

---

УДК 621.396

А.О. Силин

*Інститут радіофізики і електроніки імені А.Я. Усикова НАН України, Харків*

## **ОСОБЕННОСТИ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ МЕДИЦИНСКИХ СВЧ-АПЛИКАТОРОВ**

*Рассмотрены ключевые вопросы экспериментального исследования пространственного распределения электромагнитных полей различных излучателей в диссипативных средах. Представлены структурная схема, принцип работы и особенности реализации разработанного автоматизированного стенда для регистрации двумерного пространственного распределения амплитуды электрической компоненты СВЧ электромагнитного поля в жидких средах. Приведены результаты измерения полей аппликаторов с плоской и круговой апертурами в жидких фантомах биотканей.*

**Ключевые слова:** электромагнитное поле, аппликатор, биоткани.

### **Введение**

Эффективное СВЧ электромагнитного излучения в медицине [1, 2] обуславливает необходимость разработки соответствующих методов экспериментального исследования пространственного распределения электромагнитных полей в ближней зоне

различных излучателей в средах с высоким поглощением.

Отсутствие в ближней зоне простой связи через волновое сопротивление между электрической и магнитной компонентами поля требует в каждом конкретном случае измерять определенную компоненту, используя различные типы датчиков [3, 4].

Они должны вносить в исследуемое поле минимальные искажения, для обеспечения высокой разрешающей способности быть максимально миниатюрными и обеспечивать независимость характеристик от параметров среды.

Необходимым инструментом таких исследований являются также так называемые сканеры [5, 6] – управляемые системы, включающие электромеханическое устройство перемещения датчиков поля по двум или трем координатам и устройства регистрации сигналов этих датчиков для последующей визуализации пространственного распределения поля.

При экспериментальном изучении распределения полей реальные биоткани моделируются фантомами, заменяющими их по тем или иным свойствам (например, по диэлектрической проницаемости). Даже простейшие фантомы мышечных тканей существенно отличаются по диэлектрическим свойствам от жировых и костных тканей из-за большого содержания в них воды.

**Цель исследований** – выявить особенности распределений электромагнитных полей медицинских СВЧ-аппликаторов различных типов в жидких фантомах биотканей и определить зону их эффективного воздействия.

### Автоматизированный стенд

Структурная схема, принцип работы и особенности реализации разработанного нами экспериментального автоматизированного стенда для регистрации двумерного пространственного распределения амплитуды электрической компоненты СВЧ электромагнитного поля в жидких средах различного рода излучателями (аппликаторами), приведена в [7]. Аппликаторы могут быть коаксиального типа (вводимыми в тело пациента через катетеры) [8, 9] или внешними, с плоской контактной апертурой [10].

Стенд создан на базе серийных приборов и в его состав входят: генератор модулированного СВЧ сигнала; кювета, заполненная фантомом, в которую помещаются исследуемый аппликатор; широкополосный изотропный зонд; управляемое персональным компьютером (ПК) устройство перемещения зонда по двум координатам; блок предварительного усиления и коммутации сигналов; узкополосный фильтр; индикаторный блок, включающий в себя логарифмический усилитель и аналого-цифровой преобразователь; блок интерфейса канала общего пользования; направленный ответвитель; детекторная головка и генератор сигнала модуляции.

Принцип действия стенда состоит в последовательной регистрации в определенных точках пространства, заполненного фантомом, сигналов, пропорциональных квадратам напряженностей трех взаимно ортогональных компонент вектора  $E$  электромагнитного поля, передачи данных в ПК, вычисления ампли-

тудных значений векторов, формирования и хранения массива из значений координат точек и соответствующих амплитуд поля. Впоследствии этот массив обеспечивает визуализацию распределения поля исследуемого аппликатора в соответствующей фантомной среде. Применение в качестве источника СВЧ поля сигнала с амплитудной модуляцией частотой 100 кГц обусловлено необходимостью (в совокупности с использованием узкополосного фильтра) обеспечения необходимой чувствительности системы регистрации и работы серийного блока Я2Р-70. Кроме того, при этом система регистрации не подвержена влиянию смещения нулей операционных усилителей, и легко обеспечивается развязка цепей полезного сигнала и цепей подачи смещения на диоды зонда.

### Электромагнитные поля СВЧ-аппликаторов в фантомах биотканей

На рис. 1 приведен пример распределения поля разработанного нами микрополосково-щелевого аппликатора на частоте 2,45 ГГц.

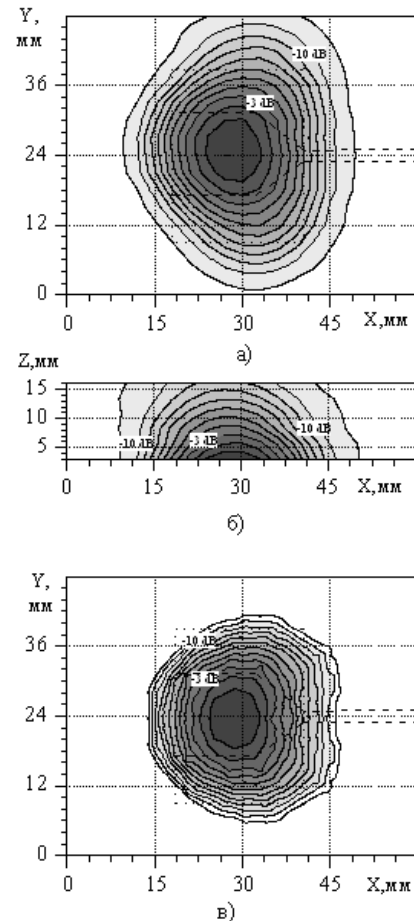


Рис. 1. Распределение поля микрополосково-щелевого аппликатора

Параметры фантомной среды:  $\epsilon' \approx 46$ ,  $\epsilon'' \approx 24$ . В горизонтальной плоскости XY (рис. 1, а) поле снималось на расстоянии 3 мм от мембраны. На графике для ориентировки показаны контуры микрополоска и

щели. В вертикальній плоскості XZ (рис. 1, б) поле снималось вдоль оси симметрии аппликатора. Для сравнения на рис. 1, в приведено распределение поля в плоскости XY, полученное при моделировании.

Исследовались также макеты коаксиальных аппликаторов, предназначенные для использования в медицинских установках СВЧ гипертермии с частотой 915 МГц. Аппликаторы выполнены из коаксиального кабеля РК-50-2-22. На рис. 2 приведены экспериментально измеренные на стенде распределения полей двух аппликаторов. На этом же рисунке под соответствующим распределением упрощенно показана конструкция аппликатора и его положение в принятой системе координат (поперечный масштаб для наглядности увеличен).

Распределение построено в логарифмическом масштабе. Нормировка произведена на максимальное из измеренных значений для каждого аппликатора. Рис. 2, а соответствует известной простейшей конструкции аппликатора [11]. Рис. 2, б соответствует конструкции с четвертьволновым стаканом, образованным вывернутой на наружную изоляцию оплеткой кабеля, и утолщенной выступающей частью центрального проводника.

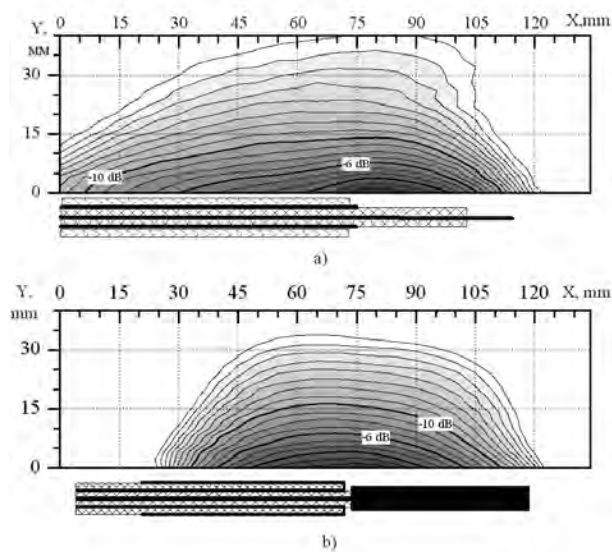


Рис. 2. Экспериментально измеренные распределения полей коаксиальных аппликаторов

Аналогичную последней конструкцию имеет излучатель штатного внутриполостного излучателя установки для локальной электромагнитной гипертермии "Яхта-3". На рис. 3 приведено распределение поля полостного излучателя с диаметром защитной оболочки 16 мм. Поскольку поле такого излучателя имеет осевую симметрию, распределение измерялось в одной плоскости, проходящей через ось излучателя (ось X на рисунке). Расстояния по оси Y отсчитывались от внешнего радиуса защитной оболочки. Абсциссы X=15 мм и с X=95 мм соответствуют границам рабочей зоны аппликатора (отмечены рисками на оболочке).

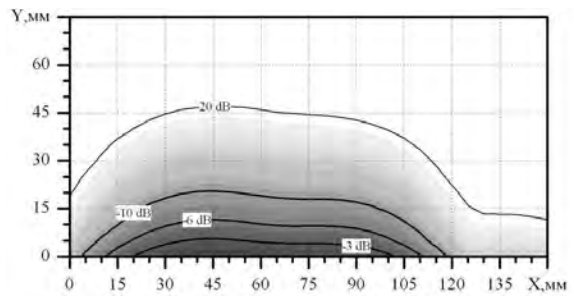


Рис. 3. Распределение поля внутриполостного аппликатора установки "Яхта-3" на частоте 915 МГц

Были измерены также распределения полей создаваемых в фантоме с  $\epsilon' \approx 55$ ,  $\epsilon'' \approx 24$  двумя наружными аппликаторами с плоскими апертурами: прямоугольной формы размером 120x90 мм (№1), и круглой диаметром 145 мм (№2).

На рис. 4 показаны зарегистрированные распределения поля (квадрата напряженности электрической составляющей) в трех горизонтальных плоскостях на различных расстояниях Z от плоскости мембраны и в двух взаимно перпендикулярных плоскостях, проходящих через геометрический центр первого аппликатора.

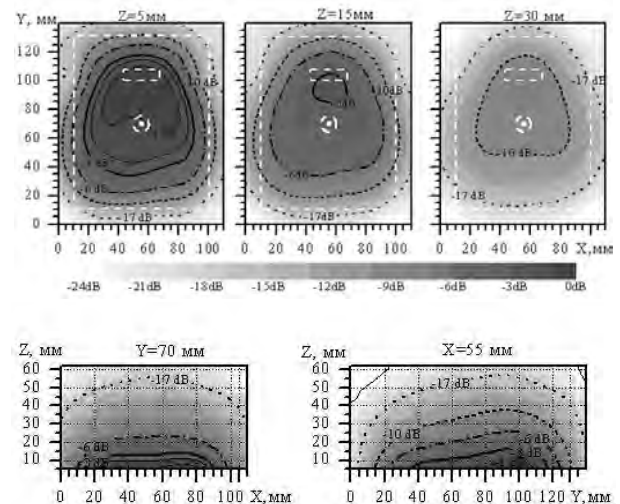


Рис. 4. Распределение поля аппликатора №1

На рис. 5 представлены аналогичные распределения, полученные при исследовании поля, создаваемого аппликатором с круглой апертурой. Нормировка всех распределений для каждого аппликатора произведена на максимальное из всех зарегистрированных значений. На горизонтальных распределениях белыми штриховыми линиями в масштабе показаны контуры апертуры и расположение коаксиального соединителя и элемента крепления с тыльной стороны аппликатора. Анализ полученных результатов показывает, что электромагнитное поле, создаваемое аппликаторами с плоской апертурой, вблизи нее довольно неравномерно, причем его максимум в обоих случаях не совпадает с геометрическим центром аппликатора.

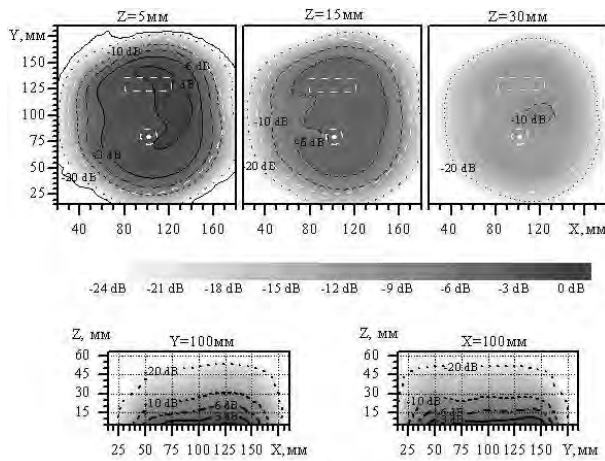


Рис. 5. Распределение поля аппликатора №2

Перепад уровня поля в некоторых точках, лежащих симметрично относительно центра может достигать 3 дБ. Среднее спадание поля к краям аппликаторов в плоскости  $Z=5\text{мм}$  составляет 10...13 дБ. Такое распределение поля определяется конструкцией аппликаторов, и его следует учитывать при их практическом применении. Приведенные на рис. 2 распределения свидетельствуют о том, что такая конструкция является удачной с точки зрения предотвращения затекания токов на внешнюю оплетку кабеля и паразитного нагрева тканей вне облучаемой области.

### Заключение

Разработан автоматизированный стенд для регистрации распределений электромагнитных полей излучателей СВЧ диапазона в жидких поглощающих средах. Датчик поля - изотропный зонд и система регистрации сигналов обеспечили визуализацию распределения относительной интенсивности электрической компоненты поля в динамическом диапазоне до 30 дБ с разрешающей способностью по градиенту поля не хуже 1 дБ/мм

Измеренные на стенде распределения полей излучателей для СВЧ гипертермии (как оригинальных макетов, так и промышленных образцов) в фан-

томах биотканей позволили определить зону их эффективного воздействия - характеристику, которая до сих пор не поверяется из-за отсутствия подобных технических средств.

### Список литературы

1. McTomer K. *Transurethral microwave thermotherapy* / K. McTomer // *Microw. J.* - 1992. - V. 35, No 11. - P. 24-41.
2. Thurey Y. *Microwave: Industrial, Scientific and Medical Applications* / Y. Thurey. - Artech House, Boston, 1991. - 650 p.
3. Bassen H.I. *Electric Field Probes - A Review* / H.I. Bassen, G.S. Smith // *IEEE Trans. Ant. and Prop.* 1983. - V. AP-31, No 5. - P. 710-718.
4. Green F.M. *NBS field-strength standards and measurements (30Hz - 1000MHz)* / F.M. Green // *Proc.IEEE.* - 1967. - V.55, No 6. - P. 970-981.
5. Schmidt T. *Automated E-field Scanning system for dosimetric assessment* / T. Schmidt // *IEEE Trans. on MTT-44.* - 1996. - V. 44, No 1. - P. 105-113.
6. Gaida G. *Mapping of near field pattern in simulated biological tissue* / G. Gaida // *El. Letters.* - 1995. - V. 11, No 4. - P. 95-108.
7. Иванов В.К. Экспериментальные исследования распределения электромагнитных полей медицинских СВЧ-аппликаторов / В.К. Иванов, А.О. Силин, А.М. Стадник, А.С. Васильев // *Успехи современной радиоэлектроники.* - 2005. - №9. - С. 30-35.
8. Гельвич Э.А. Излучатели для полостной ЭМ гипертермии / Э.А. Гельвич, И.Б. Давыдова, В.Н. Мазохин // *Электронная техника. Серия 1 "Электроника СВЧ".* - 1983. - Вып. 10. - С. 31-36.
9. Debicki P.S. *Calculation of input impedance electrically small insulated antennas for microwave hyperthermia* / P.S. Debicki, M.A. Astrahan // *IEEE Trans. MTT-41.* - 1993. - No 2. - P. 357-360.
10. Gopal M.K. *Miniature dipole E-field probes for characterizing both phase and amplitude of microwave radiators for hyperthermia* / M.K. Gopal, T.C. Cetas, D. Rosman // *Int. J. of Hyperthermia.* - 1995. - V. 11, No 6. - P. 769-783.
11. Iskander M.F. *Design Optimization of Interstitial Antennas* / M.F. Iskander, A.M. Tumeah // *IEEE Trans. on Biomedical Engineering.* - 1989. - V. 36, № 2. - P. 238-246.

Поступила в редколлегию 16.10.2015

Рецензент: д-р техн. наук, проф. А.А. Можаяев, Национальный технический университет «ХПИ», Харьков.

### ОСОБЛИВОСТІ ПРОСТОРОВОГО РОЗПОДІЛУ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПОЛІВ МЕДИЧНИХ СВЧ-АПЛІКАТОРІВ

О.О. Сілін

Розглянуто ключові питання експериментального дослідження просторового розподілу електромагнітних полів різних випромінювачів в дисипативних середовищах. Представлені структурна схема, принцип роботи та особливості реалізації розробленого автоматизованого стенда для реєстрації двовимірного просторового розподілу амплітуди електричної компоненти НВЧ електромагнітного поля в рідких середовищах. Наведено результати вимірювання полів аплікаторів з плоскою і круговою апертурами в рідких фантомах біотканей.

**Ключові слова:** електромагнітне поле, аплікатор, біотканіни.

### FEATURES OF SPATIAL DISTRIBUTION OF ELECTROMAGNETIC FIELDS OF MEDICAL MICROWAVE APPLICATORS

A.O. Silin

Key questions of experimental studies of spatial distribution of electromagnetic fields of various emitters in dissipative media are considered. Structure, principle of functioning and features of implementation of developed automated stand for registration of two-dimensional spatial distribution of amplitude of electrical components of electromagnetic microwave field in liquid media are presented. Results of measurements of fields of applicators with plane and circular apertures in liquid phantoms of tissues are shown.

**Keywords:** electromagnetic field, applicator, tissues.