

С. А. АНДРЕЕВ, канд. техн. наук, доцент

В. М. КАРНАУХОВ, канд. физ.-мат. наук, доцент

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – Московская сельскохозяйственная академия имени К. А. Тимирязева, Российская Федерация, г. Москва

S. A. ANDREEV, Ph. D. of Engineering Sciences, Associate Professor

V. M. KARNAUKHOV, Ph. D. of Physico-mathematical Sciences, Associate Professor

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Russian State University Moscow Agricultural Academy of the name of K. A. Timiryazev", Russian Federation, Moscow

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАБОЧЕГО ОБЪЕМА В КАМЕРЕ МИКРОВОЛНОВОЙ УСТАНОВКИ ПЕРИОДИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ

### THE DEFINITION OF THE EFFECTIVE VOLUME IN THE CHAMBER OF MICROWAVE INSTALLATION PERIODIC ACTION

**Аннотация.** Энергия сверхвысокочастотных электромагнитных полей широко используется для повышения эффективности многих технологических процессов. Необходимым условием успешной микроволновой обработки сельскохозяйственных материалов является точность дозирования подводимой энергии, однако современные микроволновые установки периодического действия не обеспечивают достаточно равномерного воздействия во всем объеме резонатора. Поэтому актуальной задачей является определение рабочего объема, во всех точках которого разность интенсивности микроволнового воздействия не будет превышать установленную величину. В статье предложен алгоритм проведения экспериментально-теоретических исследований, позволяющий определить рабочий объем практически любой микроволновой установки периодического действия. Первым этапом исследований является замер интенсивности воздействия поля в различных точках камеры, который должен осуществляться по величине теплового эффекта. В качестве второго шага исследований рассматривается процедура составления математической модели распределения поля, в которой в качестве независимых переменных используются пространственные координаты экспериментальных точек. Во избежание чрезмерной сложности расчетов и связанных с ними погрешностей вычислений поиск параметров модели рекомендуется осуществлять методом узловой точки. На третьем этапе исследований должен производиться анализ полученной модели и определение значения максимальной дозы сверхвысокочастотного воздействия и соответствующих стационарных точек. Завершающим действием является оценка величины рабочего объема посредством вычисления определенного интеграла от функции, учитывающей поставленные условия и сформированной в результате последовательного рассмотрения ограничивающей линии на плоскости и ограничивающей плоскости в пространстве.

**Ключевые слова:** СВЧ-энергия, микроволновая обработка, сельскохозяйственные материалы, дозирование воздействия, объемный резонатор, математическое моделирование, рабочий объем.

**Abstract.** The energy of microwave electromagnetic fields is widely used to improve the efficiency of many technological processes. A necessary condition for the successful microwave processing of agricultural materials is the accuracy of the dosing of the supplied energy, but modern microwave batch plants do not provide a sufficiently uniform effect in the entire volume of the resonator. Therefore, the actual task is to determine the working volume, at all points of which the difference in the intensity of microwave exposure will not exceed the set

*value. In article the algorithm of carrying out of experimental and theoretical studies allow to determine the displacement of virtually any microwave installations periodic action. The first stage of research is the measurement of the intensity of the field effect at different points of the chamber, which should be carried out by the magnitude of the thermal effect. The second step of the research is the procedure of compiling a mathematical model of the field distribution, in which the spatial coordinates of the experimental points are used as independent variables. In order to avoid excessive complexity of calculations and associated calculation errors, it is recommended to search for model parameters by the nodal point method. At the third stage of research, the obtained model should be analyzed and the value of the maximum dose of microwave exposure and the corresponding stationary points should be determined. The final action is to estimate the value of the working volume by calculating a certain integral of the function that takes into account the conditions and formed as a result of sequential consideration of the bounding line on the plane and the bounding plane in space.*

**Keywords:** *microwave energy, microwave processing, agricultural materials, dosage of exposure, the volume of the resonator, mathematical modelling of the displacement.*

### **Основные положения**

1. Обоснована необходимость определения рабочего объема резонатора для обеспечения точного дозирования СВЧ-воздействия на сельскохозяйственные материалы.

2. Изложена последовательность экспериментального исследования напряженности поля внутри рабочей камеры микроволновой установки периодического действия.

3. Получена математическая модель распределения СВЧ-поля и осуществлен ее анализ.

4. Произведен расчет рабочего объема резонатора, удовлетворяющего условиям равномерности микроволновой обработки сельскохозяйственных материалов.

### **Введение**

Микроволновая обработка сельскохозяйственных материалов требует тщательного дозирования воздействия. Вместе с тем промышленные микроволновые установки периодического действия не обеспечивают одинаковой напряженности поля внутри рабочей камеры. Поэтому, стремясь увеличить производительность процесса и загружая в рабочую камеру максимально возможный объем обрабатываемых материалов, мы рискуем часть этих материалов подвергнуть ненормированному воздействию. Во избежание нарушения требуемой дозы обработки необходимо рассчитать максимально допустимый объем пространства рабочей камеры, все точки которого характеризовались бы одинаковой напряженностью поля.

### **Материалы и методы**

В качестве материала исследований

были использованы экспериментальные данные, полученные при изучении распределения СВЧ-поля в объемном резонаторе. Поиск параметров трехфакторного нелинейного уравнения регрессии осуществлялся методом узловых точек с использованием принципа наименьших квадратов. При поиске рабочего объема использовалось численное интегрирование функции, сформированной в соответствии с условиями поставленной задачи.

**Цель исследований** – определение рабочего объема в камере микроволновой установки, характеризующегося близкими значениями напряженности поля.

### **Результаты и обсуждения**

Возрастающее значение в осуществлении ряда технологических процессов АПК принадлежит электромагнитной энергии сверхвысокой частоты (СВЧ) [1, 2]. В соответствии с классическим представлением СВЧ-диапазон сосредоточен в интервале от 300 до 3000 МГц, однако сегодня в категорию СВЧ часто относят электромагнитные колебания и более высоких частот – 4,5...6,0 ГГц. Начиная с 90-х годов XX столетия в отечественной терминологии утвердилась классификация электромагнитной энергии по длинам волн, в соответствии с которой СВЧ-диапазон стал называться микроволновым. Соответственно, СВЧ-технологии и СВЧ-оборудование, описанные в трудах основоположников этого прикладного направления, получили определения микроволновых.

На сегодняшний день микроволновой обработке успешно подвергается ряд сель-

скохозяйственных материалов [3]. Среди них: продукты растениеводства, молоко и молокопродукты, древесина, почва, зерно, семена и многое другое [4]. Для микроволновой обработки сельскохозяйственных материалов применяются установки непрерывного и периодического действия. В установках непрерывного действия обрабатываемые материалы располагаются на движущейся ленте (на транспортере), а затем перемещаются в зону воздействия электромагнитного поля [5]. Иногда в таких установках материалы остаются неподвижными, а перемещается сама микроволновая установка (например, при обработке почвы в полевых условиях). В установках периодического действия обрабатываемые материалы предварительно загружаются в рабочую камеру, после чего на определенное время включается микроволновый генератор [6]. Таким образом, зона воздействия микроволновой энергии в первом случае является частью разомкнутой системы, а во втором – объемным резонатором.

Основным требованием к процессу микроволновой обработки сельскохозяйственных материалов является точность дозирования подводимой энергии. Известно, что в большинстве случаев эффективность микроволновой обработки существенно зависит от получаемой материалом дозы и имеет явно выраженный экстремальный характер [7]. При обработке биологических материалов с использованием специфического (нетеплового) действия требования к точности дозирования микроволновой энергии еще более возрастают [8].

Надо признать, что микроволновые установки непрерывного действия не способны обеспечить требуемой точности воздействия, вследствие значительного влияния на процесс облучения внешних факторов, меняющегося расстояния между обрабатываемыми материалами и излучателем и других причин. Кроме того, КПД установок непрерывного действия невелик, а их эксплуатация требует повышенных мер безопасности ввиду существенного рассеяния электромагнитной энергии в окружающую среду. По этим причинам в особо ответственных случаях, например, при предпосевной обработке семян, используют исключительно установки периодического

действия. Для повышения равномерности распределения поля внутри рабочей камеры эти установки оснащаются либо механизмом вращения обрабатываемого материала (как в бытовых микроволновых печах), либо стирерами – электромеханическими устройствами, меняющими направление потока за счет изменения угла его отражения от вращающихся лопастей. Но и в этих установках достичь требуемой точности дозирования во всех точках рабочей камеры в полной мере не удастся [9].

Каждый раз оператору приходится находить компромисс между производительностью процесса, и точностью дозирования воздействия. Повышение производительности достигается увеличением количества обрабатываемого материала, а сокращение разброса величины дозы в каждой точке – его уменьшением. Обычно эта процедура осуществляется «на глаз» и ее успех определяется опытом и добросовестностью оператора. Вместе с тем, ввиду многообразия микроволновых установок периодического действия, а также множества режимов воздействия, создание единых рекомендаций по выбору количества обрабатываемых материалов едва ли возможно. В связи с этим приобретает актуальность разработка общей методики определения рабочего объема в камере микроволновой установки, характеризующегося близкими значениями напряженности поля.

Сформулированная методика апробировалась при расчете параметров рабочего объема камеры отечественной микроволновой установки КБН-82, разработанной в конце 70-х годов, успешно выпускаемой по сей день и послужившей основой для конструирования широкого круга подобных устройств фирмами Sony, Husqvarna, LG, Samsung и др. [10].

Методика определения рабочего объема сводится к последовательному выполнению следующих операций:

1. Экспериментальному исследованию распределения электромагнитного поля в пространстве рабочей камеры.

2. Составлению математической модели, иллюстрирующей зависимость интенсивности воздействия поля на обрабатываемые материалы от пространственных координат.

3. Определению координат точки максимальной интенсивности воздействия.

4. Формулированию условий допустимого отклонения интенсивности микроволнового воздействия от аналогичной величины в точке максимума.

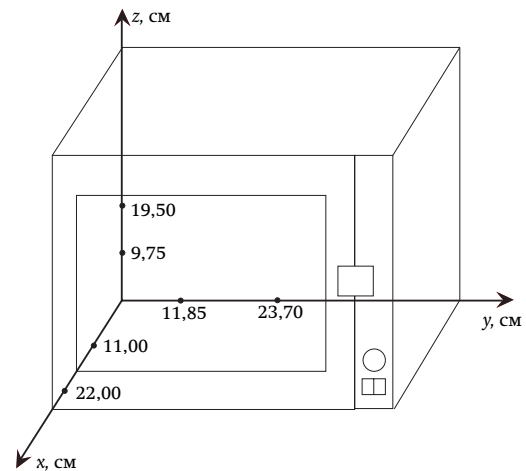
5. Расчету рабочего объема, удовлетворяющего условиям равномерности микроволновой обработки сельскохозяйственных материалов.

Экспериментальная оценка напряженности поля в пространстве рабочей камеры осуществлялась косвенным образом – посредством замеров количества тепловой энергии, приобретенной обрабатываемым материалом за определенное время. От непосредственных замеров напряженности пришлось отказаться, так как используемые при этом электрические датчики содержат токопроводящие элементы (в том числе – соединительные проводники), которые искажают и локализуют энергию поля. Обрабатываемым материалом служила вода, помещенная в стеклянную емкость с плоским основанием. Количество сообщенной теплоты (далее – доза) определялось в соответствии с выражением

$$D = C_0 m (T_2 - T_1),$$

где  $C_0$  – теплоемкость воды,  $C_0 = 4,19$  кДж/кг-град;  $m$  – масса воды,  $m = 0,075$  кг;  $T_1$  и  $T_2$  – начальная и конечная температуры воды соответственно, град.

Продолжительность микроволнового воздействия составляла 40 с. Эксперимент осуществлялся в 27 точках рабочей камеры. При этом начало координат располагалось в дальнем левом нижнем углу (рисунок), а исследуемое пространство разбивалось на три уровня: по длине (Y), по ширине (X) и высоте (Z). Для удобства расчетов координаты исследуемых точек измерялись в сантиметрах.



Расположение исследуемых точек в пространстве рабочей камеры

Таблица 1 – Экспериментальные данные и результаты их обработки

№ точки	X	Y	Z	$D_{\text{экс.}}$	$D_{\text{теор.}}$	$\Delta, \%$
1	2	3	4	5	6	7
1	3,8	4,2	0	174,6	191,2	9,5
2	11,4	4,2	0	172,6	183,9	6,6
3	29,0	4,2	0	156,4	172,0	10,0
4	3,8	12,6	0	190,0	192,6	1,4
5	11,4	12,6	0	187,3	186,8	0,2
6	29,0	12,6	0	169,2	173,4	2,5
7	3,8	21,0	0	177,2	194,1	9,6
8	11,4	21,0	0	175,2	188,3	7,5
9	29,0	21,0	0	157,3	174,9	11,2
10	3,8	4,2	5	204,1	191,4	6,2
11	11,4	4,2	5	206,8	185,6	10,2
12	29,0	4,2	5	187,3	172,2	8,03
13	3,8	12,6	5	221,6	192,9	13,0
14	11,4	12,6	5	226,5	187,1	17,4
15	29,0	12,6	5	204,3	173,7	14,9
16	3,8	21,0	5	209,3	194,3	7,1
17	11,4	21,0	5	209,6	188,5	10,03
18	29,0	21,0	5	190,5	175,1	8,04
19	3,8	4,2	10	173,5	191,6	10,5
20	11,4	4,2	10	173,2	185,8	7,3

№ точки	X	Y	Z	$D_{\text{экс.}}$	$D_{\text{теор.}}$	$\Delta, \%$
1	2	3	4	5	6	7
21	29,0	4,2	10	155,9	172,4	10,6
22	3,8	12,6	10	185,4	193,1	4,2
23	11,4	12,6	10	193,8	187,3	3,3
24	29,0	12,6	10	170,6	173,9	2,0
25	3,8	21,0	10	173,5	194,5	12,2
26	11,4	21,0	10	177,7	188,8	6,3
27	29,0	21,0	10	160,4	175,4	9,4

Результаты эксперимента сведены в таблицу 1.

По массиву экспериментальных данных составлялась математическая модель распределения поля  $D = f(x, y, z)$ .

В настоящее время в исследовательской практике широкое распространение получили ортогональные планы. Эти планы позволяют сократить количество опытов и получить математическую модель, пригодную для анализа и оптимизации изучаемого процесса. Вместе с тем ортогональные планы требуют проведения эксперимента при фиксированных и предусмотренных схемой этих планов значениях независимых переменных. В нашем случае удовлетворить требованиям схемы плана не представлялось возможным. Кроме того, ортогональные планы предусматривают проведение сложной процедуры анализа многофакторной модели и допускают возможность несовместимости исследуемых факторов. В то же время расчет параметров нелинейной трехфакторной полиномиальной модели методом наименьших квадратов также не вполне эффективен, так как он требует проведения большого объема вычислительных операций, что повышает риск получения неверных ответов.

Во избежание перечисленных недостатков при составлении модели распределения электромагнитного поля в пространстве рабочей камеры был использован метод узловой точки. В соответствии с этим методом гиперповерхность изучаемого процесса может быть представлена в виде

$$D = \frac{1}{(D_0)^{n-1}} \prod_{j=1}^n f_j(v_j), \quad (1)$$

где  $D_0$  – значение дозы в узловой точке с координатами;  $x = 11,4$  см,  $y = 11,4$  см,  $z = 5$  см;  $n$  – количество факторов,  $n = 3$ ;  $j$  – номер однофакторной функции и номер фактора;  $v_j$  – фактор,  $v_1 = x, v_2 = y, v_3 = z$ .

Возможность применения выражения (1) обусловлена положительностью  $D_0$ , а также подчиняемостью изучаемого процесса мультипликативному влиянию факторов. Трехфакторная модель, полученная методом узловой точки, имеет вид:

$$D = \frac{1}{D_0^2} (a_1 x^2 + b_1 x + c_1) (a_2 y^2 + b_2 y + c_2) (a_3 z^2 + b_3 z + c_3), \quad (2)$$

Поскольку зависимость дозы воздействия от каждой переменной  $(x, y, z)$  не является линейной, математическая модель определялась в виде системы регрессионных уравнений второго порядка:

$$\begin{cases} D = a_1 x^2 + b_1 x + c_1; y = \text{const}, z = \text{const} \\ D = a_2 x^2 + b_2 x + c_2; y = \text{const}, z = \text{const} \\ D = a_3 x^2 + b_3 x + c_3; y = \text{const}, z = \text{const} \end{cases}$$

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

$$\begin{cases} a_1 \sum_{i=1}^3 x_i^4 + b_1 \sum_{i=1}^3 x_i^3 + c_1 \sum_{i=1}^3 x_i^2 = \sum_{i=1}^3 x_i^2 D_i \\ a_1 \sum_{i=1}^3 x_i^3 + b_1 \sum_{i=1}^3 x_i^2 + c_1 \sum_{i=1}^3 x_i = \sum_{i=1}^3 x_i D_i \\ a_1 \sum_{i=1}^3 x_i^2 + b_1 \sum_{i=1}^3 x_i + 3c_1 = \sum_{i=1}^3 D_i \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} a_2 \sum_{i=1}^3 y_i^4 + b_2 \sum_{i=1}^3 y_i^3 + c_2 \sum_{i=1}^3 y_i^2 = \sum_{i=1}^3 y_i^2 D_i \\ a_2 \sum_{i=1}^3 y_i^3 + b_2 \sum_{i=1}^3 y_i^2 + c_2 \sum_{i=1}^3 y_i = \sum_{i=1}^3 y_i D_i \\ a_2 \sum_{i=1}^3 x_i^2 + b_2 \sum_{i=1}^3 x_i + 3c_2 = \sum_{i=1}^3 D_i \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} a_3 \sum_{i=1}^3 z_i^4 + b_3 \sum_{i=1}^3 z_i^3 + c_3 \sum_{i=1}^3 z_i^2 = \sum_{i=1}^3 z_i^2 D_i \\ a_3 \sum_{i=1}^3 z_i^3 + b_3 \sum_{i=1}^3 z_i^2 + c_3 \sum_{i=1}^3 z_i = \sum_{i=1}^3 z_i D_i \\ a_3 \sum_{i=1}^3 z_i^2 + b_3 \sum_{i=1}^3 z_i + 3c_3 = \sum_{i=1}^3 D_i \end{cases} \quad (5)$$

В результате решения систем уравнений (3), (4) и (5) были найдены следующие корни:



$$a_1 = -58,3 \times 10^{-3}; b_1 = 11,6 \times 10^{-1}; c_1 = 218;$$

$$a_2 = -22,6 \times 10^{-2}; b_2 = 58,5 \times 10^{-1}; c_2 = 186,4;$$

$$a_3 = -13,6 \times 10^{-1}; b_3 = 13,7; c_3 = 189,8.$$

Проверка качества модели осуществлялась подстановкой в нее исходных значений независимых переменных  $x$ ,  $y$  и  $z$  и сравнении полученных значений дозы с экспериментальными величинами. Теоретические значения дозы  $D_{\text{теор}}$  и значения отклонений также сведены в таблицу 1. Для нахождения экстремума про дифференцируем выражение (2) по  $x$ ,  $y$  и  $z$ :

$$\begin{cases} \frac{\partial D}{\partial x} = \frac{1}{D_0^2} (2a_1x + b_1)(a_2y^2 + b_2y + c_2)(a_3z^2 + b_3z + c_3) \\ \frac{\partial D}{\partial y} = \frac{1}{D_0^2} (2a_2y + b_2)(a_1x^2 + b_1y + c_1)(a_3z^2 + b_3z + c_3) \\ \frac{\partial D}{\partial z} = \frac{1}{D_0^2} (2a_3z + b_3)(a_2y^2 + b_2y + c_2)(a_1x^2 + b_1x + c_1) \end{cases} \quad (6)$$

Стационарные точки определялись как корни системы уравнений, полученной в результате приравнивания выражений (6) к нулю:

$$\begin{cases} \frac{1}{D_0^2} (2a_1x + b_1)(a_2y^2 + b_2y + c_2)(a_3z^2 + b_3z + c_3) = 0 \\ \frac{1}{D_0^2} (2a_2y + b_2)(a_1x^2 + b_1y + c_1)(a_3z^2 + b_3z + c_3) = 0 \\ \frac{1}{D_0^2} (2a_3z + b_3)(a_2y^2 + b_2y + c_2)(a_1x^2 + b_1x + c_1) = 0 \end{cases}$$

Численные значения стационарных точек сведены в таблицу 2.

Таблица 2 – Стационарные точки исследуемой функции

Наименование координаты	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

Из совокупности стационарных точек выбраны значения, соответствующие глобальному максимуму:  $x_0 = 9,97$  см,  $y_0 = 12,90$  см и  $z_0 = 5,03$  см. Таким образом, в точке с координатами  $(x_0, y_0, z_0)$  доза энергии, сообщенная обрабатываемому материалу, максимальна и соответствует 22,42 кДж/кг. Очевидно, что для достижения максимального КПД процесса микроволновую обработку следует производить в окрестности найденной

точки. При этом удаление от этой точки в любом направлении будет сопровождаться уменьшением дозы. Поэтому поиск максимального объема обрабатываемого материала сводится к определению пространства, внутри которого все точки обрабатываемого материала получают дозу, отличающуюся от требуемой на величину допустимого отклонения.

Итак, мы располагаем функцией

$$D = D_1 (A - (x - a)^2) (B - (y - b)^2) (C - (z - c)^2),$$

$$D_1 = \frac{1}{D_0^2}; a = x_0; b = y_0; c = z_0; \quad (7)$$

где  $A = a^2 + C_1$ ;  $B = b^2 + C_2$ ;  $C = c^2 + C_3$ .

Рассмотрим поверхность уровня этой функции.

Преобразуем систему координат посредством смещения исходного начала координат  $O(0, 0, 0)$  в точку  $M_0(a, b, c)$ . Тогда выражение (7) можно представить в виде

$$D = D_1 (A - x^2) (B - y^2) (C - z^2).$$

При этом максимальное значение дозы, приходящееся на линию уровня, определяется выражением:  $D = D_{\text{max}} = D_1 ABC$ . Для выполнения условия  $D_0 < D_{\text{max}}$  необходимо вычислить объем, ограниченный поверхностью уровня

$$D_0 : D_1 (A - x^2) (B - y^2) (C - z^2) = D_0.$$

Искомый объем определим с помощью тройного интеграла

$$V = \iiint_V 1 dx \times dy \times dz = \int_{z_{\text{min}}}^{z_{\text{max}}} dz \iint_{V_z} 1 dx \times dy,$$

где  $V_z$  – плоское сечение объема  $V$  (замкнутая плоскость пространства), ограниченного линией

$$(A - x^2) (B - y^2) = \frac{D_0}{D_1 (C - z^2)}.$$

Обозначим:  $U = \frac{D_0}{D_1 (C - z^2)}.$

Построим линию  $(A - x^2) (B - y^2) = U$ , которая симметрична относительно осей  $OX$  и  $OY$ . Пусть  $x > 0$ ,  $y > 0$ .

$$\text{Тогда } y = \sqrt{B - \frac{U}{A - x^2}}. \quad (8)$$

Легко заметить, что при возрастании  $x$  будет наблюдаться уменьшение  $y$ .

В результате дифференцирования выражения (8) получим:

$$y' = \frac{U_x}{\sqrt{B - \frac{U}{A-x^2}} (A-x^2)^2}. \quad (9)$$

Из выражения (9) видно, что при

$$x \rightarrow 0 \quad y' \rightarrow 0. \quad \text{Одновременно при } x \rightarrow \sqrt{A - \frac{U}{B}} \\ y' \rightarrow \infty.$$

$$\text{Тогда } B - \frac{U}{A-x^2} = 0. \quad \text{Откуда } x = \sqrt{A - \frac{U}{B}}.$$

Вычислим площадь

$$\iint_{V_z} dx \times dy = 4 \int_0^{\sqrt{A - \frac{U}{B}}} dx \int_0^{\frac{B-U}{A-x^2}} dy = 4 \int_0^{\sqrt{A - \frac{U}{B}}} \sqrt{B - \frac{U}{A-x^2}} dx = \\ = 4 \int_0^{\sqrt{A - \frac{U}{B}}} \sqrt{\frac{AB - Bx^2 - U}{A-x^2}} dx.$$

Принимая во внимание возможность представления координаты  $x$  в виде тригонометрической функции  $x = \sqrt{A} \sin t$ , сформируем следующее выражение для определения площади:

$$f(z) = 4 \int_0^{\arcsin \sqrt{A - \frac{U}{AB}}} \sqrt{(AB - U) - AB \sin^2 t} \times dt.$$

Поскольку  $\frac{D_9}{D_1(C-z^2)} \leq AB$ , можно утверждать, что  $C - z^2 \geq \frac{D_9}{DAB}$ .

Аналогично при

$$z^2 \leq C - \frac{D_0}{D_1 FC} \quad |z| \leq \sqrt{C - \frac{D_0}{D_1 AB}}.$$

Для определения искомого объема необходимо вычислить значение интеграла:

$$V = 2 \int_0^{\sqrt{C - \frac{D_0}{D_1 AB}}} f(z) dz,$$

где  $C = z_0^2 + C_3$ ;  $A = x_0^2 + C_1$ ;  $B = y_0^2 + C_2$ .

Таким образом, выполняя перечисленные действия для известных значений дозы микроволнового воздействия в узловой точке, максимально допустимого отклонения дозы в соответствии с требованиями технологического процесса, а также для известной зависимости дозы от координат, возможно определение рабочего объема, удовлетворяющего условиям равномерности микроволновой обработки сельскохозяйственных материалов.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Диденко А. Н. СВЧ-энергетика: Теория и практика / Отв. ред. Я. В. Данилевич. М. : Наука, 2003. 446 с.
2. Окресс Э. СВЧ-энергетика / Пер. с англ. В 3-х т. М. : Мир, 1971. 963 с.
3. Бородин И. Ф., Шарков Г. А., Горин А. Д. Применение СВЧ-энергии в сельском хозяйстве. Госагропром СССР / Всесоюзный научно-исследовательский институт информации технико-экономических исследований в агропромышленном комплексе. М. : 1987. 55 с.
4. Пюшнер Г. Нагрев энергией сверхвысоких частот / Пер. с англ. М. : Энергия, 1968. 312 с.
5. Шматько А. А. Электронные приборы сверхвысоких частот. Основы теории и радиофизический лабораторный практикум: Учебное пособие. Харьков : ХНУ имени В. Н. Карузина, 2006. 328 с.
6. Шабунин С. Н., Соловьянова И. П. Волноводы и объемные резонаторы: Методические указания по курсу «Электродинамика и распространение радиоволн». Екатеринбург : УГТУ, 1998. 38 с.
7. Белов А. А. Совершенствование технологии и сверхвысокочастотных установок для повышения кормовой ценности фуражного зерна: дис. ... доктора техн. наук : 05.20.02 / А. А. Белов. М., 2016. 417 с.
8. Гаврилова А. А., Егорашин В. Г., Чурмасов А. В., Кревский М. А. Применение СВЧ технологии сверхнизкой интенсивности в сельском хозяйстве // Журнал радиоэлектроники РАН / Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова. 2014. № 11. С. 1–24.
9. Андреев С. А., Пивоваров Д. Н. Использование микроволновой печи «Электроника» для СВЧ-обработки сельскохозяйственных продуктов // Научно-технический бюллетень по электрификации сельского хозяйства / ВИЭСХ. 1986. Выпуск 2 (57). С. 25–35.
10. Беляев А. А., Андержанов А. Л., Андреев С. А., Соколов А. И. Исследование распределения СВЧ-поля в пространстве рабочей камеры // Электропривод и электротехнология на объектах АПК: Сборник научных трудов МИИСП имени В. П. Горячкина. М. , 1989. С. 12–21.

REFERENCES

1. **Didenko A. N.** SVCh-energetika: Teoriya i praktika / Otv. red. Ya. V. Danilevich. M. : Nauka, 2003. 446 p.
2. **Okress E.** SVCh-energetika / Per. s angl. V 3 tomakh. M. : Mir, 1971. 963 p.
3. **Borodin I. F., Sharkov G. A., Gorin A. D.** Primenenie SVCh-energii v sel'skom khozyaystve. Gosagroprom SSSR, Vsesoyuznyy nauchno-issledovatel'skiy institut informatsii tekhniko-ekonomicheskikh issledovaniy v agropromyshlennom komplekse. M. : 1987. 55 p.
4. **Pyushner G.** Nagrev energiyey sverkhvysokikh chastot / Per. s angl. M. : Energiya, 1968. 312 p.
5. **Shmat'ko A. A.** Elektronnyye pribory sverkhvysokikh chastot. Osnovy teorii i radiofizicheskoy laboratornyy praktikum: Uchebnoe posobie. Khar'kov : KhNU imeni V. N. Karuzina, 2006. 328 p.
6. **Shabunin S. N., Solov'yanova I. P.** Volnovody i ob"emnyye rezonatory: Metodicheskie ukazaniya po kursu «Elektrodinamika i rasprostraneniye radiovoln». Ekaterinburg : UGTU, 1998. 38 p.
7. **Belov A. A.** Sovershenstvovanie tekhnologii i sverkhvysokochastotnykh ustanovok dlya povysheniya kormovoy tsennosti furazhnogo zerna: dis. ... doktora tekhn. nauk: 05.20.02 / A. A. Belov. M., 2016. 417 p.
8. **Gavrilova A. A., Egorashin V. G., Churmasov A. V., Krevskiy M. A.** Primenenie SVCh tekhnologii sverkhnizkoy intensivnosti v sel'skom khozyaystve // Zhurnal radioelektroniki RAN / Institut radiotekhniki i elektroniki im. V. A. Kotelnikova. 2014. № 11. pp. 1–24.
9. **Andreev S. A., Pivovarov D. N.** Ispol'zovanie mikrovolnovoy pechi «Elektronika» dlya SVCh-obrabotki sel'skokhozyaystvennykh produktov // Nauchno-tekhnicheskiy byulleten' po elektrifikatsii sel'skogo khozyaystva / VIESKh. 1986. Vypusk 2 (57). pp. 25–35.
10. **Belyaev A. A., Anderzhanov A. L., Andreev S. A., Sokolov A. I.** Issledovanie raspredeleniya SVCh-polya v prostranstve rabochey kamery // Elektroprivod i elektrotekhnologiya na ob"ektakh APK: Sbornik nauchnykh trudov MIISP imeni V. P. Goryachkina. M. , 1989. pp. 12–21.

*Андреев Сергей Андреевич, канд. техн. наук, доцент*

*Тел. 8-906-783-71-60*

*E-mail: asa-finance@yandex.ru*

*123557, Москва, Большой Тишинский переулок, д. 2, кв. 61*

*Карнаухов Вячеслав Михайлович, канд. физ.-мат. наук, доцент*

*Тел. 8-903-280-04-01*

*E-mail: karnauhov60@mail.ru*

*125319, Москва, Часовая ул., д. 4, корп. 2, кв. 81*