

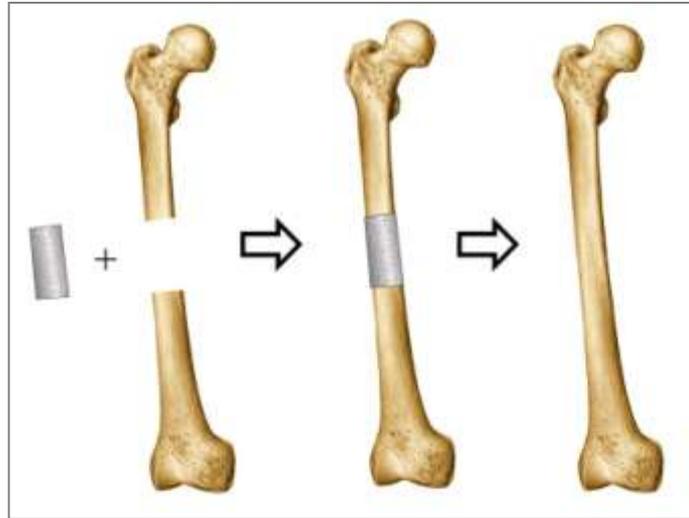
**МОДАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ КОСТИ ПРИ РЕГЕНЕРАЦИИ ТКАНИ ПРИ  
РЕКОНСТРУКЦИИ КОСТНЫМИ ИМПЛАНТАМИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ  
ГАРМОНИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ**

***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>

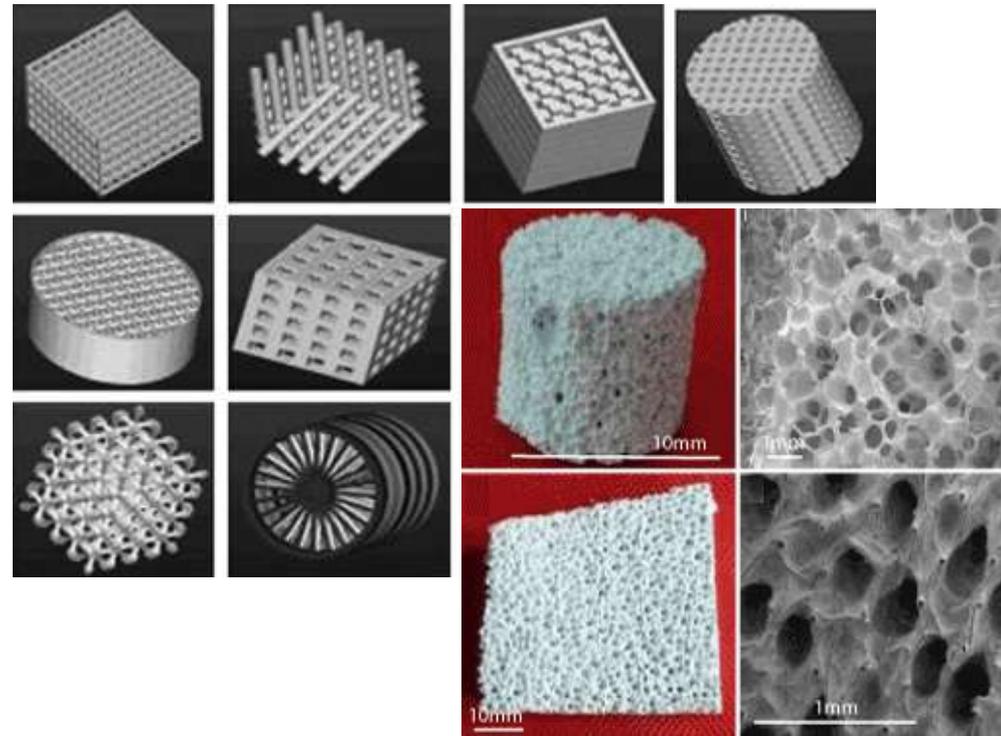
# Задача реконструкции кости с помощью пористых имплантатов (скаффолдов)



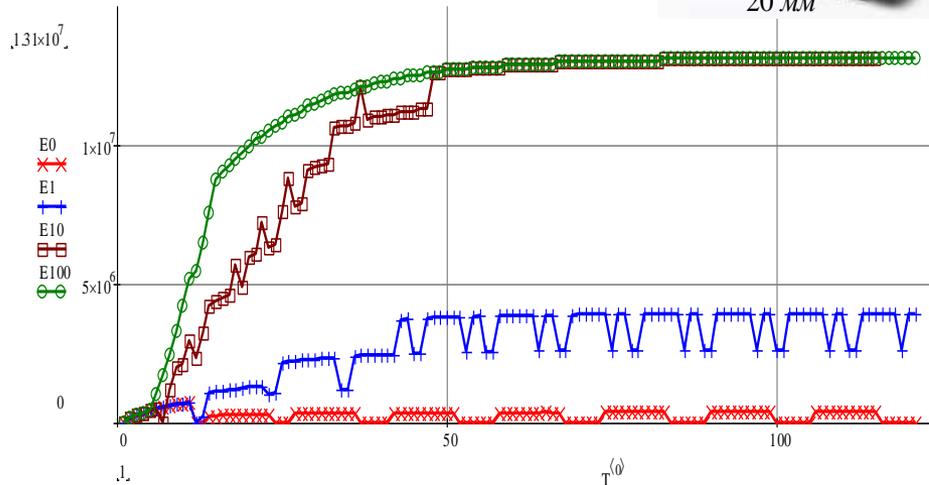
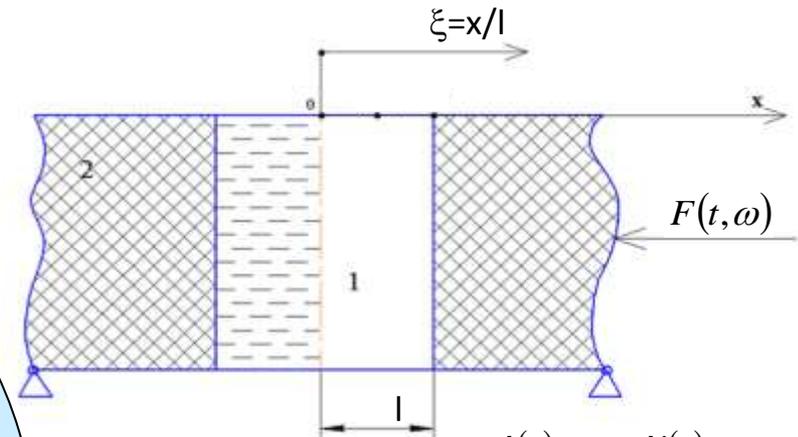
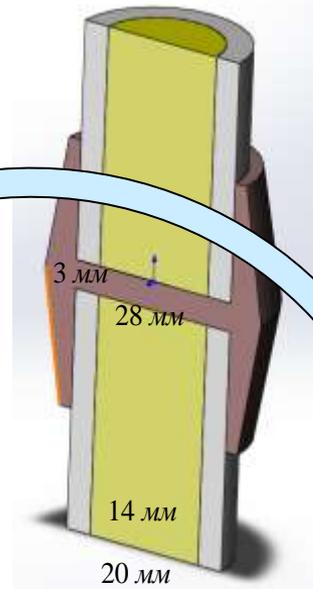
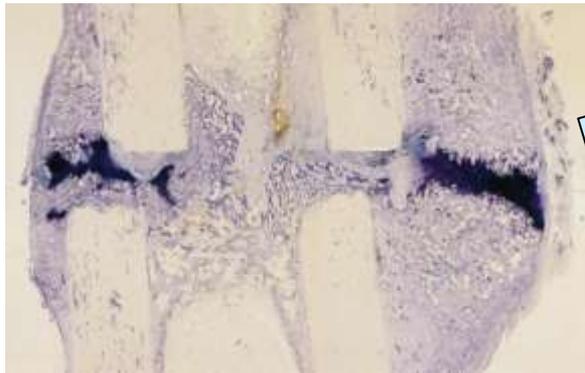
Sun W., et al. (2005) Bio-CAD modeling and its application in computer-aided tissue engineering. Computer-aided design 37, 1097-1114.

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



✖ 0 Hz  
+ 1 Hz  
■ 10 Hz  
○ 100 Hz

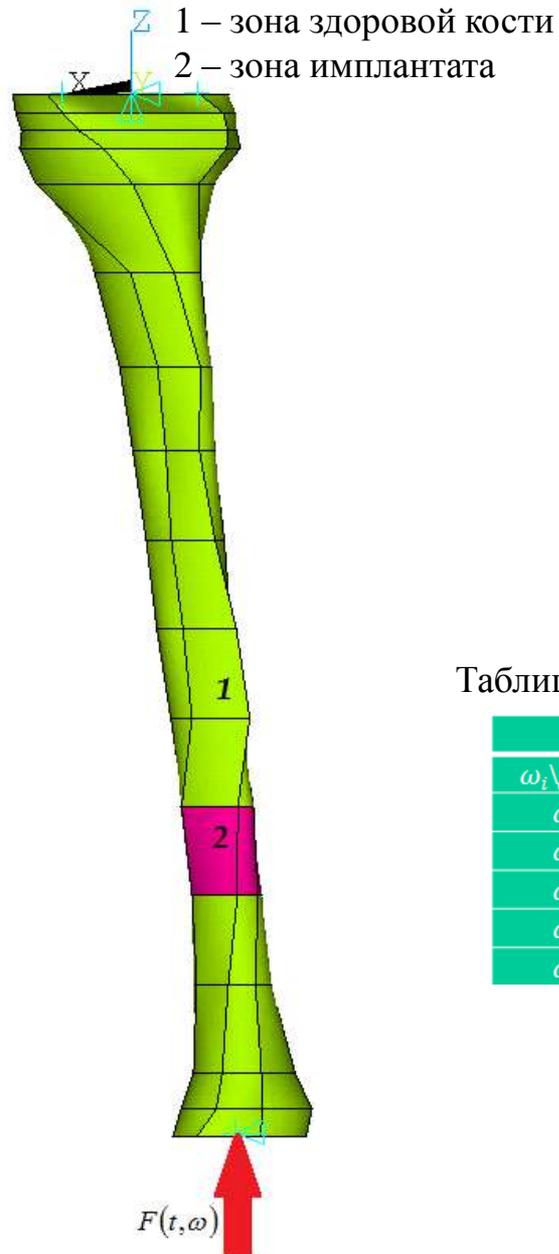
**Изменение модуля Юнга ткани  
в средней точке при  
различных частотах нагрузки**

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

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

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

# Трёхмерная конечно-элементная модель «кость-имплантат»



Эффективные модули биологических тканей и материала имплантата

| Тип ткани                 | $\phi$        | $\alpha$ | $\rho$<br>кг/м <sup>3</sup> | $E^{(abr)}$<br>Па    | $G^{(abr)}$<br>Па    | $R$<br>Па          | $K$<br>м <sup>4</sup> /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–<br>0.9 | 0.198    | 3156                        | $1.19 \cdot 10^{11}$ | $4.65 \cdot 10^{10}$ | $0.189 \cdot 10^9$ | $2.55 \cdot 10^{-5}$       |

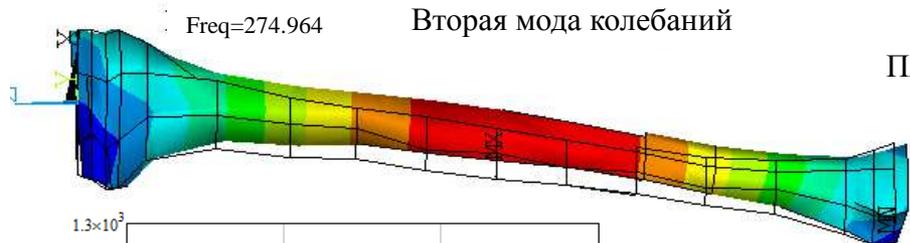
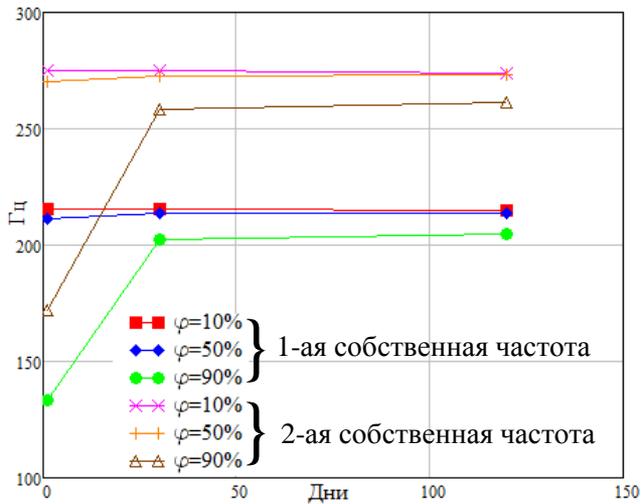
Таблицы зависимости собственных частот от пористости имплантата и стадии заживления

| $\phi = 10\%$                    |        |        |        |
|----------------------------------|--------|--------|--------|
| $\omega_i \setminus \text{День}$ | 1      | 30     | 120    |
| $\omega_1$                       | 215.23 | 215.18 | 215.13 |
| $\omega_2$                       | 275    | 274.96 | 274    |
| $\omega_3$                       | 849.9  | 849.55 | 849.2  |
| $\omega_4$                       | 969.1  | 968.7  | 968.4  |
| $\omega_5$                       | 1256.2 | 1256.1 | 1255.8 |

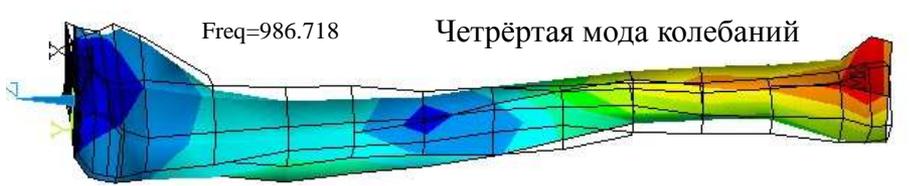
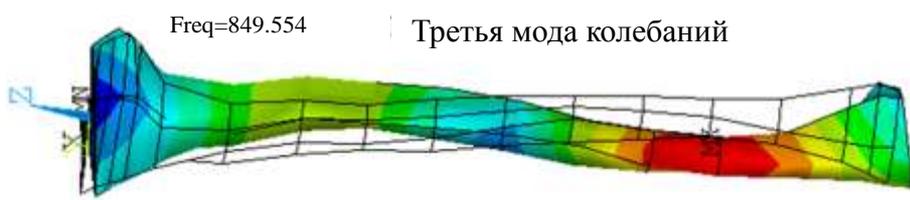
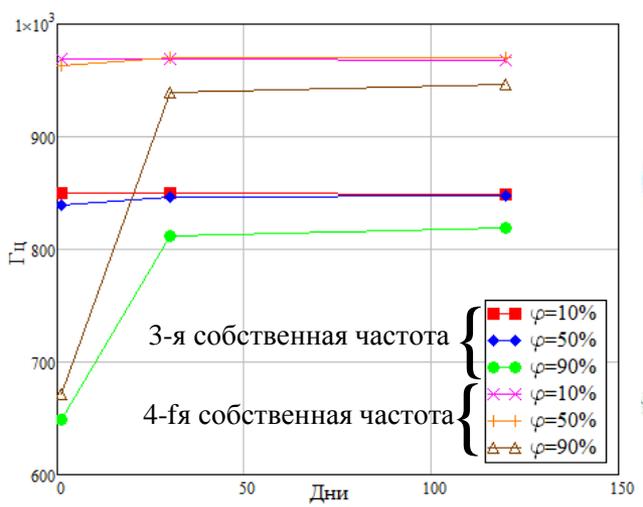
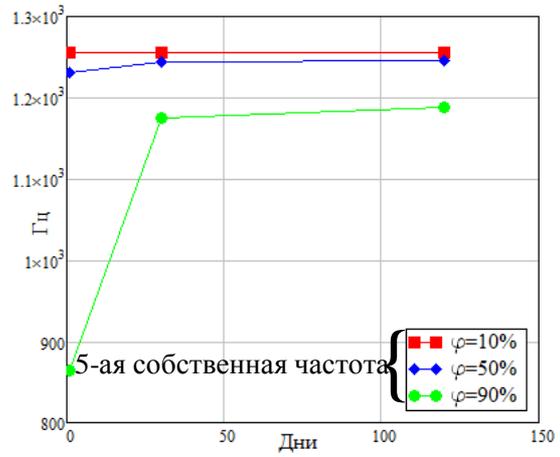
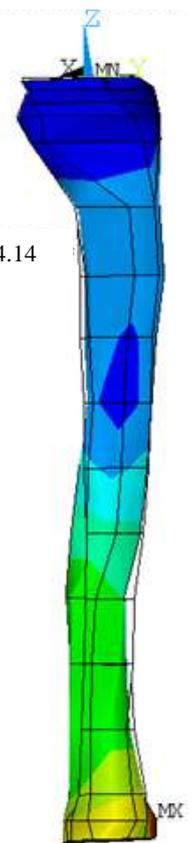
| $\phi = 50\%$                    |         |        |         |
|----------------------------------|---------|--------|---------|
| $\omega_i \setminus \text{День}$ | 1       | 30     | 120     |
| $\omega_1$                       | 211.34  | 213.46 | 213.8   |
| $\omega_2$                       | 270.02  | 272.76 | 273.2   |
| $\omega_3$                       | 838.96  | 846.85 | 847.96  |
| $\omega_4$                       | 963.5   | 969.8  | 970.6   |
| $\omega_5$                       | 1230.48 | 1243.9 | 1246.28 |

| $\phi = 90\%$                    |        |        |        |
|----------------------------------|--------|--------|--------|
| $\omega_i \setminus \text{День}$ | 1      | 30     | 120    |
| $\omega_1$                       | 133.62 | 202.19 | 204.50 |
| $\omega_2$                       | 172.22 | 258.31 | 261.26 |
| $\omega_3$                       | 649.01 | 812.47 | 819.64 |
| $\omega_4$                       | 671.85 | 938.93 | 946.02 |
| $\omega_5$                       | 864.68 | 1174.5 | 1188.4 |

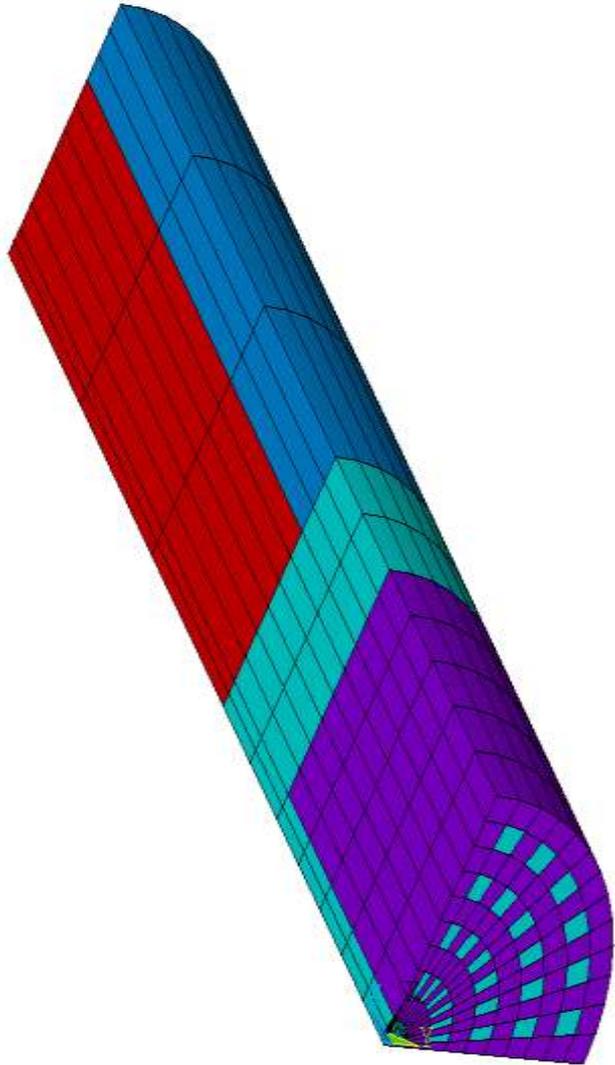
# Модальный анализ системы «кость-имплантат»



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