

РАЗРАБОТКА КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЙ МОДЕЛИ ГОЛЕНИ

СМИРНОВ Д.С., асп.

Рассмотрены принципы и метод разработки конечно-элементной модели голени, которая принадлежит классу задач компьютерной биомеханики по вибродиагностике и виброреабилитации поврежденных конструкций мышечно-сухожильной ткани человека.

Ключевые слова: биомеханика, конечно-элементная модель голени, вибровоздействие, вибродинамические воздействия.

THE DEVELOPMENT OF FINITE-ELEMENTAL CRUS MODEL

SMIRNOV D.S., postgraduate

The article concerns the principles and methods of finite-elemental crus model development that is a problem of computer biomechanics of vibrodiagnostics and vibrorehabilitation of damaged musculotendinous tissues of man.

Key words: biomechanics, finite-elemental crus model, vibroeffect, vibrodynamic effect.

Введение. Создание конечно-элементной модели голени биомеханического объекта необходимо, прежде всего, для понимания физических процессов, определяющих какие затрагиваются ткани и выявляющих степень влияния каждой ткани на общую картину вибрации голени. Создание модели обусловлено также и необходимостью теоретического обоснования выбора частотного диапазона, характера воздействия на исследуемый объект и определения точки воздействия при различных видах повреждений объекта. Конечно-элементная модель позволяет детально рассматривать характер вибрации каждой ткани в отдельности и определять значения и направления виброперемещений в любой дискретной точке. Одна из задач создания модели сводится к общему анализу характера колебаний каждой ткани: кожа–мышца–кость [1].

Анализ конечно-элементной модели позволяет выбрать оптимальный способ и амплитуду воздействия при синусоидальной форме возмущающей силы. Точка приложения силы будет определяться максимальным откликом при минимальной амплитуде воздействия. Фактически это будет означать определение в процессе исследования частотной характеристики объекта в условиях максимальной эргономичности.

Таким образом, разрабатываемая конечно-элементная модель позволяет исследовать следующие параметры:

- частотный диапазон;
- характер воздействия;
- область вибровоздействия.

Объект исследования. В качестве объекта исследования выбрана голень среднестатистического человека без повреждений элементов опорно-двигательной системы. Для построения реалистичной компьютерной модели голени использовалась база данных фотографических снимков поперечных сечений тела человека среднего веса и роста, представленная в рамках

проекта Visible Human Project Национального Института Здоровья США. База данных содержит снимки среднестатистического мужчины, сделанные с шагом 1 мм (рис. 1).

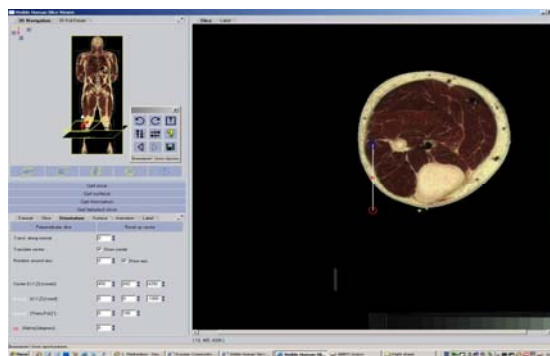


Рис. 1. Электронное изображение поперечного среза голени

Для повышения точности переноса электронного изображения в препроцессор основного расчетного комплекса было разработано программное обеспечение, которое позволяет в заданной координатной системе определять координаты произвольных точек рисунка в растровом графическом формате. Интерфейс программы обеспечивает управление выбором точек и сохранение их номеров и координат в текстовый файл в заданном формате, соответствующем программе чтения данных основного расчетного комплекса (рис. 2).

Средняя часть голени человека имеет топологическую структуру, слабо изменяющуюся вдоль продольной оси, в то время как внутренние органы дистальной и проксимальной частей претерпевают существенные изменения своей формы и размеров. Поэтому для описания диафиза использовались 20 сечений с шагом 10 мм, а при моделировании зон голеностопного и коленного сустава шаг был уменьшен до 2,5 мм. Каждое сечение было обработано с помощью программы расчета координат харак-

терных точек таким образом, чтобы отдельно были выделены основные элементы опорно-двигательной системы голени: большая и малая берцовые кости, ахиллово сухожилие, трехглавая мышца, мышцы передней поверхности голени, а также кожный покров.

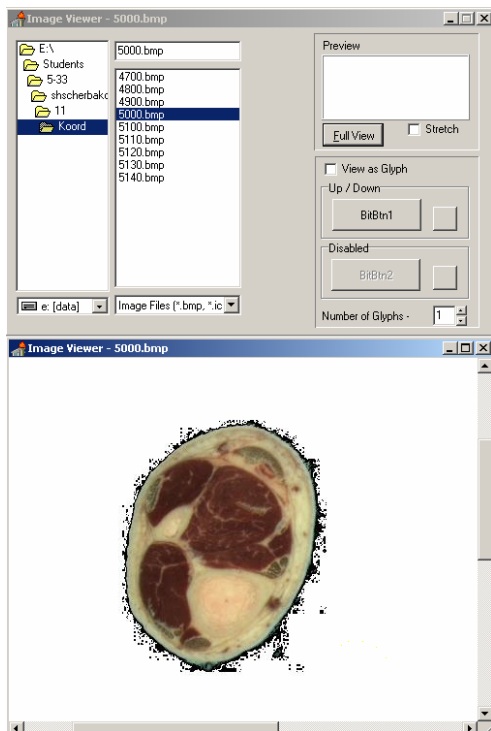


Рис. 2. Внешний вид программного обеспечения (модуль ввода точек)

Способ исследования. Разработка трехмерной модели голени была осуществлена в препроцессоре универсального конечно-элементного комплекса ANSYS (ANSYS Inc.). Полученные на предыдущем этапе точки, описывающие контуры твердых и мягких тканей в последовательных сечениях голени, использовались как ключевые точки разрабатываемой твердотельной пространственной модели объекта. После ввода ключевых точек в препроцессор они соединялись с помощью сплайнов, что обеспечивало получение плавных естественных контуров, ограничивающих выбранные элементы опорно-двигательной системы голени (рис. 3). Необходимо отметить, что мы рассматривали только внешний контур большой и малой берцовых костей без учета их достаточно сложной внутренней структуры, образованной компактной и губчатой тканью, насыщенной внутритканевой жидкостью, с каналом, заполненным костным мозгом. Обоснование такого упрощения модели заключается в том, что в качестве конечного результата предусматривается анализ колебаний мягких тканей голени, и в первую очередь, – сухожильно-мышечного комплекса. Внутренняя структура костей голени влияет на интегральные частотные характеристики как твердых тканей, так и голени в целом. Однако известно [1], что

спектр нижних собственных частот мягких тканей находится значительно ниже частотного спектра твердых тканей голени. Поэтому можно рассматривать отдельно колебания мягких тканей, учитывая лишь общие инерционные и жесткостные характеристики большой берцовой и малой берцовой костей. Следующим шагом после построения замкнутых контуров внутренних органов, выбранных для численного анализа, и внешнего контура сечения голени является формирование плоских областей, ограниченных этими контурами.

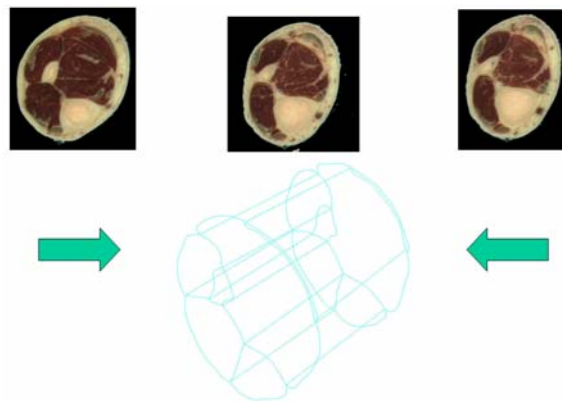


Рис. 3. Вид сплайнов, ограничивающих ткани голени

В результате получена последовательная система плоских поперечных сечений с выделенными подобластями, моделирующими отдельные внутренние органы. Путем соединения сечений линиями, проходящими через ключевые точки, получаем пространственный каркас для формирования объемов. Формируя поверхности, ограниченные построенными линиями, последовательно создавались замкнутые объемы, ограниченные полученными поверхностями (рис. 4).

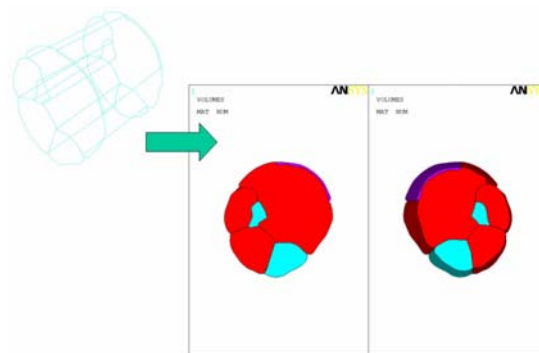


Рис. 4. Вид объемов, моделирующих основные элементы голени

Используя представленный пошаговый алгоритм формирования модели от ключевых точек к объемам, построена трехмерная реалистичная модель голени, включающая в себя основные элементы опорно-двигательной системы, такие как берцовые большую (tibia) и малую (fibula) кости, ахиллово сухожилие (t. Achillis), трехглавую мышцу (m. triceps surae),

состоящую из икроножной (*m. gastrocnemius*) и камбаловидной (*m. soleus*) мышц, мышц передней поверхности голени, и ограниченная кожным покровом (рис. 5).

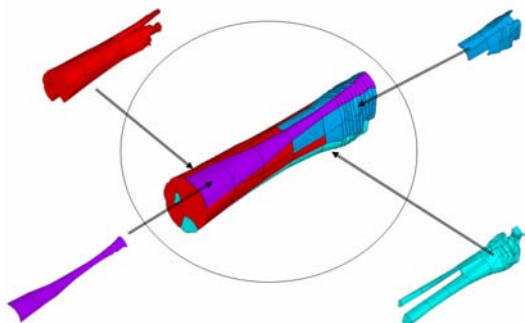


Рис. 5. Основные элементы модели

Создание конечно-элементной сетки.

Согласно общему подходу компьютерного моделирования, после построения так называемой твердотельной модели объекта необходимо сформировать конечно-элементную сетку, осуществив разбиение модели на конечные элементы соответствующего типа и формы. Выбор элемента диктует геометрия и характер поставленной задачи. Естественно-сложная пространственная форма объемов, моделирующих внутренние органы голени, с большим количеством острых углов приводит к необходимости использовать тетраэдрический конечный элемент, допускающий использование автоматической генерации сетки на объемах топологически-нерегулярной формы, т.е. ограниченных произвольным количеством сторон. Заметим, что гексаэдрический элемент теоретически обеспечивает более высокую точность, но автоматическое разбиение на такие элементы допустимо только для топологически-подобных шестисторонних объемов, что ограничивает его применение в биомеханическом моделировании.

Обсуждение результатов. В результате проведенных исследований сформирована сетка, состоящая из 78912 линейных тетраэдрических элементов. Общее количество узлов равно 15291. Конечно-элементная модель голени приведена на рис. 6.

Поскольку целью работы с моделью являлось исследование собственных частот и форм колебаний тканей голени, то в качестве

Смирнов Дмитрий Сергеевич,
ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
аспирант кафедры теоретической и прикладной механики,
телефон (4932) 26-97-13.

модели сплошной среды была выбрана модель линейно упругого тела.

При этом для исследования вибродинамических процессов ахиллова сухожилия в качестве граничных условий было выбрано жесткое закрепление узлов на торцах модели.

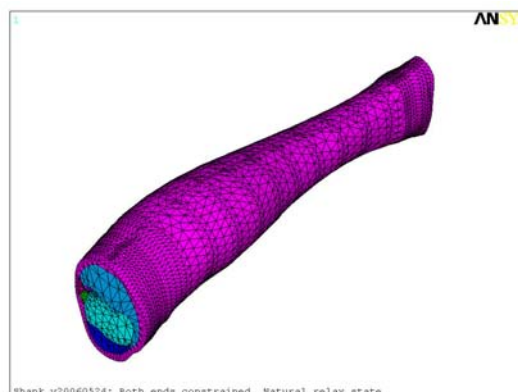


Рис. 6. Конечно-элементная модель голени

Таким образом, результатом работы явилось создание достаточно полной конечно-элементной модели ограниченного участка голени исследуемого объекта. Дальнейшее исследование вибродинамических процессов предполагается проводить в численном пре-процессоре универсального конечно-элементного комплекса ANSYS (ANSYS Inc.). Комплекс предназначен не только для создания объемной графической части модели, но может использоваться и для получения амплитудно-частотной характеристики, нахождения собственных частот и форм колебаний объекта. Кроме этого, появляется возможность моделирования изменения прочностных свойств объекта в целом при внесении локальных повреждений (дефектов) в мышечно-сухожильной и костной ткани опорно-двигательного аппарата человека.

Список литературы

1. Математическое моделирование и компьютерное моделирование в биомеханике: Учеб. пособие / А.В. Зинковский, Д.В. Ликсонов, Л.Б. Маслов и др.; Под ред. А.В. Зинковского и В.А. Пальмова. – СПб.: Изд-во Политех. ун-та, 2004.