

ти ТЭМ, равного $10\,000\text{ Вт/м}^2$, что соответствует $Q_{\text{х.ТЭМ}} = 18,4\text{ Вт}$, для губки толщиной 3 мм оно составляет 28 с, а для губки толщиной 5 мм – 65 с. Поэтому для случаев, где чрезвычайно важна оперативность извлечения ИО, прежде всего при боевых травмах, необходимым будет использование режима работы ТЭМ именно при его максимальной мощности, а также применение губки меньшей толщины. При этом с учетом того, что для предложенного метода имеет место существенно более надежная фиксация ИО к зонду, когда соскальзывание захватного приспособления с ИО сведено к минимуму, в отличие от использования механических приспособлений, где велика такая вероятность, использование рассмотренной процедуры будет достаточно эффективным.

Что же касается размеров ИО, подлежащих извлечению предложенным методом, то они связаны с диаметром трубки и мощностью ТЭМ. Исходя из целесообразности, а также медицинских ограничений, диаметр трубки может составлять до 50 мм, а максимальная мощность современных ТЭМ такой же площади – 70...80 Вт (например, максимальная мощность стандартного модуля ICE-71 ООО «Криотерм», г. Санкт-Петербург, 82 Вт [6]). Поэтому максимальный размер ИО, подлежащих извлечению, в коаксиальном направлении трубки может составлять до 50 мм, размер объекта в противоположном направлении может превышать данную величину в 1,5...1,7 раз.

Заключение

Установлено, что эффективным методом оказания первой медицинской помощи, связанной с извлечением ИО из тела человека, является применение методики фиксации его к зонду путем примораживания через влажную губку с использованием в качестве исполнительного элемента ТЭМ. Разработана модель ТЭУ для его реализации, основанная на решении задачи теплопроводности, в том числе при фазовом переходе, с учетом теплофизических характеристик биологического объекта, ИО, ТЭМ. В результате численного эксперимента получена зависимость продолжительности полного заледене-

ния влажной губки, определяющая время фиксации ИО к зонду, от холодопроизводительности ТЭМ при различных ее толщинах. Определено, что в устройстве может быть использован стандартный ТЭМ холодопроизводительностью от 5 000 до $10\,000\text{ Вт/м}^2$ при продолжительности процедуры фиксации ИО к прибору соответственно от 112 до 28 с.

Список литературы:

1. Корнеев А. Первая медицинская помощь. – Донецк: БАО, 2013. 240 с.
2. Евдулов О.В., Насрулаев А.М., Магомедова С.Г., Миспахов И.Ш., Набиев Н.А. Термоэлектрическая система для извлечения инородных объектов из тела человека // Вестник ДГТУ. Технические науки. 2019. Т. 46. № 1. С. 32-41.
3. Данилюк И.И. О задаче Стефана // Успехи математических наук. 1985. Т. 40. № 5. С. 133-185.
4. Исмаилов Т.А., Евдулов О.В., Набиев Н.А., Рагимова Т.А. Термоэлектрическое устройство для остановки кровотечения // Медицинская техника. 2019. № 2. С. 12-14.
5. Анатыхчук Л.И. Термоэлектричество. Т. 2. Термоэлектрические преобразователи энергии. – Киев, Черновцы: Институт термоэлектричества, 2003. 376 с.
6. <http://www.kryotherm.spb.ru> (дата доступа 23.03.2021 г.).

Тагир Абдурашидович Исмаилов,
д-р техн. наук, профессор, президент,
Олег Викторович Евдулов,
канд. техн. наук, доцент,
кафедра теоретической и общей электротехники,
Абдула Магомедович Насрулаев,
соискатель,
ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный
технический университет»,
г. Махачкала,
e-mail: ole-ole-ole@rambler.ru

М.К. Седанкин, А.Г. Гудков, С.Г. Веснин, А.А. Коновалова, В.Ю. Леушин,
Ю.В. Соловьев, И.А. Сидоров, С.В. Агасиева, С.В. Чижиков, Е.Н. Горлачева

Внутриполостная термометрия в медицине

Аннотация

Представлен аналитический обзор в области технических средств, используемых для внутриполостной термометрии биологических объектов. Показано, что радиотермографы могут быть эффективны для внутриполостной термометрии как в медицине, так и в животноводстве. Рассмотрена возможность нахождения 3D-распределения и динамики радиоярких температур, измеряемых через естественные полости тела человека.

Введение

В области современной медицинской термометрии все работы идут в двух направлениях: разработка внутриполостных датчиков температуры, измеряющих температуры через естественные биологические полости, и абдоминальных датчиков, измеряющих температуру через кожный покров. Исследования, связанные с получением информации о внутриполостной температуре внутри естественных биологических полостей и прилегающих к ним органов, приобретают все больший практический интерес, так как температура является одним из первых признаков патологических изменений в организме человека. Для медицинских целей измеряют поверхностную и внутреннюю (внутриполостную) температуру. Внутриполостная температура тела более стабильна, мало подвержена влиянию окружающей среды. Измерение внутриполостной температуры может дать уникальную диагностическую информацию. Целью исследования является аналитический обзор приборов, применяемых для измерения температуры через биологические полости орга-

низма, и оценка перспективности применения СВЧ-радиотермографа для внутриполостной термометрии.

При измерениях температуры тканей через естественные полости человека необходимы измерители температуры, которые имеют минимальные размеры, так как введение измерителя в эти полости может приводить к их травматизации. Самым распространенным устройством измерения температуры биологических объектов является инфракрасный термограф, визуализирующий температуру биологической ткани толщиной не более 100 мкм. Для измерения внутриполостной температуры могут применяться различные измерители: термомпары, ИК-датчики и другие контактные сенсоры. При помощи контактных приборов можно измерять температуру только в точке непосредственного контакта со слизистой, причем контакт должен быть надежно обеспечен. Микроволновая радиотермометрия, основанная на регистрации мощности собственного электромагнитного излучения, позволяет проводить измерения температуры глубоко расположенных биологических тканей [1]. Известно, что существует возможность

применения для измерения внутренней температуры биологических тканей других методов, таких как МРТ, акустотермометрия, метод нулевого теплового потока [2], а также термометрия при помощи терагерцового излучения [3]. Однако применение МРТ требует доступа к сложной и дорогостоящей медицинской технике. Что касается последних трех методов, то здесь необходимы дальнейшие исследования и говорить о внедрении метода в систему здравоохранения как внутриполостного метода термометрии пока рано [4]. Минимальный размер опухоли, диагностируемый с применением традиционных методов диагностики, составляет 15 мм в диаметре [5]. Невозможность раннего обнаружения патологии является основной причиной неудач в лечении опухолей, которые начинают метастазировать при меньших размерах [5], поэтому актуальной задачей является поиск чувствительных методов, позволяющих диагностировать опухоли минимальных размеров. К таким методам относится микроволновая радиотермометрия.

Основная часть

Внутриполостная термометрия включает в себя ряд методов измерения температуры: трансректальную, трансвагинальную, оральную и пр. Также существует инфракрасная тимпаническая термометрия. Каждый метод измерения имеет свои достоинства и недостатки, что отражено в работах [6], [7].

В работе [8] авторы определяли нормальный дневной диапазон подмышечной и ректальной температуры младенцев в первые 6 месяцев жизни. Ректальную и подмышечную температуру измеряли в дневное время у 281 ребенка, которого случайным образом осматривали дома, и у 656 детей – в больнице, в возрасте до 6 месяцев, при помощи стеклянных ртутных термометров. Ректальная температура была выше подмышечной в 98 % измерений и имела более высокую чувствительность. Сделан вывод, что для измерения температуры младенца лучше использовать ректальную температуру.

Одним из основных методов для поддержания и контроля женского здоровья является измерение внутривагинальной температуры. Мониторинг температуры позволяет отследить стадию менструального цикла, а также установить некоторые причины бесплодия или другие патологические процессы. Для этого можно использовать различные типы ИК-датчиков и контактных измерителей температуры [9], которые возможно ввести внутри организма. В частности, разработан внутриполостной прибор [10] для внутривагинального мониторинга температуры. Прибор состоит из двух основных частей: датчика температуры и процессора. Имеется также компьютерное приложение, позволяющее анализировать измеряемую температуру. Данный прибор может использоваться совместно с системой внутривагинального мониторинга температур с применением мобильного телефона с операционной системой «Symbian» [11]. Женщина может отслеживать изменения температуры в режиме реального времени или в режиме offline и тем самым определять овуляцию, особенности месячного цикла и наиболее благоприятное время для планирования беременности. В работе [12] та же группа исследователей представила беспроводной датчик для измерения и контроля внутривагинальной температуры с целью определения овуляции. Другие исследования указанной выше научной группы описаны в работах [13], [14]. Внутриполостные датчики [10]–[14] для термомониторинга не в полной мере дают информацию о наличии патологии в малом тазу, а также не позволяют осуществлять обследования других отделов малого таза и созданы для изучения фертильности женщин, определения овуляции и планирования беременности. В работе [15] предложен способ измерения температуры при помощи нескольких беспроводных датчиков, объединенных в единую сеть. Полученные данные используются в исследовании взаимосвязей температуры и различных процессов в организме человека, например биоритмов.

В патенте [16] представлен внутриполостной измерительный прибор, реализованный в виде кольца. Гибкое кольцо

диаметром 50...80 мм располагается прямо перед шейкой матки, а тампон размещается во влагалище. Измерения проводятся каждые 1...5 с на протяжении 6...48 ч в автономном режиме. Описываемая конструкция включает в себя батарею и беспроводной передатчик. Прибор предусматривает наличие следующих типов датчиков: тензометр, pH-метр, пульсоксиметр, термометр и др. – и имеет резервуар для доставки лекарственных средств. Основная задача данного прибора – исследование дисфункции женских репродуктивных органов.

В работе [17] для измерения базальной температуры тела с целью определения овуляции предлагается альтернативный метод, предполагающий использование телеметрического термометра. Термометр представляет собой активный трансвагинальный зонд в тампоноподобной оболочке, построенный на основе малоомощной схемы измерения температуры, и включает в себя одноступенчатый резонатор на поверхностных акустических волнах и передатчик, работающий на частоте 418 МГц с амплитудно-импульсной модуляцией. Прикроватная базовая станция содержит специальный приемник с микроконтроллером, подключаемым к часам реального времени, который каждую ночь регистрирует температуру с разрешением 0,1 °C в течение заданного периода. Первоначальные клинические результаты показывают большую эффективность трансвагинальной термометрии по сравнению с термометрией в полости рта и подмышечных впадинах, измеренной ртутным стеклянным термометром.

В работе [18] авторы проводили внутривагинальную термометрию в ночное время, при условии отсутствия менструаций, при помощи системы «OvuSense» для выявления атипичных паттернов, связанных со снижением фертильности. В эксперименте участвовали 6 647 женщин от 20 до 52 лет с продолжительностью цикла от 11 до 190 дней. Всего были исследованы 10 463 овуляторных цикла. В эксперименте учитывались также возраст, и с какого момента женщины пытаются зачать ребенка. Система измеряла температуру каждые 5 мин с последующей компьютерной обработкой данных. Основными критериями оценки результатов были пропорции нормальных и атипичных временных паттернов, частота их появления и связи между паттернами. В результате было выявлено три новых нетипичных температурных режима. Постоянная внутривагинальная температура отражает лютеиновые изменения прогестерона, следовательно, описывает аномалии секреции прогестерона или метаболизма, которые ранее не распознавали. Таким образом, внутривагинальный мониторинг температуры представляет собой перспективный метод выявления причин бесплодия у женщин с «нормальной» овуляцией.

В технологических процессах содержания и воспроизводства сельскохозяйственных и домашних животных существует необходимость оперативного контроля физиологических показателей организма. Это особенно актуально в условиях крупных хозяйств, где все животные подвергаются ветеринарному контролю. Одной из составляющих такого контроля может быть внутриполостная термометрия. Например, японские ученые проводили непрерывные измерения внутривагинальной температуры у коров при помощи беспроводного датчика с последующим прогнозированием начала отела и определением взаимосвязи между дистокцией, состоянием теленка и изменениями температуры в определенное время [19]. Датчик был вставлен во влагалище за 7 дней до предполагаемой даты родов и собирал температурную информацию каждые 5 мин. Во время исследования было обнаружено несколько предупреждающих закономерностей. Первым предупреждением являлось снижение температуры влагалища на 0,4 °C за 4 ч по сравнению с другими днями. Вторым – падение температуры до температуры окружающей среды во время разрыва аллантоисного мешка. Уровень обнаружения предупреждений 1 и 2 составил 88,3 и 99,4 % соответственно. Среднее время между предупреждениями 1 и 2 составляло 22 ч, а между предупреждением 2 и родами – 2 ч. Эти результаты показали, что мониторинг внутривагинальной температуры эффективен для прогнозирования времени отела. По этим данным также можно оценить тяжесть

родов, что коррелирует с дистоцией, массой тела при рождении теленка, полом и сроками беременности. Результаты показывают, что масса теленка является наиболее важным фактором риска дистоции, а постоянное измерение температуры может стать хорошим индикатором прогнозирования начала отела и необходимости помощи при родах. Другие применения внутриполостной термометрии в ветеринарии представлены в работах [20]-[23].

Микроволновый радиотермометр уже использовался в гинекологии и других областях медицины. Для решения задач внутриполостной термометрии подходит микроволновый радиотермограф, оснащенный специальными внутриполостными антеннами и использующий специальное программное обеспечение для 3D-визуализации температуры в биологических полостях сложной формы. Для внутриполостного использования необходимо создание малогабаритных приборов на основе современной элементной базы и применения новых технологий [5], [24]-[29]. Дело в том, что органы малого таза располагаются на некотором расстоянии от стенки брюшной полости, поэтому при наличии патологии температура брюшной стенки, как правило, не повышается. Так, например, обследование матки трансабдоминально при установке антенны на брюшную полость дает только косвенную информацию о процессах, протекающих в малом тазу. Использование стандартных трансабдоминальных медицинских антенн также малоэффективно для выявления заболеваний органов малого таза ввиду удаленности последних от поверхности тела. Также конструкция внутриполостной антенны должна позволить определить, на какую глубину она вводится в полость и где находится очаг повышенной температуры. В работе [30] использовался радиотермометр с внутриполостной одноканальной антенной и обычной волноводной антенной. Обследования проводились трансабдоминально и трансвагинально. Показатели температуры регистрировались на проекции придатков, дна и передней стенки матки, шейки матки. Авторы отмечают, что проведение радиотермометрии трансвагинальным датчиком позволяло диагностировать, помимо острого обострения хронического сальпингоофорита и осложненных форм течения воспалительного процесса в области придатков матки, подострое течение сальпингоофорита, в отличие от исследования, выполненного трансабдоминальным датчиком. В целом авторы рассматривают радиотермометрию как высокоинформативный дополнительный метод в общепринятом алгоритме обследования пациенток с воспалительными заболеваниями придатков матки и доброкачественными опухолями яичников.

Важное значение имеет внутриполостная термометрия как метод контроля лечебных процессов, выполняемого различными другими методами, например методом СВЧ-гипертермии. В патенте [31] представлен внутриполостной эндоскопический аппарат, который осуществляет локальный нагрев подповерхностной ткани с использованием СВЧ-передатчика. В состав аппарата интегрирован радиотермометр, который позволяет обнаруживать разность температур, возникающую вследствие различного нагрева опухоли и окружающих тканей. В патенте [32] представлен метод лечения заболеваний предстательной железы, ткани которой ранее удалялись лишь хирургически при трансуретральной резекции. Излучающее устройство интегрировано в катетер Фолея и может быть также регистратором мощности теплового излучения для контроля нагрева простаты. Уретральный аппликатор представляет собой многоканальную трубку и баллонный катетер. В патенте [33] описан микроволновый радиотермометр, к которому подключен внутриполостной аппликатор, представляющий собой катетер с двумя микроволновыми антеннами для измерения разности температур между двумя точками ткани пациента для онкопоиска. Аппликатор медленно вводится в уретру пациента так, чтобы он проходил по области расположения простаты, в которой может быть опухоль. При измерении строится график изменения температуры на всем протяжении мочеиспускательного канала. При повышении температуры

определяется не только факт наличия термоаномалии, но и расстояние, на котором она расположена, т. е. локализация опухоли. Данные технические решения являются инвазивными методами и требуют высокой квалификации персонала. Наиболее совершенной для применения в урологии и гинекологии представляется трехканальная внутриполостная антенна [34]. Данная антенна может быть успешно интегрирована в микроволновый радиотермометр, позволяющий визуализировать внутреннюю температуру биологической полости в трехмерном режиме за счет измерения внутренней и поверхностной температуры, и является более информативной, чем описанная в работе [31].

Использование радиометрических приборов для внутриполостной термометрии имеет свою специфику и накладывает определенные требования на схемы и конструкции применяемых радиотермометров [29], [34]. Кроме того, вследствие измерений параметров в полостях человека использование одноканального и одночастотного прибора не всегда оправдано и не позволяет с требуемой точностью измерять температуру в полостях и близлежащих органах. Поэтому целесообразно использовать многоканальные антенны либо многочастотные модули с одноканальной или многоканальной антенной при миниатюризации самих модулей, что возможно при использовании СВЧ-монолитных интегральных схем.

Использование новых схемотехнических решений в СВЧ-радиотермографах, а также современной элементной базы позволит значительно сократить объем одного канала измерения. При этом возможно построение радиотермографов на основе различных электрических схем соответственно решаемой медицинской задаче. В целом применение микроволновых радиотермографов позволит достичь ряда важных целей: локализовать источники термонеоднородностей; регистрировать отклики на воздействие физических и химических факторов в процессе исследования; регистрировать пространственно-частотные характеристики и устанавливать связь между параметрами этих характеристик и физиологическими параметрами тканей и органов человека; корректировать процесс лечения по изменению параметров электромагнитного излучения тканей и органов. Окончательный выбор количества каналов и диапазонов частот, типов применяемых датчиков (конструкций антенн), методов проведения обследований, интерпретации и визуализации их результатов, расчетных и программных решений обработки данных необходимо осуществлять только в условиях совместной медицинской апробации с врачами в процессе диагностики или лечения конкретных заболеваний в ходе рутинных медицинских экспериментов. Это потребует участия в будущих исследованиях заинтересованного и компетентного медицинского соисполнителя, а также доступа к современной инновационной инфраструктуре.

Заключение

Для внутриполостной термометрии наиболее перспективными являются СВЧ-радиотермографы. Таким образом, измерение распределения температур в тканях через естественные полости тела является весьма актуальной задачей. При этом к медицинским радиотермографам предъявляются специфические требования, в частности к миниатюризации, количеству каналов и рабочих частот, к конструкции антенн и форме их корпуса. Применение внутриполостной термометрии перспективно в таких областях, как оценка фертильности с целью планирования беременности, первичная диагностика онкологических заболеваний, мониторинг биологических показателей и многих других. На основании вышеизложенного можно сделать вывод о необходимости дальнейших исследований с целью повышения информативности внутриполостной радиотермометрии.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 19-19-00349).

Список литературы:

1. Vesnin S., Turnbull A.K., Dixon J.M., Goryanin I. Modern microwave thermometry for breast cancer // Journal of Molecular Imaging & Dynamics. 2017. Vol. 7. № 136. 6 p.

2. Yamakage M., Namiki A. Deep temperature monitoring using a zero-heat-flow method // Journal of Anesthesia. 2003. Vol. 17. № 2. PP. 108-115.
3. Naccache R. et al. Terahertz thermometry: Combining hyperspectral imaging and temperature mapping at terahertz frequencies // Laser & Photonics Reviews. 2017. Vol. 11. № 5. PP. 1-9.
4. Жорина Л.В. Методы неинвазивного измерения внутренней температуры тела // Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки. 2017. Т. 22. № 2. С. 464-470.
5. Gudkov A.G., Leushin V.Yu., Vesnin S.G. et al. Studies of a microwave radiometer based on integrated circuits // Biomedical Engineering. 2020. Vol. 53. № 6. PP. 413-416.
6. Stavem K., Saxholm H., Smith-Erichsen N. Accuracy of infrared ear thermometer in adult patients // Intensive Care Med. 1997. Vol. 23. PP. 100-105.
7. Stavem K., Saxholm H., Erikssen J. Tympanic or rectal temperature measurement? A cost-minimization analysis // Scandinavian Journal of Infectious Diseases. 2000. Vol. 32. № 3. PP. 299-301.
8. Morley C.J. et al. Axillary and rectal temperature measurements in infants // Archives of Disease in Childhood. 1992. Vol. 67. № 1. PP. 122-125.
9. Oğuz P., Ertas G. Wireless dual channel human body temperature measurement device / IEEE 2013 International Conference on Electronics, Computer and Computation (ICECCO). Ankara, Turkey, 7-9 Nov., 2013. PP. 52-55.
10. Rodrigues J.J.P.C., Caldeira J.M.L.P., Vaidya B. A novel intra-body sensor for vaginal temperature monitoring // Sensors. 2009. Vol. 9. PP. 2797-2808.
11. Pereira O.R.E., Caldeira J.M.L.P., Rodrigues J.J.P.C. A Symbian-based mobile solution for intra-body temperature monitoring / In 12th IEEE International Conference on E-health Networking Applications and Services (Healthcom 2010). Lyon, France, 1-3 July. PP. 316-321.
12. Rodrigues J.J.P.C. et al. A new wireless biosensor for intravaginal temperature monitoring // Sensors. 2010. Vol. 10. PP. 10314-10327.
13. Caldeira J.M.L.P. et al. Intra-body temperature monitoring using a biofeedback solution / IEEE 2010 Second International Conference on Ehealth, Telemedicine, and Social Medicine. Saint Maarten, Netherlands Antilles, 10-16 Feb. 2010. PP. 119-124.
14. Caldeira J.M.L.P. et al. Core-body temperature acquisition tools for long-term monitoring and analysis // International Journal on Advances in Life Sciences. 2010. Vol. 2. PP. 209-218.
15. Boano C.A., Lasagni M., Romer K., Lange T. Accurate temperature measurements for medical research using body sensor networks / 2011 14th IEEE International Symposium on Object/Component/Service-Oriented Real-Time Distributed Computing Workshops (SORT'11). Newport Beach, California, USA, 28-31 Mar., 2011. PP. 189-198.
16. Rosenshein B. Body cavity physiological measurement device / Patent US № 20100274105, class. A61M5/1723. Assignee Rosenshein B. (US). Appl. № 12/766598. Filed 23.04.2010. Publ. 28.10.2010.
17. McCreesh Z., Evans N.E., Scanlon W.G. Vaginal temperature sensing using UHF radio telemetry // Medical Engineering & Physics. 1996. Vol. 18. № 2. PP. 110-114.
18. Hurst B. et al. Atypical vaginal temperature patterns may identify subtle, not yet recognized, causes of infertility // Fertility and Sterility. 2019. Vol. 112. № 3. PP. e244-e245.
19. Sakatani M. et al. Vaginal temperature measurement by a wireless sensor for predicting the onset of calving in Japanese Black cows // Theriogenology. 2018. Vol. 111. PP. 19-24.
20. Maeder B. et al. Application of vaginal temperature measurement in bitches // Reproduction in Domestic Animals. 2012. Vol. 47. PP. 359-361.
21. Geiser B. et al. Prediction of parturition in bitches utilizing continuous vaginal temperature measurement // Reproduction in Domestic Animals. 2014. Vol. 49. № 1. PP. 109-114.
22. Miwa M. et al. Prepartum change in ventral tail base surface temperature in beef cattle: Comparison with vaginal temperature and behavior indices, and effect of ambient temperature // Journal of Reproduction and Development. 2019. PP. 1-33.
23. Ricci A. et al. Assessment of the temperature cut-off point by a commercial intravaginal device to predict parturition in Piedmontese beef cows // Theriogenology. 2018. Vol. 113. PP. 27-33.
24. Белкин М.Е., Кудж С.А., Сигов А.С. Новые принципы построения радиоэлектронной аппаратуры СВЧ-диапазона с использованием радиофотонной технологии // Российский технологический журнал. 2016. Т. 4. № 1. С. 4-20.
25. Gudkov A.G., Leushin V.Yu., Sidorov I.A. et al. Use of multichannel microwave radiometry for functional diagnostics of the brain // Biomedical Engineering. 2019. Vol. 53. № 2. PP. 108-111.
26. Sedankin M.K., Gudkov A.G., Leushin V.Y. et al. Microwave radiometry of the pelvic organs // Biomedical Engineering. 2019. Vol. 53. № 4. PP. 288-292.
27. Tikhomirov V.G. et al. Increasing efficiency of GaN HEMT transistors in equipment for radiometry using numerical simulation // Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing. 2019. Vol. 1410. № 1. PP. 1-4.
28. Tikhomirov V.G. et al. Research of low noise pHEMT transistors in equipment for microwave radiometry using numerical simulation // Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing. 2020. Vol. 1695. № 1. PP. 1-4.
29. Gudkov A.G., Vesnin S.G. et al. Portable microwave radiometer for wearable devices // Sensors and Actuators, A: Physical. 2021. Vol. 318. PP. 1-10.
30. Цомаева Е.А. Клиническое значение радиотермометрии в диагностике и дифференциальной диагностике заболеваний органов малого таза / Автореф. дис. ... канд. мед. наук. – М., 2012. 27 с.
31. Carr K.L. Microwave endoscope detection and treatment system / Patent US № 20100274105, class. A61B 5/015. Assignee: Microwave Associates, Inc. (US). Appl. № 06/232,820. Filed 09.02.1981. Publ. 10.12.1985.
32. Turner P.F. et al. Urethral inserted applicator prostate hyperthermia / Patent US № 5344435, class. A61N5/0601. Inventors: all of US. Assignee: BSD Medical Corporation (US). Appl. № 07/609,372. Filed 05.11.1990. Publ. 06.09.1994.
33. Sterzer F. et al. Temperature-measuring microwave radiometer apparatus / Patent US № 59498450, class. A61B5/0507. Inventors: all of US. Assignee: MMTC, Inc. (US). Appl. № 08/415,302. Filed 03.04.1995. Publ. 18.11.1997.
34. Sedankin M. et al. Development of a miniature microwave radiothermograph for monitoring the internal brain temperature // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2018. Vol. 3. № 5. PP. 26-36.

Михаил Константинович Седанкин,
канд. техн. наук, ст. научный сотрудник,
лаборатория анализа техногенных рисков,
ФГБУ «ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России»,
доцент,
кафедра биокибернетических систем и технологий,
ФГБОУ ВО «РТУ МИРЭА»,
Александр Григорьевич Гудков,
д-р техн. наук, профессор,
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Н.Э. Баумана»,
Сергей Георгиевич Веснин,
канд. техн. наук, гл. конструктор,
ООО «РТМ Диагностика»,
Анастасия Алексеевна Коновалова,
ассистент,
кафедра биокибернетических систем и технологий,
ФГБОУ ВО «РТУ МИРЭА»,
Виталий Юрьевич Леушин,
канд. техн. наук, ст. научный сотрудник,
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Н.Э. Баумана»,
г. Москва,
Юрий Владимирович Соловьев,
канд. техн. наук,
зам. директора по полупроводниковому направлению,
АО «Светлана-Электронприбор»,
г. С.-Петербург,
Игорь Александрович Сидоров,
канд. техн. наук, ст. научный сотрудник,
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Н.Э. Баумана»,
Светлана Викторовна Агасиева,
канд. техн. наук, доцент,
ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов»,
Сергей Владимирович Чижиков,
аспирант,
кафедра «Технологии приборостроения»,
Евгения Николаевна Горлачева,
канд. эконом. наук, доцент,
кафедра «Промышленная логистика»,
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Н.Э. Баумана»,
г. Москва,
e-mail: ooo.giperion@gmail.com