

DOI: 10.18481/2077-7566-2025-21-3-46-50

УДК 616.314-089.23

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИ ПРИМЕНЕНИИ ОРТОПЕДИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ С ОПОРОЙ НА ДЕНТАЛЬНЫЕ ИМПЛАНТАТЫ

Шлык А. Д., Горяйнова А. В., Аль-Дирес А. М. А., Николенко Д. А., Рудова А. И.

Первый московский государственный медицинский университет им. И. М. Сеченова, г. Москва, Россия

Аннотация

Статья посвящена актуальным вопросам повышения долговечности и функциональной надежности ортопедических конструкций с опорой на дентальные имплантаты. Авторами обосновывается значимость темы исследования, обусловленная необходимостью точного прогнозирования биомеханического поведения имплантационных систем, включая влияние типа соединения имплантата и абатмента, метода фиксации и угла наклона имплантата.

Актуальность исследования подтверждается активным внедрением методов математического моделирования, в частности метода конечных элементов (МКЭ), позволяющего анализировать распределение нагрузок и напряжений в костной ткани и компонентах протеза. Однако аспекты влияния различных конфигураций соединений (наружных, внутренних, конических) и способов фиксации (цементной, винтовой) на долгосрочную стабильность ортопедических конструкций остаются недостаточно изученными.

Авторами проведен систематический анализ отечественных и зарубежных научных публикаций из баз данных PubMed, Medline, Cochranе, eLIBRARY и CyberLeninka, посвященных математическому моделированию в ортопедической стоматологии. Использован комплекс методов, включающий сравнительный анализ, обобщение данных, оценку достоверности результатов и критический разбор клинических исследований.

Результаты исследования показали, что внутренние и конические соединения обладают большей устойчивостью к микроподвижности и концентрации напряжений по сравнению с наружными; винтовая фиксация обеспечивает лучшую стабильность при высоких нагрузках, тогда как цементная фиксация требует дополнительного изучения в долгосрочной перспективе; угол наклона имплантата существенно влияет на распределение напряжений в костной ткани.

Заключение. Несмотря на прогресс в области математического моделирования, сохраняется необходимость стандартизации методов анализа и проведения дополнительных исследований для оптимизации параметров имплантационных систем. Полученные данные могут быть использованы для повышения точности планирования ортопедического лечения и снижения риска осложнений.

Ключевые слова: соединение импланта и абатмента, фиксирующий винт, биомеханика, математическое моделирование, метод конечных элементов, ортопедическая конструкция

Авторы заявили об отсутствии конфликта интересов

Андрей Дмитриевич ШЛЫК ORCID ID 0000-0001-7829-975X

ассистент кафедры ортопедической стоматологии Института стоматологии им. Е.В. Боровского, Первый московский государственный медицинский университет им. И.М. Сеченова, г. Москва, Россия
andshlyk@yandex.ru

Анастасия Владимировна ГОРЯЙНОВА ORCID ID 0009-0000-2473-2175

студент 4 курса Института стоматологии им. Е.В. Боровского, Первый московский государственный медицинский университет им. И.М. Сеченова, г. Москва, Россия
nasttsun@gmail.com

Абдулла Махмуд Ахмед АЛЬ-ДИРЕС ORCID ID 0000-0003-4855-7687

аспирант кафедры ортопедической стоматологии Института стоматологии им. Е.В. Боровского, Первый московский государственный медицинский университет им. И.М. Сеченова, г. Москва, Россия
abdumaster3@gmail.com

Денис Андреевич НИКОЛЕНКО ORCID ID 0000-0002-4067-8321

к.м.н., доцент кафедры ортопедической стоматологии Института стоматологии им. Е.В. Боровского, Первый московский государственный медицинский университет им. И.М. Сеченова, г. Москва, Россия
nikolenko.denis.a@yandex.ru

Анна Ильясовна РУДОВА ORCID ID 0009-0001-5298-8992

ассистент кафедры ортопедической стоматологии Института стоматологии им. Е.В. Боровского, Первый московский государственный медицинский университет им. И.М. Сеченова, г. Москва, Россия
gilmanova_a_i@staff.sechenov.ru

Адрес для переписки: Анастасия Владимировна ГОРЯЙНОВА

105523, Москва, Щелковское ш., д. 78

+ 7 (919) 7734710

nasttsun@gmail.com

Образец цитирования:

Шлык А. Д., Горяйнова А. В., Аль-Дирес А. М. А., Николенко Д. А., Рудова А. И.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИ ПРИМЕНЕНИИ ОРТОПЕДИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ С ОПОРОЙ НА ДЕНТАЛЬНЫЕ ИМПЛАНТАТЫ. Проблемы стоматологии. 2025; 3: 46-50.

© Шлык А. Д. и др., 2025

DOI: 10.18481/2077-7566-2025-21-3-46-50

Поступила 06.07.2025. Принята к печати 04.08.2025

DOI: 10.18481/2077-7566-2025-21-3-46-50

MATHEMATICAL MODELLING IN THE APPLICATION OF ORTHOPAEDIC STRUCTURES SUPPORTED BY DENTAL IMPLANTS**Shlyk A.D., Goryainova A.V., Al-Dires A.M.A., Nikolenko D.A.***I.M. Sechenov Moscow State Medical University, Moscow, Russia***Abstract**

The article is devoted to topical issues of improving the durability and functional reliability of orthopaedic structures based on dental implants. The authors justify the significance of the research topic, which is determined by the need for accurate prediction of the biomechanical behaviour of implant systems, including the influence of the type of implant and abutment connection, the fixation method, and the angle of the implant.

The relevance of this research is confirmed by the active introduction of mathematical modelling methods, in particular the finite element method (FEM), which allows analysing the distribution of loads and stresses in bone tissue and prosthesis components. However, the aspects of the influence of various connection configurations (external, internal, conical) and fixation methods (cemented, screw) on the long-term stability of orthopaedic structures remain insufficiently studied.

The study conducted a systematic analysis of domestic and foreign scientific publications from the PubMed, Medline, Cochrane, eLIBRARY, and CyberLeninka databases devoted to mathematical modelling in orthopaedic dentistry. A set of methods was used, including comparative analysis, data summarisation, assessment of result reliability, and critical analysis of clinical studies.

The results of the study showed that internal and conical connections are more resistant to micromobility and stress concentration than external ones; screw fixation provides better stability under high loads, while cemented fixation requires further study in the long-term; the angle of the implant significantly affects the distribution of stresses in bone tissue.

Conclusion. Despite advances in mathematical modelling, there is still a need to standardise analysis methods and conduct additional studies to optimise the parameters of implant systems. The data obtained can be used to improve the accuracy of orthopaedic treatment planning and reduce the risk of complications.

Keywords: implant-abutment connection, fixation screw, biomechanics, mathematical modelling, finite element method, prosthetic design

The authors declare no conflict of interest**Andrey D. SHLYK** ORCID ID 0000-0001-7829-975X

Assistant of the Department of Orthopedic Dentistry at the E.V. Borovsky Institute of Dentistry,
I.M. Sechenov Moscow State Medical University, Moscow, Russia
andshlyk@yandex.ru

Anastasia V. GORYAINOVA ORCID ID 0009-0000-2473-2175

4th year student of the E.V. Borovsky Institute of Dentistry, I.M. Sechenov Moscow State Medical University, Moscow, Russia
nasttsun@gmail.com

Abdullah M. A. AL-DIRES ORCID ID 0000-0003-4855-7687

post-graduate student of the Department of Orthopedic Dentistry at the E.V. Borovsky Institute of
Dentistry, I.M. Sechenov Moscow State Medical University, Moscow, Russia
abdumaster3@gmail.com

Denis A. NIKOLENKO ORCID ID 0000-0002-4067-8321

PhD in Medical Sciences, Associate Professor of the Department of Orthopedic Dentistry, Borovsky
Institute of Dentistry, I.M. Sechenov Moscow State Medical University, Moscow, Russia
nikolenko.denis.a@yandex.ru

Anna I. RUDOVA ORCID ID 0009-0001-5298-8992

Assistant of the Department of Orthopedic Dentistry at the E.V. Borovsky Institute of Dentistry,
I.M. Sechenov Moscow State Medical University, Moscow, Russia
gilmanova_a_i@staff.sechenov.ru

Correspondence address: Anastasia V. GORYAINOVA

78 Shchelkovskoe shosse, Moscow, 105523
+7 (919) 773-47-10
nasttsun@gmail.com

For citation:

Shlyk A.D., Goryainova A.V., Al-Dires A.M.A., Nikolenko D.A.

MATHEMATICAL MODELLING IN THE APPLICATION OF ORTHOPAEDIC STRUCTURES SUPPORTED BY DENTAL IMPLANTS.

Actual problems in dentistry. 2025; 3: 46-50. (In Russ.)

© Shlyk A.D. et al., 2025

DOI: 10.18481/2077-7566-2025-21-3-46-50

Received 06.07.2025. Accepted 04.08.2025

Введение

Современная имплантология сосредоточена на повышении долговечности и функциональной надежности ортопедических конструкций, основанных на денальных имплантатах [7, 8, 11]. Ключевым фактором выступает точный анализ биомеханического поведения имплантата и ортопедической конструкции, включая особенности соединения имплантата и абатмента, взаиморасположение имплантатов, угол наклона имплантата, а также тип и метод фиксации ортопедической конструкции [3, 9, 16]. Ошибки в расчетах нагрузок или игнорирование влияния конструктивных параметров могут привести к перегрузке костной ткани, расцементировке ортопедической конструкции или осложнениям, связанным с нестабильностью деталей имплантационных систем [4–6, 10, 13, 15, 20].

В контексте комплексного анализа ортопедических конструкций с опорой на денальные имплантаты одной из наиболее актуальных областей научного поиска становится применение математического моделирования, в частности метода конечных элементов (МКЭ). Это позволяет объективно оценить и спрогнозировать поведение различных конструктивных схем, учитывая сложную геометрию, материалы и условия эксплуатации [1, 8, 9, 13, 14, 17, 20]. Особое внимание при этом уделяется таким факторам, как типы соединений (наружное и внутреннее шестигранное, комбинированное, конусное и плоскостное), ориентация имплантата под разными углами, а также методам фиксации ортопедических конструкций (цементная или винтовая фиксация, использование титановых оснований и опора на мульти-юнит абатменты) [1, 3, 8, 12]. Изучение указанных параметров с помощью математического моделирования открывает возможности для более обоснованного подбора протоколов лечения, выбора оптимальных геометрических характеристик деталей имплантационных систем, а также повышения предсказуемости и эффективности имплантологического вмешательства [2, 5–11, 14, 19].

По данным обзора Shakir и соавт. [14], несмотря на широкое применение метода конечных элементов для анализа биомеханического поведения денальных имплантатов, имеется значительная вариативность в исходных данных, критериях моделирования и методологиях [13, 18–20]. Это затрудняет сопоставление результатов исследований, стандартизацию подходов и выработку клинических рекомендаций. Используются различные модели (по геометрии и материалам), граничные условия и критерии прочностной оценки [14, 19, 20]. Это ограничивает возможность обоснованного выбора типа соединения (наружное или внутреннее шестигранное, комбинированное, конусное, плоскостное), метода фиксации (цементная, винтовая, с титановым основанием, с опорой на мульти-юниты) и угла установки имплантата, что усложняет прогнозирование функционирования конструкций в долгосрочной перспективе [4, 18, 20].

Таким образом, в литературе отмечается острая необходимость в систематизации и стандартизации подходов

к математическому моделированию с учетом множества конструктивных и технологических переменных, чтобы повысить достоверность и практическую применимость получаемых результатов [15, 18].

Цель исследования

Систематизировать и проанализировать существующие подходы к математическому моделированию биомеханического поведения ортопедических конструкций с опорой на денальные имплантаты, сопоставляя различные типы соединений (наружное и внутреннее шестигранное, комбинированное, конусное, плоскостное), учитывая угол установки имплантатов, а также оценить влияние методов фиксации (цементной, винтовой и опорой на мульти-юниты) на надежность и долговечность конструкций, возникновение напряжений.

Материалы и методы

В рамках настоящего исследования проведен анализ научной литературы, посвященной применению методов математического моделирования для изучения биомеханического поведения импланта и ортопедической конструкции. Особое внимание уделено использованию численных методов, включая анализ конечных элементов, для оценки влияния различных типов соединений, методов фиксации и угла установки имплантатов на распределение нагрузок и напряженно-деформированное состояние конструкции [6, 9, 10, 13, 16]. Подходы к моделированию рассматривались в контексте их клинической значимости и потенциала для стандартизации рекомендаций.

Литературный поиск осуществлялся в ведущих электронных базах данных, таких как PubMed, Medline, Cochrane, Elibrary и Cyberleninka, что позволило охватить максимально широкий спектр актуальной информации. Для повышения полноты отбора использовались как русскоязычные, так и англоязычные поисковые запросы: «математическое моделирование», «цементная фиксация», «винтовая фиксация», «титановые основания», «мульти-юнитные абатменты», «наклонные нагрузки», «математическое моделирование в стоматологии», «биомеханика денальных имплантатов», «типы соединений имплантатов и их влияние на стабильность», «конструкция имплант-абатмент при наклонных нагрузках», «напряжения и деформации в периимплантатной зоне», «сравнение наружного и внутреннего соединений имплантатов», «прогнозирование долговечности ортопедических конструкций», «биомеханическая эффективность конусных соединений имплантатов», «метод конечных элементов для оценки имплантатов», а также «mathematical modeling», «cement fixation», «screw fixation», «titanium bases», «multi-unit abutments», «inclined loads», «implant screw», «mathematical modeling in dentistry», «biomechanics of dental implant systems», «cement-retained vs screw-retained prostheses», «stress and strain analysis in peri-implant bone», «implant design under inclined loads», «comparison of external and internal implant connections», «longevity of prosthetic systems with different connections», «biomechanical efficiency of conical implant connections».

Такой подход обеспечил доступ к разнообразным методологическим точкам зрения и позволил сформировать

целостное представление о влиянии типа соединения на биомеханическую устойчивость и долговечность ортопедических конструкций с опорой на имплантаты.

Результаты

Математическое моделирование, базирующееся преимущественно на методе конечных элементов (МКЭ), широко применяется для оценки биомеханического поведения ортопедических конструкций с опорой на имплантаты, учитывая различные типы соединения имплантата и абатмента, геометрию и угол установки имплантата, а также методы фиксации ортопедических конструкций [6, 19]. Применение МКЭ позволяет детально проанализировать напряженно-деформированное состояние имплант-опорных систем при варьировании конструктивных параметров, что необходимо для повышения прогнозируемости клинических результатов [3, 17].

Среди основных типов соединений — наружного плоскостного, внутреннего плоскостного, комбинированного (конусного и плоскостного): наиболее традиционным вариантом остается наружное плоскостное соединение (чаще шестигранное), которое изначально широко использовалось благодаря простоте и унифицированности систем [10]. Однако моделирование показывает, что наружное плоскостное соединение может быть более подвержено микродвижениям и повышенной концентрации напряжений в краевой зоне кости, особенно при наклонных нагрузках [15, 18]. Внутреннее плоскостное соединение за счет утопленного интерфейса способствует равномерному распределению напряжений, минимизируя риск расцементирования и микроподвижности, что подтверждается данными численного моделирования [12, 15]. Комбинированные типы соединений, сочетающие элементы конусного и плоскостного интерфейса, позволяют достичь компромисса между технологической простотой и биомеханической надежностью [1, 2, 3, 5, 6].

Комбинированные соединения демонстрируют улучшенные характеристики соединения имплант-абатмент, создавая более герметичный и стабильный контакт [4, 10, 11]. Математическое моделирование подтверждает, что конусные интерфейсы лучше противостоят наклонным нагрузкам, снижая риск усталостного разрушения имплантата и окружающих тканей [14]. Плоскостное соединение используется реже, но обеспечивает удовлетворительное распределение напряжения при специфических нагрузках, о чем свидетельствуют результаты математических исследований [11].

Под влиянием наклонно приложенных нагрузок угол установки имплантата приобретает критическое значение в формировании напряженно-деформированного состояния системы «имплант–абатмент–кость» [10]. Наружные шестигранные соединения при отклонении имплантата от вертикальной оси провоцируют повышенную концентрацию напряжений, что способствует микродвижениям и увеличению риска механических и биологических осложнений [1, 5, 6, 11, 14, 20]. Напротив, внутренние шестигранные и конические конфигурации обеспечивают более равномерное распределение сил и снижение уровня напряжений в периимплантатной кости, повышая пред-

сказуемость и устойчивость имплантно-ортопедических систем в долгосрочной перспективе.

Тип фиксации ортопедической конструкции (цементная, винтовая, использование титановых оснований и мультиюнитных абатментов) оказывает существенное влияние на биомеханические характеристики системы. Сравнительный анализ цементно- и винтово-ретенционных подходов с биомеханической точки зрения является ключевым элементом рационального планирования лечения [3, 19].

Цементно-ретенционные ортопедические конструкции традиционно рассматриваются в качестве эстетически предпочтительного решения за счет отсутствия винтового канала и относительной технологической простоты изготовления [4, 11]. Однако наличие остаточного цемента способно индуцировать воспалительные процессы в периимплантатных тканях и ускоренное уменьшение костной поддержки [4]. Результаты моделирования указывают на менее благоприятное распределение напряжений при наклонных нагрузках в цементных конструкциях, особенно при применении наружного шестигранного соединения, что повышает риск расцементирования и усталостных повреждений ортопедической конструкции. Кроме того, извлечение и последующая корректировка цементированной ортопедической конструкции при необходимости ревизии представляют определенную сложность. Конструкции на винтовой фиксации облегчают доступ к абатменту, упрощая техническое обслуживание, ремонт и замену ортопедической конструкции [3]. Математическое моделирование свидетельствует о более равномерном распределении напряжений при функциональных и наклонных нагрузках в винтовых системах, а также о снижении риска периимплантных осложнений, обусловленных отсутствием резидуального цемента.

Применение титановых оснований в сочетании с винтовой фиксацией способствует оптимизации адаптации контактных поверхностей и снижению локальных напряжений, увеличивая долговечность всей конструкции [7].

Использование титановых оснований и мультиюнитных абатментов (MUA) расширяет возможности ортопедического лечения, позволяя компенсировать отклонения имплантатов и минимизируя микродвижения интерфейса, адаптируя конструкцию под различные углы установки имплантатов, увеличивает устойчивость системы в целом, что подтверждается результатами вычислительных моделей.

Современные CAD/CAM-подходы и внедрение ангулированных винтовых каналов (angulated screw channels) предоставляют возможность коррекции угла введения винта, что улучшает эстетические показатели и снижает напряжения в конструкции [7]. Исследования показывают, что интеграция таких технических решений с титановыми основаниями и MUA повышает предсказуемость клинических исходов и снижает вероятность осложнений, связанных с фиксационными элементами.

Таким образом, более детальный анализ с использованием МКЭ демонстрирует, что винтовая фиксация в сочетании с титановыми основаниями, мульти-

юнитными абатментами и ангулированными винтовыми каналами в большинстве случаев обеспечивает более благоприятное распределение напряжений и упрощает обслуживание конструкции по сравнению с цементной фиксацией. Однако и цементная, и винтовая фиксации имеют свои клинические показания и ограничения, зависящие от конкретной клинической ситуации, эстетических требований и опыта врача.

Результаты, полученные при помощи математического моделирования, указывают на необходимость комплексного учета типа соединения, угла установки и метода фиксации при планировании ортопедических конструкций с опорой на имплантаты [6, 7, 9, 11, 20]. Однако отсутствие единых стандартов моделирования и критериев оценки усложняет прямое сопоставление различных исследований [2, 5–8, 10]. Дальнейшая стандартизация подходов к математическому моделированию позволит более объективно оценивать биомеханическую эффективность различных типов соединений и методов фиксации, повышая достоверность прогноза клинических результатов.

Выводы

В большинстве проанализированных исследований отмечается, что конические и глубокие плоскостные соединения имплантата с абатментом в большей степени способствуют снижению риска осложнений, связанных с фиксирующим винтом. Однако встречаются публикации, в которых авторы указывают на отсутствие существенного влияния типа соединения на стабиль-

ность винта и долговечность ортопедической конструкции. Во многих работах прослеживается взаимосвязь между биомеханическими осложнениями в системе «имплантат — супраструктура — винт» и конструктивными особенностями ортопедических конструкций, а также наличием парафункциональных окклюзионных нагрузок или эксцентрических контактов у пациента. Несоответствие параметров фиксации и угла установки имплантата, а также неучитывание индивидуальных биомеханических условий способствуют увеличению риска микродвижений, повреждений и расцементирования [11].

Результаты проведенного анализа позволяют заключить, что закономерности возникновения биомеханических осложнений активно изучаются и все более детализируются с применением математического моделирования и стандартизированных методов анализа методом конечных элементов. Вместе с тем, появление новых типов соединений, более сложных интерфейсов и ангулированных винтовых каналов для винтовой фиксации требует дальнейших многосторонних исследований [3–5, 7–10]. В ходе таких работ необходимо учитывать не только геометрию и тип соединения ортопедической конструкции с опорой на имплантаты, но и факторы функциональной нагрузки, парафункциональные изменения окклюзии, а также индивидуальные особенности пациента, чтобы обеспечить более точный прогноз и повысить клиническую эффективность ортопедического лечения на имплантатах [10, 11–13].

Литература/References

1. Büyük F.N., Savran E., Karpat F. Review on finite element analysis of dental implants. *Journal of Dental Implant Research*. 2022;41(3):50–63. <http://dx.doi.org/10.54527/jdir.2022.41.3.50>
2. Lemos C.A.A., Verri F.R., Noritomi P.Y., Kemmoku D.T., Souza Batista V.E. de, Cruz R.S. et al. Effect of bone quality and bone loss level around internal and external connection implants: A finite element analysis study. *The Journal of Prosthetic Dentistry*. 2021;125(1): 137.e1–137.e10. <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2020.06.029>
3. Adatia N.D., Bayne S.C., Cooper L.F., Thompson J.Y. Fracture Resistance of Yttria-Stabilized Zirconia Dental Implant Abutments. *Journal of Prosthodontics*. 2009;18(1):17–22. <https://doi.org/10.1111/j.1532-849x.2008.00378.x>
4. Al-Thobity A.M. Titanium Base Abutments in Implant Prosthodontics: A Literature Review. *European Journal of Dentistry*. 2021;16(01):49–55. <https://doi.org/10.1055/s-0041-1735423>
5. Camps-Font O., Rubianes-Porta L., Valmaseda-Castellón E., Jung R.E., Gay-Escoda C., Figueiredo R. Comparison of external, internal flat-to-flat, and conical implant abutment connections for implant-supported prostheses: A systematic review and network meta-analysis of randomized clinical trials. *The Journal of Prosthetic Dentistry*. 2023;30(3):327–340. [https://www.thejpd.org/article/S0022-3913\(21\)00529-1/fulltext](https://www.thejpd.org/article/S0022-3913(21)00529-1/fulltext)
6. Rubianes-Porta L., Traver-Méndez V., Ghiorgiu R., Piera-Auguet J., Subirà-Pifarré C., Figueiredo R. et al. Impact of implant-abutment connection design on biological and mechanical outcomes in posterior single-tooth restorations: A randomized clinical trial. *The Journal of Prosthetic Dentistry*. Published online July 14, 2025. Online ahead of print. <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2025.06.022>
7. Derksen W., Joda T., Chantler J., Fehmer V., Gallucci G.O., Gierthmuehlen P.C. et al. Group 2 ITI Consensus Report: Technological developments in implant prosthetics. *Clinical oral implants research*. 2023;34(S26):104–111. <https://doi.org/10.1111/clr.14148>
8. Falcinelli C., Valente F., Vasta M., Traini T. Finite element analysis in implant dentistry: State of the art and future directions. *Dental Materials*. 2023;39(6):539–556. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2023.04.002>
9. Maria Prados-Privado, Ivorra C., Martínez-Martínez C., Gehrke S.A., José Luis Calvo-Guirado, Prados-Frutos J.C. A Finite Element Analysis of the Fatigue Behavior and Risk of Failure of Immediate Provisional Implants. *Metals*. 2019;9(5):535. <https://doi.org/10.3390/met9050535>
10. Chang Y., Tambe A.A., Maeda Y., Wada M., Gonda T. Finite element analysis of dental implants with validation: to what extent can we expect the model to predict biological phenomena? A literature review and proposal for classification of a validation process. *International journal of implant dentistry*. 2018;4(1):7. <https://doi.org/10.1186/s40729-018-0119-5>
11. Gallardo Y.N.R., da Silva-Olivio I.R., Gonzaga L., Sesma N., Martin W. A Systematic Review of Clinical Outcomes on Patients Rehabilitated with Complete-Arch Fixed Implant-Supported Prostheses According to the Time of Loading. *Journal of Prosthodontics*. 2019;28(9):958–968. <https://doi.org/10.1111/jopr.13104>
12. Kim W., Li X.C., Bidra A.S. Clinical outcomes of implant-supported monolithic zirconia crowns and fixed partial dentures: A systematic review. *Journal of Prosthodontics*. 2022;32(2):102–107. <https://doi.org/10.1111/jopr.13575>
13. Prados-Privado M., Martínez-Martínez C., Gehrke S.A., Prados-Frutos J.C. Influence of Bone Definition and Finite Element Parameters in Bone and Dental Implants Stress: A Literature Review. *Biology*. 2020;9(8):224. <https://doi.org/10.3390/biology9080224>
14. Shahad Mohammed Shakir, Saja Ali Muhsin, Raad Al Marza. Finite Element Modelling Based Studies for Dental Implants: Systematic Review. *Journal of techniques*. 2022;4(33):155–169. <http://dx.doi.org/10.51173/jt.v4i33.771>
15. Tribst J.P.M., Dal Piva A.M.d.O., da Silva-Concilio L.R., Ausiello P., Kalman L. Influence of Implant-Abutment Contact Surfaces and Prosthetic Screw Tightening on the Stress Concentration, Fatigue Life and Microgap Formation: A Finite Element Analysis. *Oral*. 2021;1(2):88–101. <https://doi.org/10.3390/oral1020009>
16. González-Mederos P., Rodríguez-Guerra J., González J., Picardo A., Torres Y. A Finite Element Analysis of a New Dental Implant Design: The Influence of the Diameter, Length, and Material of an Implant on Its Biomechanical Behavior. *Materials*. 2025;18(12):2692. <https://doi.org/10.3390/ma18122692>
17. Nokar S., Jalali H., Nozari F., Arshad M. Finite Element Analysis of Stress in Bone and Abutment-Implant Interface under Static and Cyclic Loadings. *Frontiers in Dentistry*. 2020;17(21):1–8. <https://doi.org/10.18502/fid.v17i21.4315>
18. Widjaja W., Hartung C. Biomechanische Untersuchungen und Finite-Elemente-Analysen an einem Knochen-Implantat-Verbund - Biomechanical Investigations and Finite Element Analysis of a Bone-implant Interface. *Biomedizinische Technik/Biomedical Engineering*. 2001;46(12):351–354. <http://dx.doi.org/10.1515/bmte.2001.46.12.351>
19. Hussein M.O. Stress-strain distribution at bone-implant interface of two splinted overdenture systems using 3D finite element analysis. *The Journal of Advanced Prosthodontics*. 2013;3(3):333–340. <https://doi.org/10.4047/jap.2013.5.3.333>
20. Ovesy M., Voumard B., Zysset P. A nonlinear homogenized finite element analysis of the primary stability of the bone-implant interface. *Biomechanics and Modeling in Mechanobiology*. 2018;17(5):1471–1480. <https://doi.org/10.1007/s10237-018-1038-3>