
ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ И АВТОМАТИЗАЦИЯ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА

ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ И АВТОМАТИЗАЦИЯ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА /
/ POWER SUPPLY AND AUTOMATION OF AGRICULTURAL PRODUCTION
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL ARTICLE
УДК 631.5/.539.1.047
DOI 10.26897/1728-7936-2018-6-56-64

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭКВИНАПРЯЖЕННОГО ПРОСТРАНСТВА В РАБОЧЕЙ КАМЕРЕ СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНОЙ УСТАНОВКИ ЦИКЛИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ

АНДРЕЕВ СЕРГЕЙ АНДРЕЕВИЧ, канд. техн. наук, доцент¹
E-mail: s.andreev@aol.com

ИВАНОВА ТАТЬЯНА ВЛАДИМИРОВНА, доцент²
E-mail: drok2@mail.ru

¹ Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127550, ул. Тимирязевская, 49, Москва, Российская Федерация

² Академия государственной противопожарной службы МЧС России; 129366, ул. Бориса Галушкина, 4, Москва, Российская Федерация

Важным требованием к процессу СВЧ-обработки сельскохозяйственных материалов является точность дозирования подводимой энергии. Наиболее успешно дозирование СВЧ-энергии достигается в установках циклического действия. Вследствие неравномерности распределения СВЧ-поля в рабочих камерах необходим компромисс между степенью загрузки и равномерностью воздействия. Для поиска эквинапряженного пространства произведено экспериментальное исследование распределения СВЧ-поля. По результатам исследования была составлена трехфакторная математическая модель в виде нелинейного полинома. Стационарные точки процесса определялись решением системы линейных алгебраических уравнений, полученных в результате приравнивания к нулю частных производных математической модели по длине, ширине и высоте. Максимальный характер экстремума был установлен по критерию Сельвестра на основе чередования знаков диагональных миноров матрицы Гессе. Предварительно осуществлялся расчет дозы энергии, сообщаемой обрабатываемому материалу, в различных точках рабочей камеры и проводилось сравнение полученных результатов с допустимым значением. С целью исключения субъективности в процессе поиска эквинапряженного пространства и достижения универсальности результатов последовательному исследованию подвергались точки, расположенные на поверхности шара с увеличивающимся радиусом. Для реализации модели раздувающегося шара предложен вычислительный алгоритм, суть которого заключается в поэтапном переборе точек на окружностях, опоясывающих шар. По завершении расчета дозы воздействия на точки, находящиеся на поверхности шара, происходит приращение его радиуса и возобновление исследований. Описанная методика позволяет анализировать любые СВЧ-установки циклического действия и избежать ошибок при обосновании выбора компромисса между производительностью и качеством обработки.

Ключевые слова: СВЧ-энергия, сельскохозяйственные материалы, СВЧ-обработка, дозирование, СВЧ-установка циклического действия, рабочая камера, эквинапряженное пространство, модель раздувающегося шара, метод узловой точки, метод наименьших квадратов, стационарные точки, экстремум функции трех переменных.

Формат цитирования: Андреев С.А., Иванова Т.В. Определение эквинапряженного пространства в рабочей камере сверхвысокочастотной установки циклического действия // Вестник ФГОУ ВПО «МГАУ имени В.П. Горячкина». 2018. N 6(88). С. 56-64. DOI 10.26897/1728-7936-2018-6-56-64.

DETERMINATION OF EQUALLY IRRADIATED SPACE IN THE WORKING CHAMBER OF A CYCLIC ACTION MICROWAVE INSTALLATION

SERGEY A. ANDREYEV, PhD (Eng), Associate Professor¹

E-mail: s.andreev@aol.com

TATYANA V. IVANOVA, Assistant Professor²

E-mail: drok2@mail.ru

An important requirement for microwave treatment of agricultural products is the dosing accuracy of the energy supplied. The most successful dosing of microwave energy is achieved in installations of cyclic action. At the same time, the microwave field in the working chambers of such installations is distributed unevenly, which puts forward the task of finding a compromise between the degree of loading and the uniformity of impact. To search for equally irradiated space, the authors have conducted an experimental study of the distribution of the microwave field. Basing on the study results, they have designed a three-factor mathematical model in the form of a nonlinear polynomial. Stationary points of the process have been determined by solving a system of linear algebraic equations obtained as a result of setting to zero partial derivatives of the mathematical model with respect to length, width, and height. The maximum value of the extremum has been established with Sylvester's criterion by alternating the diagonal minor signs of the Hessian matrix. The theoretical part of the work consists in studying the distribution of the microwave field by interpolating a mathematical model in the space of the working chamber. To do this, a calculation has been made of the energy dose reported to the treated material at various points in the working chamber and the results have been compared with an acceptable value. If the dose divergence at any point is small, then this point is recognized as part of the equally irradiated space. To provide for objective results in the process of searching for equally irradiated space and to achieve the uniformity of results, sequential studies have been performed on points located on the surface of a ball with an increasing radius. To implement the model of ballooning, use has been made of a computational algorithm consisting in a step-by-step search of points on the circles surrounding the ball. After the calculation of the impact dose on the points located on the ball surface, its radius increases and the research can be resumed.

Key words: microwave energy, agricultural materials, microwave treatment, dosing, microwave installation of cyclic action, working chamber, equally irradiated space, model of ballooning, node point method, least squares method, stationary points, extremum of a three-variable function.

For citation: Andreyev S.A., Ivanova T.V. Determination of equally irradiated space in the working chamber of a cyclic action microwave installation. *Vestnik of Moscow Goryachkin Agroengineering University*. 2018; 6(88): 56-64. (in Rus.). DOI 10.26897/1728-7936-2018-6-56-64.

Введение. Электромагнитная энергия сверхвысоких частот (СВЧ) активно используется во многих сферах человеческой деятельности. К ним относятся разнообразные виды радиосвязи, неразрушаемый контроль веществ, измерение неэлектрических величин, беспроводная передача энергии, а также тепловое и специфическое воздействие на материальные объекты с целью направленного изменения их свойств [1, 2]. Специфика использования СВЧ-энергии в сельскохозяйственном производстве обусловлена чрезвычайно высокими требованиями к точности дозирования подводимой энергии. В большинстве случаев зависимость положительного эффекта от дозы содержит явно выраженный максимум: негативный результат является следствием как недооблучения, так и переоблучения обрабатываемых объектов [3, 4]. Особое значение точность дозирования СВЧ-энергии приобретает при обработке биологических материалов [5-7]. При обработке, например, семян несоблюдение или недостаточно строгое соблюдение дозирования СВЧ-воздействия может вызывать необратимые негативные последствия.

С увеличением количества обрабатываемых материалов производительность СВЧ-обработки растет, а точность дозирования подводимой энергии снижается. Для достижения приемлемого режима обработки в производственных условиях между производительностью

и качеством процесса должен быть установлен некоторый компромисс, который обычно определяется интуитивно и не всегда точно.

Цель исследования – определение расположения, конфигурации и объема пространства в рабочей камере СВЧ-установки, в каждой точке которого напряженность поля не отличается от максимального значения на заданную величину.

Материал и методы. В качестве материала исследований был использован массив экспериментальных данных по распределению электромагнитного поля в рабочей камере СВЧ-установки КБН-82. При составлении трехфакторной полиномиальной математической модели процесса был применен метод наименьших квадратов. Последующий анализ модели осуществлялся численным методом с использованием компьютерных средств.

Результаты и обсуждение. В большинстве случаев СВЧ-обработка сельскохозяйственных объектов осуществляется в установках циклического действия. Эти установки по принципу действия схожи с бытовыми микроволновыми печами. Обрабатываемые материалы закладываются в рабочую камеру, после чего на определенное время включается СВЧ-генератор [8, 9]. Главным недостатком современных СВЧ-установок является неравномерность распределения поля внутри рабочей камеры, вследствие чего

крайне сложно обеспечить требуемую дозу воздействия на весь объем обрабатываемого материала. Организуя технологический процесс, оператор интуитивно находит компромисс между стремлением повысить производительность и требованием соблюдения точности дозирования. При этом первая цель достигается увеличением объема обрабатываемых объектов, а вторая – его уменьшением.

Необходимо научное обоснование объема обрабатываемых материалов. Искомый объем представляет собой некоторое пространство внутри рабочей камеры, в каждой точке которого напряженность поля будет отличаться от заданной на заранее допустимую величину. В дальнейшем этот объем будет упоминаться как эквивалентное пространство.

Для решения поставленной задачи были произведены экспериментальные исследования распределения поля в рабочей камере серийной отечественной СВЧ-установки КБН-82. Пространство рабочей камеры было разбито на 27 областей, располагающихся на трех уровнях по длине (Y), ширине (X) и высоте (Z). Места расположения каждой области определялись координатами точек, заключающихся в их центрах. При этом точка начала координат размещалась в дальнем левом нижнем углу рабочей камеры (рис. 1). Традиционные электрические датчики напряженности поля не использовались, поскольку они содержат токопроводящие элементы, локализирующие и искажающие исследуемое поле. Информация об интенсивности СВЧ-воздействия получалась косвенным образом – по количеству теплоты, выделяемой в нагреваемой воде, которая размещалась в исследуемых областях. Количество сообщенной теплоты, далее называемой дозой, рассчитывалось в соответствии с выражением

$$D = Cm (T_2 - T_1),$$

где C – теплоемкость воды, $C = 4,19$ кДж/кг·град; m – масса воды, $m = 0,075$ кг; T_1 и T_2 – начальная и конечная температуры воды соответственно, град.

Продолжительность нагрева составляла 40 с. Результаты эксперимента, представляющие собой средние арифметические значения дозы по четырехкратным повторностям, сведены в таблицу 1.

По массиву экспериментальных данных составлялась математическая модель распределения поля $D = f(x, y, z)$. В предшествующих исследованиях [10] для описания этого процесса предлагалось выражение вида

$$D = \frac{1}{D_0^2} (a_1 x^2 + d_1 x + c_1) (a_2 y^2 + d_2 y + c_2) (a_3 z^2 + d_3 z + c_3), \quad (1)$$

сформированное методом узловых точек с дозой D_0 . При этом суммы, заключенные в скобках модели (1), рассматривались как однофакторные уравнения регрессии при постоянстве двух других факторов.

$$\begin{cases} D = a_1 x^2 + d_1 x + c_1; & y = const; & z = const; \\ D = a_2 y^2 + d_2 y + c_2; & x = const; & z = const; \\ D = a_3 z^2 + d_3 z + c_3; & x = const; & y = const. \end{cases} \quad (2)$$

Коэффициенты a_i , b_i и c_i определялись из систем линейных уравнений, сформированных на основе метода наименьших квадратов:

$$\begin{cases} a_1 \sum_{i=1}^3 x_i^4 + d_1 \sum_{i=1}^3 x_i^3 + c_1 \sum_{i=1}^3 x_i^2 = \sum_{i=1}^3 x_i^2 D_i; \\ a_1 \sum_{i=1}^3 x_i^3 + d_1 \sum_{i=1}^3 x_i^2 + c_1 \sum_{i=1}^3 x_i = \sum_{i=1}^3 x_i D_i; \\ a_1 \sum_{i=1}^3 x_i^2 + d_1 \sum_{i=1}^3 x_i + 3c_1 = \sum_{i=1}^3 D_i. \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} a_2 \sum_{i=1}^3 y_i^4 + d_2 \sum_{i=1}^3 y_i^3 + c_2 \sum_{i=1}^3 y_i^2 = \sum_{i=1}^3 y_i^2 D_i; \\ a_2 \sum_{i=1}^3 y_i^3 + d_2 \sum_{i=1}^3 y_i^2 + c_2 \sum_{i=1}^3 y_i = \sum_{i=1}^3 y_i D_i; \\ a_2 \sum_{i=1}^3 y_i^2 + d_2 \sum_{i=1}^3 y_i + 3c_2 = \sum_{i=1}^3 D_i. \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} a_3 \sum_{i=1}^3 z_i^4 + d_3 \sum_{i=1}^3 z_i^3 + c_3 \sum_{i=1}^3 z_i^2 = \sum_{i=1}^3 z_i^2 D_i; \\ a_3 \sum_{i=1}^3 z_i^3 + d_3 \sum_{i=1}^3 z_i^2 + c_3 \sum_{i=1}^3 z_i = \sum_{i=1}^3 z_i D_i; \\ a_3 \sum_{i=1}^3 z_i^2 + d_3 \sum_{i=1}^3 z_i + 3c_3 = \sum_{i=1}^3 D_i. \end{cases} \quad (5)$$

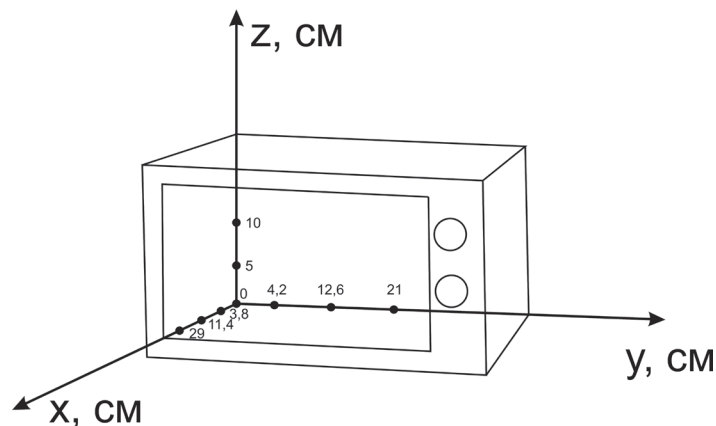


Рис. 1. Расположение исследуемых точек в пространстве рабочей камеры

Fig. 1. Location of the studied points in the working chamber space

Экспериментальные данные и результаты их обработки

Experimental data and the results of their processing

№ точки	X	Y	Z	$D_{\text{эксп.}}$	$D_{\text{теор.}}$	$\Delta, \%$	$D_{\text{нелин.}}$	$\Delta_1, \%$
1	3,8	4,2	0	174,6	191,2	9,5	173,3	0,7
2	11,4	4,2	0	172,6	183,9	6,6	174,3	0,9
3	29,0	4,2	0	156,4	172,0	10,0	154,1	1,4
4	3,8	12,6	0	190,0	192,6	1,4	189,1	0,5
5	11,4	12,6	0	187,3	186,8	0,2	190,1	1,5
6	29,0	12,6	0	169,2	173,4	2,5	170,0	0,5
7	3,8	21,0	0	177,2	194,1	9,6	175,7	0,9
8	11,4	21,0	0	175,2	188,3	7,5	176,7	0,9
9	29,0	21,0	0	157,3	174,9	11,2	156,6	0,4
10	3,8	4,2	5	204,1	191,4	6,2	205,7	0,8
11	11,4	4,2	5	206,8	185,6	10,2	207,2	0,2
12	29,0	4,2	5	187,3	172,2	8,03	188,2	0,5
13	3,8	12,6	5	221,6	192,9	13,0	221,7	0,1
14	11,4	12,6	5	226,5	187,1	17,4	223,2	1,5
15	29,0	12,6	5	204,3	173,7	14,9	204,2	0
16	3,8	21,0	5	209,3	194,3	7,1	208,6	0,4
17	11,4	21,0	5	209,6	188,5	10,03	210,1	0,2
18	29,0	21,0	5	190,5	175,1	8,04	191,2	0,3
19	3,8	4,2	10	173,5	191,6	10,5	171,9	0,9
20	11,4	4,2	10	173,2	185,8	7,3	173,8	0,4
21	29,0	4,2	10	155,9	172,4	10,6	155,9	0
22	3,8	12,6	10	185,4	193,1	4,2	188,1	1,5
23	11,4	12,6	10	193,8	187,3	3,3	190,1	1,9
24	29,0	12,6	10	170,6	173,9	2,0	172,3	1,0
25	3,8	21,0	10	173,5	194,5	12,2	175,2	1,0
26	11,4	21,0	10	177,7	188,8	6,3	177,2	0,3
27	29,0	21,0	10	160,4	175,4	9,4	159,4	0,6

В результате решения систем (3)-(5) были найдены следующие значения параметров модели (1):

$$a_0 = -58,3 \cdot 10^{-3}; d_1 = 11,6 \cdot 10^{-1}; c_1 = 218;$$

$$a_2 = -22,6 \cdot 10^{-2}; d_2 = 58,5 \cdot 10^{-1}; c_2 = 186,4;$$

$$a_3 = -13,6 \cdot 10^{-1}; d_3 = 13,7; c_3 = 189,8.$$

Для проверки качества модели в нее подставлялись исходные значения независимых переменных x , y и z , а полученные значения дозы $D_{\text{теор.}}$ сравнивались с экспериментальными $D_{\text{эксп.}}$ (табл. 1):

$$\Delta = \frac{D_{\text{теор.}} - D_{\text{эксп.}}}{D_{\text{эксп.}}} \cdot 100\%.$$

Далее определялись стационарные точки как корни систем уравнений:

$$\begin{cases} \frac{1}{D_0^2}(2a_1x + d_1)(a_2y^2 + d_2y + c_2)(a_3z^2 + d_3z + c_3) = 0, \\ \frac{1}{D_0^2}(2a_2y + d_2)(a_1x^2 + d_1x + c_1)(a_3z^2 + d_3z + c_3) = 0, \\ \frac{1}{D_0^2}(2a_3z + d_3)(a_2y^2 + d_2y + c_2)(a_1x^2 + d_1x + c_1) = 0. \end{cases}$$

Членные значения стационарных точек сведены в таблицу 2.

Из совокупности стационарных точек выбирались значения, соответствующие глобальному максимуму:

$x_0 = 9,97$ см, $y_0 = 12,90$ см и $z_0 = 5,03$ см. Эти значения признавались координатами точки, соответствующей максимальной дозе энергии (22,42 кДж/кг), сообщаемой обрабатываемому материалу.

К сожалению, метод узловых точек обеспечивает качественное воспроизведение экспериментальных данных только вблизи от этой точки, а при удалении от нее разности между теоретическими и экспериментальными значениями резко возрастают. С целью повышения точности математического описания применили нелинейную трехфакторную полиномиальную модель, включающую 10 параметров:

$$D_{\text{нелин.}} = b_0 + b_1x + b_2y + b_3z + b_4x^2 + b_5y^2 + b_6z^2 + b_7xy + b_8xz + b_9yz. \quad (6)$$

Таблица 2

Стационарные точки исследуемой функции

Table 2

Stationary points of the studied function

Координата	Значения стационарных точек		
x	9,97	71,99 -52,05	71,99 -52,05
y	44,42 -18,56	12,90	44,42 -18,56
z	17,86 -7,81	17,86 -7,81	5,03

В основу стратегии поиска параметров b_0, \dots, b_9 был положен метод наименьших квадратов, согласно которому минимизировались суммы квадратов отклонений теоретических и экспериментальных значений дозы во всех 27 точках эксперимента [11]. Для записи этих отклонений использовались следующие выражения:

$$S_1 = b_0 + b_1x_1 + b_2y_1 + b_3z_1 + b_4x_1^2 + b_5y_1^2 + b_6z_1^2 + b_7x_1y_1 + b_8x_1z_1 + b_9y_1z_1 - D_{\text{эксн.1}};$$

$$S_2 = b_0 + b_1x_2 + b_2y_2 + b_3z_2 + b_4x_2^2 + b_5y_2^2 + b_6z_2^2 + b_7x_2y_2 + b_8x_2z_2 + b_9y_2z_2 - D_{\text{эксн.1}};$$

$$S_{27} = b_0 + b_1x_{27} + b_2y_{27} + b_3z_{27} + b_4x_{27}^2 + b_5y_{27}^2 + b_6z_{27}^2 + b_7x_{27}y_{27} + b_8x_{27}y_{27} + b_9y_{27}z_{27} - D_{\text{эксн.27}}.$$

Минимизируемая сумма квадратов отклонений имеет вид

$$M = \sum_{i=1}^{27} S_i^2 = (b_0 + b_1x_1 + b_2y_1 + b_3z_1 + b_4x_1^2 + b_5y_1^2 + b_6z_1^2 + b_7x_1y_1 + b_8x_1z_1 + b_9y_1z_1 - D_{\text{эксн.1}})^2 + (b_0 + b_1x_2 + b_2y_2 + b_3z_2 + b_4x_2^2 + b_5y_2^2 + b_6z_2^2 + b_7x_2y_2 + b_8x_2z_2 + b_9y_2z_2 - D_{\text{эксн.1}})^2 + (b_0 + b_1x_{27} + b_2y_{27} + b_3z_{27} + b_4x_{27}^2 + b_5y_{27}^2 + b_6z_{27}^2 + b_7x_{27}y_{27} + b_8x_{27}y_{27} + b_9y_{27}z_{27} - D_{\text{эксн.27}})^2. \quad (7)$$

После решения системы были получены следующие значения параметров:

$$\begin{aligned} b_0 &= 151,78; b_1 = 0,90; b_2 = 5,35; & 13,04; \\ b_4 &= -0,05; b_5 = -0,21; b_6 = -1,32; b_7 = 0,00026; \\ b_8 &= 0,0127; b_9 = 0,0058. \end{aligned}$$

При подстановке исходных значений x, y и z в выражение (6) получен ряд значений $D_{\text{нелин.}}$, сведенный в таблицу 1. В результате сравнения качества моделей (2) и (6) были выявлены преимущества полиномиальной математической модели, проявляющиеся в снижении максимального отклонения теоретических значений дозы от экспериментальных до 1,9% и средней величины этих отклонений до 0,71%.

Для нахождения экстремума продифференцируем выражение (6) по x, y и z и приравняем полученные выражения к нулю:

$$\begin{cases} \frac{\partial D}{\partial x} = b_1 + 2b_4x + b_7y + b_8z = 0; \\ \frac{\partial D}{\partial y} = b_2 + 2b_5y + b_7x + b_9z = 0; \\ \frac{\partial D}{\partial z} = b_3 + 2b_6z + b_8x + b_9y = 0. \end{cases} \quad (8)$$

Решим систему уравнений (8) методом Крамера:

$$x = \frac{\Delta x}{\Delta}; \quad y = \frac{\Delta y}{\Delta}; \quad z = \frac{\Delta z}{\Delta}, \quad \text{где}$$

$$\Delta = \begin{vmatrix} 2b_4 & b_7 & b_8 \\ b_7 & 2b_5 & b_9 \\ b_8 & b_9 & 2b_6 \end{vmatrix}; \quad \Delta_x = \begin{vmatrix} -b_1 & b_7 & b_8 \\ -b_2 & 2b_5 & b_9 \\ -b_3 & b_9 & 2b_6 \end{vmatrix};$$

$$\Delta_y = \begin{vmatrix} 2b_4 & -b_1 & b_8 \\ b_7 & -b_2 & b_9 \\ b_8 & -b_3 & 2b_6 \end{vmatrix}; \quad \Delta_z = \begin{vmatrix} 2b_4 & b_7 & -b_1 \\ b_7 & 2b_5 & -b_2 \\ b_8 & b_9 & -b_3 \end{vmatrix}.$$

После подстановки численных значений $b_0 \dots b_9$ будем иметь:

$$x_0 = 9,8; \quad y_0 = 13,1; \quad z_0 = 4,9.$$

Таким образом, в точке пространства с координатами x_0, y_0, z_0 возможно существование экстремального значения функции (6). Для проверки выполнения достаточного условия наличия экстремума найдем частные производные высших порядков:

$$\frac{\partial^2 D}{\partial x^2} = (D'_x)'_x = D''_{xx} = (b_1 + 2b_4x + b_7y + b_8z)'_x = 2b_4 = -0,62.$$

$$\frac{\partial^2 D}{\partial x \partial y} = (D'_x)'_y = D''_{xy} = (b_1 + 2b_4x + b_7y + b_8z)'_y = b_7 = 0,00026.$$

$$\frac{\partial^2 D}{\partial x \partial z} = (D'_x)'_z = D''_{xz} = (b_1 + 2b_4x + b_7y + b_8z)'_z = b_8 = 0,012.$$

$$\frac{\partial^2 D}{\partial y^2} = (D'_y)'_y = D''_{yy} = (b_2 + 2b_5y + b_7x + b_9z)'_y = 2b_5 = -0,4.$$

$$\frac{\partial^2 D}{\partial y \partial x} = (D'_y)'_x = D''_{yx} = (b_2 + 2b_5y + b_7x + b_9z)'_x = b_7 = 0,00026.$$

$$\frac{\partial^2 D}{\partial y \partial z} = (D'_y)'_z = D''_{yz} = (b_2 + 2b_5y + b_7x + b_9z)'_z = b_9 = 0,0057.$$

$$\frac{\partial^2 D}{\partial z^2} = (D'_z)'_z = D''_{zz} = (b_3 + 2b_6 + b_8x + b_9y)'_z = 2b_6 = -2,64.$$

$$\frac{\partial^2 D}{\partial z \partial x} = (D'_z)'_x = D''_{zx} = (b_3 + 2b_6 + b_8x + b_9y)'_x = b_8 = 0,012.$$

$$\frac{\partial^2 D}{\partial z \partial y} = (D'_z)'_y = D''_{zy} = (b_3 + 2b_6 + b_8x + b_9y)'_y = b_9 = 0,0057.$$

На основании равенств $D''_{xy} = D''_{yx}, D''_{xz} = D''_{zx}, D''_{yz} = D''_{zy}$ в соответствии с теоремой Шварца делаем вывод о непрерывности исследуемой функции.

Для определения характера экстремумов составим матрицу Гессе:

$$|G| = \begin{vmatrix} D''_{xx} & D''_{xy} & D''_{xz} \\ D''_{yx} & D''_{yy} & D''_{yz} \\ D''_{zx} & D''_{zy} & D''_{zz} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 2b_4 & b_7 & b_8 \\ b_7 & 2b_5 & b_9 \\ b_8 & b_9 & 2b_6 \end{vmatrix} \quad (9)$$

и найдем диагональные миноры:

$$\Delta_1 = 2b_4 = -0,10; \quad \Delta_2 = \begin{vmatrix} 2b_4 & b_7 \\ b_7 & 2b_5 \end{vmatrix} = 0,04;$$

$$\Delta_3 = \begin{vmatrix} 2b_4 & b_7 & b_8 \\ b_7 & 2b_5 & b_9 \\ b_8 & b_9 & 2b_6 \end{vmatrix} = -0,109.$$

По чередованию знаков диагональных миноров в соответствии с критерием Сильвестра делаем вывод о максимальном характере экстремума в исследуемой точке.

Очевидно, что наибольший КПД СВЧ-воздействия может быть достигнут в области найденной точки. При удалении области обработки от этой точки доза воздействия будет уменьшаться. Поэтому определение компромиссного объема (эквинапряженного пространства) рекомендуется осуществлять посредством многократной подстановки в модель (6) меняющихся с определенным шагом значений координат x, y и z и сравнения полученной дозы с заранее установленным значением. Если на определенном шаге исследования разность между максимальной D_{max} и рассчитанной дозой $D_{нелин.}$ становится больше заданной S , процесс приращения x, y и z останавливается, а точка с соответствующими координатами признается граничной. Совокупность таких граничных точек и будет определять поверхность искомого эквинапряженного объема.

В предшествующих исследованиях алгоритм интерполяции пространства по модели (1) заключался в фиксировании координаты z и одновременном приращении x и y в полярных координатах. Из центра этих координат, соответствующего точке размещения D_{max} , исходил поворачивающийся и увеличивающийся вектор. При этом конец этого вектора совершал движение по расходящейся спирали Архимеда. По достижении условия $D_{max} - D_{нелин.} > S$ осуществлялись определение координат очередной граничной точки, возвращение к начальным координатам x и y , приращение координаты z и возобновление обследования пространства на новой высоте. Таким образом, эквинапряженное пространство представляло собой своеобразный набор дисков с общей осью. Надо признать, что описанный подход не вполне однозначен. С одной стороны, алгоритм интерполяции пространства действительно позволяет найти координаты и объем эквинапряженного пространства, однако при фиксировании вместо z значений x или y искомый объем получился бы другим. В таком случае для получения универсального решения пришлось бы выполнить перечисленные действия для нескольких вариантов фиксирования и варьирования переменных, а затем полученные результаты наложить. И только та часть объема, которая удовлетворяла бы требованиям всех трех исследований, могла бы признаваться универсальным эквинапряженным пространством. Кроме того, описанная методика громоздка, включает большой объем ручных операций и требует повышенного внимания оператора.

Принимая во внимание перечисленные ограничения и недостатки известной методики, предлагается новый алгоритм исследования, в котором эквинапряженное пространство рассматривается в форме шара. Шар – правильное геометрическое тело, легко описываемое аналитическими функциями и характеризующееся максимальным объемом при минимальной поверхности.

Аналогично предыдущему случаю точки исследуемого пространства подвергаются проверке на выполнение условия $D_{max} - D_{нелин.} > S$. При этом в процессе исследования шар производит впечатление «раздувающегося», поскольку его радиус постепенно увеличивается.

Алгоритм изменения координат исследуемых точек.

Разделим поверхность шара с радиусом R на $2N$ поясов. При этом ширина каждого пояса составит величину $h = \frac{R}{N}$. Если при наблюдении сбоку пояса параллельны поверхности земли, то ширина каждого из них может рассматриваться как толщина соответствующего слоя или высота. Приняв за начало отсчета верхний (северный) полюс шара, пронумеруем пояса числами от 1 до N с текущим номером k . Таким образом, слой с номером N располагается на экваторе, а последующие слои, находящиеся в нижнем полушарии, имеют номера от $N + 1$ до $2N$. Нижнее основание слоя с номером k удалено от северного полюса на величину $kh = k \frac{R}{N}$, а от нижнего (южного) полюса – на $2R - k \frac{R}{N}$.

Рассмотрим расположение нижнего основания произвольного слоя внутри шара (вид сбоку), представленное на рисунке 2.

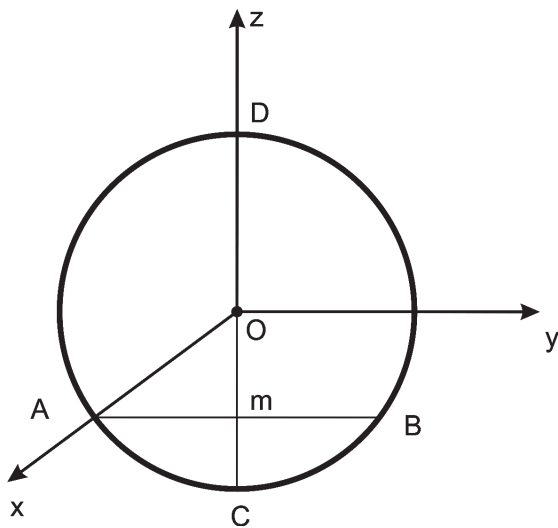


Рис. 2. Расположение нижнего основания произвольного слоя внутри шара
Fig. 2. Location of an arbitrary layer of the bottom base inside the ball

Нижнее основание слоя определяется хордой AB , а диаметр шара – отрезком CD , который также являет-

ся частным видом хорды. В соответствии со свойством пересекающихся хорд можно записать:

$$AM \cdot MB = DM \cdot MC. \quad (10)$$

Присутствующий в выражении (10) множитель MC определяет расстояние от нижнего основания слоя до южного полюса, равное $2R - k \frac{R}{N}$. Аналогично множитель DM соответствует расстоянию от нижнего основания слоя до северного полюса, то есть величине $k \frac{R}{N}$. Таким образом, $AM \cdot MB = k \frac{R}{N} \cdot \left(2R - k \frac{R}{N}\right)$.

Отрезки AM и MB являются радиусами нижнего основания среза с центром в точке M . Обозначим этот радиус символом f :

$$f = AM = MB.$$

$$\text{Тогда } f^2 = k \frac{R}{N} \cdot \left(2R - k \frac{R}{N}\right) \text{ и } f = \sqrt{k \frac{R}{N} \cdot \left(2R - k \frac{R}{N}\right)}.$$

Итак, радиус нижнего основания k -го каждого среза оказался выраженным через известный радиус R шара, количество срезов (поясов) N на одном полушарии и порядковый номер k среза:

$$f = R \sqrt{\frac{k}{N} \left(2 - \frac{k}{N}\right)}. \quad (11)$$

Задаваясь величинами R и N и варьируя значениями k от 1 до N , можно получить ряд значений радиусов нижних оснований срезов, пронизывающих весь объем шара.

Введем новую систему координат, начало которой будет находиться в точке, соответствующей максимальной дозе x_0, y_0, z_0 , и одновременно в центре моделируемого шара. При этом оси координат проведем параллельно плоскостям рабочей камеры. Разобьем окружности, образуемые нижними основаниями каждого среза, на m частей. Теперь для описания этих окружностей можно воспользоваться соотношениями

$$x = f \cos \alpha, \quad y = f \sin \alpha,$$

где α – угол, образуемый вектором, исходящим из начала координат с осями новой системы координат, $0 \leq \alpha \leq 360^\circ$.

Для достижения перемещения контрольной точки по исследуемому поясу необходимо обеспечить многократные расчеты координат x и y при различных α . По завершении полного поворота на 360° и невыполнении условия $D_{max} - D_{нелин.} > S$ следует сместиться на следующий пояс r , который будет удален от северного полюса шара на величину kh . Фактически это смещение будет осуществляться за счет изменения параметра k , входящего в формулу (11).

Для организации вычислительных циклов необходимо присвоить текущие номера значениям α в виде индексов j , меняющихся от 1 до m , и значениям k , меняющимся от 1 до N .

На рисунке 3 представлен алгоритм компьютерного расчета эквинапряженного пространства в рабочей камере, реализующего модель «раздувающегося» шара.

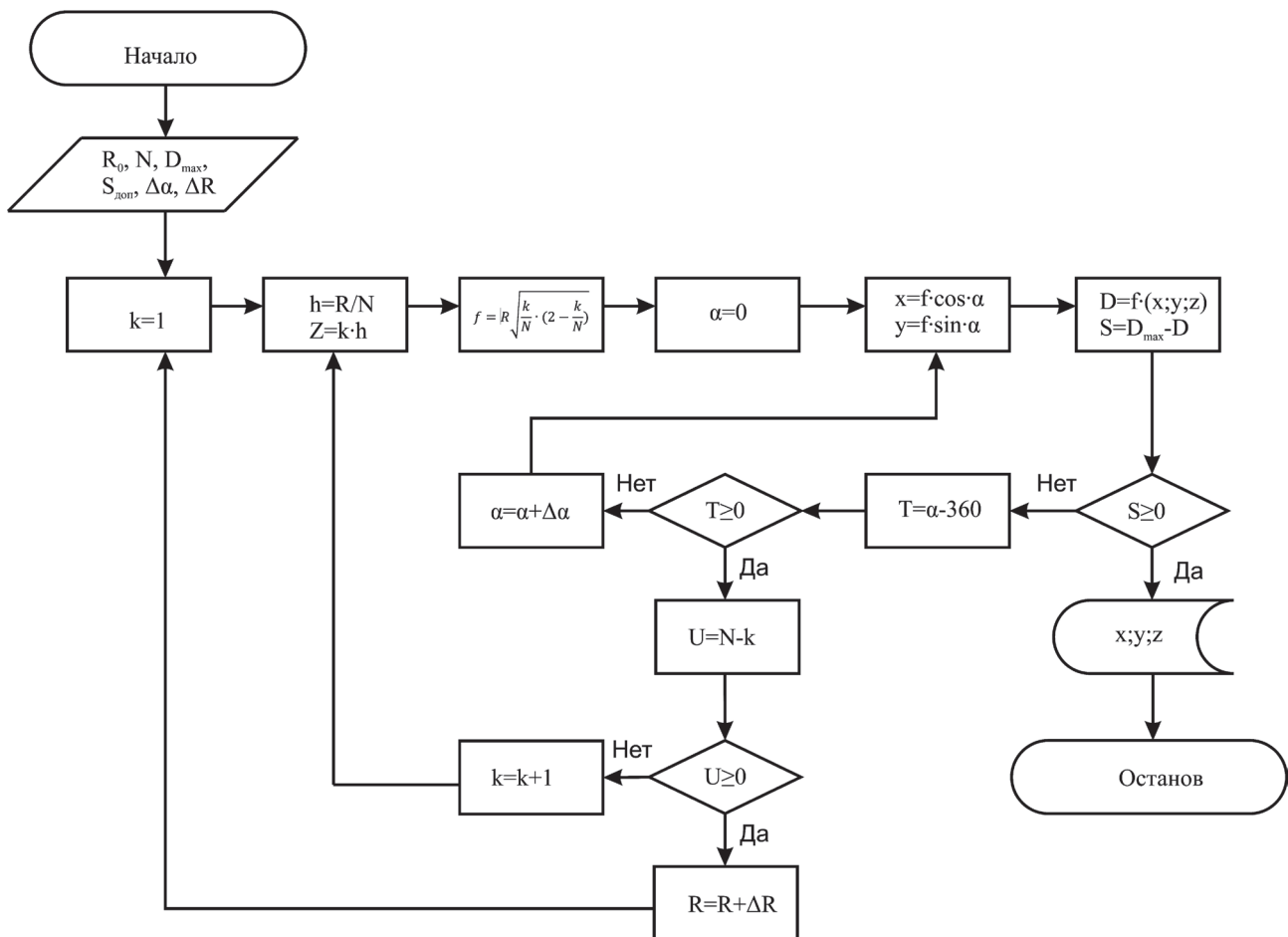


Рис. 3. Алгоритм расчета эквинапряженного пространства в рабочей камере
 Fig. 3. Algorithm for calculating the equally irradiated space in the working chamber

Представленный алгоритм был реализован на языке программирования Visual Basic и после подстановки численных значений позволил установить, что для минимально допустимого значения дозы воздействия 200 кДж/кг радиус эквинапряженного шарообразного пространства составляет 4,2 см, откуда максимальный объем одновременно обрабатываемых материалов окажется равным 310 см³.

Вывод

Описанная методика позволяет анализировать любые СВЧ-установки циклического действия и избежать ошибок при обосновании выбора компромисса между производительностью и качеством обработки.

Библиографический список

1. Пчельников Ю.Н., Свиридов В.Т. Электроника сверхвысоких частот. Массовая радиобиблиотека. М.: Радио и связь, 1981. Вып. 1039. 96 с.
2. Бородин И.Ф., Шарков Г.А., Горин А.Д. Применение СВЧ-энергии в сельском хозяйстве. М.: Госагропром СССР: ВАСХНИЛ, 1987. 56 с.

3. Бородин И.Ф. Применение сверхвысокой частоты в сельском хозяйстве // Электричество. 1989. № 6. С. 1-8.

4. Пахомов В.И., Пахомов А.И., Паралопов А.А. Перспективы применения СВЧ-энергии в сельском хозяйстве // Тр. Междунар. науч.-техн. конференции «Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве». М.: ВИЭСХ. 2010. Т. 3. С. 250-255.

5. Григорьев Ю.Г. Биоэффекты при воздействии модулированных электромагнитных полей в острых опытах // Сб. тр. Ежегодника РНКЗНИ 2003. М.: Изд-во «АЛЛАНА», 2004. С. 16-73.

6. Устройство для обработки биообъектов низкоинтенсивным СВЧ излучением: Патент РФ № 66883, А01С 1/00, № 2007111431 / Б.Н. Орлов, А.А. Гаврилова, А.В. Чурмасов, М.А. Кревский. Оpubл. 10.10.2007. Бюл. № 28.

7. Алексенко А.А. Экологически чистые электротехнологии в сельском хозяйстве // Ползуновский вестник. 2011. № 2/2. С. 37-42.

8. Требух В.П., Морозов О.А., Морозов А.О. Микроволновая установка большой производительности для высокоинтенсивной тепловой обработки зерна и зерновых продуктов // Вестник ВНИИМЖ. 2014. № 1 (13). С. 63-70.

9. Сыроватка В.И. Совершенствование технологических процессов производства комбикормов в хозяйствах // Вестник ВНИИМЖ. 2014. № 1 (13). С. 4-11.

10. Андреев С.А., Пивоваров Д.Н. Использование микроволновой печи «Электроника» при СВЧ-обработке сельскохозяйственных продуктов // Науч.-техн. бюл. по электрификации сельского хозяйства. 1986. Вып. 2 (57). С. 25-32.

11. Андреев С.А., Ермакова И.А. Математическое моделирование процесса распределения электромагнитного поля в пространстве микроволнового резонатора. Актуальные проблемы в современной науке: теория и практика // Сб. статей II Междунар. науч.-практ. конференции. М.: ООО «Мегаполис», 2018. С. 125-132.

References

1. Pchel'nikov Yu.N., Sviridov V.T. Elektronika sverkhvysokikh chastot. Massovaya radiobiblioteka [Electronics of ultrahigh frequencies. Mass radio library]. Moscow, Radio i svyaz', 1981;1039: 96. (in Rus.).

2. Borodin I.F., Sharkov G.A., Gorin A.D. Primeneniye SVCH-energii v sel'skom khozyaystve [Application of microwave energy in agriculture]. Moscow, Gosagroprom SSSR: VASKHNIL, 1987: 56. (in Rus.).

3. Borodin I.F. Primeneniye sverkhvysokoy chastoty v sel'skom khozyaystve [Application of ultrahigh frequency in agriculture]. *Elektrichestvo*, 1989; 6: 1-8. (in Rus.).

4. Pakhomov V.I., Pakhomov A.I., Parapopov A.A. Perspektivy primeneniya SVCH-energii v sel'skom khozyaystve [Prospects for the application of microwave energy in agriculture]. *Tr. Mezhdunar. nauch.-tekhn. konferentsii "Energoobespecheniye i energosberezheniye v sel'skom khozyaystve"*. Moscow, VIESKH. 2010; 3: 250-255. (in Rus.).

5. Grigor'yev Yu.G. Bioeffekty pri vozdeystvii modulirovannykh elektromagnitnykh poley v ostryykh opytakh

[Bioeffects of the exposure to modulated electromagnetic fields in acute experiments]. *Sb. tr. Yezhegodnika RNKZNI 2003*. Moscow, Izd-vo "ALLANA", 2004: 16-73. (in Rus.).

6. Orlov B.N., Gavrilova A.A., Churmasov A.V., Krevskiy M.A. Ustroystvo dlya obrabotki bioob'yektov nizkointensivnym SVCH izlucheniym [Device for exposing bioobjects to low-intensity microwave radiation]: RF Patent No. 66883, 2007. (in Rus.).

7. Aleksenko A.A. Ekologicheski chistyye elektrotekhnologii v sel'skom khozyaystve [Eco-friendly electrotechnologies in agriculture]. *Polzunovskiy vestnik*, 2011; 2/2: 37-42. (in Rus.).

8. Trebukh V.P., Morozov O.A., Morozov A.O. Mikrovolnovaya ustanovka bol'shoy proizvoditel'nosti dlya vysokointensivnoy teplovooy obrabotki zerna i zernovykh produktov [Microwave installation of high capacity for high-intensity heat treatment of grain and grain products]. *Vestnik VNIIMZH*, 2014; 1 (13): 63-70. (in Rus.).

9. Syrovatka V.I. Sovershenstvovaniye tekhnologicheskikh protsessov proizvodstva kombikormov v khozyaystvakh [Improving technological processes of production of mixed fodders in farm enterprises]. *Vestnik VNIIMZH*, 2014; 1 (13): 4-11. (in Rus.).

10. Andreyev S.A., Pivovarov D.N. Ispol'zovaniye mikrovolnovoy pechi "Elektronika" pri SVCH-obrabotke sel'skokhozyaystvennykh produktov [Use of the microwave oven "Electronics" for microwave processing of agricultural products]. *Nauch.-tekhn. byul. po elektrifikatsii sel'skogo khozyaystva*, 1986; 2 (57): 25-32. (in Rus.).

11. Andreyev S.A., Yermakova I.A. Matematicheskoye modelirovaniye protsessa raspredeleniya elektromagnitnogo polya v prostranstve mikrovolnovogo rezonatora [Mathematical modeling of the process of electromagnetic field distribution inside the microwave cavity]. *Aktual'nyye problemy v sovremennoy nauke: teoriya i praktika. Sb. statey II Mezhdunar. nauch.-prakt. konferentsii*. Moscow, ООО "Мегаполис", 2018: 125-132. (in Rus.).

Критерии авторства

Андреев С.А., Иванова Т.В. провели обобщение и написали рукопись. Андреев С.А., Иванова Т.В. имеют на статью авторские права и несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила 29.08.2018

Contribution

Andreyev S.A., Ivanova T.V. summarized the material and wrote the manuscript. Andreyev S.A., Ivanova T.V. have equal author's rights and bear equal responsibility for plagiarism.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this paper.

The paper was received on August 29, 2018