

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по научной работе
федерального государственного
автономного образовательного
учреждения высшего образования
«Национальный исследовательский
университет «Московский
институт электронной техники»

К.Т.Н. Дронов А.А.



«15» октября 2025 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

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

Актуальность темы диссертационной работы

Для сохранения здоровья человека, увеличения продолжительности жизни и снижение инвалидности активно развиваются передовые направления биоинженерии, связанные с 3D-печатью тканеинженерных конструкций непосредственно из живых клеток для восстановления функции органов или тканей. Метод биопечати *in situ* подразумевает нанесение биоматериалов непосредственно в раневое ложе для обеспечения регенерации дефекта. Существенным преимуществом биопечати *in situ* по сравнению с классической 3D-биопечатью является отсутствие необходимости в использовании инкубатора для созревания напечатанных эквивалентов тканей, а также решение проблемы их васкуляризации за счет естественной миграции эндотелиальных прогениторных клеток реципиента в напечатанные биологические структуры. В связи с этим, диссертационное исследование Левина Александра Александровича посвященное разработке робототехнического комплекса (РТК) для интраоперационной 3D-

биопечати эквивалентов мягких тканей непосредственно на теле пациента является актуальным. Также актуальность темы обусловлена стремительным развитием регенеративной медицины, потребностью в минимизации времени операций, снижении риска инфицирования и улучшении качества заживления сложных ран. Предложенный подход позволяет интегрировать процессы сканирования, моделирования и биопечати в единую систему, что соответствует современным тенденциям персонализированной медицины и роботизации хирургических вмешательств.

Связь с планами отраслей науки и народного хозяйства

Представленное исследование напрямую связано с приоритетными направлениями развития науки и технологий в Российской Федерации, определенными в Стратегии научно-технологического развития РФ, в частности с переходом к передовым производственным технологиям, персонализированной медицине и высокотехнологичному здравоохранению.

Работа выполнена в рамках государственных инициатив, таких как федеральная программа «Приоритет 2030», проект «Передовые инженерные школы» и государственное задание на разработку новых медицинских роботизированных комплексов. Разработка отечественного РТК для биопечати *in situ* направлена на импортозамещение критически важных медицинских технологий, что соответствует задачам развития народного хозяйства в сфере высокотехнологичного медицинского приборостроения и обеспечения национальной технологической суверенности.

Научная новизна диссертационного исследования

В диссертационной работе получены оригинальные научные результаты, позволяющие говорить о существенном продвижении в области роботизированной биопечати и регенеративной медицины. Научная новизна исследования заключается в следующем:

- разработка нового алгоритма сканирования, учитывающего отражающую способность биологических тканей;
- создание алгоритма расчёта траектории шарнирного манипулятора с мехатронным дозатором для глубоких раневых дефектов сложной формы;
- предложен метод определения параметров печати на основе компьютерного моделирования процесса сканирования поверхности с последующим нанесением гидрогеля;
- разработка принципов глубокой интеграции систем сканирования, планирования траектории и дозирования биоматериала
- экспериментальное доказательство эффективности разработанного

робототехнического комплекса для ускорения регенерации полнослойных дефектов кожи *in situ*.

Таким образом, результаты работы обладают высокой степенью оригинальности и открывают новые перспективы для развития методов интраоперационной биопечати и роботизированной хирургии.

Значимость для науки и производства полученных автором результатов

Полученные в работе результаты содержат новые знания в области создания робототехнических комплексов для интраоперационной биопечати, которые нашли свое воплощение в разработанном методе сканирования и послойного нанесения биоматериалов на раневые поверхности сложной геометрии.

Определенный интерес представляет подход автора, основанный на комплексном компьютерном моделировании процесса биопечати, который включает в себя моделирование сканирования поверхности с последующим нанесением гидрогеля с учетом конструктивных особенностей сканера и реологических свойств вязкого биоматериала для расчета оптимальных параметров печати. Существенным научным результатом является также разработка алгоритма заполнения сложных объемов, обеспечивающего формирование тканеинженерного конструкта, анатомически соответствующего здоровым тканям пациента.

Разработанные алгоритмы сканирования и планирования траектории являются универсальным инструментом для систем медицинской робототехники, предназначенных для работы с биологическими тканями сложной топографии, и могут быть применены не только в биопечати, но и в других хирургических вмешательствах, требующих точного позиционирования инструмента.

Разработанное программное обеспечение, включающее среду компьютерного моделирования и средства визуализации процесса биопечати, может быть внедрено в клиническую практику в качестве системы поддержки принятия врачебных решений, а также интегрировано в учебный процесс для подготовки специалистов в области биомедицинской инженерии и биофабрикации.

Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертационной работы

Результаты работы автора использованы в ЧУ «3Д Биопринтинг Солюшенс» в рамках реализации проектов по разработке новых технологий в биофабрикации; в НИТУ «МИСИС» в учебном процессе магистерской программы «Биомедицинская инженерия и биофабрикация (ПИШ)» и программы дополнительного профессионального образования «Биофабрикация и методы анализа в тканевой инженерии»; в СамГМУ при внедрении промышленного образца печатающего устройства в клиническую практику.

Результаты работы могут быть востребованы в ведущих медицинских и научных центрах, осуществляющих внедрение передовых биотехнологий в клиническую практику: ФГБУ «ГВКГ им. Н.Н.Бурденко» Минобороны России, ФГБУ «НМИЦ травматологии и ортопедии им. Н.Н. Приорова», ФГБУ «НМИЦ онкологии им. Н.Н. Блохина» и других учреждениях, занимающихся лечением обширных повреждений кожи, последствий ожогов и травм.

Обоснованность и достоверность научных положений и выводов подтверждаются корректностью постановки цели и задач, выбранными методами исследования, использованием современного оборудования, валидированных протоколов и необходимого количества повторов.

Оценка содержания диссертации. Диссертационная работа А.А. Левина структурно состоит из введения, пяти основных глав, выводов, словаря терминов и списка литературы. Содержание работы является логически завершенным и последовательно раскрывает этапы решения поставленной научной задачи. Изложение материала аргументировано, сопровождается необходимым количеством иллюстраций, таблиц, формул и ссылок на литературные источники.

Введение содержит обоснование актуальности темы, анализ степени разработанности проблемы, четкую формулировку цели, задач, объекта и предмета исследования.

Первая глава представляет собой глубокий аналитический обзор современного состояния исследований в области робототехнических систем для биопечати и технологий 3D-сканирования.

Вторая глава посвящена разработке рабочего органа робототехнической системы – 3D-сканера и мехатронного дозатора. Содержание главы свидетельствует о глубокой проработке автором конструкторских и алгоритмических вопросов.

Третья глава является центральной с точки зрения программно-алгоритмического обеспечения комплекса. В ней последовательно решены ключевые задачи планирования траектории для биопечати на сложных криволинейных поверхностях.

Четвертая глава описывает комплексное компьютерное моделирование процесса биопечати. Автором разработана специализированная среда на C# с использованием OpenGL и OpenCV, которая интегрирует модели 3D-сканера (с учетом оптических искажений и шумов), поведения гидрогеля при экструзии и робототехнической системы.

Пятая глава содержит экспериментальные исследования, подтверждающие работоспособность разработанных решений. Описано изготовление лабораторных образцов на базе роботов KUKA и Rozum, разработан пользовательский интерфейс управления. Проведены испытания: проверка точности 3D-сканера в сравнении с коммерческим аналогом, печать на фантомах и, что наиболее важно, успешные эксперименты по биопечати полнослойных кожных дефектов у лабораторных животных. Полученные результаты доказывают, что разработанный комплекс обеспечивает воспроизводимое нанесение гидрогелевой конструкции с равномерной пористостью и способствует регенерации, близкой к нативной ткани.

Выводы логически вытекают из содержания работы и адекватно отражают достигнутые результаты. Словарь терминов способствует однозначному пониманию использованной специфической терминологии.

Замечания по диссертационной работе:

1. В разделе 2.4 предложен алгоритм вычитания кадров для фильтрации бликов, который требует статичности сцены. Как планируется адаптировать этот метод для клинической практики, где возможны микродвижения пациента (дыхание, пульсация сосудов)? Рассматривалась ли возможность использования поляризационных фильтров как более надежные решения?

2. В главе 3 представлены алгоритмы генерации траекторий, но отсутствуют количественные метрики сравнения с существующими методами (например, стандартными алгоритмами слайсеров). Можно ли предоставить сравнительный анализ по таким параметрам как: общее время печати, длина холостых ходов, равномерность распределения пор?

3. В разделе 2.14 упоминается проблема неточностей при 3D-печати корпуса дозатора. Были ли проведены исследования влияния этих неточностей на повторяемость дозирования? Почему не рассматривалось использование стандартных алюминиевых профилей или фрезерованных деталей для критичных к точности компонентов?

4. В экспериментах использовались роботы KUKA и Rozum. Приводились ли исследования по калибровке и компенсации упругих деформаций манипуляторов при разных скоростях движения? Как учитывалась динамическая ошибка позиционирования в алгоритмах проецирования траектории?

5. В разделе 5.5 указано, что заживление происходило за "стандартное время близкое с контролем". Однако для доказательства эффективности метода необходимы гистологические исследования и количественная оценка качества регенерации (например, содержание коллагена I/III типа, плотность сосудов). Планируются ли такие исследования?

6. В выводах рекомендованы параметры $w = 0.6$ мм и $k = 0.75$. На основании каких критериев оптимизации выбраны именно эти значения? Проводился ли DOE (Design of Experiments) для определения оптимальных параметров печати?

7. Как решается проблема стерилизации рабочего органа, особенно оптических компонентов сканера?

Приведенные замечания не влияют на общую положительную оценку диссертационного исследования.

Заключение

Оценивая выполненную работу, важно отметить, что по совокупности полученных результатов она является самостоятельным научным исследованием, в котором решена важная научно-практическая задача. Автореферат и публикации объективно отражают содержание диссертации.

Диссертация «Разработка робототехнического комплекса для интраоперационной 3D-биопечати эквивалентов мягких тканей» является законченной научно-квалификационной работой и соответствует требованиям Положения о порядке присуждения ученых степеней в Национальном исследовательском технологическом университете "МИСИС", а ее автору, Левину Александру Александровичу может быть присвоена ученая степень кандидата технических наук по специальности 1.1.10 – «Биомеханика и биоинженерия».

Отзыв о диссертационной работе обсужден и утвержден на заседании ученого совета Института БМС ФГАОУ ВО Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники» (протокол № 14 от 14.10.2025 г.)

Председатель,
д.ф.-м.н., профессор,
директор Института БМС



Селищев С.В.

Подпись Селищева С.В. подтверждаю
Ученый секретарь,
к.ф.-м.н., доцент,
доцент Института БМС



Савельев М.С.

Адрес: 124498, г. Москва, г. Зеленоград, площадь Шокина 1.
Тел.: 8(499) 731-44-41; E-mail: netadm@miee.ru Сайт: www.miet.ru