

ISSN 2500-316X (Online)

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-1-73-78>



УДК 615.471

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Фантом для контроля процесса термоабляции

В.Н. Макаров[@],
Д.В. Шмелева,
Н.А. Боос

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва 119454, Россия

[@]Автор для переписки, e-mail: makarov_vn@bk.ru

Медицинское оборудование в силу своей специфики требует точной наладки и проверки. Поэтому перед непосредственным воздействием на организм человека оборудование испытывается на специализированных макетах ткани человека – фантомах. Физико-химические характеристики фантомов должны быть близки к характеристикам выбранной биологической ткани. В зависимости от поставленной задачи структура самого фантома и его свойства будут различны. Целью работы являлось создание фантома, наглядно демонстрирующего распределение теплового поля в объеме при нагреве с сохранением картины нагрева на протяжении нескольких часов. Исследования проводились на экспериментальном стенде, который состоит из установки для радиочастотной абляции тканей «МЕТАТОМ-3» с набором электродов, тепловизора, а также штатива для их фиксации. Для сравнения имитаторов биологической ткани использовались печень свиньи и картофель. Лучшие результаты были получены при воздействии на картофель. В месте нагрева происходило объемное изменение структуры растительной ткани, позволяющее оценивать эффекты термического воздействия. Размеры теплового поля были аналогичны полям, полученным на животной ткани. Получаемые картины теплового поля достоверны и сохраняются на протяжении нескольких часов. Эксперименты показали эффективность и статистическую достоверность такого фантома. Проведенные исследования различных одноэлектродных и многоэлектродных систем позволяют рекомендовать данный фантом для внедрения в процесс разработки радиочастотных и микроволновых систем абляции.

Ключевые слова: фантом, имитатор ткани, тепловое поле, медицинское оборудование, абляция, нагрев биоткани

Для цитирования: Макаров В.Н., Шмелева Д.В., Боос Н.А. Фантом для контроля процесса термоабляции. *Российский технологический журнал*. 2021;9(1):73–78. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-1-73-78>

RESEARCH ARTICLE

Phantom to control the thermal ablation process

Valeriy N. Makarov@,
Dina V. Shmeliova,
Nikita A. Boos

MIREA – Russian Technological University, Moscow 119454, Russia
@Corresponding author, e-mail: makarov_vn@bk.ru

Medical equipment, due to its specificity, requires precise adjustment and testing. Therefore, before direct exposure to a human organism, the equipment is tested on specialized mock-ups of human tissue – phantoms. The physicochemical characteristics of phantoms should be close to the characteristics of the selected biological tissue. Depending on the task at hand, the design of the phantom itself and its properties will be different. The aim of this work is to create a phantom that clearly demonstrates the distribution of the thermal field in the volume during heating while maintaining the heating pattern for several hours. The studies were carried out on an experimental stand, which contained a device for radio frequency ablation of tissues “METATOM-3” with a set of electrodes, a thermal imager, and a tripod for fixing the electrodes. Animal tissue (pig liver) and plant tissue (potatoes) were used as biological tissue simulators. The most suitable imitator turned out to be potatoes, because the electrophysical parameters of potatoes are close to those of the human parenchymal organs. Thermal exposure of potatoes at 58–62°C leads to changes in the starch characteristics: the appearance of a fine-crystalline structure filled with water from the surrounding space is observed. As a result, volumetric changes in the structure of plant tissue appear at the place of heating, which makes it possible to evaluate the results of thermal exposure. To form a clearer thermogram, part of the potato is cut off. In general, potatoes have a narrow temperature range of reaction in the range of 58–62°C, which conveniently coincides with the temperature of cell death (60°C). The experiments carried out show the effectiveness of such a phantom. The obtained pictures of thermal field are reliable and persist for several hours. Experimental studies of various single-electrode and multi-electrode systems provide ground for recommending this phantom for the practice of developing radio-frequency and microwave ablation systems.

Keywords: phantom, tissue simulator, thermal field, medical equipment, ablation, heating of biological tissue

For citation: Makarov V.N., Shmeliova D.V., Boos N.A. Phantom to control the thermal ablation process. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal = Russian Technological Journal*. 2021;9(1):73–78 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500316X-2021-9-1-73-78>

Введение

Медицинское оборудование является отдельным классом приборного оборудования в силу своей специфической области применения. К нему предъявляются повышенные требования. Запрещается использование приборов без предварительных испытаний. Поэтому перед непосредственным воздействием на организм человека оборудование испытывается на специализированных макетах ткани человека – фантомах.

Физико-химические характеристики фантомов должны быть близки к характеристикам выбранной биологической ткани. В зависимости от поставлен-

ной задачи структура самого фантома и его свойства будут различны.

Методика проведения испытаний оборудования на фантомах биоткани применяется во многих областях. Каждый тип фантома соответствует специфической задаче, стоящей перед конкретным медицинским прибором. Так, например, фантомы, применяемые в ультразвуковой аппаратуре, обычно представляют собой многослойные структуры, состоящие из нескольких слоев гелеобразного материала [1]. Помимо этого, в их состав с целью имитации ослабления ультразвуковой волны могут быть добавлены мелкие стеклянные шарики, количество которых может быть изменено в зависимости от не-

обходимых требований. Также можно использовать более крупные стеклянные шарики, чтобы регулировать коэффициент обратного рассеяния ультразвука без значительного влияния на коэффициент ослабления излучаемых волн. Материал, имитирующий ткань мышцы, может иметь более мелкие стеклянные шарики и более высокую концентрацию гелеобразного материала, чем другие слои фантома. В работе [2] описан фантом ткани, состоящий из термически необратимого геля. В геле содержится два типа капель жидкости. Первый тип капель имеет средний диаметр частиц 0.5 мкм или менее, второй тип имеет средний диаметр частиц от 0.5 до 20 мкм. При ультразвуковом воздействии капли жидкости первого и второго типов переходят из жидкой фазы в газовую, что имитирует артефакты и пузырьки воздуха при реальной процедуре ультразвукового исследования (УЗИ). Примером использования высоких технологий при создании фантома биоткани может служить фантом для лазерного нагрева с использованием наночастиц в своем составе [3]. При нагреве меняются оптические свойства биоткани. Изменяя концентрацию рассеивающих частиц в фантоме, можно легко подобрать состав для любого типа биологической ткани. Преимуществом такого фантома является наглядная демонстрация процесса нагрева, создаваемого теплового поля и его температуры. К числу его недостатков можно отнести отсутствие реакции на температуру ниже пороговой, необходимой для начала изменения цвета чувствительного слоя.

Радиочастотная абляция (РЧА) и микроволновая абляция (МВА) относятся к методам термической деструкции. Принцип их действия основан на воздействии высокими температурами (60–130 °C). В связи с этим фантомы, создаваемые для испытания оборудования, должны соответствовать биологическим тканям, в первую очередь, своей реакцией на нагрев и распределение теплового поля. В широком смысле фантом для РЧА или МВА – это фантом, достоверно имитирующий последствия теплового воздействия. В качестве материала для него используются жидкие, гелеобразные [4, 5] и твердые [6] термоиндикаторные составы, которые реагируют на изменение температуры путем изменения окраски. Интерес представляет фантом для радиочастотной абляции, имеющий в своем составе жидкие кристаллы для индикации [7]. Фантом является трехслойной структурой. Первый слой состоит из прозрачного полиакриламидного геля. Второй состоит из термохромных жидких кристаллов, изменяющих цвет при термическом воздействии. Температурный диапазон реакции составляет от –30 до 120 °C. Третий слой эквивалентен по своему составу первому. Для исследования распределения теплового поля в предстательной железе при трансректальном воздействии был создан фантом, представля-

ющий собой желатиновую форму, обернутую в ткань свиного кишечника [8].

На практике в качестве фантомов для тепловой абляции чаще всего применяются части органов животных. Для увеличения достоверности ткани иногда размещаются в физрастворе. Преимуществом такой методики является крайне низкая стоимость необходимых материалов, однако важно учитывать, что конкретный образец ткани животного обладает своими специфическими свойствами. Использование таких тканей может привести к значительным изменениям результатов из-за неоднородности образцов и субъективной интерпретации результатов, т.е. может отсутствовать возможность получения статистически достоверного результата. Помимо этого, эффективность абляционной терапии с применением методов, использующих животные ткани может быть оценена только после разрезания, окрашивания и субъективного наблюдения. Все эти факторы могут усложнить тестирование новых абляционных устройств и методов.

К общим недостаткам указанных фантомов для абляции относится невозможность сохранения четкой картины нагрева в случае использования жидких фантомов и широкий температурный диапазон используемых реакций, не позволяющий четко определить минимальную границу некроза и ее положение в фантоме. В случае использования фантомов из животной ткани появляется проблема воспроизводимости полученных результатов из-за неравномерности структуры ткани.

Целью данной работы являлось создание фантома биоткани для отработки возможных конструкций многоэлектродных систем, позволяющих получить максимально возможный объем деструкции при минимальном времени нагрева.

Материалы и методы

Исследования проводились на экспериментальном стенде, в состав которого входили установка для радиочастотной абляции тканей «МЕТАТОМ-3» с набором электродов, тепловизор FLIR и штатив для их закрепления (рис. 1).

В качестве имитатора биообъектов использовались поролон, помещенный в физиологический раствор, свиная или говяжья печень и клубни картофеля.

Использование поролона в качестве имитатора позволяло исследовать в широких диапазоне значений влияние первичного импеданса на процесс нагрева. Однако для представления общей картины нагрева требовалось введение дополнительных термодатчиков по периметру нагреваемой области. Печень при ее нагреве позволяет получить объемную цветную картину теплового поля, но из-за «расплавания» поля на границе трудно установить получаемый объем коагуляции.



Рис. 1. Внешний вид испытательного стенда: а – фантом с введенной в него электродной системой; б – тепловизор, фиксирующий температуру на срезе картофеля; в – многофункциональная радиочастотная система «МЕТАТОМ-3» с ноутбуком, фиксирующим результаты измерений.

При работе с клубнями картофеля алгоритм испытаний заключался во введении активных игольчатых электродов в клубень и отслеживании распределения температуры и ее точных значений с помощью тепловизионного устройства контроля. При этом, в случае работы установки в монополярном режиме, к противоположной от активного электрода стороне прикладывался пассивный электрод, а в биполярном режиме пассивный электрод отсутствовал. Важно отметить, что испытания проводились с различными системами электродов – это могут быть как одиночные активные игольчатые электроды (в случае монополярной радиочастотной или микроволновой абляции), так и многоэлектродные системы с двумя и более электродами.

Результаты экспериментов

Наиболее подходящим имитатором биоткани оказался картофель, электрофизические параметры которого близки к параметрам паренхиматозных органов человека [9]. В месте нагрева происходило объемное изменение структуры растительной ткани, позволяющее оценивать эффекты термического воздействия (рис. 2).

Во время нагрева при температурах в интервале 58–62 °С в картофеле наблюдались изменения физико-химических характеристик крахмала [10], что приводило к появлению мелкокристаллической структуры, которая заполнялась водой из окружающего пространства. В результате в месте нагрева появляется объемное изменение структуры растительной ткани, позволяющее оценивать результаты термического воздействия.

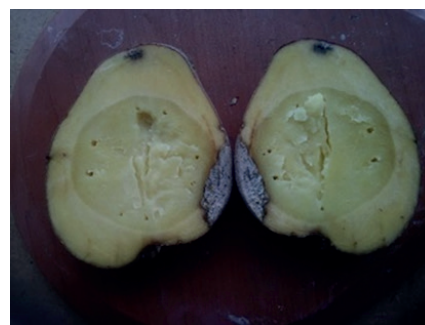


Рис. 2. Фотография среза картофеля после термического воздействия 8-ю электродами. Картина нагрева сохраняется в течение суток.

Картофель является удобным объектом для исследования тепловых полей, т.к. плотность, теплоемкость и теплопроводность его растительной ткани близки к параметрам печени человека. Сравнительные результаты нагрева печени и картофеля, полученные при одной и той же мощности, показаны на рис. 3. Как видно из рисунка, нагрев носит кольцевой характер, но картина получаемого теплового поля на картофеле более четко визуализирована. Воспроизводимость результатов нагрева на картофеле является весьма высокой в отличие от печени, где изменение места ввода электродов может привести к совершенно другой картине поля. Кроме того, на таком имитаторе легко получить послойную картину теплового нагрева, которая сохраняется длительное время. В дальнейших исследованиях предпочтение отдавалось имитаторам из картофеля в силу высокой однородности растительной массы по сравнению с печенью.

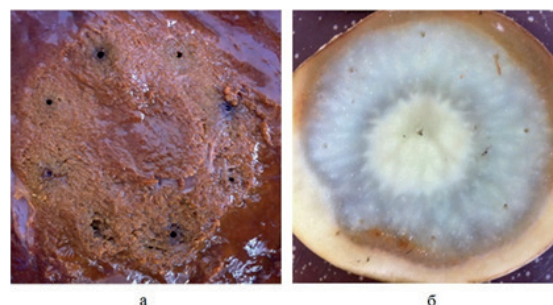


Рис. 3. Результаты сравнительных экспериментов по нагреву имитаторов однорядной системой из 8-ми электродов в биполярном режиме: а – животная ткань (печень свиньи) и б – растительная ткань (картофель).

В отличие от фантома животного происхождения (печень свиньи, рис. 3а), растительный фантом (рис. 3б) демонстрирует четкую картину границы теплового поля, позволяющую подбирать мощность и время нагрева.

Примеры использования фантома при исследовании характеристик нагрева различными системами приведены на рис. 4.

Так, при исследовании однорядных электродных систем с разным количеством электродов (4, 6, 8) на-

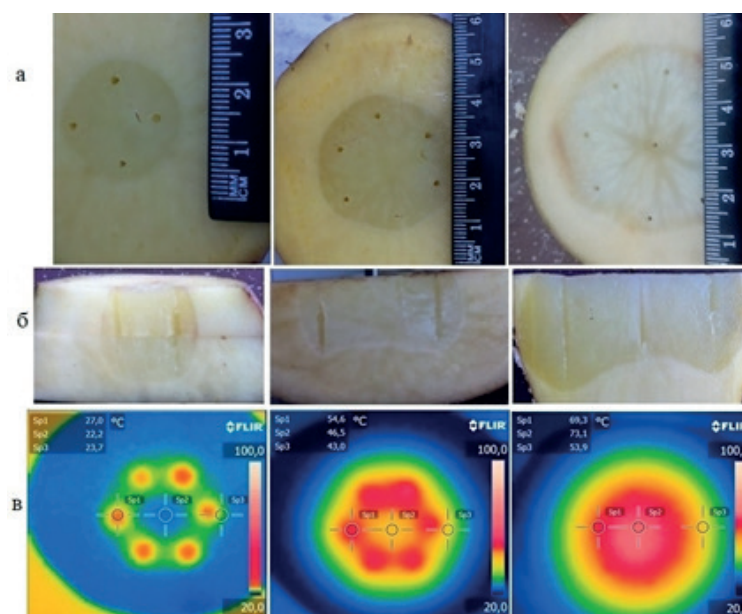


Рис. 4. Срезы картин нагрева, полученные с помощью растительного фантома:
а – горизонтальные, б – вертикальные; в – термограммы нагрева картофеля шестиэлектродной системой.

блюдалось увеличение размера теплового поля при сохранении одного и того же расстояния между электродами (рис. 4а). Одновременно с этим наблюдалось увеличение глубины нагрева (рис. 4б). Данный фантом позволяет также измерять температуру по сечению фантома. На рис. 4в показано изменение теплового поля во времени, позволяющее судить о равномерности нагрева шестиэлектродной системой.

Таким образом, фантом является эффективным средством при определении равномерности теплового нагрева, распределения теплового поля по вертикальным и горизонтальным сечениям и возможной оценки объема теплового поля и времени процедуры.

Заключение

Фантом из картофеля наглядно демонстрирует распределение теплового поля в объеме при нагреве, при этом картина нагрева сохраняется на протяжении нескольких часов. Он имеет низкую стоимость и прост в использовании. Совпадение свойств картофеля со свойствами паренхиматоз-

ных органов человека делают такой имитатор перспективной альтернативой для испытания оборудования локальной термодеструкции. Фантом был многократно испытан в экспериментах по подбору размеров активной части игольчатых электродов и возможных диаметров их введения в ткани. Использование картофеля в качестве фантома в дальнейшем позволит разрабатывать эффективные системы термического нагрева и осуществлять подбор параметров нагрева.

Финансовая поддержка

Работа выполнена при финансовой поддержке РТУ МИРЭА – грант «Университетский», тема «НИЧ-Абляция».

Вклад авторов

Все авторы в равной степени внесли свой вклад в исследовательскую работу.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Authors' contribution

All authors equally contributed to the research work.

The authors declare no conflicts of interest

Глоссарий / Glossarium

Фантом – имитатор биологической ткани / Phantom – biological tissue simulator.

Абляция – процесс нагрева биологической ткани до температуры гибели клетки (60 градусов) / Ablation – process of heating of biological tissue to a cell death temperature (60 degrees).

Радиочастотная абляция – тип абляции, при котором для нагрева биологических тканей используется высокочастотный ток / Radiofrequency ablation – type of ablation where high frequency current is used to heat biological tissue

Литература

1. Madsen E.L., D'Souza W.D., Frank G.R. Multi-imaging modality tissue mimicking materials for imaging phantoms: pat. 6635486-B2 US. Publ. 21.10.2003.

References

1. Madsen E.L., D'Souza W.D., Frank G.R. Multi-imaging modality tissue mimicking materials for imaging phantoms: pat. 6635486-B2 US. Publ. 21.10.2003.

2. Kawabata K.I. Phantom: pat. 8011826-B2 US. Publ. 06.09.2011.
3. Мохаммед А.Х.М., Усталков С.О., Сагайдачная Е.А., Кочубей В.И., Скапцов А.А. Создание и свойства фантомов биологической ткани, содержащих наночастицы. *Инженерный вестник Дона*. 2019;2(53). URL: <http://ivdon.ru/magazine/archive/n2y2019/5750>
4. Хитров Ю.А., Корепанова Е.А., Макаров В.Н. Термоиндикаторный состав: а.с. 1326910 СССР. Заявка № 3976413; заявл. 19.11.1985; опублик. 30.07.1987. Бюл. № 28.
5. Долгушин Б.И., Косырев В.Ю. Радиочастотная термоабляция опухолей, под ред. М.И. Давыдова. М.: Практическая медицина; 2015. 192 с. ISBN 978-5-98811-328-7.
6. Казакова С.М., Береславский С.И., Бажева Т.П., Задачная В.Г. Высокостабильное термоиндикаторное покрытие на температуру 100 ± 2 °C: а.с. 245403 СССР. Заявка № 1219554/18-10; заявл. 19.02.1968; опублик. 04.06.1969. Бюл. № 19.
7. Strunk A.R., Novichenok A. Thermochromic polyacrylamide tissue phantom and its use for evaluation of ablation therapies: pat. 20150168227 US. Publ. 17.07.2018.
8. Педонова З.Н., Белавская С.В., Лисицына Л.И., Потеряева Е.Л., Феофилов И.В. Исследование распределения физических полей в предстательной железе при трансректальном воздействии на примере фантома. *Биотехносфера*. 2016;5 (47):19–22.
9. Архангельский Ю.С. Справочная книга по СВЧ электротермии. Саратов: Научная книга; 2011. 560 с. ISBN 978-5-9758-1360-2.
10. Церетели Г.И., Белопольская Т.В., Грунина Н.А., Вакуленко О.А. Реорганизация вторичных кристаллических структур крахмала при хранении и отжиге. *Вестник СПбГУ. Сер. 4: Физика, Химия*. 2012;2:40–49.

2. Kawabata K.I. Phantom: pat. 8011826-B2 US. Publ. 06.09.2011.
3. Mohammed A.H.M., Ustalkov S.O., Sagaidachnaya E.A., Kochubey V.I., Skaptsov A.A. The creation and properties of the biological tissue containing nanoparticles. *Inzhenernyi vestnik Dona = Engineering J. of Don*. 2019;2(53) (in Russ). URL: <http://ivdon.ru/magazine/archive/n2y2019/5750>
4. Khitrov Yu.A., Korepanova E.A., Makarov V.N. Thermoinicator composition: pat. 1326910 USSR. Publ. 07.30.1987. (in Russ).
5. Dolgushin B.I., Kosyrev V.Yu. *Radiochastotnaya termoablyatsiya opukholei, pod red. M.I. Davydova* (Radiofrequency thermoablation of tumors. (Ed.) M.I. Davydov. Moscow: Prakticheskaya meditsina; 2015. 192 p. (in Russ). ISBN 978-5-98811-328-7.
6. Kazakova S.M., Bereslavskii S.I., Bazheva T.P., Zadayannaya V.G. Highly stable thermal indicator coating for a temperature of 100 ± 2 °C: pat. 245403 USSR. Publ. 04.06.1969. (in Russ).
7. Strunk A. R., Novichenok A. Thermochromic polyacrylamide tissue phantom and its use for evaluation of ablation therapies: pat. 20150168227 US. Publ. 17.07.2018.
8. Pedonova Z.N., Belavskaya S.V., Lisitsyna L.I., Poteryaeva E.L., Feofilov I.V. Study of distribution of physical fields in the prostate gland with transrectal effect on the example of the phantom. *Biotechnosfera*. 2016;5(47):19–22 (in Russ).
9. Arkhangel'skii Yu.S. *Spravochnaya kniga po SVCh elektrotermii* (Reference book on microwave electrothermy). Saratov: Nauchnaya kniga; 2011. 560 p. (in Russ). ISBN 978-5-9758-1360-2.
10. Tsereteli G.I., Belopolskaya T.V., Grunina N.A., Vakulenko O.A. Reorganization of starch secondary structures at storage and annealing. *Vestnik Sankt-Petersburgskogo universiteta. Ser. 4: Fizika, Khimiya = Vestnik St.Petersburg University. Ser. 4: Physics, Chemistry*. 2012;2:40–49 (in Russ).

Об авторах:

Макаров Валерий Николаевич, доктор физико-математических наук, профессор кафедры «Биокибернетические системы и технологии» Института кибернетики ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: makarov_vn@bk.ru. <http://orcid.org/0000-0002-7550-4735>.

Шмелева Дина Владимировна, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Биокибернетические системы и технологии» Института кибернетики ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: shmeleva@mirea.ru. <http://orcid.org/0000-0003-3869-8806>. Scopus Author ID 6507238678

Боос Никита Александрович, лаборант Проблемной лаборатории молекулярной акустики ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: 111lkmcb@mail.ru. <http://orcid.org/0000-0002-4659-3759>.

About the authors:

Valeriy N. Makarov, Dr. Sci. (Physics and Mathematics), Professor of the Department of Biocybernetics Systems and Technologies, Institute of Cybernetics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo Pr., Moscow 119454, Russia). E-mail: makarov_vn@bk.ru. <http://orcid.org/0000-0002-7550-4735>.

Dina V. Shmeliova, Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Associate Professor of the Department of the Department of Biocybernetics Systems and Technologies, Institute of Cybernetics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo Pr., Moscow 119454, Russia). E-mail: shmeleva@mirea.ru. <http://orcid.org/0000-0003-3869-8806>. Scopus Author ID 6507238678

Nikita A. Boos, Laboratory Assistant of the Problem Laboratory of Molecular Acoustics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia). E-mail: 111lkmcb@mail.ru. <http://orcid.org/0000-0002-4659-3759>.

Поступила: 10.11.2020; получена после рецензирования: 27.11.2020; принята к опубликованию: 30.11.2020.