

На правах рукописи

Измайлова Заира Татархановна

МЕТОДЫ И БИОТЕХНИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ  
ЧРЕСКОСТНОГО ОСТЕОСИНТЕЗА

Специальность: 05.11.17 – Приборы, системы и изделия  
медицинского назначения

А в т о р е ф е р а т  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2009

Работа выполнена в государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)»

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор Бегун П.И.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор Коротков К. Г.

кандидат физико-математических наук, профессор Смольников Б. А.

Ведущая организация – ФГУ "Санкт-Петербургский научно-практический центр медико-социальной экспертизы, протезирования и реабилитации инвалидов имени Г. А. Альбрехта

Защита состоится «25» декабря 2009 г. в \_\_\_\_ часов на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.238.09 Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) по адресу: 197376, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, 5

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета.

Автореферат разослан «23» ноября 2009 г.

Ученый секретарь  
совета по защите докторских  
и кандидатских диссертаций

Болсунов К.Н.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Переломы костей верхних и нижних конечностей являются самыми распространенными и составляют примерно 80-90 % от общего количества переломов. Огромное количество работ посвященных методам реабилитации пациентов, после перенесенных переломов, свидетельствуют об актуальности этой проблемы. В клинической практике используют различные методы реабилитации, но наибольшее распространение получил метод чрескостного остеосинтеза. Чрескостный остеосинтез – метод лечения повреждений костей и суставов, для реализации, которого используют связанные с костью внешние по отношению к поверхности кожи конструкции. Несмотря на всю универсальность метода чрескостного остеосинтеза, врачи постоянно работают над поиском новых схем фиксации костных отломков и совершенствование существующих. Большинство исследований чрескостного остеосинтеза направлены на определение жесткости фиксации костных отломков. На данный момент подробно изучены оптимальные позиции и уровни введения чрескостных элементов во избежание травмирования магистральных сосудов и нервов. Но вопрос выбора компоновок чрескостного остеосинтеза, обеспечивающих допустимые деформации регенерата до сих пор остается открытым.

Совершенствованием чрескостного остеосинтеза занимаются не только в институтах травматологии и ортопедии, но и в лабораториях с инженерным уклоном. В последние годы для этих целей активно используется компьютерное моделирование, которое является одним из эффективных методов изучения сложных биомеханических систем. Построение компьютерных моделей и последующий анализ, позволяют оценить допустимые нагрузки при чрескостном остеосинтезе бедренной кости и костей предплечья. Анализ моделей чрескостного остеосинтеза при переломах бедренной кости и костей предплечья, построенных в программе SolidWorks, позволяет оценить влияние модульной трансформации на процесс регенерации кости.

Актуальность работы обусловлена:

- отсутствием методов прогнозирования состояния чрескостного остеосинтеза костей предплечья и бедренной кости;
- существующими потребностями в системе для исследования чрескостного остеосинтеза бедренной кости и костей предплечья, позволяющей про-

гнозировать критическое состояние чрескостного остеосинтеза при различных внешних воздействиях.

– возможностями современных компьютерных технологий.

**Цель работы:** повышение эффективности прогнозирования критического состояния чрескостного остеосинтеза бедренной кости и костей предплечья при различных внешних воздействиях.

**Задачи исследования.** Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Разработка компьютерных моделей бедренной кости и костей предплечья, учитывающих реальные параметры и механические свойства при чрескостном остеосинтезе;
2. Создание метода исследования напряженно-деформированного состояния, возникающего при чрескостном остеосинтезе бедренной кости и костях предплечья и модульной трансформации;
3. Проведение экспериментальных исследований жесткости чрескостного остеосинтеза при использовании аппаратов внешней фиксации;
4. Разработка биотехнической системы и методического обеспечения для исследования состояния чрескостного остеосинтеза бедренной кости и костей предплечья при различных внешних воздействиях.

**Методы исследования.** В работе использованы методы теории механики твердого деформированного тела, методы математической статистики, методы моделирования на основе компьютерной программы SolidWorks и метод конечных элементов.

**Научная новизна:**

1. Разработаны компьютерные модели чрескостного остеосинтеза бедренной кости и костей предплечья для исследования напряженно-деформированного состояния при различных внешних воздействиях, позволяющие оценить его критическое состояние;
2. Создана методика исследования напряжений и перемещений при чрескостном остеосинтезе бедренной кости и костей предплечья, позволяющая строить для них компьютерные модели;
3. Разработана биотехническая система и методическое обеспечение для исследования чрескостного остеосинтеза бедренной кости и костей предплечья на основе компьютерного моделирования и анализа биологических структур по данным компьютерных томограмм.

**Практическую ценность работы составляют:**

1. Компьютерные модели спицевого и комбинированного чрескостного остеосинтеза бедренной кости и костей предплечья при различных внешних воздействиях;
2. Биомеханический метод исследования напряженно-деформированного состояния чрескостного остеосинтеза бедренной кости и костей предплечья;
3. Экспериментальные исследования жесткости чрескостного остеосинтеза, позволяющие оценить адекватность компьютерного моделирования;
4. Биотехническая система и методическое обеспечение для исследования состояния чрескостного остеосинтеза бедренной кости и костей предплечья при различных внешних воздействиях.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Задание геометрических параметров по клиническим данным - компьютерным томограммам отражает индивидуальные анатомические особенности пациента, что учитывается в разработанных моделях.
2. Использование биомеханического компьютерного метода исследования напряженно-деформированного состояния, возникающего при чрескостном остеосинтезе бедренной кости и костях предплечья и модульной трансформации, позволяет оценить их критическое состояние при различных внешних нагрузках.
3. Исследование состояния чрескостного остеосинтеза бедренной кости и костей предплечья целесообразно при использовании методического обеспечения и биотехнической системы.

**Внедрение результатов.** Результаты исследований, включающие компьютерные модели и алгоритм исследования напряжений и перемещений при чрескостном остеосинтезе бедренной кости и костей предплечья внедрены в клиническую практику Центра семейной, восстановительной и спортивной медицины «Пятый океан» и РНИИТО им. Р.Р. Вредена и подтверждены актами о внедрении.

**Апробация работы.** Основные научные и практические результаты работы докладывались и обсуждались на 21 всероссийских и международных научных и научно-технических конференциях, в том числе: 59-ая научно – техническая конференция, посвященная Дню радио (СПб-2004); XVIII всероссийская научно-техническая конференция студентов, молодых ученых и специали-

стов «Биомедсистемы – 2005» (Рязань, 2005); «Юбилейная 60-я Научно-техническая конференция, посвященная 110-летию изобретения радио» (СПб-2005); VIII всероссийская конференция по биомеханике «Биомеханика-2006» (Н.Новгород-2006); VII международная научно-техническая конференция «Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии – ФРЭМЭ-2006» (Владимир-2006); XIX всероссийская научно-техническая конференция студентов, молодых ученых и специалистов «Биомедсистемы – 2006» (Рязань, 2006); Политехнический симпозиум «Молодые ученые – промышленности Северо-Западного региона» (СПб- 2006); IX всероссийская конференция по биомеханике «Биомеханика-2007» (Н.Новгород-2007); Политехнический симпозиум «Молодые ученые – промышленности Северо-Западного региона» (СПб-2007); Всероссийская научно-практическая конференция «Клеточные и нанотехнологии в биологии и медицине» (Курган - 2007); Труды Всероссийских научных чтений «Будущее сильной России - в высоких технологиях» (СПб - 2007); IX всероссийская конференция по биомеханике «Биомеханика-2008» (Н.Новгород-2008); VIII международная научно-техническая конференция «Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии – ФРЭМЭ-2008» (Владимир, 2008); Восьмой Всероссийский симпозиум по прикладной и промышленной математике «Обзор прикладной и промышленной математики» (Москва - 2008); Труды Всероссийских научных чтений «Будущее сильной России - в высоких технологиях» (СПб - 2008); Современные компьютерные технологии в биомеханике и медицине (СПб - 2009); «62-я Научно-техническая конференция» (СПб-2009); Третий Всероссийский форум студентов, аспирантов и молодых ученых «Наука и инновации в технических университетах» (СПб - 2009); Рабочее совещание «БИОМЕХАНИКА-2009 (СПб - 2009); Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям (СПб - 2009); Всероссийская школа– семинар «Математическое моделирование и биомеханика в современном университете» (Ростов – на – Дону - 2008).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 18 научных работ, из них 9 статей, из них 3 статьи опубликованы в ведущих рецензируемых научных изданиях и журналах, определенных ВАК, из них 1 статья опубликована в журнале, рекомендованном экспертным советом по электронике, измерительной технике, радиотехнике и связи, 9 работ в трудах и материалах научно-технических конференций.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, 4 глав, за-

ключения, списка литературы, включающего 57 наименований. Основная часть работы изложена на 139 страницах машинописного текста. Работа содержит 68 рисунков и 28 таблиц.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность исследования, определены цели и задачи работы, объект и предмет исследования. Сформулированы научные положения, выносимые на защиту, определены их научная новизна и практическая значимость, приведены сведения об апробации и внедрении результатов работы.

**В первой главе** проведен анализ современного состояния исследования чрескостного остеосинтеза и выявлены проблемы связанные с отсутствием однозначной методики исследования состояния костей при чрескостном остеосинтезе.

Существующий комплекс методов исследования не дает адекватного диагностического обеспечения чрескостного остеосинтеза. Недостатком является отсутствие системы предоперационного прогнозирования, позволяющей прогнозировать критическое состояние чрескостного остеосинтеза при различных внешних воздействиях. Следовательно, невозможно обоснованно осуществить выбор типа аппарата внешней фиксации и минимизировать риск возникновения осложнений при чрескостном остеосинтезе.

**Во второй главе** рассмотрены положения, на которых основывается модель; определены исходные данные; выявлены параметры, отвечающие на вопросы, связанные с проблемой, для решения которой и была поставлена задача.

Компьютерные модели для исследования перемещений и напряжений, возникающих при чрескостном остеосинтезе, реализованы при использовании модуля конечно-элементного анализа Simulation, интегрированного в систему пространственного моделирования SolidWorks.

Содержательная модель чрескостного остеосинтеза костей предплечья построена при следующих допущениях: 1) материалы костей, спиц, колец – однородные и изотропные; 2) среда сплошная; 3) начальные напряжения в биологических структурах и во всех элементах конструкции аппарата, кроме спиц, не учитываются; 4) предплечья жестко закреплено по проксимальной поверхности, спицы и стержни жестко закреплены на опорных кольцах; 5) к дистальному концу предплечья приложены сосредоточенные силы  $P$  (ком-

прессия - дистракция),  $P_1$ (сгибание - разгибание) и  $P_2$  (приведение - отведение) (рис.1, а)

Компьютерные модели костей построены на основе томографических снимков выполненных с шагом 2 мм. Приняты обозначения геометрических параметров костей и элементов аппарата внешней фиксации:  $L$  – длина предплечья,  $l$  – расстояние от места закрепления кости до первого кольца,  $l_1, l_2, l_3$  – расстояние между кольцами,  $d_{ок}$  – внутренний диаметр опорного кольца,  $d_o$  – диаметр отверстий на кольце,  $h_{ок}$  – толщина опорного кольца,  $d_c$  – диаметр спицы,  $d_{ст}$  – диаметр стержня,  $l_c$  – длина спицы,  $l_{ст}$  – длина стержня,  $n$  – количество отверстий в опорном кольце.

Введены обозначения для модуля упругости  $E_i$  и коэффициента Пуассона  $\nu_i$  каждой  $i$ -ой структуры: костей предплечья  $E_k$  и  $\nu_k$ , межкостной мембраны  $E_{мкм}$  и  $\nu_{мкм}$ , кольцевидной связки  $E_{кс}$  и  $\nu_{кс}$ , передней связки  $E_{пс}$  и  $\nu_{пс}$ , фиброзно-хрящевое комплекса  $E_{фк}$  и  $\nu_{фк}$ , опорных колец  $E_{ок}$  и  $\nu_{ок}$ , спиц  $E_c$  и  $\nu_c$ , стержней  $E_{ст}$  и  $\nu_{ст}$ , регенерата  $E_r$  и  $\nu_r$ .

На рис. 1,б приведена компьютерная модель чрескостного остеосинтеза костей предплечья при переломе средней трети. Число введенных конечных элементов до 170 тысяч существенно влияет на результаты вычисления перемещений, дальнейшее увеличение числа конечных элементов на результатах вычислений сказывается незначительно (рис. 1, в). Поэтому, для достижения необходимой точности, при минимальных затратах времени на вычисления напряженно-деформированного состояния чрескостного остеосинтеза костей предплечья при переломе средней трети целесообразно задавать разбиение на 170 тысяч конечных элементов.

Вычисления перемещений и напряжений проведены при следующих механических параметрах:  $E_{ок}=2 \cdot 10^{11}$  Па,  $\nu_{ок}=0,28$ ;  $E_{ст}=1,1 \cdot 10^{11}$  Па,  $\nu_{ст}=0,28$ ;  $E_k=1 \cdot 10^{10}$  Па,  $\nu_k=0,4$  (рис. 1, г).

При первом и втором этапах модульной трансформации модели чрескостного остеосинтеза костей предплечья при переломе средней трети построены с учетом образования костного регенерата. Модульная трансформация аппарата внешней фиксации - поэтапное удаление спиц и внешних опор для уменьшения жесткости фиксации костных фрагментов, в соответствии с ростом несущей способности костного регенерата, что положительно сказывается на его функциональной перестройке. В дополнение к допущениям принятым для первой модели, ведено следующее: материал регенерата од-



нородный и изотропный, модуль упругости регенерата  $E_{p1}=2 \cdot 10^8$  Па на первом и  $E_{p2}=2 \cdot 10^9$  на втором этапах модульной трансформации.

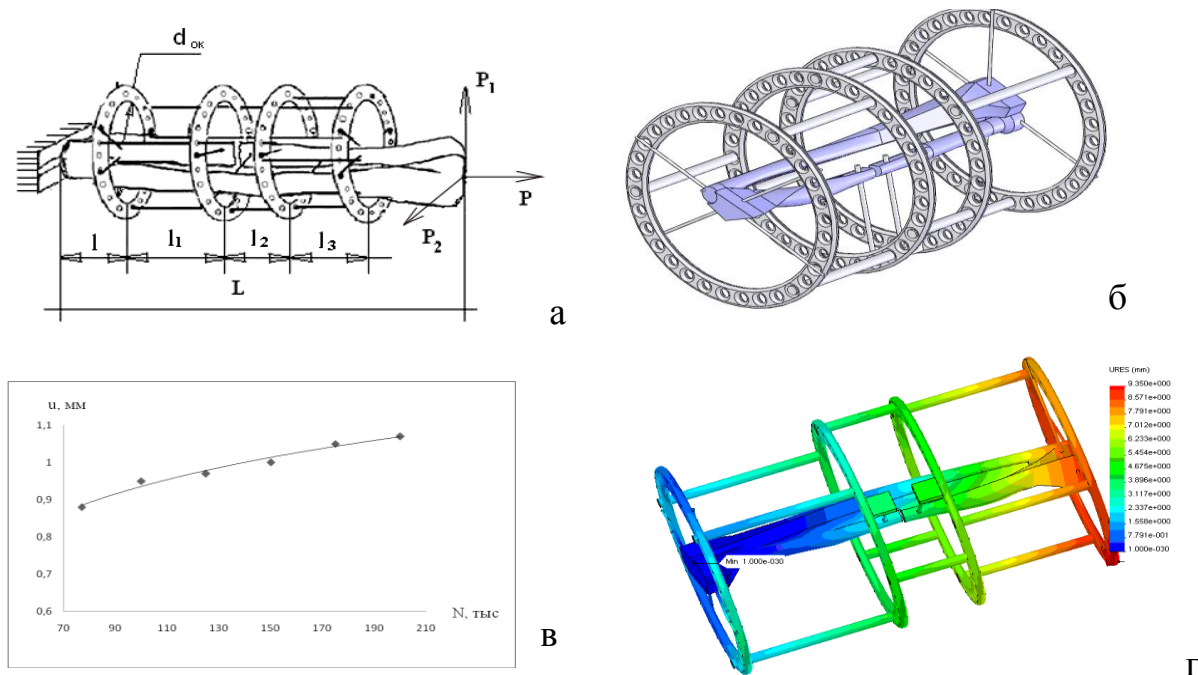


Рис.1. Схема содержательной модели костей предплечья (а), компьютерная модель предплечья при чрескостном остеосинтезе (б), зависимость перемещений от количества конечных элементов (в) и эпюры перемещений (г)

Надежность применения компьютерных моделей для исследования напряженно-деформированного состояния при чрескостном остеосинтезе костей предплечья подтверждена сопоставлением результатов вычислений с результатами экспериментальных исследований. Погрешность вычислений максимально-допустимых нагрузок составляет 10 – 40 %.

При построении моделей чрескостного остеосинтеза бедренной кости в дополнение к допущениям для моделей чрескостного остеосинтеза костей предплечья введены следующие: 1) бедренная кость жестко закреплено по проксимальной поверхности; 2) мышечные нагрузки  $P_i$  приложены в зоне прикрепления мышц к бедренной кости под углами  $\alpha_i$  к ее оси.

Для оценки адекватности компьютерного моделирования проведены экспериментальные исследования жесткости аппаратов внешней фиксации совместно с сотрудником РНИИТО им. Р.Р. Вредена Кулешом П.Н. Исследования проведены с использованием биомеханического стенда (патент РФ №2246139), состоящего из станины и узлов фиксации исследуемых конструкций. Регистрация перемещений осуществлена при помощи индикаторов

линейных перемещений циферблатного типа с ценой деления 0,01мм. В качестве силозадающих элементов использованы чугунные тарированные грузы для вытяжения, при использовании которых известна погрешность, которая является постоянной и составляет 1%.

На рис.2. представлена схема смещения костных отломков при нагружение дистального костного отломка при условии закрепления проксимального. Величину перемещения костных отломков относительно друг друга  $X$  и угол раскрытия межфрагментарной щели  $\alpha$  определяют по формулам:

$$X = D_1 + (D_1 - D_2)a/b,$$

$$\alpha = \arctg ((D_1 - D_2)/b),$$

где  $D_1$  и  $D_2$  - показания проксимальной и дистального индикаторов линейных перемещений,  $b$  - расстояние между датчиками,  $a$  - расстояние от перелома до проксимального индикатора.

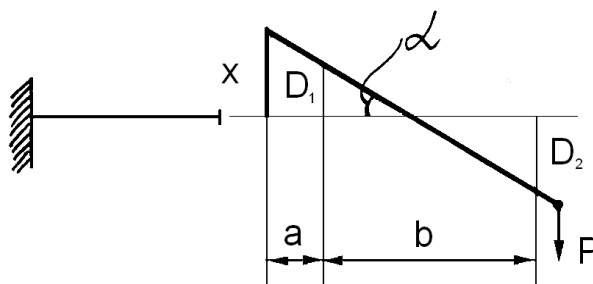


Рис.2. Схема смещения костных отломков

**В третьей главе** представлены: 1) результаты экспериментальных исследований жесткости аппаратов внешней фиксации при переломах костей предплечья; 2) вычисления напряжений и перемещений при различных переломах бедренной кости и костей предплечья; 3) проведено исследование влияния модульной трансформации на процесс воспитания регенерата; 4) проведены расчеты напряжений и перемещений с учетом соединительнотканых структур; 4) проведена оценка влияния мышечных усилий на смещение костных отломков при переломах бедренной кости.

1. Экспериментальные исследования проведены для девяти наиболее часто встречаемых в клинической практике типов переломов: переломы проксимальной, средней и дистальной трети лучевой кости, локтевой кости и обеих костей. Скомпонованы 18 (9 спицевых и 9 спицестержневых) компоновок аппаратов внешней фиксации, определены компоновки, обеспечиваю-

щие стабильность остеосинтеза при минимальном количестве чрескостных элементов. В табл. 1 представлены максимально-допустимые нагрузки и коэффициенты жесткости компоновок аппаратов внешней фиксации при переломах средней трети локтевой, лучевой и обеих костей.

Таблица 1.

Компоновка	Спицевая		Комбинированная	
Перелом средней трети локтевой кости				
Перемещения	Р, Н	с, Н/мм	Р, Н	с, Н/мм
Сгибание	11	7,9	92	93,9
Разгибание	11	7,5	99	103,6
Приведение	14	8,2	18	17,5
Отведение	45	41,9	15	14
Перелом средней трети обеих костей				
Сгибание	39	38	45	48
Разгибание	4	4,5	44	84
Приведение	31	31,5	36	51,2
Отведение	26	32,1	36	51,5
Перелом средней трети лучевой кости				
Сгибание	39	38	64	48
Разгибание	4	3,7	52	84
Приведение	65	69,2	75	72,5
Отведение	72	70,7	82	85,9

Все полученные в ходе экспериментальных исследований данные подвержены статистической обработке по закону распределения случайной величины Стьюдента с доверительной вероятностью 0,9–0,99 (доверительная вероятность погрешности в динамике 0,9–0,95 вполне достаточна для практических целей). Погрешность экспериментальных исследований составляет 3,5 – 5 %.

2. На рис. 3,а, г представлены геометрические компьютерные модели чрескостного остеосинтеза костей предплечья при модульной трансформации, которые построены при допущениях: материалы костного регенерата, межкостной мембраны, кольцевидной связки и фиброзно-хрящевого комплекса однородные изотропные, среда сплошная, начальные напряжения отсутствуют. Вычисления перемещений и напряжений проведены при механических параметрах: модуль упругости регенерата  $E_{p1}=2 \cdot 10^8$  Па,  $E_{p2}=2 \cdot 10^9$ , межкостной мембраны  $E_{МКМ}=120$  МПа, кольцевидной связки  $E_{КС}=34$  МПа, фиброзно-хрящевого комплекса  $E_{КС}=10$  МПа, коэффициент Пуассона  $\nu_{p1} = \nu_{p2} = \nu_{КС} = \nu_{МКМ} = \nu_{фк} = 0,4$ .

Для достижения необходимой точности при минимальных затратах времени на вычисление напряженно-деформированного состояния проведено разбиение на 200 тысяч конечных элементов.

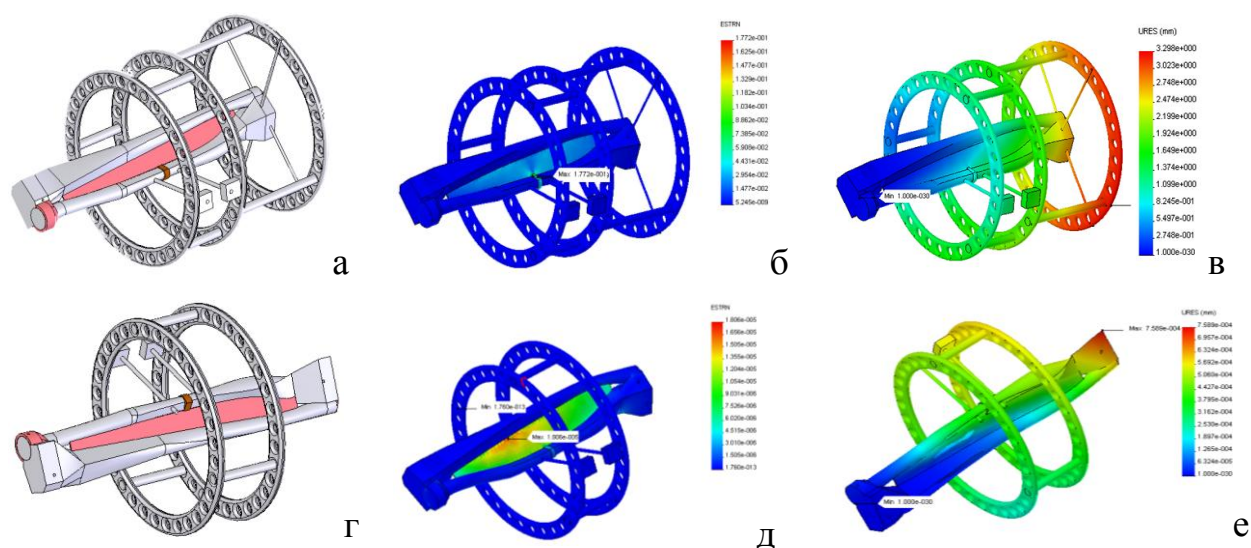


Рис. 3. Геометрические компьютерные модели чрескостного остеосинтеза костей предплечья при первом (а) и втором (г) этапах модульной трансформации, эпюры деформаций (б, д) и перемещений (в, е)

На рис.3 приведены эпюры деформаций и перемещений, как видно из эпюр максимальные деформации происходят в межкостной мембране и костном регенерате при поперечных нагрузках (сгибании - разгибании и приведении - отведении). При этом максимальные деформации межкостной мембраны происходят в зоне перелома при передаче усилий с лучевой на локтевую кость.

При модульной трансформации постепенное снижение жесткости, и в то же время уменьшение громоздкости чрескостного аппарата приводит к прогнозируемому увеличению нагрузки на костный регенерат в соответствии с ростом его несущей способности, что положительно сказывается на его функциональной перестройке.

Построены компьютерные модели при 9 основных типах переломов костей предплечья, проведены вычисления напряжений и перемещений при чрескостном остеосинтезе костей предплечья, определены максимально-допустимые нагрузки, при которых происходит смещение костных отломков на 1 мм.

3. Содержательная модель чрескостного остеосинтеза бедренной кости построена при следующих допущениях: 1) материалы костей, спиц, стержней,

колец – однородные и изотропные; 2) среда сплошная; 3) начальные напряжения в биологических структурах и во всех элементах конструкции аппарата, кроме спиц, не учитываются; 4) начальное натяжение спиц  $P_c$ ; 5) бедренная кость жестко закреплено по проксимальной поверхности; 6) к дистальному концу бедренной кости приложены сосредоточенные силы  $P$ ,  $P_1$  и  $P_2$ ; 7) мышечные нагрузки  $P_i$  приложены в зоне прикрепления мышц к бедренной кости под углами  $\alpha_i$  к ее оси.

Геометрические компьютерные модели бедренной кости построены при следующих геометрических параметрах:  $L=430$  мм;  $l_1=88$  мм;  $l_2=88$  мм;  $l_3=132$ ;  $t_2=27$ ;  $t_3=27,72$ ;  $t_4=27$ ;  $t_5=28,55$ ;  $t_6=34,6$ ;  $d_{ок}=180, 195, 225$  и  $250$  мм;  $d_c=1,8$  мм;  $d_{ст}=8$  мм;  $n=2$ ; углы  $\alpha=30^\circ$  и  $\alpha_1=25^\circ$  (рис.4).

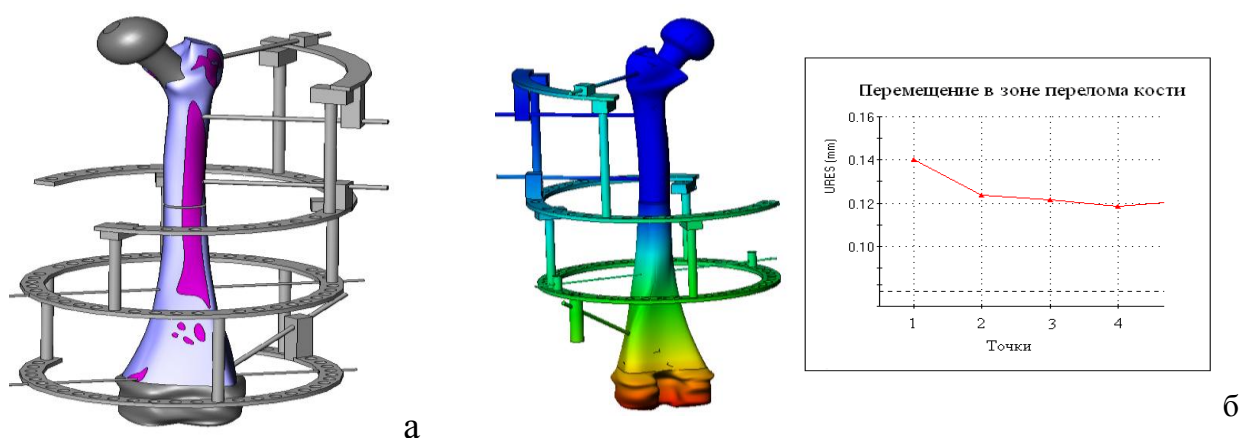


Рис.4. Геометрическая компьютерная модель (а) и эпюра перемещений (б)

На рис.4. представлена эпюра перемещений: смещение костных отломков при двуопорном стоянии без учета мышечных усилий составляет 0,14 мм, в то время как при одноопорном стоянии смещение превышает допустимую норму.

Таблица 2.

Критические нагрузки	$P$ , Н	$P_1$ , Н	$P_2$ , Н
Спицевая компоновка			
– Перелом проксимальной трети	21	15	5
– Перелом средней трети	20	12	1
– Перелом дистальной трети	30	11	27
Комбинированная компоновка			
– Перелом проксимальной трети	17	8	8
– Перелом средней трети	55	12	13
– Перелом дистальной трети	35	9	26

Исследования напряженно - деформированного состояния проведены при переломах проксимальной, средней и дистальной трети бедренной кости, а

также при одноопорном, двуопорном стоянии, приведении-отведении и сгибании-разгибании бедра. Нагрузки на бедренную кость варьируют весьма в широких пределах и зависят от места приложения и перемещения центра тяжести надсуставной части тела. В таблице 2 представлены критические нагрузки при переломах бедренной кости, которые приводят к смещению костных отломков на 1 мм.

**В четвертой главе** рассмотрены вопросы создания и практического применения системы для исследования состояния чрескостного остеосинтеза бедренной кости и костей предплечья. Блок-схема системы для исследования состояния структур конечностей при чрескостном остеосинтезе представлена на рис.5. Основными составными частями системы являются устройство ввода информации, данные параметрических моделей, данные механических свойств биологических структур, расчетный модуль с программным пакетом SolidWorks - SolidWorks Simulation, алгоритмы проведения исследований, методика проведения экспериментальных исследований, устройство печати и накопитель информации.

Определение необходимых для исследования геометрических параметров костей выполняется по срезам компьютерных томографических снимков в вычислительном комплексе томографа. Шаг 2 мм. Информация о геометрических параметрах костей, элементов аппарата внешней фиксации, вводится в систему для исследования состояния структур конечностей при чрескостном остеосинтезе по томограммам. Вводятся механические свойства костей, соединительнотканых структур, элементов аппарата внешней фиксации: модуль нормальной упругости  $E$ , коэффициент Пуассона  $\nu$ , значение допустимого напряжения  $\sigma$  в соответствии с клиническими данными пациента.

Сбор клинических данных осуществляется врачом-хирургом при обследовании пациента. Ввод данных в систему и проведение расчета проводится специально обученным персоналом – инженером-биомехаником.

Выбирается модель чрескостного остеосинтеза и проводится анализ. Если напряжения в структурах превышают допустимые, то производится повторный выбор модели в соответствии с разработанным алгоритмом, до тех пор, пока не будет найдена технология хирургического вмешательства, обеспечивающая оптимальный результат операции для данного пациента. Результаты прогноза выводятся на печатающее устройство или на накопитель информации.

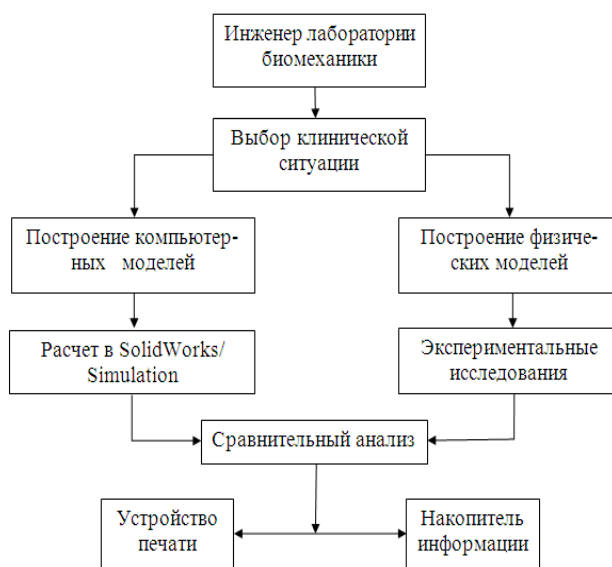


Рис. 5. Схема взаимодействия основных компонентов системы для исследования состояния бедренной кости и костей предплечья при чрескостном остеосинтезе.

Для расчета рассматриваемых моделей необходим компьютер класса не ниже Pentium IV 3000 МГц, с объемом оперативной памяти не менее 1 Гб и объемом жесткого диска не менее 20 Гб. Расчет каждой из моделей на компьютерах подобного класса, при разбиении на 50-150 тысяч конечных элементов, занимает порядка 5-10 минут, а при разбиении на 200-350 тысяч – порядка 20-30 минут.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

Актуальность работы определяется отсутствием объективных методов для оценки качества внешней фиксации и существующими потребностями в предоперационном прогнозировании критического состояния чрескостного остеосинтеза при переломах костей предплечья и бедренной кости. Поэтому цель работы - разработка системы для исследования состояния костей предплечья и бедренной кости при чрескостном остеосинтезе. Для достижения поставленной цели:

- разработаны компьютерные модели, учитывающие реальную геометрию и механические характеристики структур костей предплечья и бедренной кости при чрескостном остеосинтезе и позволяющие проводить исследования напряженно-деформированного состояния, возникающего в структурах при различных переломах;

— создан метод для исследования напряженно-деформированного состояния чрескостного остеосинтеза бедренной кости и костей предплечья и модульной трансформации;

— проведены экспериментальные исследования жесткости чрескостного остеосинтеза при переломах костей предплечья, позволяющие оценить адекватность компьютерного моделирования и провести сравнительные анализ жесткости спицевого и комбинированного чрескостного остеосинтеза;

— разработаны методическое обеспечение и биотехническая система для исследования состояния чрескостного остеосинтеза костей предплечья и бедренной кости при различных переломах на основе компьютерного биомеханического моделирования и анализа клинических данных по компьютерным томограммам. Построена обобщенная схема системы для исследования состояния чрескостного остеосинтеза костей предплечья и бедренной кости.

Создание системы и нового методического обеспечения для исследования состояния структур костей предплечья и бедра при чрескостном остеосинтезе позволило учесть индивидуальные особенности геометрических размеров костей конкретного пациента, определить величину нагрузки, при которой происходит смещение костных отломков на 1 мм и стабильность чрескостного остеосинтеза, необходимую для консолидации перелома. Достоверность компьютерных исследований подтверждена соответствием полученных результатов с результатами экспериментальных исследований.

## ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### **Публикации, входящие в перечень ВАК:**

1. Измайлова, З.Т. Методика исследования состояния костей конечностей при чрескостном остеосинтезе [Текст]/ З.Т. Измайлова // Биомедицинская радиоэлектроника.– 2009. - №8. – С. 21 – 25.

2. Измайлова, З.Т. Предоперационная диагностика модульной трансформации при чрескостном остеосинтезе бедренной кости [Текст]/ З.Т. Измайлова // Российский журнал Биомеханики.– 2009. - №2. – С. 93 – 98.

3. Измайлова, З.Т. Математическое моделирование чрескостного остеосинтеза верхних и нижних конечностей с учетом мышечных усилий [Текст]/ З.Т. Измайлова// Обозрение прикладной и промышленной математике. – Сочи, 2008.- С. 138 – 140.

### **Публикации в других изданиях:**

4. Измайлова, З.Т. Сравнение жесткости чрескостного остеосинтеза по Г.А. Илизарову и комбинированного чрескостного остеосинтеза при диафи-



зарных переломах лучевой кости [Текст]/ З.Т. Измайлова, А.А. Егоркина, П.Н. Кулеш, П.П. Оганезов // Юбилейная научно-техническая конференция: матер. конф. - СПб: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2005.-С.201-202.

5. Измайлова, З.Т. Методика исследования жесткости аппаратов внешней фиксации при переломах костей предплечья [Текст]/ З.Т. Измайлова// Биомеханика-2006: сбор. докл. VIII Всеросс. конф. по биомеханике. - Н.Новгород: 2006. – С. 174-175.

6. Измайлова, З.Т. Совершенствование комбинированного чрескостного остеосинтеза при диафизарных переломах костей предплечья [Текст]/ З.Т. Измайлова, Л.Н. Соломин, П.Н. Кулеш, А.А. Егоркина, П.П. Оганезов // Современные технологии в травматологии и ортопедии: сбор. стат. конф. - М., 2005. – С. 40-42.

7. Измайлова, З.Т. Биомеханическое обоснование проблем коррекции и лечения опорно-двигательного аппарата [Текст]/ З.Т. Измайлова, Н.Х. Цурова, А.А. Егоркина// VII международная научно-техническая конференция «Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии – ФРЭМЭ-2006»: сбор. докл. – Владимир, 2006. - С.236 – 239.

8. Измайлова, З.Т. Компьютерная оценка состояния чрескостного остеосинтеза бедренной кости с учетом мышечных усилий. [Текст]/ З.Т. Измайлова // VIII Международная научно-техническая конференция «Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии» ФРЭМЭ'2008: сбор. докл. – Владимир, 2008. – С. 249 – 251.

9. Измайлова, З.Т. Компьютерная методика оценки напряженно-деформированного состояния чрескостного остеосинтеза бедренной кости [Текст]/ З.Т. Измайлова, П.И. Бегун // Всероссийская конференция по математике и механике. – Томск, 2008. - С. 211.

10. Измайлова, З.Т. Биомеханический анализ состояния чрескостного остеосинтеза бедренной кости с учетом мышечных усилий [Текст]/ З.Т. Измайлова// Известия СПбГЭТУ "ЛЭТИ".- СПб., 2008. – С. 63 – 66.

11. Измайлова, З.Т. Компьютерное моделирование и биомеханический анализ состояния чрескостного остеосинтеза бедренной кости с учетом мышечных усилий [Текст]/ З.Т. Измайлова, П.И. Бегун // IX Всероссийская конференция по биомеханике «Биомеханика - 2008»: докл. – Н. Новгород, 2008. – С. – 162 -164.

12. Измайлова, З.Т. Компьютерное моделирование при чрескостном остеосинтезе бедренной кости [Текст]/ З.Т. Измайлова // Современные компьютерные технологии в биомеханике и медицине: мат. конф.– Н. Новгород, 2009. – С. 10-11.

13. Измайлова, З.Т. Моделирование чрескостного остеосинтеза костей предплечья [Текст]/ З.Т. Измайлова // 62–ая Научно-техническая конференция ППС СПбГЭТУ: сбор. докл. – СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2009.- С. 232 - 236.

14. Измайлова, З.Т. Исследования состояния костей конечностей при чрескостном остеосинтезе [Текст]/ З.Т. Измайлова //Третий всероссийский форум студентов, аспирантов и молодых ученых «Наука и инновации в технических университетах»: мат. конф.- СПб.: Изд-во Политех. университета, 2009. – С. 37-38.

15. Измайлова, З.Т. Компьютерные методы исследования и коррекции органов и структур человеческого организма [Текст]/ З.Т. Измайлова, Бегун П.И., А.А. Егоркина, О.В. Кривохижина, Лебедева Е.А., М.Ю. Смирнова, Н.Х. Цурова, И.И. Аль – Моджагед / Всероссийских научных чтений “Будущее сильной России в высоких технологиях”. - СПб., 2007- С. 90-109.

16. Измайлова, З.Т. Моделирование органов и структур человеческого организма для оценки состояния и прогнозирования результатов коррекции и протезирования [Текст]/ З.Т. Измайлова, П.И. Бегун, О.В. Кривохижина, М.Ю. Смирнова, Н.Х. Цурова // Труды Всероссийских научных чтений “Будущее сильной России в высоких технологиях”. - СПб., 2008- С. 57-66

17. Измайлова, З.Т. Интегральная компьютерная технология исследования структур организма при протезировании и коррекции [Текст]/ З.Т. Измайлова, П.И. Бегун, О.В. Кривохижина, Е.А. Лебедева, Н.Х. Цурова // Четвертый Всероссийская школа–семинар «Математическое моделирование и биомеханика в современном университете»: труды школы-семинара. – Ростов - на Дону. 2008 – с. 17.

18. Измайлова, З.Т. Компьютерное моделирование и биомеханические исследования состояния структур опорно-двигательного аппарата человека в норме при патологии и коррекциях / П.И. Бегун, Н.Х. Зиннатова, З.Т. Измайлова, В.В. Баранов/. Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям: мат. конф. - СПб., 2009. – С. 111 – 114.

---

Подписано в печать . Формат 60×84 1/16.  
Бумага офсетная. Печать офсетная. Печ. л. 1,0.  
Тираж 100 экз. Заказ

---

Отпечатано с готового оригинал-макета  
в типографии Издательства СПбГЭТУ «ЛЭТИ»

Издательство СПбГЭТУ «ЛЭТИ»  
197376, С.-Петербург, ул. Проф. Попова, 5