменяемым углом сгиба коленей и положением сиденья легко настраивается под пациента любого роста и комплекции и управляется сенсорами на панели рабочего места ассистента либо беспроводной педалью (дополнительная опция – ручной пульт дистанционного управления). Стоматологическая установка премиум-класса F1 Prime без преувеличения является уникальной моделью. Эксклюзивная система полного бокового сайд-лифта с универсальной беспроводной педалью управления и современным эргономичным дизайном позволяют говорить о модели как о шедевре дентального искусства.

Компания Fimet не ограничивает своих клиентов в выборе опций и комплектации стоматологических установок: наряду с моделями, имеющими предустановленную базовую оснастку, производитель создаст именно для Вас любую конфигурацию и комплектность установки, руководствуясь Вашими требованиями и предпочтениями.

Некоторые особенности стоматологических установок Fimet:

- **мощная активная аспирационная система** (не требует подключения к компрессору);
- синхронизированное движение кресла, плевательницы, инструментов, аспирационной системы и управления светом;
- вращение кресла и всего стоматологического модуля на 180°;
- лёгкая левосторонняя возможность работы;
- **беспроводная педаль** максимизирует эргономику, гигиену и обеспечивает многофункциональное управление;
- автоматическое очищение инструментальных и аспирационных шлангов;
- **отсутствие эффекта натяжения шлангов верхней подачи**; самовозврат инструментальных шлангов в нулевое положение.

Официальный дистрибьютор Fimet Oy в Республике Беларусь ООО «Всемирные Системы Здравоохранения» предоставляет наилучшие для покупателя условия и гибкую систему оплаты.

Тел. (017) 292 38 10, 292 11 32

GSM (029) 382 55 96

г. Минск, ул. Я. Коласа, 21, пом. 4.

