

УДК 615.478.6

Основные узлы современных медицинских роботических систем

Пушкарёв А.В., магистрант
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Холодильная, криогенная техника. Системы
кондиционирования и жизнеобеспечения»

Васильев М.К., студент
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Холодильная, криогенная техника. Системы
кондиционирования и жизнеобеспечения»

Верховный А.И., студент
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Холодильная, криогенная техника. Системы
кондиционирования и жизнеобеспечения»

Научный руководитель: **Шакуров А.В.**, инженер I категории, ассистент
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
shakurov@bmstu.ru

1. Введение

Роботическая хирургия развивается с 80-х годов XX века. Выполнение операций с помощью хирургических роботических систем имеет ряд преимуществ перед традиционным хирургическим методом, они будут рассмотрены конкретно для систем ROBODOC, NeuroMate и da Vinci.

Статистика онкологических заболеваний в ряде стран, показывает, что рак предстательной железы (РПЖ) выходит на 2–3 место после рака легких и желудка, а в США и Швеции — на 1-е место. В США ежегодно диагностируют около 232 тыс. новых случаев РПЖ, в Европе около 238 тыс. случаев. Каждый год около 30 350 американцев и 85 200 европейцев умирают от этого заболевания. В России случаи РПЖ наблюдается около 14 тыс. в год. По величине прироста в России (темп прироста 31,4%) рак простаты занимает 2-е место после меланомы кожи (35%) и значительно превосходит злокачественные заболевания легких (5%) и желудка (10,2%) [1].

Intuitive Surgical, разработчики системы da Vinci, используя базу данных пациентов, идентифицировали результаты 71312 радикальных простатэктомий,

проведенных 3739 хирургами в более чем 300 больницах США в период между 2004 и 2010 гг., используя открытый или роботизированный метод. Результаты исследования приведены в таблице 1 [2].

Таблица 1

Отчет Intuitive Surgical

	Открытая хирургия простаты (Не роботизированная больница) п = 13 840	Открытая хирургия простаты (Роботизированная больница) п = 30 124	Роботизированная хирургия простаты п = 27 348
Среднее время операции (часы)	3,2	3,4	4,4
Средняя длительность госпитализации (дней)	3,7	3,4	2,2
Число переливаний	17,1% (n=2 360)	11,5% (n=3 449)	2,3% (n=638)
Общее число осложнений	17,9% (n=2 474)	15,8% (n=4 759)	10,6% (n=2 892)

Исследование также показало, что чем больше роботизированных вмешательств проводили хирурги, тем меньше времени требовалось на операцию в целом: для менее опытных хирургов это время составило в среднем 5,0 часов на одну операцию, для более опытных - в среднем 3,9 часа. Отмечено также снижение частоты осложнений (с 11,75% до 8,95%) и необходимости применения другого метода (с 1,13% до 0,18%).

Сейчас в мире проводится более 400 000 робот-ассистированных операций в год. И их число возрастает [3]. Будущее данных аппаратов заключается в их совершенствовании и добавлении функционала в данные системы. На данный момент на этапе тестирования функции удаленного оперирования, когда хирург может находиться в другой точке земного шара относительно пациента. В будущем, самими хирургами видится еще более малоинвазивный доступ к пораженному участку в теле человека, в виде уменьшения количества разрезов.

2. ROBODOC

ROBODOC — компьютеризированная роботизированная ортопедическая хирургическая система производится в Корее компанией Curexo Technology Corporation.

Предназначен этот хирургический робот для всех основных операций по артропластике, таких как первичная полная артропластика тазобедренного сустава и полная артропластика коленного сустава.

2.1 Структура комплекса и технические характеристики

Платформа пациента имеет широкий спектр возможностей по размещению, позиционированию и поддержанию пациента: центральное расположение пациента, автоматически репозиционирующаяся поддержка ног и поясничная поддержка, размещение пациента в наклоне и в положении лежа на спине, запатентованная M3D система позиционирования позвоночника, позволяющая проводить декомпрессию, и другие терапевтические процедуры в различных направлениях (не только в одной плоскости), моторизированные наклонные и подъемные поясничные и тазовые поддержки для правильного позиционирования позвоночника и таза.

Технические характеристики приведены ниже в таблице 2 [8].

Таблица 2

Технические характеристики системы ROBODOC

	Наименование составляющих компонентов	Физические характеристики (габариты, мм)	Масса, кг
Рука робота и станина	Рука робота Станина Датчик усилий Дигитайзер	Рука робота - 80 см Станина робота: 1830 x 780 x 2290	359
Станция управления	19" монитор IPM Компьютер Видео коммутатор	980 x 740 x 1390	306
ORTHODOC	ПК - все в одном ОС - Linux Монитор: 22", разрешение 1680 x 1050	535 x 420 x 84	10,7

Масса всей системы: 2420 кг

Максимальный вес пациента: 770 кг

На рис. 1 изображена рука робота, станина и платформа пациента.



Рис. 1. Фотография робота

2.2 Технологии используемые в системе ROBODOC

ORTHODOC – система предоперационного планирования, библиотека имплантатов. Принцип работы системы описан ниже.

Все начинается с предоперационного планирования (КТ сканирования пациента), после чего появляется точная структура кости для представления в систему ORTHODOC. Программное обеспечение форматирует КТ снимок на экран из 4 рабочих окон, показывается сустав в 3 плоскостях и его трехмерное изображение. Далее, используя систему ORTHODOC, строится точная анатомическая картина будущего положения имплантата в кости, имплантат выбирается из предустановленной базы, включающей самые современные имплантаты мировых производителей. Хирург планирует расположение имплантата используя 4 рабочих окна, где отображается положение будущего имплантата и результат можно наблюдать в трехмерном пространстве.

После с помощью системы ORTHODOC происходит планирование операции. Использование системы ORTHODOC гарантирует точную длину ноги и обеспечивает полный объем движений и как результат точного расположения протеза. Кроме того процесс планирования операции помогает избежать проблем и отклонений во время

хирургического вмешательства. После процесса планирования операции информация передается на вспомогательную машину ROBODOC Surgical Assistant.

После предоперационного планирования операции информация загружается в ROBODOC Surgical Assistant, робот устанавливается в операционной, пациент позиционируется, используя специальные фиксаторы, затем хирург вскрывает сустав. После вскрытия сустава робот показывает хирургу куда необходимо приложить специальный регистратор (DigiMatch) для получения еще более точной пространственной картины кости.

На завершающей стадии под контролем хирурга, рука робота наводится на операционное поле. Затем робот начинает пилить кость с субмиллиметровой точностью. После подготовки кости к имплантации рука робота удаляется из операционного поля и хирург устанавливает протез так, как это было спланировано заранее.

Благодаря описанным выше технологиям и методам, система ROBODOC показывает наилучшие результаты в точности и качестве выпиливаний в кости. Кроме того, робот точно располагает и регулирует положение пациента. При операции минимальны кровопотери и риск осложнения, в следствие чего уменьшается срок госпитализации. Тем не менее, у данного хирургического робота есть и ряд недостатков, такие как обязательное наблюдение за операцией и невозможность системы самостоятельно определить ошибочное действие в алгоритме и остановится. Потому, при совершенствовании робота надо создавать более выверенную систему планирования, которая сможет определить ошибки хирурга до начала операции. И конечно повышать точность расчета и точность выпиливания кости.

3. NeuroMate

NeuroMate — первая роботизированная система предназначенная для выполнения стереотаксической хирургии головного мозга (рис.2). В настоящее время система используется для оказания помощи хирургам в выполнении стереотаксических нейрохирургических операций. Она была разработана для комплексных хирургических систем. Хирург манипулирует роботизированной рукой, с 5 степенями свободы.



Рис. 2. Изображение робота во время операции, голова пациента закреплена в раме

В таблице 3 представлены преимущества и недостатки данного робота в хирургии [9].

Таблица 3

Особенности хирургического робота NeuroMate

Преимущества	Недостатки
Рамное и безрамное проведение операции Возможность удаленного проведения операции Планирование операции Совместимость	Стоимость (техническое обслуживание на 2005 год составляет \$ 61 850 в год) Узкоспециализированное применение Не востребованность нейрохирургических операций

Роботизированная система NeuroMate является одной из ведущих нейрохирургических роботических систем в мире. Однако, из-за его недостатков количество роботов в мире очень мало. Поэтому в данном направлении роботической хирургии требуется совершенствование и увеличение функционала робота: точность, совершенство предпланирования операции, выполнение более сложных и разнообразных нейрохирургических операций. Подобные улучшения в свою очередь увеличат его востребованность в мире.

4. Da Vinci

Хирургическая система da Vinci (США, Intuitive Surgical, Inc.) — сложная

роботизированная платформа, предназначенная для сложных операций через минимально инвазивный доступ. Система da Vinci очень распространена в мире и известна разработчикам других роботических хирургических систем и может работать с различными хирургическими системами и выполнять операции ранее для неё невозможные. Например: офтальмологические операции da Vinci может проводить совместно с Stereotaxical Microtelemanipulator (SMOS), а нейрохирургические операции da Vinci может проводить совместно с NeuroMate. Система успешно используется в следующих процедурах, представленных в таблице 4.

Таблица 4

Области применения Da Vinci и типы процедур

Область применения	Тип процедуры
Кардиоторакальная хирургия	Восстановление митрального клапана, реваскуляризация миокарда, абляция тканей сердца, установка эпикардимального электронного стимулятора сердца для бивентрикулярной ресинхронизации
Общая хирургия	Желудочное шунтирование, трансоральная резекция опухолей верхних отделов дыхательных путей (миндалины, основание языка, гортани), лобэктомия легкого
Ортопедическая хирургия	Операции на позвоночнике, замена межпозвоночных дисков
Гинекология	Гистерэктомия, миомэктомия,
Урология	Радикальная простатэктомия, пиелопластика, цистэктомия, реимплантация почки и мочеточника, удаление мочевого пузыря
Нейрохирургия	Гидроконкатенация тканей головного мозга (совместно с NeuroMate)

Преимущества и недостатки хирургической системы da Vinci показаны в таблице 5. Также статистика по работе роботической системе da Vinci приведена в введении в таблице1.

Таблица 5

Особенности хирургического робота da Vinci

Преимущества	Недостатки
Малый срок госпитализации	Стоимость робота (\$ 1 500 000 – 2 000 000) Инструменты (среднее количество использований 10 раз)
Малая кровопотеря	
Малое число осложнений	
Уравнивание по опыту хирургов (в лучшую сторону)	
Широкий спектр типов выполняемых операций	
Популярность и распространенность	

В таблице 6 представлена тенденция увеличения хирургических систем da Vinci в странах мира. [4], [5]

Таблица 6

Распределение установок da Vinci по странам мира

Регион, страна	Статистика за 2011 год	Статистика за 2014 год
США	1548	2083
Канада	16	22
Бразилия	4	12
Аргентина	4	5
Израиль	5	6
Катар	4	4
Германия	58	64
Франция	55	73
Великобритания	25	34
Бельгия	25	31
Испания	24	26
Турция	15	22
Россия	12	20
Румыния	10	5
Норвегия	6	10
Финляндия	5	5
Греция	5	9
Австрия	4	5

Болгария	1	2
Португалия	1	1
Япония	40	159
Южная Корея	36	43
Китай	20	25
Индия	17	24
Тайвань	10	18
Сингапур	6	7
Малайзия	4	3

4.1 Консоль хирурга

Консоль хирурга — центр управления системой da Vinci, изображенный на рис. 3. Оператор консоли хирурга сидит вне стерильной зоны и управляет инструментами и трехмерным эндоскопом руками, используя два главных контроллера, и ногами, используя педали.

Как видно в стереоскопическом окуляре, концы инструментов выравниваются руками хирурга, лежащими на главных контроллерах. Такая конструкция предназначена симулировать естественное выравнивание глаз, руки и инструмента при открытой операции. Естественное выравнивание, в свою очередь, помогает оптимизировать координацию в системе глаз-рука. Это означает, что система da Vinci S позволяет хирургу быть столь же ловким, как в открытой хирургии, оперируя в минимально инвазивной среде. Дальнейшее управление обеспечивается масштабированием движений и уменьшением тремора, что минимизирует влияние естественного дрожания рук или нежелательных движений. Оператор консоли хирурга также может изменять вид с полноэкранного режима на режим нескольких изображений (режим *TilePro*), который показывает трехмерное изображение операционного поля наряду с двумя дополнительными изображениями от вспомогательных входов.

Используя хирургическую систему da Vinci, хирург оперирует, комфортно сидя у консоли и видя трехмерное изображение операционного поля. Пальцы хирурга захватывают рукоятки под дисплеем, а кисти и запястья располагаются естественно по отношению к его глазам. Система равномерно транслирует движения пальцев, кистей и запястий хирурга в точные движения хирургических инструментов внутри пациента в реальном времени. Стойка у операционного стола имеет три-четыре роботизированные

руки – две или три инструментальные, и одну с эндоскопом – которые выполняют команды хирурга. Лапароскопические руки работают через 1-2 сантиметровые разрезы. Ассистенты вводят инструменты в полость, а также меняют инструменты.



Рис. 3. Консоль хирурга

4.2 Тележка пациента

Операционная (хирургическая) панель, изображенная на рис. 4, это часть системы, которая находится в прямом контакте с пациентом, и поэтому в течение всей операции она имеет специальное стерильное покрытие. В зависимости от конфигурации операционная панель содержит 2 или 3 рабочих манипулятора с закрепленными на них инструментами, а также один манипулятор с камерой.

Движения манипуляторов можно разделить на два вида. Первый вид - это моторные движения, которые задаются оператором непосредственно с панели управления, оказывают влияние на ход операции в теле пациента, управляют инструментами и с помощью которых, собственно, проводится операция. Второй вид - это движения торможения, которые задаются ассистирующим персоналом и служат только для настройки системы перед операцией.

Инструменты и камера легко прикрепляются к рукам и легко перемещаются с консоли или ассистентом. Первые две руки робота, соответствующие правой и левой руке

хирурга, держат инструменты EndoWrist. Третья рука держит эндоскоп, позволяя хирургу легко менять, перемещать, приближать и поворачивать поле зрения с консоли. Такая подвижность устраняет необходимость в ассистенте. Четвертая рука позволяет добавлять третий инструмент EndoWrist и выполнять дополнительные задачи, такие как приложение противотяги и поддержка непрерывного шва. Это устраняет необходимость еще в одном ассистенте. Хирург может одновременно управлять любыми двумя руками с помощью педалей под консолью.

Набор инструментов EndoWrist включает разнообразие зажимов, иглодержателей, ножниц; монополярных и биполярных электрохирургических инструментов; скальпелей и других специализированных инструментов (всего более 40 типов инструментов). Инструменты EndoWrist могут иметь диаметр 5 мм и 8 мм.

При смене инструментов интерфейс сразу распознает тип нового инструмента и число его использований.



Рис. 4. Тележка пациента

4.3 Тележка технического зрения

На видеостойке, показанной на рис. 5, размещен центральный системный блок обработки и видеооборудование. На видеостойке имеется 24-дюймовый сенсорный экран, а также регулируемые полки для дополнительного хирургического оборудования, например электрохирургических элементов (ЭХЭ) и инсуффляторов. Во время операции видеостойкой может управлять нестерильный оператор.



Рис. 5. Тележка технического зрения

В таблице 7 указаны составляющие компоненты и технические характеристики каждой части робота хирурга.

Таблица 7

Технические характеристики роботической системы da Vinci

	Наименование составляющих компонентов	Физические характеристики (габариты ШхГхВ, мм)	Масса, кг
Консоль хирурга	Главные контроллеры	970х860х860	264

	Стереоскопический окуляр Левая и правая боковые панели Панель ножного выключателя		
Тележка пациента	Установочные шарниры Инструментальные манипуляторы Манипулятор камеры Монитор с сенсорным экраном Моторный привод	910x1270x1750	544
Тележка технического зрения	Осветитель Эндоскопы Головка стерео камеры Блоки управления камерой (CCUs) Регулятор фокуса Система селекторной связи Разделительный трансформатор и разветвитель питания Держатели резервуаров	676x927x1930	202.3

4.4 Инструменты EndoWrist

Созданные по образцу человеческого запястья, инструменты EndoWrist имеют больший объем движений, чем человеческая рука. Они позволяют системе da Vinci продвигать хирургическую точность и технику за пределы возможностей человеческой руки. Внутренние тросы инструментов EndoWrist обеспечивают максимальную реакцию, давая возможность быстро и точно накладывать швы, выполнять диссекцию и манипуляции на тканях.

Набор инструментов EndoWrist включает разнообразие зажимов, иглодержателей, ножниц; монополярных и биполярных электрохирургических инструментов; скальпелей и других специализированных инструментов (всего более 40 типов инструментов). Инструменты EndoWrist могут иметь диаметр 5 мм и 8 мм. Часть инструментов изображено на рис. 6 [12].

При смене инструментов интерфейс быстро распознает тип нового инструмента и число его использований. Максимальное число использований одного инструмента это 10 операций, что является существенным недостатком этих инструментов.



Рис. 6. Инструменты EndoWrist

Подводя итоги по рассматриваемой роботической хирургической системе можно утверждать, что на сегодняшний день da Vinci является лучшим и востребованным хирургическим роботом в мире. Его широкое применение в разных типах операций дает ему большое преимущество перед другими хирургическими роботами. Сделав в данном роботе систему предпланирования операции, оснастив тактильными сенсорами, уменьшив габариты робота, добавив функции удаленного оперирования, а также улучшив технические характеристики, такие как точность позиционирования инструментов, масштабируемость перемещений, уменьшение размеров разрезов и их количества, сможем добиться увеличения области применения робота и улучшения качества операций. Но его значительными недостатками являются малый ресурс инструментов EndoWrist и высокая стоимость робота, с которыми в первую очередь стоит бороться. Стоимость робота в России, включая обучение специалиста и трехлетнюю сервисную поддержку, составляет около € 3.5 млн.

Заключение

В данной работе рассмотрены возможности и основные характеристики самых распространенных роботических систем, их преимущества и недостатки. Приведенная статистика, очевидно, показывает, что роботическая хирургия является важной составляющей современной медицины, и необходимо внедрять данные системы в современные медицинские учреждения. Особенно актуально это для России, где только данная сфера технологий только начинает свое развитие.

Несмотря на то, что показатели роботических хирургических систем в качестве выполнения операций высоки, улучшать и расширять функционал еще возможно и необходимо. Например, требуется разработать более совершенный искусственный интеллект для систем типа ROBODOC. Для систем типа NeuroMate необходимо расширить область выполняемых операций, тем самым сделав популярными роботические нейрохирургические операции. Для систем типа Da Vinci необходимо увеличивать ресурс применяемых инструментов, делать систему технологически проще для снижения стоимости, и улучшать технические характеристики, о которых было сказано выше. Также недостаточно реализованы телехирургия и симуляция операций для упрощения обучения оперирующих хирургов работе на конкретной системе.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 13-08-12143 офи_м.

Список литературы

1. Пушкарь Д.Ю., Колонтарев К.Б. Робот-ассистированная радикальная простатэктомия: руководство для врачей / под ред. О.С. Шевченко М.: ГЭОТАР-Медиа, 2014. 384 с.
2. Davis J. W. et al. Learning Curve Assessment of Robot-Assisted Radical Prostatectomy Compared with Open-Surgery Controls from the Premier Perspective Database // Journal of Endourology. 2014. Т. 28. №. 5. P. 560-566.
3. Краснопольский В.И., Попов А.А., Мананникова Т.Н., Федоров А.А., Слободянюк Б.А., Коваль А.А., Мироненко К.В. Робот-ассистированная хирургия в онкогинекологии // Онкогинекология. 2014. №3. С. 23 –30
4. Investor presentation Q4. Sunnyvale: Intuitive Surgical, 2014. 42 p.
5. Investor presentation Q1. Sunnyvale: Intuitive Surgical, 2012. 32 p.

6. Атрощенко А.О., Поздняков С.В. История развития роботизированной хирургии и ее место в современной колопроктологии: обзор литературы // Злокачественные опухоли. 2014. №1. С. 3–13.
7. Nakamura N., Sugano N., Nishii T., Kakimoto A., Miki H., A comparison between robotic-assisted and manual implantation of cementless total hip arthroplasty // Clinical Orthopaedics and Related Research. 2010. Т. 468. №. 4. P. 1072-1081.
8. ROBODOC Первый и единственный в мире хирургический робот для операций на коленном и тазобедренном суставах. Режим доступа: http://www.trimm.ru/news/detail.php?ELEMENT_ID=1458 (дата обращения 8.10.2014).
9. Nathoo N., Çavusoglu M. C., Vogelbaum M. A., Barnett G. H. In touch with robotics: neurosurgery for the future // Neurosurgery. 2005. Т. 56. №. 3. P. 421-433.
10. Роботизированная хирургическая система da Vinci SI (медицинский робот). Режим доступа: <http://www.mpamed.ru/maloinvazivnaya-khirurgiya/da-vinci-robot/951-da-vinci-si.htm> (дата обращения 21.10.2014).
11. Da Vinci Si Surgical System. User manual (Russian). Sunnyvale: Intuitive Surgical, 2012. 298 p.
12. EndoWrist Instrument & Accessory. Sunnyvale: Intuitive Surgical, 2013. 32 p.