

АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЦИФРОВОЙ МОДЕЛИ РЕКОНСТРУКТИВНОГО ЛИОФИЛИЗИРОВАННОГО АЛЛОГЕННОГО КОСТНОГО ИМПЛАНТАТА ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ЕГО КОНСТРУКТИВНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ

А.А. Ипполитов, Н.В. Попов

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Самарский государственный медицинский университет» Министерства здравоохранения Российской Федерации, Самара, Россия

Как цитировать: Ипполитов А.А., Попов Н.В. Анализ напряженно-деформированного состояния цифровой модели реконструктивного лиофилизированного аллогенного костного имплантата при изменении его конструктивных особенностей // Аспирантский вестник Поволжья. 2021. № 1–2. С. 15–20. DOI: <https://doi.org/10.55531/2072-2354.2021.21.1.15-20>

Поступила: 23.12.2020

Одобрена: 21.01.2021

Принята: 10.03.2021

▪ **Обоснование.** Благоприятный исход восстановления убыли костной ткани челюстей зависит от множества факторов. Так, одними из ключевых факторов являются данные о механических и биофизических особенностях применяемых костных имплантатов, незнание которых нередко ставит под угрозу успешное проведение лечения стоматологических пациентов.

Цель — провести сравнительный экспериментальный анализ напряженно-деформированного состояния цифровой модели реконструктивного лиофилизированного аллогенного костного имплантата при изменении его конструктивных особенностей.

Материалы и методы. Для определения биомеханических показателей сохранения целостности был проведен анализ напряженно-деформированного состояния математических моделей реконструктивного цилиндрического имплантата и реконструктивного имплантата из лиофилизированного аллогенного материала в равных условиях с использованием метода конечных элементов.

Результаты. В результате проведенного анализа напряженно-деформированного состояния цифровых 3D-моделей реконструктивных костных имплантатов двух видов получены распределения напряжений по Мизесу (эквивалентные напряжения), вызванные действием заданных нагрузок. При исследовании были получены данные о запасе прочности реконструктивных имплантатов.

Заключение. Возможности современного компьютерного программного обеспечения позволяют расширить возможности проведения костной аугментации альвеолярной костной ткани челюстей с одномоментной дентальной имплантацией, позволяя аналитическим путем найти оптимальные параметры применяемых материалов, выбрать величину и направление силы при их установке, а также спрогнозировать их поведение в постоперационном периоде.

▪ **Ключевые слова:** костный имплантат; метод конечных элементов; напряженно-деформированное состояние; дентальный имплантат.

ANALYSIS OF THE STRESS-STRAIN STATE OF A DIGITAL MODEL OF A RECONSTRUCTIVE LYOPHILIZED ALLOGENEIC BONE IMPLANT WITH THE CHANGE IN ITS DESIGN FEATURES

A.A. Ippolitov, N.V. Popov

Samara State Medical University, Samara, Russia

To cite this article: Ippolitov AA, Popov NV. Analysis of the stress-strain state of a digital model of a reconstructive lyophilized allogeneic bone implant with the change in its design features. *Aspirantskiy Vestnik Povolzh'ya*. 2021;(1-2):15–20. DOI: <https://doi.org/10.55531/2072-2354.2021.21.1.15-20>

Received: 23.12.2020

Revised: 21.01.2021

Accepted: 10.03.2021

▪ **BACKGROUND:** The favorable outcome after the restoration of bone loss in the jaws depends on many factors. Thus, one of the key factors is the data on the mechanical and biophysical characteristics of the used bone implants, ignorance of which often jeopardizes the successful treatment of dental patients.

AIM: To carry out a comparative experimental analysis of the stress-strain state of a digital model of a reconstructive lyophilized allogeneic bone implant with a change in its design characteristics.

MATERIALS AND METHODS: To determine the biomechanical indicators of integrity preservation, the analysis of the stress-strain state of mathematical models of a reconstructive cylindrical implant and a reconstructive implant made of lyophilized allogenic material was carried out under equal conditions using the finite element method.

RESULTS: As a result of the analysis of the stress-strain state of digital 3D models of reconstructive bone implants of two types, stress distributions according to von Mises (equivalent stresses) caused by the action of given loads were obtained. During the study, data on the margin of safety of reconstructive implants were obtained.

CONCLUSIONS: The capabilities of modern computer software make it possible to expand the possibilities of bone augmentation of the alveolar bone tissue of the jaws with simultaneous dental implantation, allowing analytically to find the optimal parameters of the used materials, to choose the magnitude and direction of force during their installation, and also to predict their behavior in the postoperative period.

▪ **Keywords:** bone implant; finite element method; stress-strain state; dental implant.

Обоснование

Изучение особенностей замещения альвеолярных костных дефектов челюстей лиофилизированными аллогенными остеопластическими имплантатами для дальнейшей дентальной имплантации занимает одно из приоритетных направлений в современной практической стоматологии [5, 7].

Аргументируется это тем, что аугментация альвеолярной костной ткани челюстей костнозамещающими материалами и последующая установка дентальных имплантатов сопровождается комплексом биологических, биофизических и биомеханических локальных процессов [3, 6].

Как правило, благоприятный исход восстановления убыли костной ткани челюстей зависит от ряда факторов: состояния костной ткани в зоне планируемой аугментации альвеолярного гребня челюстей, вида и формы костного материала, остеопластического потенциала применяемых материалов [1, 2, 4].

Однако, несмотря на вышеперечисленные факторы, отсутствие данных о механических и биофизических особенностях применяемых костных имплантатов приводит к отсутствию понимания верной методологии их применения.

Это влияет на возникновение таких интра- и постоперационных осложнений, как необратимые поперечные и продольные переломы аллогенных костных имплантатов, что негативно влияет на исход лечения стоматологического больного и является условием ограничения применения данного костного материала.

Цель исследования — провести сравнительный экспериментальный анализ напряженно-деформированного состояния цифровой модели реконструктивного лиофилизированного аллогенного костного имплантата при изменении его конструктивных особенностей.

Материалы и методы

Для определения биомеханических показателей сохранения целостности реконструктивных имплантатов необходимо провести анализ напряженно-деформированного состояния, полученного в результате сравнительного исследования математических моделей реконструктивного цилиндрического имплантата (РЦИ) и реконструктивного имплантата из лиофилизированного аллогенного материала (РИЛАМ) с использованием метода конечных элементов. Этот метод является основным и универсальным способом определения напряженно-деформированного состояния конструкций.

Для проведения математических исследований применялся программный комплекс компьютерного инженерного анализа, основанный на методе конечных элементов. Одной из программ компьютерного инженерного анализа является система ANSYS версии R19.1, предназначенная для конечно-элементного анализа. Система анализирует краевые области математической модели, разбитые на конечные элементы, для которых задаются граничные условия в соответствии с решаемой задачей.

Основные механические характеристики структурных составляющих математической модели, а именно коэффициент Пуассона (ν) и модуль Юнга (E) лиофилизированной аллогенной костной ткани, имели следующие показатели: $\nu = 74$, $E = 147,2$ МПа.

Для анализа поперечно-деформированного состояния предварительно были составлены две цифровые 3D-модели: РИЛАМ и РЦИ. Конструктивные параметры данных аллогенных костных имплантатов были равны: диаметр 7 мм, высота 8,1 мм, наличие центрального направляющего отверстия. Однако стенки РИЛАМ не имели перфорационных отверстий, а стенки РЦИ имели отверстия диаметром 1,2 мм.

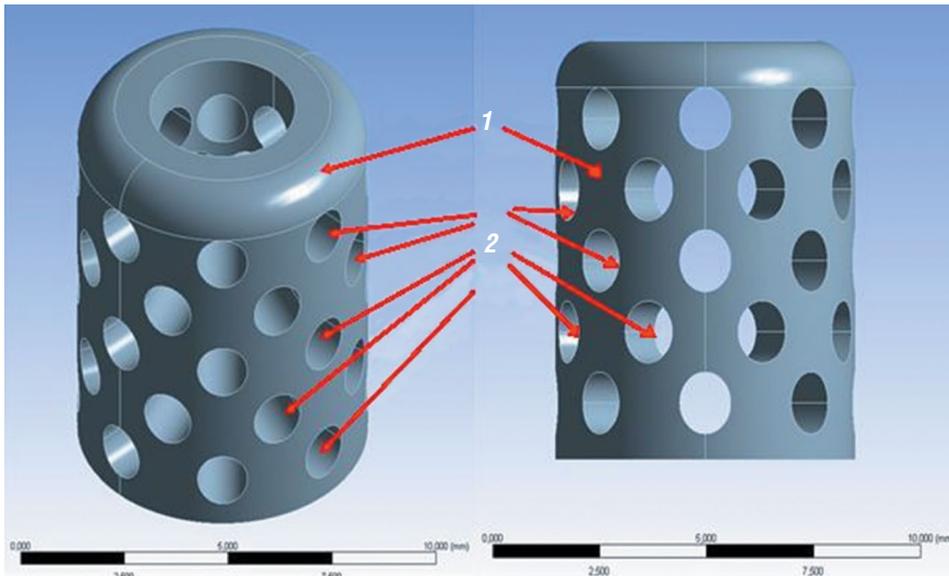


Рис. 1. Цифровая 3D-модель реконструктивного цилиндрического имплантата: 1 — корпус костного имплантата; 2 — отверстия диаметром 1,2 мм

Fig. 1. Digital 3D model of a reconstructive cylindrical implant: 1 — the body of the bone implant; 2 — holes with the diameter of 1.2 mm

Далее с помощью программного обеспечения ANSYS R19.1 в автоматическом режиме проведено разбиение областей на конечные элементы для цифровых 3D-моделей костных имплантатов (рис. 1, 2).

Для полученных цифровых 3D-моделей заданы одинаковые граничные условия. Основания закреплены по трем координатам — XYZ. С помощью программного обеспечения ANSYS R19.1 смоделировано приложение нагрузки от 0 до 60 Н к верхней части цифровых

3D-моделей костных имплантатов. Величины выбранной нагрузки соответствовали нагрузкам при установке дентальных имплантатов.

Направление нагрузок задавали в декартовой системе координат (рис. 3).

Рассматривали 2 расчетных случая деформированного состояния:

1. Нагружение на верхнюю часть РЦИ. Сила нагрузки составляла от 0 до 60 Н по оси минус 0Y. Основание РЦИ фиксировалось в плоскости Z0X.

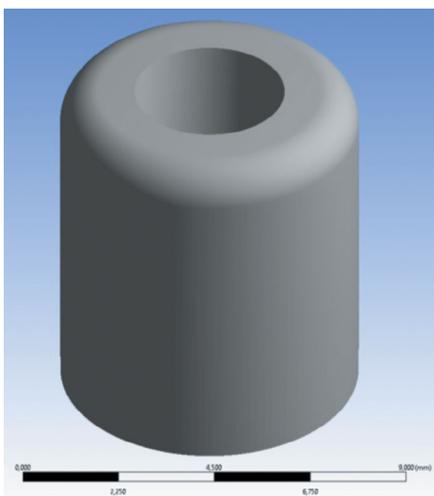


Рис. 2. Цифровая 3D-модель реконструктивного имплантата из лиофилизированного аллогенного материала

Fig. 2. Digital 3D model of a reconstructive implant made of lyophilized allogeneic material

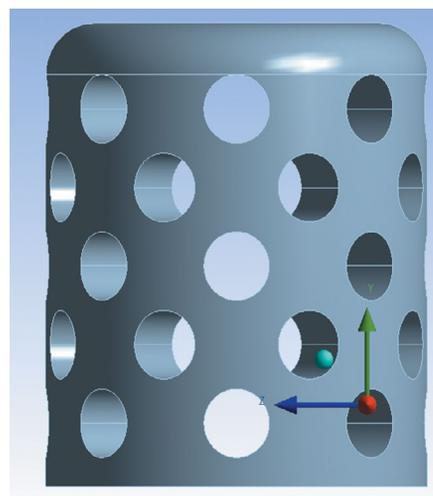


Рис. 3. Направление нагрузок в декартовой системе координат

Fig. 3. Direction of loads in a Cartesian coordinate system

2. Нагружение на верхнюю часть РИЛАМ. Сила нагрузки составляла от 0 до 60 Н по оси минус 0Y. Основание РИЛАМ фиксировалось в плоскости ZOX.

Результаты и их обсуждение

В результате проведенного анализа напряженно-деформированного состояния полученных цифровых 3D-моделей реконструктивных костных имплантатов двух видов получены распределения напряжений по Мизесу (эквивалентные напряжения), вызванные действием заданных нагрузок. Было выявлено, что цифровая 3D-модель РИЛАМ выдерживает нагрузки в 58 Н без разрушения, а цифровая 3D-модель РЦИ с отверсти-

ями в 1,2 мм выдерживает нагрузки без разрушения в 25 Н.

Распределения напряжений у цифровой 3D-модели РИЛАМ по Мизесу при величине нагрузки в 58 Н представлены на рис. 4, а, и запас прочности при данной нагрузке — на рис. 4, б. Распределения напряжений у цифровой 3D-модели РЦИ по Мизесу при величине нагрузки в 25 Н представлены на рис. 5, а, и запас прочности, оставшийся при данной нагрузке, — на рис. 5, б.

В качестве параметра, определяющего запас прочности материала, был выбран предел текучести, так как материал реконструктивного костного имплантата не должен деформироваться необратимо. Для наглядности модели показаны в изометрии.

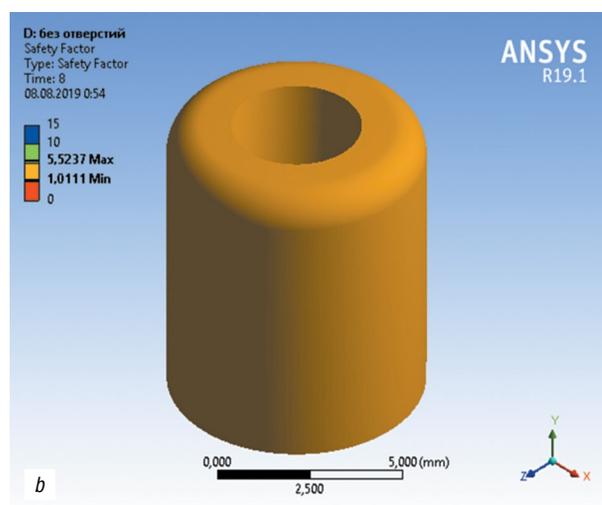
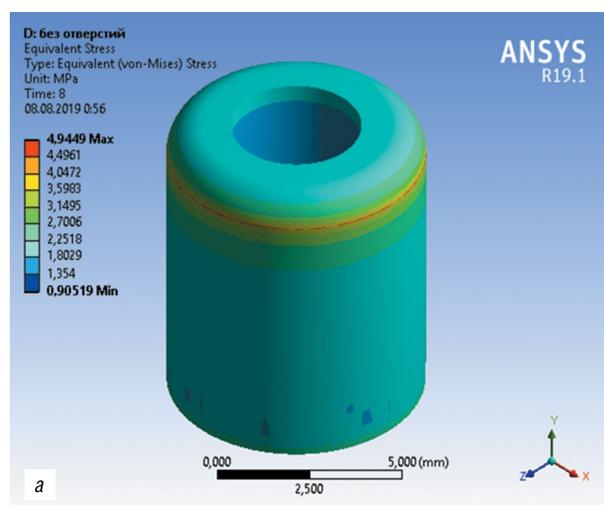


Рис. 4. Нагружения для реконструктивного имплантата из лиофилизированного аллогенного материала (а); запас прочности (b)

Fig. 4. Safety factor RILAM (a); load for RILAM (b)

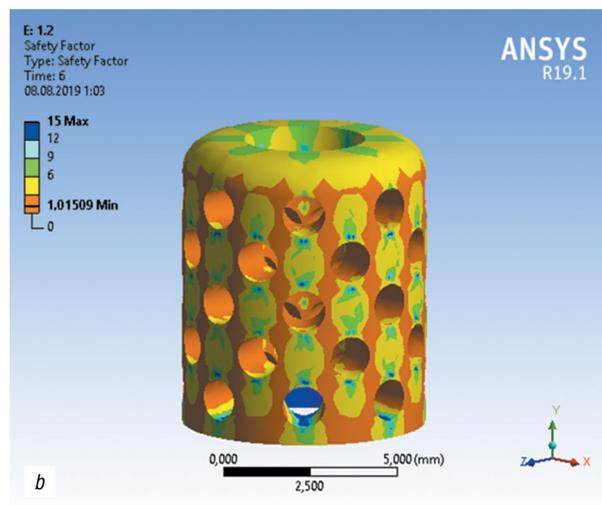
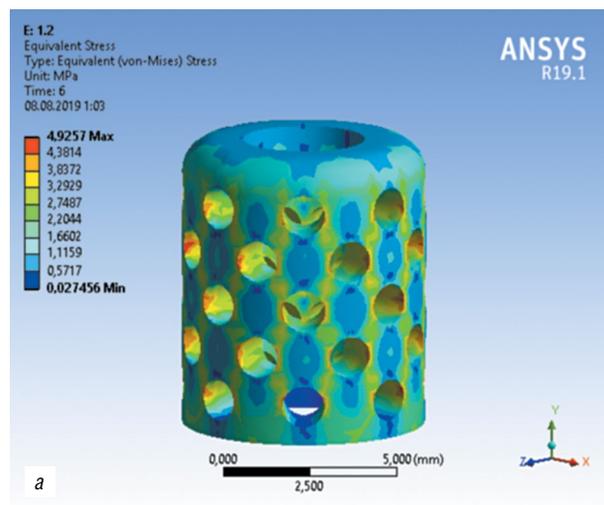


Рис. 5. Нагружения для реконструктивного цилиндрического имплантата (а); запас прочности (b)

Fig. 4. Load for RCI (a); safety factor RCI (b)

Анализируя полученные распределения напряжений для цифровых 3D-моделей РИЛАМ и РЦИ, можно сделать вывод, что при нагрузке РИЛАМ в 58 Н напряжение концентрируется в верхней части и достигает 4,9 МПа. В то время как при нагрузке в 25 Н у РЦИ напряжения концентрируются в созданных отверстиях и достигает 4,9 МПа.

Выводы

Сопоставляя полученные данные, склонность к деформации у РЦИ выше, чем у РИЛАМ, что связано с наличием перфораций (1,2 мм) костного имплантата.

Однако совокупность полученных удовлетворяющих показателей нагрузки и запаса прочности реконструктивного цилиндрического имплантата и высоких остеопластических свойств за счет наличия перфораций создает благоприятные условия для диффузии клеток костной ткани и питательных веществ, васкуляризации и неостеогенеза, обеспечивая положительный исход проведения протокола одномоментной установки дентального и костного имплантатов даже с применением немедленной нагрузки.

Таким образом, возможности современного компьютерного программного обеспечения позволяют расширить способы проведения костной аугментации альвеолярной костной ткани челюсти с одномоментной дентальной имплантацией и аналитическим путем найти оптимальные параметры применяемых материалов, выбрать величину и направление силы при их установке, а также спрогнозировать их поведение в постоперационном периоде.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

1. Гветадзе Р.Ш., Федоровский А.Н., Козлова Л.С. Широков Ю.Ю. Консольный элемент в несъемной ортопедической конструкции с опорой на дентальные имплантаты: влияние на напряженно-деформированное состояние кости // *Стоматология*. 2016. Т. 95, № 4. С. 62–64. DOI: 10.17116/stomat201695462-64
2. Мураев А.А., Гажва Ю.В., Ивашкевич С.Г. и др. Новый подход к объемной реконструкции сложных дефектов альвеолярной кости // *Современные технологии в медицине*. 2017. Т. 9, № 2. С. 37–45. DOI: 10.17691/stm2017.9.2.04
3. Цициашвили А.М., Силантьев А.С., Панин А.М. и др. Биомеханика короткого дентального имплантата в кост-

ной ткани нижней челюсти // *Стоматология*. 2019. Т. 98, № 6–2. С. 33–36. DOI: 10.17116/stomat20199806233

4. Hanser T., Houry F. Alveolar ridge contouring with free connective tissue graft at implant placement: A 5-year consecutive clinical study // *Int J Periodontics Restorative Dent*. 2016. Vol. 36, No. 4. P. 465–473. DOI: 10.11607/prd.2730
5. Yamada M., Egusa H. Current bone substitutes for implant dentistry // *J. Prosthodont. Res*. 2018. Vol. 62, No. 2. P.152–161. DOI: 10.1016/j.jpor.2017.08.010
6. Premnath K., Sridevi J., Kalavathy N., et al. Evaluation of stress distribution in bone of different densities using different implant designs: a three-dimensional finite element analysis // *J Indian Prosthodont Soc*. 2013. Vol. 13, No. 4. P. 555–559. DOI: 10.1007/s13191-012-0189-7
7. Urban I.A., Montero E., Monje A., Sanz-Sánchez I. Effectiveness of vertical ridge augmentation interventions: A systematic review and meta-analysis // *J Clin Periodontol*. 2019. Vol. 46 Suppl 21. P. 319–339. DOI: 10.1111/jcpe.13061

References

1. Gvetadze RSh, Fedorovskij AN, Kozlova LS, Shirokov YuYu. Konsol'nyj element v nes'emnoj ortopedicheskoj konstrukcii s oporoj na dental'nye implantaty: vliyanie na napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie kosti. *Stomatologiya*. 2016;95(4):62–64. (In Russ.) DOI: 10.17116/stomat201695462-64
2. Muraev AA, Gazhva YuV, Ivashkevich SG, et al. A novel approach to alveolar bone complex defects 3d reconstruction. *Modern Technologies in Medicine*. 2017;9(2):37–45. (In Russ.) DOI: 10.17691/stm2017.9.2.04
3. Ciciashvili AM, Silant'ev AS, Panin AM, et al. Biomekhanika korotkogo dental'nogo implantata v kostnoj tkani nizhnej chelyusti. *Stomatologiya*. 2019;98(6–2):33–36. (In Russ.) DOI: 10.17116/stomat20199806233
4. Hanser T, Houry F. Alveolar ridge contouring with free connective tissue graft at implant placement: A 5-year consecutive clinical study. *Int J Periodontics Restorative Dent*. 2016;36(4):465–473. DOI: 10.11607/prd.2730
5. Yamada M, Egusa H. Current bone substitutes for implant dentistry. *J Prosthodont Res*. 2018;62(2):152–161. DOI: 10.1016/j.jpor.2017.08.010
6. Premnath K, Sridevi J, Kalavathy N, et al. Evaluation of stress distribution in bone of different densities using different implant designs: a three-dimensional finite element analysis. *J Indian Prosthodont Soc*. 2013;13(4):555–559. DOI: 10.1007/s13191-012-0189-7
7. Urban IA, Montero E, Monje A, Sanz-Sánchez I. Effectiveness of vertical ridge augmentation interventions: A systematic review and meta-analysis. *J Clin Periodontol*. 2019;46 Suppl 21:319–339. DOI: 10.1111/jcpe.13061

▪ Информация об авторах

Алексей Андреевич Ипполитов — ординатор кафедры стоматологии ИПО. ФГБОУ ВО «Самарский государственный медицинский университет» Минздрава России, Самара, Россия. E-mail: ippolitoff.al@yandex.ru

Николай Владимирович Попов — заместитель директора института стоматологии, доктор медицинских наук, профессор кафедры стоматологии детского возраста и ортодонтии. ФГБОУ ВО «Самарский государственный медицинский университет» Минздрава России, Самара, Россия. E-mail: 2750668@mail.ru

▪ Information about the authors

Aleksey A. Ippolitov — Resident of the Department of Dentistry of the IPE. Samara State Medical University, Samara, Russia. E-mail: ippolitoff.al@yandex.ru

Nikolay V. Popov — Deputy Director of the Institute of Dentistry, Doctor of Medical Sciences, Professor of the Department of Pediatric Dentistry and Orthodontics. Samara State Medical University, Samara, Russia. E-mail: 2750668@mail.ru