

Научная статья
УДК 531/534: [57+61]

М.В. Матросова

M.V. Matrosova

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, Российская Федерация

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИ МЕХАНОАДАПТАЦИИ КОСТЕЙ (ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ)

FINITE ELEMENT MODELING FOR BONE MECHANICAL ADAPTATION (REVIEW OF LITERATURE)

Кость адаптируется к механической среде путем изменения своей структуры и свойств. Этот процесс называется механоадаптацией. В течение последних 50 лет для изучения взаимосвязи между геометрией кости, ее материальными свойствами и условиями механической нагрузки применялось моделирование конечных элементов. В данном обзоре рассматривается использование конечно-элементного моделирования в контексте механоадаптации кости. Новейшие результаты показывают, что конечно-элементные модели позволяют оценить сложные механические воздействия на уровне тканей и клеток, объяснить результаты экспериментов и использоваться для разработки протоколов нагружения и протезирования.

Ключевые слова: конечно-элементная модель, механоадаптация, костная ткань, протезирование.

Bone changes its structure and properties in response to the mechanical environment, which is called mechanical adaptation. In the last 50 years, finite element modeling has been used to study the relationship between bone geometry, material properties, and mechanical load conditions. This review examines the application of finite element modeling in the context of bone mechanical adaptation. Recent results show that finite element models make it possible to evaluate complex mechanical effects at the level of tissues and cells, explain the results of experiments and be used to develop loading and prosthetics protocols.

Keywords: finite element model, mechanical adaptation, bone tissue, prosthetics.

Введение

Конечно-элементное моделирование (КЭ) представляет собой математическое описание структуры, включающее геометрию, свойства материала и условия нагружения, с целью понимания воздействия механической среды. Поскольку кость изменяет свою геометрию и свойства материала под воздействием механической среды, модели КЭ широко применяются для изучения влияния нагрузки на рост кости [1] и заживление переломов. Также они применяются для прогнозирования риска переломов и изучения механоадаптации кости к условиям нагрузки. В данной работе представлен краткий обзор использования

моделирования КЭ в контексте механоадаптации кости, то есть адаптации кости к механической нагрузке без углубления в модели эндохондрального окостенения во время роста или заживления переломов, а также без рассмотрения использования КЭ для прогнозирования риска переломов.

Для объяснения результатов экспериментов по изучению адаптации кости у животных в живом организме (*in vivo*) исследуется, как механическая нагрузка или разгрузка влияют на формирование и резорбцию кости. Обычно механическая нагрузка, которая применяется, хорошо определена и контролируется. Модели конечно-элементного анализа позволяют оценить механическую среду в интересующих областях [33, 42], которые могут быть связаны с процессами адаптации костей [31, 38, 41, 127, 128]. Недавно было проведено сравнение механических условий у мужчин и женщин [51] после овариэктомии [52, 53], после медикаментозного лечения [54] и при генетических модификациях [55, 56]. Исторически пятно считалось основным механическим стимулом, вызывающим адаптацию кости [57–59]. Однако исследования показали, что другие механические параметры, такие как скорость деформации, плотность энергии деформации и поток жидкости, также могут способствовать адаптации [31, 59–63]. Модели конечно-элементного анализа также использовались для изучения менее изученных стимулов, таких как пьезоэлектрические свойства кости [64, 65]. Модели конечно-элементного анализа в сочетании с алгоритмами ремоделирования могут имитировать изменения геометрии и свойств костей в ответ на изменения их механической среды (например, приложение внешних нагрузок или установка имплантатов).

Этот подход включает предположения о том, как механические стимулы влияют на адаптацию кости. Например, такие как плотность энергии деформации, уровень деформации и поток жидкости, и то как кость реагирует на эти стимулы. Обычно алгоритмы ремоделирования используют механоадаптивную теорию: если механический сигнал превышает или опускается ниже определенного порога, происходит формирование или резорбция кости в соответствии с заданным алгоритмом. В некоторых исследованиях также учитывается «lazy зона», где не происходит образования или рассасывания кости. Кроме того, можно моделировать реакцию на сильные механические нагрузки, чтобы учесть образование сплетенной кости или повреждение. Адаптация кости под воздействием раздражителей часто представляется как изменение плотности или модуля упругости [52, 70, 74, 130] или изменение геометрии кости [68, 73]. Алгоритмы ремоделирования позволяют прогнозировать, как кость будет адаптироваться к различным нагрузкам, и затем результаты моделирования можно сопоставить с результатами экспериментов для оценки точности прогноза [68, 75, 76].

Поскольку алгоритмы могут быть настроены для регулирования уровня формирования кости (или изменения плотности или модуля упругости), сравнение экспериментов *in vivo* и компьютерных моделей чаще проводится для оценки локализации адаптивных изменений, которая сильно зависит от распределения стимулов. Таким образом, сравнение вычислительных и экспериментальных результатов помогает определить механические стимулы, наиболее точно предсказывающие адаптацию. При использовании этого подхода поток жидкости оказался более надежным предиктором областей адаптации, чем уровень деформации [63, 68].

Материалы и методы. Характеристики материала

В большинстве моделей предполагается, что упрощение возможно за счет предположения об однородных свойствах материала. Однако кость является гетерогенным материалом, что требует учета в моделировании [68, 76, 99, 129]. Неоднородные свойства кости могут привести к различиям в распределении деформации [41, 55, 99]. Для учета гетерогенности модули Юнга основываются на коэффициентах ослабления, полученных из компьютерной томографии, которые отражают плотность кости. Гетерогенные модели могут вызывать незначительные различия в распределении деформации по сравнению с гомогенными моделями, как, например, в среднем диафизе большеберцовой кости мыши [55]. Однако в своей модели большеберцовой кости мыши Оливейро и коллеги отметили [100], что гомогенные модели представляют собой оптимальный баланс между точностью и вычислительным временем для прогнозирования структурно-механических свойств.

При использовании моделей FE для изучения распределения напряжений в кости обычно предполагается, что свойства материала являются упругими. При анализе потока жидкости в модели необходимо учитывать пороупругие свойства кости. Вязкоупругие свойства обычно не учитываются, но они могут играть важную роль при определении деформации матрицы при различных скоростях деформации. Рассмотрение вязкоупругих свойств перицеллюлярного матрикса может помочь различить прямое воздействие потока жидкости на активацию остецитов от деформации перицеллюлярного матрикса. Современные настольные компьютеры обладают достаточной вычислительной мощностью для моделирования сложных свойств гетерогенных материалов и условий динамического нагружения. Однако при моделировании нелинейных вязкопороупругих материалов возникают ограничения в определении вязкоупругих и пороупругопластичных свойств кости на основе экспериментов.

Условия нагружения в различных конечно-элементных моделях

Условия нагрузки, применяемые в моделировании, часто нацелены на имитацию нагрузок, которые возникают в экспериментальных условиях или во время обычной физической активности, такой как ходьба. Для этого требуются определенные значения и обоснованные предположения о распределении и направлении нагрузок. Условия нагружения могут быть определены путем визуализации образца во время нагружения.

Например, Пуле и соавторы [101] изобразили большеберцовую кость мыши при одноосном сжатии и показали, что крайнее согнутое положение приводит к контакту мыщелков бедра с задней частью большеберцовой кости. Дополнительные методы, такие как анализ походки, использование инструментальных имплантатов с датчиками нагрузки [102, 103] и программное обеспечение для моделирования опорно-двигательного аппарата [104], помогают определить физиологические условия нагрузки [105, 106]. Мышечные усилия могут быть включены в модель в виде точечных нагрузок или распределенных по области крепления. В некоторых случаях мышечные усилия в интересующей области могут не оказывать влияния на механические раздражители, их можно не учитывать. Например, мы обнаружили, что мышцы бедра оказывают значительное воздействие на силу контакта тазобедренного сустава, но не влияют на напряжения в ростковой пластинке [126, 136].

Недавно конечно-элементные модели были использованы для оценки воздействия местоположения нагрузки в большеберцовой кости мыши на распределение напряжения в кости [93]. Результаты показали, что для получения аналогичного распределения напряжения необходимо регулировать местоположение нагрузки между образцами.

Предполагается, что граничные условия одинаковы между вычислительными моделями и экспериментом *in vivo* и, вероятно, будут повторяемыми между образцами. Для учета потенциальной вариабельности нагрузки, применяемой между образцами, для исследований на людях можно использовать специфические для конкретного субъекта модели [86, 107] или визуализацию *in vivo* во время нагрузки для исследований на животных.

Методы проверки моделей

Важность проверки моделей конечных элементов часто проявляется в сравнении результатов моделирования с измеренными значениями деформации при помощи тензометрических датчиков [55, 93, 99, 108, 117, 118, 119]. Этот метод проверяет деформацию в определенных точках. Однако из-за неоднородности распределения деформации в костях из-за их сложной формы и свойств материала необходимы предположения для экстраполяции результатов проверки на другие части кости.

Для преодоления этого ограничения была использована цифровая корреляция изображений для проверки моделей вдоль кости [120]. Такой способ позволяет исследователям оценить поверхностную деформацию в интересующей

области [74, 77, 120]. Расширяя этот метод, цифровая объемная корреляция объединила механическое тестирование и микросканирование недеформированных и деформированных костей, что позволило прямо измерить напряжение в ткани [100, 121]. Очные значения деформации будут различаться в зависимости от вида, генотипа, пола и местоположения на кости из-за различий в геометрии кости, плотности и свойствах материала [122]. Точная оценка механического воздействия имеет большое значение для настройки экспериментов на один и тот же стимул в разных группах. Однако точное измерение механического воздействия не всегда возможно и не является обязательным. Для многих экспериментов сравнение между группами требует только общего обозначения выше/ниже. Например, проверка смоделированной скорости потока жидкости представляет собой сложную задачу. В работе Meslier et al. модель была проверена для моделирования деформаций при синдроме ДВС, но использовалась для сравнения высоких и низких скоростей жидкости в различных условиях нагружения [136, 137]. Для этой цели, вероятно, достаточно непроверенной модели. Модели FE могут оценить области с высокой скоростью потока жидкости, исследовать зависимость потока жидкости от свойств материала, позволяют проводить относительное сравнение условий нагружения и выявлять изменения потока из-за изменения геометрии.

Моделирование костной ткани в стоматологии

Конечно-элементные модели широко применяются в различных областях изучения. Широкое применение они нашли и в области стоматологии. В основном реализация метода конечных элементов реализуется в таких программных пакетах, как Femap [132], ANSYS [127, 131, 135, 136, 140, 143] (рис. 1), ABAQUS [134], Comsol Multiphysics Analysis [135].

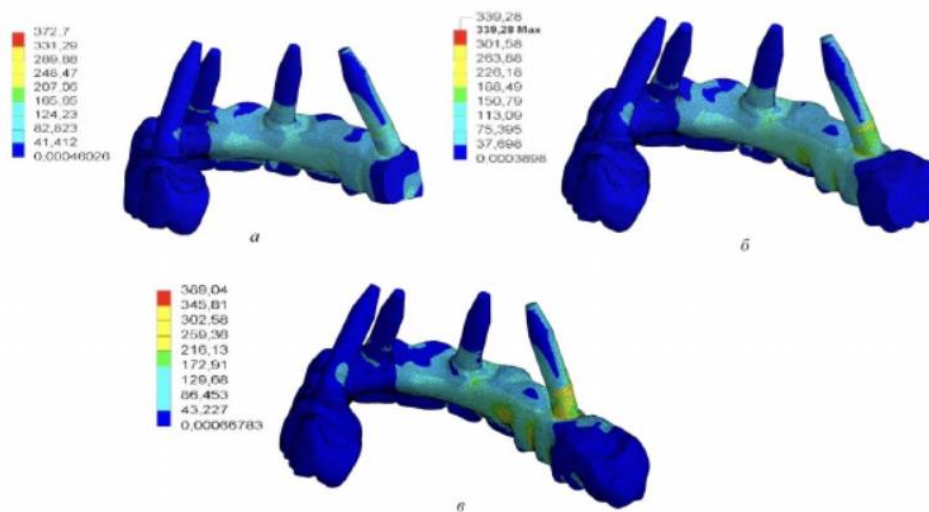


Рис. 1. Визуализация модели в ANSYS [130]

Современные работы в данной области исследований посвящены изучению моделей материалов костей [131]; новым материалам для изготовления имплантатов [134]; оценке напряжений в одиночных имплантатах [131, 134]; распределению нагрузок в мостовых протезах и в костной ткани [130, 135]; анализу влияния типов материалов на напряженно-деформированное состояние кости и протеза [133]; оценке первичной устойчивости имплантатов в месте крепления к кости (рис. 2).

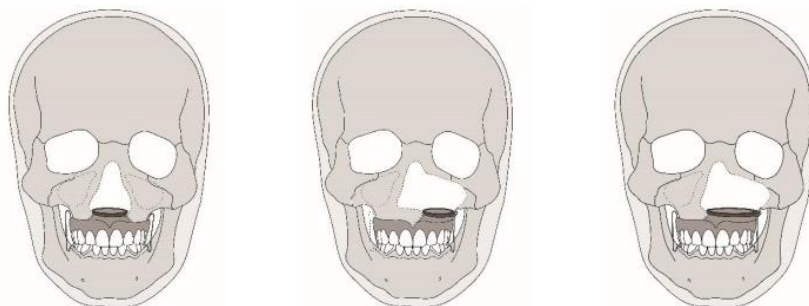


Рис. 2. Модель с заданными геометрическими характеристиками [142]

Выводы

Метод конечных элементов представляет собой мощный инструмент для изучения распределения сложных механических сигналов в кости при различных условиях нагрузки и для моделирования механоадаптивной реакции при изменении свойств материала или геометрии. Важно отметить, что модели не могут полностью заменить эксперименты. Однако они могут помочь объяснить результаты экспериментов и эффективно спланировать дальнейшие исследования. Учет адаптации кости имеет ключевое значение при разработке имплантатов, и моделирование методом конечных элементов облегчает этот процесс. Перед тем как приступить к моделированию механоадаптации кости, важно ясно сформулировать исследовательский вопрос. Например, что может дать модель, чего не может дать эксперимент? Модели должны быть достаточно сложными, чтобы отвечать на поставленный вопрос, но использование непроверенных моделей может быть полезным для сравнения между группами. Однако с увеличением сложности модели появляется больше неизвестных переменных, что может снизить способность модели точно предсказывать адаптивные результаты. В последние

50 лет моделирование конечных элементов позволило нам получить представление о механоадаптации кости; в следующие 50 лет мы сможем использовать это понимание для разработки эффективных устройств, методов лечения и экспериментов, направленных на использование терапевтического потенциала адаптации костей.

Список литературы

1. Brekelmans W.A.M., Poort H.W., Sloof T.J.J.H. A new method to analyse the mechanical behaviour of skeletal parts // *Acta. Orthop. Scand.* – 1972. – No. 43 (5). – P. 301–17. DOI: 10.3109/1745367720 8998949
2. McLeish R.D., Charnley J. Abduction forces in the one-legged stance // *J. Biomech.* – 1970. – No. 3 (2). – P. 191–209. DOI: 10.1016/ 0021-9290(70)90006-0
3. Brown T.D., Ferguson A.B. The development of a computational stress analysis of the femoral head // *J. Bone Joint Surg.* – 1978. – No. 60 (5). – P. 619–29.
4. Hayes W.C., Snyder B., Levine B.M., Ramaswamy S. Stress-morphology relationships in trabecular bone of the patella // *Finite Elem. Biomech.*, John Wiley. – 1982. – No. 12. – P. 223–68.
5. Valliappan S., Svensson N.L., Wood R.D. Three dimensional stress analysis of the human femur // *Comput. Biol. Med.* – 1977. – No. 7 (4) – P. 253–64. DOI: 10.1016/0010-4825(77)90031-2
6. Rohlmann A., Mössner U., Bergmann G., Kölbl R. Finite-element-analysis and experimental investigation of stresses in a femur // *J. Biomed. Eng.* – 1982. – No. 4 (3). – P. 241–6. DOI: 10.1016/ 0141-5425(82)90009-7
7. Brockhurst P.J., Svensson N.L. Design of total hip prosthesis: the femoral stem // *Med. Prog. Technol.* – 1977. – No. 5 (2). – P. 73–102.
8. Huiskes R., Chao E.Y.S. A survey of finite element analysis in orthopedic biomechanics: the first decade // *J. Biomech.* – 1983. – No. 16 (6). – P. 385–409.
9. Hollister S.J., Kikuchi N., Goldstein S.A.. Do bone ingrowth processes produce a globally optimized structure? // *J. Biomech.* – 1993. – No. 26 (4–5). – P. 391–407.
10. Huiskes R., Hollister S.J. From structure to process, from organ to cell: recent developments of FE-analysis in orthopaedic biomechanics // *J. Biomech. Eng.* – 1993. – 115 (4B). – P. 520–7. DOI: 10.1115/1.2895534
11. Fyhrie D.P., Carter D.R. Femoral head apparent density distribution predicted from bone stresses // *J. Biomech.* – 1990. – No. 23 (1). – P. 1–10. DOI: 10.1016/0021-9290(90)90363-8
12. Orr T.E., Beaupré G.S., Carter D.R., Schurman D.J. Computer predictions of bone remodeling around porous-coated implants // *J. Arthroplasty.* –

1990. – No. 5 (3). – P. 191–200. DOI: 10.1016/S0883-5403(08)80074-5

13. Beaupré G.S., Orr T.E., Carter D.R. An approach for time-dependent bone modeling and remodeling-theoretical development: time-dependent modeling and remodeling // *J. Orthop. Res.* – 1990. – No. 8 (5). – P. 651–61. DOI: 10.1002/jor.1100080506

14. Beaupré G.S., Orr T.E., Carter D.R. An approach for time-dependent bone modeling and remodeling-application: a preliminary remodeling simulation: time-dependent remodeling theory // *J. Orthop. Res.* – 1990. – No. 8 (5). – P. 662–70. DOI: 10.1002/jor.1100080507

15. The direct examination of three-dimensional bone architecture in vitro by computed tomography / L.A. Feldkamp, S.A. Goldstein, M.A. Parfitt, G. Jesion, M. Kleerekoper // *J. Bone Miner Res.* – 1989. – No. 4 (1). – P. 3–11. DOI: 10.1002/jbmr.5650040103

16. Hollister S.J., Riemer B.A. Digital-image-based finite element analysis for bone microstructure using conjugate gradient and Gaussian filter techniques. – San Diego, CA, 1993. – P. 95–106. DOI: 10.1117/12.146616

17. Keyak J.H., Meagher J.M., Skinner H.B., Mote C.D. Automated three-dimensional finite element modelling of bone: a new method // *J. Biomed. Eng.* – 1990. – No. 12 (5). – P. 389–97. DOI: 10.1016/0141-5425(90)90022-F

18. Viceconti M., Bellingeri L., Cristofolini L., Toni A. A comparative study on different methods of automatic mesh generation of human femurs // *Med. Eng. Phys.* – 1998. – No. 20 (1). – P. 1–10. DOI: 10.1016/S1350-4533(97)00049-0

19. Tadepalli S.C., Erdemir A., Cavanagh P.R. Comparison of hexahedral and tetrahedral elements in finite element analysis of the foot and footwear // *J. Biomech.* – 2011. – No. 44 (12). – P. 2337–43. DOI: 10.1016/j.jbiomech.2011.05.006

20. Bourne B.C., van der Meulen M.C.H. Finite element models predict cancellous apparent modulus when tissue modulus is scaled from specimen CT-attenuation // *J. Biomech.* – 2004. – No. 37 (5). – P. 613–21. DOI: 10.1016/j.jbiomech.2003.10.002

21. Van Rietbergen B., Weinans H., Huiskes R., Odgaard A. A new method to determine trabecular bone elastic properties and loading using micromechanical finite-element models // *J. Biomech.* – 1995. – No. 28 (1). – P. 69–81. DOI: 10.1016/0021-9290(95) 80008-5

22. The material mapping strategy influences the accuracy of CT-based finite element models of bones: an evaluation against experimental measurements / F. Taddei, E. Schileo, B. Helgason, L. Cristofolini, M. Viceconti // *Med. Eng. Phys.* – 2007. – No. 29 (9). – P. 973–9. DOI: 10.1016/j.medengphy.2006.10.014

23. Smit T.H., Huyghe J.M., Cowin S.C. Estimation of the poroelastic parameters of cortical bone // *J. Biomech.* – 2002. – No. 35 (6). – P. 829–35. DOI: 10.1016/S0021-9290(02)00021-0

24. Pereira A.F., Shefelbine S.J. The influence of load repetition in bone mechanotransduction using poroelastic finite-element models: the impact of permeability // *Biomech. Model. Mechanobiol.* – 2014. – No. 13 (1). – P. 215–25. DOI: 10.1007/s10237-013-0498-8

25. Steck R., Niederer P., Knothe Tate M.L. A finite element analysis for the prediction of load-induced fluid flow and mechanochemical transduction in bone // *J. Theor. Biol.* – 2003. – No. 220 (2). – P. 249–59. DOI: 10.1006/jtbi.2003.3163

26. Guo X.E., Eichler M.J., Takai E., Kim C.H. Quantification of a rat tail vertebra model for trabecular bone adaptation studies // *J. Biomech.* – 2002. – No. 35 (3). – P. 363–8. DOI: 10.1016/S0021-9290(01)00212-3

27. Ulrich D., van Rietbergen B., Weinans H., Rügsegger P. Finite element analysis of trabecular bone structure: a comparison of image-based meshing techniques // *J. Biomech.* – 1998. – No. 31 (12). – P. 1187–92. DOI: 10.1016/S0021-9290(98)00118-3

28. Van Rietbergen B. Micro-FE analyses of bone: state of the art. In *Noninvasive Assess Trabecular Bone Arch. Competence Bone.* – Boston, MA: Springer US, 2001. – P. 21–30. DOI: 10.1007/978-1-4615-0651-5_3

29. Non-invasive axial loading of mouse tibiae increases cortical bone formation and modifies trabecular organization: a new model to study cortical and cancellous compartments in a single loaded element / R.L. De Souza, M. Matsuura, F. Eckstein, S.C.F. Rawlinson, L.E. Lanyon, A.A. Pitsillides // *Bone.* – 2005. – No. 37 (6). – P. 810–8. DOI: 10.1016/j.bone.2005.07.022

30. Fritton J., Myers E., Wright T., Vandermeulen M. Loading induces site-specific increases in mineral content assessed by microcomputed tomography of the mouse tibia // *Bone.* – 2005. – No. 36 (6). – P. 1030–8. DOI: 10.1016/j.bone.2005.02.013

31. Local mechanical stimuli regulate bone formation and resorption in mice at the tissue level / F.A. Schulte [et al.] // *PLoS One.* – 2013. – No. 8 (4). – P. e62172. DOI: 10.1371/journal.pone.0062172

32. The influence of age on adaptive bone formation and bone resorption / A.I. Birkhold, H. Razi, G.N. Duda, R. Weinkamer, S. Checa, B.M. Willie // *Biomaterials.* – 2014. – No. 35 (34). – P. 9290–301. DOI: 10.1016/j.biomaterials.2014.07.051

33. Patel T.K., Brodt M.D., Silva M.J. Experimental and finite element analysis of strains induced by axial tibial compression in young adult and old female C57Bl/6 mice // *J. Biomech.* – 2014. – No. 47 (2). – P. 451–7. DOI: 10.1016/j.jbiomech.2013.10.052

34. Mechanical loading-related changes in osteocyte sclerostin expression in mice are more closely associated with the subsequent osteogenic response than the peak strains engendered / A. Moustafa [et al.] // *Osteoporos. Int.* – 2012. –

No. 23 (4). – P. 1225–34. DOI: 10.1007/s00198-011-1656-4

35. Osteocyte calcium signals encode strain magnitude and loading frequency in vivo / K.J. Lewis [et al.] // *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.* – 2017. – No. 114 (44). – P. 11775–80. DOI: 10.1073/pnas.1707863114

36. Silva M.J., Brodt M.D., Hucker W.J. Finite element analysis of the mouse tibia: estimating endocortical strain during three-point bending in SAMP6 osteoporotic mice // *Anat. Rec.* – 2005. – No. 283A (2). – P. 380–90. DOI: 10.1002/ar.a.20171

37. Diminished response to in vivo mechanical loading in trabecular and not cortical bone in adulthood of female C57Bl/6 mice coincides with a reduction in deformation to load / B.M. Willie [et al.] // *Bone.* – 2013. – No. 55 (2). – P. 335–46. DOI: 10.1016/j.bone.2013.04.023

38. The periosteal bone surface is less mechano-responsive than the endocortical / A.I. Birkhold, H. Razi, G.N. Duda, R. Weinkamer, S. Checa, B.M. Willie // *Sci. Rep.* – 2016. – No. 6 (1). – P. 23480. DOI: 10.1038/srep23480

39. Poroelastic finite element analysis of a bone specimen under cyclic loading / P. Manfredini, G. Cocchetti, G. Maier, A. Redaelli, F.M. Montevecchi // *J. Biomech.* – 1999. – No. 32 (2). – P. 135–44. DOI: 10.1016/S0021-9290(98)00162-6

40. Gross T.S., Edwards J.L., McLeod K.J., Rubin C.T. Strain gradients correlate with sites of periosteal bone formation // *J. Bone Miner Res.* – 1997. – No. 12 (6). – P. 982–8. DOI: 10.1359/jbmr.1997.12.6.982

41. Skeletal maturity leads to a reduction in the strain magnitudes induced within the bone: a murine tibia study / H. Razi [et al.] // *Acta. Biomater.* – 2015. – No. 13. – P. 301–10. DOI: 10.1016/j.actbio.2014.11.021

42. 3D-strain map of axially loaded mouse tibia: a numerical analysis validated by experimental measurements / V.A. Stadelmann [et al.] // *Comput. Methods Biomech. Biomed. Engin.* – 2009. – No. 12 (1). – P. 95–100. DOI: 10.1080/10255840802178053

43. McCreddie B.R., Hollister S.J. Strain concentrations surrounding an ellipsoid model of lacunae and osteocytes // *Comput. Methods Biomech. Biomed. Engin.* – 1997. – No. 1 (1). – P. 61–8. DOI: 10.1080/01495739708936695

44. McCreddie B.R., Hollister S.J., Schafer M.B., Goldstein S.A. Osteocyte lacuna size and shape in women with and without osteoporotic fracture // *J. Biomech.* – 2004. – No. 37 (4). – P. 563–72. DOI: 10.1016/S0021-9290(03)00287-2

45. Verbruggen S.W., Vaughan T.J., McNamara L.M. Strain amplification in bone mechanobiology: a computational investigation of the in vivo mechanics of osteocytes // *J. R. Soc. Interface.* – 2012. – No. 9 (75). – P. 2735–44. DOI: 10.1098/rsif.2012.0286

46. Synchrotron X-ray phase nano-tomography-based analysis of the lacunar-canalicular network morphology and its relation to the strains experienced by osteocytes

in situ as predicted by case-specific finite element analysis / P. Varga [et al.] // *Biomech. Model Mechanobiol.* – 2015. – No. 14 (2). – P. 267–82. DOI: 10.1007/s10237-014-0601-9

47. RathBonivtch A., Bonewald L.F., Nicolella D.P. Tissue strain amplification at the osteocyte lacuna: a microstructural finite element analysis // *J. Biomech.* – 2007. – No. 40 (10). – P. 2199–206. DOI: 10.1016/j.jbiomech.2006.10.040

48. Deligianni D.D., Apostolopoulos C.A. Multilevel finite element modeling for the prediction of local cellular deformation in bone // *Biomech. Model Mechanobiol.* – 2008. – No. 7 (2). – P. 151–9. DOI: 10.1007/s10237-007-0082-1

49. Fan L., Pei S., Lucas Lu.X., Wang L. A multiscale 3D finite element analysis of fluid/solute transport in mechanically loaded bone // *Bone Res.* – 2016. – No. 4 (1). – P. 16032. DOI: 10.1038/boneres.2016.32

50. Image-based finite element models for the investigation of 112 Current Osteoporosis Reports (2023) osteocyte mechanotransduction / P. Schneider, D. Rufoni, D. Larsson, I. Chiapparini, R. Müller // *J. Biomech.* – 2012. – No. 45. – P. S436. DOI: 10.1016/S0021-9290(12)70437-2

51. Sexually dimorphic tibia shape is linked to natural osteoarthritis in STR/Ort mice / B. Javaheri [et al.] // *Osteoarthr. Cartil.* – 2018. – No. 26 (6). – P. 807–17. DOI: 10.1016/j.joca.2018.03.008

52. Cheong V.S., Roberts B.C., Kadirkamanathan V., Dall'Ara E. Bone remodelling in the mouse tibia is spatio-temporally modulated by oestrogen deficiency and external mechanical loading: A combined in vivo/in silico study // *Acta. Biomater.* – 2020. – No. 116. – P. 302–17. DOI: 10.1016/j.actbio.2020.09.011

53. Cheong V.S., Kadirkamanathan V., Dall'Ara E. The role of the loading condition in predictions of bone adaptation in a mouse tibial loading model // *Front Bioeng. Biotechnol.* – 2021. – No. 9. – P. 676867. DOI: 10.3389/fbioe.2021.676867

54. Robinson S.T., Shyu P.T., Guo X.E. Mechanical loading and parathyroid hormone effects and synergism in bone vary by site and modeling/remodeling regime // *Bone.* – 2021. – No. 153. – P. 116171. DOI: 10.1016/j.bone.2021.116171

55. Sost deficiency leads to reduced mechanical strains at the tibia midshaft in strain-matched in vivo loading experiments in mice / L. Albiol [et al.] // *J.R. Soc. Interface.* – 2018. – No. 15 (141). – P. 20180012. DOI: 10.1098/rsif.2018.0012

56. Cortical bone adaptation to a moderate level of mechanical loading in male Sost deficient mice / H. Yang [et al.] // *Sci. Rep.* – 2020. – No. 10 (1). – P. 22299. DOI: 10.1038/s41598-020-79098-0

57. Frost H.M.. Bone 'mass' and the 'mechanostat': a proposal // *Anat. Rec.* – 1987. – No. 219 (1). – P. 1–9. DOI: 10.1002/ar.1092190104

58. Turner C.H., Forwood M.R., Rho J.-Y., Yoshikawa T. Mechanical loading thresholds for lamellar and woven bone formation // *J. Bone Miner Res.* – 2009. – No. 9 (1). – P. 87–97. DOI: 10.1002/jbmr.5650090113

59. Hsieh Y.-F., Turner C.H. Effects of loading frequency on mechanically induced bone formation // *J. Bone Miner Res.* – 2001. – No. 16 (5). –

P. 918–24. DOI: 10.1359/jbmr.2001.16.5.918

60. You L., Cowin S.C., Schafer M.B., Weinbaum S. A model for strain amplification in the actin cytoskeleton of osteocytes due to fluid drag on pericellular matrix // *J. Biomech.* – 2001. – No. 34 (11). – P. 1375–86. DOI: 10.1016/S0021-9290(01)00107-5

61. Knothe Tate M.L., Steck R., Forwood M.R., Niederer P. In vivo demonstration of load-induced fluid flow in the rat tibia and its potential implications for processes associated with functional adaptation // *J. Exp. Biol.* – 2000. – No. 203 (18). – P. 2737–45. DOI: 10.1242/jeb.203.18.2737

62. LaMothe J.M., Hamilton N.H., Zernicke R.F. Strain rate influences periosteal adaptation in mature bone // *Med. Eng. Phys.* – 2005. – No. 27 (4). – P. 277–84. DOI: 10.1016/j.medengphy.2004.04.012

63. Pereira A.F., Javaheri B., Pitsillides A.A., Shefelbine S.J. Predicting cortical bone adaptation to axial loading in the mouse tibia // *J. R. Soc. Interface.* – 2015. – No. 12 (110). – P. 20150590. DOI: 10.1098/rsif.2015.0590

64. Finite element analysis of bone remodelling with piezoelectric effects using an open-source framework / Y.D. Bansod, M. Keibach, D. Klues, R. Bader, U. van Rienen // *Biomech. Model Mechanobiol.* – 2021. – No. 20 (3). – P. 1147–1166. DOI: 10.1007/s10237-021-01439-3

65. Mohammadkhah M., Marinkovic D., Zehn M., Checa S. A review on computer modeling of bone piezoelectricity and its application to bone adaptation and regeneration // *Bone.* – 2019. – No. 127. – P. 544–55. DOI: 10.1016/j.bone.2019.07.024

66. Adaptive bone-remodeling theory applied to prosthetic-design analysis / R. Huiskes, H. Weinans, H.J. Grootenboer, M. Dalstra, B. Fudala, T.J. Sloof // *J. Biomech.* – 1987. – No. 20 (11–12). – P. 1135–50. DOI: 10.1016/0021-9290(87)90030-3

67. Cowin S.C., Hegedus D.H. Bone remodeling I: theory of adaptive elasticity // *J. Elasticity.* – 1976. – No. 6 (3). – P. 313–26. DOI: 10.1007/BF00041724

68. The mechanoresponse of bone is closely related to the osteocyte lacunocanalicular network architecture / A.F. van Tol [et al.] // *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.* – 2020. – No. 117 (51). – P. 32251–32259. DOI: 10.1073/pnas.2011504117

69. Prasad J., Goyal A. An invertible mathematical model of cortical bone's adaptation to mechanical loading // *Sci. Rep.* – 2019. – No. 9 (1). – P. 5890. DOI: 10.1038/s41598-019-42378-5

70. Gonzalez J., Nacy S., Youssef G. Finite element analysis of human skull bone adaptation to mechanical loading. 13. A finite element model and bone remodeling algorithm were used to investigate changes in properties in a human skull following loading. This study provides an approach valuable to design implants and investigate their prolonged effect on the surrounding bone properties.

71. Computational tibial bone remodeling over a population after total knee arthroplasty: a comparative study / T. Anijs, S. Eemers, Y. Minoda,

D. Wolfson, N. Verdonschot, D. Janssen // *J. Biomed. Mater. Res.* – 2022. – No. 110 (4). – P. 776–86. DOI: 10.1002/jbm.b.34957

72. Du J., Li S., Silberschmidt V.V. Remodelling of trabecular bone in human distal tibia: a model based on an in-vivo HR-pQCT study // *J. Mech. Behav. Biomed. Mater.* – 2021. – No. 119. – P. 104506. DOI: 10.1016/j.jmbbm.2021.104506.

73. Goyal A., Prasad J. An in silico model for woven bone adaptation to heavy loading conditions in murine tibia // *Biomech. Model Mechanobiol.* – 2022. DOI: 10.1007/s10237-022-01599-w

74. Comparative analysis of the biomechanical behavior of collar and collar-less stems: experimental testing and finite element modelling / I. Leivadnyi [et al.] // *J. Med. Biol. Eng.* – 2021. – No. 41 (6). – P. 844–55. DOI: 10.1007/s40846-021-00652-w

75. Mechano-regulation of trabecular bone adaptation is controlled by the local in vivo environment and logarithmically dependent on loading frequency / A.C. Scheuren [et al.] // *Front Bioeng. Biotechnol.* – 2020. – No. 8. – P. 566346. DOI: 10.3389/fbioe.2020.566346

76. Lasting organ-level bone mechanoadaptation is unrelated to local strain / B. Javaheri [et al.] // *Sci. Adv.* – 2020. – No. 6 (10). – eaax8301. DOI: /10.1126/sciadv.aax8301.

77. Spatial relationship between bone formation and mechanical stimulus within cortical bone: combining 3D fluorochrome mapping and poroelastic finite element modelling / A. Carriero [et al.] // *Bone Reports.* – 2018. – No. 8. – P. 72–80. DOI: 10.1016/j.bonr.2018.02.003

78. Effects of assessing the bone remodeling process in biomechanical finite element stability evaluations of dental implants / S. Park, J. Park, I. Kang, H. Lee, G. Noh // *Comput. Methods Prog. Biomed.* – 2022. – No. 221. – P. 106852. DOI: 10.1016/j.cmpb.2022.106852

79. Effect of implant placement depth on bone remodeling on implant-supported single zirconia abutment crown: a 3D finite element study / P. Poovarodom [et al.] // *J. Prosthodont. Res.* DOI: 10.2186/jpr.JPR_D_22_00054

80. Mathai B., Gupta S. Bone ingrowth around an uncemented femoral implant using mechanoregulatory algorithm: a multiscale finite element analysis // *J. Biomech. Eng.* – 2022. – No. 144 (2). – P. 021004. DOI: 10.1115/1.4052227

81. Smotrova E., Li S., Silberschmidt V.V. Mechanoregulated trabecular bone adaptation: progress report on in silico approaches // *Biomater. Biosyst.* – 2022. – No. 7. – P. 100058. DOI: 10.1016/j.bbiosy.2022.100058

82. Bone mechanoregulation allows subject-specific load estimation based on time-lapsed micro-CT and HR-pQCT in vivo / M. Walle, F.C. Marques, N. Ohs, M. Blauth, R. Müller, C.J. Collins // *Front Bioeng. Biotechnol.* – 2021. – No. 9. – P. 677985. DOI: 10.3389/fbioe.2021.677985

83. Chlebek C., Moore J.A., Ross F.P., van der Meulen M.C.H. Molecular

identification of spatially distinct anabolic responses to mechanical loading in murine cortical bone // *J. Bone Miner Res.* – 2022. – P. jbmr. 4686. DOI: 10.1002/jbmr.4686

84. Bones' adaptive response to mechanical loading is essentially linear between the low strains associated with disuse and the high strains associated with the lamellar/woven bone transition / T. Sugiyama, L.B. Meakin, W.J. Browne, G.L. Galea, J.S. Price, L.E. Lanyon // *J. Bone Miner Res.* – 2012. – No. 27 (8). – P. 1784–93. DOI: 10.1002/jbmr.1599

85. Taylor M., Prendergast P.J. Four decades of finite element analysis of orthopaedic devices: where are we now and what are the opportunities? // *J. Biomech.* – 2015. – No. 48 (5). – P. 767–78. DOI: 10.1016/j.jbiomech.2014.12.019

86. Bone adaptation in adult women is related to loading dose: a 12-month randomized controlled trial / K.L. Troy, M.E. Mancuso, J.E. Johnson, Z. Wu, T.J. Schnitzer, T.A. Butler // *J. Bone Miner Res.* – 2020. – No. 35 (7). – P. 1300–1312. DOI: 10.1002/jbmr.3999

87. Troy K.L., Edwards W.B., Bhatia V.A., Bareither M.L. In vivo loading model to examine bone adaptation in humans: a pilot study: prospective bone adaptation in women // *J. Orthop. Res.* – 2013. – No. 31 (9). – P. 1406–13. DOI: 10.1002/jor.22388

88. Bhatia V.A., Edwards W.B., Troy K.L. Predicting surface strains at the human distal radius during an in vivo loading task – finite element model validation and application // *J. Biomech.* – 2014. – No. 47 (11). – P. 2759–65. DOI: 10.1016/j.jbiomech.2014.04.050

89. Mechanoadaptation of the bones of mice with high fat diet induced obesity in response to cyclical loading / K. Eller [et al.] // *J. Biomech.* – 2021. – No. 124. – P. 110569. DOI: 10.1016/j.jbiomech.2021.110569

90. Manipulating load-induced fluid flow in vivo to promote bone adaptation / Q.A. Meslier, N. DiMauro, P. Somanchi, S. Nano, S.J. Shefelbine // *Bone.* – 2022. – No. 165. – P. 116547. DOI: 10.1016/j.bone.2022.116547

91. Pickering E., Trichilo S., Delisser P., Pivonka P. Beam theory for rapid strain estimation in the mouse tibia compression model // *Biomech. Model Mechanobiol.* – 2022. – No. 21 (2). – P. 513–25. DOI: 10.1007/s10237-021-01546-1

92. Characterization of cancellous and cortical bone strain in the in vivo mouse tibial loading model using microCT-based finite element analysis / H. Yang, K.D. Butz, D. Dufy, G.L. Niebur, E.A. Nauman, R.P. Main // *Bone.* – 2014. – No. 66. – P. 131–9. DOI: 10.1016/j.bone.2014.05.019

93. Estimation of load conditions and strain distribution for in vivo murine tibia compression loading using experimentally informed finite element models / E. Pickering, M.J. Silva, P. Delisser, M.D. Brodt, Y. Gu, P. Pivonka // *J. Biomech.* – 2021. – No. 115. – P. 110140. DOI: 10.1016/j.jbiomech.2020.110140

94. Main R.P., Lynch M.E., van der Meulen M.C.H. Load-induced changes in

bone stiffness and cancellous and cortical bone mass following tibial compression diminish with age in female mice // *J. Exp. Biol.* – 2014. – P. jeb. 085522. DOI: 10.1242/jeb. 085522

95. Application of subject-specific adaptive mechanical loading for bone healing in a mouse tail vertebral defect / A. Malhotra, M. Walle, G.R. Paul, G.A. Kuhn, R. Müller // *Sci. Rep.* – 2021. – No. 11 (1). – P. 1861. DOI: 10.1038/s41598-021-81132-8

96. Realtime finite element analysis allows homogenization of tissue scale strains and reduces variance in a mouse defect healing model / G.R. Paul, E. Wehrle, D.C. Tourolle, G.A. Kuhn, R. Müller // *Sci. Rep.* – 2021. – No. 11 (1). – P. 13511. DOI: 10.1038/s41598-021-92961-y

97. Diminished response to in vivo mechanical loading in trabecular and not cortical bone in adulthood of female C57Bl/6 mice coincides with a reduction in deformation to load / B.M. Willie [et al.] // *Bone.* – 2013. – No. 55 (2). – P. 335–46. DOI: 10.1016/j.bone.2013.04.023

98. Cancellous bone may have a greater adaptive strain threshold than cortical bone / H. Yang, W.A. Bullock, A. Myhal, P. DeShield, D. Dufy, R.P. Main // *JBMR Plus.* – 2021. – No. 5 (5). DOI: 10.1002/jbm4.10489

99. Examining tissue composition, whole-bone morphology and mechanical behavior of *GorabPrx1* mice tibiae: a mouse model of premature aging / H. Yang [et al.] // *J. Biomech.* – 2017. – No. 65. – P. 145–53. DOI: 10.1016/j.jbiomech.2017.10.018

100. Non-invasive prediction of the mouse tibia mechanical properties from microCT images: comparison between different finite element models / S. Oliviero, M. Roberts, R. Owen, G.C. Reilly, I. Bellantuono, E. Dall'Ara // *Biomech. Model Mechanobiol.* – 2021. – No. 20 (3). – P. 941–955. DOI: 10.1007/s10237-021-01422-y

101. Poulet B., Hamilton R.W., Shefelbine S., Pitsillides A.A. Characterizing a novel and adjustable noninvasive murine joint loading model // *Arthritis Rheum.* – 2011. – No. 63 (1). – P. 137–47. DOI: 10.1002/art.27765

102. An instrumented implant for vertebral body replacement that measures loads in the anterior spinal column / A. Rohlmann, U. Gabel, F. Graichen, A. Bender, G. Bergmann // *Med. Eng. Phys.* – 2007. – No. 29 (5). – P. 580–5. DOI: 10.1016/j.medengphy.2006.06.012

103. Subject-specific modeling of muscle force and knee contact in total knee arthroplasty: modeling of knee contact in total knee arthroplasty / A. Navacchia, P.J. Rullkoetter, P. Schütz, R.B. List, C.K. Fitzpatrick, K.B. Shelburne // *J. Orthop. Res.* – 2016. – No. 34 (9). – P. 1576–87. DOI: 10.1002/jor.23171

104. OpenSim: open-source software to create and analyze dynamic simulations of movement / S.L. Delp [et al.] // *IEEE Trans. Biomed. Eng.* – 2007. –

No. 54 (11). – P. 1940–50. DOI: 10.1109/TBME.2007.901024

105. Mechanical loading of the femoral neck in human locomotion / M.E. Kersh, S. Martelli, R. Zebaze, E. Seeman, M.G. Pandy // *J. Bone Miner Res.* – 2018. – No. 33 (11). – P. 1999–2006. DOI: 10.1002/jbmr.3529

106. Modelling human locomotion to inform exercise prescription for osteoporosis / S. Martelli, B. Beck, D. Saxby, D. Lloyd, P. Pivonka, M. Taylor // *Curr. Osteoporos. Rep.* – 2020. – No. 18 (3). – P. 301–311. DOI: 10.1007/s11914-020-00592-5

107. Warden S.J., Wright C.S., Fuchs R.K. Bone microarchitecture and strength adaptation to physical activity: a withinsubject controlled HRpQCT study // *Med. Sci. Sports Exerc.* – 2021. – No. 53 (6). – P. 1179–87. DOI: 10.1249/MSS.0000000000002571

108. Interactive effects of various loading parameters on the fluid dynamics within the lacunar-canalicular system for a single osteocyte / H. Wang, T. Du, R. Li, R.P. Main, H. Yang // *Bone.* – 2022. – No. 158. – P. 116367. DOI: 10.1016/j.bone.2022.116367

109. Study on the biomechanical responses of the loaded bone in macroscale and mesoscale by multiscale poroelastic FE analysis / W. Yu [et al.] // *BioMed. Eng. OnLine.* – 2019. – No. 18 (1). – P. 122. DOI: 10.1186/s12938-019-0741-3

110. Ganesh T., Laughrey L.E., Niroobakhsh M., Lara-Castillo N. Multiscale finite element modeling of mechanical strains and fluid flow in osteocyte lacunocanalicular system // *Bone.* – 2020. – No. 137. – P. 115328. DOI: 10.1016/j.bone.2020.115328

111. Osteocyte lacunar strain determination using multiscale finite element analysis / S.K. Kola [et al.] // *Bone Rep.* – 2020. – No. 12. – P. 100277. DOI: 10.1016/j.bonr.2020.100277

112. Sang W., Ural A. Quantifying how altered lacunar morphology and perilacunar tissue properties influence local mechanical environment of osteocyte lacunae using finite element modeling // *J. Mech. Behav. Biomed. Mater.* – 2022. – No. 135. – P. 105433. DOI: 10.1016/j.jmbbm.2022.105433

113. Gatti V., Azoulay E.M., Fritton S.P. Microstructural changes associated with osteoporosis negatively affect loading-induced fluid flow around osteocytes in cortical bone // *J. Biomech.* – 2018. – No. 66. – P. 127–36. DOI: 10.1016/j.jbiomech.2017.11.011

114. Schurman C.A., Verbruggen S.W., Alliston T. Disrupted osteocyte connectivity and pericellular fluid flow in bone with aging and defective TGF- β signaling // *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.* – 2021. – No. 118 (25). – P. e2023999118. DOI: 10.1073/pnas.2023999118

115. Paul G.R., Malhotra A., Müller R. Mechanical stimuli in the local in vivo environment in bone: computational approaches linking organ-scale loads to cellular

signals // *Curr. Osteoporos. Rep.* – 2018. – No. 16 (4). – P. 395–403. DOI: 10.1007/s11914-018-0448-6

116. Smit T.H. Finite element models of osteocytes and their load-induced activation // *Curr. Osteoporos. Rep.* – 2022. – No. 20 (2). – P. 127–140. DOI: 10.1007/s11914-022-00728-9

117. Static preload inhibits loading-induced bone formation: static preload inhibits bone adaptation / S. Srinivasan [et al.] // *JBMR Plus.* – 2019. – No. 3 (5). – P. e10087. DOI: 10.1002/jbm4.10087

118. Strain distribution evaluation of rat tibia under axial compressive load by combining strain gauge measurement and finite element analysis / J. Gao, B. Liu, M. Zhang, H. Gong, B. Gao // *Appl. Bionics Biomech.* – 2019. – No. 2019. – P. 1–14. DOI: 10.1155/2019/1736763

119. Webster D.J., Morley P.L., van Lenthe G.H., Müller R. A novel in vivo mouse model for mechanically stimulated bone adaptation – a combined experimental and computational validation study // *Comput. Methods Biomech. Biomed. Engin.* – 2008. – No. 11 (5). – P. 435–41. DOI: 10.1080/10255840802078014

120. Using digital image correlation to determine bone surface strains during loading and after adaptation of the mouse tibia / P. Szeftak, M. Vanleene, R. Olsson, R. Collinson, A.A. Pitsillides, S. Shefelbine // *J. Biomech.* – 2010. – No. 43 (4). – P. 599–605. DOI: 10.1016/j.jbiomech.2009.10.042

121. Oliviero S., Giorgi M., Dall'Ara E. Validation of finite element models of the mouse tibia using digital volume correlation // *J. Mech. Behav. Biomed. Mater.* – 2018. – No. 86. – P. 172–84. DOI: 10.1016/j.jmbbm.2018.06.022

122. Age and sex differences in load-induced tibial cortical bone surface strain maps / A. Carriero, B. Javaheri, N. Bassir Kazeruni, A.A. Pitsillides, S.J. Shefelbine // *JBMR Plus.* – 2021. – No. 5 (3). DOI: 10.1002/jbm4.10467

123. Liu C. FDA recognizes simulation essential to evaluate medical devices // *Adv. Mater. Process.* – 2013.

124. Reporting of computational modeling studies in medical device submissions – guidance for industry and food and drug administration staff. – U.S Food Drug Adm, 2016.

125. Assessing the credibility of computational modeling and simulation in medical device submissions. – U.S Food Drug Adm, 2021.

126. Carriero A., Jonkers I., Shefelbine S.J. Mechanobiological prediction of proximal femoral deformities in children with cerebral palsy // *Comput. Methods Biomech. Biomed. Engin.* – 2011. – No. 14 (3). – P. 253–62. DOI: 10.1080/10255841003682505

127. Численное исследование влияния дефектов зубного ряда малой протяженности на напряженно-деформированные состояния мостовидного

протеза и периодонта / А.Е. Крупин, Я.Н. Харах, Л.Г. Киракосян, И.В. Золотницкий, С.Д. Арутюнов // Российский журнал биомеханики. – 2019. – № 1. – С. 46–53.

128. применение метода конечных элементов при моделировании биологических систем в травматологии и ортопедии / В.Э. Дубров, Д.А. Зюзин, И.А. Кузькин, И.М. Щербаков, С.В. Донченко, К.А. Сапрыкина // Российский журнал биомеханики. – 2019. – № 3. – С. 44–53.

129. Маслов Л.Б., Дмитрюк А.Ю., Жмайло М.А., Коваленко А.Н. Конечно-элементный анализ напряженно-деформированного состояния эндопротеза тазобедренного сустава при ходьбе // Российский журнал биомеханики. – 2021. – № 2. – С. 56–66.

130. Экспериментальное изучение распределения упругих напряжений в периимплантатной кости при зубном протезировании / В.Н. Трезубов, М.Л. Мишнев, Ю.В. Паршин, В.С. Модестов, Д.И. Яреха // Российский журнал биомеханики. – 2023. – № 2. – С. 21–33.

131. Тверье В.М., Шитоев И.Д., Няшин Ю.И. Биомеханическое моделирование влияния усилий зубочелюстной системы на внутреннюю сонную артерию // Российский журнал биомеханики. – 2020. – № 3. – С. 65–71.

132. Четвертных В.А., Василюк В.П., Ерискина Е.В. Результаты морфологических исследований регенерации костной ткани на основе концептуальных подходов в хирургической стоматологии // Российский журнал биомеханики. – 2021. – № 3. – С. 31–44.

133. Перельмутер М.Н. Концентрация напряжений в костных тканях и винтовых дентальных имплантатах // Российский журнал биомеханики. – 2023. – № 2. – С. 18–29.

134. Джеббар Н., Бачири А., Бутабут Б. Трехмерный конечно-элементный анализ влияния ударной нагрузки от импактора переменной массы на распределение напряжений на поверхности «кость – имплант» // Российский журнал биомеханики. – 2023. – № 1. – С. 10–21.

135. Еремина Г.М., Смолин А.Ю. Численное исследование механического поведения тазобедренного сустава при терапевтическом акустическом воздействии // Российский журнал биомеханики. – 2023. – № 1. – С. 40–54.

136. Камалтдинов М.Р., Кучумов А.Г. Применение математической модели системного кровообращения для определения параметров кровотока после операции шунтирования у новорожденных // Российский журнал биомеханики. – 2021. – № 3. – С. 313–330.

137. Кучумов А.Г. Математическое моделирование перистальтического течения литогенной желчи через проток при рубцовом стенозе, рассматриваемый в виде трубки с сужающимися стенками конечной длины // Российский журнал биомеханики. – 2016. – № 2. – С. 96–115.

138. Иванова О.П. Расположение зубов в пространстве окклюзивной сферы у пациентов с различными типами строения гнатической части лица // Российский журнал биомеханики. – 2021. – № 4. – С. 376–382.

139. Использование механизмов механизации костной проводимости для

субъективной оценки звукопоглощающих свойств материалов / В.В. Харитонов, А.Ю. Литвинова, В.Н. Зинкин, П.М. Шешегов, Л.П. Сливина // Российский журнал биомеханики. – 2021. – № 1. – С. 78–98.

140. Математическое моделирование биомеханического поведения базиса съемного зубного протеза под действием характерных жевательных нагрузок / С.Д. Арутюнов, Д.И. Грачев, Г.Г. Багдасарян, В.Н. Никитин, Н.В. Максимова, А.Д. Никитин // Российский журнал биомеханики. – 2020. – № 4. – С. 491–504.

141. Джалалова М.В., Степанов А.Г. Численно-экспериментальное исследование влияния толщины цементного соединения трансдентального имплантата с тканями зуба на его адгезионные свойства // Российский журнал биомеханики. – 2020. – № 2. – С. 203–215.

142. Биомеханический подход к стоматологическому ортопедическому лечению пациентов с послеоперационным дефектом верхней челюсти / З.Л. Шанидзе, С.А. Муслев, А.С. Арутюнов, Н.Б. Асташина, С.Д. Арутюнов // Российский журнал биомеханики. – 2020. – № 1. – С. 28–38.

143. Дубинин А.Л., Осипенко М.А., Няшин Ю.И. Применение цифровых технологий при биомеханическом моделировании ортодонтического перемещения зубов // Российский журнал биомеханики. – 2019. – № 3. – С. 359–374.

Сведения об авторах

Научный руководитель – **Лохов Валерий Александрович**, доцент кафедры вычислительной математики, механики и биомеханики, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, e-mail: valeriy.lokhov@yandex.ru

Матросова Мария Владимировна – магистрант кафедры вычислительной математики, механики и биомеханики факультета прикладной математики и механики, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, e-mail: marymatru@yandex.ru

Финансирование: исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов: автор и научный руководитель заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад автора: 100 %.

Получена: 05.02.2024.

Одобрена: 06.02.2024.

Принята к публикации: 06.02.2024.

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом: Матросова, М.В. Конечно-элементное моделирование при механоадаптации костей (обзор литературы) / М. В. Матросова // Master's Journal. – 2024. – № 1. – Art. № 09.

Please cite this article in English as: Matrosova M.V. Finite element modeling for bone mechanical adaptation (review of literature). *Master's Journal*, 2024, no. 1, art. no. 09.