

УТВЕРЖДАЮ

директор по науке и инновациям

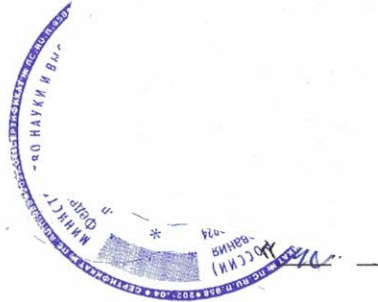
Пермского

университета,

технических наук,

А. И. Швейкин

2024 г.



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного автономного образовательного учреждения
высшего образования

«Пермский национальный исследовательский политехнический университет»

Министерства науки и высшего образования Российской Федерации

Диссертация «Моделирование структуры решетчатых скаффолдов с учетом их механического отклика и вариации морфометрических параметров» выполнена на кафедре «Динамика и прочность машин» федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет».

В период подготовки соискатель Еленская Наталия Витальевна работала в федеральном автономном образовательном учреждении высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» на кафедре «Динамика и прочность машин» в должностях учебного мастера, ассистента, старшего преподавателя, в научно-исследовательской лаборатории «Механика биосовместимых материалов и устройств» в должности младшего научного сотрудника (по совместительству).

В 2019 году окончила с отличием федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» по направлению подготовки 15.03.03 Прикладная механика (бакалавр), в 2021 году окончила с отличием федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» по направлению подготовки 15.04.03 Прикладная механика (магистр). С 2021 года обучается в аспирантуре очной формы обучения федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования Пермский национальный исследовательский политехнический университет» по направлению 01.06.01. Математика и механика (период обучения с 01 октября 2021 по 30 сентября 2025 г.).

Научный руководитель — кандидат физико-математических наук Ташкинов Михаил Анатольевич, доцент кафедры «Динамика и прочность машин»; заведующий научно-исследовательской лабораторией «Механика биосовместимых материалов и устройств» федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет».

По итогам обсуждения принято следующее решение:

1. Личное участие автора в получении результатов, изложенных в диссертации, заключается в следующем:

Автором диссертации проведен литературный обзор по тематике исследования, разработаны программные алгоритмы для создания трехмерных моделей геометрии пористых структур на основе аналитического задания трижды периодических минимальных поверхностей (ТПМП), предложен способ задания параметров этих моделей для их сопоставления с референтной структурой, созданы конечно-элементные модели, выполнены численные расчеты и обработка полученных данных, сопоставление полученных результатов с экспериментальными данными. Постановка задач,

результаты исследования и их интерпретация обсуждалась с научным руководителем М.А. Ташкиновым и другими соавторами публикаций. Создание образцов и проведение экспериментальных исследований осуществлялось м.н.с. НИЛ «МБМУ» И.В. Виндокуровым и Ю.В. Пироговой, автором диссертации осуществлялся анализ полученных экспериментальных данных, а также их сопоставление с результатами численного моделирования.

2. Научная новизна диссертационного исследования

- Разработан новый математический алгоритм построения геометрических моделей для периодических и функционально-градиентных решетчатых структур на основе аналитического задания ТПМП с учетом морфометрических характеристик замещаемой костной ткани.
- Разработан программный продукт для создания геометрии решетчатых структур на основе ТПМП с возможностью реализации различных типов структурного градиента, а также управления такими параметрами, как общая и локальная объемная доля пор, средняя толщина структурных элементов, диаметр пор, площадь внутренней поверхности.
- Предложен и реализован подход для определения параметров моделей структур на основе ТПМП, имитирующих механическое поведение референтной модели трабекулярной костной ткани, на основе конечно-элементного анализа упругого и упругопластического механического поведения.
- Разработан новый способ моделирования переходной зоны между кортикальной и трабекулярной костной тканью с использованием структур на основе ТПМП с градиентом морфологического строения.
- Получены новые данные о влиянии конфигурации переходной зоны градиентных структур, а также геометрии элементарных ячеек, на локальное распределение напряжений.
- Обнаружено, что морфология ячейки значительно влияет на распределение напряжений в структуре при сжимающем нагружении, тогда

как морфометрические характеристики структуры изменяются незначительно. При этом задание градиента оказывает существенное влияние как на морфометрические, так и на прочностные свойства структуры.

3. Степень достоверности результатов проведенных исследований

Достоверность и обоснованность результатов моделирования механического поведения структур на основе ТПМП, полученных при численных расчетах, обеспечиваются сходимостью вычислительных алгоритмов программ, воспроизводимостью полученных результатов, качественным и количественным соответствием результатов моделирования данным экспериментальных исследований.

4. Теоретическая и практическая значимость диссертационного исследования

Теоретическая значимость работы заключается в разработке и реализации нового комплексного подхода к моделированию пористых структур на основе ТПМП при их адаптации к референтной модели с использованием инструментов численного моделирования и морфометрического анализа.

Практическая значимость работы заключается в разработке способа рационального проектирования биомедицинских скаффолдов на основе ТПМП с учетом адаптации механического поведения и персонализированных требований, выполнение которых необходимо для эффективного замещения поврежденного участка костной ткани.

5. Полнота изложения материалов диссертации в работах, опубликованных соискателем

По тематике диссертационного исследования опубликована 37 печатных работ, в том числе 8 статей в ведущих рецензируемых изданиях, индексированных в международных базах цитирования Web of Science и/или Scopus, 23 публикации в тезисах докладов и материалах конференций. Получено 6 свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Основные положения и результаты работы отражены в следующих научных публикациях и журналах:

1. **Elenskaya N.** Modeling of Deformation Behavior of Gyroid and I-WP Polymer Lattice Structures with a Porosity Gradient / **N. Elenskaya, M. Tashkinov** // *Procedia Structural Integrity*. — 2021. — № 32. — С. 253–260. **Web of Science, Scopus**

Представлены результаты проектирования структур на основе ТПМП с функциональным градиентом пористости на основе разработанных соискателем математического алгоритма и программного продукта. Выполнена оценка их упругопластического поведения и механического отклика. Авторский вклад 70%.

2. **Elenskaya N.** Numerical simulation of deformation behavior of additively manufactured polymer lattice structures with a porosity gradient / **N. Elenskaya, M. Tashkinov** // *Procedia Structural Integrity*. — 2022. — № 37. — С. 692-697. **Web of Science, Scopus**

На основе разработанных соискателем математического алгоритма и программного продукта спроектированы функционально-градиентные структуры на основе ТПМП. Представлены результаты оценки их механического отклика. Авторский вклад 70%.

3. **Еленская Н. В.** Численное поведение деформационного поведения полимерных решетчатых структур с градиентом пористости, изготовленных на основе аддитивных технологий / **Н. В. Еленская, М. А. Ташкинов, В. В. Зильбершмидт** // *Вестник Санкт-Петербургского университета. Математика. Механика. Астрономия*. – 2022. – Т. 9 (67). – № 4. – С. 679–692. **Scopus, Q4, ВАК**

На основе разработанных соискателем математического алгоритма и программного продукта спроектированы функционально-градиентные структуры с контролируемыми параметрами. Приведены результаты численной оценки их механического отклика под воздействием сжимающих

нагрузок. Сопоставление результатов моделирования осуществлено на основе методов статистического анализа. Авторский вклад 70%.

4. Understanding of trabecular-cortical transition zone: Numerical and experimental assessment of multi-morphology scaffolds / N. Elenskaya, M. Tashkinov, I. Vindokurov [et al.] // Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials. – 2023. – Т. 147. – С. 106146. **Web of Science, Scopus, Q2**

Соискателем описан подход к использованию градиентных структур на основе ТПМП для замещения переходной зоны между кортикальной и трабекулярной костной тканью. На основе разработанных математического алгоритма и программного продукта спроектированы функционально-градиентные структуры с контролируемыми параметрами. Проведена оценка упругопластического поведения разработанных структур при сжатии. Сопоставление результатов моделирования осуществлено на основе методов статистического анализа. Проведено сопоставление с результатами экспериментальных исследований. Авторский вклад 65%.

5. Elenskaya N. Numerical strategies for modelling of the degradation process in TPMS-based polymer scaffolds / Elenskaya N., Koryagina P., Tashkinov M., Silberschmidt V. V. // Procedia Structural Integrity. — 2023. — № 49. — С. 43–50.

Web of Science, Scopus

Соискателем представлены результаты проектирования периодических структур с контролируемыми морфометрическими параметрами. Приведена оценка их механического отклика на различных этапах деградации. Сопоставление результатов моделирования осуществлено на основе методов статистического анализа. Авторский вклад 70%.

6. Elenskaya N. Effect of degradation in polymer scaffolds on mechanical properties: Surface vs. bulk erosion / Elenskaya N. Koryagina P., Tashkinov M., Silberschmidt V. V. // Computers in Biology and Medicine. — 2024. — Т. 174 — С. 108402. **Web of Science, Scopus, Q1**

Соискателем представлены результаты проектирования периодических и функционально-градиентных структур с контролируемыми

морфометрическими параметрами. Проведена оценка их механического отклика на различных этапах деградации. Оценивается влияние различных морфометрических характеристик, связанных с выбором элементарной ячейки, на свойства структуры. Авторский вклад 70%.

7. Bratsun D. Numerical Analysis of Permeability of Functionally Graded Scaffolds / Bratsun D., **Elenskaya N.**, Siraev R., Tashkinov M. // Fluid Dynamics & Materials Processing. — 2024. — Vol. 20. — № 7. — P. 1463-1479. **Web of Science, Scopus, Q4**

На основе разработанных соискателем математического алгоритма и программного продукта спроектированы функционально-градиентные структуры с контролируемыми морфометрическими параметрами. Представлены результаты исследования проницаемости структур. Авторский вклад 25%.

8. Crack Propagation in TPMS Scaffolds under Monotonic Axial Load: Effect of Morphology / A.Shalimov, M. Tashkinov, N. **Elenskaya** [et al.] // Medical Engineering & Physics. — 2024. — С. 104235. **Web of Science, Scopus, Q3**

Соискателем спроектированы периодические структуры с контролируемыми морфометрическими параметрами. Приведена оценка влияния типа элементарной ячейки на механический отклик. Авторский вклад 20%.

Свидетельства о регистрации программ для ЭВМ:

9. **Еленская Н. В.** Вычислительный модуль для создания геометрических моделей для трехмерных градиентных взаимопроникающих структур на основе трижды периодических минимальных поверхностей типа «I-WP». – Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021680746 от 16.12.2021 (вклад автора – 100%)

Соискателем написан код программного модуля, позволяющего проектировать периодические и функционально-градиентные структуры на основе трижды периодической минимальной поверхности I-WP.

10. **Еленская Н. В.** Вычислительный модуль для создания геометрических моделей для трехмерных градиентных взаимопроникающих структур на основе трижды периодических минимальных поверхностей типа «Гироид». – Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021680743 от 16.12.2021 (вклад автора – 100%)

Соискателем написан код программного модуля, позволяющего проектировать периодические и функционально-градиентные структуры на основе трижды периодической минимальной поверхности гироида.

11. **Еленская Н. В.,** Ташкинов М.А. Программа для генерации конечно-элементных функционально-градиентных структур на основе трижды периодических минимальных поверхностей. – Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022684068 от 12.12.2022 (вклад автора – 50%)

Соискателем написан модуль обработки входных данных, расчета параметров функционального градиента и моделирования неоднородной градиентной структуры на основе трижды периодических минимальных поверхностей.

12. **Еленская Н. В.** Программа для оценки статистического распределения полей на основе данных конечно-элементных моделей / **Н. В. Еленская,** Е. А. Кононов, Ю. В. Пирогова, М. А. Ташкинов. – Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022684067 от 12.12.2022 (вклад автора – 25%)

Соискателем написан модуль интерпретации входных данных в среде Wolfram Mathematica

13. **Еленская Н. В.** Программный продукт для анализа изменений пористости решетчатых структур на основе трижды периодических минимальных поверхностей. – Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023682507 от 24.10.2023 (вклад автора – 100%)

Соискателем написан модуль обработки входных данных, генерации пористой структуры на основе трижды периодических минимальных поверхностей, расчета и анализа параметров пористости

14. Еленская Н. В. Программный продукт для анализа численных стратегий моделирования процесса деградации в скаффолдах на основе трижды периодических минимальных поверхностей. – Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023682312 от 24.10.2023 (вклад автора – 100%)

Соискателем написан модуль обработки входных данных, анализ влияния выбранной численной методики моделирования процесса деградации на эффективные свойства структур на основе трижды периодических минимальных поверхностей, сопоставление различных подходов к моделированию деградации между собой

Прочие работы по теме диссертационного исследования:

15. Упругопластическое поведение функционально-градиентных пористых полимерных структур для замещения трабекулярно-кортикальной зоны костной ткани / Н. В. Еленская, М. А. Ташкинов, И. В. Виндокуров, Ю. В. Пирогова // Физическая мезомеханика. Материалы с многоуровневой иерархически организованной структурой и интеллектуальные производственные технологии : Междунар. конф., 09-12 сент. 2024 г., Томск, Россия : тез. докл. / Ин-т физики прочности и материаловедения СО РАН. - Томск : [б. и.], 2024. - С. 215-216.

16. Применение модели Джонсона-Кука для моделирования упругопластического поведения полимерных решетчатых структур на основе ТППП / Н. В. Еленская, М. А. Ташкинов, И. В. Виндокуров, И. Э. Келлер, А. А. Адамов // Актуальные проблемы механики : сб. аннот. : 51 shk.-конф. памяти Д. А. Индейцева / Рос. нац. ком. по теорет. и прикл. механике, Ин-т проблем машиноведения РАН, Новгород. гос. ун-т им. Ярослава Мудрого. - Великий Новгород : [б. и.], 2024. - С. 78.

17. Исследование морфометрических характеристик и механического отклика решетчатых скаффолдов для восстановления костной ткани / Ю. В. Пирогова,

М. А. Ташкинов, И. В. Виндокуров, Н. В. Еленская, А. С. Шалимов, А. С. Тарасова // Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций : XVIII Междунар. конф., (Екатеринбург, 27–31 мая 2024 г.) : сб. материалов / Мин-во России, Урал. отд-ние Рос. акад. наук, ИМАШ УрО РАН [и др.]. - Екатеринбург : ИМАШ УрО РАН, 2024. – Режим доступа: <https://www.imach.uran.ru/Conf2024/about/> – С. 28

18. Управление морфологией структур на основе ТПМП: оценка влияния морфометрических характеристик на упругопластическое поведение / Н. В. Еленская, М. А. Ташкинов, И. В. Виндокуров // Математическое моделирование и биомеханика в современном университете : тез. докл. XVIII Всерос. шк. (пос. Дивноморское, 27–31 мая 2024 г.) / М-во науки и высш. образования Рос. Федерации, Юж. федер. ун-т, Дон. гос. техн. ун-т. - Ростов-на-Дону ; Таганрог : Изд-во Юж. федер. ун-та, 2024. – С. 30.

19. Numerical and Experimental Assessment of Multi-Morphology Bone Tissue Engineering Scaffolds / M. Tashkinov, N. Elenskaya, Y. Pirogova, A. Shalimov, I. Vindikurov, V. V. Silberschmidt // 6th African conference on computational mechanics : Cape Town, South Africa, 26-28 February 2024 / AfriComp, University of Cape Town. - Cape Town : [s. n.], 2024. - P. 14.

20. Мультиморфологические скаффолды для регенерации костной ткани: численное и экспериментальное исследование механического поведения / М. А. Ташкинов, Н. В. Еленская, Ю. В. Пирогова [и др.] // Новые материалы и технологии в условиях Арктики : материалы VI Междунар. конф. с элементами науч. шк. для молодежи, посвящ. 30-летию высш. хим. образования в Респ. Саха (Якутия), 27-29 нояб. 2023 г., Якутск, Россия. – Якутск : Издат. дом Северо-Вост. федер. ун-та, 2023. – С. 200-202.

21. Исследование механического поведения структур на основе трижды периодических минимальных поверхностей для приложений тканевой инженерии с учетом морфометрических характеристик / Н.В. Еленская, М.А. Ташкинов, И.В. Виндокуров, Ю.В. Пирогова, В.В. Зильбершмидт // Современные проблемы механики сплошной среды : тез. докл. XXI междунар. конф., Ростов-на-Дону, 11–13 окт. 2023 г. / М-во науки и высш. образования Рос. Федерации, Рос. нац. ком. по теорет. и прикл. механике, Юж. федер. ун-т,

Дон. гос. техн. ун-т. [и др.] - Ростов-на-Дону ; Таганрог : Изд-во Юж. федер. ун-та, 2023 – С. 41

22. Численное моделирование деформационного поведения аддитивно изготовленных решетчатых структур для приложений тканевой инженерии с учетом их морфометрических характеристик / Н.В. Еленская, М.А. Ташкинов, В.В. Зильбершмидт // Математическое моделирование в естественных науках : Материалы XXXII Всерос. конф. / Перм. нац. исслед. политехн. ун-т, Ин-т механики сплошных сред Урал. отд-ния Рос. акад. наук. - Пермь : Изд-во ПНИПУ, 2023 –С. 133

23. Влияние объёмной и поверхностной деградации на механическое поведение полимерных пористых скаффолдов / П.О. Корягина, Н.В. Еленская, М.А. Ташкинов, В.В. Зильбершмидт // Математическое моделирование в естественных науках : Материалы XXXII Всерос. конф. / Перм. нац. исслед. политехн. ун-т, Ин-т механики сплошных сред Урал. отд-ния Рос. акад. наук. - Пермь : Изд-во ПНИПУ, 2023 – С. 182

24. Исследование конфигурации внутренней структуры и упругих свойств решетчатых биомедицинских скаффолдов / Ю.В. Пирогова, М.А. Ташкинов, Н. В. Еленская, А.С. Тарасова, И.В. Виндокуров, М.А. Ташкинов, В.В. Зильбершмидт // Актуальные проблемы механики сплошной среды : Материалы VIII междунар. конф., 01-05 окт. 2023, Цахкадзор, Армения / Нац. акад. наук Армении, Ин-т механики. - Ереван : Гитутюн, 2023. – Режим доступа: <http://www.mechins.sci.am/conf2023/files/conf-proceedings-2023.pdf> – С. 218-222

25. Разработка аддитивно-изготавливаемых скаффолдов для инженерии костной ткани на основе концепции контролируемой морфологии / Н.В. Еленская // Наука будущего - наука молодых : VIII Всерос. молодеж. науч. форум. Наука будущего : V Междунар. науч. конф., г. Орел, 20-23 сент. 2023 г. : сб. тез. докл. участников / М-во науки и высш. образования Рос. Федерации, ООО "Инконсалт К". - Орел : [б. и.], 2023. – С. 354

26. Проектирование функционально-градиентных 3д-печатных полимерных скаффолдов для тканевой инженерии на основе численно-экспериментального подхода / Н. В. Еленская, М.А. Ташкинов, И.В. Виндокуров, Ю.В. Пирогова //

XIII Всероссийский съезд по теоретической и прикладной механике : сб. тез. докл., 21-25 авг. 2023 г., Санкт-Петербург. В 4 т. Т. 4. Материалы симпозиумов и Исторической сессии / М-во науки и высш. образования Рос. Федерации, Рос. акад. наук, Рос. нац. ком. по теорет. и прикл. механике. - Санкт-Петербург : ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2023 – С. 40-42

27. Design of Functionally-Graded Tissue Engineering Scaffolds Based on Numerical-Experimental Approach / N. Elenskaya, M. Tashkinov, I. Vindokurov [et al.] // Mechanics of biomedical materials and devices – 2023 : Материалы междунар. конф. (Пермь, 17–18 июля 2023 г.) / М-во науки и высш. образования Рос. Федерации, Перм. нац. исслед. политехн. ун-т. - Пермь : Изд-во ПНИПУ, 2023. – С. 65.

28. Numerical Strategies for Analysis of Degradation of Additively Manufactured Polymer Scaffolds / P. Koryagina, N. Elenskaya, M. Tashkinov, V. V. Silberschmidt // Mechanics of Biomedical Materials and Devices – 2023 : Материалы междунар. конф. (Пермь, 17–18 июля 2023 г.) / М-во науки и высш. образования Рос. Федерации, Перм. нац. исслед. политехн. ун-т. - Пермь : Изд-во ПНИПУ, 2023. – Р. 68.

29. Механическое поведение решетчатых структур скаффолдов для восстановления трабекулярной костной ткани / Ю. Пирогова, М. Ташкинов, И. Виндокуров [и др.] // Mechanics of Biomedical Materials and Devices – 2023 : Материалы междунар. конф. (Пермь, 17–18 июля 2023 г.) / М-во науки и высш. образования Рос. Федерации, Перм. нац. исслед. политехн. ун-т. - Пермь : Изд-во ПНИПУ, 2023. – С. 28.

30. Разработка 3D-печатных функционально-градиентных полимерных пористых структур для приложений тканевой инженерии / Н. В. Еленская, М. А. Ташкинов, И. В. Виндокуров, Ю. В. Пирогова // Математическое моделирование и биомеханика в современном университете : тез. докл. XVII Всерос. шк. (пос. Дивноморское, 28 мая — 1 июня 2023 г.) / М-во науки и высш. образования Рос. Федерации, Юж. федер. ун-т, Дон. гос. техн. ун-т. - Ростов-на-Дону ; Таганрог : Изд-во Юж. федер. ун-та, 2023 – С. 38.

31. Сравнительный анализ механического поведения пористых решетчатых структур костных имплантатов на основе скаффолдов / Ю. В. Пирогова, И. В.

Виндокуров, Н. В. Еленская [и др.] // Математическое моделирование и биомеханика в современном университете : тез. докл. XVII Всерос. шк. (пос. Дивноморское, 28 мая — 1 июня 2023 г.) / М-во науки и высш. образования Рос. Федерации, Юж. федер. ун-т, Дон. гос. техн. ун-т. - Ростов-на-Дону ; Таганрог : Изд-во Юж. федер. ун-та, 2023 – С. 88.

32. Численное и экспериментальное исследование деформационного поведения аддитивно изготовленных полимерных функционально-градиентных решетчатых структур / Н.В. Еленская, И.В. Виндокуров, Ю.В. Пирогова, М.А. Ташкинов // XXIII Зимняя школа по механике сплошных сред, Пермь, 13-17 февраля 2023 г. : тез. докл. / М-во науки и высш. образования Рос. Федерации, Урал. отд-ние Рос. акад. наук, Ин-т механики сплошных сред УрО РАН - фил. Федер. гос. бюджет. учр. науки Перм. федер. исслед. центра Урал. отд-ния Рос. акад. наук. - Пермь : Новопринт, 2023 – С. 111

33. Численное моделирование деформационного поведения аддитивно изготовленных пористых структур на основе трижды периодических минимальных поверхностей / Н.В. Еленская, М.А. Ташкинов // Математическое моделирование в естественных науках : материалы XXXI Всерос. шк.-конф. / М-во науки и высш. образования Рос. Федерации, Рос. акад. наук, М-во образования и науки Перм. края, Перм. нац. исслед. политехн. ун-т, Ин-т механики сплошных сред УрО РАН. - Пермь : ИП Серегина О. Н., 2022. – С. 94.

34. Анализ механического поведения полимерных решетчатых градиентных структур, изготовленных на основе аддитивных технологий / Н.В. Еленская, М.А. Ташкинов // Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций : XVI Международная конференция [Екатеринбург, 16–20 мая 2022 г.] : сб. материалов / М-во науки и высш. образования Рос. Федерации [и др.]. – Екатеринбург : ИМАШ УрО РАН, 2022. – Режим доступа: <https://www.imach.uran.ru/conf2022/attend/psi> – С. 57

35. Численное моделирование деформационного поведения полимерных ячеистых структур с градиентом пористости, изготовленных на основе аддитивных технологий / Н. В. Еленская, М. А. Ташкинов // Математическое моделирование в естественных науках : материалы XXX Всерос. шк.-конф. /

М-во науки и высш. образования Рос. Федерации, Рос. акад. наук, М-во образования и науки Перм. края, Перм. нац. исслед. политехн. ун-т, Ин-т механики сплошных сред УрО РАН. С. 265-267.

36. Numerical Simulation of Deformation Behavior of Additively Manufactured Polymer Lattice Structures with a Porosity Gradient / M. Tashkinov, N. Elenskaya // 4th International Conference on Structural Integrity : тез. докл. [г. Фуншал, Мадейра, Португалия, 30 авг. – 1 сент. 2021 г.] / Тезисы докладов / The Intern. Conf. on Structural Integrity. – Режим доступа: <https://www.icsi.pt/icsi-events-published-volumes/> – С. 167

37. Моделирование деформационного поведения неоднородных полимерных решетчатых структур с градиентом пористости / Н. В. Еленская, М. А. Ташкинов // XXII Зимняя школа по механике сплошных сред : тез. докл., [г. Пермь, 22-26 марта 2021 г.] / Тезисы докладов / ПФИЦ УрО РАН. – Электронные данные. – Пермь : [б. и.], 2021. – Режим доступа: <https://conf.icmm.ru/event/2/page/4> – С. 126

6. Соответствие содержания диссертации специальности, по которой она рекомендуется к защите

Представленная диссертационная работа «Моделирование структуры решетчатых скаффолдов с учетом их механического отклика и вариации морфометрических параметров» соответствует паспорту специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (физико-математические науки). Работа посвящена разработке методов для рационального проектирования и моделирования полимерных решетчатых структур скаффолдов с учетом механических свойств и морфометрических характеристик замещающей костной ткани, что соответствует п. 1 Разработка новых математических методов моделирования объектов и явлений и п. 3 Реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента паспорта специальности.

7. Соответствие диссертационной работы требованиям, «Положения о присуждении ученых степеней».

Диссертация Еленской Наталии Витальевны отвечает требованиям п. 9-11, 13, 14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 № 842, предъявляемым к кандидатским диссертациям.

Диссертация «Моделирование структуры решетчатых скаффолдов с учетом их механического отклика и вариации морфометрических параметров» Еленской Наталии Витальевны рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Заключение принято на заседании кафедры «Динамика и прочность машин».

Присутствовало на заседании 15 чел. Результаты голосования: «за» - 15 чел., «против» - 0 чел., «воздержалось» - 0, протокол № 1 – от «02» сентября 2024 г.

Заведующий кафедрой

«Динамика и пр

д.т.н., академик

профессор

 /Матвеевко В.П./

ФИО

Ученый секретарь

«Динамика и пр

 /Мельникова Т.Е./

ФИО