

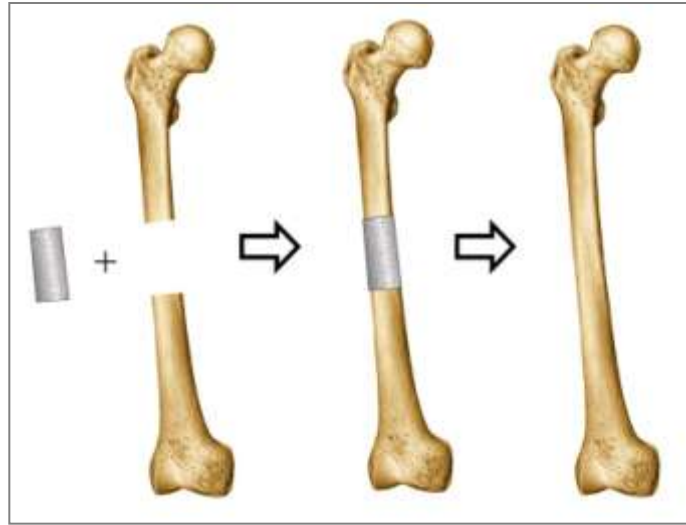
**МОДАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ КОСТИ ПРИ РЕГЕНЕРАЦИИ ТКАНИ ПРИ
РЕКОНСТРУКЦИИ КОСТНЫМИ ИМПЛАНТАМИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ
ГАРМОНИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ**

СЕДОВ В.М.

Ивановский государственный энергетический университет
Кафедра теоретической и прикладной механики
Научно-исследовательская лаборатория «Биомеханика»

153003, Иваново, ул. Рабфаковская 34, ИГЭУ. <http://tipm.ispu.ru>

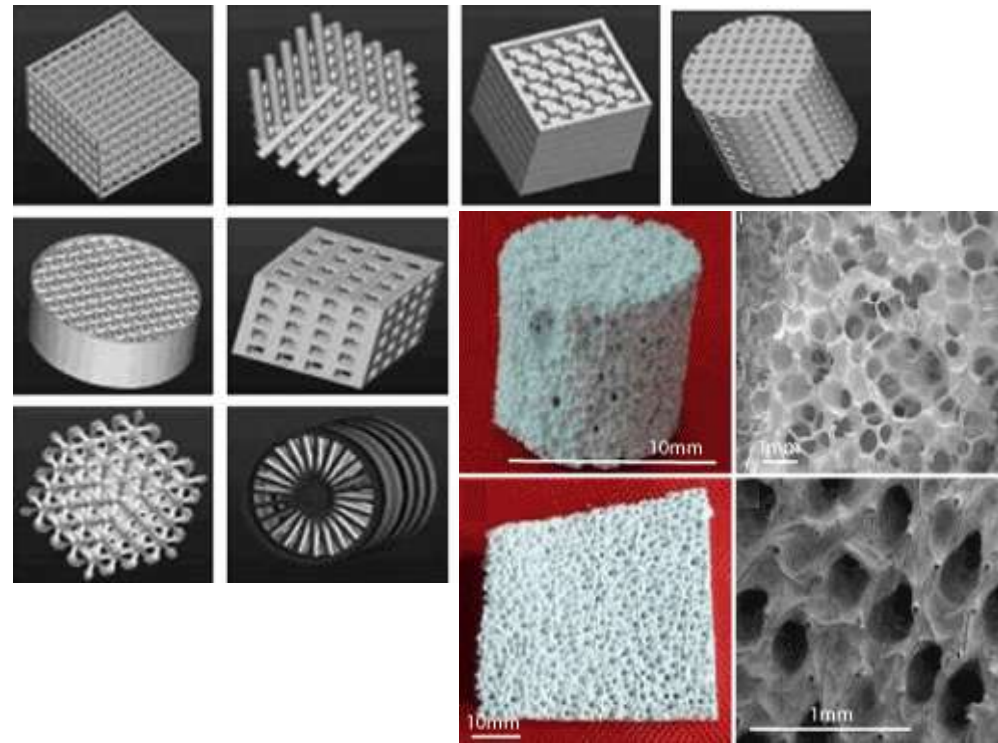
Задача реконструкции кости с помощью пористых имплантатов (скаффолдов)



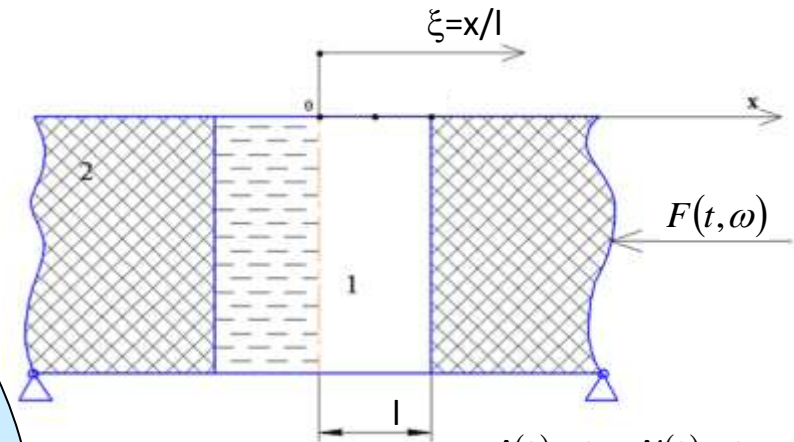
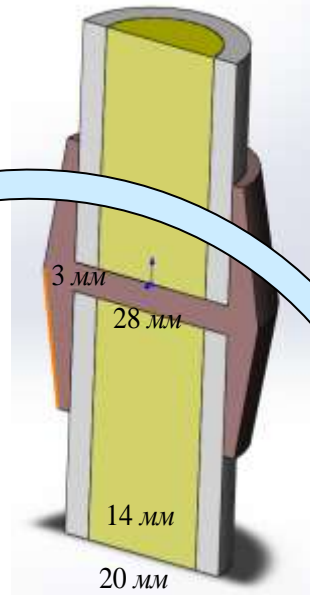
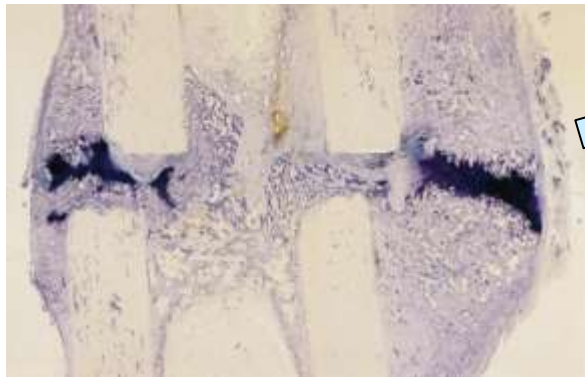
Sun W., et al. (2005) Bio-CAD modeling and its application in computer-aided tissue engineering. Computer-aided design 37, 1097-1114.

Cunningham E. et al. (2011) Comparative characterisation of 3-D hydroxyapatite scaffolds developed via replication of synthetic polymer foams and natural marine sponges. J. Tissue Sci. Eng. S:1

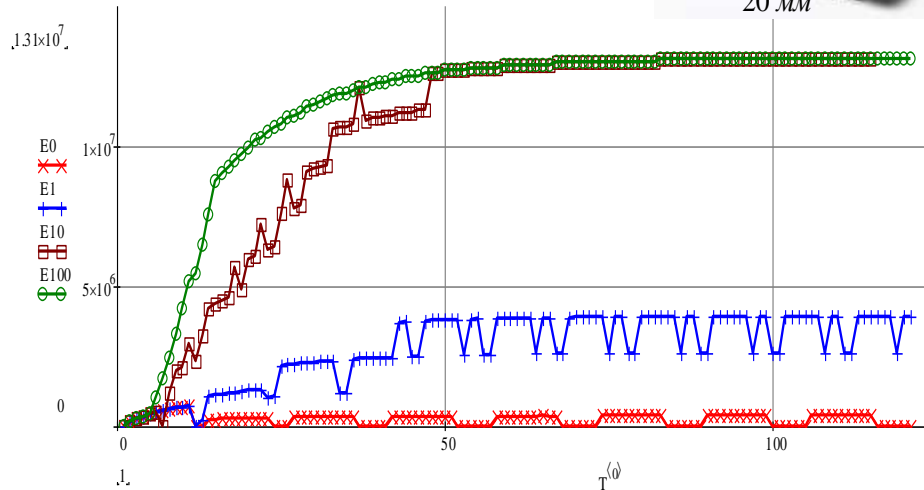
Marcacci M., et al. (2007) Stem cells associated with macroporous bioceramics for long bone repair: 6- to 7-year outcome of a pilot clinical study. Tissue Eng. 13, 947-955.



Численно-аналитическая модель регенерации костной ткани и первичные результаты



$$\begin{aligned} \hat{u}(0) &= 0, & \hat{p}'(0) &= 0 \\ \hat{u}'(l) &= 0, & \hat{p}(l) &= 0 \end{aligned}$$



✕ 0 Hz
+ 1 Hz
■ 10 Hz
○ 100 Hz

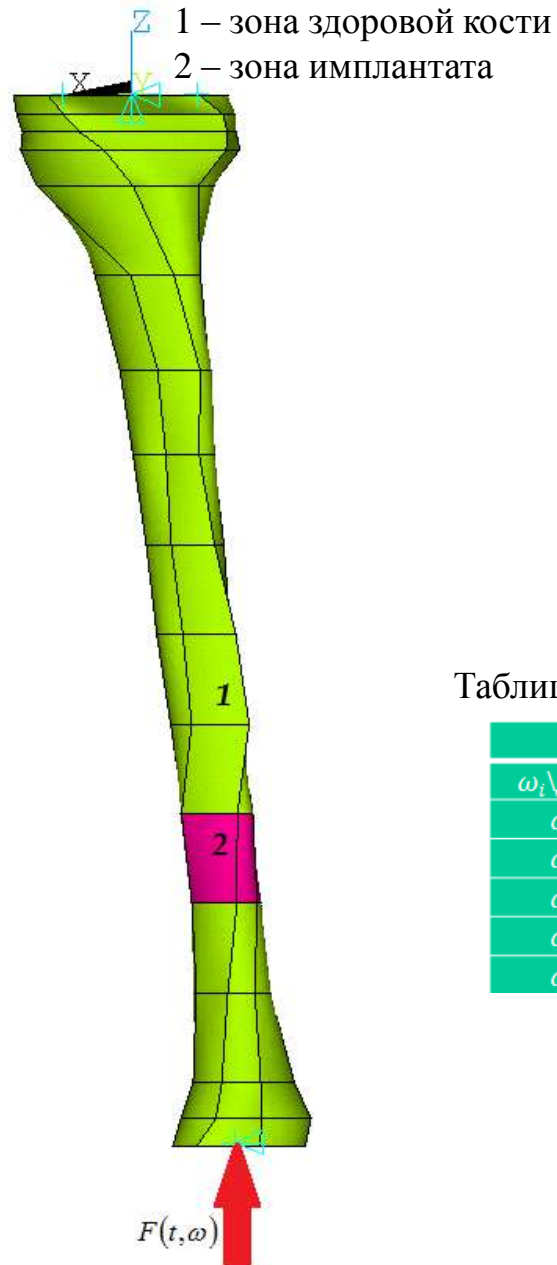
**Изменение модуля Юнга ткани
в средней точке при
различных частотах нагрузки**

$$\begin{aligned} -E\hat{u}'' - (\rho - \tilde{\gamma}(\omega)\rho_f)\omega^2\hat{u} + (\alpha - \tilde{\gamma}(\omega))\hat{p}' &= \hat{f}_{Vx} \\ -\tilde{K}(\omega)\hat{p}'' + i\omega\phi^2R^{-1}\hat{p} + i(\alpha - \tilde{\gamma}(\omega))\omega\hat{u}' &= 0 \end{aligned}$$

$$\hat{\varepsilon}(x) = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{(\tilde{K}(\omega)(n\pi/2l)^2 + i\omega\phi^2R^{-1})(n\pi/2l)f_n}{\Delta(\omega)} \cos \frac{n\pi x}{2l}$$

$$\hat{q}(x) = \tilde{K}(\omega) \sum_{k=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{i\omega(\alpha - \tilde{\gamma}(\omega))(n\pi/2l)^2 f_n}{\Delta(\omega)} \sin \frac{n\pi x}{2l}$$

Трёхмерная конечно-элементная модель «кость-имплантат»



Эффективные модули биологических тканей и материала имплантата

Тип ткани	ϕ	α	ρ кг/м ³	$E^{(abr)}$ Па	$G^{(abr)}$ 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	$2.11 \cdot 10^{10}$	$0.63 \cdot 10^{10}$	$0.19 \cdot 10^9$	$1.0 \cdot 10^{-17}$
Гидроксиапатит	0.085– 0.9	0.198	3156	$1.19 \cdot 10^{11}$	$4.65 \cdot 10^{10}$	$0.189 \cdot 10^9$	$2.55 \cdot 10^{-5}$

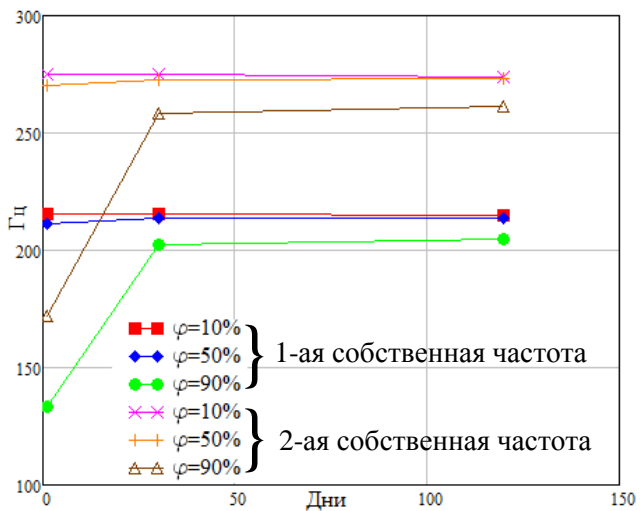
Таблицы зависимости собственных частот от пористости имплантата и стадии заживления

$\phi = 10\%$			
$\omega_i \setminus \text{День}$	1	30	120
ω_1	215.23	215.18	215.13
ω_2	275	274.96	274
ω_3	849.9	849.55	849.2
ω_4	969.1	968.7	968.4
ω_5	1256.2	1256.1	1255.8

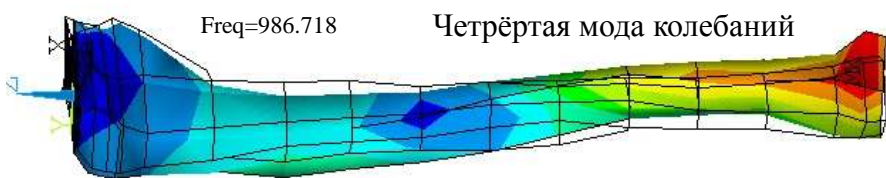
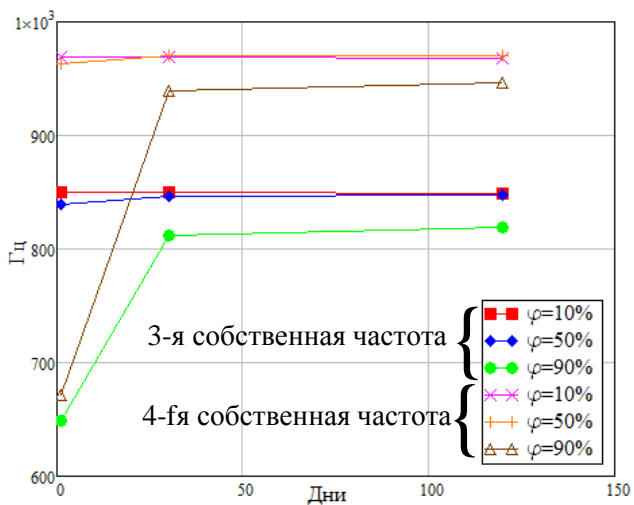
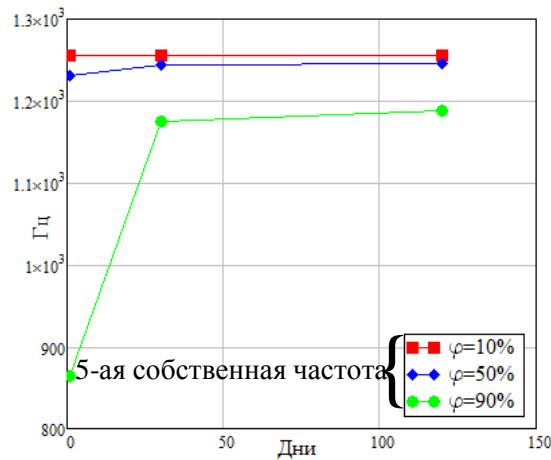
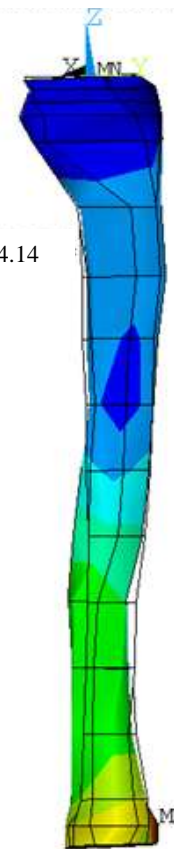
$\phi = 50\%$			
$\omega_i \setminus \text{День}$	1	30	120
ω_1	211.34	213.46	213.8
ω_2	270.02	272.76	273.2
ω_3	838.96	846.85	847.96
ω_4	963.5	969.8	970.6
ω_5	1230.48	1243.9	1246.28

$\phi = 90\%$			
$\omega_i \setminus \text{День}$	1	30	120
ω_1	133.62	202.19	204.50
ω_2	172.22	258.31	261.26
ω_3	649.01	812.47	819.64
ω_4	671.85	938.93	946.02
ω_5	864.68	1174.5	1188.4

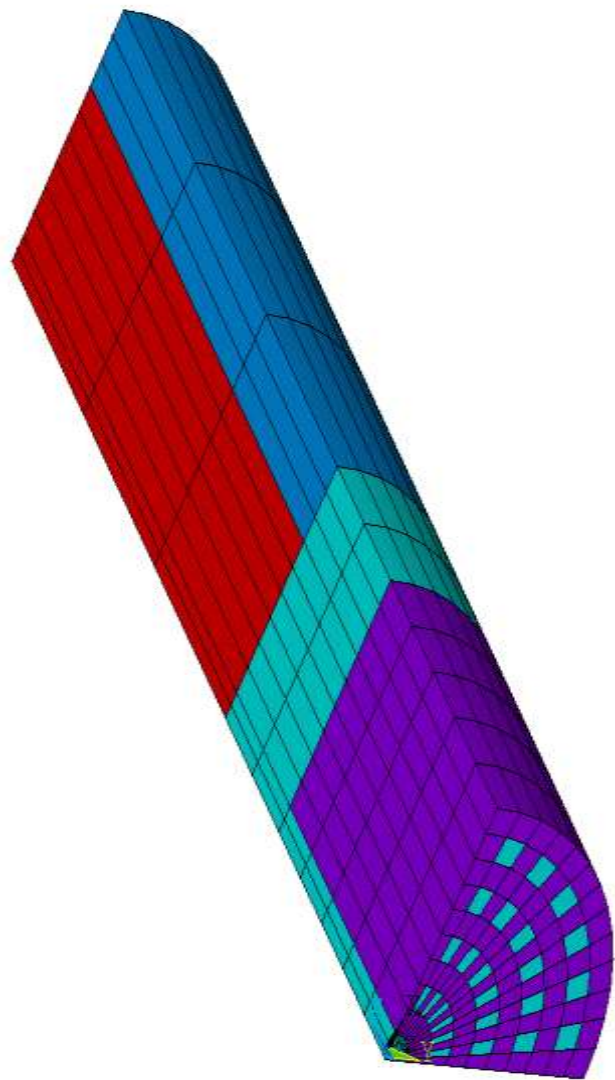
Модальный анализ системы «кость-имплантат»



Пятая мода колебаний



1) Параметрический анализ регенерации костной ткани при реконструкции костными имплантатами имеющие макроскопические поры



2) Рассмотрение полноразмерной модели кости с имплантатом имеющим макроскопические поры