



## ИНФОРМАТИКА

УДК 004.925.8

### ТЕХНОЛОГИЯ ПОСТРОЕНИЯ ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ МОДЕЛЕЙ БЕДРЕННЫХ КОСТЕЙ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ КОМПЬЮТЕРНОЙ ТОМОГРАФИИ

В.М. Соловьёв, П.В. Ирматов, М.С. Ирматова, М.Г. Щербаков

Саратовский государственный университет,  
Поволжский региональный центр новых информационных технологий  
E-mail: svm@sgu.ru, welecat@gmail.com, karteron@yahoo.com

В статье рассмотрена технология построения твердотельных моделей бедренных костей на основе данных компьютерной томографии, использованная в проекте «Разработка вычислительно-информационных технологий компьютерного моделирования на параллельных вычислительных комплексах травматологических и операционных процессов для оперативной выработки диагностических и лечебных рекомендаций».

**Ключевые слова:** твердотельная модель, CAD модель, математическое моделирование, расчетная сетка, компьютерное моделирование, Slicer, MeshLab, Salome, медицинские изображения, формат DICOM.

**Technology of Building Femur Bones Solid Models Based on Data from Computerized Axial Tomography**

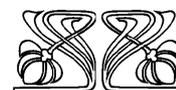
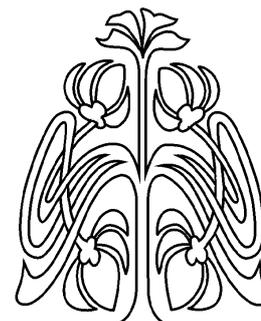
V.M. Solovyev, P.V. Irmatov, M.S. Irmatova, M.G. Scherbakov

Saratov State University,  
Volga Regional Center of New Information Technologies  
E-mail: svm@sgu.ru, welecat@gmail.com, karteron@yahoo.com

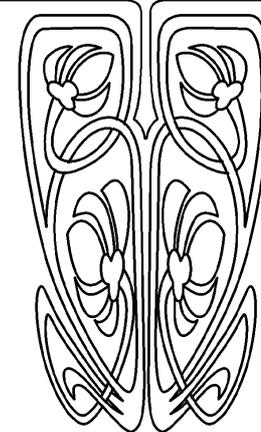
In this article we describe the technology used to build femur bone 3D models based on Computerized Axial Tomography data. This project is titled «Development of Computational and information technologies using computer modeling on parallel computing complexes for traumatological and surgical evaluations to enable efficient diagnostic and medical recommendations».

**Key words:** solid model, CAD model, mathematical simulation, mesh, computer simulation, Slicer, MeshLab, Salome, medical images, DICOM format.

При разработке методов компьютерного и биомеханического моделирования на основе моделей деформируемого твердого тела, позволяющих создавать трёхмерные модели переломов бедренной кости с пропорциональным учётом действия сил различных мышц на костные отломки, приходится сталкиваться с проблемой расчета систем, имеющих сложную геометрическую конфигурацию и нерегулярную физическую структуру. Такая сложная расчетная задача может быть решена только на основе высокопроизводительного программно-информационного комплекса (ПИК). Разрабатываемый ПИК — это комплекс параллельных вычислений травматологических и операционных процессов для оперативной выработки диагностических и лечебных рекомендаций, позволяющий выполнять такие расчеты при помощи приближенных численных методов, в частности, метода конечных элементов (МКЭ). Программно-информационный комплекс создается в рамках проекта: «Разработка вычислительно-информационных технологий компьютерного моделирования на па-



НАУЧНЫЙ  
ОТДЕЛ





раллельных вычислительных комплексах травматологических и операционных процессов для оперативной выработки диагностических и лечебных рекомендаций», выполняемом в ходе реализации федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2012 годы» по Государственному контракту от 30 сентября 2009 года № 02.514.11.4121.

Для биомеханического моделирования на основе моделей деформируемого твердого тела с использованием МКЭ необходима адекватная трехмерная геометрическая модель и «решатель», специально разработанный для травматологических и операционных процессов. Трехмерные (3D) геометрические модели являются основой для построения расчетных сеток при использовании МКЭ. Насколько 3D модели будут соответствовать реальной картине перелома бедренной кости человека, настолько и адекватной будет ситуация при диагностировании, подборе оптимальной оперативной тактики, проведении виртуальных хирургических и травматологических операций и предсказании возможных последствий. В общем виде адекватные (точные) геометрические модели перелома бедренной кости человека могут быть получены из трех источников: используя 3D анатомические атласы типа Glasklar Human 3D, Interactive Hip и т.д.; специальные сетевые приложения построения 3D моделей типа Google SketchUp; используя графические базы данных ПИК (Архивы 3D моделей костей человека), созданные на основе технологий построения трехмерных геометрических моделей в САД-системах.

Однако использование 3D анатомических атласов в качестве источников геометрических моделей имеет существенные недостатки. Во-первых, все 3D модели органов человека, включенные в анатомический атлас, являются «среднестатистическими» и не содержат различного рода патологий (в предложениях известных разработчиков атласов нет «патологических» моделей органов человека). Во-вторых, анатомические атласы и дополнительные 3D модели органов человека — это проприетарное программное обеспечение высокой стоимости, а также для защиты авторских прав в анатомических атласах, как правило, используются внутренние 3D графические форматы, не совместимые с САД/САЕ-системами. В-третьих, при использовании анатомических атласов и программ типа Google SketchUp нет необходимых дополнительных средств импортирования 3D моделей анатомических структур человека в САЕ-системы, используемые для моделирования перелома бедренной кости.

В силу приведенных выше особенностей 3D анатомические атласы имеют ограниченное применение, как источник геометрических моделей перелома бедренной кости человека. Наибольшее распространение среди травматологов, конечно, получают графические базы данных ПИК (архивы 3D моделей костей человека) по мере их создания и заполнения. Эти архивы 3D моделей костей человека и систем кость – фиксатор могут быть получены с использованием стандартных САД-технологий. Графическая интерпретация применения таких технологий показана на рис. 1.

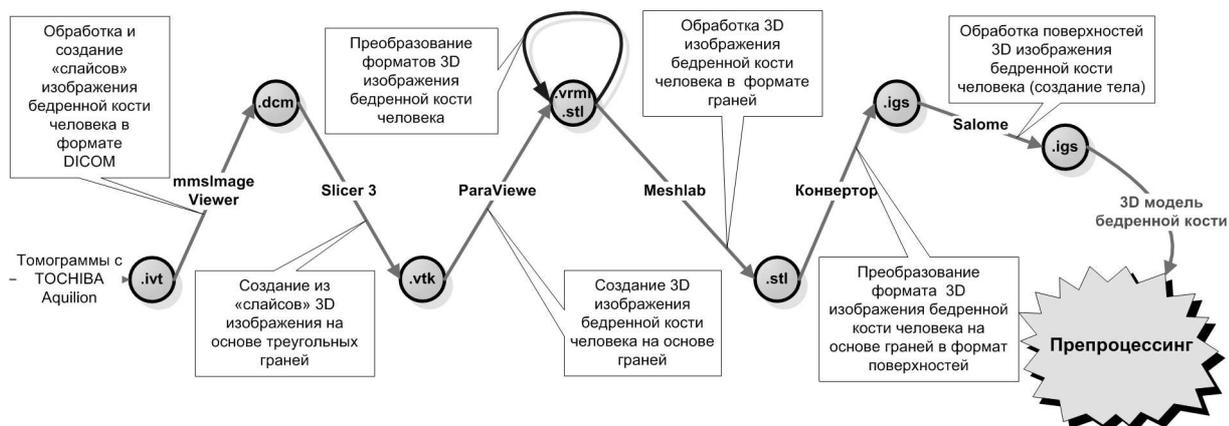


Рис. 1. Технология получения геометрических моделей костей человека

Как показано на рис. 1, создание геометрических моделей перелома бедренной кости начинается с получения томограмм анатомических структур (костей) человека. Для этого используются компьютерная томография (КТ) или магнитно-резонансная томография (МРТ), позволяющие получить



разрешение исследуемых органов менее 1 мм. Чаще всего результатом исследований на томографе является срез (slice) по плоскости, проходящий через изучаемый орган. Для построения геометрических моделей «слайсы» изучаемого органа (бедренной кости человека) могут представляться в виде файла, содержащего одну или несколько исследовательских сессий, а также в виде нескольких каталогов, каждый из которых содержит файлы (кадры) одной исследовательской сессии.

Для построения геометрических моделей бедренной кости человека в работе использовались мультисессионные файлы формата .ivt, полученные на томографе TOSHIBA Aquilion. Томограф Aquilion представляет собой мультисрезовый КТ-сканер высокого разрешения с возможностью одновременного получения 64-х срезов толщиной 0.5 мм за время полного оборота 0.35 с, что позволяет получить данные для длинных анатомических зон (бедренной кости) за одну сессию. Программное обеспечение (ПО) mmsImageViewer, входящее в состав томографа, позволяет не только просматривать слайсы сессий, но и экспортировать их в стандарт DICOM (Digital Imaging and COmmunications in Medicine), как показано на рис. 2.

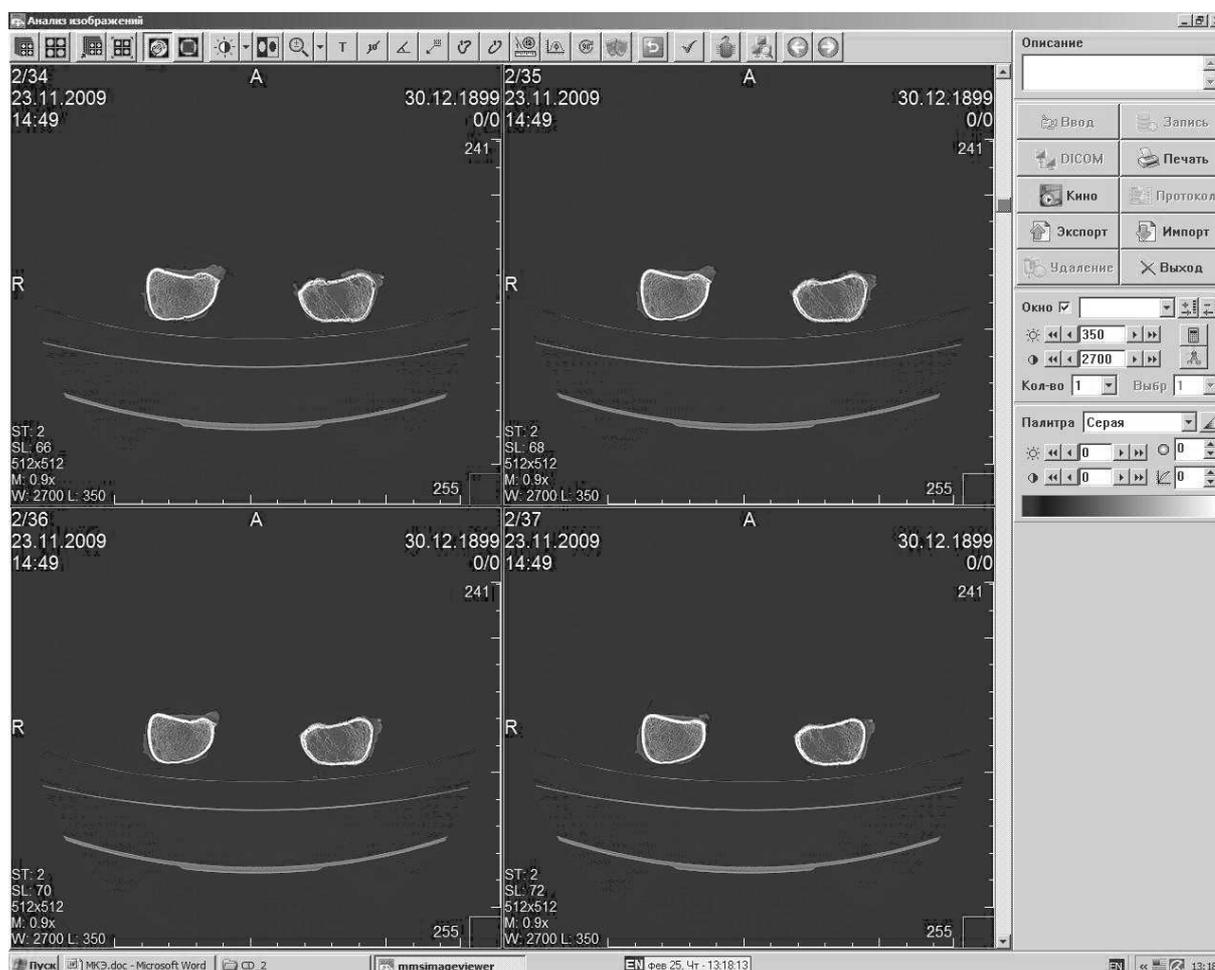


Рис. 2. Интерфейс программы mmsImageViewer

Формат DICOM — это промышленный стандарт для создания, хранения, передачи и визуализации медицинских изображений с теговой организацией. Работая в дальнейшем с DICOM-файлами (.dcm) или DICOM-каталогами (DICOMDIR), можно, используя особенности этого стандарта, получить 3D модели перелома бедренной кости человека.

Термин «медицинское изображение», широко используемый в стандарте DICOM, требует пояснения, так как это синоним понятию «сложное изображение» в обычном понимании. Для пояснения терминов «сложное изображение» – «медицинское изображение», воспользуемся ER-диаграммой (сущность – связь), широко применяемой при проектировании информационных систем (рис. 3).

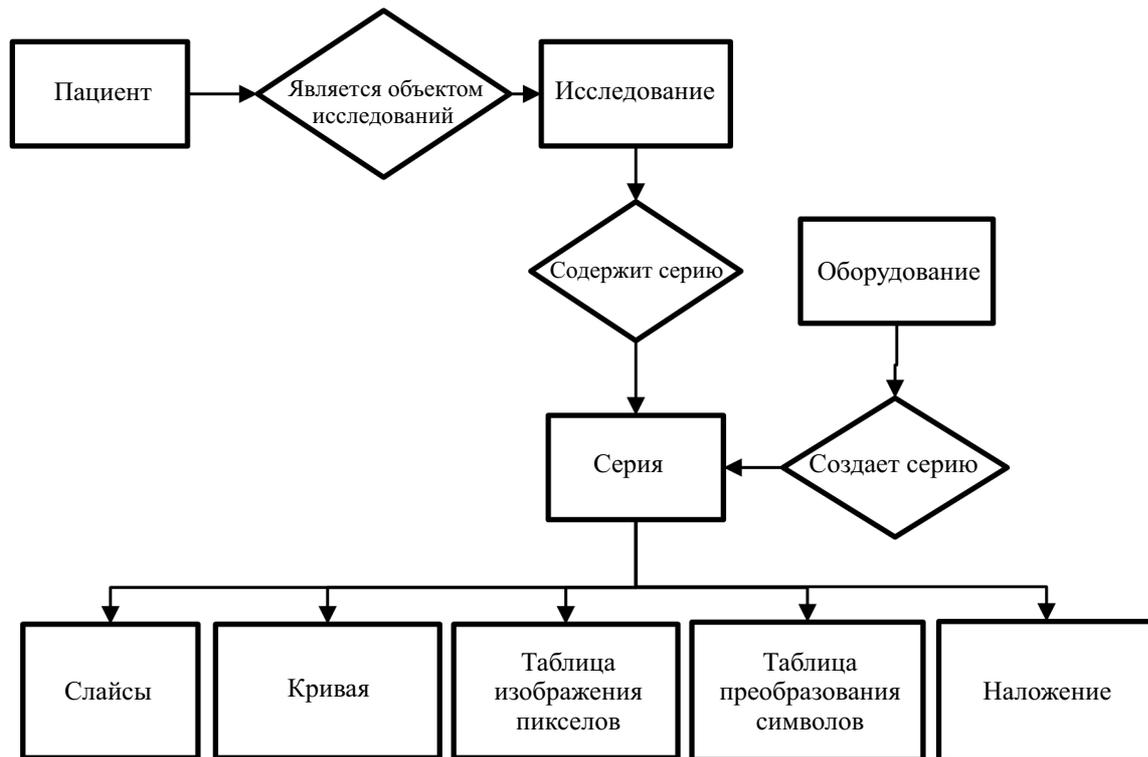


Рис. 3. Интерпретация понятия «медицинское изображение»

Из ER-диаграммы видно, что сложное (медицинское) изображение представляет собой серию изображений, полученных при исследовании пациента. Кроме элементарных изображений нескольких срезов (обычно в RAW формате), компонентами сложного изображения являются: кривые, задающие исследуемые области; наложения растровых текстов с параметрами исследования и другой текстовой информацией; несколько таблиц преобразования пикселей изображения при его визуализации; таблицы или формулы преобразования пикселей изображения из внутренней формы хранения, используемой производителем оборудования, в универсальную внешнюю форму и т.д.

Таким образом, медицинское изображение DICOM стандарта хранится обычно в отдельном каталоге в виде файлов с расширением .dcm и может быть преобразовано специальным ПО в 3D модели органов человека (3D модель бедренной кости человека).

Задача получения 3D модели бедренной кости человека из слайсов — это задача обратного инжиниринга, то есть создания трехмерной модели анатомической структуры с помощью «оцифровки» физического прототипа с использованием медицинского изображения. Задачи такого класса усложняются еще и дополнительными условиями, а именно необходимостью построения 3D модели, не в так называемом mesh формате, в котором модель представляется сеткой, состоящей из треугольников, а в виде CAD-модели (модели в виде деформируемого твердого тела или в виде поверхностей). Это условие необходимо для создания системы «отломки кости – фиксатор» и последующего решения задачи математического моделирования травматологических и операционных процессов. Для создания такой 3D модели на основе «оцифрованных» данных DICOM стандарта, как следует из рис. 1, можно использовать три основных программных продукта: Slicer 3 [1] (получение сетки из треугольных граней), MeshLab [2] (обработка и упрощение треугольной сетки) и Salome [3] (построение твердотельной модели). Кроме того, необходимо ещё две вспомогательных программы преобразования формата 3D изображения: ParaView [4] и Программа импорта (конвертер) геометрических примитивов ANSISTLtoSALOMEpy. Всё программное обеспечение является свободно распространяемым (Open Source), сконфигурированным или разработанным самостоятельно в соответствии с решаемой задачей.

Рассмотрим подробнее разработанную в рамках проекта программу импорта (конвертер) геометрических примитивов ANSISTLtoSALOMEpy. Программа предназначена для использования в качестве



вспомогательного средства при построении CAD моделей из файлов формата STL и может быть использована при обратной инженерии данных, полученных с компьютерного томографа и преобразованных в формат STL. Программа обеспечивает выполнение следующих функций.

1. Импорт файлов в формате ANSI STL.
2. Экспорт точек в формат интерпретатора SALOME.
3. Экспорт треугольников в формат интерпретатора SALOME.
4. Построение кривых по срезам и их экспорт в формат интерпретатора SALOME.

Построение кривых происходит по следующему алгоритму.

1. Необходимо найти точки, которые будут составлять первый вектор. Для этого вычисляется центр масс выбранной области точек и, используя такой параметр алгоритма как «порог», ограничивается область, равная половине значения порога слева и справа от центра масс по оси  $O_y$ . Затем выбираются точки слева и справа из ограниченной области с максимальной высотой (координатой по оси  $O_y$ ), они и будут составлять первый вектор. Точки выбираются слева направо по часовой стрелке. Обе они запоминаются как точки, составляющие кривую.

2. Затем из последней добавленной точки проводится линия, равная по длине величине порога, и поворачивается по часовой стрелке от параметра, задаваемого начальным углом, и до параметра, задаваемого конечным углом. Первая точка, которая встречается на пути, добавляется в кривую. Алгоритм останавливается в случае, если встречается точка, которая уже была добавлена, либо не встретилось ни одной новой точки.

3. После построения кривых на всех выбранных уровнях по оси  $z$  (параметры алгоритма «Уровни  $z$ ») создается файл в формате интерпретатора SALOME, по которому в дальнейшем строится поверхность.

На рис. 4 представлен внешний вид конвертера. Параметр «Округление» позволяет задать шаг, с которым работал томограф, чтобы пропустить пустые уровни в .stl файле.

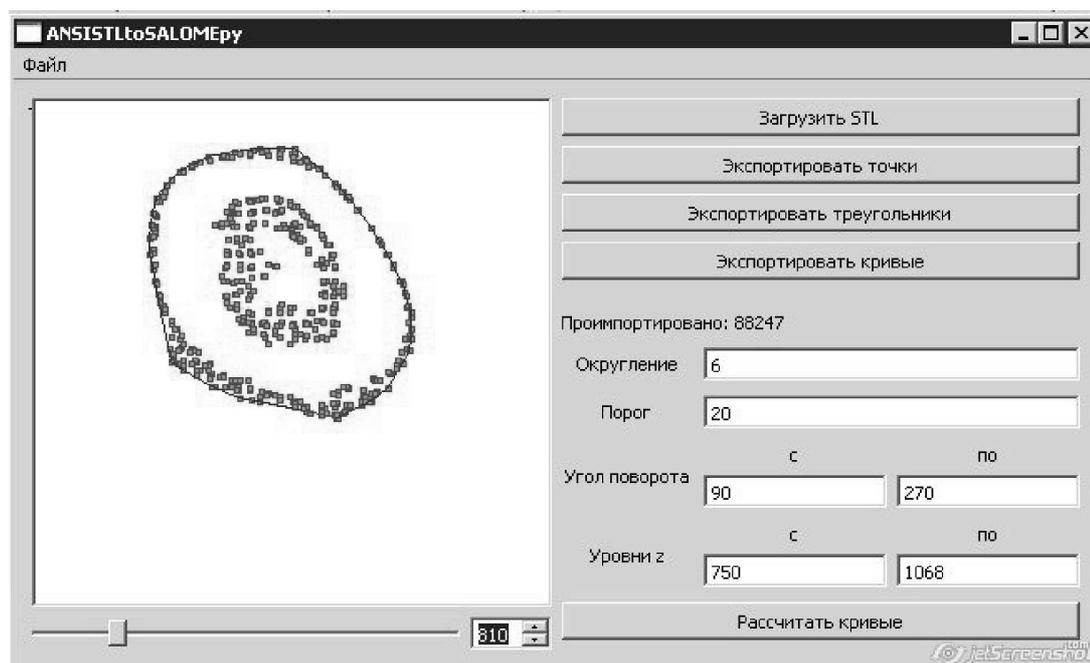


Рис. 4. Интерфейс программы импорта (конвертера) геометрических примитивов ANSISTLtoSALOMEpy

В дальнейшем созданные с помощью описанной технологии твердотельные модели бедренной кости человека используются для моделирования конкретного клинического случая (перелома бедренной кости). Такое моделирование может быть выполнено в какой-либо CAD-системе (Salom, Kompas-3D и т.д.), как показано на рис. 5. При накоплении архива конкретных клинических случаев CAD-системы можно и не использовать, а готовые 3D модели извлекать в дальнейшем из базы данных ПИК.



Моделирование перелома бедренной кости человека осуществляется с использованием рентгенограмм конкретного клинического случая. После получения 3D моделей отломков бедренной кости (рис. 5), на их основе в САD-системе создается модель кость – фиксатор, которая передается для дальнейших инженерных расчетов в препроцессинг ПИК (рис. 6).

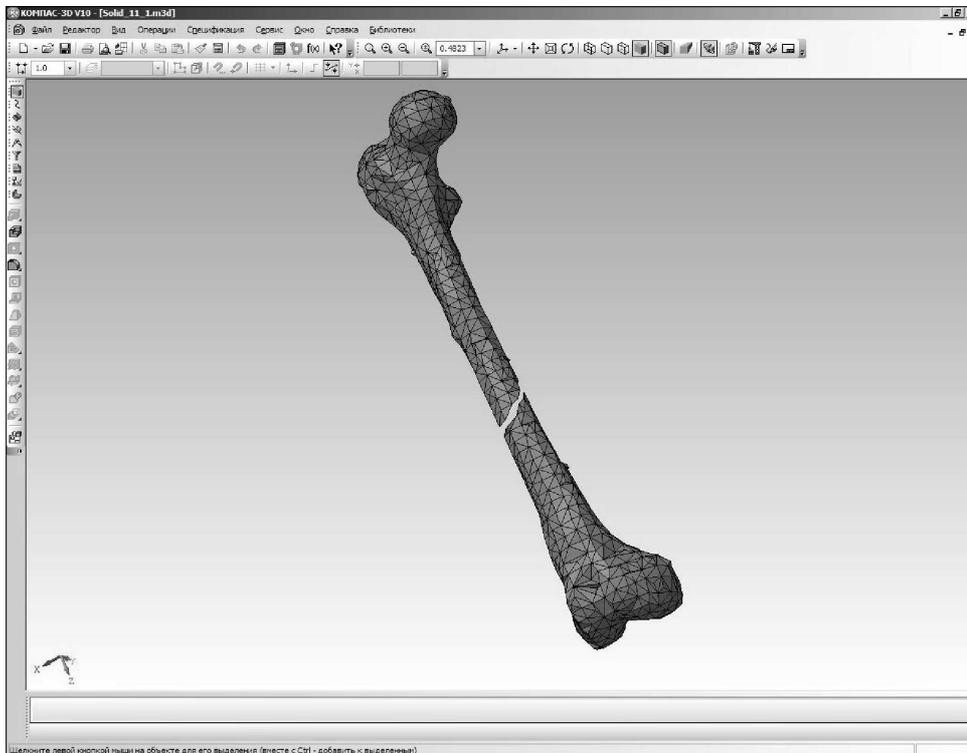


Рис. 5. Моделирование перелома бедренной кости в Kompas-3D

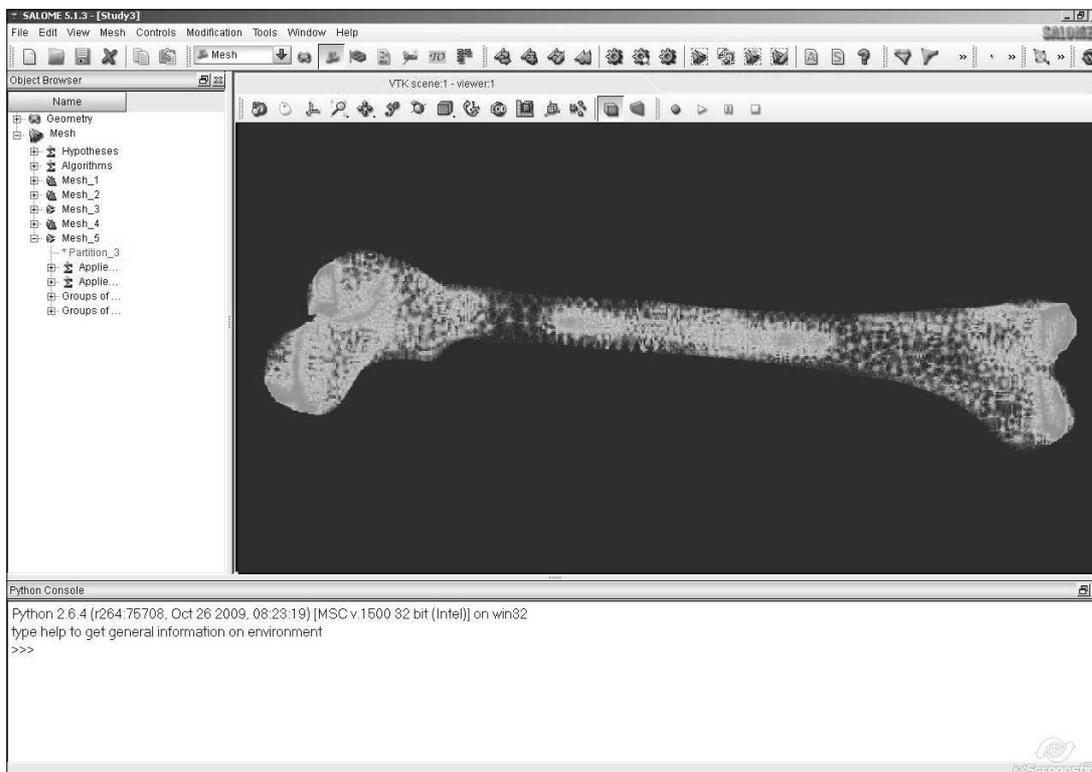


Рис. 6. Моделирование системы кость – фиксатор в Salome 5.1.3 (видно соединение отломков бедренной кости человека с помощью металлофиксатора)



На подготовленную таким образом адекватную трехмерную модель перелома бедренной кости взрослого человека накладывается расчетная сетка, задаются механические свойства металлофиксаторов и костных отломков, нагрузки на бедренную кость, граничные условия и т.д., которые являются основой для дальнейшего моделирования на основе МКЭ. В конечном итоге, результатом моделирования может быть количественная оценка смещений, прочностных характеристик системы кость – фиксатор, стабильность (допустимая микроподвижность, не превышающая заданную травматологом). Весь дальнейший процесс моделирования выполняется с использованием программ «решателей», созданных на основе МКЭ и являющихся неотъемлемой частью применяемой САЕ-системы, например, Elmer.

*Работа выполнена в рамках Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2012 годы» (контракт 02.514.11.4121).*

### **Библиографический список**

1. 3D Slicer [Электронный ресурс]. URL: [http:// www.slicer.org/](http://www.slicer.org/) (Дата обращения 10.03.10).
2. MeshLab [Электронный ресурс]. URL: [http:// meshlab.sourceforge.net/](http://meshlab.sourceforge.net/) (Дата обращения 10.03.10).
3. Salome [Электронный ресурс]: The Open Source Integration Platform for Numerical Simulation. URL: <http://www.salome-platform.org/> (Дата обращения 10.03.10).
4. ParaView [Электронный ресурс]: Open Source Scientific Visualization. URL: [http:// www.paraview.org/](http://www.paraview.org/) (Дата обращения 10.03.10).
5. Zienkiewicz, O.C. The finite element method for solid and structural mechanics. Sixth edition / O.C. Zienkiewicz, R.L. Taylor. – Oxford: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2005. – 631 p.