

**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ ОБЗОР  
ИНФОРМАЦИОННОГО СОДЕРЖАНИЯ  
АНАЛИТИЧЕСКИХ И ЧИСЛЕННЫХ МЕТОДОВ  
РАСЧЕТА ПОГЛОЩЕННОЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ЭНЕРГИИ  
БИОЛОГИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ**

д.т.н., проф. Л.Ф. Кучин, к.т.н. Г.А. Ляшенко,  
И.А. Черепнев, А.К. Гиголаев

*В статье рассмотрены основные подходы к теоретическому определению доз электромагнитных излучений, поглощенных биологическими объектами.*

Широкое внедрение электромагнитных устройств в жизнь современного общества (сотовые телефоны, сверхвысокочастотные (СВЧ) бытовые печи и т.д.) увеличило озабоченность той опасностью, которую может представлять их электромагнитное излучение (ЭМИ) для здоровья человека. Эта озабоченность привела к интенсификации исследований, направленных на выявление опасных последствий воздействия на человека ЭМИ. Так как проведение экспериментов непосредственно на человеке недопустимо, значительно возрастает роль теоретических методов определения поглощенной энергии органами человека и животных, с помощью которых можно по результатам экспериментов с животными прогнозировать ожидаемые биологические эффекты у людей.

Современные представления [1, 2] о биологических эффектах, вызванных воздействием ЭМИ кратко сводятся к тому, что его результаты зависят от сочетания биотропных параметров излучения и могут характеризовать воздействие в целом как тепловое или информационное (нетепловое). Однако информация о поглощенной биологическим объектом дозе электромагнитной энергии имеет первостепенное значение для определения возможных последствий ее воздействия.

Наиболее общий метод расчета поглощаемой энергии – это строгое решение уравнений Максвелла для рассматриваемой модели поглотителя. Однако эти уравнения сложны, что приводит к необходимости умелого выбора как модели, так и метода решения. Вообще говоря, каждый метод имеет ограниченную область применения, т.е. позволяет получить полезную информацию только в ограниченной области изменения параметров.

Однако, несмотря на ограниченную область применимости каждого метода в отдельности, их совместное применение позволяет получить

ценную дозиметрическую информацию в широком диапазоне интересующих нас параметров.

Методы теоретической дозиметрии разделяются на две группы – численные и аналитические [2].

Примером применения численных методов могут служить расчеты поглощенной электромагнитной энергии моделью человека, составленной из элементарных кубиков [1]. Для этого решалось следующее интегральное уравнение [1]:

$$\left[1 + \frac{t(\mathbf{r})}{3\omega\epsilon_0}\right] \mathbf{E}(\mathbf{r}) - PV \int_V t(\mathbf{r}^I) \mathbf{E}(\mathbf{r}^I) \mathbf{G}(\mathbf{r}, \mathbf{r}^I) dV = \mathbf{E}^i(\mathbf{r}),$$

где

$$\mathbf{G}(\mathbf{r}, \mathbf{r}^I) = -j\omega\mu_0 \left[1 + \frac{\nabla\nabla}{k_0^2}\right] \Psi(\mathbf{r}, \mathbf{r}^I);$$

$$\Psi(\mathbf{r}, \mathbf{r}^I) = \frac{\exp(-jk_0|\mathbf{r} - \mathbf{r}^I|)}{4\pi|\mathbf{r} - \mathbf{r}^I|};$$

$$k_0 = \omega(\mu_0\epsilon_0)^{1/2};$$

$$t(\mathbf{r}) = \sigma(\mathbf{r}) + j\omega[\epsilon(\mathbf{r}) - \epsilon_0];$$

$\mathbf{E}^i(\mathbf{r})$  – падающее электрическое поле;

$\mathbf{E}(\mathbf{r})$  – поле внутри поглотителя;

$\epsilon_0, \mu_0$  – электрическая и магнитная постоянные соответственно;

$\sigma(\mathbf{r})$  – проводимость биологической ткани.

Для решения этого уравнения поглощающее тело разбивается на кубические элементарные ячейки, при этом полагается, что каждая ячейка настолько мала, что внутри ее электрическое поле и диэлектрическая проницаемость постоянны. Такая процедура позволяет свести интегральное уравнение к матричному уравнению. В каждой элементарной ячейке электрическое поле задается импульсной функцией, т.е. оно постоянно внутри ячейки и равно нулю вне ее.

Численные методы использовались до частот порядка 600 МГц и сводились к решению матричных уравнений очень высокого порядка [1]. Эти уравнения образовывались либо при дискретизации уравнений поля, либо из условий совместности для коэффициентов тех рядов, в которые раскладываются поля. При дискретизации уравнений поля элемент матрицы соответствует амплитуде поля в элементарной ячейке дискретной

модели [1]. С ростом частоты длина волны излучения уменьшается, а значит, уменьшается характерный размер пространственных вариаций поля. Отсюда следует, что с ростом частоты необходимо уменьшать и размер элементарной ячейки дискретной модели. Таким образом, на высоких частотах необходимо использовать большое число элементарных ячеек, что приводит к значительным трудностям при обращении матрицы.

Очевидно, преимущества численных методов состоят в том, что они позволяют получить информацию о локальном удельном поглощении электромагнитной энергии. Однако численные методы не дают представления о распределении полей в слоистых моделях элементов строения человеческого тела (например – головного мозга) и сложны в реализации при высоких частотах (единицы и десятки гигагерц) воздействующего излучения, т.е. приводят очень часто к громоздким вычислениям, связанным с весьма серьезными трудностями математического характера и с использованием мощной вычислительной техники. В то же время прикладная сторона электромагнитного воздействия на организм человека, целью которой являются конкретные технические разработки по защите от данных излучений требует как простых подходов, так и простых решений поставленных задач, которыми могли бы пользоваться лица, не имеющие специальной подготовки в области теоретической электродинамики и математики.

Рассмотренные недостатки устраняются при использовании *аналитических методов* [1,2]. В этих методах на первой стадии ищутся аналитические решения уравнений Максвелла, которые затем подвергаются численному анализу, но без обращения матриц высокого порядка [1]. В классических решениях электромагнитные поля разложены по сферическим векторным гармоникам, а граничные условия задаются на поверхности сферы [2]. Впоследствии в работе [2] были рассмотрены составные модели, в которых различные элементы строения тела человека отображались слоистыми сферическими и цилиндрическими моделями. Анализ многослойной сферической модели, главным образом сферической модели головы человека показал, что резонансные свойства многослойной модели существенно отличаются от свойств однородной модели [2].

На основании изложенного можно сделать следующие выводы.

Учитывая геометрическую форму и электрофизические свойства биологических объектов, в частности диэлектрическую проницаемость, представляется целесообразным использовать классический аналитический подход для исследования структуры излученного и рассеянного электромагнитного поля различными элементами организма человека.

Поскольку форма биологического объекта, начиная с клетки и кончая целостным организмом, может быть приближенно сведена к различным объемам с правильной геометрией, то вышеназванные задачи можно

свести к задачам излучения и перераспределения электромагнитных полей сферой, эллипсоидом и цилиндром.

Разработка методики расчета излученных и рассеянных электромагнитных полей сантиметрового и миллиметрового диапазона различными структурами организма человека является актуальной задачей, так как позволяет обосновать медико-технические требования к медицинским приборам, предназначенным для радиометрии органов человека.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Дерни К.Х. Модели человека и животных применительно к электромагнитной дозиметрии: Обзор аналитических и численных методов // ТИИЭР. – 1980. – Т.68, №1. – С. 40 - 48.
2. Пустоваров В.Е., Черепнев А.С., Ляшенко Г.А. и др. Обеспечение безопасной эксплуатации тракторов радиоэлектронных средств СВЧ - диапазона. – Харьков : ХВУ, 1996. – 76 с.

Поступила 26.12.2001

**КУЧИН Лев Федорович**, доктор техн. наук, профессор, профессор кафедры общей электротехники Харьковского государственного технического университета сельского хозяйства. В 1951 году закончил Харьковский политехнический институт. Область научных интересов – применение электромагнитных технологий в сельском хозяйстве.

**ЛЯШЕНКО Геннадий Анатольевич**, канд. техн. наук, доцент кафедры Харьковского военного университета. В 1973 году закончил Харьковское высшее военное училище. Область научных интересов – применение электромагнитных технологий в медицине и медицинских приборах и системах.

**ЧЕРЕПНЕВ Игорь Аркадьевич**, начальник лаборатории научно-исследовательского отдела Харьковского военного университета. В 1984 году закончил Харьковское высшее военное командно-инженерное училище. Область научных интересов – разработка технических систем в сфере экологии жизнедеятельности.

**ГИГОЛАЕВ Александр Казбекович**, начальник лаборатории научно-исследовательского отдела Харьковского военного университета. В 1982 году закончил Харьковский институт радиоэлектроники. Область научных интересов – разработка и внедрение систем экологического мониторинга.

---