

## ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОПОНЕНТА

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

**Актуальность исследования.** Разработка биосовместимых решетчатых структур (скаффолдов) для замещения костных дефектов является одним из востребованных быстроразвивающихся направлений регенеративной медицины. Функциональные особенности таких структур предполагают, что они не только оберут на себя основные механические функции замещаемого фрагмента кости, но и выступают в качестве матрицы для прорастания и дальнейшего формирования новой костной ткани. Для этого требуется, чтобы скаффолд соответствовал ряду требований, связанных с внутренней архитектурой решетчатой конструкции, ее механическими характеристиками и свойствами материала. Ключевую роль здесь играет внутренняя структура скаффолда, поскольку от неё зависит не только взаимодействие с биологической средой, но и эффективные механические характеристики готового изделия. Вопросы проектирования подобных геометрически сложных объектов с особыми свойствами требуют использования методов математического моделирования, а также численных методов. Несмотря на активную исследовательскую деятельность в этой области, на данный момент не существует универсального подхода к проектированию геометрии скаффолдов. Диссертационная работа Н.В. Еленской посвящена развитию методов математического моделирования структур для замещения костной ткани с требуемыми свойствами, что, безусловно, является актуальным. Развитие данной темы также важно с точки зрения практического применения для повышения эффективности персонализированных медицинских изделий и ускорения реабилитации пациентов с нарушением целостности костной ткани.

**Краткая характеристика основного содержания работы.** В работе предложен подход к проектированию костных скаффолдов, имитирующих неоднородность костной ткани. Подход основан на анализе морфометрических характеристик и степени их соответствия замещаемому фрагменту костной ткани. Кроме того, при выборе базовой элементарной ячейки учитывается взаимосвязь морфометрических параметров структуры с ее физико-механическими свойствами. Моделирование геометрии функционально-градиентной структуры производится на основе трехмерных периодических минимальных поверхностей (ТПМП).

Полученные результаты морфометрического анализа, приведенные во второй главе для периодических и функционально-градиентных структур, позволяют оценить влияние типа ТПМП и параметров функционального градиента на структурные характеристики проектируемого скаффолда. Полученные новые данные позволят создавать более точные и эффективные модели, приближенные по своему строению к живым тканям.

Анализ механического поведения спроектированных структур при сжатии, представленный в третьей и четвертой главах, позволил оценить влияние выбранного типа ТПМП, а также параметров функционального градиента на распределение напряжений как по всей конструкции, так и в переходной градиентной зоне. Результаты конечно-элементного анализа позволили выделить наиболее устойчивые к сжатию типы периодических структур, установить зависимость характеристик жесткости от направления структурного градиента, а также оценить влияние размера переходной зоны на возникающие в структуре напряжения. Полученные данные актуальны с точки зрения прогнозирования механического отклика будущего скаффолда, поскольку позволяют выделить наиболее опасные случаи нагружения, которые необходимо рассматривать в первую очередь. Предложенный в четвертой главе способ замещения трабекулярно-кортикального переходного участка костной ткани за счет создания структур с градиентом морфологического строения является перспективным, однако требует дополнительных исследований, основанных на механическом отклике реального фрагмента такой ткани, и сопоставления с уже имеющимися решениями.

**Обоснованность и достоверность научных положений и выводов.** Модели механического поведения решетчатых структур на основе ТПМП, спроектированных с учетом ограничений на морфометрические характеристики, с хорошей точностью прогнозируют поведение реальных конструкций. Достоверность результатов обеспечиваются сходимостью алгоритмов вычислительных программ, воспроизводимостью полученных результатов, а также их согласованностью с результатами экспериментальных исследований.

**Научная новизна результатов.** Соискателем разработаны новый программный продукт на основе предложенного алгоритма, который позволяет проектировать решетчатые конструкции на основе ТПМП с контролируемыми морфометрическими и механическими свойствами, что открывает новые возможности по созданию персонализированных биомедицинских эндопротезов с требуемыми характеристиками. Предложенный подход предполагает ориентироваться на данные референтного объекта – реального фрагмента костной ткани – на этапе проектирования внутренней структуры. В рамках данного подхода контроль за структурными характеристиками скаффолда

реализуется с помощью сравнения морфометрических параметров проектируемого объекта с параметрами конкретного фрагмента костной ткани. Адаптация механических характеристик предполагается за счет сопоставления особенностей механического поведения с применением инструментов статистического анализа. Использован оригинальный подход к сравнению полученных конструкций за счет сопоставления механического отклика, выраженного через распределения напряжений по объему структуры. Получены новые данные о влиянии выбранного типа базовой поверхности и подхода к проектированию на морфометрические и механические параметры конечных структур. Проанализировано влияние типа функционального градиента на параметры структуры. На основе полученных результатов для модельных структур предложен принципиально новый подход к замещению трабекулярно-кортикального перехода в костной ткани.

#### **Замечания и вопросы по работе:**

1. В главе 2 обоснованно, как существенные для процессов остеоинтеграции, вводятся в рассмотрение, а затем анализируются, четыре интегральные характеристики внутренней структуры скаффолда, основанные на аналогичных морфометрических параметрах трабекулярной костной ткани: объемная доля твердого вещества, площадь внутренней поверхности порового пространства, средняя толщина трабекул и среднее расстояние между трабекулами. Хотелось бы узнать, позволяют ли разработанные математические модели пористых структур на основе ТПМП провести анализ такого параметра как кривизна поровых каналов, встречающегося в описании пористых сред?

2. Какие типы ТПМП наиболее подходят для описания компактного вещества кортикального слоя длинных трубчатых костей?

3. Глава 3 посвящена исследованию напряженно-деформированного состояния (НДС) построенных структур при заданной тестовой нагрузке, значение которой, как я понял, выбрано таким образом, чтобы рассмотреть НДС и прочность при превышении предела упругости материала. К постановке задачи есть несколько вопросов:

- Хотя результаты эксперимента (рис. 3.1.2) показывают наличие упругого поведения до деформаций 3-4 %, хотелось бы узнать, сравнивались ли полученные результаты с исследованиями других авторов механического поведения полилактида?

- Насколько нагрузка 100 Н на кубик выбранного размера является характерной с точки зрения биомеханики и возможного применения скаффолда?

- В расчетах главным образом оценивается НДС конструкции «как есть», но, тем не менее, встречается понятие эффективный упругий отклик. Это допустимо, в отличие от понятия модуль упругости на сжатие, которое тоже встречается в тексте.

- Обычно в механике деформируемого твердого тела рассматривается два характерных состояния: одно на растяжение-сжатие, другое на сдвиг. Было бы полезно провести и такой анализ построенных структур.

#### 4. Замечания по терминологии:

- В работе используется понятие «пористость в направлении Y и Z», например, в таблице 2.5.1. Хотя из содержания диссертации, понятно, о чем идет речь, но, строго говоря, пористость – скалярная величина, не имеющая направления. Было бы лучше, если бы для описания системы поровых каналов в различных направлениях использовалась другая терминология или предложены другие характеристики.

- В тексте аддитивная технология производства скаффолдов местами обозначается как 3д печать. Стоит использовать устоявшееся обозначение 3d от слов «three-dimensional».

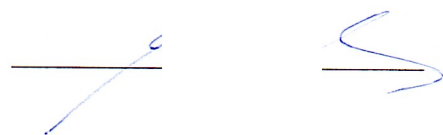
**Заключение по диссертации.** Диссертационная работа Еленской Наталии Витальевны «Моделирование структуры решетчатых скаффолдов с учетом их механического отклика и вариации морфометрических параметров» по содержанию и изложению материала соответствует паспорту специальности 1.2.2. «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Считаю, что диссертационная работа Н.В. Еленской «Моделирование структуры решетчатых скаффолдов с учетом их механического отклика и вариации морфометрических параметров» соответствует требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор заслуживает присуждения степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Официальный оппонент,

заведующий кафедрой теоретической и прикладной механики ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор физико-математических наук (05.13.18 - Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ)

Маслов Леонид Борисович



« 23 » ноября 2024 г.

Маслов Леонид Борисович, доктор физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой теоретической и прикладной механики ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»

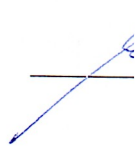
Адрес организации: 153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34

Телефон: +7 (4932) 269-712

E-mail: [leonid-maslov@mail.ru](mailto:leonid-maslov@mail.ru)

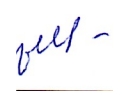
Я, Маслов Леонид Борисович, даю своё согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Еленской Наталии Витальевны, и их дальнейшую обработку.

« 23 » ноября 2024 г.

 / Л.Б. Маслов /

Подпись доктора физико-математических наук, доцента, заведующего кафедрой теоретической и прикладной механики Маслова Леонида Борисовича заверяю.

Ученый секретарь совета ИГЭУ

 / Ю.В. Вылгина /

23.11.2024г.

