

ОТЗЫВ

на автореферат диссертации Левина Александра Александровича «Разработка робототехнического комплекса для интраоперационной 3D-биопечати эквивалентов мягких тканей», представленной на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 1.1.10 – «Биомеханика и биоинженерия»

Рецензируемый автореферат диссертационной работы Левина А.А. представляет собой грамотно структурированный и содержательный научный доклад, в котором последовательно и полно отражены основные этапы, результаты и научные достижения проведенного исследования.

Автореферат начинается с обоснования актуальности темы, которая связана с необходимостью разработки отечественных робототехнических комплексов для интраоперационной биопечати, способных работать в условиях операционной и обеспечивать восстановление мягких тканей с высокой точностью. Актуальность подкреплена ссылками на современные мировые исследования и четко обозначенные технологические пробелы, существующие в данной области.

Структура автореферата логична и отражает последовательность решения поставленных задач. В первой главе представлен анализ существующих систем *in situ* биопечати, выявлены их ограничения и обоснована необходимость использования шарнирных роботов с шестью степенями свободы. Во второй главе подробно описана разработка малогабаритного 3D-сканера на основе лазерной триангуляции и мехатронного дозатора, адаптированных для работы в стерильных условиях. Особого внимания заслуживает предложенный автором алгоритм фильтрации бликов и расчёта положения лазерной линии с субпиксельной точностью.

Третья глава посвящена алгоритму заполнения раневых дефектов, учитывающему геометрию нижней поверхности раны и окружающих здоровых тканей. Предложенный метод генерации слоев и планирования траектории позволяет обеспечить анатомическое соответствие напечатанного эквивалента натуральным тканям. В четвёртой главе описана компьютерная модель процесса биопечати, учитывающая погрешности сканирования и реологические свойства гидрогеля. Моделирование позволило оптимизировать параметры печати, такие как ширина линии и соотношение высоты к ширине.

Пятая глава содержит описание лабораторных образцов робототехнического комплекса и результаты доклинических испытаний на животных, подтвердившие эффективность предложенного подхода для регенерации полнослойных дефектов кожи.

Научная новизна работы убедительно раскрыта и включает:

- ~ разработку алгоритма сканирования, повышающего точность построения 3D-модели раневой поверхности;
- ~ создание метода планирования траектории с учётом кривизны поверхности и выбора шаблонов заполнения;
- ~ разработку интегрированного сканера и дозатора с возможностью стерилизации;

компьютерное моделирование процесса печати с учётом вязкоупругих свойств гидрогеля.

Практическая значимость работы подтверждается внедрением результатов в учебный процесс, передачей технологий по лицензионному договору и использованием в рамках государственных программ («Приоритет 2030», «Передовые инженерные школы»). Публикации в рецензируемых журналах и выступления на международных конференциях свидетельствуют о признании результатов научным сообществом.

Автореферат написан ясным и лаконичным языком, содержит необходимые иллюстрации и таблицы, что облегчает восприятие материала. Выводы соответствуют поставленным задачам и подтверждены экспериментальными данными.

В качестве пожеланий и вопросов, направленных на углубление понимания химико-технологических аспектов работы, отмечу следующее:

1. Как обеспечивается и контролируется процесс сшивания гидрогеля *in situ* после нанесения? Используется ли физический (ионный, термообратимый) или химический (фотоиницируемый, ферментативный) сшивание? Если химическое, то какие именно инициаторы, сшивающие агенты используются, и как гарантируется их биосовместимость и полное удаление/нейтрализация после реакции?

2. Были ли проведены исследования стабильности подготовленного гидрогеля во времени? Как изменяются его реологические свойства и жизнеспособность клеток (если они есть) в шприце в течение типичной продолжительности операции?

3. Рассматривалась ли возможность использования других типов биочернил (например, на основе синтетических полимеров с более предсказуемыми свойствами) в рамках разработанного комплекса? Насколько алгоритмы печати адаптивны к материалам с принципиально иной реологией?

Более подробное описание этих аспектов, а также перспектив масштабирования технологии для клинического применения, дополнило бы раздел практической значимости. Однако это не снижает общей ценности работы.

На основании изложенного считаю, что диссертационная работа Левина Александра Александровича соответствует требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 1.1.10 «Биомеханика и биоинженерия».

Руководитель проектов
ЦТИ ООО «Норникель-спутник»



к.т.н., Индык Денис Викторович

08.10.2025

Контактные данные: +7-952-184-00-77, IndykDV@nornik.ru