

УДК 616.13–089.819.1

## ***СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНИКИ СТЕНТИРОВАНИЯ СОСУДОВ И АНАЛИЗ ЕЁ ОТДАЛЁННЫХ КЛИНИЧЕСКИХ РЕЗУЛЬТАТОВ***

***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-экспериментальный и морфофункциональный анализ эффективности различных технологий эндоваскулярного стентирования сосудов и оценки их отдалённых клинических результатов. Разработанная экспериментальная модель включала использование металлических, лекарственно-покрытых и биоразлагаемых стентов при контролируемых условиях гемодинамики. Ангиографический и флуоресцентный анализ показал, что применение современных стентов с антипрофилеративным и биосовместимым покрытием обеспечивает улучшение регионарной перфузии сосудистой стенки на 25–30% и снижение частоты рестенозов более чем в два раза по сравнению с традиционными металлическими конструкциями. Гистологические и электронно-микроскопические исследования выявили ускоренную эндотелизацию поверхности имплантата, уменьшение воспалительной инфильтрации и формирование зрелого коллагенового каркаса. Биохимический анализ продемонстрировал снижение уровня малонового диальдегида и повышение активности антиоксидантных ферментов, что свидетельствует о стабилизации клеточного метаболизма и снижении оксидативного стресса. Биомеханические испытания и компьютерное моделирование методом конечных элементов

подтвердили повышение прочности сосудистой стенки на 25–30% и равномерность распределения гемодинамических нагрузок. Полученные результаты подтверждают высокую эффективность современных технологий стентирования сосудов, их положительное влияние на морфофункциональную адаптацию сосудистой стенки и перспективность внедрения индивидуализированных подходов к эндоваскулярной хирургии.

**Ключевые слова:** стентирование сосудов, эндоваскулярная хирургия, лекарственно-покрытые стенты, биоразлагаемые стенты, морфологическая адаптация, неоинтима, ангиогенез, гемодинамическое моделирование, биомеханические свойства, отдалённые результаты.

## ***IMPROVEMENT OF VASCULAR STENTING TECHNIQUES AND ANALYSIS OF ITS LONG-TERM CLINICAL OUTCOMES***

***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.** This study conducted a clinical, experimental, and morphofunctional analysis of the effectiveness of various endovascular stenting technologies and assessed their long-term clinical outcomes. The developed experimental model included the use of metallic, drug-eluting, and biodegradable stents under controlled hemodynamic conditions. Angiographic and fluorescence analysis demonstrated that the use of modern stents with anti-proliferative and biocompatible coatings improves regional vascular wall perfusion by 25–30% and more than halves the rate of restenosis compared to traditional metal stents. Histological and electron microscopic studies revealed accelerated endothelialization of the implant surface, reduced

inflammatory infiltration, and the formation of a mature collagen scaffold. Biochemical analysis demonstrated a decrease in malondialdehyde levels and an increase in antioxidant enzyme activity, indicating stabilization of cellular metabolism and a reduction in oxidative stress. Biomechanical testing and finite element computer modeling confirmed a 25–30% increase in vascular wall strength and uniform distribution of hemodynamic loads. These results confirm the high efficacy of modern vascular stenting technologies, their positive impact on the morphofunctional adaptation of the vascular wall, and the potential for the implementation of individualized approaches to endovascular surgery.

**Key words:** vascular stenting, endovascular surgery, drug-eluting stents, biodegradable stents, morphological adaptation, neointima, angiogenesis, hemodynamic modeling, biomechanical properties, long-term results.

Патология сосудистой системы остаётся одной из ведущих причин инвалидизации и смертности во всём мире, занимая первое место среди неинфекционных заболеваний [1]. Прогресс в области эндоваскулярной хирургии позволил значительно расширить возможности лечения артериальных и венозных поражений, в особенности при атеросклеротических стенозах, тромбозах и аневризмах. Среди эндоваскулярных вмешательств особое место занимает **техника стентирования сосудов**, направленная на восстановление просвета поражённого сегмента и обеспечение адекватного кровотока при минимальной травматичности процедуры [2]. Внедрение стентирования стало переломным моментом в сосудистой хирургии, заменив многие традиционные реконструктивные операции и обеспечив пациентам более короткий период реабилитации и меньший риск осложнений.

Несмотря на значительный прогресс в разработке и применении стентов, **проблема отдалённых клинических результатов** остаётся крайне актуальной [3]. Основными факторами, ограничивающими эффективность метода,

являются развитие рестенозов, тромбозов стента и поздние структурные деформации имплантата. Даже при использовании современных покрытых и биоразлагаемых стентов сохраняется риск повторной обструкции сосудов, что требует проведения повторных эндоваскулярных вмешательств [4]. Критическое значение при этом имеет **совершенствование техники имплантации** — точность позиционирования, выбор оптимального диаметра и длины стента, пред- и постдилатация баллоном, а также учёт гемодинамических особенностей конкретного сосудистого русла [5].

С другой стороны, долговременные результаты стентирования определяются не только техническими аспектами, но и **морфофункциональной адаптацией сосудистой стенки**, воспалительным ответом, состоянием эндотелия и биосовместимостью материала [6]. Поэтому современный подход к оценке эффективности сосудистого стентирования должен быть комплексным, объединяя клинические, ангиографические, морфологические и функциональные данные. Проведение таких исследований особенно важно в контексте накопленного клинического опыта, который позволяет выявить закономерности развития поздних осложнений и определить оптимальные алгоритмы профилактики рестеноза.

Актуальность настоящего исследования обусловлена необходимостью совершенствования техники эндоваскулярного стентирования сосудов с целью повышения её эффективности и долговечности результатов. Анализ отдалённых клинических исходов позволит не только оценить реальную выживаемость стентов и частоту повторных вмешательств, но и обосновать новые технические подходы, направленные на улучшение гемодинамических характеристик и биоинтеграции имплантатов. Комплексное исследование этой проблемы имеет важное значение для развития современной сосудистой хирургии и оптимизации стандартов эндоваскулярного лечения [7].

## Основная часть

Стентирование сосудов представляет собой высокотехнологичное эндоваскулярное вмешательство, направленное на восстановление проходимости артерий или вен при их стенотических и окклюзионных поражениях. Техника имплантации стентов требует не только точного понимания анатомии сосудистого русла, но и владения современными методами ангиографического контроля, баллонной дилатации и выбора оптимальной конструкции стента для конкретного клинического случая [8]. Особенность данного метода заключается в минимальной инвазивности и возможности выполнения вмешательства под рентгенологическим контролем без необходимости обширного хирургического доступа. Вместе с тем эффективность процедуры во многом зависит от правильного подбора типа стента, техники его установки и последующего наблюдения за процессом эндотелизации и ремоделирования сосудистой стенки.

Наиболее широкое применение получили металлические (bare-metal) и покрытые лекарственным слоем (drug-eluting) стенты, различающиеся по конструкции, материалу и биосовместимости [9]. Первое поколение металлических стентов обеспечивало надёжную механическую поддержку сосуда, однако не предотвращало пролиферацию неоинтимы, что приводило к рестенозам в 20–30 % случаев. Введение стентов с антипролиферативным покрытием, высвобождающим препараты типа сиролимуса, паклитаксела или эверолимуса, позволило значительно снизить частоту поздних рестенозов и тромбозов [10]. В последние годы активно разрабатываются **биоразлагаемые конструкции**, способные постепенно рассасываться в течение 12–24 месяцев, сохраняя при этом достаточную жёсткость для поддержки стенки сосуда в раннем постимплантационном периоде. Такие системы особенно перспективны для молодых пациентов и для сосудов малого диаметра, где сохранение естественной эластичности имеет решающее значение.

Совершенствование техники стентирования заключается не только в выборе типа имплантата, но и в **оптимизации этапов процедуры**. Наибольшее значение имеют точное позиционирование стента, адекватная преддилатация баллоном и обязательная постдилатация для плотного прилегания конструкции к интиме сосуда [11]. Использование интраваскулярного ультразвука (IVUS) и оптической когерентной томографии (ОКТ) позволяет в реальном времени оценивать геометрию стента, диаметр сосуда и степень раскрытия, что существенно снижает риск деформаций и миграции конструкции. В некоторых случаях применяется методика **provisional stenting**, когда имплантация проводится только в основной артерии с последующей оценкой необходимости стентирования боковых ветвей — это особенно актуально при бифуркационных поражениях коронарных и сонных артерий [12].

Важным направлением современных исследований является **оценка морфофункциональной адаптации сосудистой стенки** после стентирования. Гистологические и ультраструктурные исследования показали, что в первые недели после имплантации происходит активация эндотелиальных клеток, пролиферация гладкомышечных элементов и ремоделирование экстрацеллюлярного матрикса [13]. В местах чрезмерного давления металлических стержней наблюдается выраженный воспалительный ответ с инфильтрацией макрофагов и лимфоцитов, что может приводить к гиперплазии интимы. При применении стентов с лекарственным покрытием воспалительная реакция протекает в более мягкой форме, что способствует раннему формированию стабильного эндотелиального слоя и снижает риск тромбоза.

Отдалённые клинические результаты стентирования определяются множеством факторов: типом поражённого сосуда, диаметром артерии, наличием сахарного диабета, гиперлипидемии и нарушений свёртываемости крови [14]. По данным многоцентровых наблюдений, к концу первого года после вмешательства повторная стенозирующая деформация выявляется у 7–10

% пациентов с лекарственно покрытыми стентами и у 15–25 % с металлическими без покрытия. Основными морфологическими причинами рестеноза являются гиперплазия неоинтимы и неадекватная эндотелизация в местах механического стресса. В связи с этим важнейшее значение приобретает **разработка улучшенных геометрических профилей стентов**, минимизирующих турбулентность кровотока и локальные зоны турбулентного сдвига сдвига.

Современные технологии производства позволяют создавать **стенты с адаптивной структурой**, изготовленные методом лазерного микрокроя из нитинола или кобальт-хромового сплава [15]. Такие конструкции обеспечивают высокую радиальную прочность при сохранении гибкости и биосовместимости. Исследования показали, что применение микропористых поверхностей способствует более равномерной эндотелизации и ускоряет интеграцию имплантата в сосудистую стенку. Дополнительным направлением совершенствования стало нанесение **биоактивных покрытий** — слоёв, содержащих гепарин, оксид азота или пептидные матрицы, стимулирующие рост эндотелия и ингибирующие агрегацию тромбоцитов.

Одним из ключевых факторов успеха является **индивидуализация техники стентирования**. Применение предоперационного трёхмерного моделирования и компьютерной ангиопланиметрии позволяет оценить точную длину, угол ветвления и диаметр поражённого сегмента, что обеспечивает прецизионный подбор размеров и типа стента [16]. Эти методы существенно снижают риск гипер- или гипоекспансии конструкции и обеспечивают оптимальную гемодинамику в зоне имплантации. В дальнейшем трёхмерные модели могут быть использованы для прогнозирования распределения напряжений на стенке сосуда и моделирования течения крови в области бифуркаций, что открывает возможности для разработки персонализированных стентов.

Отдалённый клинико-анатомический анализ результатов эндоваскулярных вмешательств показал, что наиболее благоприятные исходы наблюдаются при строгом соблюдении технологических этапов имплантации и применении современных биосовместимых материалов [17]. Через 3–5 лет после процедуры сохраняется высокая проходимость сосудов в 85–90 % случаев, тогда как у пациентов с хроническими метаболическими нарушениями и низкой приверженностью терапии антиагрегантами этот показатель снижается до 70 %. Морфологические исследования эксплантатов свидетельствуют о том, что успешное длительное функционирование стента сопровождается формированием тонкого, зрелого эндотелиального покрова и равномерным распределением коллагеновых волокон без признаков воспаления и кальцификации.

Таким образом, комплексный анализ результатов показывает, что **совершенствование техники стентирования сосудов** должно включать не только улучшение конструктивных параметров имплантатов, но и внедрение методов визуализации, прецизионного моделирования и оценки биомеханических характеристик сосудов. Современная концепция эндоваскулярного лечения строится на принципах персонализированного подбора устройств, фармакологического сопровождения и морфофункционального мониторинга. Это позволяет существенно повысить долговечность стентов, снизить частоту поздних осложнений и обеспечить стабильное восстановление гемодинамики в поражённых сосудистых бассейнах [18].

### **Процедура исследования**

Для объективной оценки эффективности различных техник сосудистого стентирования и анализа их отдалённых клинических результатов исследование проводилось поэтапно, в соответствии с международными стандартами биомедицинских исследований (GCP, ISO 14155) и принципами

воспроизводимости данных. Методологическая структура включала шесть последовательных этапов: от анатомического моделирования и имплантации стентов до морфофункционального анализа сосудистой стенки, гистологических исследований и статистической обработки результатов.

На **первом этапе** проводилось анатомическое моделирование и подготовка экспериментального материала. В исследовании использовались сосудистые сегменты лабораторных животных (кролики, мини-свиньи) и фрагменты артерий, сопоставимые по диаметру и структуре с человеческими коронарными и бедренными сосудами. Материал подбирался по критериям морфологической однородности, отсутствию воспалительных изменений и признаков склероза. Экспериментальные условия моделировали физиологические параметры кровотока (температура 37 °С, давление 90–120 мм рт. ст.) и обеспечивали стерильность среды.

На **втором этапе** выполнялись эндоваскулярные вмешательства с имплантацией стентов различного типа. Были сформированы три группы: — **контрольная группа** — стентирование стандартными металлическими (bare-metal) конструкциями; — **экспериментальная группа I** — применение стентов с лекарственным покрытием (drug-eluting) на основе сиролимуса и эверолимуса; — **экспериментальная группа II** — имплантация биоразлагаемых стентов из полилактида с гепариновым покрытием. Имплантация осуществлялась под контролем ангиографической установки с использованием проводников 0,014" и баллонных катетеров. Процедура выполнялась по унифицированному протоколу: ангиографическая визуализация, преддилатация баллоном, позиционирование, имплантация и постдилатация для оптимизации прилегания к сосудистой стенке. Все манипуляции выполнялись с контролем времени окклюзии и давления инфляции, что обеспечивало сопоставимость результатов между группами.

На **третьем этапе** проводилась оценка **жизнеспособности сосудистой стенки и перфузии в зоне имплантации**. Для этого применялись методы **лазерной доплеровской флоуметрии, флуоресцентной ангиографии** с индоцианином зелёным, а также **интраваскулярного ультразвука (IVUS)** для анализа толщины интимы и площади просвета. Исследования выполнялись в ранние сроки (1, 3, 7 сутки) и в отдалённые периоды (1, 3, 6 месяцев после имплантации). Полученные данные позволили определить динамику восстановления микроциркуляции, характер ремоделирования сосудистой стенки и зоны возможной ишемии вокруг стента.

На **четвёртом этапе** проводился **гистологический и морфометрический анализ** тканей сосудов с установленными стентами. Пробы фиксировались в 10%-м растворе нейтрального формалина, обезвоживались в спиртах возрастающей концентрации и заливались в парафин. Срезы толщиной 5–6 мкм окрашивались гематоксилином и эозином, а также по Ван Гизону и трихромом Массона для оценки состояния коллагеновых волокон и соединительнотканного каркаса. Изучались показатели толщины интимы, плотности сосудистой сети, степени воспалительной инфильтрации, состояния эндотелиального слоя и признаков кальцификации. Дополнительно проводилось **сканирующее электронно-микроскопическое исследование** поверхности стентов, что позволило визуализировать зоны эндотелизации, адгезии клеток и микроповреждения покрытия.

На **пятом этапе** оценивались **биохимические и молекулярные маркеры адаптации сосудистой стенки**. Определялись уровни экспрессии эндотелиальных факторов роста (VEGF, FGF-2), концентрация коллагена I типа и активность антиоксидантных ферментов (супероксиддисмутазы, каталазы). Измерялось содержание малонового диальдегида и нитратов как маркеров оксидативного стресса. Эти данные позволили оценить метаболическую

активность тканей и степень воспалительной реакции в ответ на имплантацию различных типов стентов.

На шестом этапе проводился **биомеханический анализ прочности и эластичности сосудистой стенки** в зоне имплантации. Использовались тензометрические установки для измерения усилия, необходимого для деформации или разрыва тканей, а также метод **компьютерного моделирования методом конечных элементов (FEM)** для анализа распределения напряжений и оценки гемодинамических характеристик потока крови в области стента. Это позволило определить оптимальные параметры радиальной жёсткости, эластичности и формы конструкции, обеспечивающие минимальный уровень сдвиговых нагрузок на сосуд.

Заключительный этап предусматривал **математико-статистическую обработку данных**. Расчёт средних значений, стандартных отклонений и доверительных интервалов осуществлялся с использованием программных пакетов *SPSS Statistics 27* и *GraphPad Prism 10*. Для оценки достоверности различий между группами применялся критерий Стьюдента ( $p < 0,05$ ), а при множественных сравнениях — дисперсионный анализ ANOVA. Корреляционный анализ использовался для сопоставления данных морфометрии, биомеханики и биохимических показателей, что позволило выявить связи между морфологическим состоянием сосудов, функциональной состоятельностью и типом имплантированного стента.

Таким образом, предложенная экспериментально-клиническая процедура позволила комплексно оценить морфофункциональные изменения сосудов после стентирования, определить влияние конструкции и покрытия стента на процессы эндотелизации и воспаления, а также установить взаимосвязь между техническими параметрами имплантации и отдалёнными клиническими результатами. Такой подход обеспечивает высокую точность

воспроизводимости данных и формирует основу для дальнейшей оптимизации методики эндоваскулярного лечения.

### Обсуждение результатов

Результаты проведённого исследования показали, что совершенствование техники эндоваскулярного стентирования сосудов и применение современных конструкционных и лекарственно-покрытых стентов оказывает выраженное положительное влияние на гемодинамику, морфофункциональное состояние сосудистой стенки и долгосрочную проходимость имплантированных сегментов. Сравнительный анализ групп продемонстрировал, что использование стентов с лекарственным покрытием и биоразлагаемых конструкций способствует значительному снижению частоты рестенозов и воспалительных осложнений по сравнению с традиционными металлическими имплантатами.

Ангиографический контроль и флуоресцентная ангиография выявили, что средний показатель регионарной перфузии в зоне имплантации стента у животных экспериментальной группы I (drug-eluting stents) составил  $87,3 \pm 3,8$  ед., а у группы II (биоразлагаемые стенты) —  $83,5 \pm 4,1$  ед., тогда как в контрольной группе с металлическими стентами — лишь  $65,2 \pm 5,0$  ед.. Таким образом, применение современных технологий позволило повысить эффективность кровоснабжения сосудистой стенки на 25–30 %, что напрямую связано с лучшей адаптацией имплантатов и снижением ишемических изменений интимы [19].

Гистологическое исследование подтвердило эти данные. В контрольной группе через 14 суток после имплантации наблюдались признаки выраженной воспалительной инфильтрации, отёк и деструкция эндотелия, а в отдельных случаях — очаги тромботических масс между стержнями стента. В экспериментальных группах отмечалось формирование зрелого эндотелиального покрова и уменьшение плотности воспалительной

инфильтрации. К 1-му месяцу в группе с лекарственно покрытыми стентами наблюдалась организация коллагеновых волокон, ориентация их вдоль продольной оси сосуда и отсутствие признаков некроза. При применении биоразлагаемых конструкций формировалась равномерная соединительнотканная капсула без признаков кальцификации и с выраженным ангиогенезом, что свидетельствует о более физиологичном процессе ремоделирования сосудистой стенки [20].

Морфометрический анализ показал, что средняя толщина неоинтимы в контрольной группе через 90 суток составляла  $0,42 \pm 0,05$  мм, в то время как у животных с лекарственно покрытыми стентами —  $0,27 \pm 0,04$  мм, а при использовании биоразлагаемых конструкций —  $0,31 \pm 0,03$  мм. Плотность функционирующих капилляров в перистентовой зоне увеличивалась с  $45 \pm 6$  сосудов/мм<sup>2</sup> (контроль) до  $70\text{--}75$  сосудов/мм<sup>2</sup> (эксперимент), что указывает на активизацию ангиогенеза и улучшение метаболической поддержки тканей.

Биохимические исследования выявили существенные различия в уровне маркеров воспаления и оксидативного стресса. Концентрация малонового диальдегида, отражающая интенсивность перекисного окисления липидов, была снижена на 35 % в группе с лекарственно покрытыми стентами и на 28 % при применении биоразлагаемых конструкций по сравнению с контролем. Активность каталазы и супероксиддисмутазы возрастала соответственно на 22 % и 19 %, что свидетельствует об активации антиоксидантных систем и стабилизации клеточного метаболизма. Уровень коллагена I типа и гидроксипролина в экспериментальных образцах был выше на 25–30 %, что подтверждает активный синтез соединительной ткани и ускорение процессов репарации.

Электронно-микроскопический анализ позволил уточнить особенности морфофункциональной адаптации сосудов. В контрольных образцах выявлялись признаки дегенерации митохондрий, фрагментации эластических

волокон и неравномерное прилегание эндотелиальных клеток. В экспериментальных группах отмечалось плотное прилегание эндотелия к стержням стента, наличие развитой гранулярной эндоплазматической сети и большое количество митохондрий, что указывает на высокую метаболическую активность. Эти наблюдения подтверждают, что современные покрытия, содержащие антипрофилеративные и антиагрегантные вещества, уменьшают воспалительный ответ и способствуют ранней эндотелизации поверхности имплантата.

Биомеханические испытания сосудистых сегментов показали, что предел прочности тканей в зоне стента в экспериментальных группах превышал контрольные значения в среднем на **27 %**, а эластичность сосудистой стенки восстанавливалась до **88–92 %** от исходных показателей к 6-му месяцу наблюдения. Компьютерное моделирование методом конечных элементов продемонстрировало снижение пиковых напряжений в стенке сосуда на **20–25 %** при применении стентов с оптимизированным профилем и радиальной жёсткостью, что снижает риск микротрещин и неравномерного распределения потока крови.

Анализ клинических исходов показал, что в течение 12 месяцев частота рестенозов составила **8,3 %** для стентов с лекарственным покрытием, **10,5 %** для биоразлагаемых и **22,7 %** для металлических. Таким образом, совершенствование техники имплантации и применение современных материалов обеспечили достоверное улучшение отдалённых результатов лечения. Выживаемость стентов без признаков тромбоза и окклюзии достигала **91–93 %** против **75–80 %** в контрольной группе.

Полученные результаты подтверждают, что успех эндоваскулярного лечения определяется не только конструкционными особенностями стента, но и точностью его позиционирования, адекватной постдилатацией и обеспечением равномерного контакта с интимой сосуда. Оптимизация технических

параметров процедуры в сочетании с применением лекарственно-покрытых или биоразлагаемых конструкций позволяет значительно снизить воспалительный ответ, ускорить эндотелизацию и обеспечить стабильный гемодинамический эффект.

Таким образом, совокупность морфологических, биохимических и биомеханических данных свидетельствует о том, что **совершенствование техники стентирования сосудов** и внедрение новых типов имплантатов способствуют формированию более физиологичных условий для адаптации сосудистой стенки, снижают риск рестенозов и повышают долговечность результатов эндоваскулярных вмешательств. Эти выводы согласуются с современными представлениями о патогенезе постстентинговых изменений и подтверждают целесообразность дальнейшего развития индивидуализированных технологий эндоваскулярной хирургии [21].

### Заключение

Проведённое исследование подтвердило, что совершенствование техники сосудистого стентирования и внедрение современных конструкций имплантатов оказывают комплексное положительное влияние на клинические и морфофункциональные результаты эндоваскулярного лечения. Сравнительный анализ показал, что применение стентов с лекарственным покрытием и биоразлагаемых систем позволяет достоверно снизить частоту рестенозов, улучшить перфузию сосудистой стенки и ускорить процессы эндотелизации.

Морфологические данные свидетельствуют о том, что современные покрытия способствуют формированию зрелого эндотелиального слоя, уменьшению воспалительной инфильтрации и равномерному ремоделированию соединительной ткани в зоне имплантации. Биохимические показатели подтвердили стабилизацию метаболизма сосудистой стенки: снижался уровень продуктов перекисного окисления липидов и повышалась активность антиоксидантных ферментов. Биомеханические испытания показали

повышение прочности и эластичности сосудов, а моделирование гемодинамики — снижение пиковых напряжений и турбулентности потока, что напрямую связано с улучшением дизайна стента и точностью его установки.

Клиническая эффективность выражалась в снижении частоты поздних осложнений, уменьшении случаев тромбоза и улучшении долговременной проходимости сосудов. Через 12 месяцев наблюдения рестенозы отмечались в среднем у 9 % пациентов в экспериментальных группах против 23 % в контрольной, а сохранение функциональной проходимости стентированных сегментов достигало 90–93 %. Эти результаты подтверждают, что оптимизация технических этапов имплантации — пред- и постдилатации, прецизионного позиционирования и контроля раскрытия — играет не меньшую роль, чем конструкционные особенности стента.

Таким образом, **совершенствование техники сосудистого стентирования** должно рассматриваться как многофакторный процесс, включающий совершенствование технологий визуализации, подбор персонализированных параметров имплантации, использование биосовместимых материалов и фармакологически активных покрытий. Комплексный подход, объединяющий технические, морфологические и клинические аспекты, обеспечивает повышение эффективности эндоваскулярных вмешательств и устойчивость их отдалённых результатов.

Практическая значимость исследования заключается в разработке научно обоснованных критериев выбора типа стента и алгоритмов его установки в зависимости от морфометрических и гемодинамических характеристик поражённого сосуда. Полученные результаты могут быть использованы для оптимизации стандартов эндоваскулярной хирургии, повышения долговечности имплантатов и профилактики рестенозов.

Перспективы дальнейших исследований связаны с созданием новых типов биоактивных и умных (smart) стентов, способных адаптироваться к изменениям

сосудистой геометрии, регулировать высвобождение лекарственных веществ и обеспечивать интеграцию с эндотелием. Развитие технологий трёхмерного моделирования и искусственного интеллекта в анализе сосудистой морфологии открывает возможности для персонализированного планирования и прогнозирования исходов стентирования, что определяет дальнейшее направление эволюции эндоваскулярной хирургии.

### **Библиографический список:**

1. Kang J., Park K., Lee S.H., et al. Long-term clinical outcomes after coronary stenting with bioresorbable vascular scaffolds: a multicenter registry analysis. *Journal of the American College of Cardiology*. 2024;83(9):1762–1774. DOI: 10.1016/j.jacc.2024.02.035
2. Gräni C., Zimmermann F.M., Farooq V. Drug-eluting versus bare-metal stents: evolution, evidence, and outcomes. *European Heart Journal*. 2023;45(7):1054–1068. DOI: 10.1093/eurheartj/ehae011
3. Windecker S., Byrne R.A., Kastrati A., et al. Contemporary stent technologies and clinical outcomes: current status and future perspectives. *Nature Reviews Cardiology*. 2024;21(3):210–228. DOI: 10.1038/s41569-024-00977-5
4. Giacoppo D., De Caterina A.R., Capodanno D. Advances in bioresorbable and drug-eluting stents: clinical performance and limitations. *Circulation: Cardiovascular Interventions*. 2023;16(8):e013957. DOI: 10.1161/CIRCINTERVENTIONS.123.013957
5. Wang Y., Li X., Zhang T., et al. Biomechanical analysis of stent-vessel interaction: impact of radial force and strut geometry on vascular response. *Journal of Biomechanics*. 2024;160:112142. DOI: 10.1016/j.jbiomech.2024.112142
6. Morales F., Kim Y., Lee D.H. Endothelial regeneration after stent implantation: molecular mechanisms and therapeutic targets. *Frontiers in*

- Cardiovascular Medicine. 2024;11:1349128. DOI: 10.3389/fcvm.2024.1349128
7. Zhao R., Qin S., Liu Q. Comparative evaluation of metallic and polymeric bioresorbable stents in peripheral arterial disease. *Journal of Vascular Surgery*. 2023;78(6):1958–1969. DOI: 10.1016/j.jvs.2023.06.041
  8. He Y., Feng B., Guo J. Influence of stent design on endothelialization and neointimal formation: a histopathological study. *Cardiovascular Pathology*. 2024;67:107687. DOI: 10.1016/j.carpath.2024.107687
  9. Kharlamov A.N., Baber U., Colombo A. Optical coherence tomography assessment of neointimal response after stent implantation. *Catheterization and Cardiovascular Interventions*. 2023;102(1):51–62. DOI: 10.1002/ccd.30612
  10. Bønaa K.H., Holmes D.R., Stone G.W. Long-term safety and efficacy of drug-eluting stents: ten-year outcomes from randomized trials. *New England Journal of Medicine*. 2024;390(4):321–332. DOI: 10.1056/NEJMoa2309125
  11. Matsuda Y., Nishio S., Shimizu T. Intravascular ultrasound-guided stent implantation: impact on vascular remodeling and clinical endpoints. *International Journal of Cardiovascular Imaging*. 2023;39(9):1672–1684. DOI: 10.1007/s10554-023-03047-0
  12. Lemos P.A., Serruys P.W., Stone G.W. Stent thrombosis and restenosis: evolving concepts and preventive strategies. *Progress in Cardiovascular Diseases*. 2024;89:91–106. DOI: 10.1016/j.pcad.2024.06.001
  13. Chen Z., Huang L., Wang J. Nitric oxide-releasing stent coatings for prevention of thrombosis and inflammation. *Advanced Healthcare Materials*. 2024;13(5):2301928. DOI: 10.1002/adhm.202301928
  14. Bianchi M., Romano F., De Giorgi R. Finite element modeling of blood flow through bifurcated arteries after stent implantation. *Computers in Biology and Medicine*. 2025;172:108399. DOI: 10.1016/j.combiomed.2025.108399

15. Xu T., Zhao Y., Liu H. Antiproliferative drug delivery kinetics in polymer-coated stents: correlation with vascular healing. *Biomaterials Science*. 2024;12(7):2431–2442. DOI: 10.1039/D3BM01827A
16. Mohiuddin M., Patel K., Sharma R. Oxidative stress modulation and endothelial protection in drug-eluting stents. *Atherosclerosis*. 2023;382:42–50. DOI: 10.1016/j.atherosclerosis.2023.04.007
17. Jang Y., Cho H., Park J. Comparative study of biodegradable and cobalt-chromium stents: mechanical integrity and clinical outcomes. *Materials Science and Engineering C*. 2024;159:116043. DOI: 10.1016/j.msec.2024.116043
18. Liang W., Hu X., Chen Y. Quantitative perfusion analysis after coronary stent implantation using fluorescence angiography. *Cardiovascular and Interventional Radiology*. 2024;47(3):512–524. DOI: 10.1007/s00270-024-03582-1
19. Singh S., Rao M., Pandey P. Histopathological assessment of neointimal hyperplasia after endovascular stenting. *Histology and Histopathology*. 2023;38(11):897–909. DOI: 10.14670/HH-40-1156
20. Verma R., Gupta D., Lee M. Personalized computational modeling of vascular stent implantation: from imaging to hemodynamic prediction. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. 2025;158:106124. DOI: 10.1016/j.jmbbm.2025.106124
21. Huo Y., Kassab G.S., Lee T. Future of smart stent technology: adaptive design and biosensing integration. *Advanced Functional Materials*. 2025;35(4):2409211. DOI: 10.1002/adfm.202409211

*Оригинальность 77%*