

ЭНЕРГИЯ – 2015

В.М. Седов

**Параметрический анализ структурной перестройки
костной ткани**

Руководитель: д.ф.-м.н. Л.Б.Маслов

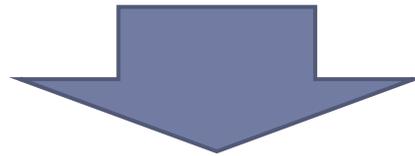
Ивановский государственный энергетический университет
Кафедра теоретической и прикладной механики



Некоторые факты о переломах:

- перелом срастается быстрее, если он один, и медленней, если переломов несколько;
- у детей переломы срастаются в несколько раз быстрее, а у стариков медленней, чем у молодых взрослых;
- переломы срастаются быстрее, если больной активен сам и активно пользуется сломанной конечностью. При полной неподвижности конечности сращение замедляется.

<http://www.bolitplecho.ru/perelomyihsrachenie/>



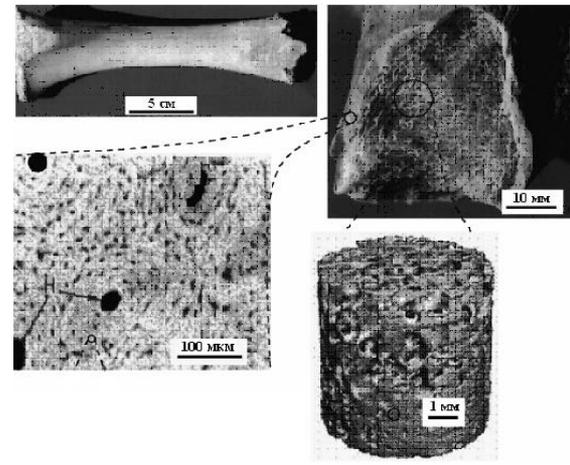
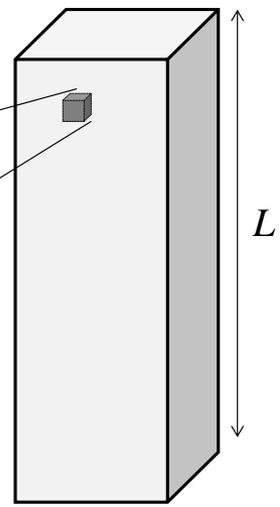
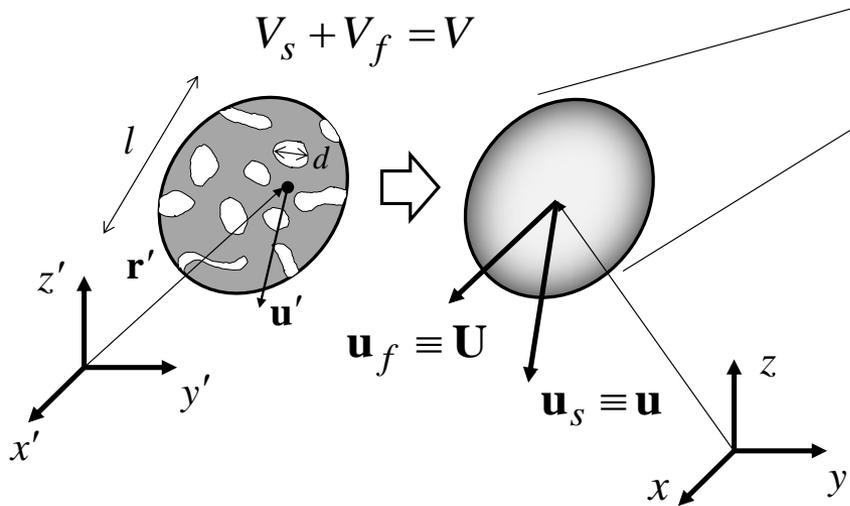
Цели работы

- Исследование влияния характеристик внешнего механического воздействия (в частности, частоты и амплитуды вибрационной нагрузки) на процессы структурной перестройки костной ткани.
- Оптимизация параметров механического воздействия (амплитуды и частоты) для наилучшего срачивания кости.



Пороупругая модель костной ткани

Двухфазная сплошная среда



Определяющие соотношения пороупругой среды в «u-p» переменных

$$\sigma(\mathbf{u}, p) = \sigma_{dr}(\mathbf{u}) - \mathbf{A}p \equiv \mathbf{C}_{dr} \cdot \boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{u}) - \mathbf{A}p$$

$$\zeta(\mathbf{u}, p) = \mathbf{A} \cdot \boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{u}) + \phi^2 R^{-1} p$$

Конечно-элементные уравнения колебаний пороупругого тела

Уравнения динамики пороупругой среды в «u-p» переменных

$$\nabla \cdot \hat{\boldsymbol{\sigma}}_{dr} - s^2 (\rho \mathbf{E} - \rho_f \tilde{\Gamma}(s)) \cdot \hat{\mathbf{u}} - (\mathbf{A} - \tilde{\Gamma}(s)) \cdot \nabla \hat{p} = -\hat{\mathbf{f}}_V$$

$$s^{-1} \nabla \cdot (\tilde{\mathbf{K}}(s) \cdot \nabla \hat{p}) - \phi^2 R^{-1} \hat{p} - (\mathbf{A} - \tilde{\Gamma}(s)) \cdot \hat{\boldsymbol{\varepsilon}} = 0$$

$s = i\omega$

$$(\mathbf{K}_{dr} - \omega^2 (\mathbf{M} + \tilde{\mathbf{L}}(i\omega))) \mathbf{U} - (\mathbf{H}_1 + \tilde{\mathbf{H}}_2(i\omega)) \mathbf{P} = \mathbf{F}$$

$$(\mathbf{H}_1 + \tilde{\mathbf{H}}_2(i\omega))^T \mathbf{U} + (-\mathbf{D} + i\omega^{-1} \tilde{\mathbf{G}}(i\omega)) \mathbf{P} = -i\omega^{-1} \mathbf{Q}^*$$

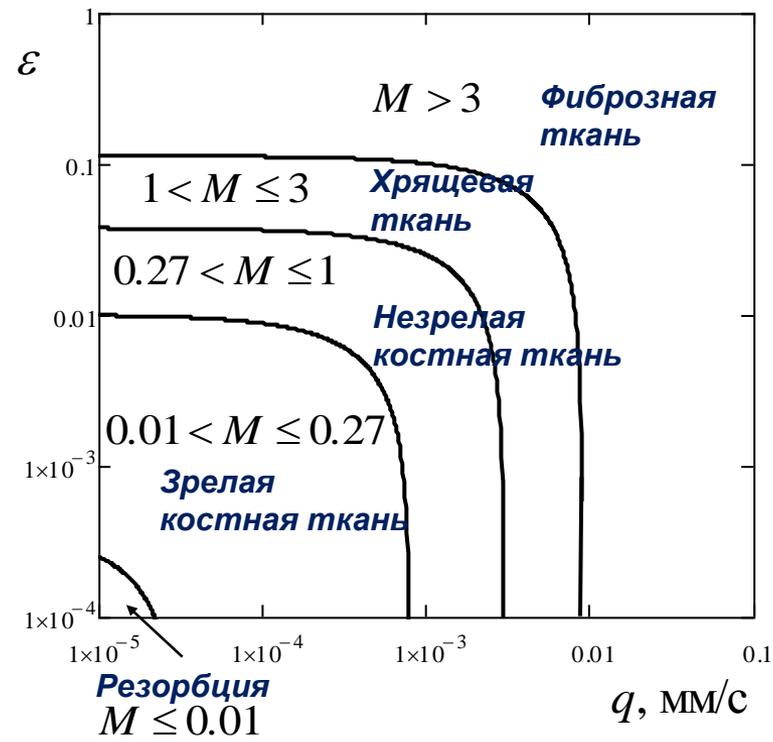
Алгоритм образования нового фенотипа

Lacroix, D., Prendergast, P.J., Li, G., Marsh, D., 2002. Biomechanical model to simulate tissue differentiation and bone regeneration...

Механорегулирующий индекс

$$M = \frac{\epsilon}{a} + \frac{q}{b}$$

$$a = 0.0375, \quad b = 3 \text{ мкм/с}$$



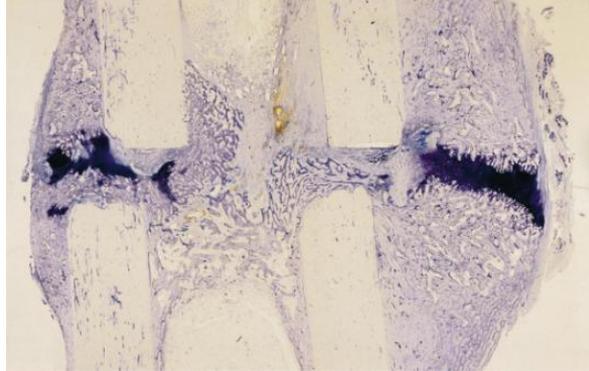
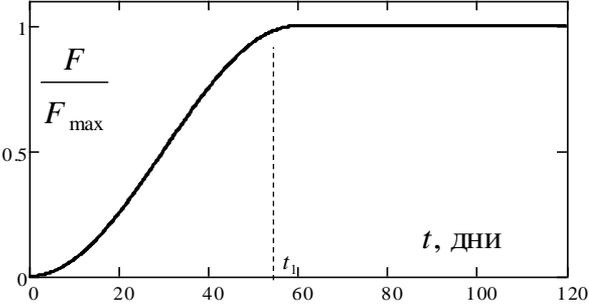
**Пороупругие
характеристики
основных
фенотипов
перестраивающейся
ткани**

Тип ткани	ϕ	α	ρ , кг/м ³	$E^{(dr)}$, Па	$G^{(dr)}$, Па	R , Па	K , м ⁴ /Н·с
Гранулированная	0,99	1,000	1021	$1,36 \cdot 10^5$	$0,57 \cdot 10^5$	$2,29 \cdot 10^9$	$1,0 \cdot 10^{-14}$
Фиброзная	0,80	0,990	1100	$1,15 \cdot 10^6$	$0,47 \cdot 10^6$	$0,21 \cdot 10^9$	$1,0 \cdot 10^{-14}$
Хрящевая	0,80	0,995	1120	$5,82 \cdot 10^6$	$2,35 \cdot 10^6$	$1,07 \cdot 10^9$	$5,0 \cdot 10^{-15}$
Незрелая кость	0,65	0,893	1182	$3,73 \cdot 10^9$	$0,97 \cdot 10^9$	$1,42 \cdot 10^9$	$1,0 \cdot 10^{-13}$
Зрелая кость	0,20	0,435	1416	$1,31 \cdot 10^{10}$	$0,45 \cdot 10^{10}$	$0,39 \cdot 10^9$	$3,7 \cdot 10^{-13}$
Компактное вещество кости	0,10	0,367	1468	$2,11 \cdot 10^{10}$	$0,63 \cdot 10^{10}$	$0,19 \cdot 10^9$	$1,0 \cdot 10^{-17}$

Постановка задачи имитационного моделирования регенерации костной ткани

$$F(t, \omega) = F_{sta}(t) + F_{dyn}(t)e^{i\omega t}$$

$$F_{dyn} = kF_{sta}$$



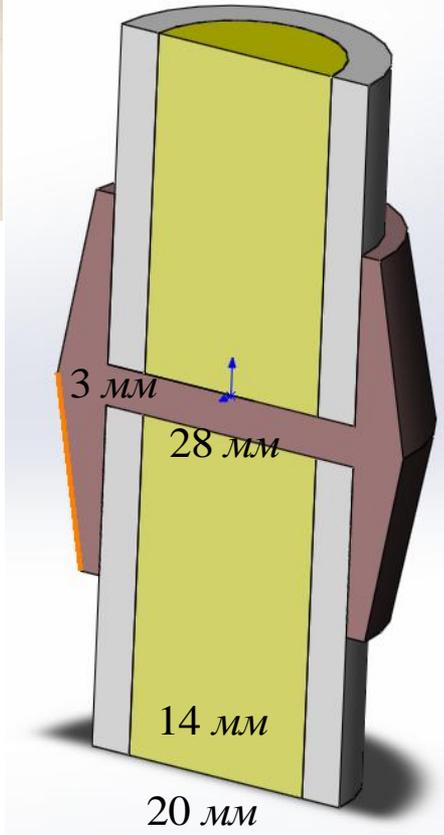
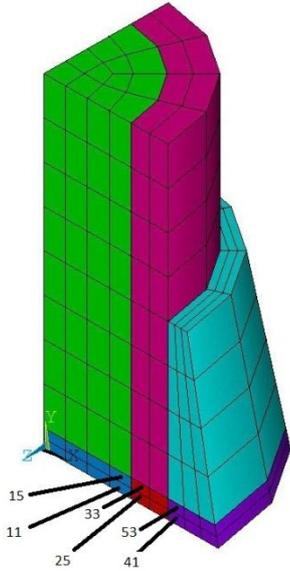
t – время (дни), F_{sta} - статическое нагружение (Н),
 F_{dyn} - динамическая составляющая нагрузки (Н),
 k – коэффициент (%), ω – частота динамической нагрузки, $F_{max} = 500$ Н

Нормирование частоты по энергии колебаний

$$E = \frac{\omega^2 * m}{2}$$

где, E – энергия колебаний (Дж),
 m – масса = const (кг)

	1 HZ	10 HZ	50 HZ	100 HZ
k не норм	10%	10%	10%	10%
k норм	10%	0.1%	4e-3%	1e-3%

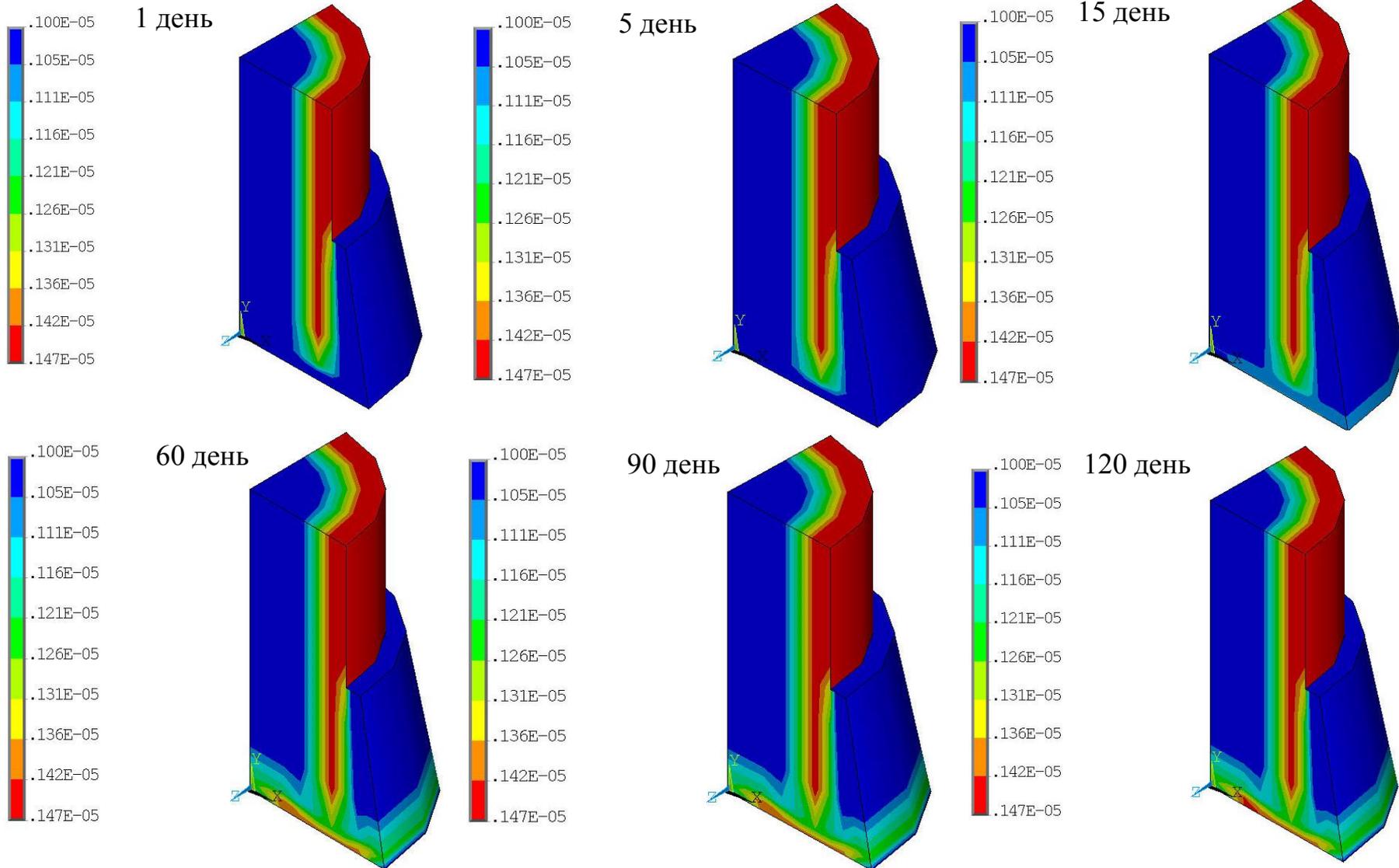


**Результаты численных экспериментов
при различном коэффициенте
динамической составляющей
механического воздействия**



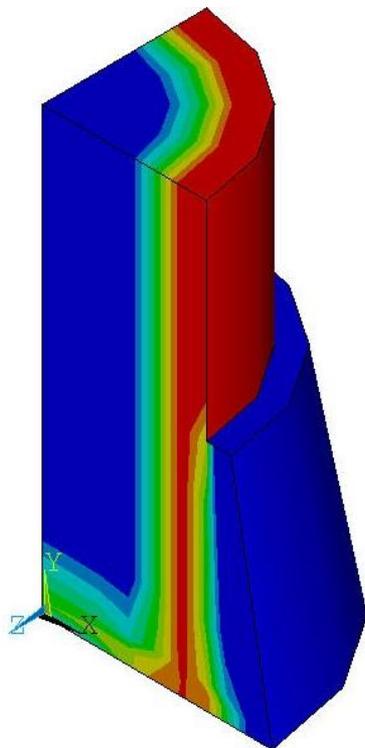
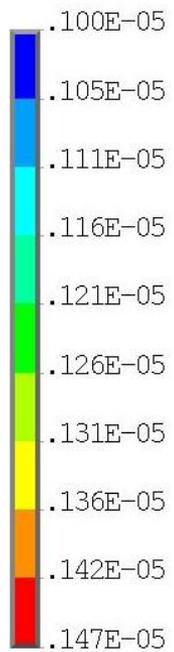
Динамика изменения плотности в области костной мозоли

Частота нагрузки 10 Гц

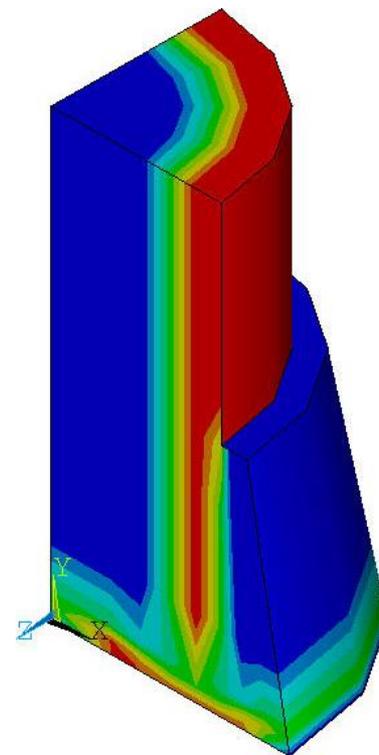
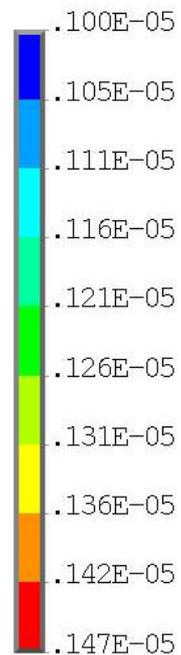


Сравнение результатов экспериментов сращивания кости

k ненормированный



k нормированный



Результаты

- ❑ На построенной модели структурной перестройки костной ткани был проведен ряд экспериментов для оценки влияния физико-механических параметров модели на процесс сращивания кости.
- ❑ Модель позволяет исследовать влияние частоты и величины динамической нагрузки на процесс перестройки от фиброзной ткани до образования зрелой костной ткани.

