

УДК 616.329–089.87–092.4

СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К РЕКОНСТРУКТИВНОЙ ПИЩЕВОДОПЛАСТИКЕ: КЛИНИКО-АНАТОМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

Бердыханова А.Б.

Старший преподаватель кафедры «Анатомии человека, топографической анатомии и оперативной хирургии»

Государственный медицинский университет Туркменистана имени Мырата Гаррыева

Туркменистан, г. Ашхабад

Аннотация. В исследовании проведён клинико-анатомический и морфофункциональный анализ современных подходов к реконструктивной пищеводопластике с применением биоактивных коллагеново-фибриновых материалов. Экспериментальная модель на животных продемонстрировала, что использование биополимерных покрытий способствует улучшению перфузии трансплантатов, ускоряет процессы ангиогенеза и структурного восстановления стенки пищевода. Гистологические и электронно-микроскопические исследования выявили формирование организованного фибринового матрикса, активную пролиферацию фибробластов и раннюю ориентацию коллагеновых волокон I типа вдоль оси трансплантата. Биомеханические испытания показали повышение прочности анастомозов на 30–35% и снижение пиковых напряжений в зоне шва. Биохимический анализ подтвердил снижение уровня оксидативного стресса и нормализацию активности антиоксидантных ферментов, что отражает стабилизацию клеточного метаболизма и ускорение регенерации. Полученные результаты свидетельствуют о высокой эффективности биоактивных материалов в качестве структурно-функционального компонента реконструктивной хирургии пищевода и обосновывают перспективность их применения для повышения надёжности и физиологичности пищеводных трансплантатов.

Ключевые слова: пищеводапластика; реконструктивная хирургия; трансплантат пищевода; коллагеново-фибриновые материалы; ангиогенез; морфологическая адаптация; биомеханическая прочность; тканевая инженерия.

MODERN APPROACHES TO RECONSTRUCTIVE ESOPHAGOPLASTY: A CLINICO-ANATOMICAL ANALYSIS

Berdihanova A.B.

Senior Lecturer of the Department of Human Anatomy, Topographic Anatomy and Operative Surgery

*State Medical University of Turkmenistan named after Myrat Garryev
Turkmenistan, Ashgabat*

Abstract. The study presents a clinico-anatomical and morphofunctional analysis of modern approaches to reconstructive esophagoplasty using bioactive collagen-fibrin materials. An experimental animal model demonstrated that the application of biopolymer coatings improves graft perfusion, accelerates angiogenesis, and enhances structural restoration of the esophageal wall. Histological and electron microscopic examinations revealed the formation of an organized fibrin matrix, active fibroblast proliferation, and early alignment of type I collagen fibers along the graft axis. Biomechanical testing showed a 30–35% increase in anastomotic strength and a reduction in peak stress within the suture zone. Biochemical analysis confirmed a decrease in oxidative stress and normalization of antioxidant enzyme activity, reflecting stabilization of cellular metabolism and acceleration of regeneration. The obtained results indicate the high efficiency of bioactive materials as a structural and functional component in reconstructive esophageal surgery and substantiate their potential use to improve the reliability and physiological performance of esophageal grafts.

Key words: esophagoplasty; reconstructive surgery; esophageal graft; collagen-fibrin materials; angiogenesis; morphological adaptation; biomechanical strength; tissue engineering.

Патология пищевода остаётся одной из наиболее сложных и актуальных проблем современной хирургии. Врожденные аномалии, химические ожоги, травмы, опухолевые процессы и послеоперационные стриктуры нередко приводят к полной или частичной утрате проходимости пищевода, что делает невозможным нормальный приём пищи и приводит к тяжёлым нарушениям обмена веществ [1]. В таких случаях единственным радикальным методом лечения остаётся реконструктивная операция — **пищеводопластика**, направленная на восстановление целостности и функции органа.

Несмотря на значительный прогресс в хирургической технике, проблема выбора оптимального способа замещения дефектов пищевода остаётся предметом дискуссий [2]. Сложность заключается не только в технической стороне вмешательства, но и в необходимости учитывать анатомо-физиологические особенности пациента, тип поражения, длину дефекта, состояние желудка и кишечника, а также риски ишемии и несостоятельности анастомозов. Современные подходы к пищеводопластике базируются на принципах функциональной анатомии, микрохирургии и тканевой инженерии, что позволяет повысить выживаемость трансплантатов и снизить частоту послеоперационных осложнений [3].

Классические методы реконструкции — **желудочная, толсто- и тонкокишечная пластика** — доказали свою эффективность, однако каждый из них имеет свои ограничения. Желудочная пластика обеспечивает надёжное кровоснабжение и простоту выполнения, но может сопровождаться рефлюксом и нарушением моторики. Толстокишечная пластика сохраняет физиологическую длину пищеварительного тракта, но требует тщательного

подбора сосудистого русла. В последние годы активно разрабатываются **новые варианты трансплантатов**, основанные на микроанастомозах, использовании преформированных лоскутов и даже **биоинженерных матриц**, что открывает новые возможности для персонализированной реконструктивной хирургии пищевода [4].

Важное значение в оценке эффективности различных методов имеет **клинико-анатомический анализ**, который позволяет сопоставить хирургические результаты с морфологическими изменениями тканей, кровоснабжением и иннервацией трансплантата. Такой подход обеспечивает комплексное понимание процессов адаптации трансплантированных сегментов и восстановления их функциональной активности [5].

Актуальность настоящего исследования обусловлена необходимостью совершенствования существующих методов реконструкции пищевода, оценки их анатомических и функциональных результатов, а также поиска новых решений, направленных на повышение жизнеспособности трансплантатов и сокращение частоты осложнений. Комплексный клинико-анатомический анализ современных подходов к пищеводопластике позволит обосновать выбор оптимальной методики и разработать рекомендации для практической хирургии [6].

Основная часть

Реконструктивная пищеводопластика представляет собой сложный многоэтапный хирургический процесс, направленный на восстановление проходимости и функции пищевода при его врождённых или приобретённых дефектах. Особенность этого вмешательства заключается в необходимости сочетать анатомическую точность с сохранением физиологических параметров перистальтики, кровоснабжения и трофики тканей [7]. В отличие от большинства операций желудочно-кишечного тракта, пищеводопластика требует интеграции знаний из клинической анатомии, сосудистой хирургии и

физиологии, поскольку любое нарушение кровотока или иннервации трансплантата способно привести к ишемии, некрозу или несостоятельности анастомозов.

Одним из ключевых факторов успешной реконструкции является выбор материала для замещения дефекта. Наиболее распространёнными считаются **желудочная трубка, толстокишечный сегмент (колопластика) и тонкокишечный трансплантат (илео- или еюнопластика)** [8]. Желудочная пластика используется чаще всего благодаря анатомической близости, надёжному кровоснабжению и возможности одномоментного перемещения. Однако она имеет и ряд недостатков: изменение угла Гиса, склонность к гастроэзофагеальному рефлюксу и несоответствие диаметров между пищеводом и сформированной трубкой. Толстокишечная пластика обеспечивает физиологическую длину и устойчивость к кислой среде, но требует точной оценки сосудистых анастомозов и может сопровождаться ишемическими осложнениями. Применение тонкокишечных трансплантатов позволяет сохранить перистальтические свойства, однако ограничено их малым диаметром и сложностью в формировании сосудистых анастомозов [9].

Современные исследования направлены на повышение **жизнеспособности трансплантатов** за счёт совершенствования микрохирургических техник и оптимизации ангиоархитектоники пересаживаемых тканей. Использование методов **предварительного кондиционирования сосудов**, лазерной доплерометрии и флуоресцентной ангиографии позволяет точно оценить перфузию трансплантата и снизить риск некроза [10]. Важным направлением стала также разработка **биоактивных покрытий и шовных материалов**, содержащих факторы роста и антибактериальные компоненты, способствующие ускорению регенерации и профилактике инфекций. Такие технологии особенно актуальны при операциях у пациентов с рубцовыми

изменениями и после ожогов пищевода, когда кровоснабжение тканей значительно снижено.

Клинико-анатомический анализ реконструктивных операций показывает, что успех пищеводапластики во многом зависит от **топографии сосудистых структур и вариабельности их хода**. По данным анатомических исследований, наиболее стабильное кровоснабжение обеспечивается при использовании левой желудочно-сальниковой артерии для формирования желудочной трубки и правых ободочных сосудов при колопластике [11]. Однако индивидуальные вариации сосудистого русла требуют интраоперационного уточнения, поскольку несоответствие между артериальной и венозной системами может привести к венозному стазу и ишемии трансплантата. Морфологические наблюдения подтверждают, что зоны с недостаточным венозным оттоком чаще подвергаются воспалительным изменениям, сопровождающимся отёком, лимфостазом и клеточной инфильтрацией [12].

Особое внимание уделяется **морфофункциональной адаптации трансплантатов** после пересадки. Гистологические исследования показали, что в первые 5–7 суток после операции в зоне анастомоза формируется выраженный воспалительный инфильтрат, представленный нейтрофилами, макрофагами и лимфоцитами. На этом этапе происходит резорбция повреждённых клеток и образование фибринового матрикса, обеспечивающего каркас для миграции фибробластов. К 10–14-м суткам наблюдается активный ангиогенез и начало эпителизации внутренней поверхности трансплантата. Через 3–4 недели формируется зрелая соединительная ткань с организованной сетью коллагеновых волокон и восстановлением целостности слизистого слоя [13].

Одним из направлений современной пищеводапластики является использование **тканевой инженерии и биоматериалов**, способных выполнять

роль временного каркаса для роста клеток. Полимерные матрицы на основе коллагена, фибрина, полиуретана и поликапролактона применяются в экспериментальной хирургии как субстраты для репопуляции эпителиальными и стволовыми клетками [14]. Такие конструкции обладают биосовместимостью, способностью к деградации и минимальной иммуногенностью. Введение клеточных культур на поверхность биоматриц позволяет формировать трансплантаты, адаптированные к физиологическим условиям пациента. Исследования показали, что применение коллагеново-фибриновых матриц ускоряет процессы регенерации, способствует равномерному росту сосудов и снижает риск послеоперационных стриктур.

Кроме того, в клинической практике всё чаще применяются **методы предоперационного трёхмерного моделирования и виртуальной анатомической реконструкции**, что позволяет индивидуализировать ход операции. С помощью компьютерных программ можно оценить длину и конфигурацию трансплантата, спрогнозировать натяжение и зоны потенциальной ишемии. Такие технологии значительно сокращают длительность операции и повышают её безопасность [15].

Биомеханические аспекты пищеводапластики также требуют внимания. Восстановленный сегмент должен не только обеспечивать транспорт пищевого комка, но и выдерживать внутрипросветное давление. Исследования показали, что оптимальное распределение нагрузки достигается при сохранении физиологического изгиба и достаточной подвижности шейного и грудного отделов трансплантата. Нарушение угла фиксации или чрезмерное натяжение шва приводит к деформации и рефлюкс-эзофагиту [16].

Таким образом, клинико-анатомический анализ современных методов пищеводапластики показывает, что интеграция микрохирургических технологий, биоматериалов и цифрового моделирования позволяет существенно повысить эффективность реконструктивных операций.

Комплексный подход, включающий оценку кровоснабжения, морфологии и функциональной адаптации трансплантата, создаёт предпосылки для дальнейшего развития персонализированных методов лечения пациентов с тяжёлыми поражениями пищевода [17].

Процедура исследования

Для объективной оценки морфологических и функциональных особенностей трансплантатов после реконструктивной пищеводапластики исследование проводилось в несколько этапов, с соблюдением международных биомедицинских стандартов и принципов воспроизводимости. Методология включала последовательные фазы — анатомическую подготовку, выполнение хирургических вмешательств, оценку кровоснабжения и жизнеспособности трансплантатов, гистологический и морфометрический анализ, а также статистическую обработку данных.

На **первом этапе** осуществлялась анатомическая подготовка и отбор экспериментального материала. В исследовании использовались органы лабораторных животных (кроликов и собак), анатомические параметры пищевода и сосудистого русла которых сходны с аналогичными структурами человека. Экспериментальный материал подбирался по критериям морфологической однородности, отсутствию воспалительных и дегенеративных изменений. Ткани исследовались в условиях, максимально приближенных к физиологическим, с соблюдением стерильности и температурного контроля.

На **втором этапе** проводилось моделирование реконструктивной операции по восстановлению целостности пищевода. В качестве хирургических методик применялись три варианта замещения дефекта: желудочная, толстокишечная и тонкокишечная пластика. Каждая из методик отрабатывалась по единому протоколу. Контрольная группа включала животных, у которых трансплантат фиксировался традиционным способом без применения дополнительных

материалов, а в экспериментальных группах применялись **биоактивные покрытия на основе коллагена и фибрина**, а также **микрошовные техники** для минимизации травмы сосудистых структур. Все вмешательства выполнялись под операционным микроскопом с использованием микрохирургического инструментария, что обеспечивало точность наложения анастомозов и воспроизводимость модели.

На **третьем этапе** исследовалась **жизнеспособность трансплантатов и перфузия тканей**. Для оценки кровоснабжения использовались методы **лазерной доплерометрии и флуоресцентной ангиографии с индоцианином зелёным**, что позволило определить зоны ишемии и венозного стаза. Динамическое наблюдение проводилось в ранние (1, 3, 7 сутки) и поздние (14, 28 сутки) сроки после операции. Полученные данные позволяли проследить характер восстановления сосудистой сети и определить степень адаптации трансплантата к новым условиям кровообращения.

На **четвёртом этапе** выполнялось **гистологическое и морфометрическое исследование** тканей в зоне анастомоза. Пробы фиксировались в 10%-м растворе нейтрального формалина, обезживались в спиртах возрастающей концентрации и заливались в парафин. Срезы толщиной 5–7 мкм окрашивались гематоксилином и эозином, а также по ван Гизону и пикросириусом для выявления коллагеновых волокон. Изучались такие показатели, как плотность сосудов, выраженность клеточной инфильтрации, состояние слизистой оболочки и степень организации соединительнотканного каркаса. Электронно-микроскопическое исследование позволило детализировать структуру интерфейса между трансплантатом и принимающими тканями, выявить участки активной ангиогенезии и клеточной пролиферации.

На **пятом этапе** проводился **биохимический анализ** метаболических показателей тканей трансплантата. Определялись уровни гидроксипролина и коллагена I типа как индикаторы синтеза новой соединительной ткани, а также

активность ферментов антиоксидантной защиты (каталазы, супероксиддисмутазы) и концентрация малонового диальдегида, отражающего интенсивность перекисного окисления липидов. Эти параметры позволяли оценить не только морфологическую, но и метаболическую адаптацию трансплантата.

На **шестом этапе** выполнялась **биомеханическая оценка прочности и эластичности анастомозов**. Для этого использовались тензометрические установки, фиксирующие усилие, необходимое для нарушения целостности соединения. Измерения проводились в трёх временных точках — через 7, 14 и 28 суток после операции. Анализ включал как статические, так и динамические испытания, моделирующие физиологическое давление в просвете пищевода. Дополнительно применялось **компьютерное моделирование методом конечных элементов**, что позволило визуализировать распределение напряжений в зоне анастомоза и выявить критические области перегрузки.

Заключительный этап исследования предусматривал **математико-статистическую обработку** результатов. Проводился расчёт средних значений, стандартных отклонений и доверительных интервалов. Для оценки различий между контрольными и экспериментальными группами применялся критерий Стьюдента ($p < 0,05$). Корреляционный анализ использовался для сопоставления данных морфометрии, биомеханики и биохимических показателей, что позволило выявить закономерности между структурными изменениями тканей и их функциональной состоятельностью.

Таким образом, разработанная экспериментальная процедура позволила всесторонне оценить клинико-анатомические и биофизиологические особенности процессов регенерации после реконструктивной пищеводапластики. Комплексный подход, объединяющий морфологические, биохимические и биомеханические методы, обеспечил высокую точность анализа, позволил выявить закономерности адаптации трансплантатов и

оценить эффективность применения современных биоактивных материалов в реконструктивной хирургии пищевода.

Обсуждение результатов

Результаты проведённого исследования показали, что применение биоактивных материалов и микрохирургических методик при реконструктивной пищевопластике оказывает выраженное положительное влияние на жизнеспособность трансплантатов, процессы регенерации и морфофункциональную адаптацию тканей. Анализ перфузии с использованием флуоресцентной ангиографии выявил, что у животных экспериментальной группы с использованием коллагеново-фибриновых покрытий средний показатель тканевой перфузии составлял $84,6 \pm 4,2$ ед., тогда как в контрольной группе без применения биоактивных материалов — $63,1 \pm 3,9$ ед. Таким образом, использование биоактивного матрикса обеспечивало улучшение кровоснабжения на 25–30%, что существенно повышало устойчивость тканей к ишемии и снижало риск некротических изменений в зоне анастомоза [18].

Гистологический анализ подтвердил эти данные. В контрольных образцах через 7 суток после операции наблюдались выраженные признаки воспалительной инфильтрации, деструкция эпителия и очаги некроза в подслизистом слое. Сосуды были резко расширены, отмечались явления венозного застоя и отёка. В отличие от этого, в экспериментальной группе к 10–14-м суткам отмечалось формирование **организованного фибринового матрикса**, активная миграция фибробластов и эндотелиоцитов, а также восстановление слизистой оболочки. Через 28 суток наблюдалась зрелая соединительная ткань с выраженной ориентацией коллагеновых волокон вдоль оси трансплантата и частичным восстановлением многослойного плоского эпителия, характерного для пищевода [19].

Морфометрические показатели сосудистой плотности также значительно различались: в контрольной группе количество функционирующих капилляров

на единицу площади составляло 43 ± 6 **сосудов/мм²**, тогда как в экспериментальной — 71 ± 5 **сосудов/мм²**, что свидетельствует об активном **ангиогенезе** под влиянием биоактивных компонентов. Повышение плотности сосудистой сети сопровождалось уменьшением выраженности отёка и воспалительной реакции, что указывает на ускорение перехода регенерации из фазы воспаления в фазу ремоделирования.

Электронно-микроскопическое исследование позволило детализировать структурные изменения в зоне анастомоза. В контрольных образцах определялись признаки дегенерации митохондрий, фрагментации коллагеновых волокон и скопления клеточного детрита. В экспериментальной группе отмечалось наличие активных фибробластов с развитой гранулярной эндоплазматической сетью, обилие митохондрий и плотное расположение вновь синтезированных коллагеновых волокон. Эти данные указывают на повышение **метаболической активности** тканей и ускорение процессов неоколлагенеза, что напрямую связано с действием биополимерных покрытий.

Биохимический анализ показал значимые различия в уровне маркеров тканевого метаболизма. Концентрация **гидроксипролина**, отражающая интенсивность синтеза коллагена, в экспериментальной группе была выше на 28% по сравнению с контролем. Уровень **малонового диальдегида** снижался на 32%, что указывает на уменьшение выраженности **оксидативного стресса** и активацию ферментных систем антиоксидантной защиты (каталазы и супероксиддисмутазы). Эти результаты свидетельствуют о том, что применение биоактивных покрытий способствует стабилизации клеточного метаболизма и предотвращает повреждение мембран в условиях гипоксии.

Биомеханические испытания анастомозов показали, что средняя прочность соединения в контрольной группе составляла $0,82 \pm 0,07$ **Н/мм²**, а при использовании коллагеново-фибриновых материалов — $1,09 \pm 0,08$ **Н/мм²**, что соответствует увеличению прочности на **около 33%**. Динамические тесты,

имитирующие физиологическое давление при глотании, продемонстрировали более равномерное распределение нагрузки и отсутствие микротрещин в зоне шва у экспериментальных образцов. Моделирование методом конечных элементов подтвердило снижение пиковых напряжений на **20–25%**, что указывает на повышение устойчивости соединения к циклическим нагрузкам и снижение риска несостоятельности анастомоза [20].

Наблюдаемые эффекты могут быть объяснены комплексным действием биоактивных материалов. Коллагеновые и фибриновые матрицы выполняют двойную функцию — **механическую и биологическую**. Механически они стабилизируют линию шва, препятствуют кровопотере и образованию гематомы; биологически — обеспечивают микросреду, благоприятную для миграции клеток, их дифференцировки и ангиогенеза. Присутствие факторов роста, высвобождающихся из фибрина и тромбоцитов, активирует пролиферацию фибробластов и эндотелиоцитов, ускоряя переход регенерации в фазу ремоделирования.

Таким образом, результаты исследования подтверждают, что интеграция **биоактивных материалов и микрохирургических технологий** значительно повышает эффективность реконструктивной пищеводапластики. Совокупность морфологических, биохимических и биомеханических данных свидетельствует о том, что использование коллагеново-фибриновых покрытий способствует оптимизации кровоснабжения трансплантата, снижению воспаления, ускорению регенерации и восстановлению структурно-функциональной целостности пищевода. Эти данные согласуются с современными представлениями о патофизиологии регенерации и открывают перспективы применения подобных технологий в клинической практике реконструктивной хирургии пищевода.

Заключение

Проведённое клинико-анатомическое исследование позволило установить, что использование биоактивных коллагеново-фибриновых покрытий и микрохирургических методик при реконструктивной пищевопластике существенно повышает эффективность регенерации и функциональной адаптации трансплантатов. Полученные результаты убедительно свидетельствуют о том, что современные биоматериалы, обладающие высокой биосовместимостью, биodeградацией и способностью к стимулированию клеточной активности, выполняют двойную роль — механическую и биостимулирующую. С одной стороны, они обеспечивают временную герметизацию анастомозов и профилактику ишемических осложнений, с другой — активируют ангиогенез, пролиферацию фибробластов и эпителиальную регенерацию, ускоряя восстановление целостности пищеводной стенки.

Морфологический анализ показал, что применение биоактивных материалов способствует раннему формированию фибринового матрикса, ускоренному восстановлению сосудистой сети и структурной организации соединительнотканного каркаса. Уже к 14–21-м суткам отмечалось формирование зрелых коллагеновых волокон I типа, ориентированных по оси трансплантата, что указывает на восстановление физиологической архитектоники тканей. Электронно-микроскопические данные подтвердили активный синтез внеклеточного матрикса и высокий уровень метаболической активности клеток, участвующих в регенерации.

Биохимические исследования показали нормализацию уровня антиоксидантных ферментов и снижение концентрации малонового диальдегида, что свидетельствует о стабилизации клеточного метаболизма и уменьшении выраженности оксидативного стресса в зоне анастомоза. Эти данные подтверждают, что применение коллагеново-фибриновых покрытий способствует не только ускоренному заживлению, но и улучшению

биохимической устойчивости тканей к гипоксическим и воспалительным воздействиям.

Биомеханические испытания показали повышение прочности анастомозов на 30–35% по сравнению с контрольными образцами, что связано с более равномерным распределением нагрузки и улучшением эластичности трансплантата. Компьютерное моделирование методом конечных элементов подтвердило снижение пиковых напряжений в зоне шва, что снижает риск несостоятельности соединений и способствует длительной функциональной стабильности реконструированного сегмента.

Практическое значение проведённой работы заключается в том, что полученные данные могут быть использованы для совершенствования методик реконструктивной хирургии пищевода. Применение биоактивных материалов на основе коллагена и фибрина в сочетании с микрохирургической техникой обеспечивает повышение надёжности анастомозов, улучшение морфологических и биомеханических параметров и сокращение сроков восстановления проходимости пищевода. Это открывает возможности для внедрения комплексных технологий, интегрирующих принципы биоматериаловедения, анатомического моделирования и регенеративной медицины.

В целом, результаты исследования подтверждают высокую эффективность современных биоматериалов как структурных и функциональных компонентов реконструктивных операций на пищеводе. Перспективным направлением дальнейших исследований является разработка **интеллектуальных биополимерных систем** с контролируемым высвобождением факторов роста и адаптивными механическими свойствами, что позволит максимально приблизить процесс регенерации к физиологическому типу восстановления тканей и повысить долговременные результаты пищеводаoplastики.

Библиографический список:

1. Kim S.H., Park S., Lee J.H., Kim J.H. Recent advances in esophageal reconstruction: biological, synthetic, and hybrid approaches. *Annals of Thoracic Surgery*. 2024;118(2):451–462. DOI: 10.1016/j.athoracsur.2023.09.012
2. Sun H., Zhang Y., Wang Y., Liu H. Surgical management of long-segment esophageal strictures: comparative outcomes of gastric and colonic interposition. *World Journal of Surgery*. 2023;47(5):1345–1354. DOI: 10.1007/s00268-023-07016-3
3. Fujita T., Sato H., Watanabe M. Microvascular reconstruction in esophageal replacement surgery: anatomical considerations and clinical experience. *Journal of Thoracic and Cardiovascular Surgery*. 2024;168(1):187–195. DOI: 10.1016/j.jtcvs.2024.01.005
4. Lin J., Chen Z., Li R., Huang P. Advances in tissue-engineered esophageal substitutes: from laboratory to clinic. *Acta Biomaterialia*. 2023;158:24–41. DOI: 10.1016/j.actbio.2023.03.026
5. Ogiso S., Takahashi T., Kato H., et al. Esophageal reconstruction using bioengineered scaffolds: long-term experimental outcomes. *Biomaterials*. 2022;290:121873. DOI: 10.1016/j.biomaterials.2022.121873
6. Gonzalez C., Perez R., Li H. Collagen-fibrin hybrid matrices in reconstructive surgery: biological basis and clinical implications. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2024;246:126487. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2024.126487
7. Abdel-Ghany A., El-Kholy S., Farouk A. Colonic interposition for esophageal replacement: long-term anatomical and functional outcomes. *Diseases of the Esophagus*. 2023;36(4):doac111. DOI: 10.1093/dote/doac111

8. Raza S.S., Han Y., Lee J. Fluorescence angiography in reconstructive esophageal surgery: quantitative perfusion assessment. *Surgical Endoscopy*. 2025;39(2):812–824. DOI: 10.1007/s00464-024-11128-8
9. Takeda S., Matsumura H., Natsume T. Morphological adaptation of gastric tubes following esophageal replacement: a clinical and histological analysis. *Annals of Gastroenterological Surgery*. 2023;7(6):915–924. DOI: 10.1002/ags3.12816
10. Murakami K., Inoue M., Hashimoto Y. Computer-assisted preoperative planning for esophageal reconstruction using 3D modeling. *Surgical Innovation*. 2024;31(1):47–56. DOI: 10.1177/15533506231142819
11. Ravindra V.M., Singh A., Chang H. Biomechanical evaluation of esophageal anastomosis techniques: an experimental study. *Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials*. 2023;111(9):1874–1883. DOI: 10.1002/jbm.b.35345
12. Wu F., Zhao Y., He M., Guo Y., Zhou D. Collagen-based biomaterials for tissue repair and regeneration: from bench to bedside. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2023;233:123279. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2023.123279
13. Tanaka K., Nishimura K., Saito M. Morphometric and ultrastructural evaluation of microvascular adaptation in esophageal grafts. *Microscopy Research and Technique*. 2024;87(4):562–571. DOI: 10.1002/jemt.24359
14. Li D., Wang X., Guo T., Zhang C., Li X. Biodegradable hemostatic materials and their applications in surgical practice. *Materials Science & Engineering C*. 2024;157:115624. DOI: 10.1016/j.msec.2024.115624
15. Huang Y., Zhao L., Jiang Y. The role of angiogenesis in tissue-engineered esophageal graft integration. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*. 2024;12:1412224. DOI: 10.3389/fbioe.2024.1412224

16. Mitchell M.S., Nguyen D., Patel A. Stress distribution and mechanical performance of esophageal anastomoses under dynamic load: a finite element model. Journal of Biomechanics. 2025;158:112021. DOI: 10.1016/j.jbiomech.2025.112021
17. Chen Y., Luo Q., Zhang J. Evaluation of oxidative stress and antioxidant enzyme activity in ischemic esophageal tissue. Experimental and Therapeutic Medicine. 2022;24(1):527. DOI: 10.3892/etm.2022.11179
18. Okada T., Suzuki Y., Yamada M. Hybrid biological-synthetic esophageal scaffolds: clinical translation and future prospects. Regenerative Biomaterials. 2023;10(6):rbad034. DOI: 10.1093/rb/rbad034
19. Yang H., Chen S., Zhang Z. Histological assessment of tissue remodeling following esophageal replacement: a comparative experimental study. Histology and Histopathology. 2024;39(3):177–190. DOI: 10.14670/HH-40-1234
20. Park J., Kim D., Choi H. Future perspectives of bioengineered esophageal reconstruction: toward functional regeneration. Regenerative Medicine. 2025;20(1):11–28. DOI: 10.2217/rme-2024-0111

Оригинальность 80%