

© Коллектив авторов, 2017
УДК 616.65-006.6-089

Н. А. Грязнов, Г. С. Киреева, В. В. Харламов, К. Ю. Сенчик,
Д. В. Новицкий, С. А. Никитин

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ОРИГИНАЛЬНОЙ РОБОТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ БРАХИТЕРАПИИ РАКА ПРЕДСТАТЕЛЬНОЙ ЖЕЛЕЗЫ

Федеральное государственное автономное научное учреждение «Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики»
(дир. — канд. эконом. наук А. В. Лопота), Санкт-Петербург

Цель исследования — оценка погрешности позиционирования иглы для брахитерапии при введении с помощью разработанной оригинальной роботизированной системы «Онкоробот» (ЦНИИ РТК, Санкт-Петербург) в сравнении с традиционными методиками и техническими средствами. Для экспериментов был использован фантом предстательной железы. По координатам дозиметрического плана расположения микроисточников составляли программу по введению иглы в фантом. После каждого введения иглы проводили измерения координат местоположения ее кончика и рассчитывали среднеквадратическую погрешность. По итогам эксперимента погрешность позиционирования кончика иглы в фантоме при линейной скорости введения от 3,0 до 30,0 мм/с не превысила 0,5 мм. Величина погрешности возрастала с увеличением скорости введения иглы в фантом. Точность введения иглы с помощью разработанной роботизированной системы значительно выше, чем при проведении брахитерапии в ручном режиме, и сопоставима со значениями, описанными для других роботизированных систем.

Ключевые слова: брахитерапия, рак предстательной железы, роботизированная система

N. A. Gryaznov, G. S. Kireeva, V. V. Kharlamov, K. Yu. Senchik, D. V. Novitskiy, S. A. Nikitin

PROSPECTS OF APPLICATION OF ORIGINAL MULTIROBOTIC SYSTEM FOR BRACHYTHERAPY OF PROSTATE CANCER

Central Research Institute of Robotic and Technical Cybernetics, St. Petersburg

The authors analyzed the positioning error for brachytherapy needle inserted with original robotic system «Oncorobot» (Central Research Institute of Robotic And Technical Cybernetics, St. Petersburg) compared with traditional methods of insertion and other technical systems. The gelatin phantom of prostate gland was used for experiments. Needle insertion robotic program was written according to coordinates of dosimetric plan of microsource localization. A coordinate of the needle tip location was measured after each injection of the needle into phantom and the mean-square error was calculated. It was shown that needle tip positioning error wasn't more than 0,5 mm at insertion speeds from 3,0 to 30,00 mm/sec. Positioning error enlarged with increase of insertion speed. Needle positioning accuracy of insertion was significantly higher in case of developed robotic system, than in manual brachytherapy. The accuracy indices of the system were correlated with other described robotic systems.

Key words: brachytherapy, prostatic cancer, robotic system

Введение. Брахитерапия является одним из наиболее эффективных методов лечения локализованного рака предстательной железы. Данный метод заключается в имплантации радиоактивных микроисточников в предстательную железу с помощью полых игл и традиционно осуществляется врачом вручную. Это обуславливает ряд недостатков [5, 8]:

- использование фиксированного шаблона для введения игл, что ограничивает маневренность;
- сложность введения иглы под углом в случае необходимости;
- при дозиметрическом планировании не учитываются факторы движения и деформации предстательной железы и кровотока, которые имеют место при введении игл;

- влияние человеческого фактора на постоянство, точность и эффективность проведения процедуры.

Эффективность брахитерапии в первую очередь зависит от равномерного распределения дозы облучения, которое достигается за счет точного расположения микроисточников в соответствии с планом операции. Любое смещение микроисточника от заданного положения при имплантации приводит к негативным эффектам. Так, было показано, что смещение микроисточника на расстояние более чем 0,5 см от заданного местоположения может приводить к переоблучению и повреждению здоровых тканей [7]. Более того, план операции должен меняться в режиме реального времени, поскольку при введении игл происходят деформация и смещение предстательной железы и прилежащих органов [1]. Все вышесказанное обуславливает все большую актуальность разработки роботизированных систем для проведения процедуры брахитерапии.

Материал и методы. Для проведения эксперимента была использована роботизированная система для брахитерапии («Онкоробот»), разработанная в «Центральном научно-исследовательском институте робототехники и технической кибернетики» (Санкт-Петербург). В состав системы входят: 1 — робот-манипулятор с 6 степенями подвижности; 2 — устройство перемещения игл (УПИ) с двумя степенями подвижности — вращательной и поступательной;

3 — ультразвуковой сканер с трансректальным биплановым датчиком; 4 — система позиционирования ультразвукового сканера; 5 — система управления, сопряженная с ультразвуковым сканером; 6 — фантом предстательной железы (рис. 1).

Исходными данными для исследования являлся дозиметрический план расположения микроисточников с заданными трёхмерными координатами расположения микроисточников в фантоме предстательной железы. По данным координатам для робота составляли программу по введению иглы в фантом. После каждого введения иглы проводили измерения координат местоположения ее кончика и рассчитывали среднеквадратическую погрешность. Измерение координат точек, соответствующих местоположению кончика иглы в фантоме предстательной железы, осуществляли в режиме реального времени по данным с канала обратной связи ультразвукового датчика и регистрировали в системе управления робота. Скорость движения иглы находилась в диапазоне от 3,0 до 30,0 мм/с с шагом 3 мм/с, глубина введения в фантом составляла 100 мм. В качестве фантома предстательной железы использовали пищевой желатин с коэффициентом затухания 0,5 дБ/см/МГц и скоростью распространения звука 1540 м/с, что максимально приближает данный фантом по акустическим свойствам к предстательной железе [2]. Для исследований использовали стандартную медицинскую инъекционную иглу для брахитерапии с симметричным кончиком. Визуализацию траектории движения иглы в режиме реального времени осуществляли с помощью ультразвукового сканера с трансректальным биплановым датчиком. Все расчеты по определению реальных координат кончика иглы при ее введении в фантом производили в программе, написанной специально для данной роботизированной системы.



Рис. 1. Схема экспериментального стенда с разработанной роботизированной системой для брахитерапии (объяснения в тексте)

Таблица 1

**Обработка результатов эксперимента
по измерению погрешности позиционирования
кончика иглы в фантоме мягких тканей пациента
при перемещении по линейной траектории
движения (глубина инъекции — 100 мм)**

№	Линейная скорость инъекции (мм/с)	Среднее арифметическое величины погрешности позиционирования кончика иглы (мм)
1	3,0	0,15±0,08
2	6,0	0,20±0,06
3	9,0	0,25±0,07
4	12,0	0,31±0,05
5	15,0	0,36±0,04
6	18,0	0,41±0,03
7	21,0	0,42±0,04
8	24,0	0,44±0,04
9	27,0	0,47±0,03
10	30,0	0,49±0,03

Результаты. Обобщенные данные, полученные в ходе эксперимента для точки с координатами $X=100,0$ мм, $Y=30,0$ мм, $Z=40,0$ мм, представлены в *табл. 1*.

Исходя из полученных данных, можно сделать вывод о том, что погрешность позиционирования кончика иглы в фантоме мягких тканей пациента при линейной скорости инъекции от 3 до 30 мм/с и глубине инъекции иглы 100 мм лежит в диапазоне от $(0,15\pm 0,08)$ до $(0,49\pm 0,03)$ мм. Таким образом, погрешность позиционирования иглы для брахитерапии при введении в фантом предстательной железы с помощью разработанной роботизированной системы не превышает 0,5 мм. Также на основании результатов эксперимента по измерению погрешности позиционирования кончика иглы в фантоме мягких тканей пациента при реализации линейной траектории движения иглы при угловой скорости 4 рад/с построен график зависимости (*рис. 2*).

Из графика видно, что погрешность позиционирования кончика иглы с ростом линейной скорости инъекции от 3 до 30 мм/с увеличилась в 5 раз.

Обсуждение. На сегодняшний день в литературе описаны достаточно большое количество роботизированных систем для проведения брахитерапии, находящихся на разных стадиях разработки и испытаний [9]. Наиболее известные из них представлены в *табл. 2*. При этом стоит отметить, что только 2 системы были апробированы и применяются у пациентов с раком предстательной железы [3, 13].

При стандартном выполнении брахитерапии у пациентов в ручном режиме средняя ошибка позиционирования иглы в предстательной железе составляет около 2,1 мм, 95% всех ошибок размещения иглы составляют менее 4,0 мм, а максимальная ошибка — около 4,4 мм [11]. Согласно другим данным, точность позиционирования кончика иглы в системах для внутритканевой брахитерапии в ручном режиме под ультразвуковой навигацией составляет от 2 до 3 мм [10]. Поскольку качество имплантации микроисточников напрямую зависит от позиционирования игл, их любые отклонения от заданной траектории и целевой точки в предстательной железе могут привести к тому, что опухоль не получит необходимую дозу облучения, тогда как здоровые органы и ткани, наоборот, окажутся под влиянием высоких доз радиации [4, 6, 12]. Для роботизированных

систем точность позиционирования кончика иглы в фантоме или предстательной железе пациента значительно выше, чем для ручного режима (см. *табл. 2*), причем для тех, которые уже используются в клинической практике, погрешность позиционирования микроисточников составляет не более 1 мм. В нашем экспериментальном исследовании мы продемонстрировали, что разработанная оригинальная роботизированная система для брахитерапии обеспечивает погрешность позиционирования кончика иглы, которая не превышает 0,5 мм, что сопоставимо с цифрами, которые опубликованы в литературе для других роботизированных систем аналогичного



Рис. 2. График зависимости погрешности позиционирования кончика иглы в фантоме мягких тканей пациента от линейной скорости введения иглы

Таблица 2

Характеристика некоторых роботизированных систем для брахитерапии

Название системы	Тип исследования	Точность позиционирования кончика иглы в фантоме (мм)	Введение иглы	Позиционирование микроисточника
«FIRST Elekta-Nucletron»	Фантомное/клиническое	< 0,5	Ручное	Автономное
«EUCLIDIAN TJU»	Фантомное/клиническое	< 0,5	Автономное	Автономное
«MIRAB TJU»	Фантомное	< 0,5	Автономное	Автономное
«JHU1-robot1»	Фантомное	1,04	Ручное	Ручное
«CHUG»	Фантомное	1,0	Ручное	Ручное
«RRI»	Фантомное	0,9	Ручное	Ручное

назначения [9]. Также в ходе исследования установлено, что важным фактором, определяющим точность при введении иглы в фантом, является линейная скорость введения. В ходе дальнейших исследований будет установлена скорость, обеспечивающая оптимальное соотношение между точностью позиционирования иглы и длительностью процедуры.

За последние 10 лет произошел значительный прорыв в направлении автоматизации процедуры брахитерапии. Разрабатываемые роботизированные системы направлены на увеличение точности позиционирования микроисточников, совершенствование дозиметрического планирования для оптимального расположения микроисточников, снижение операционной травмы, уменьшение воздействия облучения на медицинский персонал. Тем не менее, большинство разработок находятся на ранних стадиях технических или доклинических испытаний и неизвестно, какое количество из них дойдет до этапа клинических испытаний. Роботизированную систему, разработанную в Центральном научно-исследовательском институте робототехники и технической кибернетики, также в настоящее время изучают в экспериментальных исследованиях. Проводят экспериментальные исследования по апробации макета роботизированной системы для осуществления операций по наведению инструмента на оперируемую область, перемещению игл по линейной и криволинейной траекториям, а также по введению моделей радионуклидных микроисточников в фантом тела пациента. Кроме того, разрабатывают программное обеспечение, позволяющее применять систему не только для процедуры брахитерапии, но также для проведения биопсии под ультразвуковой навигацией. Учитывая, что точность позиционирования иглы в заданной точке весьма высокая, что было показано в ходе экспериментальных исследований, актуальным является исследование возможностей применения разработанной роботизированной системы для других

медицинских процедур, в которых точность введения иглы является определяющим фактором эффективности (например биопсия).

Выводы. 1. В оригинальной роботизированной системе для брахитерапии величина погрешности позиционирования кончика иглы в фантоме мягких тканей не превышает 0,5 мм, что значительно меньше величины погрешности при проведении брахитерапии в ручном режиме.

2. Точность позиционирования иглы снижается при увеличении линейной скорости введения.

3. Полученные результаты демонстрируют значительный потенциал роботизированной системы не только при использовании для брахитерапии, но и для проведения биопсии солидных опухолей.

Статья подготовлена при финансовой поддержке Минобрнауки в ходе выполнения работ по Соглашению от 27.06.2014 г. № 14.575.21.0035 RFMEFI57514X0035 о предоставлении субсидии в целях реализации Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технического комплекса России на 2014–2020 годы».

ЛИТЕРАТУРА [REFERENCE]

1. Лопота А.В., Сенчик К.Ю., Грязнов Н.А. и др. Роботизированные системы для проведения брахитерапии при раке предстательной железы // Вестн. хир. 2016. № 1. С. 118–122 [Lopota A.V., Senchik K.Y., Gryaznov N.A. et al. Robotizirovannye sistemy dlya provedeniya brakhiterapii pri rake predstatel'noy zhelezy // Vestn. khir. 2016. № 1. P. 118–122].
2. Fichtinger G., Burdette E.C., Tanacs A. et al. Robotically assisted prostate brachytherapy with transrectal ultrasound guidance — Phantom experiments // Brachytherapy. 2006. Vol. 5. P. 14–26.
3. Fichtinger G., Fiene J.P., Kennedy C.W. et al. Robotic assistance for ultrasound-guided prostate brachytherapy // Med. Image Anal. 2008. Vol. 12. P. 535–545.
4. Ghadjar P., Gwerder N., Madlung A. et al. Use of gold markers for setup in image-guided fractionated high-dose-rate brachytherapy as a monotherapy for prostate cancer // Strahlenther. Onkol. 2009. Vol. 185. P. 731–735.
5. Gryaznov N.A., Senchik K.Y., Velichko O.V. et al. Robotic systems for prostate cancer brachytherapy (robot-assisted systems) // Ind. J. Sci. Technol. 2015. Vol. 8. P. 1–6.

6. Jacobs H. Experiences with interstitial HDR afterloading therapy in genital and breast cancer // *Sonderb. Strahlenther. Onkol.* 1988. Vol. 82. P. 258–262.
7. Kuznetsov M.A. Dosimetric and radiation-hygienic maintenance of prostate cancer brachytherapy with sealed radionuclide sources // *Vestn. Mosc. Univ.* 2013. P. 91–104.
8. Lopota A.V., Gryaznov N.A., Velichko O.V. et al. The existing methods for motion control of flexible needles along a curved path as part of robotic systems for brachytherapy // *Am. J. Appl. Sci.* 2015. Vol. 13. P. 73–79.
9. Podder T.K., Beaulieu L., Caldwell B. et al. AAPM and GEC-ESTRO guidelines for image-guided robotic brachytherapy: report of task group 192 // *Med. Phys.* 2014. Vol. 41. P. 1–27.
10. Stone N.N., Roy J., Hong S. et al. Prostate gland motion and deformation caused by needle placement during brachytherapy // *Brachytherapy.* 2002. Vol. 1. P. 154–160.
11. Susil R.C., Camphausen K., Choyke P. et al. System for prostate brachytherapy and biopsy in a standard 1,5 T MRI scanner // *Magn. Reson. Med.* 2004. Vol. 52. P. 683–687.
12. van den Bergh F., Meertens H., Moonen L. et al. The use of a transverse CT image for the estimation of the dose given to the rectum in intracavitary brachytherapy for carcinoma of the cervix // *Radiother. Oncol.* 1998. Vol. 47. P. 85–90.
13. van den Bosch M.R., Moman M.R., van Vulpen M. et al. MRI-guided robotics system for transperineal prostate interventions: proof of principle // *Phys. Med. Biol.* 2010. Vol. 55. P. 133–140.

Поступила в редакцию 19.10.2016 г.

Сведения об авторах:

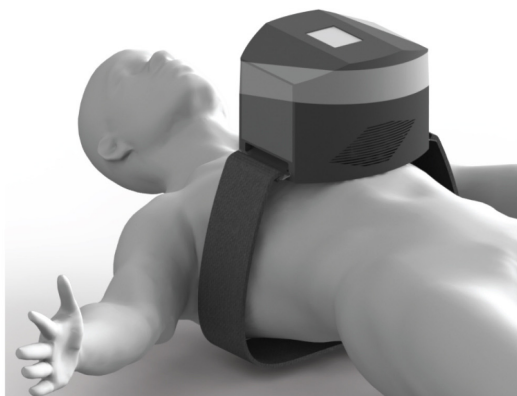
Грязнов Николай Анатольевич (e-mail: gna@rtc.ru), зам. по науч. работе; Киреева Галина Сергеевна (e-mail: galinakireyeva@mail.ru), канд. биол. наук, мл. науч. сотр.; Харламов Вячеслав Валентинович (e-mail: sl@rtc.ru), нач. 6-го отдела; Сенчик Константин Юрьевич (e-mail: k-yurivich@bk.ru), д-р мед. наук, глав. науч. сотр. 6-го отдела; Новицкий Дмитрий Вадимович (e-mail: kira_9_1@mail.ru), программист I категории в 6-м отделе; Никитин Сергей Александрович (e-mail: s.nikitin@rtc.ru), нач. лаб. мед. техн., Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики, 194064, Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., 21



Государственный научный центр Российской Федерации
Федеральное государственное автономное научное учреждение
"Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники
и технической кибернетики" (ЦНИИ РТК)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ ОБРАЗЕЦ РОБОТИЗИРОВАННОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ НЕПРЯМОГО МАССАЖА СЕРДЦА

Предназначен для замены ручного массажа сердца при выполнении процедуры
сердечно-легочной реанимации



Преимущества

- глубина компрессии грудной клетки в диапазоне 3–6 см;
- частота компрессии до 120 компр./мин;
- время работы в автономном режиме до 45 мин;
- наличие адаптивного режима подстройки параметров компрессии;
- защита от перелома ребер;
- максимально быстрая установка на пациента - менее 1 мин.

194064, Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., 21 • Тел.: (812) 552-01-00, e-mail: rtc@rtc.ru, rtc.ru
Лаборатория "Медицинской техники" • Тел.: (812) 556-33-51, e-mail: v.harlamov@rtc.ru