

## Возможности роботизации ультразвуковых технологий эндоваскулярной хирургии

### Аннотация

В настоящее время развитие технологий эндоваскулярной хирургии требует разработки и внедрения новых методов, позволяющих устранить недостатки существующих. К таким методам относятся методы комбинированного воздействия при реканализации артерий и удаления рестеноза внутри стента, осуществляемые путем совмещения минимально инвазивных технологий. Для обеспечения надежности и эффективности применения разрабатываемых методов, повышения комфортности и защиты от облучения хирурга предлагается внедрение новых роботизированных систем в эндоваскулярную хирургию.

### Введение

В различных областях хирургии происходит активное внедрение минимально инвазивных методов, позволяющих снизить время постоперационной реабилитации и улучшить показатели постоперационного ведения пациентов [1]. В настоящей статье рассмотрены направления исследований и разработок в области минимально инвазивных хирургических методов, ведущихся на кафедре «Биомедицинские технические системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана. К ним относятся метод комбинированного воздействия на биоткань, ультразвуковые технологии устранения рестеноза, а также создание роботизированных систем для эндоваскулярной хирургии.

Начиная с середины 80-х годов прошлого века в клиническую практику было внедрено множество эндоваскулярных технологий ангиопластики, таких как баллонная дилатация, стентирование, ротационная и катетерная атерэктомия, лазерная и ультразвуковая реканализация. Каждый из перечисленных методов обладает рядом достоинств и недостатков, приведенных в *табл. 1*.

Из сравнения существующих методов можно сделать вывод об отсутствии метода обработки облитерированного сосуда, совмещающего малую травматичность и низкую вероятность рестеноза.

С середины 90-х годов прошлого века началось активное внедрение в эндоваскулярную хирургию роботизированных технологий. В настоящее время роботизированные кардиологические операции представлены в основном интракардиальными операциями и коронарной реваскуляризацией. Робот «Da Vinci» является единственным одобренным в этой области роботом [10], и кардиологическая программа на «Da Vinci» присутствует лишь в нескольких центрах в мире. Причиной является высокая стоимость, требования к техническому оснащению и необходимость обучения персонала [11].

Достоинства использования роботизированных систем в сердечно-сосудистых операциях были продемонстрированы в анализе результатов коронарного шунтирования [12]. Роботизация позволила улучшить ближайшие результаты по ряду критериев, однако отдаленные результаты показателей проходимости не различаются. Роботизация коронарного шунтирования остается менее используемой, чем стандартная операция, хотя количество операций с использованием роботов растет. Роботы выполняют изъятие левой внутренней грудной артерии и гибридные операции по реваскуляризации, включающей в себя шунтирование и чрескожное коронарное вмешательство [12], [13].

Таким образом, использование роботизированных систем для применения перспективных ультразвуковых технологий в эндоваскулярной хирургии позволит решить ряд проблем:

- обеспечить надежность и эффективность применения разрабатываемых методов;
- повысить комфортность и безопасность работы хирурга, благодаря удаленному управлению процессом операции и предотвращению рентгеновского облучения хирурга;
- понизить требования к квалификации хирурга и уменьшить влияние человеческого фактора на конечный результат операции;
- совершать точные и плавные перемещения инструмента, исключив влияние усталости и тремора рук хирурга на процесс управления инструментом.

Результаты разработки подобных систем в МГТУ им. Н.Э. Баумана представлены в [14]. В ходе исследований действий хирурга во время операции ультразвуковой эндартерэктомии была установлена необходимость в манипуляторе, имеющем не менее 6 степеней подвижности, большую рабочую зону и способном перемещать инструмент с высокой скоростью.

Был спроектирован и изготовлен 6-степенной робот-манипулятор (*рис. 1а*). Данный робот предназначен для высокоам-

Таблица 1

Сравнение существующих эндоваскулярных технологий ангиопластики

Тип операции	Достоинства	Недостатки
Чрескожная транслюминальная баллонная дилатация (ЧТБД)	Простота	Рестеноз 20..40 % [2]. Отсутствует удаление бляшки
ЧТБД + стентирование	Применимость ко всем видам поражений при неполной облитерации	Рестеноз до 48,8 % [2]-[5]. Отсутствует удаление бляшки. Аневризмы вследствие давления на стенки сосуда. Образование трещин в стенте
Ротационная атерэктомия	Частицы бляшки размером менее 5 мкм	Риск перфорации [6]
Катетерная атерэктомия	Частицы бляшки размером менее 5 мкм	Риск повреждения сосуда и диссекции интимы [7]
Лазерная абляция	Удаление любых типов бляшек	Неполное удаление бляшки. Риск перфорации [8]
Ультразвуковая реканализация	Избирательность воздействия на биоткани [9]. Низкая травматизация	Отсутствует удаление бляшки
Ультразвуковая эндартерэктомия	Возможность импрегнации лекарственных веществ	Высокая травматизация

плитудных манипуляций хирургическим сосудистым инструментом массой до 1 кг.

Ограничением манипулятора с шестью степенями подвижности при работе с пациентом является единственная конфигурация звеньев для каждого заданного положения инструмента. На практике хирургу может быть необходимо, чтобы манипулятор мог изменять положение звеньев без изменения положения инструмента. Достижение этого возможно введением в конструкцию манипулятора седьмой степени подвижности.

Такая возможность была реализована в многофункциональном роботе-манипуляторе (рис. 1б). Данный робот также обладает высокими передаточными отношениями первых четырех звеньев, что позволяет удерживать манипулятор в произвольном положении при выключенном питании, что важно для безопасности пациента.

В состав многофункционального робота-манипулятора входят: манипулятор, предназначенный для выполнения действий с хирургическим инструментом; пост управления, позволяющий управлять всей системой в целом; модуль обзорного изображения операционного поля; стереомодуль операционного поля с лазерным дальномером.

Рассмотренные роботы-манипуляторы предусматривают установку на оконечное звено устройства осязательного устройства. Такое устройство позволяет оценивать силы, возникающие при взаимодействии хирургического инструмента с биотканью. При этом появляется возможность точно дозировать усилие воздействия. Также становится возможным перемещать оконечное звено манипулятора вручную при высоких передаточных отношениях.

## Минимально инвазивные хирургические методы, разрабатываемые в МГТУ им. Н.Э. Баумана

### 1 Метод комбинированного воздействия

В качестве альтернативы существующим методам эндоваскулярной хирургии в [15] была описана идея комбинированного метода воздействия на биоткань, заключающаяся в расширении области применения ультразвука для удаления различных типов тканей методами эндоваскулярной хирургии.

При использовании комбинированного метода область взаимодействия инструмента с удаляемым объектом сначала переводится в другое физическое состояние в ходе процесса охрупчивания, а затем подвергается ультразвуковой обработке (рис. 2).

В ходе процесса охрупчивания происходит увеличение жесткости удаляемой ткани вследствие карбонизации при использовании термической предобработки или стеклования при использовании криогенного воздействия.

Более хрупкие ткани легче поддаются ультразвуковому диспергированию, что увеличивает скорость и эффективность удаления патологической ткани. Также селективное воздействие ультразвука позволяет удалять части ткани после охрупчивания, так как ультразвуковая волна, движущаяся по границе раздела сред, позволяет отделить более жесткие хрупкие частицы обработанной ткани от более упругой нативной.

Диспергированные частицы имеют малые размеры для перекрытия капилляров, однако для предотвращения риска эмболизации в русло сосуда может вводиться система эвакуации частиц патологической ткани.

Таким образом, комбинированный метод воздействия, примененный в эндоваскулярной хирургии, позволит устранить облитерацию сосуда с минимальной травматизацией других внутренних слоев артерии, что приведет к снижению числа рестенозов и повышению эффективности операции.

В [16] предложены различные методы предварительного воздействия для перевода ткани в охрупченное состояние, в том числе лазерный и токами высокой частоты. Для изучения воздействия указанных методов в качестве объекта исследований были выбраны на первом этапе почки барана, а на втором – атеросклеротические бляшки сонных артерий человека.

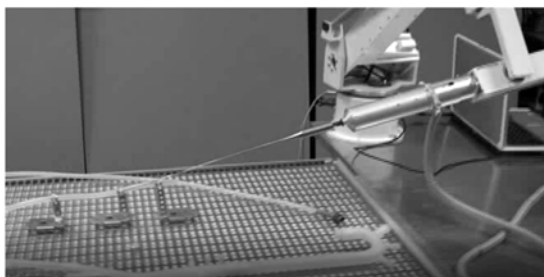
При предварительной лазерной обработке образцов был получен тонкий поверхностный слой обугленной ткани. Целью последующей ультразвуковой обработки было полное удаление данного слоя. Контактный метод ультразвуковой обработки обугленной ткани показал положительный результат ее удаления в отличие от гидрообработки, которая показала низкую эффективность.

При предварительной обработке токами высокой частоты (РЧА) карбонизация происходила точно в поверхностном слое образца. Частицы карбонизированной ткани легко диспергировались как контактным ультразвуком, так и методом гидрообработки.

Первичный анализ полученных результатов дает основание полагать, что комбинированный метод ультразвуковой обработки биотканей осуществим с применением любого из предложенных методов охрупчивания. Целью дальнейшей работы будет подбор параметров предобработки и разработка систем доставки указанных воздействий непосредственно к пораженному участку сосуда.

### 2 Ультразвуковые технологии устранения рестеноза

Ультразвуковые технологии также применимы для решения проблемы рестеноза внутри стента (РВС). На данный момент, учитывая высокий процент рестеноза после повторного вмешательства, не решен вопрос максимального количества стентов, которые могут быть помещены в целевой сосуд. По этой причине наилучшим решением является удаление облитерирующе-



а)



б)

Рис. 1. 6-степенной робот-манипулятор (а); многофункциональный робот-манипулятор (б)

го материала без повторного стентирования при сохранении преимуществ минимально инвазивной операции (рис. 3).

Ультразвуковая обработка при РВС исключает необходимость последующей баллонной дилатации или других вмешательств. Также применение ультразвуковой импрегнации после стентирования способно увеличить концентрацию препарата в стенке сосуда, что обеспечит увеличение проходимости в стентированном сосуде и снизит риск тромбоза. Предлагаемая технология может использоваться как для первичного стентирования, так и для лечения РВС.

Данное направление предполагает использование различных методов:

- ультразвуковая реканализация просвета посредством гидрообработки сосуда без удаления стента;
- ультразвуковая реканализация просвета посредством комбинированного метода воздействия на сосуд без удаления стента;
- ультразвуковая реканализация просвета с удалением стента и внутреннего слоя сосуда.

### 3 Роботизированные системы для эндоваскулярной хирургии

На первичном этапе разработки роботизированных хирургических систем должны быть сформированы требования к их

структуре. В роботизированную систему входят несколько подсистем, выполняющих различные функции. Пример функциональной схемы предлагаемой роботизированной системы для реализации комбинированного метода показан на рис. 4.

Робот-манипулятор является частью роботизированной системы, находящейся непосредственно рядом с пациентом. Его функцией является перемещение инструмента, повторяющее движения хирурга.

Хирург-оператор располагается в помещении, отделенном от операционной рентген-непрозрачной стеной. Информацию о ходе операции он может получать от системы визуализации и мониторинга на посту управления в реальном времени. Хирург управляет движениями робота посредством системы управления.

Система визуализации и мониторинга представлена видеокамерами, эндоскопическими системами и диагностическими аппаратами.

Система комбинированного воздействия состоит из нескольких блоков: генератора ультразвуковых колебаний, генератора охрупчивающего воздействия и ультразвукового узла. На последнем блоке, закрепленном на рабочем звене робота-манипулятора, может быть установлен минимально инвазивный инструмент.

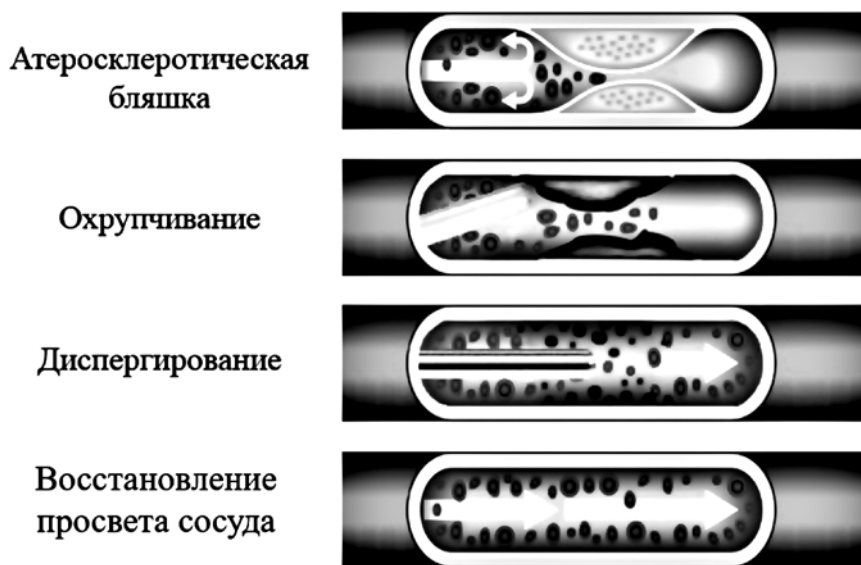


Рис. 2. Минимально инвазивная схема реализации комбинированного метода воздействия

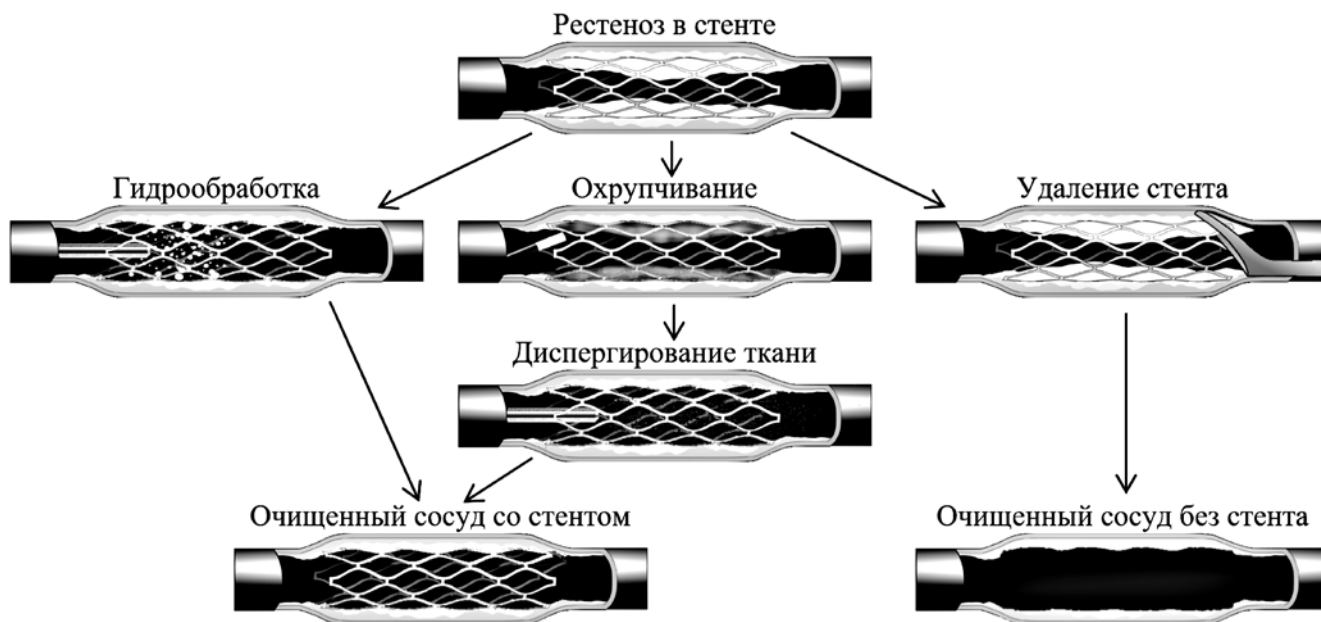


Рис. 3. Схема ультразвуковой обработки при РВС

## Заклучение

В работе была показана перспективность методов комбинированного воздействия при реканализации артерий и удаления рестеноза внутри стента, осуществляемых путем совмещения различных минимально инвазивных технологий. Роботизация ультразвуковых технологий эндоваскулярной хирургии будет способствовать повышению надежности и эффективности данных процедур. Использование роботизированных систем также позволит решить ряд проблем, связанных со сложностью проведения эндоваскулярных операций, включая повышение комфортности и защиты от облучения хирурга.

### Список литературы:

1. Бокерия Л.А., Кайли А.Е. Сердечно-сосудистые заболевания: современный уровень диагностики и лечения // Бюл. Науч. центра сердечно-сосудистой хирургии им. А.Н. Бакулева РАМН. Сердечно-сосудистые заболевания. 2009. Т. 10. № 3. С. 33-43.
2. Panchavinnin P., Tresukosol D., Phankingthongkum R. et al. Stent placement compared with balloon angioplasty for obstructed coronary artery disease in Thai elderly patients: Initial result and 6 months follow-up // Journal of the Medical Association of Thailand. 2004. Vol. 87. № 3. PP. 225-232.
3. Teirstein P.S. Drug-eluting stent restenosis: An uncommon yet pervasive problem // Circulation. 2010. Vol. 122. № 1. PP. 5-7.
4. Mohan S., Dhall A. A comparative study of restenosis rates in bare metal and drug-eluting stents // International Journal of Angiology. 2010. Vol. 19. № 02. PP. e66-e72.
5. Mehilli J. et al. Randomized trial of paclitaxel-versus sirolimus-eluting stents for treatment of coronary restenosis in sirolimus-eluting stents: The ISAR-DESIRE 2 (Intracoronary Stenting and Angiographic Results: Drug Eluting Stents for In-Stent Restenosis 2) study // Journal of the American College of Cardiology. 2010. Vol. 55. № 24. PP. 2710-2716.
6. Cohen B.M. et al. Cocktail attenuation of rotational ablation flow effects (CARAFE) study: Pilot / Catheterization and cardiovascular diagnosis. 1996. PP. 69-72.
7. Капранов С.А., Хачатуров А.А., Ховалкин Р.Г. и др. Эндоваскулярная катетерная атерэктомия – возможные области применения и перспективы // Диагностическая и интервенционная радиология. 2012. Т. 6. № 2-1. С. 53-66.
8. Bowker T.J. et al. Excimer laser angioplasty: Quantitative comparison in vitro of three ultraviolet wavelengths on tissue ablation and haemolysis // Lasers in Medical Science. 1986. Vol. 1. № 2. PP. 91-100.
9. Ультразвуковая ангиохирургия / Под ред. А.В. Покровского, Г.В. Саврасова, Ю.В. Новикова, В.А. Красавина. – Кострома: ДиАр, 2004. С. 202.

10. Rodriguez E. et al. Pathway for surgeons and programs to establish and maintain a successful robot-assisted adult cardiac surgery program // The Journal of thoracic and cardiovascular surgery. 2016. Vol. 152. № 1. PP. 9-13.
11. Whellan D. J. et al. Trends in robotic-assisted coronary artery bypass grafts: A Study of the Society of Thoracic Surgeons Adult Cardiac Surgery Database, 2006 to 2012 // The Annals of thoracic surgery. 2016. Vol. 102. № 1. PP. 140-146.
12. Langer N.B., Argenziano M. Minimally invasive cardiovascular surgery: Incisions and approaches // Methodist DeBakey cardiovascular journal. 2016. Vol. 12. № 1. P. 4.
13. Alemzadeh H. et al. Adverse events in robotic surgery: A retrospective study of 14 years of FDA data // PloS one. 2016. Vol. 11. № 4. P. e0151470.
14. Саврасов Г.В., Батанов А.Ф., Башлай А.П., Гусаров С.Г. Опыт разработки медицинских роботов-манипуляторов в МГТУ им. Н.Э. Баумана // Биомедицинская радиоэлектроника. 2014. № 10. С. 14-20.
15. Саврасов Г.В. Хирургический ультразвуковой инструмент для удаления патологического образования из биологической ткани, устройство для удаления патологического образования из биологической ткани и способ с их использованием / Патент РФ № 2535404. Заявл. 19.11.2012. Опубл. 10.12.2014.
16. Savrasov G. V., Belikov N. V., Khaydukova I. V. Experimental study of combined treatment of biological tissue / Proceedings of the 11th German-Russian-Conference on Biomedical Engineering. June 17th-19th, 2015, Aachen, Germany. PP. 95-97.

Геннадий Викторович Саврасов,  
д-р техн. наук, профессор,  
Никита Владимирович Беликов,  
аспирант,  
Ирина Витальевна Хайдукова,  
аспирант,  
Анна Сергеевна Борде,  
аспирант,  
кафедра БМТ-1,  
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Н.Э. Баумана  
(национальный исследовательский университет)»,  
г. Москва,  
e-mail: aneox@list.ru

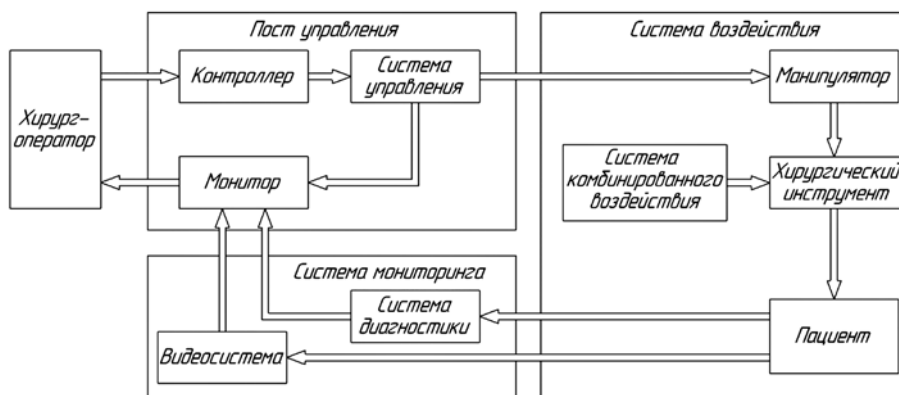


Рис. 4. Роботизированная система для реализации комбинированного метода