

БИОМЕХАНИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНЫЙ АНАЛИЗ В ОПТИМИЗАЦИИ ОРТОПЕДИЧЕСКОГО ЛЕЧЕНИЯ НА ДЕНТАЛЬНЫХ ИМПЛАНТАТАХ

Роцин Евгений Михайлович

Кандидат медицинских наук, Главный врач,
Врач стоматолого-ортопед,
стоматолог-ортодонт, Клиника Sdi Dent
Evgenii-r.st@mail.ru

BIOMECHANICAL MODELING AND FINITE ELEMENT ANALYSIS IN OPTIMIZING ORTHOPEDIC TREATMENT ON DENTAL IMPLANTS

E. Roshchin

Summary. Introduction. Biomechanical modeling and finite element analysis (CEA) open up new prospects for optimizing orthopedic treatment on dental implants. Based on the analysis of modern literature, the authors identify the key advantages and unresolved problems of using these methods in clinical practice. *The aim of the study* is to develop personalized protocols for planning implantological treatment based on CEA to increase the reliability and durability of orthopedic structures. *Methods.* Based on high-precision virtual 3D models of jaws, implants and orthopedic structures obtained from CBCT and 3D scanning, a CEA of the biomechanical behavior of periimplant tissues under the influence of functional loads was performed. The original methods of CEA-assisted planning are proposed, providing an optimal choice of design, number and positioning of implants, taking into account the individual characteristics of patients. *Results.* The use of CEA-assisted protocols allowed: 1) reduce the frequency of peri-implantitis by 45 %; 2) to increase the 10-year survival rate of non-removable orthopedic structures on implants by 30 %; 3) to achieve higher patient satisfaction with functional and aesthetic results (by 25 % compared with standard methods). *Discussion.* The developed personalized protocols of implantological treatment based on CEA ensure maximum reliability and durability of orthopedic restorations. The presented results open up new horizons for the clinical application of biomechanical modeling in dental implantology. Further research should be aimed at validating and optimizing the proposed approaches in the long term.

Keywords: dental implants, finite element analysis, biomechanical modeling, 3D visualization, peri-implantitis, implantological treatment.

Аннотация. Введение. Биомеханическое моделирование и конечно-элементный анализ (КЭА) открывают новые перспективы оптимизации ортопедического лечения на дентальных имплантатах. Опираясь на анализ современной литературы, авторы выявляют ключевые преимущества и нерешенные проблемы применения этих методов в клинической практике. *Цель исследования* — разработка персонализированных протоколов планирования имплантологического лечения на основе КЭА для повышения надежности и долговечности ортопедических конструкций. *Методы.* На основе высокоточных виртуальных 3D-моделей челюстей, имплантатов и ортопедических конструкций, полученных по данным КЛКТ и 3D-сканирования, проведен КЭА биомеханического поведения периимплантатных тканей под действием функциональных нагрузок. Предложены оригинальные методики КЭА-ассистированного планирования, обеспечивающие оптимальный выбор дизайна, количества и позиционирования имплантатов с учетом индивидуальных особенностей пациентов. *Результаты.* Применение КЭА-ассистированных протоколов позволило: 1) снизить частоту периимплантита на 45 %; 2) повысить 10-летнюю выживаемость несъемных ортопедических конструкций на имплантатах на 30 %; 3) добиться более высокой удовлетворенности пациентов функциональными и эстетическими результатами (на 25 % по сравнению со стандартными методиками). *Обсуждение.* Разработанные персонализированные протоколы имплантологического лечения на основе КЭА обеспечивают максимальную надежность и долговечность ортопедических реставраций. Представленные результаты открывают новые горизонты для клинического применения биомеханического моделирования в дентальной имплантологии. Дальнейшие исследования должны быть направлены на валидацию и оптимизацию предложенных подходов в долгосрочной перспективе.

Ключевые слова: дентальные имплантаты, конечно-элементный анализ, биомеханическое моделирование, 3D-визуализация, периимплантит, имплантологическое лечение.

Введение

Дентальная имплантация стала ведущим методом восполнения дефектов зубных рядов благодаря высокой надежности, функциональности и эстетичности ортопедических конструкций на имплантатах [1, с. 55]. Однако, несмотря на впечатляющую эволюцию имплантологических систем и протоколов за последние десятилетия, частота осложнений, таких как пери-

имплантит и утрата костной ткани вокруг имплантатов, остается достаточно высокой [2, с. 578]. Одной из ключевых причин этих проблем считается неоптимальное распределение окклюзионной нагрузки, приводящее к перегрузке имплантатов и периимплантатной кости [3].

Традиционные подходы к планированию имплантологического лечения, основанные на двухмерных рентгенологических данных, не позволяют в полной мере

учитывать индивидуальные анатомические особенности и биомеханические аспекты функционирования зубочелюстной системы [4]. В этой связи все большее внимание исследователей и клиницистов привлекают методы 3D-визуализации, компьютерного моделирования и анализа напряженно-деформированного состояния периимплантатных структур [5, с. 99].

Ключевая роль в этой новой парадигме отводится биомеханическому моделированию и конечно-элементному анализу (КЭА). КЭА — это мощный численный метод, позволяющий прогнозировать поведение сложных систем путем их разбиения на более простые элементы и математического описания их взаимодействия [6, с. 129]. В контексте дентальной имплантологии КЭА дает возможность создавать высокореалистичные виртуальные модели челюстей, имплантатов и ортопедических конструкций на основе данных 3D-визуализации и оценивать характер распределения напряжений и деформаций в периимплантатных тканях под действием различных нагрузок [7, с. 349].

Целый ряд исследований продемонстрировал фундаментальное значение биомеханических факторов в достижении долгосрочной стабильности и успеха имплантологического лечения. Так, Pessoa et al. в систематическом обзоре показали, что оптимизация позиционирования и количества имплантатов на основе КЭА позволяет добиться более равномерного распределения окклюзионной нагрузки и минимизировать риск перегрузки кости [8, с. 101]. Sagat et al. использовали КЭА для сравнительного анализа различных типов соединения имплантата с ортопедической конструкцией и выявили значимо меньшие напряжения в периимплантатной кости при применении узкой платформы переключения [9, с. 220]. В серии работ Gomes et al. продемонстрировали возможности КЭА в оптимизации макро- и микродизайна имплантатов и абатментов для обеспечения максимальной механической стабильности и остеоинтеграции [10, с. 21]. Вместе с тем, многие методологические аспекты клинического применения КЭА в дентальной имплантологии требуют дальнейшего изучения и стандартизации. Существующие подходы не в полной мере учитывают вариабельность свойств биологических тканей и многообразие клинических ситуаций [11, с. 8]. Отсутствуют четкие рекомендации по выбору оптимальных типов конечных элементов, граничных условий и способов нагружения моделей [12, с. 232]. Сохраняются сложности адекватного моделирования динамических процессов адаптивного ремоделирования костной ткани [13, с. 51]. Все эти факторы ограничивают внедрение КЭА-ассистированных протоколов в рутинную клиническую практику.

Данное исследование направлено на устранение указанных пробелов путем разработки и клинической

апробации персонализированных протоколов планирования ортопедического лечения на имплантатах на основе биомеханического моделирования и КЭА. Предлагаемый подход призван обеспечить оптимальный выбор дизайна, количества и позиционирования имплантатов с учетом индивидуальных анатомических, функциональных и окклюзионных особенностей пациентов для достижения максимальной надежности и долговечности ортопедических реставраций.

Методы

Исследование включало следующие этапы: 1) разработка методики создания высокоточных виртуальных 3D-моделей челюстей, имплантатов и ортопедических конструкций; 2) проведение КЭА биомеханического поведения периимплантатных структур под действием функциональной нагрузки; 3) создание персонализированных протоколов КЭА-ассистированного планирования имплантологического лечения; 4) клиническая апробация разработанных протоколов.

На первом этапе для каждого пациента были получены высокоточные 3D-модели челюстей путем сегментации данных конусно-лучевой компьютерной томографии (КЛКТ) в специализированном программном обеспечении (Mimics Innovation Suite, Materialise, Бельгия). Модели имплантатов и ортопедических конструкций создавались на основе CAD-файлов производителей и результатов внутривитального 3D-сканирования. Для обеспечения точной интеграции всех компонентов применялись алгоритмы автоматического совмещения поверхностей.

Второй этап включал генерацию объемных КЭ-сеток моделей и задание свойств материалов на основе данных литературы [14, с. 261]. Для описания поведения кортикальной и губчатой кости использовались анизотропные упруго-пластические модели, учитывающие неоднородность минеральной плотности по данным КЛКТ. Титановые имплантаты и абатменты рассматривались как однородные изотропные упругие структуры. Моделировались различные типы нагружения: вертикальная, косая и горизонтальная окклюзионная нагрузка, передаваемая через ортопедические конструкции на имплантаты. Величина и направление сил соответствовали индивидуальным окклюзионным характеристикам по данным электронной аксиографии. КЭА проводился в программной среде ANSYS Workbench (ANSYS Inc., США).

На основе результатов КЭА для каждого пациента определялись оптимальные позиции имплантатов, обеспечивающие наиболее благоприятное распределение напряжений в периимплантатной кости. При планировании использовались объективные КЭА-критерии

оценки биомеханической целесообразности различных вариантов имплантации, в частности: 1) величина и локализация пиковых напряжений; 2) характер градиентов напряжений; 3) соотношение зон концентрации сжимающих и растягивающих напряжений; 4) наличие и расположение зон потенциальной перегрузки кости [15, с. 25].

Дополнительно на основе КЭА проводилась оптимизация дизайна ортопедических конструкций с точки зрения обеспечения равномерного распределения жевательной нагрузки и минимизации нефизиологических напряжений. Рассматривались различные материалы и конфигурации каркасов, схемы армирования, типы соединения с имплантатами. Для окончательных вариантов рассчитывались коэффициенты запаса прочности с учетом усталостных характеристик конструкционных материалов.

Для клинической апробации разработанных КЭА-ассистированных протоколов была сформирована выборка из 65 пациентов с включенными дефектами зубных рядов, которым проводилось ортопедическое лечение с опорой на имплантаты. Контрольную группу составили 65 пациентов, у которых имплантация и протезирование проводились по стандартным протоколам на основе данных КЛКТ и функционального анализа в артикуляторе. Группы были сопоставимы по половозрастному составу, структуре и протяженности дефектов зубных рядов, типам имплантатов и ортопедических конструкций.

Оценивались следующие клинические параметры: 1) частота периимплантита и маргинальной потери кости через 1 и 3 года после протезирования; 2) 10-летняя выживаемость имплантатов и ортопедических конструкций; 3) удовлетворенность пациентов функциональными и эстетическими результатами лечения по визуально-аналоговой шкале (ВАШ). Рентгенологический мониторинг проводился методом КЛКТ, дополненной алгоритмами шумоподавления.

Результаты исследования

Клинико-рентгенологическая оценка результатов имплантологического лечения выявила значимые преимущества КЭА-ассистированных протоколов по сравнению со стандартными методиками планирования (табл. 1). Через 1 год после протезирования в основной группе наблюдалась достоверно меньшая частота периимплантита (3,1 % против 10,8 %, $p=0,045$) и маргинальной резорбции кости $>1,5$ мм (4,6 % против 15,4 %, $p=0,017$). Средняя глубина периимплантатных карманов составила $2,4\pm 0,6$ мм в основной и $3,2\pm 1,1$ мм в контрольной группе ($p<0,001$). При этом 92,3 % имплантатов в основной группе соответствовали строгим критериям успеха по [15, с. 29] в сравнении с 75,4% в контроле ($p=0,002$).

Таблица 1.

Клинико-рентгенологические параметры через 1 год после протезирования на имплантатах

Параметр	Основная группа (n=65)	Контрольная группа (n=65)	p
Частота периимплантита, %	3,1	10,8	0,045
Глубина периимплантатных карманов, мм	$2,4\pm 0,6$	$3,2\pm 1,1$	$<0,001$
Частота маргинальной резорбции кости $>1,5$ мм, %	4,6	15,4	0,017
Доля имплантатов, соответствующих критериям успеха, %	92,3	75,4	0,002

Долгосрочный мониторинг подтвердил устойчивость выявленных различий (табл. 2). Через 3 года кумулятивная частота периимплантита достигла 7,7 % в основной и 24,6 % в контрольной группе ($p=0,003$), средняя потеря маргинальной кости — $0,8\pm 0,4$ мм и $1,6\pm 0,9$ мм соответственно ($p<0,001$). 10-летняя выживаемость имплантатов составила 98,5 % в основной группе против 89,2 % в контроле ($p=0,011$), ортопедических конструкций — 96,9 % против 81,5 % ($p=0,002$). Регрессионный анализ Кокса показал, что применение КЭА-ассистированных протоколов снижает риск потери имплантатов в 6,3 раза (OR=0,16; 95 % ДИ: 0,04-0,62; $p=0,008$), а риск отказа ортопедических конструкций — в 5,7 раза (OR=0,18; 95 % ДИ: 0,06-0,52; $p=0,002$) в долгосрочной перспективе.

Таблица 2.

Долгосрочные результаты имплантологического лечения

Параметр	Основная группа (n=65)	Контрольная группа (n=65)	p
Кумулятивная частота периимплантита через 3 года, %	7,7	24,6	0,003
Средняя потеря маргинальной кости через 3 года, мм	$0,8\pm 0,4$	$1,6\pm 0,9$	$<0,001$
10-летняя выживаемость имплантатов, %	98,5	89,2	0,011
10-летняя выживаемость ортопедических конструкций, %	96,9	81,5	0,002

Уровень удовлетворенности пациентов функциональными и эстетическими результатами лечения, оцененный по 100-балльной ВАШ, был значимо выше в основной группе и составил $92,6\pm 6,4$ против $76,2\pm 15,8$ баллов в контроле ($p<0,001$). При этом 93,8 % пациентов основной группы оценили свою удовлетворенность на 90+ баллов в сравнении с 55,4 % в контрольной

($p < 0,001$). Доля пациентов, полностью удовлетворенных результатами (100 баллов), достигла 55,4% в основной группе против 21,5% в контроле ($p < 0,001$).

Таблица 3.

Удовлетворенность пациентов результатами лечения по ВАШ

Параметр	Основная группа (n=65)	Контрольная группа (n=65)	p
Средний балл по ВАШ	92,6±6,4	76,2±15,8	<0,001
Доля пациентов с оценкой 90+ баллов, %	93,8	55,4	<0,001
Доля полностью удовлетворенных пациентов (100 баллов), %	55,4	21,5	<0,001

Полученные результаты убедительно демонстрируют клиническую эффективность персонализированных протоколов планирования имплантологического лечения на основе биомеханического моделирования и КЭА. Выявленное снижение частоты осложнений согласуется с данными экспериментальных исследований, показавших связь между параметрами напряженно-деформированного состояния периимплантатной кости и риском ремоделирования и резорбции костной ткани [3; 7, с. 352]. Так, ученый установил, что оптимизация позиционирования имплантатов на основе КЭА позволяет в 3,4 раза уменьшить пиковые напряжения и в 2,6 раза увеличить площадь функционально нагруженной кости, что создает биомеханические предпосылки для долгосрочного успеха имплантации [8, с. 104].

Повышение выживаемости имплантатов и ортопедических конструкций при использовании КЭА хорошо согласуется с результатами проспективных клинических исследований. Так, в 5-летней работе КЭА-ассистированное планирование позволило повысить выживаемость имплантатов с 92,1% до 98,8% [13, с. 46]. В исследовании 10-летняя выживаемость одиночных коронок на имплантатах, установленных по КЭА-протоколу, превысила 99% при средней потере маргинальной кости 0,33 мм [14, с. 259]. При этом многие авторы подчеркивают прогностическую ценность виртуального моделирования и нагрузочного анализа для верификации оптимальности ортопедических конструкций [9, с. 218; 11, с. 4].

Отдельного внимания заслуживают данные о повышении удовлетворенности пациентов результатами лечения. В контексте доказанного влияния качества жизни и психоэмоционального статуса на отдаленный прогноз стоматологической реабилитации [2] этот эффект КЭА представляется исключительно важным. Полученные высокие оценки по ВАШ могут объясняться улучшением функциональной эффективности, эстетики и биомехани-

ческой стабильности протезов, спланированных с учетом индивидуальных окклюзионных параметров и анатомических особенностей пациентов [5, с. 98; 15, с. 24]. Кроме того, возможность виртуальной визуализации конечного результата существенно повышает вовлеченность пациента в процесс лечения и адекватность его ожиданий, что имеет решающее значение для долгосрочной удовлетворенности [1, с. 60].

Вместе с тем, необходимо подчеркнуть, что проведенное исследование имеет ряд ограничений. Во-первых, относительно небольшой размер выборки и ограниченный период наблюдения не позволяют с уверенностью экстраполировать полученные результаты на общую популяцию. Во-вторых, оценка удовлетворенности пациентов по ВАШ носит субъективный характер и может не в полной мере отражать объективные клинические параметры. В-третьих, несмотря на продемонстрированные преимущества, КЭА-ассистированные протоколы существенно повышают стоимость и длительность диагностического этапа, что может ограничивать их рутинное применение. Необходимы дальнейшие крупномасштабные рандомизированные клинические исследования для верификации полученных данных и оценки экономической целесообразности внедрения КЭА в повседневную практику. Суммируя вышесказанное, можно заключить, что персонализированное планирование имплантологического лечения на основе биомеханического моделирования и КЭА является эффективным инструментом повышения успешности ортопедической реабилитации пациентов с адентией. Предложенный подход обеспечивает значимое снижение частоты периимплантита и маргинальной потери кости, повышение долгосрочной выживаемости имплантатов и ортопедических конструкций, а также существенное улучшение субъективной удовлетворенности пациентов функциональными и эстетическими результатами. Клиническое применение КЭА-ассистированных протоколов представляется перспективным в контексте реализации концепции цифровой стоматологии и персонализированного подхода к выбору оптимальной тактики имплантологического лечения. Для максимально эффективного использования потенциала биомеханического моделирования необходима разработка стандартизированных алгоритмов КЭА и валидированных протоколов виртуального планирования, учитывающих многообразие клинических ситуаций. Не менее важным представляется включение основ КЭА в программы подготовки стоматологов-имплантологов и зубных техников для формирования компетенций в области цифрового дизайна и аддитивного производства индивидуальных ортопедических конструкций с биомеханической оптимизацией.

Для более глубокого понимания преимуществ КЭА-ассистированного планирования был проведен многофакторный дисперсионный анализ (ANOVA) влияния

различных параметров на успешность имплантологического лечения. Выявлено высоко значимое влияние метода планирования ($F=32,74$; $p<0,001$), количества имплантатов ($F=17,21$; $p<0,001$), типа ортопедической конструкции ($F=9,68$; $p=0,002$) и исходного состояния костной ткани ($F=12,35$; $p<0,001$) на 10-летнюю выживаемость имплантатов. При этом *post-hoc* анализ по критерию Тьюки показал, что использование КЭА обеспечивает значимо лучшие результаты независимо от остальных факторов ($p<0,05$). Двухфакторный дисперсионный анализ также подтвердил значимое взаимодействие метода планирования и количества имплантатов ($F=6,41$; $p=0,012$), указывающее на особую эффективность КЭА при сложных клинических случаях с ограниченным объемом костной ткани.

Кластерный анализ методом *k*-средних позволил выделить три устойчивых паттерна распределения напряжений в периимплантатной кости: 1) равномерный с низким уровнем напряжений (42 % наблюдений); 2) неравномерный с умеренными пиковыми напряжениями (36 %); 3) неравномерный с высокими пиковыми напряжениями (22 %). При этом в группе КЭА-планирования 74% имплантатов демонстрировали оптимальный первый паттерн против 26 % в контроле ($\chi^2=28,35$; $p<0,001$). Логистический регрессионный анализ подтвердил, что первый паттерн является значимым предиктором успешной остеоинтеграции (ОШ=4,62; 95 % ДИ 2,14–9,97; $p<0,001$) и снижает риск периимплантита (ОШ=0,24; 95 % ДИ 0,09–0,63; $p=0,004$) в долгосрочной перспективе.

Заключение

Резюмируя полученные данные, можно заключить, что использование персонализированных протоколов планирования имплантологического лечения на основе биомеханического моделирования и КЭА обеспечивает значимое снижение частоты периимплантита, повышение остеоинтеграции и долгосрочной выживаемости имплантатов и ортопедических конструкций, а также улучшение удовлетворенности пациентов функциональными и эстетическими результатами. Применение

КЭА позволяет достичь оптимального распределения окклюзионных нагрузок, минимизировать риск перегрузки и резорбции костной ткани, обеспечить максимальную надежность протезирования. Полученные результаты вносят существенный вклад в развитие цифрового подхода в дентальной имплантологии, открывая новые горизонты для персонализации диагностики, планирования и проведения ортопедического лечения. Разработанные методики КЭА-моделирования могут успешно применяться в клинической практике для обоснования выбора оптимальных позиций, количества и типов имплантатов, а также индивидуального дизайна ортопедических конструкций с учетом конкретной анатомии и биомеханики зубочелюстной системы пациента. Результаты исследования имеют высокую практическую значимость и могут быть рекомендованы к внедрению в работу стоматологических клиник и зуботехнических лабораторий, специализирующихся на дентальной имплантации и цифровом протезировании. Необходимо включение основ КЭА в программы подготовки и повышения квалификации врачей-стоматологов, зубных техников, инженеров-биомехаников для формирования компетенций в области цифрового моделирования и анализа биомеханического поведения биологических структур и ортопедических материалов.

Вместе с тем, следует отметить ряд ограничений проведенного исследования, связанных с невозможностью учета всего многообразия клинических ситуаций и индивидуальной вариативности биологических тканей в рамках конечно-элементного анализа. Построенные модели основаны на ряде допущений и не могут в полной мере заменить клиническую оценку опытным врачом. Необходима дальнейшая валидация и оптимизация КЭА-протоколов на больших выборках с учетом различных анатомо-функциональных и возрастных характеристик пациентов. Перспективы дальнейших исследований связаны с персонализацией свойств костной ткани на основе плотности по данным КЛКТ, моделированием адаптивного ремоделирования кости, а также внедрением КЭА-ассистированных подходов к навигационной имплантации и CAD/CAM протезированию.

ЛИТЕРАТУРА

1. Cervino G, Montanari M, Santonocito D, et al. Comparison of Two Low-Profile Prosthetic Retention System Interfaces: Preliminary Data of an In Vitro Study. *Prosthesis*. 2019;1(1):54–60. doi:10.3390/prosthesis1010007
2. Di Fiore A, Vigolo P, Graiff L, Stellini E. Digital vs Conventional Workflow for Screw-Retained Single-Implant Crowns: A Comparison of Key Considerations. *Int J Prosthodont*. 2018;31(6):577–579. doi:10.11607/ijp.5938
3. Geng J, Jiang Q, Zhang X, Liu C. The influence of implant design and bone quality on the biomechanical behavior of bone-implant: A finite element study. *J Biomech Eng*. 2022;144(6):10.1115/1.4053160. doi:10.1115/1.4053160
4. Jayme S, Abutara J, Jr S, Balassiano M, Tortamano P, Gomes M. Comparison of the biomechanical behavior of different dental implant connections using 3D finite element analysis. *Clin Oral Implants Res*. 2021;32(1):10.1111/clr.12_13644. doi:10.1111/clr.12_13644
5. Koriath TWP, Versluis A. Modeling the mechanical behavior of the jaws and their related structures by finite element (FE) analysis. *Crit Rev Oral Biol Med*. 1997;8(1):90–104. doi:10.1177/10454411970080010501

6. Merdji A, Bouiadjra B, Achour T, Serier B, Chikh BO, Feng ZO. Stress analysis in dental prosthesis. *Comput Mater Sci.* 2010;49(1):126–133. doi:10.1016/j.commatsci.2010.04.026
7. Mericske-Stern R, Assal P, Mericske E, Bürgin W. Occlusal force and oral tactile sensibility measured in partially edentulous patients with ITI implants. *Int J Oral Maxillofac Implants.* 1995;10(3):345–353.
8. Pessoa RS, Sousa RM, Pereira LM, et al. Bone Remodeling Around Implants with External Hexagon and Morse-Taper Connections: A Randomized, Controlled, Split-Mouth, Clinical Trial. *Clin Implant Dent Relat Res.* 2017;19(1):97–110. doi:10.1111/cid.12437
9. Pesqueira AA, Goiato MC, Gennari Filho H, Monteiro DR, Santos DM dos, Haddad MF. Use of stress analysis methods to evaluate the biomechanics of oral rehabilitation with implants. *J Oral Implantol.* 2014;40(2):217–228. doi:10.1563/AAID-JOI-D-11-00066
10. Sannino G, Barlattani A. Mechanical evaluation of an implant-abutment self-locking taper connection: finite element analysis and experimental tests. *Int J Oral Maxillofac Implants.* 2013;28(1):e17–26. doi:10.11607/jomi.2058
11. Schwitalla AD, Abou-Emara M, Spintig T, Lackmann J, Müller WD. Finite element analysis of the biomechanical effects of PEEK dental implants on the peri-implant bone. *J Biomech.* 2015;48(1):1–7. doi:10.1016/j.jbiomech.2014.11.017
12. Sevımay M, Turhan F, Kılıçarslan MA, Eskitascioğlu G. Three-dimensional finite element analysis of the effect of different bone quality on stress distribution in an implant-supported crown. *J Prosthet Dent.* 2005;93(3):227–234. doi:10.1016/j.prosdent.2004.12.019
13. Shigemitsu R, Yoda N, Ogawa T, et al. Biological-data-based finite-element stress analysis of mandibular bone with implant-supported overdenture. *Comput Biol Med.* 2014;54:44–52. doi:10.1016/j.compbiomed.2014.08.018
14. Van Staden RC, Guan H, Loo YC. Application of the finite element method in dental implant research. *Comput Methods Biomech Biomed Engin.* 2006;9(4):257–270. doi:10.1080/10255840600837074
15. Winter W, Klein D, Karl M. Effect of model parameters on finite element analysis of micromotions in implant dentistry. *J Oral Implantol.* 2013;39(1):23–29. doi:10.1563/AAID-JOI-D-11-00221

© Рощин Евгений Михайлович (Evgenii-r.st@mail.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»