

КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВИНТОВОГО ИМПЛАНТАТА С КОСТНЫМИ ТКАНЯМИ ЧЕЛЮСТНОГО СЕКТОРА

Харьковская медицинская академия последипломного образования (г. Харьков)

*Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ» (г. Харьков)

Данная работа является фрагментом НИР «Патогенетичні підходи до методів діагностики та лікування основних стоматологічних захворювань на основі вивчення механізмів захворювань скронево-нижньощелепного суглобу, аномалій розвитку щелеп та зубів з використанням вітчизняних імплантів», № гос. регистрации 0113U000975.

Вступление. В настоящее время все более актуальными становятся исследования, посвященные теоретическому моделированию взаимодействия имплантатов с костными тканями челюстного сектора под действием жевательной нагрузки [5,11]. Для решения этой задачи большинство исследователей выбирают метод конечных элементов (МКЭ), который хорошо подходит для анализа различных биологических объектов и успешно применяется в стоматологии [2,14]. Основным достоинством МКЭ является возможность решения задач для области любой формы, в то время как аналитические решения могут быть получены только для задач с достаточно простой геометрией [15]. Этот факт, а также появление целого ряда коммерческих высокопроизводительных программ, эффективно реализующих этот метод, сделали его одним из основных инструментов для исследования таких систем, как дентальные [10].

Моделированию и анализу взаимодействия различных имплантатов с костной тканью посвящено достаточно большое количество исследований, проводимых как в Украине, так и за рубежом, например [7,8,9,12,13,15]. Началом отечественных комплексных исследований особенностей биомеханики в дентальной имплантологии можно считать монографию [8], в которой установлены величины реакций в наиболее характерных точках контакта имплантата с костной тканью, а также на базе упрощенных моделей проанализированы особенности напряженно-деформированного состояния (НДС) цилиндрических и винтовых имплантатов. Наиболее полно теоретические вопросы биомеханики в стоматологии освещены также в отечественной монографии [9], в которой систематически изложен отечественный опыт конечно-элементного моделирования и

анализа наиболее актуальных задач дентальной имплантологии. В данных монографиях и ряде других работ [7,8,9,12,13,15] показана определяющая роль конфигурации опорной части имплантата на НДС на границе раздела «опорная часть имплантата/костная ткань». Однако, учитывая сложность задачи, в данных работах не были рассмотрены в полной мере важные для практики особенности биомеханики винтовых имплантатов в зависимости от их геометрических параметров – диаметра, длины и угла наклона коронки абатмента.

Цель данного исследования – провести моделирование взаимодействия реально нагруженных винтовых имплантатов различной конфигурации с костной тканью челюстного сектора и оценить влияние их основных геометрических параметров на НДС биомеханической системы.

Объект и методы исследования. Зубной имплантат, служащий опорой зубному протезу, состоит из искусственного корня из медицинского титана класса V (опорной винтовой части) и абатмента, связывающего опору и коронковую часть зуба между собой. Опорная часть имплантата ввинчивается непосредственно в костную ткань челюсти, а затем с помощью цемента на имплантат устанавливается коронка. В основе проведенного исследования в плане регламентации геометрических параметров имплантатов были использованы коммерческие данные его производителя – фирмы «Anthogyr» [4], геометрические характеристики которых приведены в табл. 1.

Таблица 1

**Принятые для исследования
конфигурации имплантата**

Участок с резьбой (опорная часть)			Абатмент (верхняя часть)			
Титановый имплантат	Диаметр, мм	Длина, мм	Титановый эстетический абатмент	Диаметр ортопедического профиля, мм	Высота десны,	Угол наклона коронки
	3,4	10		5	3,5	0°
	4					15°
	4,6					8
	4	10				
		12				

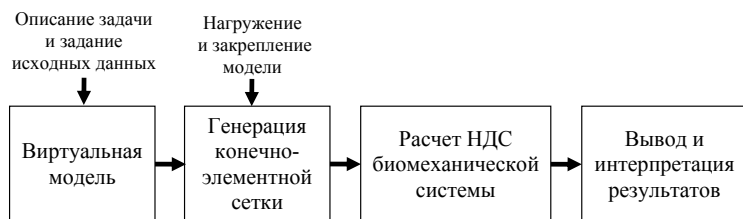


Рис. 1. Алгоритм решения задачи с использованием программного комплекса конечно-элементного анализа.

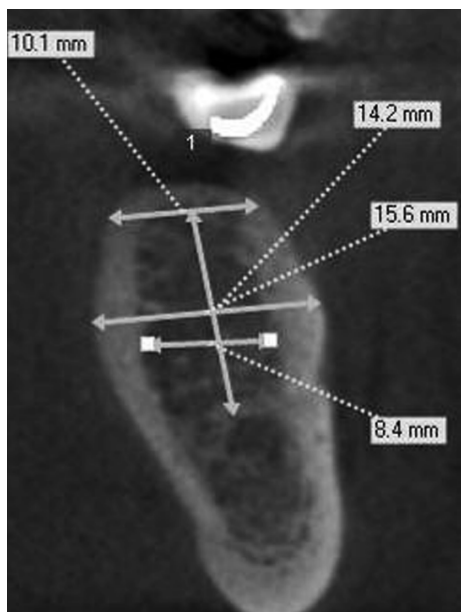


Рис. 2. Компьютерная томография. поперечного сечения челюстного сегмента челюсти, которая была использована для исследований.

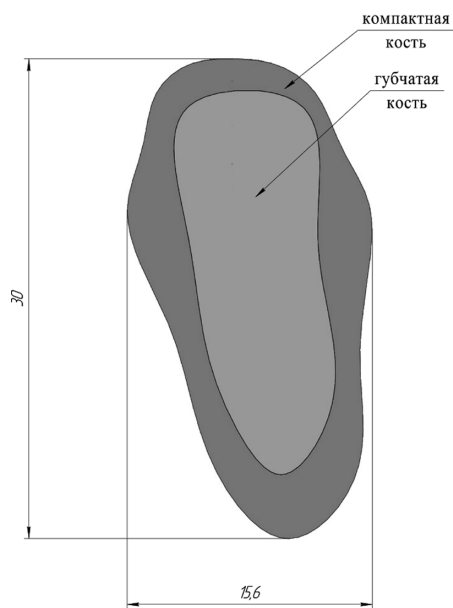


Рис. 3. Сгенерированная виртуальная модель челюстного сегмента для установки имплантата, учитывающая структуру его костной ткани.

Алгоритм решения задачи с использованием программного комплекса конечно-элементного анализа показан на рис. 1.

При определении геометрических параметров челюстного сегмента и структуры его костной ткани были использованы данные компьютерной томографии (рис. 2). Сгенерированная по этим данным виртуальная модель челюстного сегмента для установки имплантата показана на рис. 3.

В настоящее время, несмотря на достаточно большой отечественный и зарубежный клинический опыт, биомеханические свойства костных тканей исследованы недостаточно. Так приведенные в монографии [9], а также в ряде работ [3,6] основные механические характеристики костных тканей нижней челюсти свидетельствует о большом их разбросе. Учитывая выше сказанное, при дальнейших исследованиях были приняты среднестатистические их величины, приведенные в табл. 2.

В процессе эксплуатации имплантат нагружается функциональной жевательной нагрузкой, величина которой колеблется в пределах от 70 до 300 Н в зависимости от расположения зуба [8, 9]. При исследовании принята максимальная величина жевательной нагрузки равной $F_{max} = 300$ Н, которая была равномерно приложена по верхней площадке абатмента, как это показано на рис. 4.

На основе исходных данных была синтезирована конечно-элементная модель, описывающая реальную биомеханическую систему «винтовой имплантат – челюстной сегмент». Для ее генерации были использованы 10-узловые тетраэдральные конечные элементы высокого порядка с квадратичной аппроксимацией перемещений, что обеспечило высокую точность моделирования, особенно в зонах сопряжения резьбы имплантата с костной тканью, характеризующихся большим градиентом компонентов НДС [1]. Конечно-элементная модель, представленная 102231 элементом. Для составных частей виртуальной модели были заданы соответствующие им механические характеристики биологических тканей и материалов. Биомеханическая система была жестко закреплена по фронтальным срезам челюстного сегмента, что исключило его смещение. Нагруженная и закрепленная конечно-элементная модель системы «винтовой имплантат – челюстной сегмент» показана на рис. 5.

При расчете биомеханической системы в программном комплексе конечно-элементного анализа были приняты следующие основные допущения:

Таблица 2

Принятые для расчета величины основных механических характеристик костных тканей нижней челюсти и имплантата

Тип костной ткани	Модуль упругости, ГПа	Коэффициент Пуассона
Костные ткани нижней челюсти		
Компактная	13,7	0,3
Губчатая	1,37	0,3
Имплантат из медицинского титана класса V		
110	41	0,33

Таблица 3

Параметры НДС компонентов биомеханической системы в зависимости от основных геометрических параметров имплантата и абатмента

Имплантат		Эстетический абатмент Угол наклона	Максимальные эквивалентные напряжения, МПа		Максимальные линейные результирующие перемещения, мм
Диаметр	Длина		в компактной кости	в губчатой кости	
Ш3,4 мм	10 мм	15°	62,6	8,2	0,0271
Ш4,0 мм			41,8	7,1	0,0279
Ш4,6 мм			29,7	6,0	0,0296
Ш4,0 мм	8 мм	15°	42,2	9,0	0,0286
	10 мм		41,8	7,1	0,0279
	12 мм		42,6	7,5	0,0275
Ш4,0 мм	10 мм	0°	35,7	7,7	0,0156
		15°	41,8	7,1	0,0279
		23°	61,2	7,01	0,0187

- все материалы считались однородными и изотропными с заданными механическими характеристиками, при этом рассматривались малые деформации и малые перемещения, в силу чего был справедлив закон Гука;

- принято, что верхняя часть шейки имплантата может вплотную (при отсутствии резорбции костной ткани) соприкоснуться с компактной тканью, а нижняя – считается полностью остеоинтегрированной с окружающей губчатой костью.

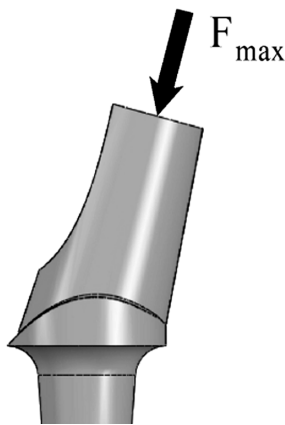


Рис. 4. Схема нагружения биомеханической системы «винтовой имплантат – челюстной сегмент».

Результаты исследований и их обсуждение. В результате моделирования в программном комплексе конечно-элементного анализа для рассматриваемой биомеханической системы были определены компоненты НДС всех ее составляющих. Для анализа напряженного состояния были использованы картины распределения эквивалентных напряжений по Мизесу, которые характеризуют напряженное состояние в любой точке исследуемого объекта и позволяют судить об интенсивности этого состояния. Для анализа деформируемости модели были использованы картины распределения линейных результирующих перемещений.

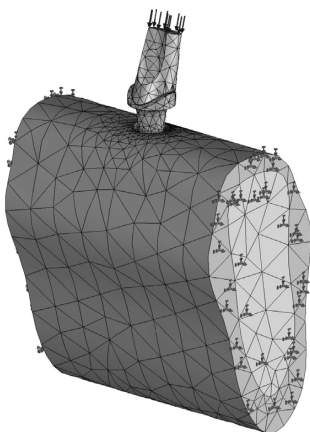


Рис. 5. Нагруженная и закрепленная конечно-элементная модель биомеханической системы «винтовой имплантат – челюстной сегмент».

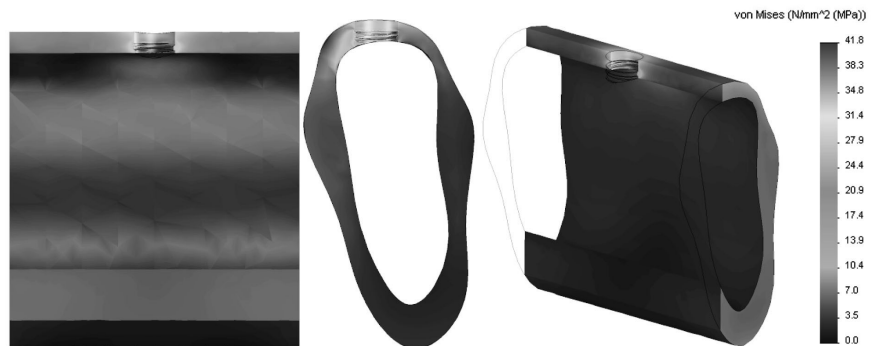


Рис. 6. Картина распределения эквивалентных напряжений в компактной кости, МПа.

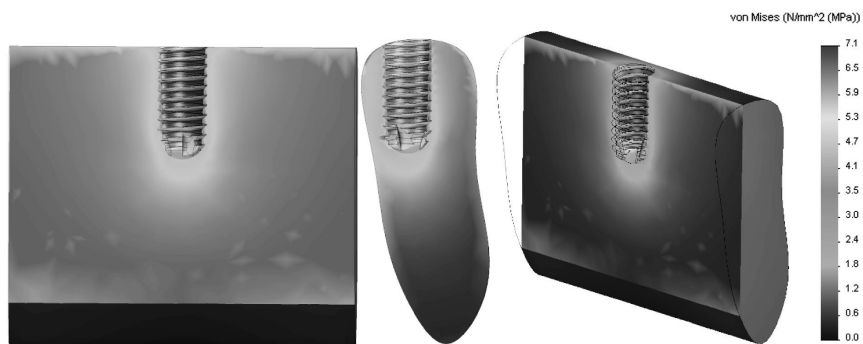


Рис. 7. Картина распределения эквивалентных напряжений в губчатой кости, МПа.



Рис. 8. Картина распределения эквивалентных напряжений в имплантате, МПа.

Полученные в результате расчетов параметры НДС биомеханической системы в зависимости от основных геометрических параметров имплантата и абатмента сведены в **табл. 3**.

На **рис. 6-8** показаны картины распределения эквивалентных напряжений по Мизесу в компактной, губчатой кости и имплантате для одной из его конфигураций (диаметр 4 мм, длина 10 мм и угол наклона эстетического абатмента 15°).

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие **выводы**:

1. Проведено моделирование взаимодействия реально нагруженного винтового имплантата различной конфигурации с костными тканями челюстного сегмента. Показана определяющая роль конфигурации опорной части имплантата на неравномерность напряженно-деформированного состояния на границе раздела «опорная часть имплантата/костная ткань». При этом нагрузка между витками резьбы несущей части имплантата в костных тканях челюстного сегмента распределяется существенно не равномерно. Более интенсивно нагруженными являются витки, контактирующие с компактной костью и первые, контактирующие с губчатой тканью.

2. Для различных конфигураций имплантата и абатмента получены картины напряженно-деформированного состояния элементом биомеханической системы. Наиболее нагруженным элементом биомеханической системы является губчатая кость. Для рассмотренных конфигураций имплантата максимальные эквивалентные напряжения в этой ткани соответствует диаметру имплантата 4 мм, длине 8 мм и углу наклона эстетического абатмента 15°.

Перспективы дальнейших исследований. В дальнейшем планируется изучить функциональную зависимость между основными геометрическими параметрами винтового имплантата различной конфигурации и напряженным состоянием костной ткани челюстного сегмента.

Литература

- Алямовский А. А. SolidWorks/CosmosWorks. Инженерный анализ методом конечных элементов / А. А. Алямовский. – М. : ДМК Пресс, 2004. – 432 с.
- Джалалова М. В. Возможность использования метода конечных элементов в задачах стоматологии: отчет №4749 / М. В. Джалалова. – М. : Изд-во Ин-та механики МГУ, 2005. – 27 с.
- Загорский В. А. Биомеханика костной ткани челюстей и черепа человека / В. А. Загорский, В. В. Загорский. – Краснодар : ДенталЮг, 2010. – № 5. – С. 64–67.
- Каталог имплантатов «Ахиом» компании «Anthogy».
- Параскевич В. Л. Дентальная имплантология. Основы теории и практики / В. Л. Параскевич. – Минск : ООО «Юнипресс», 2002. – 368 с.
- Соловьев М. М. Биомеханические свойства тканей пародонта / М. М. Соловьев, В. В. Лысенков, И. И. Демидова // Стоматология. – 1999. – Т. 18, № 3. – С. 61–67.
- Чуйко А. Н. О биомеханике дентальных имплантатов в зависимости от их диаметра и длины / А. Н. Чуйко, Д. Е. Холин // Стоматолог. – Харьков, 2008 – № 3. – С. 60–64 (Ч. 1); № 4. – С. 50–55 (Ч. 2); № 5. – С. 47–50 (Ч. 3).
- Чуйко А. Н. Особенности биомеханики в стоматологии: монография / А. Н. Чуйко, В. Е. Вовк. – Х. : Прапор, 2006. – 304 с.
- Чуйко А. Н. Биомеханика в стоматологии: монография / А. Н. Чуйко, И. А. Шинчуковский. – Х. : Форт, 2010. – 468 с.
- Application of the Finite Element Method in Implant Dentistry / J. P. Geng, Weiqi Yan, Wei Xu. – Springer, 2010. – 145 p.
- Biomechanics of dental implants: handbook for researchers / editor Murat Zehreli. – New York : Nova Science Publishers, 2012. – 365 p.
- Effect of implant size and shape on implant success rates: a literature review / L. J. Hoon, V. Frias, L. K. Woo, R. F. Wright // Journal of Prosthetic Dentistry. – 2005. – № 94. – P. 377 – 381.
- Importance of diameter-to-length ratio in selecting dental implants: a methodological finite element study / V. Demenko, I. Linetskiy, K. Nesvit [et al.] // Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering. – 2012. -P. 1–7.
- Van Staden R. C. Application of the finite element method in dental implant research / R. C. Van Staden, H. Guan, Y. C. Loo // Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering. – 2006. – № 9. – P. 257 – 270.
- Stress transfer properties of different commercial dental implants: a finite element study / M. A. Pe'reza, J. C. Prados-Frutos, J. A. Bea [et al.] // Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering. – 2010. – P. 1–11.
- Zienkiewicz O. C. The finite element method in engineering science: 7th. ed / O. C. Zienkiewicz, R. L. Taylor, J. Z. Zhu. – Elsevier LTD : Butterworth-Heinemann, 2013. – 756 p.

УДК 616. 314-089. 843-035

КІНЦЕВО-ЕЛЕМЕНТНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВЗАЄМОДІЇ ГВИНТОВОГО ІМПЛАНТАТА З КІСТКОВИМИ ТКАНИНАМИ ЩЕЛЕПНОГО СЕГМЕНТУ

Курицин А. В., Куцевляк В. І., Кондратьев А. В.

Резюме. В даний час все більш актуальними стають дослідження, присвячені теоретичному моделюванню взаємодії імплантатів з кістковими тканинами щелепного сегменту під дією жувального навантаження. Для вирішення цього завдання більшість дослідників вибирають метод кінцевих елементів (МКЕ), який добре личить для аналізу різних біологічних об'єктів і успішно застосовується в стоматології.

Мета – провести моделювання взаємодії реально навантажених гвинтових імплантатів різної конфігурації з кістковою тканиною щелепного сегменту і оцінити вплив їх основних геометричних параметрів на НДВ біомеханічної системи.

В результаті моделювання в програмному комплексі кінцево-елементного аналізу для даної біомеханічної системи були визначені компоненти НДВ всіх її складових.

Для аналізу напруженого стану були використані картини розподілу еквівалентної напруги по Мізесу, яка характеризує напружене полягання в будь-якій точці досліджуваного об'єкту і дозволяє судити про інтенсивність цього стану. Для аналізу деформованості моделі були використана картини розподілу лінійних результуючих переміщень.

Ключові слова: метод кінцевих елементів (МКЕ), напружено-деформований стан (НДВ), гвинтовий імплантат, абатмент.

УДК 616. 314-089. 843-035

КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВИНТОВОГО ИМПЛАНТАТА С КОСТНЫМИ ТКАНЯМИ ЧЕЛЮСТНОГО СЕГМЕНТА

Курицын А. В., Куцевляк В. И., Кондратьев А. В.

Резюме. В настоящее время все более актуальными становятся исследования, посвященные теоретическому моделированию взаимодействия имплантатов с костными тканями челюстного сегмента под действием жевательной нагрузки. Для решения этой задачи большинство исследователей выбирают метод конечных элементов (МКЭ), который хорошо подходит для анализа различных биологических объектов и успешно применяется в стоматологии.

Цель – провести моделирование взаимодействия реально нагруженных винтовых имплантатов различной конфигурации с костной тканью челюстного сегмента и оценить влияние их основных геометрических параметров на НДС биомеханической системы.

В результате моделирования в программном комплексе конечно-элементного анализа для рассматриваемой биомеханической системы были определены компоненты НДС всех ее составляющих. Для анализа напряженного состояния были использованы картины распределения эквивалентных напряжений по Мизесу, которые характеризуют напряженное состояние в любой точке исследуемого объекта и позволяют судить об интенсивности этого состояния. Для анализа деформируемости модели были использована картина распределения линейных результующих перемещений.

Ключевые слова: метод конечных элементов (МКЭ), напряженно-деформированное состояние (НДС), винтовой имплантат, абатмент.

UDC 616. 314-089. 843-035

Final and Element Modelling of Interaction of the Screw Implant with Bone Tissues of the Maxillary Segment

Kuritsyn A. V. Kutsevlyak V. I. Kondratyev A. V.

Abstract. Now more and more actual there are the researches devoted to theoretical modeling of interaction of implants with bone tissues of a maxillary segment under the influence of chewing loading. For the solution of this task the majority of researchers choose the method of final elements (MFE) which well is suitable for the analysis of various biological objects and it is successfully applied in dentistry. The main advantage of MFE is possibility of the solution of tasks for area of any form while decisions can be received only for tasks with rather simple geometry. This fact, and also emergence of a number of the commercial high-performance programs which are effectively realizing this method, made it one of the main tools for research of such systems, as dental.

Objective of this research – to carry out modeling of interaction of really loaded screw implants of various configuration with bone tissue of a maxillary segment and to estimate influence of their key geometrical parameters on the intense the deformed state (IDS) of biomechanical system.

Materials and methods. The tooth implant serving as a support to a denture, consists of an artificial root from the medical titan of a class V (basic screw part) and the abatement connecting a support and crowns part of tooth among themselves. The basic part of an implant is screwed in directly in bone tissue of a jaw, and then by means of cement on an implant the crown is established. At the heart of the conducted research in respect of a regulation of geometrical parameters of implants commercial data of his producer – company “Anthogyr”.

Discussion of results as a result of modeling in a program complex of the final and element analysis for considered biomechanical system the IDS components of all its components were defined. For the analysis of a tension pictures of distribution of equivalent tension according to Mises which characterize a tension in any point of studied object were used and allow to judge intensity of this state. For the analysis of deformability of model were it is used pictures of distribution of linear resultant movements.

The analysis of the received results allows to draw the following *conclusions*. Modeling of interaction of really loaded screw implant of various configuration with bone tissues of a maxillary segment is carried out. The defining role of a configuration of basic part of an implant on unevenness intense deformed a state on limit of the section "basic part of an implant / bone tissue" is shown. Thus loading between rounds of a carving of bearing part of an implant in bone tissues of a maxillary segment is distributed significantly not evenly. More intensively the rounds contacting to a compact bone and first, contacting to spongy tissue are loaded.

For various configurations of an implant and an abutment pictures intense deformed a state are received by an element of biomechanical system. The most loaded element of biomechanical system is the spongy bone. For the considered configurations of an implant the maximum equivalent tension in this tissue corresponds to diameter of an implant of 4 mm, length of 8 mm and a angle of an esthetic abutment 15.

Keys words: method of final elements (MFE), intense the deformed state (IDS), dental implant, abutment.

Рецензент – проф. Новіков В. М.

Стаття надійшла 7. 02. 2014 р. .