

# ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ИЗЛУЧАТЕЛЬНОГО ЭЛЕКТРОДА-АППЛИКАТОРА ДЛЯ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ ГИПЕРТЕРМИИ

Л.А. Поспелов, Е.И. Сокол, А.В. Кипенский, Ю.П. Федоренко, Р. С. Томашевский,  
С.В. Маслов, Г.В. Сомов.

Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»  
Кафедра ПБМЭ, НТУ «ХПИ», ул. Фрунзе 21, г. Харьков, 61002, Украина  
Тел./факс: (057) 707-63-12, E-mail: [leonid.pospelov@gmail.com](mailto:leonid.pospelov@gmail.com)

**Annotation** – Conducted and analyzed the content of the instrumentation of the stand, designed to test the experimental radiative-electrode applicator (REA). Described and analyzed the system of placement and movement of the carriage in the amount of phantom, in which the receiving antenna is placed.

**Key words** – radiative-electrode applicator, electromagnetic radiation, hyperthermia, the receiving antenna, phantom.

## ВВЕДЕНИЕ

В процессе предыдущих исследований авторами был разработан излучающий электрод-аппликатор (ИЭА) для высокочастотной гипертермии, приёмная антенна и частный фантом человека. В отличие от всех известных устройств этого типа, ИЭА характеризуется новыми важными свойствами. К ним, в первую очередь, можно отнести способность его эффективно работать практически во всём высокочастотном диапазоне электромагнитного поля. При этом апертуру его излучающих лепестков удаётся сделать соизмеримой с поперечными размерами тела пациента, которому отпускается гипертермическая процедура. Вторым столь же важным свойством является способность ИЭА обеспечивать достаточно глубокое проникновение создаваемого им излучения в тело пациента, что не удавалось сделать на всех известных до того устройствах подобного назначения. Кроме того, такие электроды-аппликаторы возбуждают тангенциально ориентированное электрическое поле вдоль центральной оси его. А такое поле обладает свойством пронизывать ткани организма пациента с разной диэлектрической проницаемостью без избыточной концентрации энергии в них. А это крайне необходимо для обеспечения безопасного гипертермического лечения онкологических пациентов. С

учётом изложенного, необходимо подтверждение всех указанных свойств на основе их получения в реальном натурном эксперименте. Техническую основу для такого эксперимента способен обеспечить испытательный стенд, анализу разработки которого и посвящена настоящая публикация. В стенде используется частный фантом человека, предназначенный для формирования среды, имитирующей диэлектрические свойства мышечной ткани человека, крепления к нему ИЭА и расположения в нем приёмной антенны. Приёмная антенна создана с целью индикации полей, возбуждаемых в среде фантома. Она обладает рядом специфических свойств, описанных в данной работе. Однако детальному изложению разработки и исследованию систем фантома, приёмной антенны и излучающего электрода-аппликатора будут посвящены отдельные публикации. В настоящей работе отмечается лишь факт их наличия и использования в испытательном стенде с указанием минимально необходимых сведений, требуемых для достаточно полного описания структуры и работы анализируемого и описываемого стенда.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ МАКЕТ ИЗЛУЧАТЕЛЬНОГО ЭЛЕКТРОДА-АППЛИКАТОРА

Соответственно с изложенными выше требованиями был изготовлен рабочий макет ИЭА. Для его изготовления был использован диск высоковольтной керамики с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_0 = 409$  толщиной 6.5 мм и покрытый с двух сторон на заданной площади серебром. Внешний диаметр его составляет 132 мм. ИЭА содержит в себе основной резонатор, заполненный керамикой с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_0 = 10000$  и дополнительный резонатор с диэлектрическим заполнением из керамики с  $\epsilon_0 = 18000$ . Для согласования ИЭА с кабелем был изготовлен широкополосный трансформатор, согласовывающий по волновому сопротивлению в отношении 3:1. Металлические части ИЭА, которые контактируют с солевым раствором, покрыты гидроизолирующим, химически стойким лаком в несколько слоёв. Далее, ИЭА был закреплен на дне фантома, а крепление дополнительно герметизировано. Фотография общего вид ИЭА приведена на рисунке 1.

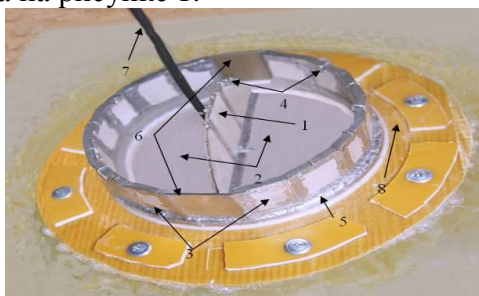


Рис. 1. Вид перспективного ИЭА со стороны резонаторов.

- 1 - основной резонатор;
- 2 - излучаемые лепестки;
- 3 - дополнительный резонатор;
- 4 - замыкающие переключки;
- 5 - экранирующее покрытие торца излучаемых лепестков;
- 6 - дополнительные стеклотекстолитовые грани;
- 7 - фидер питания;
- 8 - кольцо крепления к фантому.

После этого фантом был заполнен соевым раствором с концентрацией 0.9 %, который имитирует мышечную ткань пациента и был готов для проведения измерений напряжённости поля ИЭА, возбуждаемого фантома в среде.

## СТЕНД ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ПОЛЯ

Стенд предназначен для обеспечения измерений напряженности электрического поля в заданных точках пространства. Измерения осуществляется с помощью перемещения приемной антенны напряженности электрического поля по заданной траектории по соответствующему алгоритму. Фотография экспериментального стенда приведена на рисунке 2. Стенд состоит из координатного стола 1, фантомного стола 2, на котором размещается фантом 3, генератора высокой частоты 4, электрода-аппликатора 5, приемочной антенны 6, блока предыдущей обработки сигнала 7. В состав стенда также входят: цифровой мультиметр, усилитель мощности и персональный компьютер (на рисунке не показан).

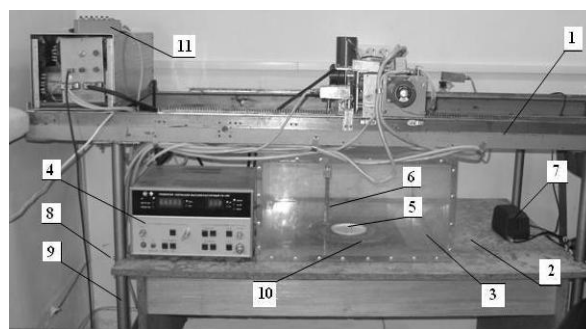


Рис.2. Внешний вид экспериментального стенда.

На фантомном столе размещается фантом, а также установлены другие системы, необходимые для проведения измерений: ВЧ генератор, блок предварительной обработки сигнала, измерительный прибор. Фантомный стол крепится к координатному столу торцевой поверхностью верхней плиты с помощью винтов 8 к стойкам 9 координатного стола. Такое крепление делает конструкцию более

жесткой и превращает ее в единый стенд для проведения измерений.

В отверстие 10 к фантому герметически крепится электрод-апликатор. Генератор высокой частоты 4 через усилитель мощности (на рисунке не показан) подключён к электроду-апликатору 5, который, в свою очередь, возбуждает в фантоме 3 исследуемое поле. Приемная антенна 6, блок предварительной обработки сигнала 7, цифровой мультиметр и ПК образуют измерительную систему, с помощью которой проводятся необходимые измерения.

Управление стендом осуществляется как в автоматическом режиме с помощью ПК, так и в ручном режиме с помощью пульта 11. Кроме измерения сигнала с помощью мультиметра, предусмотрена возможность обработки исходного сигнала системой сбора и обработки данных 7, установленной в ПК. Это дает возможность с помощью прикладных программ измерять распределение поля в автоматическом режиме. Это весьма важно, поскольку позволяет исключить ошибки, обусловленные ограниченной скоростью перемещения каретки, большим количеством точек измерения и связанной с этим длительностью процесса измерения.

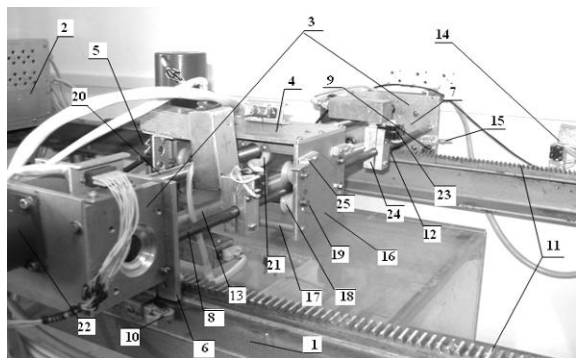


Рис. 3. Координатный стол

Координатный стол, показанный на рисунке 3, содержит жесткую стальную раму 1, которая установлена на стойках (позиция 9 на рис. 2). На раме установлена подвижная часть и блок управления 2. Для придания дополнительной жесткости конструкции координатного стола использованы штанги, одна продольная и

две поперечные. Штанги крепятся к стойкам (на рисунке не показаны).

Подвижная часть состоит из каретки 3, перемещающаяся вдоль координаты X (далее - каретка X), платформы 4, обеспечивает перемещение по координате Y (далее - платформа Y) и каретки 5 для перемещений по координате Z (далее - каретка Z). К каретке Z крепится датчик электрического поля - приемная антенна (на рисунке не показана).

Каретка X (поз. 3) состоит из вертикальных стоек 6 и 7 и двух штанг 8. Штанги 8 выполняют функцию направляющих при движении платформы Y. Стойки установлены так, чтобы иметь возможность перемещения на роликах 9 (4 шт.) в пазах рамы. Между стойками и пазами существует небольшой зазор (0,5 мм.) необходимый для исключения заклинивания каретки X в процессе движения из-за погрешности изготовления направляющих пазов. Для предотвращения незначительного перемещения каретки X в пределах зазора при движении и обеспечения точного позиционирования применены прижимные ролики 10 (2 шт.), установленные на стойке 6. Механизм перемещения каретки X состоит из зубчатой передачи и привода каретки X. Привод каретки X размещен на стойке 7 (на рисунке 3 не виден), но показанный на рисунке 4. Зубчатая передача состоит из двух зубчатых рельсов 11, установленных на продольных швеллерах рамы координатного стола, и двух шестерен 12, расположенных на концах вала 13. Вал 13 установлен в стойках 1 и 2 на втулках с подшипниками (подшипники на рисунке не видно). При обращении вала 13 в заданном направлении происходит перемещение каретки X в соответствующую сторону. Диапазон перемещения каретки X может быть ограничен в пределах выбранного интервала при помощи соответствующим образом установленных конечных ограничителей 14. Ограничители 14 устанавливаются по обеим сторонам выбранного интервала перемещения. Рух автоматически прекращается при вхождении в

процессе движения язычков 15 в пазы ограничителей 14. Максимально возможное перемещение по координате X составляет 1250 мм.

Платформа Y 4 установлена на двух боковых пластинах 16, которые снизу укреплены двумя штангами 17, что обеспечивает необходимую жесткость конструкции. Положение платформы Y определяется роликами 18 (8шт.) относительно штанг 8 каретки X. Ролики 18 могут вертикально перемещаться в своих пазах, которые прорезаны в боковых пластинах и фиксируются кронштейнами 19, что обеспечивает строгую горизонтальность плиты относительно оси Y.

Механизм перемещения платформы Y представляет собой винтовую передачу, которая состоит из вала с винтовой нарезкой 20, установленного с помощью втулок с подшипниками на стойках 6 и 7 каретки X и кронштейна 21, установленного на платформе Y. Впашает вал 20 шаговый двигатель 22 (далее - КД Y) с помощью простой цилиндрической муфты. Ограничители перемещения по координате Y (поз. 23, далее - ограничители Y), установленные на штанге 8 с помощью ограничителей 24, совместно с язычками 25 выполняют ту же функцию, что и ограничители X. При этом максимально возможный ход по координате Y составляет 500 мм.

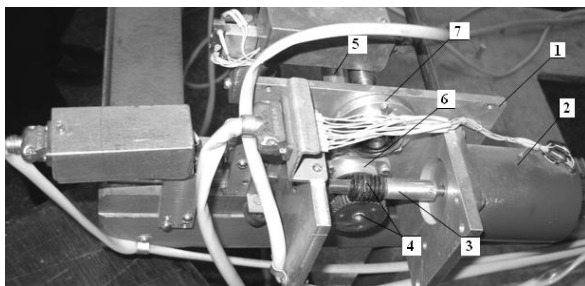


Рис. 4. Привод каретки X

На рисунке 4 представлена стойка 1, на которой установлен привод каретки X. Привод каретки X состоит из шагового двигателя 2, для обеспечения перемещения вдоль координаты X, муфты 3 и червячной передачи 4, а также цилиндрической шестерни установленной на конце

вала 5 (вал 13 рис. 3.). Кроме того, на рисунке 4 видна втулка 6 установки вала 5, втулка 7 вала механизма перемещения платформы Y.

На рисунке 5 представлена каретка, которая обеспечивает перемещение по координате Z.

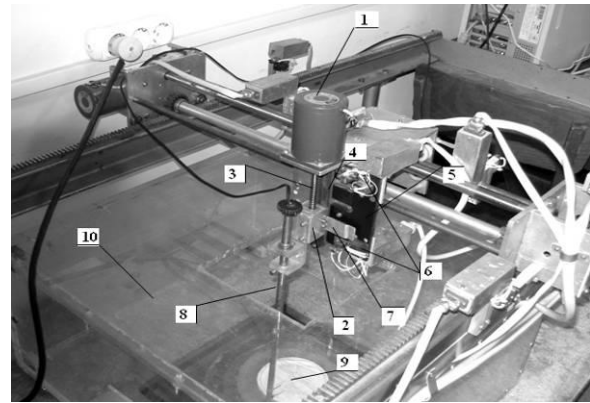


Рис. 5. Каретка перемещения по координате Z

Каретка Z содержит металлическую призму 2 с соответствующей гайкой внутри неё и установленной на винте 3, который крепится на вале шагового двигателя координаты Z 1. Шаговый двигатель Z установлен на платформе Y. Каретка двигается в пазу пластины 4, установленной на одной из боковых стоек (16 рис. 3.) платформы Y. К той же боковой стойке крепится пластина 5, на которой установлен узел ограничения перемещения по координате Z, который состоит из двух ограничителей 6 и пластины 7. Принцип работы такой же, как у соответствующих узлов перемещения по координатам X и Y. Перемещение каретки Z равно 70 мм.

На рисунке 5 видны также приемная антенна 8, установленная на каретке 2 и электрод-излучатель 9, установленный в фантоме 10. Как видно из рисунка 5, верхнее отверстие фантома сделано квадратным для обеспечения правильной работы ограничителей перемещения по координатам X и Y

Движение по координатам X, Y и Z ограничено упомянутыми выше ограничителями перемещения (см. рис. 3. и 5). Ограничители перемещения предназначены для того, чтобы не повредить прием-

ную антенну при возможных сбоях контроллера блока управления или компьютера.

Все шаговые двигатели и ограничители перемещения всех трех координат соединены с блоком управления координатного стола разъемами, размещенными на задней панели блока управления. Передняя панель блока управления представлена на рисунке 6. На ней расположены следующие узлы: тумблер питания 1, предохранители 2, разъем и кабель связи с персональным компьютером 3 (обмен информацией проходит через последовательный СОМ порт ПК), разъем питания контроллера самого блока управления 4, разъем и кабель сетевого питания 5.

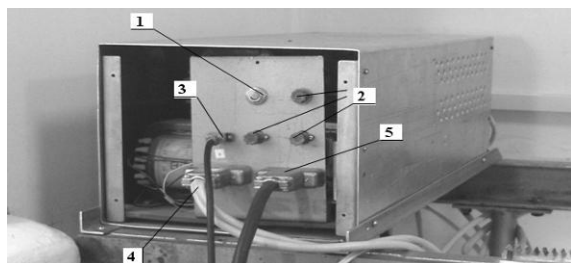


Рис. 6. Передняя панель блока управления

Блок управления дает возможность перемещать приемную антенну по всем координатам поочередно на заданное расстояние. При этом скорость вращения шаговых двигателей в ручном режиме средняя, в режиме автоматического управления она может регулироваться.

Алгоритм перемещения приемной антенны должен обеспечивать измерение напряженности поля в фантоме над электродом в заданном количестве точек, которые расположены на необходимом расстоянии от электрода-излучателя. Предлагаемым алгоритмом осуществляется пошаговое возвратно-поступательное движение датчика поля по координате  $X$  от некоторой начальной точки на некоторое произвольно заданное расстояние, которое может равняться диаметру электрода. При каждом проходе в ту или другую сторону происходит сдвиг по координате  $Y$  на заданное расстояние, или на один шаг. Общее расстояние по координате  $Y$  так же

выбирается произвольно. Размер шага по координатам  $X$  и  $Y$  должны быть кратным выбранному общему расстоянию по соответствующей координате. Начальная точка может быть выбрана произвольно, но предполагается, что это будет точка левого ближнего угла квадрата, в который вписан диаметр электрода. После каждого шага стенд должен провести остановку на заданное время для проведения измерений. Таким образом, получают совокупность измерений в точках, лежащих в заданной плоскости, расположенной на заданном расстоянии от поверхности электрода-апликатора.

После завершения этого цикла измерений стенд перемещает датчик поля по координате  $Z$  на избранное расстояние, кратное общему необходимому расстоянию по координате  $Z$ , и процесс движения по  $X$  и  $Y$  повторяется. При этом движение вдоль оси  $Y$  происходит в противоположную сторону. Движение датчика поля продолжается до тех пор, пока заданное расстояние по координате  $Z$  не будет пройдено, после чего датчик возвратится в начальную точку. Из-за своих технических особенностей экспериментальный стенд не может передвигать приемную антенну по всем координатам одновременно. Поэтому возвращение датчика после полного цикла измерений будет происходить кратчайшим путем, но поочередно по каждой координате.

Таким образом, в результате работы механизма перемещения получают массив значений напряженности электрического поля, измеренный в заранее заданном объеме среды фантома с фиксацией координат точек измерения.

Программа, которая реализует описанный алгоритм, обеспечивает также возможность задания скорости вращения шаговых двигателей для каждой из координатных осей. Это исключает пропуск шагов шаговыми двигателями, обусловленный техническим состоянием координатного стола.

Фотография информационно-управляющей панели системы управления



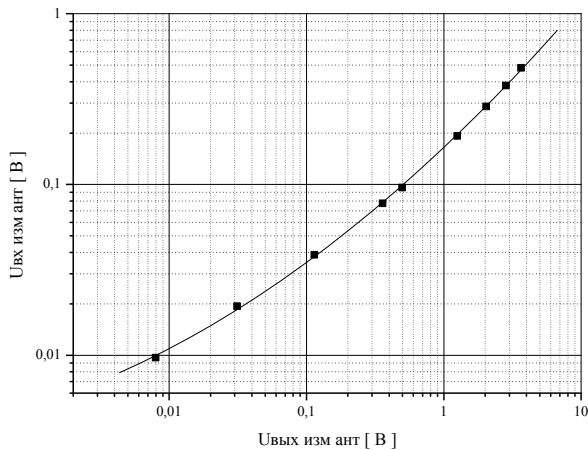


Рис. 10. Зависимость напряжения на антенне от напряженности поля

График получен аппроксимацией данных моделирования. Использование этой зависимости и данных калибровки можно получить значения напряженности поля в месте измерений. Поскольку приемная антенна является линейным элементом, а всю нелинейность дальнейших преобразований отображает график на рисунке 10, то калибровку достаточно провести только при одном значении напряженности поля. После этого достаточно лишь вычислять коэффициент пропорциональности между входным значением напряженности поля и напряжением на входе антенны на рабочей частоте.

При измерении электромагнитного поля излучающий ИЭА крепится в частном фантоме так, чтобы щель между излучающими лепестками была параллельна координате Y, тогда система координат, выбранная при теоретическом моделировании, будет совпадать с координатами измерительного стенда.

### МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Приемная антенна закрепляется так, чтобы нужная координата была параллельная оси диполя, образованного её лепестками. Для измерения вертикальной компоненты горизонтальная часть держателя приемной антенны поворачивается так, чтобы ось диполя была вертикальной.

Измерение по всему трем координатам проводятся поочередно. Начальная высота положения антенны выбрана 10 мм. Ход держателя антенны по вертикали

ограничен (70 мм), поэтому, для точнейшего позиционирования, использовался ход по координате Z протяженностью в 60 мм. Для измерений напряженности поля ИЭА была использована, блок-схема которой представлена на рисунке 11.

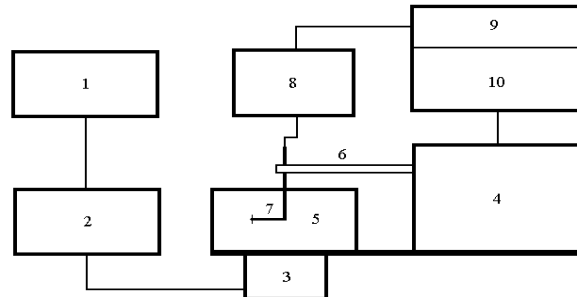


Рис.11. Блок-схема установки для снятия характеристик поля образцов ИЭА

- 1 - генератор Г4-158;
- 2 - усилитель мощности;
- 3 - излучаемый электрод-апликатор;
- 4. - измерительный стенд;
- 5 - фантом тела пациента;
- 6 - каретка измерительного стенда;
- 7 - приемная антенна;
- 8 - усилитель сигнала антенны;
- 9 - плата L-783;
- 10 - ПК.

Для оперативного контроля исходного сигнала, который поступает на плату L-783, и снятия данных в "ручном" режиме используется цифровой комбинированный прибор Щ4300, используемый как вольтметр. При измерениях можно менять величину сигнала на входе приемной антенны, изменяя затухание исходного аттенюатора генератора. Это разрешает избежать перегрузки усилителя сигнала антенны. Поскольку измеренное поле обладает аксиальной симметрией относительно центра ИЭА, то поверхность для измерений выбрана квадратной, с длиной стороны, большей диаметра ИЭА на 20-30 мм. И она располагается так, чтобы сечение диагоналей квадрата совпадало с центром ИЭА. Точка, в которой будут начаты измерения, имеет координаты X = 0, Y = 0, Z = 0, и выбирается в левом ближнем углу фантома. Шаг выбирается равным 10 мм, с учетом того, что суммарная длина

лепестков приемной антенны равная 20 мм. Окончательно длина стороны квадрата должна равняться парному числу шагов (120, 140, 160мм). Полученные расстояния вносятся в значения перемещений по X, Y и Z в соответствующую информационно управляющую панель. Внешний вид панели приведен на рисунке 12.

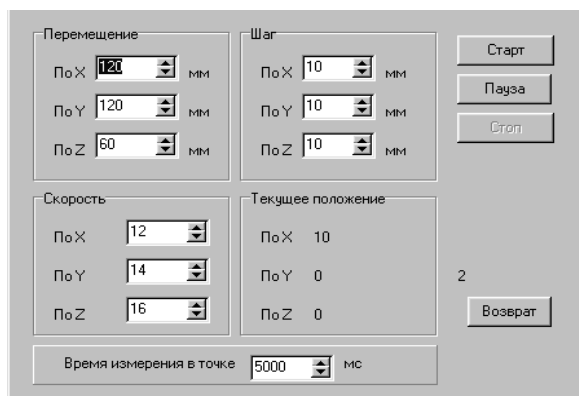


Рис. 12 Внешний вид информационно-управляющей панели.

Для обеспечения автоматизации процесса измерений использованы специализированные платы, включающие АЦП и процессор DSP, что осуществляют оцифровывание, сбором и необходимой обработкой аналоговой информации с дальнейшей передачей ее процессору контроллера. Для этой цели использована плата L-783, которая устанавливалась в компьютер и обеспечивала усиление и оцифровывание 16 двуполярных (32 однополярных) сигналов, и введение или вывод 16 цифровых сигналов. Благодаря интерфейсу PCI обеспечивалась достаточно высокая скорость обмена информацией с программой пользователя, исклю-

чаются конфликты с функциями других плат, установленных в РС, а также гарантировалось отсутствие конфигурационных переключателей. Все режимы работы таких плат задаются программным способом. Для работы в среде Windows 95/98/NT на ЗАО «L-card» использовался известный специальный драйвер, обеспечивающий максимально упрощающий процесс сбора данных из плат в реальном масштабе времени. Для преобразования аналоговых сигналов в цифровую форму для персональной ЭВМ типа IBM PC/AT были использованы платы L-783.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенной разработки созданы устройства, необходимые для проведения полного цикла исследований поля излучательного электрода-аппликатора в среде фантома, имитирующего тело пациента (мышечную ткань его). В него включены экспериментальный макет и ИЭА, испытательный стенд для исследования поля ИЭА в среде фантома и приёмная антенна, обеспечивающая регистрацию поля излучения и передачу его в системы обработки и визуализации. Эти системы достаточно подробно описаны в данной публикации. При проведении измерений разработана и использована система автоматического управления и контроля, описанию которой вместе с соответствующим математическим обеспечением будет посвящена отдельная публикация.