**4.1.1. Цели и задачи исследований (включая взаимосвязь исследования с диссертационной работой)**

Целью работы является разработка физико-математической модели, описывающей отклонение медицинской инъекционной иглы при движении в тканях человека.

Основные решаемые задачи:

1. Расчет движения иглы в плоскости Oxy, отклонение иглы в зависимости

от поступательного движения.

2. Расчет движения иглы в трехмерном пространстве в зависимости от вращательного и поступательного движения.

3. Моделирование процесса прокола, получение изгиба иглы перед внедрением ее

в ткани (нагрузка и разгрузка иглы в процессе прокола).

4. Моделирование движения иглы через материалы различной плотности (кожа, мышцы, органы).

5. Моделирование влияния сил, создаваемых тканью при ее деформации, на поверхность иглы.

6. Моделирование деформации вязкоупругих тканей.

**4.1.2. Направление из Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации (при наличии) (выбор из справочника)**

**4.1.3. Анализ современного состояния исследований в данной области (приводится обзор исследований в данной области со ссылками на публикации в научной литературе).**

Преимущества использования роботов по сравнению с традиционными методами заключаются в том, что роботизированный манипулятор способен обеспечить практически любую требуемую точность наведения инструмента и его контролируемого силового воздействия, что позволяет рассчитывать не только на повышение качества освоенных в настоящее время операций, но и создание базиса для разработки принципиально новых хирургических технологий. Другим важным преимуществом является отсутствие прямого контакта врача с радиоактивными источниками, что позволит обезопасить медицинский персонал от сопутствующего радиационного облучения.

Из-за своих геометрических особенностей и прилагаемых нагрузок в процессе выполнения операции игла деформируется, что приводит к отклонению иглы от прямолинейного движения.

Таким образом, необходимо построить модель и создать на ее основе такой программный продукт, который позволяет прогнозировать и корректировать движение иглы при работе роботизированной системы.

Управление движением иглы осуществляется путем поворота иглы вокруг своей оси. При этом кончик иглы поворачивается, а вместе с ним и плоскость изгиба дуги, и тем самым изменяется направление дальнейшего движения. При введении иглы вдоль прямолинейной траектории ее необходимо постоянно поворачивать.

Так же рассматриваются возможности применения гибких игл [1]. Основные преимущества, которые дает применение таких игл, это возможность реализации криволинейных траекторий движения иглы в теле пациента, возможность корректировки траектории движения иглы в процессе введения, а также возможность существенного уменьшения общего объема травмированных тканей человека при проведении операций. Иглы с высокой степенью гибкости изготавливаются из специальных материалов. Для проведения операций иглы начинают делать более сложными и многофункциональными.

Для моделирования отклонения иглы при ее движении в тканях человека

в настоящее время используется достаточно большое количество подходов. В работе [2] моделирование проводилось с использованием неголономной кинематической модели. Как отмечают сами авторы, поскольку работа проводилась в первом приближении, то результаты моделирования сильно отличаются от экспериментальных.

В работе [3] математическое моделирование оптимальной криволинейной траектории движения иглы осуществлялось с помощью алгоритмов планирования траектории. Формирование траектории осуществляется с помощью координат, конфигурирующих область. Здесь выделялись те её части, которые необходимо обходить, и те части, которые могут являться возможным вариантом траектории. Выделения таких областей предлагается выполнить с помощью четырёх методов: метода потенциальных полей, метода дорожных карт, метода декомпозиционного планирования и метода координатных сеток.

В работе [4] рассматривается несколько методов для моделирования движения иглы. Первый подход – кинематический. Он описывает траекторию движения, исходя из привязки к глобальной системе координат, и предполагает, что благодаря конструктивной особенности кончика, игла будет перемещаться по круговой траектории. Для данного метода описания предполагается использование unicycle model и bicycle model. Впервые данные методы были использованы в работе [5]. Поскольку предложенные модели не учитывают взаимодействие иглы с окружающими тканями, то они пригодны для описания взаимодействия иглы с достаточно мягкими тканями.

Второй подход – механический. Он описывает систему взаимодействия сил между иглой и тканью, в которой она находится. С одной стороны, требуются силы для перемещения иглы внутри ткани, с другой стороны на тело иглы воздействуют силы трения, силы распределённой нагрузки, а в силу несимметричности кончика иглы на него также воздействует сила, оказывающая давление со стороны ткани.

Так же стоит упомянуть подходы, основанные на физике протекающих процессов при проведении данных операций. Так в работе [6] авторы так же представляли иглу в виде балки. В данной работе учитывались вязкоупругие свойства ткани, но на достаточно низком уровне, и поведение самой ткани не моделировалось.

Разработанную нами модель можно использовать для построения “MPC-регуляторов” – систем, работающих на основе предсказывающих моделей (Model predictive control).  
К примеру, в статье [7] показан ход разработки такой системы, только подход для проектирования модели использовался иной. В [7] авторы использовали уравнение Лагранжа для определения положения кончика иглы.

В работе [8] так же игла представлялась в виде балки, но для расчетов использовалась была использована конечно-элементная модель для расчета отклонения иглы. Данный подход достаточно требовательный к вычислительным мощностям. Так же важным фактором является то, что для каждой операции необходимо строить высокоточную трехмерную модель области, в которой будет проводиться операция, а также строить расчетную сетку с достаточно высокой точностью. В данной работе авторы предоставили большое количество информации о испытательной установке и проводимых экспериментах.

В последнее время данная тема стала достаточно активно исследоваться по многим причинам. Так робототехника входит во многие сферы нашей жизни и начинает помогать людям в выполнении сложных операций и управлении сложными системами. То для эффективного управления необходимо разрабатывать достаточно точные модели объектов управления, цифровые двойники.

В «классических» системах для процедур брахитерапии применяются исключительно обычные металлические прямые иглы. Исходя из этого, целесообразна разработка модели для описания отклонения стальной иглы при движении в тканях человека. В данной работе будет использован новый подход для описания сил, действующих на кончик такой иглы.

1. Seong Y.K., Luca F., Ferdinando R. Closed-Loop Planar Motion Control of a Steerable Probe with a “Programmable bevel” Inspired by Nature // Department of Mechanical Engineering, Imperial College London., UK. 2010. 970-983 pp.

2. Jienan D. et al. Medical needle steering for lung biopsy: experimental results in tissue phantoms using a robotic needle driver // Imaging Science and Information Systems (ISIS), Department of Radiology, Goergetown University Medical Center, USA. Washington, DC. 2008. № 77628.

3. Kemal F. Advanced Path Planning for a Neurosurgical Flexible Catheter // Delft University of Technology. 2012, 14–18 pp.

4. Abayazid M. et al. Integrating Deflection Models and Image Feedback for Real-Time Flexible Needle Steering // IEEE Transactions on Robotics. – 2013. – Vol. 29. – P. 542– 553.

5. Webster R. J., Kim,N. J. S., Cowan J., Chirikjian G. S., Okamura A. M., “Nonholonomic modeling of needle steering,” Int. J. Robot. Res., vol. 25, no. 5/6, 2006, pp. 509–525.

6. Mohsen K., Bita F., Carlos R. “Mechanics-based Model for Simulation and Control of Flexible Needle Insertion in Soft Tissue”, IEEE International Conference on Robotics and Automation, 05.26-30, 2015, pp 2264-2269.

7. Ivan M. Buzurovic, Slavisa Salinic, Peter F. Orio1, Paul L. Nguyen, // A novel approach to an automated needle insertion in brachytherapy procedures. International Federation for Medical and Biological Engineering 2018, 56:273–287.

8. Y. Adagolodjo, L. Goffin, M. De Mathelin, H. Courtecuisse, “Robotic Insertion of Flexible Needle in Deformable Structures Using Inverse Finite-Element Simulation”, IEEE TRANSACTIONS ON ROBOTICS, VOL. 35, NO. 3, JUNE 2019, pp 697- 708.

**4.1.4. Предлагаемые методы и подходы к решению поставленных задач (включая детальный план проводимых исследований)**

В данном проекте игла будет представлена как балка с защемленным концом в месте прокола. На кончик будут действовать различные силы при ее движении в тканях человека. Основное влияние будет оказывать сила, действующая на скошенный кончик иглы. В процессе работы предполагается моделировать данную силу несколькими способами. В первом случае предполагается использовать силу лобового сопротивления. В данном случае среду будем представлять сплошной и основным параметром среды будет ее плотность.

Во втором же случае планируется моделировать внешнюю силу как реакцию вязкоупругой среды. А именно, использовать двумерные и трех мерные модели среды и различные комбинации.

Далее представлен пошаговый план разработки моделей:

1. Разработка 2-х мерной модели с использованием силы лобового сопротивления.
2. Разработка 3-х мерной модели с использование силы лобового сопротивления.
3. Разработка 2-х мерной модели с использованием реакций вязкоупругой среды.
4. Разработка 3-х мерной модели с использованием реакций вязкоупругой среды.
5. Разработка требований для проведения экспериментов.
6. Валидация и верификация моделей.

Так же для обеспечения создания моделей и проведения достаточного количества расчетов необходимо разработать советующие программы. Данные системы разрабатываются в среде MATLAB/Simulink. Данная система предполагает быструю имплементацию предложенных алгоритмов на целевые платформы, что достаточно сильно сократит время на написание дополнительных программ и переноса алгоритмов на различные языки программирования.

В настоящее время разработана система, позволяющая использовать одни и те же алгоритмы, переведенные на язык MATLAB для параметрических расчетов, виртуальных экспериментов. В последние непосредственно входит модель манипулятора. Также данная система обеспечивает генерацию библиотек под различные платформы и использование предложенных алгоритмов в других системах. Данный подход обеспечит независимость дальнейших пользователей от среды MATLAB.

**4.1.5. Новизна исследования, заявленного в проекте (формулируется новая научная идея, обосновывается новизна предлагаемой постановки и решения заявленной проблемы)**

Новизна исследования заключается, в отличие от известных, в представлении медицинской инъекционной иглы как балки с защемленным концом в месте прокола. При этом расчёт силы, воздействующей на кончик иглы, представляется различными способами: через силу лобового сопротивления и вязкоупругие свойства ткани человека.

В рассмотренных системах исследователи не уделяли внимания аппаратной имплементации моделей, не исследовали взаимодействие иглы с тканью человека. Использовали классические подходы для решения задач динамики и кинематики кончика иглы.

В данном проекте будет использован новый подход для определения отклонения иглы от прямолинейного движения, а также различными способами представлены силы, действующие на кончик иглы.

Данный подход может обеспечить достаточно большие перспективы для продолжения развития данного проекта в плане обеспечения моделирования поведения ткани при проведении операций.

**4.1.6. Ожидаемые по окончании проекта научные результаты**

Будет разработана физико-математическая модель, описывающая отклонение медицинской инъекционной иглы при движениях в тканях человека. Будут проведены параметрические вычисления. Результаты моделирования будут сравниваться с данными экспериментов. Так же будут проведены виртуальные эксперименты с использованием моделей манипуляторов.

Разработанная физико-математическая модель позволит повысить эффективность проводимых операций, снизить количество проколов, понизить травмируемость пациента.

Результаты данного проекта могут быть использованы в различных системах управления в медицинской робототехнике, где будет необходимо управление и точное позиционирование кончика иглы. В настоящем проекте будем рассматривать малоинвазивную операцию брахитерапии, которая проводиться для лечения рака предстательной железы (РПЖ) посредством внедрения микро-источников радиоизлучения в предстательную железу максимально близко к опухоли.

**-----------------------------------------**

Будет разработана физико-математическая модель,

проведены параметрические исследования

Будет проведено сравнение результаты моделирования с экспериментальными данными.

**4.2.1. Научный задел Научного руководителя по тематике проекта**

**4.2.2. Педагогический задел Научного руководителя (обязательно указать, количество аспирантов, из них – количество защитивших диссертацию; количество докторов)**

текущие – 3

защитившиеся -2

докторов - 0

**4.2.3. Список основных публикаций Научного руководителя в рецензируемых журналах (не менее 5)**

**4.3.1. Название диссертационной работы Аспиранта**

Модель деформируемого объекта управления

**4.3.2. Основные цели и задачи диссертационного исследования**

Целью работы является разработка физико-математической модели, описывающей отклонение медицинской инъекционной иглы при движении в тканях человека.

Основные решаемые задачи:

1. Расчет движения иглы в плоскости Oxy, отклонение иглы в зависимости

от поступательного движения.

2. Расчет движения иглы в трехмерном пространстве в зависимости от вращательного и поступательного движения.

3. Моделирование процесса прокола, получение изгиба иглы перед внедрением ее

в ткани (нагрузка и разгрузка иглы в процессе прокола).

4. Моделирование движения иглы через материалы различной плотности (кожа, мышцы, органы).

5. Моделирование влияния сил, создаваемых тканью при ее деформации, на поверхность иглы.

6. Моделирование деформации вязкоупругих тканей.

**4.3.3. Список основных (не более 5) публикаций Аспиранта в рецензируемых журналах**

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| № | Вид публикации | Название проводящей организации/издания | Название доклада/статьи | Авторы |
| 2 | Журнал ВАК | ЦНИИ РТК | «Мониторинг герметичности космического аппарата», «Робототехника и техническая кибернетика» | В.А. Гапонов, Л.Н. Розанов, Д.В. Ратушный, В.Г. Дружинин, |
| 10 | Журнал Scopuse | Росийский журнал Биомеханики | МОДЕЛЬ ОТКЛОНЕНИЯ МЕДИЦИНСКОЙ ИГЛЫ ПРИ ДВИЖЕНИИ В ТКАНЯХ ЧЕЛОВЕКА | Дружинин В.Г., Морозов В.А., Никитин С.А., Харламов В.В. |

**4.3.4. Научный задел Аспиранта по тематике проекта (необходимо указать сколько выступлений на конференциях; список всех публикаций; прочие достижения (премии, награды*, гранты*))**

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 1 | Сборник тезисов | Харьковский национальный университет имени В.Н.Каразина, «Современные проблемы математики и ее приложения в естественных науках и информационных технологиях» | Модель деформируемого объекта управления | Дружинин В.Г. |
| 2 | Сборник тезисов | XIV Международную конференцию «Комплексная безопасность и физическая защита». | Система моделирования движения иглы в тканях человека при про- веденнии операций с помощью робототехнических систем | Дружинин В.Г., Морозов В.А., Никитин С.А., Харламов В.В. |
| 3 | Журнал Scopuse | Российский журнал Биомеханики | МОДЕЛЬ ОТКЛОНЕНИЯ МЕДИЦИНСКОЙ ИГЛЫ ПРИ ДВИЖЕНИИ В ТКАНЯХ ЧЕЛОВЕКА | Дружинин В.Г., Морозов В.А., Никитин С.А., Харламов В.В. |
| 4 | Сборник тезисов | Конференция «Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики» 2018 | МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ИГЛЫ В ТКАНИ ЧЕЛОВЕКА | Дружинин В.Г. |
| 5 | Сборник тезисов | XII Всероссийская научная конференция молодых ученых «НАУКА. ТЕХНОЛОГИИ. ИННОВАЦИИ» | Модель объекта управления для робототехнической системы медицинского назначения | Дружинин В.Г. |
| 6 | Сборник тезисов | СПИСОК-2019 Всероссийская научная конференция по проблемам информатики | ОПИСАНИЕ ОТКЛОНЕНИЯ МЕДИЦИНСКОЙ ИГЛЫ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ОПЕРАЦИЙ | Дружинин В.Г. |

**Указать грант**