

УДК 539.3:539.4:616.71

## ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЙ БИОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ «ИМПЛАНТАТ – КОСТЬ»

О. И. Гайнутдинов<sup>1</sup>, О. О. Гайнутдинов<sup>2</sup>

*Кафедра «Физика», ФГБОУ ВПО «ТГТУ» (1); gainutdin49@mail.ru;  
кафедра «Ортопедия», Рижский университет им. П. Страдыня,  
Латвийская Республика (2)*

**Ключевые слова и фразы:** биомеханическая система «имплантат – кость»; напряжения и деформации; способы нагружения имплантата.

**Аннотация:** Путем компьютерного моделирования проведен сопоставительный анализ способов нагружения биомеханической системы «имплантат – кость» человека. Рассмотрены два способа нагружения: с помощью внешней силы и внешнего момента силы. В качестве параметров оценки состояния системы использованы напряжения и контактные давления в элементах системы. Сравнение способов нагружения проведено с учетом возможностей их практической реализации. Показано, что способ нагружения имплантатов с помощью внешней силы более предпочтителен.

### Постановка задачи

Известна проблема использования протезов отдельных частей человеческого скелета (например, конечностей) для возвращения ему функциональных способностей, утраченных в результате травмы или заболевания [1, 2]. Одним из перспективных способов является разработка и использование протезов на основе силовых имплантатов (рис. 1), применяемых для установки собственно протезов [3]. Такое решение позволяет восстановить движение в суставах, обеспечить подвижность конечностей, устранить или уменьшить болевой синдром.

Для проведения исследований по выбору конструкционных параметров имплантата и способа его фиксации в скелете требуется определиться с методикой моделирования силового нагружения системы «имплантат – кость», которая обеспечивала бы наибольшую достоверность получаемых результатов. Цель статьи – сопоставительный анализ существующих способов внешнего силового воздействия на механическую систему.

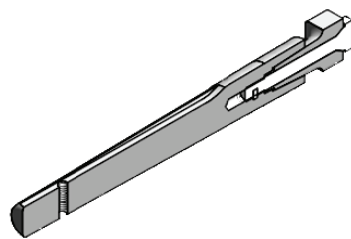


Рис. 1. Имплантат

### Способы внешнего воздействия на механическую систему

Существуют физические и математические методы исследования механических систем. Физические методы основаны на стандартизованных технических испытаниях [4], математические – на компьютерном моделировании

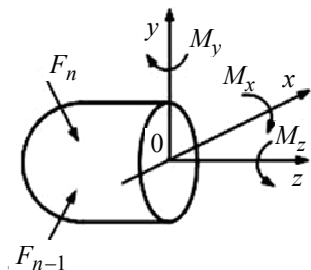


Рис. 2. Способы воздействия на систему

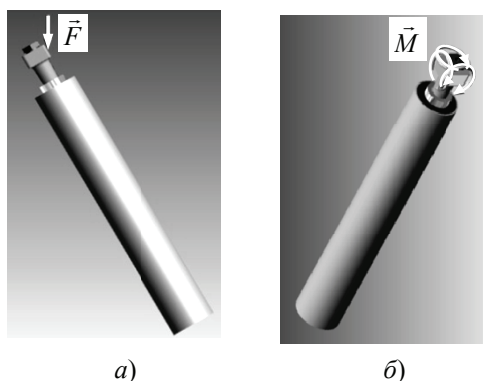


Рис. 3. Силовое (а) и моментосиловое (б) воздействия на систему

и использовании универсальных методов вычислительной математики. Данные методы, различные по своей практической реализации, сходны в другом: они предполагают использование одного из двух известных в механике способов воздействия на систему – с помощью силы или момента силы (рис. 2).

Под действием внешних сил  $\vec{F}$  или моментов сил  $\vec{M}$  в механической системе (твердом деформируемом теле) возникают разнонаправленные напряжения и деформации. При условии соблюдения определенных пропорций между силами и моментами сил возникающие напряжения и деформации должны иметь согласованные значения. По этому критерию и проводится сопоставление способов воздействия на систему.

На рисунке 3 изображены принципиальные схемы силового и моментосилового воздействия на биомеханическую систему «имплантат – кость» (стрелками показаны направления внешнего воздействия). При силовом воздействии внешняя сила  $\vec{F}$  прикладывается в точке крепления протеза к имплантату под некоторым углом к его продольной оси; при моментосиловом момент внешних сил создает составляющие момента сил относительно трех взаимно перпендикулярных осей в пространстве. В обоих случаях используется цементная фиксация имплантата в кости [3].

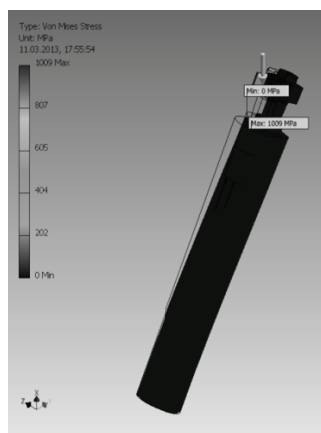
### Компьютерное моделирование

Исследования проводились на математической модели биомеханической системы «имплантат – кость» человека с помощью универсальной расчетной программы Autodesk, основанной на методе конечных элементов, а также позволяющей моделировать и анализировать поведение разрабатываемых конструкций.

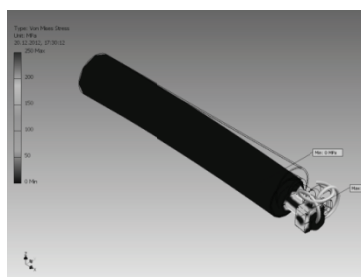
*Описание и параметры системы.* Размеры модели близки к реальным применяемым имплантатам. В качестве расчетных параметров системы использованы усредненные данные материалов различных частей скелета человека (кость и костный клей) и имплантата (Титановый сплав Ti-6Al-4V) [3].

Параметры внешнего динамического воздействия определены международным стандартом [4]: амплитуда силы при статическом нагружении составляет 3 кН, значение амплитуды момента силы устанавливается в соответствующих пропорциях.

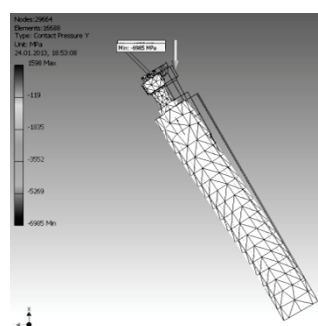
*Результаты моделирования.* На рисунке 4 и в приведенной таблице представлены некоторые численные и визуализированные результаты (напряжения и контактные давления в элементах системы). Различным по степени нагружения областям соответствует различная интенсивность оттенков серого в их окраске,  $\Delta$  – степень различия значений параметров нагружения для силового и моментосилового воздействий на имплантат.



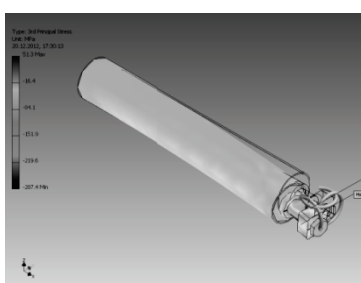
а)



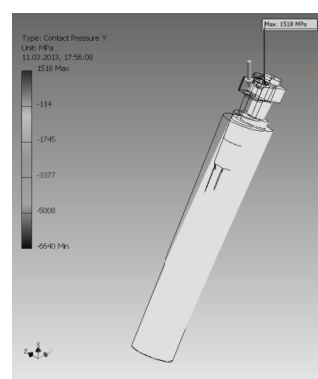
б)



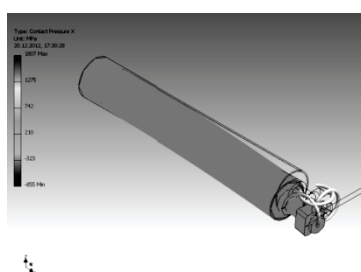
в)



г)



д)



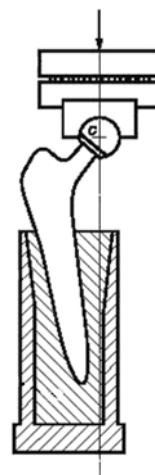
е)

**Рис. 4. Распределение напряжений и контактных давлений:**  
 а, б – напряжения по фон Мизесу (нагружение силой и моментом силы соответственно);  
 в и г – радиальные напряжения; д, е – контактные давления в поперечном направлении

## Результаты расчета параметров нагружения системы, МПа

Параметр	Вид нагружения		$\Delta$
	сила	момент силы	
Напряжение по фон Мизесу	1010,0	250,0	1,00
Главное напряжение 1 <sup>st</sup>	742,0	296,0	0,62
Главное напряжение 3 <sup>rd</sup>	1009,0	287,0	0,87
Напряжения по плоскостям:			
XX	623,0	268,0	0,57
XY	332,0	111,0	0,74
XZ	448,0	98,8	1,12
YY	850,0	120,0	1,75
YZ	220,0	99,1	0,55
ZZ	316,0	125,0	0,62
Контактное давление	7380,0	3960,0	0,46
Контактные давления по осям:			
X	2970,0	1810,0	0,41
Y	6990,0	2440,0	0,71
Z	1050,0	2530,0	0,60

Для проведения сопоставительного анализа двух способов нагружения имплантата результаты расчетов нормированы относительно напряжения по фон Мизесу (значение  $\Delta = 1,00$ ), которое является эквивалентным при многонаправленных напряжениях в системе. Наибольшее соответствие расчетных значений параметров нагружения имплантата имеет место для главного напряжения 3<sup>rd</sup> и напряжения в плоскости XZ, для остальных параметров соответствие существенно меньше. Это обстоятельство говорит о неравнозначности сравниваемых способов нагружения. В данных условиях есть необходимость учитывать и другие факторы, влияющие на выбор того или иного способа, в том числе и их практическую реализацию. В плане экспериментальной реализации способ силового воздействия на систему технологически и инструментально более прост. Подтверждением является тот факт, что в настоящее время реальные испытания имплантатов в области ортопедии проводятся именно в этом направлении. В частности, стандартизована машина испытаний имплантатов (рис. 5) для эндопротезов тазобедренного сустава [4].



**Рис. 6. Машина для испытания имплантатов**

### Заключение

Предположение о преимуществе универсального параметра нагружения конструкции (эквивалентного напряжения по фон Мизесу) не оправдалось: в большинстве частных случаев значения напряжений и контактных давлений в элементах конструкции для двух способов нагружения существенно различались. Таким образом, при учете дополнительных обстоятельств, связанных с практической реализацией способов, способ нагружения имплантатов с помощью внешней силы является более предпочтительным.

### Список литературы

1. Hagberg, K., Branemark R. Consequences of Non-Vascular Trans-Femoral Amputation: a Survey of Quality of Life, Prosthetic Use and Problems / K. Hagberg, R. Branemark // *Prosthetic Orthotherapy International* 25 (December 2001). – P. 186 – 194.
2. Rehabilitation of the Trans-Femoral Amputee with an Osseointegrated Orosthesis: The United Kingdom Experience / J. Sullivan [at al.] // *Prosthetics and Orthotics International*. – 2003. – Vol. 27, No. 2. – P. 114 – 120.
3. Гайнутдинов, О. И. Моделирование физических процессов в биомеханической системе «имплантат – кость» живого организма / О. И. Гайнутдинов, О. О. Гайнутдинов, Я. И. Кучко // *Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та*. – 2013. – Т. 19, № 2. – С. 309 – 315.
4. ГОСТ Р ИСО 7206-4-2005. Имплантаты для хирургии. Эндопротезы тазобедренного сустава частичные и тотальные. Часть 4. Определение прочности ножек бедренных компонентов. – Введ. 2006-07-01. – М. : Стандартинформ, 2005. – 14 с.

---

## Justification for the Choice of Research Methodology for Biomechanical System “Implant – Bone”

O. I. Gaynutdinov<sup>1</sup>, O. O. Gaynutdinov<sup>2</sup>

*Department “Physics”, TSTU (1); gainutdin49@mail.ru;*

*Department “Orthopedics”, Riga University named after P. Stradynya, Latvia (2)*

**Key words and phrases:** biomechanical system “implant – bone”; methods for implant loading; stresses and deformations.

**Abstract:** By computer simulation the comparative analysis of methods of loading the biomechanical system “implant – bone” of human is performed. Two methods of loading: using external force and external moment of force have been considered. Stress and contact pressure in the system elements were considered as assessment criteria of the system parameters. A comparison of methods of loading was carried out taking into account the possibilities of their practical implementation. It is shown that the process of loading the implant with an external force is more preferable.

### References

1. Hagberg, K., Branemark R. *Prosthetic Orthotherapy International* 25 (December 2001), pp. 186-194.
2. Sullivan J., Uden M., Robinson K., Sooriakumaran S. *Prosthetics and Orthotics International*, vol. 27, no. 2, pp. 114-120.
3. Gainutdinov O.I., Gainutdinov O.O., Kuchko Ya.I. *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2013, vol. 19, no. 2, pp. 309-315.
4. International Organization for Standardization, *ISO 7206-4:2002: Implants for surgery – Partial and total hip joint prostheses – Part 4: Determination of endurance properties of stemmed femoral components*, ISO, Geneva, Switzerland.

## **Begründung der Auswahl der Methodik der Forschungen des biomechanischen Systems „der Implantat – der Knochen“**

**Zusammenfassung:** Mittels der Computermodellierung ist die Vergleichsanalyse der Weisen der Beaufschlagung des biomechanischen Systems „der Implantat – der Knochen“ des Menschen durchgeführt. Es sind zwei Weisen der Belastung betrachtet: mit Hilfe der Außenkraft und des Außenmomentes der Kraft. Als Beispiel der Einschätzung des Systemzustandes wurden die Spannungen und die Kontaktdrücke in den Systemelementen betrachtet. Der Vergleich der Weisen der Belastung wurde mit Rücksicht auf die Möglichkeiten ihrer praktischen Realisation durchgeführt. Es ist vorgeführt, dass die Weise der Beaufschlagung der Implantaten mit Hilfe der äußerlichen Kraft bevorzugter ist.

---

## **Justification du choix de la méthode des études du système biomécanique “implant – os”**

**Résumé:** Par la voie du modélage informatique est effectuée une analyse comparative des moyens de chargement du système biomécanique “implant – os” de l’homme. Sont examinés deux moyens du chargement : à l’aide de la force extérieure et du moment intérieur de la force. En qualité de paramètres de l’estimation de l’état du système sont examinées les tensions et des pressions de contact dans les éléments du système. La comparaison des moyens du chargement a été effectuée compte tenue des possibilités de leur réalisation pratique. Est montré que le moyen du chargement des implants à l’aide de la force extérieure est plus favorable.

---

**Авторы:** *Гайнутдинов Олег Инсафович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Физика», ФГБОУ ВПО «ТГТУ»; *Гайнутдинов Оскар Олегович* – магистр технических наук, преподаватель кафедры «Ортопедия», Рижский университет им. П. Страдыня, Латвийская Республика.

**Рецензент:** *Молотков Николай Яковлевич* – доктор педагогических наук, профессор кафедры «Физика», ФГБОУ ВПО «ТГТУ».

---