

*Издается с ноября 2013 года  
Выходит один раз в квартал*

**№ 4 (13)**

**Декабрь 2016**

# **ВОПРОСЫ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ**

**НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ**

**УЧРЕДИТЕЛЬ – САРАТОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ ГАГАРИНА Ю.А.**

**Главный редактор**

**Зам. главного редактора**

**Ответственный секретарь**

**АРХАНГЕЛЬСКИЙ ЮРИЙ СЕРГЕЕВИЧ**

**БЕКРЕНЕВ НИКОЛАЙ ВАЛЕРЬЕВИЧ**

**ВЫРЫХАНОВ ДЕНИС АЛЕКСАНДРОВИЧ**

## **Редакционная коллегия**

**И.Н. АНТОНОВ**

**Ю.С. АРХАНГЕЛЬСКИЙ**

**Н.В. БЕКРЕНЕВ**

**В.Б. ДЕМИДОВИЧ**

**Л.С. ЗИМИН**

**Н.И. ЛОВЦОВА**

**В.Н. ЛЯСНИКОВ**

**А.Н. МАКАРОВ**

**Г.А. МОРОЗОВ**

**Ю.П. ПЕРЕЛЫГИН**

**А.Н. ПЛОТНИКОВ**

**В.П. РУБЦОВ**

**Ф.Н. САРАПУЛОВ**

**Б.К. СИВЯКОВ**

**А.А. СЫТНИК**

**Ю.Б. ТОМАШЕВСКИЙ**

**Г.Г. УГАРОВ**

**В.Н. ХМЕЛЕВ**

**В.А. ЦАРЕВ**

**Д.А. ВЫРЫХАНОВ**

д.т.н., профессор, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов

д.т.н., профессор, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов

д.т.н., профессор, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов

д.т.н., профессор, СПбГЭУ (ЛЭТИ), Санкт-Петербург

д.т.н., профессор, СамГТУ, Самара

д.с.н., профессор, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов

д.т.н., профессор, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов

д.т.н., профессор, ТГТУ, Тверь

д.т.н., профессор, КНИТУ имени А.Н. Туполева (КАИ), Казань

д.т.н., профессор, ПГУ, Пенза

д.э.н., профессор, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов

д.т.н., профессор, НИУ «МЭИ», Москва

д.т.н., профессор, УрФУ, Екатеринбург

д.т.н., профессор, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов

д.т.н., профессор, первый проректор СГТУ имени Гагарина Ю.А.

д.т.н., профессор, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов

д.т.н., профессор, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов

д.т.н., профессор, БТИ, Бийск

д.т.н., профессор, СГТУ Гагарина Ю.А., Саратов

к.т.н., СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов

Since November 2013  
Published Quarterly

**№ 4 (13)**  
**December 2016**

# **JOURNAL OF ELECTROTECHNICS**

**Scientific and Technical Publication**

The journal is founded by Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

**Chief Editor**

**Assistant to the Chief Editor**

**Chief Executive Officer**

**ARKHANGELSKIY YURIY SERGEEVICH**

**BEKRENEV NIKOLAY VALERYEVICH**

**VIRIKHANOV DENIS ALEKSANDROVICH**

## **Editorial Board Members**

**I.N. ANTONOV**

**YU.S. ARKHANGELSKIY**

**N.V. BEKRENEV**

**V.B. DEMIDOVICH**

**L.S. ZIMIN**

**N.I. LOVTSOVA**

**V.N. LYASNIKOV**

**A.N. MAKAROV**

**G.A. MOROZOV**

**YU.P. PERELYGIN**

**A.N. PLOTNIKOV**

**V.P. RUBTSOV**

**F.N. SARAPULOV**

**B.K. SIVYAKOV**

**A.A. SYTNIK**

**YU.B. TOMASHEVSKY**

**G.G. UGAROV**

**V.N. KHMELEV**

**V.A. TSAREV**

**D.A. VIRIKHANOV**

Dr.Sc., Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Dr.Sc., Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Dr. Sc., Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Dr.Sc., Professor, Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI"

Dr.Sc., Professor, Samara State Technical University

Dr. Sc., Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Dr.Sc., Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Dr.Sc., Professor, Tver State Technical University

Dr.Sc., Professor, Kazan National Research Technological University

Dr.Sc., Professor, Penza State University

Dr. Sc., Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Dr.Sc., Professor, National Research University "Moscow Power Engineering Institute"

Dr.Sc., Professor, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, Ekaterinburg

Dr.Sc., Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Dr.Sc., Professor, First Vice-Rector, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Dr. Sc., Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Dr. Sc., Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Dr.Sc., Professor, Biysk Technological Institute

Dr.Sc., Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

PhD, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

## СОДЕРЖАНИЕ

### ЭЛЕКТРОТЕРМИЯ

- Кожевников В.Ю., Машков И.В.** Математическое моделирование нагрева диэлектрика в СВЧ камере 3D принтера ..... 5
- Архангельский Ю.С., Юдина В.О.** Согласованные задачи в проектировании методических СВЧ электротермических установок..... 10

### ЭЛЕКТРОФИЗИКА

- Петровский А.П., Бочкарева А.П.** Влияние изменения режимов ультразвукового дробления агломератов твердых хрупких материалов на дисперсность получаемых порошков..... 16

### ЭЛЕКТРОХИМИЯ

- Перинская И.В., Родионов И.В.** Электротехнология ионной модификации антимонида индия - материала преобразователей Холла для измерителей СВЧ мощности ..... 26

### ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ

- Артюхов И.И., Земцов А.И., Гордеев Е.С.** Имитационная модель регулируемого источника анодного напряжения для пакетированного магнетрона промышленного назначения ..... 33

### ЭЛЕКТРОДИНАМИКА

- Гестрин С.Г., Щукина Е.В., Межоннова А.С.** Математическое моделирование солитонных возмущений ядра заряженной дислокации в полупроводнике n-типа ..... 39
- Седельников Ю.Е., Никишина Д.В., Потапова О.В., Халикова К.Н.** Оценка влияния возмущающих факторов на эффективность фокусировки электромагнитного поля в задачах СВЧ технологий ..... 46

### СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

- Сперанский С.К., Родионов И.В., Потапов А.А.** Методологические подходы к автоматизации процесса управления современным сварочным оборудованием..... 54
- Потапов А.А., Родионов И.В., Сперанский С.К., Герман В.А.** Использование фрактальных сигнатур для управления электротермическим процессом оксидирования..... 62

### ЛЕТОПИСЬ

- Морозов Г.А.** Юрий Сергеевич Архангельский ..... 69
- Кто Вы, Юрий Сергеевич? Интервью с Ю.С. Архангельским ..... 71
- К сведению авторов..... 76

## УВАЖАЕМЫЕ АВТОРЫ!

Редакция публикует при каждой статье краткие сведения об авторах. В связи с этим просим вас при направлении статьи в редакцию сообщать:

1. Полные имена и отчества всех авторов.
2. Место работы и должность.

Кроме того, напоминаем, что на каждую статью следует представлять краткий (4-5 предложений) реферат на русском и английском языках (включая название), а также ключевые слова.

## CONTENTS

### ELECTROTHERMY

- Kozhevnikov V.Y., Mashkov I.V.** Mathematical Modeling of Heat Microwave Dielectric Chamber in 3D Printer..... 5
- Arkhangelskiy Yu.S., Yudina V.O.** Objectives agreed in the methodological design of the microwave electrothermal installations ..... 10

### ELECTROPHYSICS

- Petrovsky A.P., Bochkaryova A.P.** Influence of Change of the Modes of Ultrasonic Crushing of Agglomerates of Solid Fragile Materials on Dispersion of Poluchamy Powders ..... 16

### ELECTROCHEMISTRY

- Perinskaya I.V., Rodionov I.V.** Electrotechnology of Ionic Modification Antimonite India - Material of Converters Of The Hall for Power Microwave Ovens Measuring Instruments ..... 26

### ELECTRIC POWER SUPPLY

- Artyukhov I.I., Zemtsov A.I., Gordeev E.S.** Simulation Model of Industrially Applicable Magnetron Generator with Anode Voltage Regulator ..... 33

### ELECTRODYNAMICS

- Gestrin S.G., Shchukina E.V., Mezhonova A.S.** Mathematical Modeling of Soliton Perturbations of the Core of a Charged Dislocation in n-type Semiconductor ..... 39
- Sedel'nikov E. Yu., Nikishin D. V., Potapov O. V., Khalikov K. N.** Assessment of the impact of disturbing factors on the efficiency of focusing of the electromagnetic field in problems of microwave technologies ..... 46

### CONTROLLING SYSTEMS

- Speransky S.K., Rodionov I.V., Potapov A.A.** Methodological Approaches to Automating the Process of Management of Modern Welding Equipment ..... 54
- Potapov A.A., Rodionov I.V., Speransky S.K., German V.A.** The use of fractal signature control, electro-thermal process of oxidation ..... 62

### CHRONICLE

- Morozov G. A. Osipov Arkhangelsky..... 69
- Interview with Yuri Sergeyevich Arkhangelsky..... 71
- Information for Authors..... 76

## DEAR AUTHORS!

Each article is provided with a short information about the author.  
For this reason, please, send us the following information:

1. Author(s) (last name, patronymic and first name),
2. Place of work, position.

Additionally, we would remind you that each article should be provided with an abstract (about 4-5 sentences) in Russian and in English (including the title), and keywords.

# ЭЛЕКТРОТЕРМИЯ

УДК 621.365.5

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАГРЕВА ДИЭЛЕКТРИКА В СВЧ КАМЕРЕ 3D ПРИНТЕРА

**В.Ю. Кожевников, И.В. Машков**

## MATHEMATICAL MODELLING OF MICROWAVE DIELECTRIC HEATING USING 3D PRINTING

**V.Y. Kozhevnikoff, I.V. Mashkov**

*Одним из направлений 3D печати является сверхвысокочастотный диэлектрический нагрев, применяемый для интенсификации термообработки различных диэлектрических материалов, используемых для построения 3D модели. Электротехнологическая СВЧ установка с 3D принтером позволяет ускорить процесс прототипирования и устранить такие недостатки, как деформация объекта и изменение размеров при спекания при использовании в качестве материала глины и других прекурсоров керамики. Рассмотрена математическая модель электродинамики и теплопроводности при нагреве многослойного диэлектрика в СВЧ электротермических установках лучевого типа. Получены характеристики процесса СВЧ нагрева, используемые в дальнейшем для оценки параметров технологического процесса.*

**Ключевые слова:** 3D печать, сверхвысокочастотный нагрев диэлектриков

3D печать находит широкое применение в различных отраслях электронной промышленности. Одним из направлений 3D печати является сверхвысокочастотный (СВЧ) диэлектрический нагрев, применяемый для интенсификации термообработки различных диэлектрических материалов, используемых для построения 3D модели. [1].

*One of the trends in 3D printing is microwave dielectric heating developed to stimulate heat treatment of various dielectric materials used to construct 3D models. Microwave engineering units with 3D printers allow for rapid prototyping and eliminate the disadvantages related with deformation of objects and dimensional changes at sintering when using, clay materials or other ceramic precursors. The research focuses on the mathematical electrodynamics and thermal conductivity model applied for heating a multilayer dielectric in the beam-type microwave electrothermal installations. The obtained characteristics of the microwave heating process can be used to estimate the parameters of the technological process.*

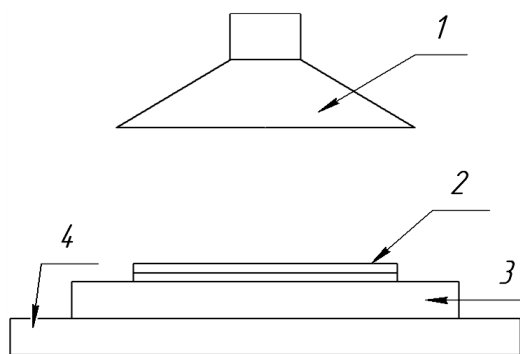
**Keywords:** 3D printing, microwave heating of dielectric materials

При термообработке твёрдых диэлектриков в поле СВЧ в них могут возникать значительные температурные деформации. Например, для сушки керамики появление температурных деформаций и трещин недопустимо.

Электротехнологическая СВЧ установка с 3D принтером позволяет ускорить процесс прототипирования и устранить та-

кие недостатки, как деформация объекта и изменение размеров при спекания при использовании в качестве материала глин и других прекурсоров керамик.

Для исследования технологического процесса сушки многослойного диэлектрика была создана математическая модель, позволяющая вычислить необходимые данные для оценки параметров технологического процесса. Для этого была рассмотрена задача электродинамики и теплопроводности при нагреве диэлектриков в СВЧ электротермических установках лучевого типа. Схема рабочей камеры установки изображена на рис. 1.



**Рис. 1.** СВЧ камера лучевого типа: 1 – СВЧ излучатель; 2 – полимерная глина; 3 – балластная нагрузка; 4 – рабочий стол

В процессе создания СВЧ 3D принтера большая роль принадлежит математическому моделированию рабочих камер и протекающих в них технологических процессов. Это объясняется сложностью решаемых технических задач, разнообразием физических процессов, происходящих в объектах СВЧ термообработки, высокими требованиями к качеству 3 D модели.

Основной задачей данной работы является создание математической модели нагрева диэлектрика в 3D принтере при СВЧ обработке. Для построения математической модели используется программный комплекс Mathcad.

Обрабатываемый диэлектрик 2 (слой наносимого) материала находится на балластной нагрузке 3, подвижной относительно излучающей системы 1. Балластная нагрузка расположена на рабочем столе 4

3D принтера. Процесс прототипирования состоит из ряда этапов: нанесение слоя диэлектрика в зоне работы экструдера, перемещение балластной нагрузки и создаваемой 3D модели в зону СВЧ облучения, облучение СВЧ энергией, перемещение 3D модели в зону экструдера, нанесение очередного слоя диэлектрика и так далее.

Задача этапа облучения СВЧ энергией создаваемой 3D модели заключается в определении нестационарного поля температур при заданной мощности СВЧ генератора. Для ее решения необходимо моделирование процессов электродинамики и теплопроводности в нагреваемом объекте.

Рассмотрим сначала решение электродинамической задачи.

Для камер лучевого типа из-за сложности нахождения электромагнитного поля в ближней зоне излучателя обычно рассматривают нормальное падение плоской электромагнитной волны на поверхность плоского диэлектрика. Тогда на основе уравнений Максвелла для случая гармонических колебаний запишем волновое уравнение, справедливое для каждого слоя диэлектрической среды [2]

$$\frac{d^2 \dot{E}_n}{dz^2} = k_n^2 \dot{E}_n, \quad (1)$$

где  $\dot{E}_n$  - комплексная функция амплитуды напряженности электрического поля в слое с номером  $n$ ;  $z$  - координата в направлении распространения электромагнитной волны;  $k_n = \alpha_n + j\beta_n$  - коэффициент распространения;  $\alpha_n$  и  $\beta_n$  - коэффициент затухания и волновое число, зависящие от электрофизических свойств  $\varepsilon_n'$  и  $\text{tg } \delta_n$ .

Решение уравнения (1) имеет вид:

$$\dot{E}_n = \dot{A}_n \exp(-kz) + \dot{B}_n \exp(kz). \quad (2)$$

Амплитуда напряженности магнитного поля в каждом слое равна

$$\dot{H}_n = \frac{k_n}{j\omega\mu_n\mu_0} [\dot{A}_n \exp(-kz) + \dot{B}_n \exp(kz)]. \quad (3)$$

Постоянные интегрирования  $A_n$  и  $B_n$  определяем из граничных условий:

$$E_0 = A_1 + B_1 \quad \text{при } z = 0 \quad (4)$$

$$E_{n-1} = E_n, H_{n-1} = H_n \quad \text{при } z = l_n \quad (5)$$

$$E_n = 0 \quad \text{при } z = l_g, \quad (6)$$

$$n = 2, \dots, g-1,$$

где  $E_0$  - напряженность электрического поля в плоскости апертуры антенны;  $g$  - количество диэлектрических слоев.

Обычно известна не величина напряженности электрического поля  $E_{me}$  на поверхности  $z = 0$ , а плотность мощности, излучаемой антенной, которую можно записать, используя теорему Умова - Пойнтинга:

$$p_0 = 0,5 R_e (\dot{E}_{me} \dot{H}_{me}) = 0,5 R_e \left\{ \left[ (\dot{A}_1 + \dot{B}_1) k_1 (\dot{A}_1 + \dot{B}_1) / (j \omega \mu_0) \right] \right\}, \quad (7)$$

где  $\dot{H}_{me}$  - сопряженный комплекс амплитуды напряженности магнитного поля при  $z = 0$ .

После преобразования (2) и (3) с учетом (5) и (6):

$$\begin{aligned} \dot{A}_{n-1} \exp(-\dot{k}_{n-1} l_{n-1}) + \dot{B}_n \exp(\dot{k}_n l_{n-1}) &= \dot{A}_n \exp(-\dot{k}_n l_{n-1}) + \dot{B}_n \exp(\dot{k}_n l_{n-1}) \\ \dot{k}_{n-1} [\dot{A}_{n-1} \exp(-\dot{k}_{n-1} l_{n-1}) - \dot{B}_{n-1} \exp(\dot{k}_{n-1} l_{n-1})] &= \dot{k}_n [\dot{A}_n \exp(-\dot{k}_n l_{n-1}) - \dot{B}_n \exp(\dot{k}_n l_{n-1})], \end{aligned} \quad (8)$$

$$(n = 2, \dots, p-1); \dot{A}_n \exp(-\dot{k}_n l_n) + \dot{B}_n \exp(\dot{k}_n l_n) = 0; n = p$$

Таким образом, получена система алгебраических уравнений относительно комплексных постоянных  $A_n$  и  $B_n$  ( $n = 1, \dots, p$ ), которая решается с помощью стандартных средств системы MathCAD.

Мощность внутренних источников теплоты в каждом слое диэлектрика определяется из соотношения

$$q_v(z) = 0,5 \omega \epsilon_0 \epsilon' \operatorname{tg} \delta \left| \dot{E} \right|^2. \quad (9)$$

Данные о распределении  $q_v(z)$  используются для определения поля температур в объекте.

Решение краевой задачи электродинамики может быть получено в аналитическом виде с использованием теории длинных линий.

Рассматривается случай, когда плоская волна затухает в обрабатываемой среде не полностью и после отражения от другой границы этой среды (в общем случае после

многократных отражений) все-таки покидает ее.

Пусть плоская электромагнитная волна имеет  $A_0$  в координате  $z = 0$ , распространяется от излучателя по оси  $z(\varphi = 0)$  до границы раздела воздух-объект и отражается от неё с коэффициентом отражения

$$\Gamma_2 = \frac{Z_{BX2} - \eta_1}{Z_{BX2} + \eta_1}, \quad (10)$$

где  $Z_{BX2}$  - входное сопротивление нагрузки, которой является для электромагнитной волны обрабатываемый диэлектрик, тогда из-за многократных отражений электромагнитной волны от границ раздела  $z = l_1$  и  $z = 0$  на границу раздела  $z = 0$  придет волна с  $A_n$ .

Решение задачи теплопроводности проводилось по соотношениям, приведенным в [3].

Алгоритм расчета СВЧ камеры лучевого типа в 3D принтере состоит из сле-

дующих этапов [4].

1. В зависимости от геометрии объекта производится выбор размера камеры, длины волны и мощности СВЧ генератора.

2. Определяются зависимости  $\varepsilon'(T)$ ,  $\operatorname{tg} \delta(T)$ ,  $c(T)$ ,  $p(T)$  обрабатываемого объекта, проводится их интерполяции.

3. Толщина обрабатываемого объекта изменяется по мере нанесения слоя при 3D печати.

4. Производится расчет плотности мощности источников  $P(z)$  для  $\varepsilon'(T)$ ,  $\operatorname{tg} \delta(T)$ , соответствующих начальному значению температуры объекта.

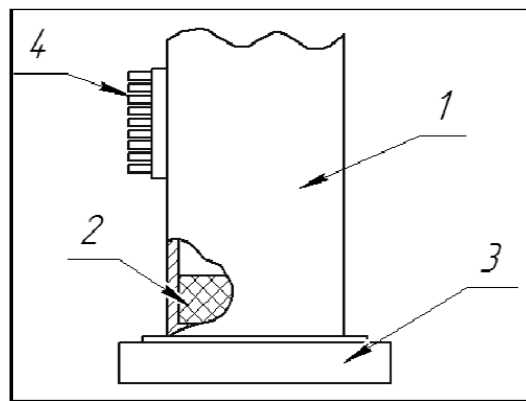
5. По соотношению  $K=1-|\Gamma_1|^2$  определяется КПД по использованию СВЧ энергии для шага по времени.

Изучение диэлектрических свойств полимерной глины, то есть исследование поведения ее комплексной диэлектрической проницаемости в зависимости от частоты, температуры, давления, напряженности электрического поля и прочих факторов, имеет весьма важное значение.

Для исследования частотной и температурной зависимостей параметров, характеризующих диэлектрик, была использована лабораторная установка, позволяющая производить измерения в широком диапазоне частот при изменении температуры образца в заданном интервале.

Существуют различные методы измерения  $\varepsilon$  и  $\operatorname{tg} \delta$  в диапазоне сантиметровых волн. Наибольшее распространение получили резонансный метод, метод отражения и поглощения при расположении диэлектрика в свободном пространстве, волноводные методы [4].

Волноводные методы и их модификации позволяют производить измерения различных твердых и жидких веществ в широком диапазоне сантиметровых длин и при широком измерении параметров диэлектриков. Измерения были проведены одним из основных методов - полное заполнение сечения волновода. Схема лабораторной установки изображена на рис. 2.



**Рис. 2.** Часть волновода лабораторной установки, с находящейся в нём полимерной глиной: 1 – волновод; 2 – полимерная глина; 3 – электрическая плита сопротивления; 4 – система охлаждения

В этом методе образец исследуемого диэлектрика толщиной  $d$  располагается в волноводе вплотную к короткозамыкающей пластине и без зазоров прилегает ко всем стенкам волновода. Второй конец волновода через развязывающий аттенуатор подключён к генератору.

Длина волны генератора (размеры волновода) выбирается таким образом, чтобы в волноводе располагался основной тип колебаний. В отсутствие образца в волноводе устанавливается стоячая волна с узлами, расположенными на расстоянии  $0,5 \lambda_d$  друг от друга и от короткозамыкающей пластины, где  $\lambda_d$  – длина волны в волноводе.

Напряжённость электрического поля в узлах стоячей волны достигает нуля, так как амплитуда отражённой волны равна амплитуде падающей [4].

При внесении образца картина изменится, принимая вид, показанный на рис. 3.

Изменения картины стоячей волны зависят от свойств исследуемого диэлектрика и могут быть связаны с его электрическими характеристиками соотношением, получающимся в результате решения соответствующей электродинамической задачи.

Решение этой задачи, учитывающей условия на границе раздела, приводит к комплексному трансцендентному уравне-



нию, связывающему характеристики диэлектрического образца с измеряемыми величинами – коэффициентом бегущей волны  $K_b$  (или коэффициентом стоячей волны  $K_c$ ) и положением узла стоячей волны относительно поверхности образца. Измерения проводятся в два этапа. В первый раз полимерная глина имела комнатную температуру (25°C), во второй раз стенка волновода, прилегающая к глине, извне подогревалась электрической плитой сопротивления до 45°C.

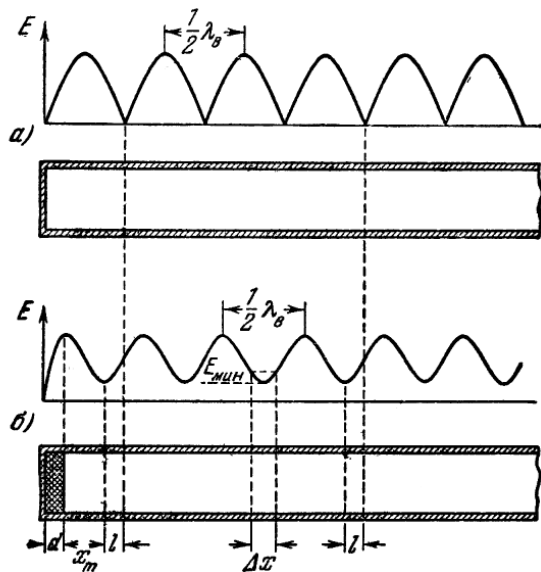


Рис. 3. Эпюры стоячей волны в волноводе: а – в пустом волноводе; б – в волноводе с диэлектриком

После получения данных о диэлектрических свойствах полимерной глины был смоделирован процесс её нагрева в СВЧ рабочей камере лучевого типа с целью подбора технологических параметров 3D принтера СВЧ установки.

Результаты измерений представлены в таблице.

Результаты измерений

| Полимерная глина    | $\varepsilon'$ | $\text{tg } \delta$ |
|---------------------|----------------|---------------------|
| Температура, °C, 25 | 67             | 0,2                 |
| Температура °C, 45  | 62             | 0,2                 |

С помощью разработанной программы, варьируя параметры СВЧ генератора, геометрию камеры и объекта, был реализован заданный технологический процесс.

На рис. 4 показана зависимость температуры слоев диэлектрика от времени при СВЧ воздействии на создаваемую 3D модель.

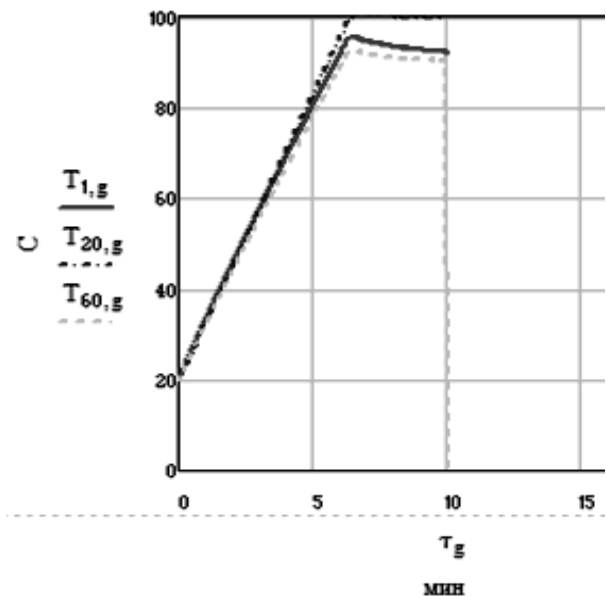


Рис. 4. Нестационарный нагрев полимерной глины

В результате расчета была определена необходимая мощность СВЧ излучателя, равная 600 Вт, длительность нагрева первого слоя составила 6 минут.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Кожевников В.Ю.** Математическое моделирование нагрева диэлектрика в СВЧ-камере 3D принтера/ В.Ю. Кожевников, И.В. Машков // Актуальные проблемы электронного приборостроения АПЭП-2016 Материалы Междуна-

ной научно-технической конференции. Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2016. Т.2. С.236-240.

2. **Архангельский Ю. С.** Компьютерное моделирование СВЧ электротермических процессов и установок / Ю.С. Архангель-

ский, С.В. Тригорлый. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2006. 212 с.

3. **Машков И.В.** Программа для моделирования электродинамических и тепловых процессов в диэлектриках при термообработке в 3D принтере / И.В. Машков.,

В.Ю. Кожевников // Св. о гос. рег. программ для ЭВМ №2015662087, 17.10.2015

4. **Брандт А.А.** Исследование диэлектриков на сверхвысоких частотах / А.А. Брандт – М.: Мир, 1963. - 403 с.

---

**Кожевников Вячеслав Юрьевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение и электротехнология» СГТУ им. Гагарина Ю.А.

**Машков Илья Вячеславович** – студент магистратуры кафедры «Электроснабжение и электротехнология» СГТУ им. Гагарина Ю.А.

**Vyacheslav Yu. Kozhevnikov** – PhD, Associate Professor, Department of Power Supplies and Electrical Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

**Ilya V. Mashkov** – Master student, Department of Power Supplies and Electrical Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

*Статья поступила в редакцию 02.11.16, принята к опубликованию 18.11.16*

УДК 621.365.5

## СОГЛАСОВАННЫЕ ЗАДАЧИ В ПРОЕКТИРОВАНИИ МЕТОДИЧЕСКИХ СВЧ ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

**Ю.С. Архангельский, В.О. Юдина**

## COORDINATED OBJECTIVES IN DESIGNING METHOD-BASED MICROWAVE ELECTROTHERMAL INSTALLATIONS

**Yu.S. Arkhangelskiy, V.O. Yudina**

*Сформированы согласованные задачи, которые надлежит решить при проектировании методических СВЧ электротермических установок. Предложен алгоритм проектирования таких установок.*

**Ключевые слова:** методические СВЧ электротермические установки, проектирование, согласованные задачи, электродинамика, теплопроводность, теплоперенос, термоупругость, технико-экономическая оптимизация, математическое моделирование, синтез рабочей камеры, алгоритм

*The paper presents the coordinated objectives and tasks needed in designing the method-based microwave electrothermal installations. The proposed algorithm is related with the design of the given facilities.*

**Keywords:** method-based microwave electrothermal installation, design, agreed objectives, electrodynamics, heat conductivity, heat transfer, thermoelasticity, technical and economic optimization, simulation, synthesis of the working chamber, the algorithm

Возможность и целесообразность применения энергии СВЧ электромагнитных колебаний (СВЧ энергии) в технологических процессах термообработки диэлектрических изделий, сред и материалов показаны, например, в работах [1-3], а основы теории и конструкции СВЧ электротермических установок – в работах [4-6]. Наибольшее распространение получили СВЧ электротермические установки, работающие в периодическом режиме (периодические СВЧ ЭТУ), но при производстве определенного изделия (объекта, продукта) с заданными параметрами (заданного качества) при одной и той же СВЧ мощности источника СВЧ энергии СВЧ ЭТУ производительность методической СВЧ ЭТУ больше, чем у СВЧ ЭТУ, работающей в периодическом режиме. Однако алгоритма проектирования методических СВЧ ЭТУ пока что нет. Рассмотрим имеющиеся здесь возможности.

Задачи, решаемые при проектировании методических СВЧ ЭТУ, находятся на стыке электродинамики, теплопроводности, тепломассопереноса, термомеханики, электромеханики, материаловедения и конкретных технологий. При этом, исключая из рассмотрения обработку в электромагнитном поле СВЧ ферромагнетиков и сегнетоэлектриков, у которых электрофизические параметры зависят от векторов напряженности электрического  $\mathbf{E}$  и магнитного  $\mathbf{H}$  полей уже в слабых полях, можно ограничиться линейными уравнениями для избранных диэлектриков:

$$\begin{aligned} \mathbf{D} &= \varepsilon \mathbf{E}, \\ \mathbf{B} &= \mu \mathbf{H}, \\ \mathbf{j} &= \sigma \mathbf{E}, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\varepsilon$  и  $\mu$  – абсолютные диэлектрическая и магнитная проницаемости обрабатываемого диэлектрика;  $\sigma$  – проводимость диэлектрика;  $\mathbf{j}$  – плотность тока проводимости;  $\mathbf{D}$ ,  $\mathbf{B}$  – векторы электрической и магнитной индукций.

Что касается структурной неоднород-

ности обрабатываемых диэлектрика, то ее размеры обычно много меньше длины волны в диэлектрике и в расчетах рабочих камер СВЧ ЭТУ неоднородный диэлектрик заменяют однородным с эквивалентными электрофизическими параметрами [4].

Диэлектрические параметры обрабатываемого диэлектрика  $\varepsilon'$  и  $\operatorname{tg} \delta$  зависят от температуры, а потому в процессе термообработки они зависят не только от времени, но и от продольной координаты транспортной системы рабочей камеры, по которой перемещается обрабатываемый объект.

Что касается теплофизических параметров обрабатываемого диэлектрика, то при тепловых расчетах можно принять обычное допущение о их постоянстве в узких интервалах температур [7]. Так что если речь идет о СВЧ нагреве, то в отсутствие сторонних токов и объемных зарядов задача сводится к совместному решению уравнений Максвелла и теплопроводности

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = \mathbf{j} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}, \quad (1 \text{ а})$$

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, \quad (1 \text{ б})$$

$$\operatorname{div} \mathbf{D} = 0, \quad (1 \text{ в})$$

$$\operatorname{div} \mathbf{B} = 0, \quad (1 \text{ г})$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + \nu \nabla T = \frac{1}{c\rho} \operatorname{div}(\lambda_T \operatorname{grad} T) + \frac{P_{y\partial}}{c\rho}, \quad (1 \text{ д})$$

где  $T$  – температура нагреваемого тела;  $\nu$  – скорость движения тела по транспортной системе;  $\lambda_T$ ,  $c$ ,  $\rho$  – коэффициент теплопроводности, удельная теплоемкость и плотность тела;  $P_{y\partial} = 0,5\omega\varepsilon_0\varepsilon'\operatorname{tg}\delta|\dot{E}|^2$  – удельная СВЧ мощность, поглощаемая телом;  $\omega$  – круговая частота СВЧ электромагнитных колебаний;  $\varepsilon_0$  – абсолютная проницаемость вакуума;  $\dot{E}$  – амплитуда напряженности электрического поля.

В задачах о СВЧ сушке капиллярно – пористых диэлектриков в системе уравне-

ний (1) вместо уравнения (1 д) должны быть уравнения тепломассопереноса Лы-

кова – Михайлова [7]

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + \nu \nabla \theta = k_{11} \nabla^2 \theta + k_{12} \nabla^2 U + k_{13} \nabla^2 p + \frac{P_{y\theta}}{c_\theta P_\theta}, \quad (2 \text{ а})$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \nu \nabla U = k_{21} \nabla^2 \theta + k_{22} \nabla^2 U + k_{23} \nabla^2 p, \quad (2 \text{ б})$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \nu \nabla p = k_{31} \nabla^2 \theta + k_{32} \nabla^2 U + k_{33} \nabla^2 p, \quad (2 \text{ в})$$

где  $k_{11}, k_{12} \dots, k_{33}$  – параметры тепломассопереноса;  $\theta = T - T_0$ ;  $T_0$  – температура окружающей среды;  $U$  – удельное влагосодержание обрабатываемого объекта;  $p$  – давление водяных паров в объекте.

Наконец, в СВЧ электромагнитном

поле из-за нагрева диэлектрика в нем могут возникнуть температурные деформации, напряжения, происходить фазовые и химические превращения. Для описания этих процессов к уравнениям Максвелла (1 а) – (1 г) следует добавить уравнения [6, 8]

$$c\rho \left( \frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{v} \nabla T \right) = \text{div} (k_{TT} \text{grad} \theta) + \text{div} (k_{T\beta} \text{grad} \rho_\beta) + \text{div} (k_{Tp} \text{grad} p) + \varphi_\beta \frac{\partial p_\beta}{\partial t} + q_v - \Pi_\theta, \quad (3 \text{ а})$$

$$\frac{\partial \rho_\beta}{\partial t} + \mathbf{v} \nabla \rho_\beta = \text{div} (k_{\beta\gamma} \text{grad} \rho_\gamma) + \text{div} (k_{\beta T} \text{grad} T) + \text{div} (k_{\beta p} \text{grad} p) + \Pi_\beta, \quad (3 \text{ б})$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \mathbf{v} \nabla p = \text{div} (k_{pp} \text{grad} p) + \text{div} (k_{pT} \text{grad} T) + \text{div} (k_{p\beta} \text{grad} \rho_\beta), \quad (3 \text{ в})$$

$$m(1-\omega) \nabla^2 \mathbf{u} + \left( l + m - \frac{1}{3} m \omega \right) \text{grad} (\text{div} \mathbf{u}) + 2\Phi_e \text{grad} [m(1-\omega)] + \\ + \text{grad} \left( l + \frac{2}{3} m \omega \right) \text{div} \mathbf{u} - \text{grad} \left[ \frac{V-V_0}{V_0} \left( l + \frac{2}{3} m \right) - \xi_p \right] + \mathbf{X} = \rho \ddot{\mathbf{u}}, \quad (3 \text{ г})$$

$$\sigma_{ij} = m(1-\omega) (u_{ij} + u_{ji}) + \left( l + \frac{2}{3} m \omega \right) u_{ji} \delta_{ij} - \frac{V-V_0}{V_0} \left( l + \frac{2}{3} m \right) \delta_{ij} + \xi p \delta_{ij}, \quad (3 \text{ д})$$

где  $T$  – температура;  $p_\beta$  – концентрация компонента обрабатываемого объекта с номером  $\beta$  ( $\beta=1, 2 \dots, A$ );  $c, \rho$  – удельная теплоемкость при постоянном давлении и плотность диэлектрика  $\left( \rho = \sum_{\beta=1}^B \rho_\beta \right)$ ;  $t$  – время;  $\mathbf{u}$  – вектор перемещения;  $\mathbf{v}$  – вектор скорости движения;  $\varphi_\beta$  – химический потенциал компонента  $\beta$ ;

$$\Pi_\theta = T \frac{\partial}{\partial t} \left\{ e_{kk} \frac{\partial}{\partial T} \left[ \frac{V-V_0}{V_0} \left( l + \frac{2}{3} m \right) - \xi p \right] \right\}$$

учитывает воздействие деформации тела на процесс теплопроводности (при  $\rho_\beta = \text{const}, p = 0$  величина  $\frac{V-V_0}{V_0} =$

$3\alpha_T (T-T_0)$  и уравнение (3 а) переходит в уравнение теплопроводности для случая термоупругой деформации);  $k_{TT} \dots k_{pp}$  –

теплофизические коэффициенты переноса;  $P_\beta$  – мощность источников массы компонентов  $\beta$ ;  $e_{kk} = \frac{V - V_0}{V_0}$  – изменение относительного удельного объема;  $V_0$ ,  $V$  – удельный объем тела при начальной температуре  $T_0$  и концентрация компонентов  $\rho_\beta = \rho_{\beta 0}$  и после изменения температур и концентрации его компонентов;  $\alpha_T$ ,  $\alpha_\beta$  – средние коэффициенты термического и концентрационного расширения в интервале температур и концентрации компонентов;  $l = \nu M[(1 + \nu)(1 - 2\nu)]$  – коэффициент Ляме;  $M$ ,  $\nu$  – модуль упругости и коэффициент Пуассона;  $m = M/[2(1 + \nu)]$  – модуль сдвига;  $\xi = \frac{\Delta V_p}{3pV_0}(2m + 3l)$ ;  $\Delta V_p$  – изменение удельного объема в области упругих деформаций при давлении  $p$  и постоянных и величинах  $T$ ,  $p_\beta$ ;  $w$  – функция относительного сдвига материала, отличающегося от нуля за пределами упругости;  $\Phi_{\text{grand}}[m(1 - \omega)]$  – скалярное произведение тензора деформации;  $\mathbf{X}$  – вектор объемных сил;  $\sigma_{ij}$  – компоненты тензора механических напряжений;  $e_{ij}$  – компоненты тензора деформации;  $u_{ji} = \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$  –

производные по пространственным координатам;  $u_i$  – компоненты вектора перемещения в направлении координат  $x$ ,  $y$ ,  $z$ ;  $\delta_{ij}$  – символ Кронекера, имеющий значения  $\delta_{ij} = 0$  ( $i \neq j$ ),  $\delta_{11} = \delta_{22} = \delta_{33} = 1$ .

Такого рода задачи, когда приходится учитывать взаимосвязанные явления разной физической природы, принято называть согласованными (самосогласованными).

Система уравнений, например, (1 а) – (1 г), (3) при соответствующих краевых условиях [4, 6] позволяет найти напряженности  $\mathbf{E}$  и  $\mathbf{H}$  электромагнитного поля, распределение температурного напора  $\Theta$ , концентрации компонентов  $\rho_\beta$ , давление  $p$ , вектор перемещения  $\mathbf{u}$ , тензоры напряжения  $\sigma_{ij}$  и деформации  $e_{ij}$ . Методы решения таких задач в СВЧ электротермии приведены в [4, 6].

Согласованные задачи при проектировании методических СВЧ ЭТУ приходится решать и при синтезе рабочих камер этих установок. Так, например, профиль камеры с бегущей волной (КБВ) на прямоугольном волноводе, частично заполненном обрабатываемым диэлектриком, рассчитывается по соотношению [4]

$$b(z) = b_2 + \frac{a\sqrt{1 - (\lambda/2a)^2}}{60\pi^2} \left[ -\frac{\Lambda}{4\pi} X_n + \sqrt{\left(\frac{\Lambda}{4\pi} X_n\right)^2 + (R_n z)^2} \right] \quad (4)$$

где  $b(z)$  – высота прямоугольного волновода в точке с координатой  $z$ , отсчитываемой от места короткого замыкания;  $b_2$  – толщина обрабатываемого диэлектрика;  $\lambda$  – длина волны СВЧ генератора;  $a$  – ширина широкой стенки волновода;  $\Lambda$  – длина волны в волноводе;  $R_n X_n$  – активное и реактивное составляющие погонного сопротивления обрабатываемого диэлектрика [4]

$$R_n = \frac{60\pi^2 F_R}{a \left[ 1 - \left( \frac{\lambda}{2a} \right)^2 \right] \sqrt{\varepsilon' \sqrt{1 + \text{tg}^2 \delta}}}, \quad (5 \text{ а})$$

$$X_n = \frac{60\pi^2 F_x}{a \left[ 1 - \left( \frac{\lambda}{2a} \right)^2 \right] \sqrt{\varepsilon' \sqrt{1 + \text{tg}^2 \delta}}}. \quad (5 \text{ б})$$

В периодических СВЧ ЭТУ профиль волновода по (4) рассчитывается для средних значений  $\varepsilon'$  и  $\text{tg} \delta$  обрабатываемого объекта на интервале от начальной температуры  $T_{\text{нач}}$  до конечной  $T_{\text{кон}}$ , а в КБВ методических СВЧ ЭТУ сначала профиль рассчитывается для  $\varepsilon'(T_{\text{нач}})$  и  $\text{tg} \delta(T_{\text{кон}})$ , затем, решая тепловую задачу, с учётом соотношения [4]

$$P(z) = P \frac{Re_{Rn}(z)}{Re_{Z_{ex}}(l)} \exp \left[ 2\beta \int_z^l \frac{ImZ_{ex}(z)}{Z_0(z)} dz \right], \quad (6)$$

где  $P$ ,  $P(z)$  – погонная СВЧ мощность электромагнитной волны, поглощаемая диэлектриком и мощность на входе КБВ;  $l$  – длина обрабатываемого объекта;  $Z_{ex}$  – входное сопротивление КБВ;  $\beta$  и  $Z_0$  – фазовая постоянная и волновое сопротивление, находят зависимость  $T(z,t)$ , устанавливают зависимости  $\varepsilon'(z,t)$ ,  $\operatorname{tg} \delta(z,t)$  при  $0 \leq t \leq l/v$ , а затем рассчитывают окончательный профиль КБВ.

Аналогичная согласованная задача имеет место при расчете четвертьволнового трансформатора, согласующего плоский слой обрабатываемого диэлектрика в КЛТ с излучающим рупором [9].

В каждой секции такой меандровой КЛТ параметры диэлектриков, заполняющих четвертьволновые слои между излучающими рупорами и обрабатываемым слоем, зависят от  $\varepsilon'$  и  $\operatorname{tg} \delta$  обрабатываемого диэлектрика, и они разные в каждой секции КЛТ.

Заметим, что в методических СВЧ ЭТУ не применяются камеры со стоячей волной (КСВ), так как входной и выходной шлюзы КСВ снижают добротность резонатора.

Согласованной задачей является и технико-экономический расчет методической СВЧ ЭТУ. Так, соотношения для расчета сравнительного экономического эффекта методических СВЧ ЭТУ  $\Delta \mathcal{E}_\Sigma$  и технико-экономической оптимизации структуры и параметров установки имеют вид [10]

$$\Delta \mathcal{E}_\Sigma = \mathcal{E}_{\Sigma^2} - \mathcal{E}_{\Sigma^1} > 0, \quad (7 \text{ а})$$

$$\frac{\partial \mathcal{E}_{\Sigma^2}}{\partial x_1} = 0, \quad (7 \text{ б})$$

$$\frac{\partial \mathcal{E}_{\Sigma^2}}{\partial x_n} = 0, \quad (7 \text{ в})$$

где  $\mathcal{E}_\Sigma = \Pi \mathcal{C} - 3$ ;  $\Pi$ ,  $\mathcal{C}$  – годовой объем и цена единицы продукции; 3 – затраты на

выпуск  $\Pi$  единиц продукции;  $\mathcal{E}_{\Sigma^2}$ ,  $\mathcal{E}_{\Sigma^1}$  – экономические эффективности методической и альтернативной установок;  $x_1, \dots, x_n$  – независимые параметры, связывающие между собой мощность СВЧ генератора и электродвигателя транспортной системы методической СВЧ ЭТУ, цены этих элементов и рабочей камеры, число параллельно работающих СВЧ ЭТУ.

Соотношение (7 а) позволяет оценить целесообразность применения методических СВЧ ЭТУ, а (7 б), (7 в) дают возможность определить оптимальные значения параметров установки, при которых она имеет наибольшую экономическую эффективность.

Что касается алгоритма проектирования методической СВЧ ЭТУ на базе рассмотренных согласованных задач, то он содержит следующие процедуры.

1. Формулируются исходные данные.
2. Выбирается исходный вариант установки.
3. Выбирается альтернативный вариант установки и рассчитывается сравнительный экономический эффект  $\Delta \mathcal{E}_\Sigma$ .
4. Если  $\Delta \mathcal{E}_\Sigma < 0$ , то выбираются способы выполнения условия  $\Delta \mathcal{E}_\Sigma > 0$ , после чего изменяются исходные данные или отказываются от проектирования методической СВЧ ЭТУ.
5. Если  $\Delta \mathcal{E}_\Sigma > 0$ , формируются исходные данные для технико-экономической оптимизации установки.
6. Решается задача технико-экономической оптимизации структуры и параметров методической СВЧ ЭТУ.
7. Формулируются исходные данные для решения задачи синтеза рабочей камеры установки и ее транспортной системы.
8. Решается задача синтеза рабочей камеры и транспортной системы.
9. Сравниваются параметры синтезированной установки с исходными данными.
10. Если нет выполнения исходных данных, они корректируются, и повторяют проектирование с новым исходными данными.

11. Если совпадение есть, проводится математическое моделирование технологического процесса.

12. Сравниваются расчетные параметры процесса с требуемыми.

13. Если совпадений нет, корректируются исходные параметры технологического расчёта и проводится математическое моделирование.

14. Если совпадение есть, формируется техническое задание на конструирование методической СВЧ ЭТУ.

Решение перечисленных согласованных задач позволяет построить экономически эффективную СВЧ электротермическую установку, производящую продукцию заданного качества с заданной производительностью.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Пюшнер Г.** Нагрев энергией сверхвысоких частот / Г. Пюшнер. М.: Энергия, 1968г. 311с.

2. СВЧ энергетика /под.ред. Э. Окресса. М.: Мир, 1971 г. Т.2. 272с.

3. **Диденко А.Н.** СВЧ энергетика. Теория и практика М.: Наука, 2003г. 446с.

4. **Архангельский Ю.С.** Сверхвысоко-частотные нагревательные установки для интерфиксации технологических процессов / Ю.С. Архангельский, И.И. Девяткин. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1983г. 140с.

5. **Архангельский Ю.С.** СВЧ электротермия / Ю.С. Архангельский. Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 1998. 408с

6. **Архангельский Ю.С.** Справочная книга по СВЧ электротермии / Ю.С. Ар-

хангельский. – Саратов: «Научная книга», 2011. 560с.

7. **Лыков А.В.** Теория сушки. / А.В. Лыков. М.: Энергия, 1968г. 471с.

8. **Колесников Е.В.** Проектирование электротехнологических установок/ Е.В. Колесников. Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2006г. 283с.

9. **Архангельский Ю.С.** Камеры лучевого типа СВЧ электротехнологических установок / Ю.С. Архангельский К.Н, Огурцов, Е.М. Гришина. Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т. 2010. 229с.

10. **Толстов В.А.** Эффективность электротехнологических установок / В.А. Толстов, Ю.С. Архангельский. Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2000г. 148с.

**Архангельский Юрий Сергеевич** – заслуженный деятель науки РФ, доктор технических наук, профессор кафедры «Электроснабжение и электротехнология» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

**Юдина Виолетта Олеговна** – студентка магистратуры Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

**Yuri S. Arkhangelsky** – Honoured Master of Science of the Russian Federation, Dr. Sc., Professor, Department of Power Supplies and Electrical Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

**Violetta O. Yudina** – Undergraduate, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

*Статья поступила в редакцию 15.11.16, принята к опубликованию 18.11.16*

# ЭЛЕКТРОФИЗИКА

УДК 621.9.048.7

## ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ РЕЖИМОВ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ДРОБЛЕНИЯ АГЛОМЕРАТОВ ТВЕРДЫХ ХРУПКИХ МАТЕРИАЛОВ НА ДИСПЕРСНОСТЬ ПОЛУЧАЕМЫХ ПОРОШКОВ

А.П. Петровский, А.П. Бочкарева

## THE INFLUENCE OF MODES FOR ULTRASONIC DISRUPTION OF FRAGILE AGGLOMERATES ON POWDER DISPERSION

A.P. Petrovsky, A.P. Bochkaryova

*Проведены экспериментальные работы по измельчению агломератов гидроксиапатита и установлению влияния технологических параметров процесса на получение микродисперсного порошка с улучшенными характеристиками: разброс частиц порошка не более 5 %, дисперсность частиц порошка от 900 нм до 10 мкм.*

*Ключевые слова: специальный инструмент, ультразвуковое дробление, технологические параметры, дисперсность порошка, контроль параметров микродисперсного порошка*

Гранулометрический состав порошковых материалов является важной характеристикой, определяющей качество готовой продукции в различных отраслях промышленности, таких как порошковая металлургия, химическая промышленность, производство изделий медицины и приборостроения с функциональными покрытиями, получаемыми методом электроплазменного напыления.

В настоящее время большие обороты набирает производство керамических изделий методами прессования на пресс-автоматах. К наиболее важным свойствам пресс-порошков относятся: насыпная плотность, сыпучесть, гранулометрический состав, коэффициент сжатия, прес-

*The conducted experiments were connected with disruption of hydroxyapatite agglomerates and defining the influence of technological parameters of the process in order to obtain the microdispersed powder having improved characteristics, such as dispersion of powder particles at no more than 5%, dispersion of powder particles from 900 nanometers to 10 microns.*

*Keywords: special tool, ultrasonic disruption, technological parameters, powder dispersion, control of parameters of microdispersed powder*

суемость порошков и т. д. От гранулометрического состава зависит давление прессования, необходимое для достижения заданной плотности, усадка при спекании и физико-механические свойства готовых изделий [1].

Целью данной работы является совершенствование способа ультразвукового дробления агломератов [2] для создания высокопроизводительной технологии получения микродисперсных и высокодисперсных порошков с улучшенными характеристиками путем изменения условий ультразвукового дробления.

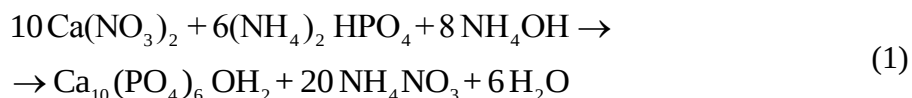
Существующий метод ультразвукового диспергирования агломератов имеет ряд



недостатком: система гравитационного нагружения не позволяет плавно регулировать движение матрицы в процессе дробления; неизвестно влияние объема агломератов и площади основания матрицы на дисперсность порошка; распыление частиц

в окружающую среду снижает эффективность данного способа дробления [2].

В качестве исходного сырья использовались агломераты гидроксипатита, синтезированные методом осаждения по реакции [3]:



Осадок отделяли от маточного раствора, промывали дистиллированной водой, отжигали в сушильном шкафу при температуре  $600 \pm 10^\circ\text{C}$  в течение 1 часа. Размер агломератов контролировался путем последовательного просеивания через набор сит (ГОСТ 6613).

На рис. 1 а изображена схема дробления агломератов на ультразвуковой установке, работающая следующим образом.

Матрицу 4 устанавливаем на поверхность микрометрического столика 6 и фиксируем с помощью винтов 5. Благодаря винтовому механизму перемещения инструмента, закрепленного на вращающейся стойке, а также микрометрическим винтам (с ценой деления 0,01 мм) обеспечивается точное установление бокового зазора  $\delta_{\text{бок}}$  между инструментом и внутренней стенкой сменного кольца 3 в матрице 4. Схема снабжена системой индикации при касании инструментом внутренней стенки сменного кольца и дна матрицы. После установления бокового зазора  $\delta_{\text{бок}}$  инструмент отводим в исходное положение, загружаются агломераты в камеру матрицы, соблюдая требование:

$$V_{\text{agl}} \leq S_{\text{матр}} d_{\text{м.пор}} \quad (2)$$

где:  $V_{\text{agl}}$  – исходный объем агломерата,  $\text{мм}^3$ ;  $S_{\text{матр}}$  – площадь основания матрицы,  $\text{мм}^2$ ;  $d_{\text{пор}}$  – начальная дисперсность порошка,  $\text{мкм}$ .

Динамику дробления агломератов можно представить в виде двух последовательных стадий: начальная стадия – дробление макрообъектов (агломератов); заключительная стадия – диспергирование

микрообъектов (начального сферического порошка).

Описание начальной стадии представлено ниже.

Время дробления связано с характеристиками агломерата (прочностью агломерата  $\sigma_{\text{agl}}$ , объемом агломерата  $V_{\text{agl}}$ , скоростью движения инструмента  $v_{\text{инстр}}$ ), которые играют роль факторов, влияющих на процесс дробления.

Скорость движения инструмента можно представить формулой

$$v_{\text{инстр}} = h_{\text{agl}} / t_{\text{др.агл}} \quad (3)$$

Экспериментально установлено, что время дробление агломератов дисперсностью 3 мм при создании статического усилия  $P_1 = 15\text{H}$  с помощью тарированной пружины происходит в течение 7 секунд.

Для создания равномерной скорости перемещения инструмента с усилием  $P_1$  использовался механизм с винтовой паром, снабженный шаговым электродвигателем, создающим вращающий момент.

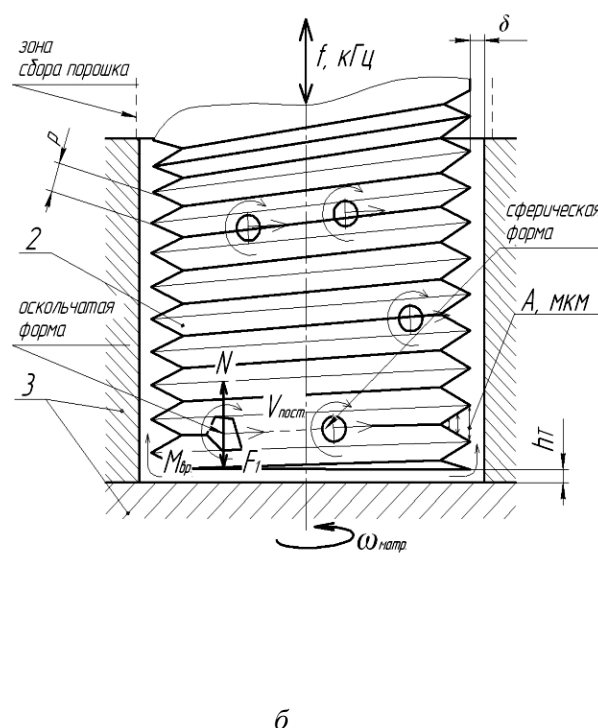
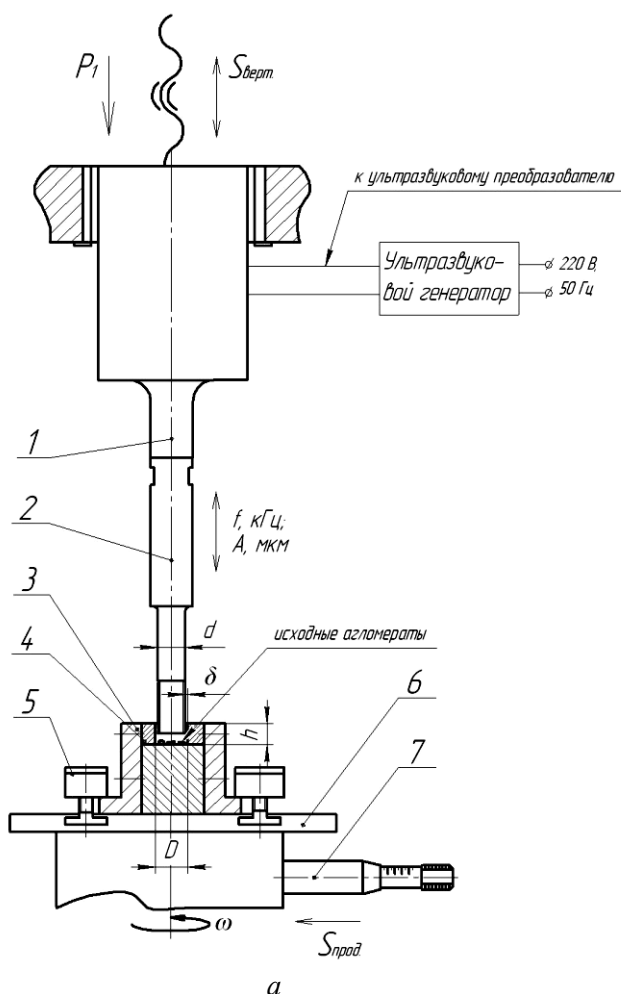
Скорость перемещения инструмента  $v_{\text{инстр}}$  составляла 430  $\text{мкм/с}$  и в ходе эксперимента не изменялась. Статическая сила  $P_1$  является постоянной величиной, рассчитываемой исходя из мощности и вращающего момента на валу шагового электродвигателя. Величина  $P_1$  должна быть постоянной для исключения влияющих факторов  $\sigma_{\text{agl}}$  и  $V_{\text{agl}}$ .

При движении инструмента к дну матрицы, колеблющегося с ультразвуковой

частотой, дробление агломератов является нестационарным процессом.

Таким образом, динамика разрушения макрообъекта (агломерата) связана с условиями формирования двухосного (трехосного) механизма нагружения, а также

дроблением вершин, острых кромок с формированием высокодисперсного порошка и более крупных частиц, которые в дальнейшем измельчаются по представленному механизму.



**Рис. 1.** Схема дробления агломератов: *а* – общая схема дробления (1 – ультразвуковой преобразователь, 2 – специальный инструмент, 3 – матрица; 4 – сменное кольцо, 5 – фиксирующий винт, 6 – основание микрометрического столика, 7 – микрометрический винт); *б* – механизм диспергирования и формирования частиц сферической формы (1 – матрица, 2 – винтовой профиль рабочего участка инструмента)

Описание заключительной стадии - диспергирования микрообъектов (диспергирование исходного микродисперсного порошка) представлено ниже.

Общее время дробления определяется геометрическим параметром агломерата  $h_{agl}$ , а также скоростью перемещения инструмента  $v_{инстр}$ :

$$t_{др.общ} = t_{др.agl} + t_{дисп.пор} \quad (4)$$

По мере приближения инструмента к дну матрицы происходит усиление следующих явлений:

- влияние силы  $P_1$  прекращается при достижении дисперсностью порошка критического значения, равного амплитуде колебания инструмента  $A$  мкм;

- под воздействием акустического давления (5) и интенсивности ультразвука (6), определяемых соотношениями, приведенными в работе [3], происходит формирование «звукового ветра», влияющего на скорость движения частиц среды (7):

$$p = \rho c 2\pi f A; \quad (5)$$

$$I_0 = \rho c V^2 / 2; \quad (6)$$

$$V = \omega A \cos \omega(t - x/c) \quad (7)$$

За счет явления преломления и отражения ультразвуковой акустической волны происходит формирование турбулентного воздушного потока в динамически изменяющемся зазоре  $h_T$ . Частицы порошка, имеющие микроскопические и субмикроскопические размеры, устремляются в направлении бокового зазора  $\delta_{бок}$ . Это явление создает безударный механизм диспергирования агломератов, а при достижении инструмента дна матрицы  $h_T = 0$  происходит её вращение за счет включения шагового электродвигателя, формирующее вихревой турбулентный воздушный поток.

Движение матрицы (рис. 1 б) обеспечивает принудительное попадание и движение порошка по винтовому профилю, расположенного на рабочем торце инструмента.

Таким образом, на формирование сферического микродисперсного порошка влияет динамически изменяющийся зазор  $h_T$ , изменяющий интенсивность ультразвука.

Увеличивающаяся интенсивность ультразвука формирует турбулентное движение частиц с безударным механизмом нагружения, вращение матрицы формирует винтовой турбулентный поток микрочастиц порошка по винтовому профилю, определяющий трехосный циклический характер нагружения.

Кроме того, диспергирование микродисперсного порошка происходит в боковом зазоре  $\delta_{бок}$  за счет турбулентного характера движения частиц.

Движение микрочастиц по винтовым канавкам на рабочей части инструмента и боковому зазору  $\delta_{бок}$  (рис. 1 б) происходит за счет избыточного давления, образующегося между инструментом и дном матрицы.

Микрочастицы порошка совершают сложное движение при перемещении по винтовым канавкам на рабочем участке инструмента, а именно:

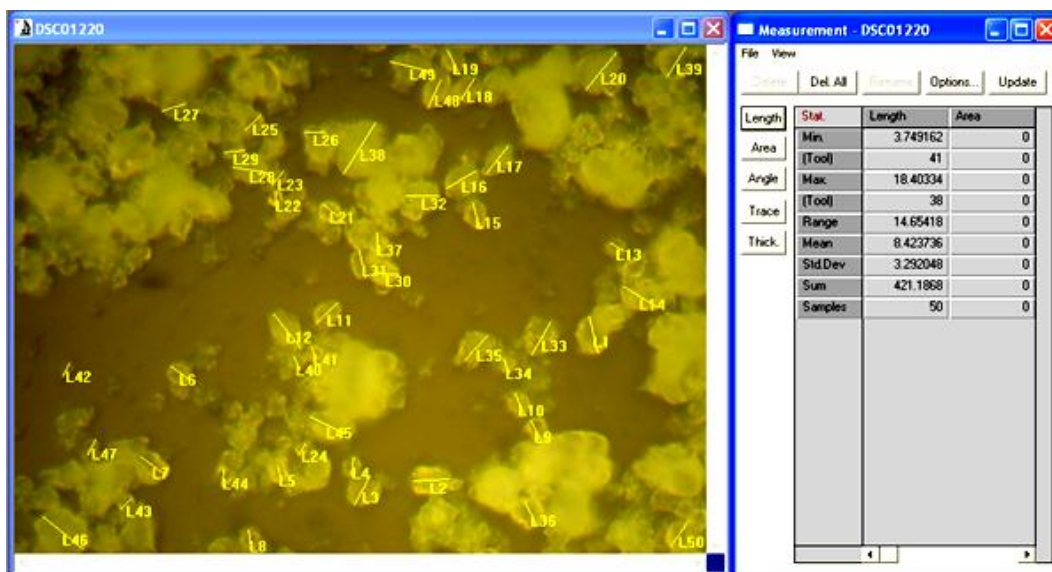
- вращательное движение вокруг собственной оси за счет колебания винтового профиля с ультразвуковой частотой;
- поступательное движение по винтовому профилю за счет вращательного движения матрицы с угловой скоростью.

В ходе экспериментальных работ получен микродисперсный порошок гидроксиапатита на различных режимах дробления (табл. 1). На рис. 2 а представлен порошок ГА, полученный по режиму 1. На рис. 3 а представлен порошок ГА, полученный по режиму 2. На рис. 4 а представлен порошок ГА, полученный по режиму 3. На рис. 5 а представлен порошок ГА, полученный по режиму 4.

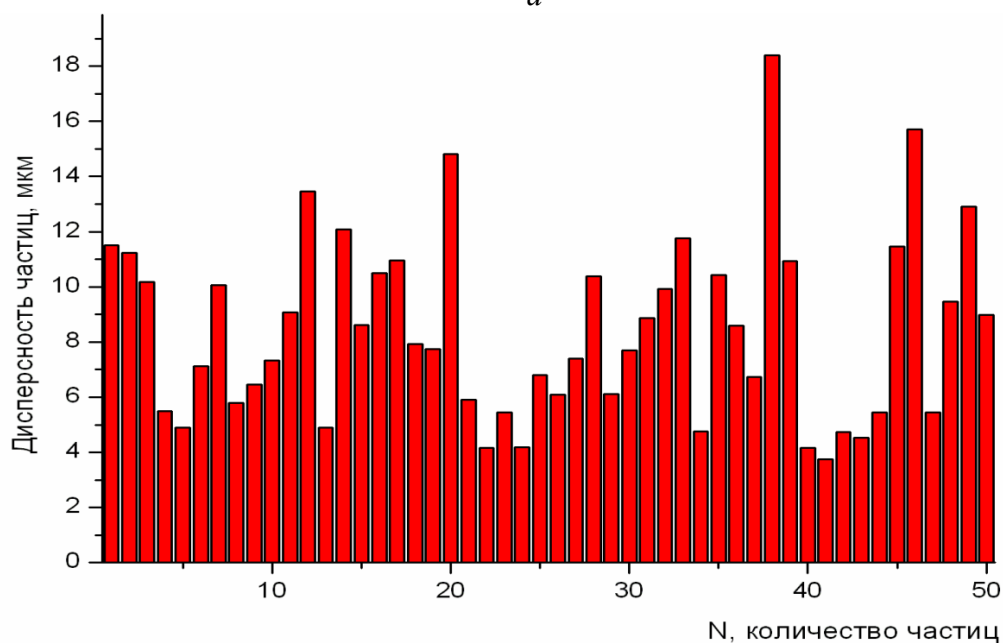
В ходе эксперимента установлено, что общее время диспергирования по режиму 1 больше чем по режиму 2 (табл. 1).

Это объясняется тем, что расстояние  $S_1$  движения частиц по винтовому профилю для режима 1 равно 898,04 мм, а расстояние  $S_2$  для режима 2 равно 414,48 мм.

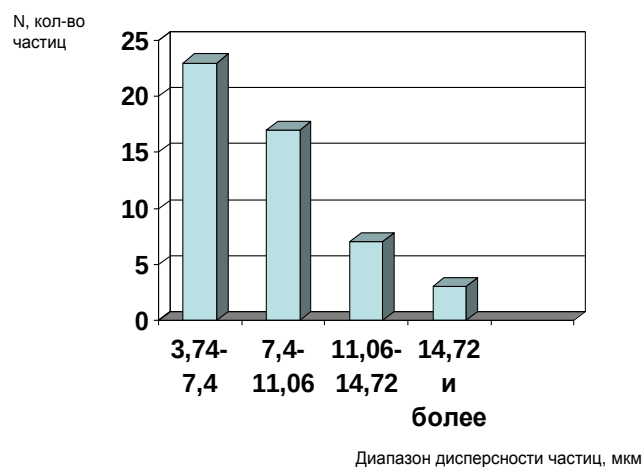
Согласно схеме дробления агломератов (рис. 1), большое значение при формировании микродисперсного порошка сферической формы является контакт инструмента с острыми кромками, ребрами. Процесс образования микрочастиц осколчатой формы носит нестационарный или случайный характер (табл. 2).



*a*

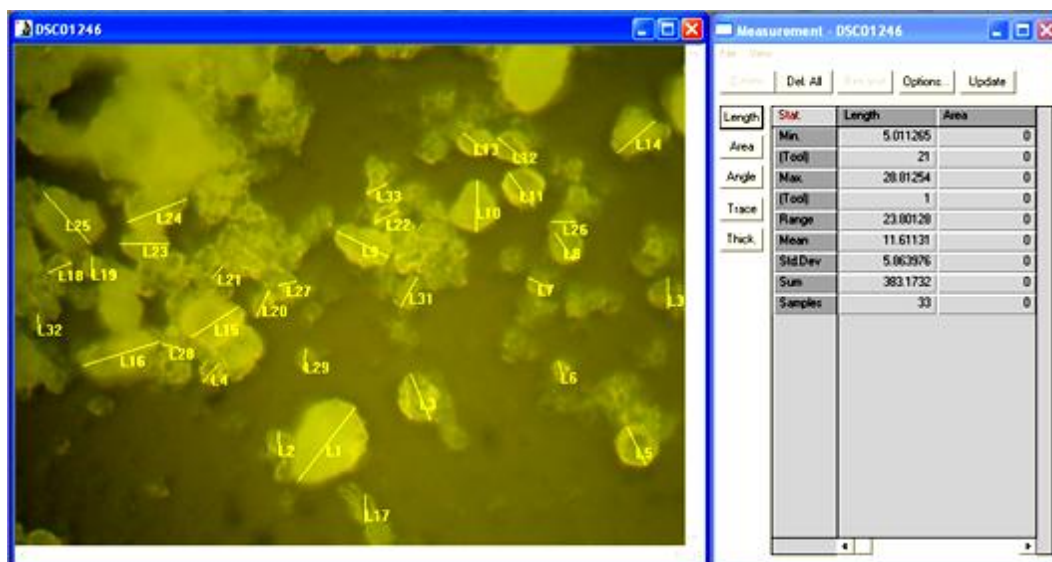


*б*

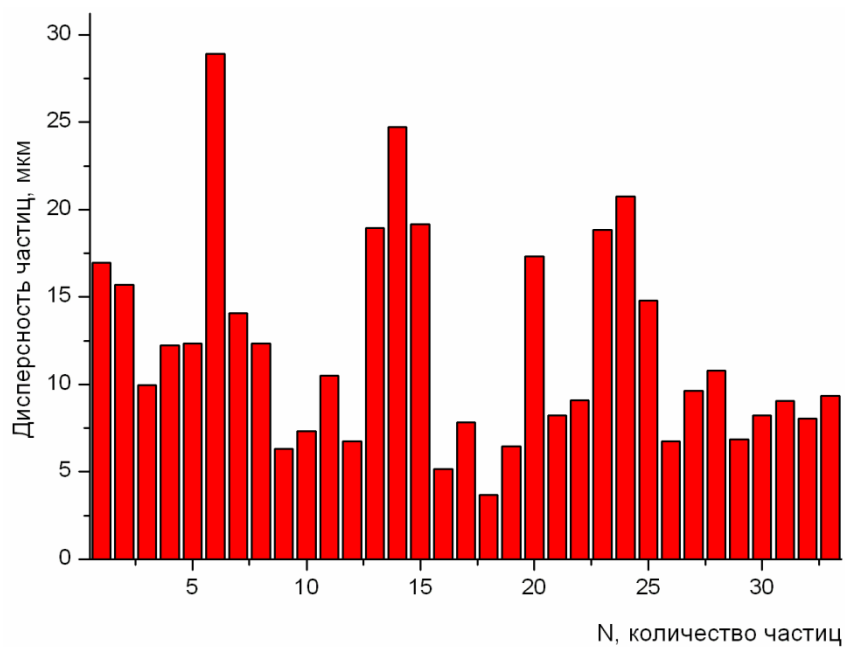


*в*

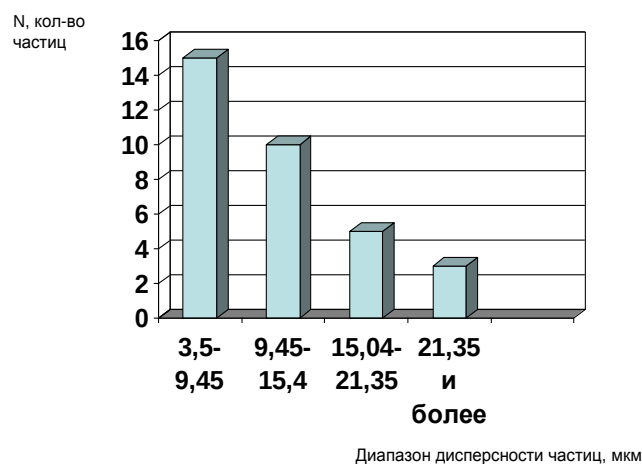
**Рис. 2.** Ультразвуковое дробление агломерата (режим 1): *a* – измерение размера частиц, *б* – распределение размера частиц порошка в пробе, *в* – гистограмма разброса частиц порошка в пробе



а

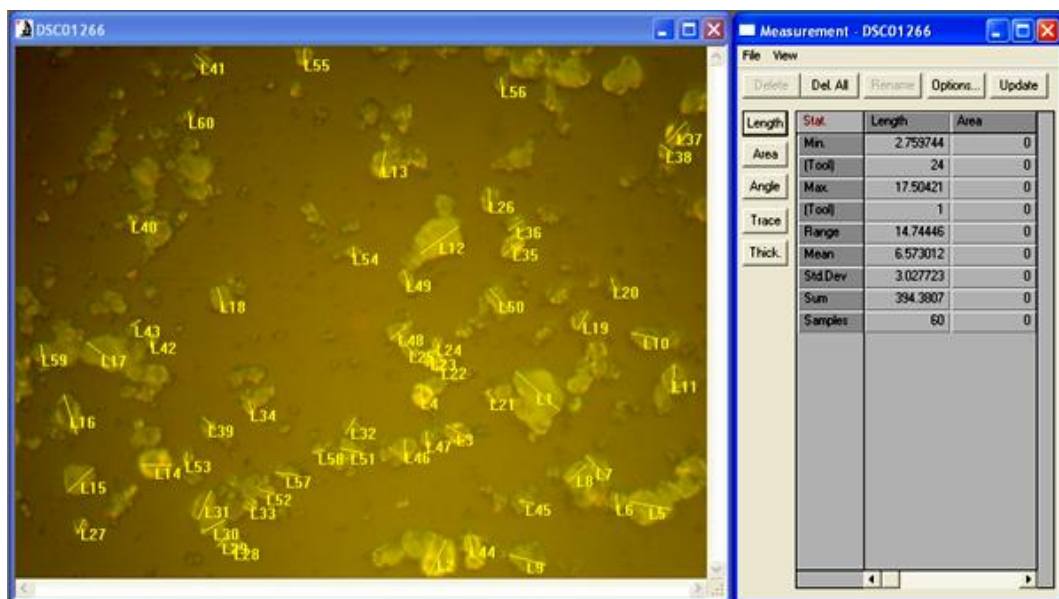


б

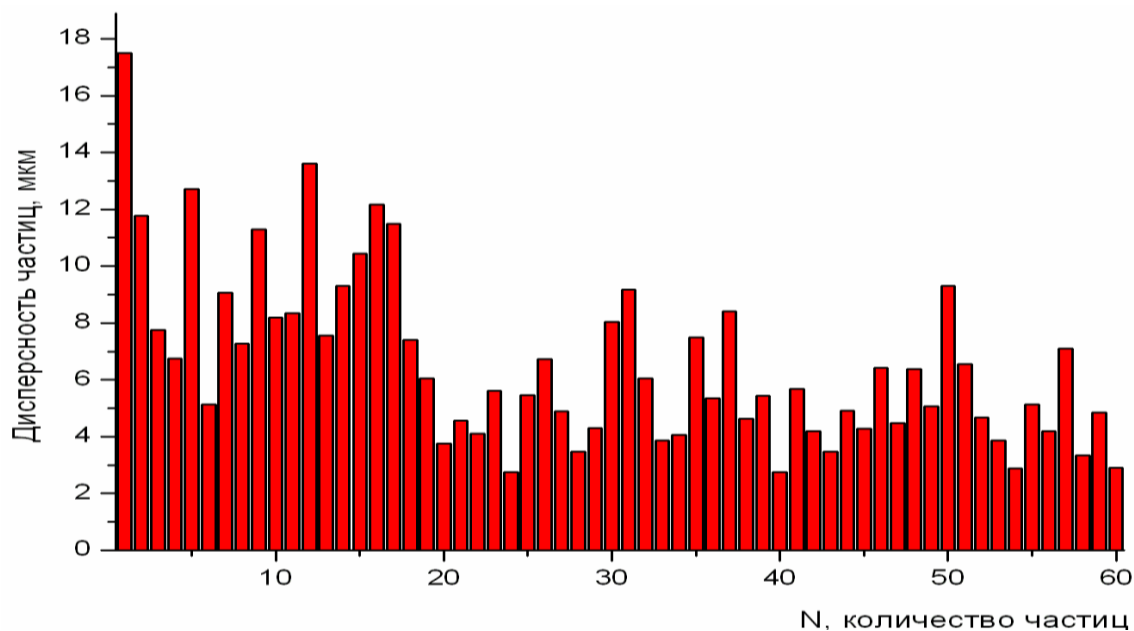


в

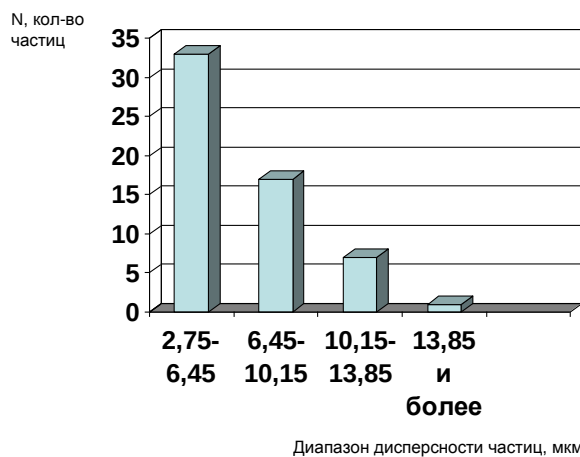
**Рис. 3.** Ультразвуковое дробление агломерата (режим 2): а – измерение размера частиц, б – распределение размера частиц порошка в пробе, в – гистограмма разброса частиц порошка в пробе



*a*

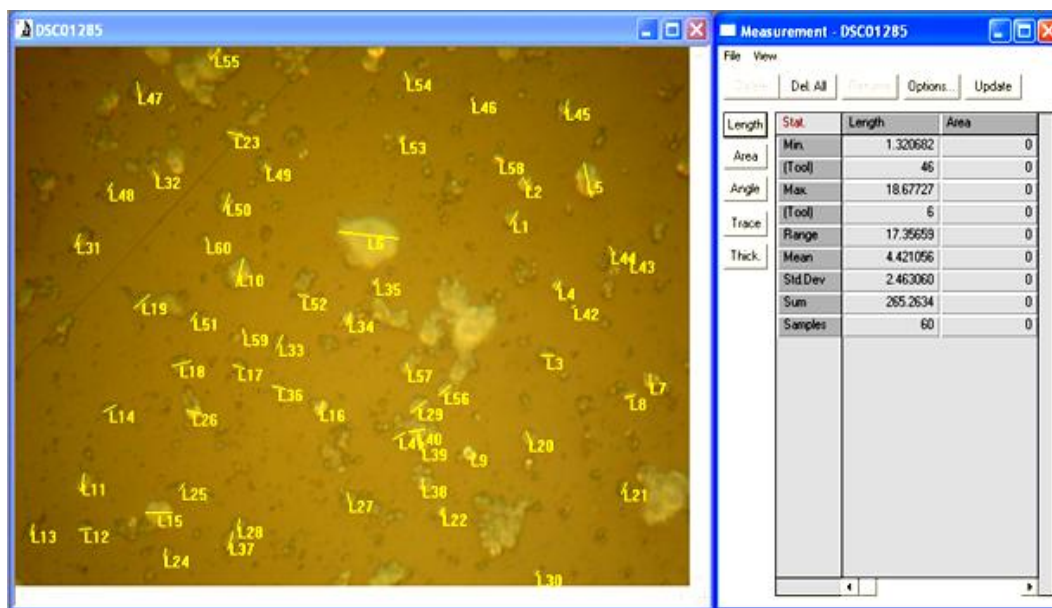


*б*

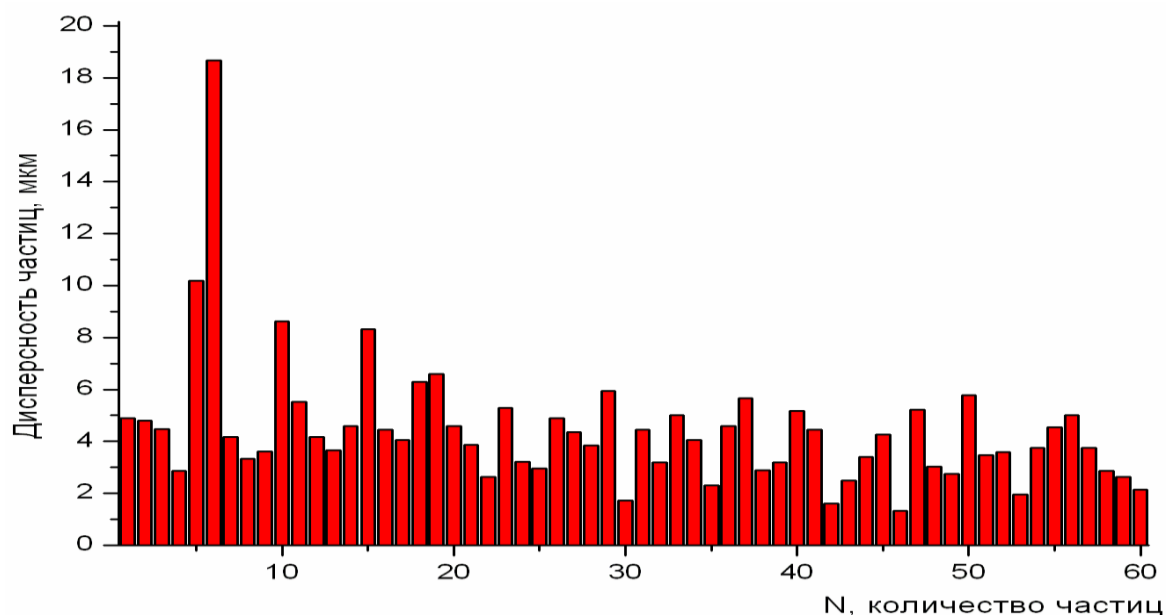


*в*

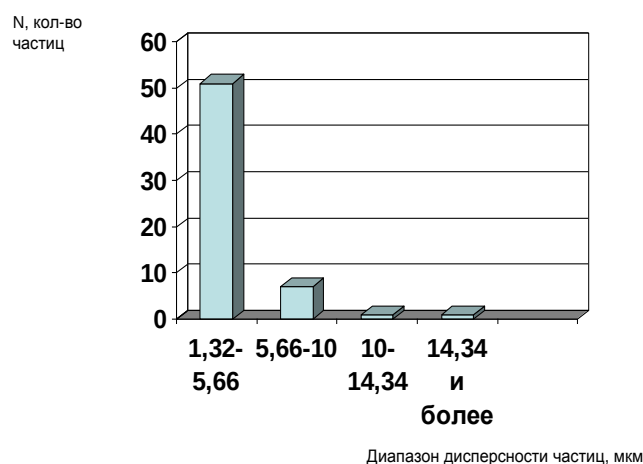
**Рис. 4.** Ультразвуковое дробление агломерата (режим 3): *a* – измерение размера частиц, *б* – распределение размера частиц порошка в пробе, *в* – гистограмма разброса частиц порошка в пробе



а



б



в

**Рис. 5.** Ультразвуковое дробление агломерата (режим 4): *а* – измерение диаметра частиц, *б* – распределение частиц порошке в пробе, *в* – гистограмма разброса частиц порошка в пробе

Таблица 1

Режимы ультразвукового дробления агломератов Г.А.

| Режим дробления | $d_{к.внутр}$ , мм | $\delta_{бок}$ , мкм | Режим нагружения | Параметры инструмента |                                         | $d_{агл}/n$ , мм;<br>$n$ – кол-во, шт. | Время дробления, сек. |
|-----------------|--------------------|----------------------|------------------|-----------------------|-----------------------------------------|----------------------------------------|-----------------------|
|                 |                    |                      |                  | $d_{инстр}$ , мм      | шаг резьбы/<br>кол-во винтовых<br>линий |                                        |                       |
| 1               | 14,6               | 300                  | P1               | 14,0                  | 0,5/22                                  | 3/2                                    | 30                    |
| 2               | 14,6               | 300                  | P1               | 14,0                  | 1,0/11                                  | 3/2                                    | 23                    |
| 3               | 13,4               | 200                  | P1               | 13,0                  | -                                       | 3/3                                    | 5                     |
| 4               | 14,4               | 200                  | P1               | 14,0                  | 0,5/22                                  | 3/3                                    | -                     |

Таблица 2

Виды нестационарных процессов при дроблении агломерата

| Виды нестационарных процессов                                                                       | Теоретическое представление процесса                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Расположение агломерата на площади матрицы носит случайный характер                                 | Дробление острых вершин, кромок агломерата приводит к образованию высокодисперсного порошка, движение которого в закрытом объеме матрицы носит неопределенный характер.                                                                                                                                                                                                                                                |
| Разрушение агломерата происходит на неопределенное число мелких осколков различного размера и формы | Наличие дефекта в структуре агломерата (открытая или закрытая пористость, внутренние трещины, скопление дислокаций и т.д.) приводит к возникновению трещин или распространению трещин по всему объему агломерата. Наличие в объеме агломерата трещины, размер которой больше критического значения, приведет к ее самораспространению без торможения при воздействии на агломерат статической и динамической нагрузки. |

На этапе дробления вершин, острых кромок агломерата образуется порошок, который устремляется в направлении бокового зазора под действием «звукового ветра». Микродисперсный порошок, имеющий размеры меньше бокового зазора, устремляется на поверхность.

Следовательно, регулируя данный параметр, можно задать верхний предел дисперсности получаемых частиц. Получение среднего размера частиц обеспечивается при соблюдении установленных парамет-

ров технологического процесса. Нижний предел устанавливается размером отдельных зерен, блоков, из которых состоит агломерат, и зависит от способа получения исходного агломерата.

Итак, обоснована возможность получения микродисперсного порошка гидроксиапатита ультразвуковым дроблением, описан процесс дробления агломератов и дальнейшего диспергирования микродисперсного порошка, разработан новый механизм дробления агломератов.



Получен микродисперсный порошок со средним размером частиц около  $\square$  5 мкм. При этом во фракции порошка наблюдается и более мелкий порошок предположительно субмикронного размера.

В ходе эксперимента установлено, что главными факторами, влияющие на размер частиц и их сферичность являются время движения частиц по винтовому профилю на инструменте и размер бокового зазора между стенками кольца и инструментом.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Тимохова М.И.** Причины возникновения брака в технической керамике при прессовании на пресс автоматах / М.И. Тимохова //Стекло и керамика. 2004. № 2. С. 19-22.

2. Подготовка порошков под электроплазменное напыление ультразвуковым диспергированием / Н.В. Протасова, В.Н. Лясников, С.Н. Барабанов, А.А. Караваев, В.Н. Гамалеев // Технология металлов, 2008. № 12. С. 29-33.

3. Влияние термообработки на спека-

ние и прочность керамики из нанопорошков гидроксиапатита / Н.В. Бакунова, С.М. Баринов, В.М. Иевлев, В.С. Комлев, Д.Д. Титов // Материаловедение. 2010. № 12. С. 11-15.

4. **Кислый П.С.** Проблемы создания и перспективы использования конструкционной керамики / П.С. Кислый // Исследование и разработка теоретических проблем в области порошковой металлургии и защитных покрытий. Ч.1. 1984. С. 41-47.

**Петровский Алексей Петрович** – кандидат технических наук, ведущий инженер Филиала ФГУП «НПЦ АП» - «ПО «Корпус», г. Саратов

**Бочкарева Анастасия Петровна** – студентка Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

**Alexey P. Petrovsky** – PhD, Leading Engineer at the Research and Production Complex KORPUS, Saratov

**Anastasia P. Bochkaryova** – Undergraduate, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

*Статья поступила в редакцию 07.11.16, принята к опубликованию 18.11.16*

## К СВЕДЕНИЮ ЧИТАТЕЛЕЙ!

Экземпляры номеров журнала «Вопросы электротехнологии» можно приобрести в редакции журнала 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77 (СГТУ им. Гагарина Ю.А., кафедра ЭЛЭТ, корпус 1, первый этаж, ком. 133 а, тел.: 8 (8452) 99-87-63).

УДК 621.382

**ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЯ ИОННОЙ МОДИФИКАЦИИ  
АНТИМОНИДА ИНДИЯ - МАТЕРИАЛА ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ХОЛЛА  
ДЛЯ ИЗМЕРИТЕЛЕЙ СВЧ МОЩНОСТИ**

**И.В. Перинская, И.В. Родионов**

**ELECTROTECHNOLOGY FOR IONIC MODIFICATION OF INDIUM ANTIMONIDE AS  
THE MATERIAL TO HALL-EFFECT TRANSDUCERS IN MICROWAVE POWER  
METERS**

**I.V. Perinskaya, I.V. Rodionov**

*Исследовано влияние облучения ионами гелия с энергией 200 кэВ и дозой  $6 \cdot 10^{17}$ - $6 \cdot 10^{18}$  ион/см<sup>2</sup> на образование квазипористой структуры эпитаксиального антимонид индия и морфологию скола, характер, клин травления при изготовлении рельефного топологического рисунка микроминиатюрных преобразователей Холла на основе механизма блистеринга. Установлен режим ионноускоренного локального прецизионного химического травления квазипористого антимонид индия с целью разработки технологии уменьшения остаточного напряжения датчиков Холла, используемых в СВЧ радиоаппаратуре.*

*Ключевые слова: ионно-лучевая обработка, ионная имплантация, механизм блистеринга, гетероэпитаксиальный антимонид индия*

Из-за своих малых габаритов микроминиатюрные преобразователи Холла на основе гетероструктур  $A^3B^5$ -i-GaAs могут использоваться в условиях жестких воздействий: сверхнизкие температуры, космический вакуум, ударные перегрузки в

*The paper deals with the research into the influence of radiation by helium ions with energy at 200 keV and the irradiation dose at  $6 \cdot 10^{17}$ - $6 \cdot 10^{18}$  ion/sm<sup>2</sup> used to form the quasiporous structure with the depth of the layer of epitaxial indium antimonide up to the gallium arsenide substrate on the chip morphology, character, an etching wedge at the production of the raised topological pattern of microminiature Hall transducers on the basis of the blistering mechanism. The set mode of ion-accelerated local precision chemical etching of quasiporous indium antimonide in order to form the needed etching wedge of the topological pattern is the basis for the technology of reducing the residual tension of Hall sensors used in microwave radio devices.*

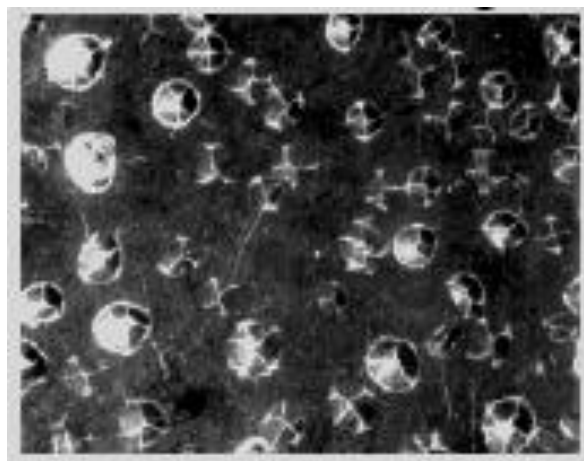
*Keywords: ion-beam processing, ionic implantation, blistering mechanism, epitaxial indium antimonide*

$10^3$ g и т.д. Из гетероструктур этого класса особенно перспективны n-InSb-i-GaAs в следствие высокой подвижности носителей заряда (электронов).

Величина остаточного напряжения полупроводниковых преобразователей Холла

определяется несколькими составляющими, одна из которых – не контролируемый подтрав боковой поверхности преобразователей при формировании топологии рабочего тела методом химического травления. Величина этого подтрав у формируемых структур преобразователей Холла имеет существенный разброс по площади полупроводниковой пластины.

Авторы предлагают использовать образованные ионно-лучевой обработкой (ИЛО) блистеры на поверхности гетероэпитаксиального слоя антимонида индия на подложке арсенида галлия для обеспечения процесса локального, воспроизводимого химического травления топологии субмикронных размеров (рис. 1).



**Рис. 1.** Блистеры на поверхности монокристаллического полупроводника, облученного ионами гелия при энергии 100 кэВ и дозе  $6 \cdot 10^{17}$  ион/см<sup>2</sup>

Начало интенсивного исследования блистеринга связано с созданием термоядерного реактора, поскольку первая стенка реактора подвергается интенсивному облучению высокоэнергетичными ионами, в том числе, гелия [1]. Блистеринг рассматривается как один из опаснейших механизмов эрозии материалов, поскольку коэффициент эрозии материала при гелиевом блистеринге может превышать на 1-2 порядка коэффициент распыления того же материала ионами гелия. К настоящему времени изучены основные закономерности блистеринга в металлах и порообразо-

вания при облучении ионами гелия [2,3].

Для появления блистеров необходима некоторая минимальная доза облучения (критическая доза образования блистеров  $\Phi_{кр}$ ) ионами плохо растворимого газа. Она растет с ростом энергии ионов в диапазоне  $E = 100 \div 200$  кэВ, когда доза принимает значение  $\Phi_{кр} = 6 \cdot 10^{17} \div 6 \cdot 10^{18}$  ион/см<sup>2</sup> [3,4]. Характер образования блистеров (образования пор) определяется также температурой мишени во время облучения [5 – 7], причем при температурах  $T_{обл} > (0,5 \div 0,6) T_{пл}$  ( $T_{пл}$  – температура плавления мишени) из блистеров образуется пористая поверхность.

В полупроводниковых кристаллах эффекты формирования пор при имплантации легких ионов исследованы существенно меньше в сравнении с металлами. Имеются особенности формирования и свойств таких слоев [8].

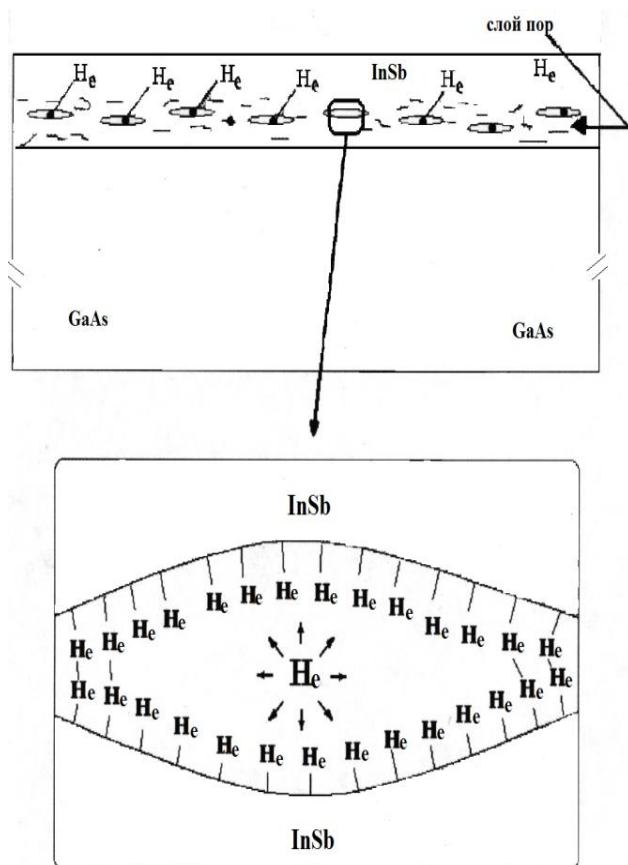
Известно, что на характер ионной гелиевой эрозии влияет наличие кристаллографической ориентации, характерной для монокристаллов полупроводников и эпитаксиальных полупроводниковых слоев. Из-за анизотропии свойств блистеры на монокристаллах имеют специфическую (треугольную, например, для грани {111}) форму [8].

Следует отметить, что тематика практических исследований и применений пористых слоев, сформированных в полупроводниках имплантацией ионов инертных газов (гелия, аргона), ограничена практически только случаем пор в кремнии [7].

Имплантация ионов гелия с энергией 200 кэВ и дозой  $6 \cdot 10^{17} - 6 \cdot 10^{18}$  ион/см<sup>2</sup> для образования квазипористой структуры на глубину слоя эпитаксиального антимонида индия вплоть до подложки арсенида галлия (рис. 2) применена в настоящей работе при формировании топологии микроминиатюрных датчиков Холла селективным химическим травлением.

Гетероструктуры n-InSb-i-GaAs с толщиной гетероэпитаксиальной пленки антимонида индия 2 мкм с ориентацией {110} использованы из-за наличия необхо-

димой высокой подвижности носителей заряда (электронов). При их изготовлении в процессе напыления InSb на подложку использовалось термическое напыление в вакууме с принудительной очисткой поверхности адсорбированного поверхностного слоя. Эпитаксиальный рост антимида индия требуемой толщины 2 мкм происходит из молекулярного пучка при температуре 520-530 °С.



**Рис. 2.** Схематическое изображение гетероэпитаксиальной структуры антимида индия на арсениде галлия после высокодозной имплантации гелия, иллюстрирующее образование пор, наполненных гелием

Имплантация ионов гелия производилась на установке ионного легирования «Везувий-5» с  $E = 200$  кэВ. При изготовлении рельефного топологического рисунка микроминиатюрных преобразователей Холла на основе гетероэпитаксиальных пленок антимида индия использовалась маска фоторезиста ФП-383 толщиной 0,8 мкм, достаточной для маскирования

поверхности полупроводника и, таким образом, получения локальных пористых областей имплантацией ионов гелия.

Далее образцы закрепляли на держателе и проводили имплантацию ионов гелия ( $\text{He}^+$ ) в вакууме  $10^{-5}$  Па в непрерывном режиме. Внедрение ионов проводили нормально к поверхности образцов. Дозу имплантации варьировали в пределах  $6 \cdot 10^{17}$ – $6 \cdot 10^{18}$  ион/см<sup>2</sup>, плотность ионного тока  $1 \cdot 10^{-9}$ – $3 \cdot 10^{-6}$  А см<sup>-2</sup>. Энергию ионов при имплантации выбирали таким образом, чтобы блистеры образовывались по всей толщине эпитаксиального слоя. Температуру образцов контролировали с помощью платино-платинородиевой термодпары. При наибольшей имплантированной дозе ионов температура образцов находилась в пределах  $T_{\text{обл}} > (0,5 \div 0,6) T_{\text{пл}}$ . Химическое травление до подложки арсенида галлия осуществлялось с послойным контролем удельного сопротивления четырехзондовым методом.

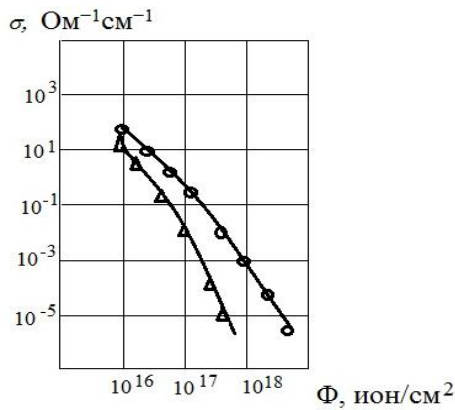
Характер травления имплантированных ионами гелия эпитаксиальных слоев антимида индия по глубине исследовался на растровом электронном микроскопе ( $\times 20000$ ), клин травления и топология датчика – на оптическом микроскопе при увеличении ( $\times 700$ ) и ( $\times 200$ ) в различных химических травителях (табл. 1).

Таблица 1

Составы химических травителей

| № | Состав химического травителя                                                    |
|---|---------------------------------------------------------------------------------|
| 1 | $\text{HNO}_3:\text{HF}=1:1$                                                    |
| 2 | $\text{HNO}_3:\text{HCl}=1:1$                                                   |
| 3 | $\text{H}_2\text{O}_2:\text{HF}=1:1$                                            |
| 4 | $\text{HNO}_3:40\% \text{ винная кислота}=1:3$                                  |
| 5 | $\text{HNO}_3:40\% \text{ винная кислота}=1:3$ ( $T_r \sim 35^\circ \text{C}$ ) |
| 6 | $\text{HNO}_3:40\% \text{ винная кислота}=1:3$                                  |

На рис. 3 представлена экспериментальная зависимость проводимости образцов n-InSb-i-GaAs, имплантированных ионами гелия с энергией 100-200 кэВ в диапазоне доз ионов гелия.

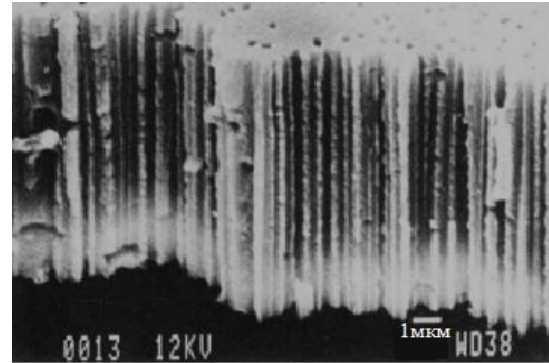


**Рис. 3.** Экспериментальная зависимость проводимости образца n-InSb-i-GaAs имплантированного ионами гелия ( $\text{He}^+$ ) с энергией:  $\Delta$ -200 кэВ;  $\circ$ -100 кэВ от  $\Phi$

Аналогичная зависимость на структурах n-GaAs-i-GaAs описана в работе [7], авторы которой уменьшение  $\sigma$  объяснили с позиций прыжкового механизма проводимости по локализованным состояниям дефектов вблизи уровня Ферми. Причем минимальное значение  $\sigma$  соответствует наибольшей концентрации дефектов для

кристаллических тел при аморфизации их структуры.

На рис. 4 представлен экспериментально наблюдаемый на растровом электронном микроскопе ( $\times 20000$ ) вертикальный скол образца антимоид индия-арсенид галлия, облученного пучком ионов гелия ( $\text{He}^+$ ) с последующим химическим травлением.



**Рис. 4.** Скол образца антимоид индия-арсенид галлия, облученного пучком ионов гелия ( $\text{He}^+$ ) с последующим химическим травлением (№ 6, табл. 2)

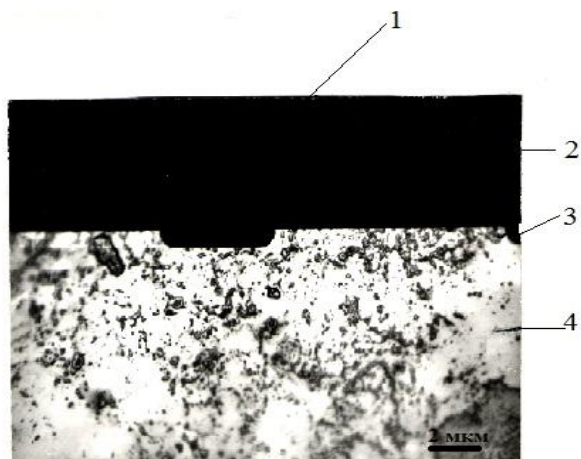
Таблица 2

Зависимость клина травления антимоид индия от состава химического травителя и режима ионно-лучевого облучения

| № п.п. | Состав химического травителя                                           | Режим ИЛО                                                              | Время травления, С | Размер по чертежу, мкм | Отклонение от заданного размера, % | Клин травления |
|--------|------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|--------------------|------------------------|------------------------------------|----------------|
| 1      | $\text{HNO}_3:\text{HF}=1:1$                                           | -                                                                      | 5                  | 30,0                   | 40                                 | $18^\circ$     |
| 2      | $\text{HNO}_3:\text{HCl}=1:1$                                          | -                                                                      | 7                  | 30,0                   | 43                                 | $31^\circ$     |
| 3      | $\text{H}_2\text{O}_2:\text{HF}=1:1$                                   | -                                                                      | 15                 | 30,0                   | 53                                 | $14^\circ$     |
| 4      | $\text{HNO}_3:40\%$ винная кислота=1:3                                 | -                                                                      | 420                | 30,0                   | 6                                  | $76^\circ$     |
| 5      | $\text{HNO}_3:40\%$ винная кислота=1:3 ( $T_r \sim 35^\circ\text{C}$ ) | -                                                                      | 180                | 30,0                   | 5,7                                | $77^\circ$     |
| 6      | $\text{HNO}_3:40\%$ винная кислота=1:3                                 | $E = 200\text{кэВ}$<br>$\Phi = 6 \cdot 10^{18}$<br>ион/см <sup>2</sup> | 220                | 30,0                   | 0                                  | $90^\circ$     |

На рис. 5 приведена фотография клина травления элемента топологии первичного преобразователя Холла, изготовленного химическим травлением через маску фоторезиста после имплантации ионов гелия (№ 6, табл. 2).

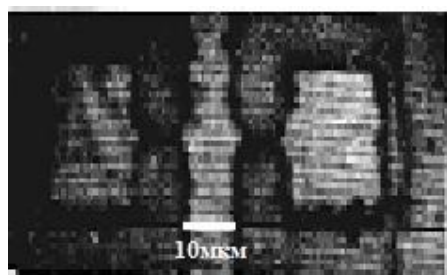
Клин травления имеет два угла наклона. В верхней части поперечного сечения до глубины 1,5 мкм угол клина травления практически равен  $90^\circ$ ; далее угол наклона уменьшается до  $77^\circ$ , соответствующей клину при травлении в режиме № 5.



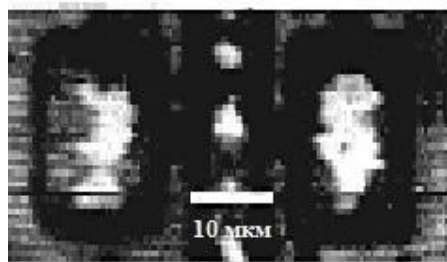
**Рис. 5.** Вид поперечного шлифа элемента топологии первичного преобразователя Холла InSb:GaAs: 1 - вытравленный элемент топологии; 2- клин травления; 3- антимонид индия InSb; 4- арсенид галлия GaAs  $E_{не}^+ = 200$  кэВ;  $\Phi = 6 \times 10^{18}$  ион/см<sup>2</sup>

На рис. 6 приведены фотографии топологий первичных преобразователей Холла на гетероэпитаксиальных структурах InSb на GaAs, иллюстрирующих влияние состава химических травителей, приведенных в табл. 2, причем, образец  $\delta$  изготовлен с применением порообразования имплантацией ионов гелия.

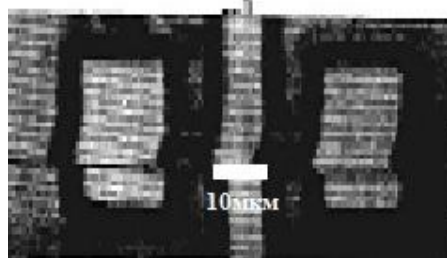
В результате последующего химического травления до подложки арсенида галлия с послойным контролем удельного сопротивления формировались топологические элементы с отвесным краем вплоть до глубины  $\sim 2$  мкм. Полученные первичные полупроводниковые преобразователи для датчиков Холла с габаритными размерами  $0,4 \times 0,4$  мм, имеют размеры области взаимодействия  $0,01 \times 0,06$  мм и электрические параметры, приведенные на рис. 7.



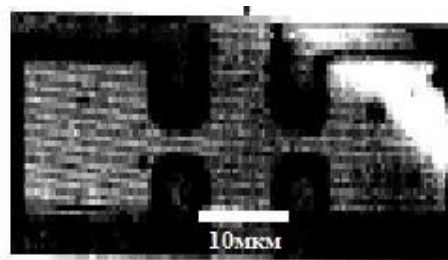
*a*



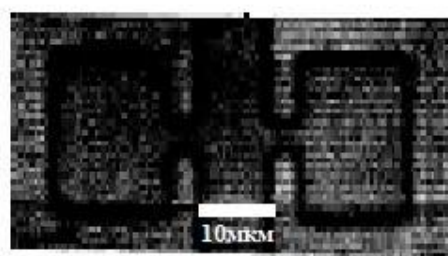
*б*



*в*



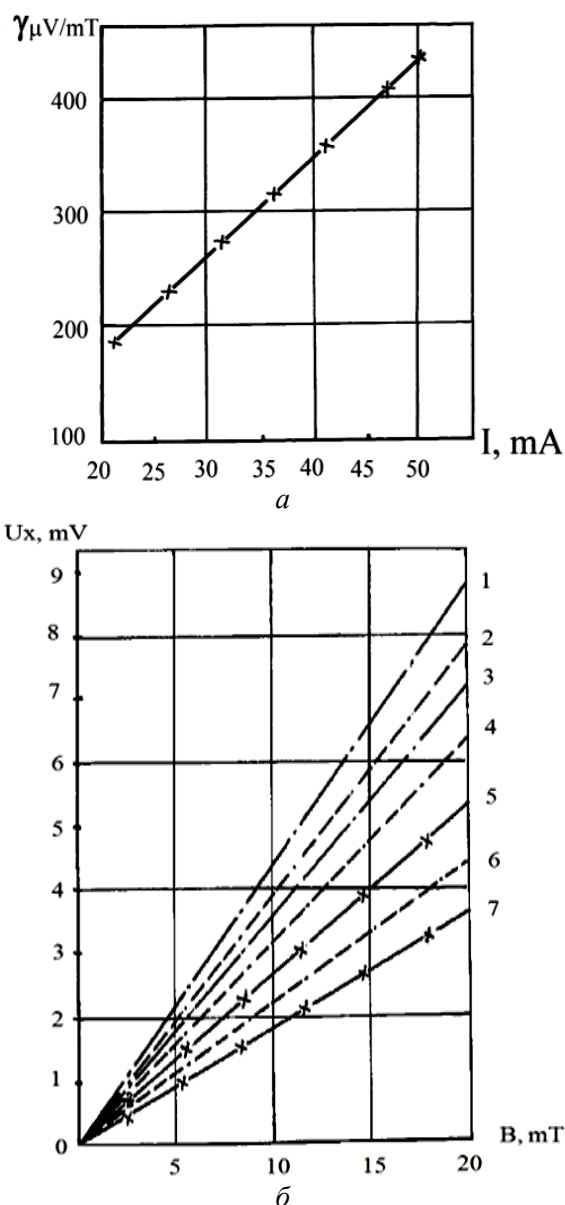
*г*



*д*

**Рис. 6.** Фотографии топологии первичных преобразователей для датчика Холла. Д-Топология получена методом облученного пучком ионов гелия ( $He^+$ ) с последующим химическим травлением в режиме № 6: *a* -  $HNO_3:HF=1:1$ ; *б* -  $HNO_3:HCl=1:1$ ; *в* -  $H_2O_2:HF=1:1$ ; *г* -  $HNO_3:40\%$  винная кислота =  $1:3$  ( $T_r \sim 35^\circ C$ ); *д* -  $HNO_3:40\%$  винная кислота =  $1:3$  с предварительным облучением  $He^+$  в режиме  $E = 200$  кэВ,  $\Phi = 6 \cdot 10^{18}$  ион/см<sup>2</sup>





**Рис. 7.** Параметры первичных преобразователей датчиков Холла: *a* - зависимость магнитной чувствительности от управляющего тока; *б* - зависимость холловского напряжения от напряженности магнитного поля: 1 - 50 мА; 2 - 45 мА; 3 - 40 мА; 4 - 35 мА; 5 - 30 мА; 6 - 25 мА; 7 - 21 мА

Итак, разработана методика гелиевого блистерингового порообразования при имплантации ионов гелия с энергией  $E = 100\text{--}200$  кэВ и дозой  $\Phi = 6 \cdot 10^{17}\text{--}6 \cdot 10^{18}$  ион/см<sup>2</sup> в поверхность монокристаллического антимонида индия с целью образования пор в поверхностном слое размером  $d = 0,01\text{--}0,1$  мкм.

Установлен режим ионно-ускоренного локального прецизионного химического травления пористого антимонида индия с целью образования необходимого клина травления топологического рисунка. Он положен в основу технологии уменьшения остаточного напряжения датчиков Холла, используемых в радиоаппаратуре в качестве малоинерционных датчиков проходящей СВЧ-мощности, использованных в диагностической аппаратуре научно-производственной фирмы «Диагностические технологии для техносферы «НПФ «Диа-тех» (г. Москва) и научно-производственного предприятия «Техносфера-МЛ» (г. Зеленоград) в качестве малоинерционных датчиков проходящей СВЧ-мощности. В соответствии с актами внедрения, изготовленные по разработанной технологии датчики использованы в 2008-2011 г.г. при диагностике трубопроводов ОАО «Газпром» в составе экспертно-диагностических систем с реальным экономическим эффектом.

В результате на пластине структуры  $n\text{-InSb-i-GaAs}$  в одном процессе (групповым способом) получены 400 шт. первичных преобразователей Холла с величиной остаточного напряжения  $\leq 0,05$  мВ. Выход годных составил 86%.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Donnelly S.E., Lucas A.A., Vigneron J.P., Rife J.C. Rad. Eff.78, 1982. 337 p.
2. Griffioen C.C., Evans J.H., De Jong P.C., Van Veen A. Nucl. Instr. Meth. B., 1987. 417 p.
3. Гусева М.И. Радиационный блистеринг / М.И. Гусева, Ю.В. Мартыненко // Успехи физических наук. М.: 1981. Т. 135.

Вып. 4. С.671-689.

4. Африканов И.Н. Гелиевый блистеринг при больших дозах облучения / И.Н. Африканов, В.М. Гусев, М.И. Гусева, А.Н. Мансурова, Ю.В. Мартыненко, В.Н. Морозов, О.И. Челноков // АЭ, 1979. Т. 46, вып. 3. С. 14-26.
5. Перинская И.В. Полиморфные пре-

вращения в металлах, стимулированные ионно-лучевой обработкой / И.В. Перинская, В.В. Перинский // Технология металлов, 2012. № 9. С. 45-49.

6. Заявка на патент на изобретение № 2015117140 / Е.Д. Перинская, А.В. Лясникова, И.В. Перинская, В.В. Перинский / Способ изготовления внутрикостных стоматологических имплантатов с биоактивным покрытием. 2015.

7. **Козловский В.В.** Модифицирование полупроводников пучками протонов /

В.В. Козловский, В.А. Козлов, В.Н. Лома-сов // Физика и техника полупроводников, 2000. Т.34. Вып.10. С. 22-28.

8. **Перинская И.В.** Свеллинг при ионной имплантации антимонида индия и коммерциализация формирования рельефа: сб. науч. тр. по итогам международной научно-технической конференции «Новые материалы и технологии в машиностроении» / И.В. Перинская, В.В. Перинский, Н.А. Петрова, Брянск: БГИТА, 2013. Вып.17. С. 80-83.

---

**Перинская Ирина Владимировна** - кандидат технических наук, доцент кафедры «Сварка и металлургия» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

**Родионов Игорь Владимирович** – доктор технических наук, заведующий кафедрой «Сварка и металлургия» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

**Irina V. Perinskaya** – PhD, Associate Professor, Department of Welding and Metallurgy, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

**Igor V. Rodionov** – D.Sc., Professor, Head: Department of Welding and Metallurgy, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

*Статья поступила в редакцию 15.11.16, принята к опубликованию 18.11.16*

### УВАЖАЕМЫЕ АВТОРЫ!

Редакция готова опубликовать сведения о ваших вузах и предприятиях, об их истории, научных и производственных успехах, планах на будущее. Объем публикации – одна страница текста с фотографиями.



# ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ

УДК 621.314

## ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ РЕГУЛИРУЕМОГО ИСТОЧНИКА АНОДНОГО НАПРЯЖЕНИЯ ДЛЯ ПАКЕТИРОВАННОГО МАГНЕТРОНА ПРОМЫШЛЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

И.И. Артюхов, А.И. Земцов, Е.С. Гордеев

## A SIMULATION MODEL OF INDUSTRIALLY APPLICABLE MAGNETRON GENERATOR WITH ANODE VOLTAGE REGULATOR SIMULATION MODEL OF INDUSTRIALLY APPLICABLE MAGNETRON GENERATOR WITH ANODE VOLTAGE REGULATOR

I.I. Artyukhov, A.I. Zemtsov, E.S. Gordeev

*Технико-экономические показатели генераторов, применяемых в технологических установках, во многом зависят от энергетических характеристик источника питания. На этапе разработки источника питания необходимо иметь модель для исследования электромагнитных процессов. В статье рассматривается имитационная модель регулируемого источника анодного напряжения для магнетрона мощностью 3 кВт, которая построена в среде MATLAB с пакетом расширения Simulink. Даны результаты моделирования, характеризующие влияние сетевого напряжения и углов управления тиристорами регулятора напряжения на режим работы магнетронного генератора.*

**Ключевые слова:** магнетронный генератор, источник анодного напряжения, имитационное моделирование

Технологические процессы, основанные на взаимодействии СВЧ энергии с диэлектриками, имеют широкий спектр применений [1]. Для СВЧ установок промышленного назначения необходимы достаточно мощные регулируемые магнетронные генераторы. В каталогах фирм можно

*Performance of generating plants used in processing installations to a large extent depend on input and output power characteristics. Therefore at this stage of creating the power supply, we need a model for investigation of electromagnetic processes within the system. The paper considers the simulation model for the magnetron tunable by variation of the anode voltage at 3 kW, which has been developed in MATLAB/Simulink environment. The given simulation results characterize the impact of the electric line voltage and angle for the voltage control thyristor on the mode of magnetron generators.*

**Keywords:** magnetron generator, anode voltage regulator, simulation modeling

найти характеристики магнетронов с различными системами создания магнитного поля как пакетированных (со встроенными магнитами), так и с электромагнитами. Выпускаются также магнетроны с комбинированной магнитной системой.

Для работы пакетированного магнетрона необходимо наличие двух источников, один из которых осуществляет накал катода, другой служит для питания анодной цепи. Для магнетрона с электромагнитом требуется еще источник с возможностью регулировки тока электромагнита [2].

Источники питания (ИП) анодной цепи для магнетронов промышленного назначения создают, в основном, на базе трехфазного мостового выпрямителя с повышающим трансформатором. Регулирование анодного напряжения осуществляется встречно-параллельно соединенными тиристорами, которые включаются между сетью 50 Гц и первичной обмоткой повы-

шающего трансформатора. Для сглаживания пульсаций анодного тока на выходе выпрямителя может устанавливаться дроссель.

Технико-экономические показатели магнетронных генераторов во многом определяются характеристиками ИП, поэтому на этапе разработки ИП необходимо иметь модель, с помощью которой можно провести исследование электромагнитных процессов в источнике питания магнетронного генератора при различных параметрах схемы.

Для построения такой модели целесообразно применить среду MATLAB с пакетом расширения Simulink [3]. Схема имитационной модели показана на рис. 1.

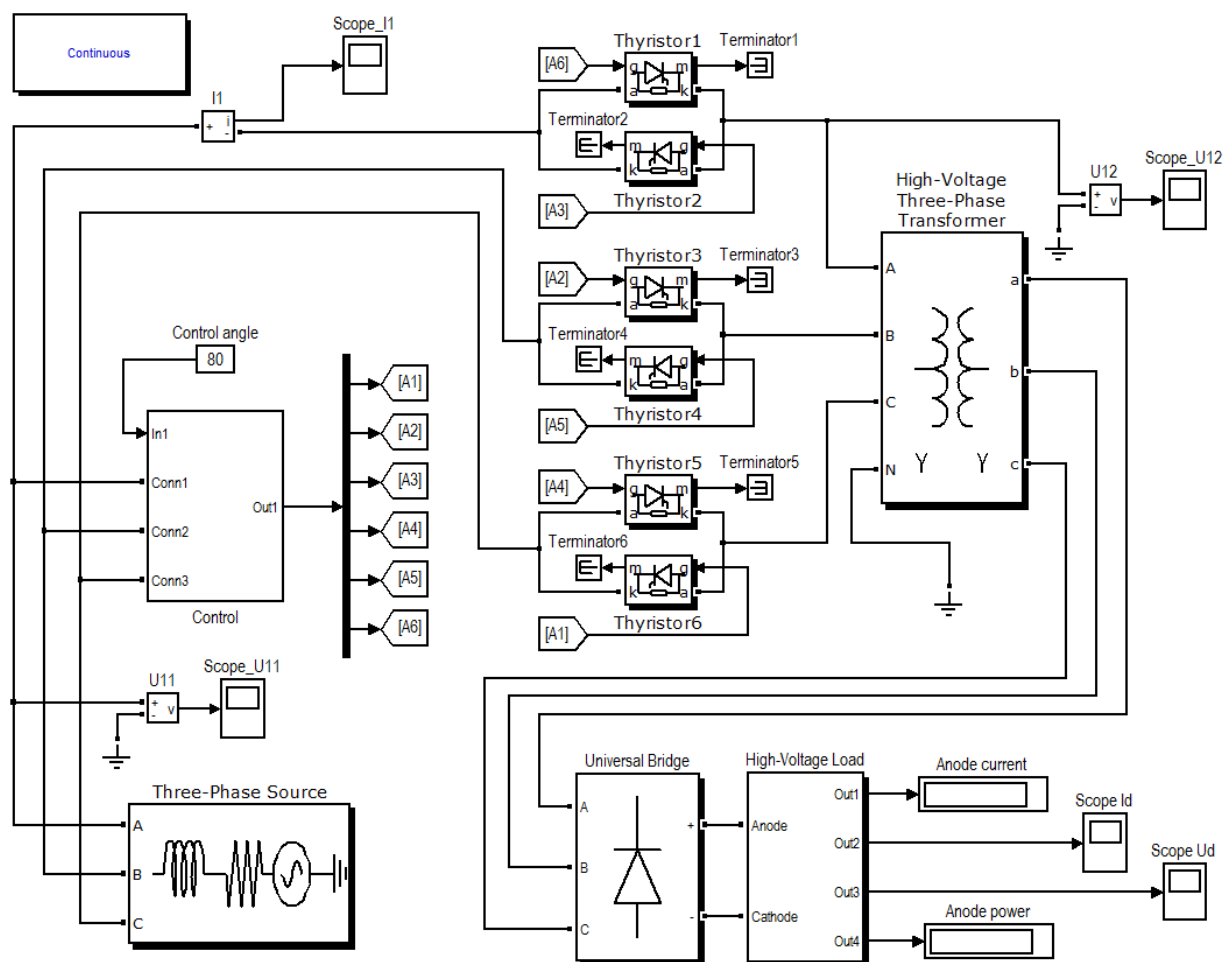


Рис. 1. Схема имитационной модели регулируемого источника анодного напряжения

Модель силовой части источника включает следующие блоки: Three-Phase Source (трехфазная сеть), High-Voltage

Three-Phase Transformer (высоковольтный трехфазный повышающий трансформатор), Universal Bridge (трехфазный мосто-

вой выпрямитель). Нагрузка выпрямителя моделируется подсистемой High-Voltage Load, схема которой показана на рис. 2. В эту подсистему входит модель анодной цепи магнетрона, которая представлена в виде последовательно соединенных блоков Diode,  $R_{din}$  и DC Voltage Source. Тиристорный регулятор напряжения представлен

блоками Thyristor1 – Thyristor6, управляющие входы которых соединены с соответствующими выходами подсистемы Control (рис. 3). Эта подсистема синхронизирована с напряжениями питающей сети. На входе In1 можно задавать величину угла управления тиристорами.

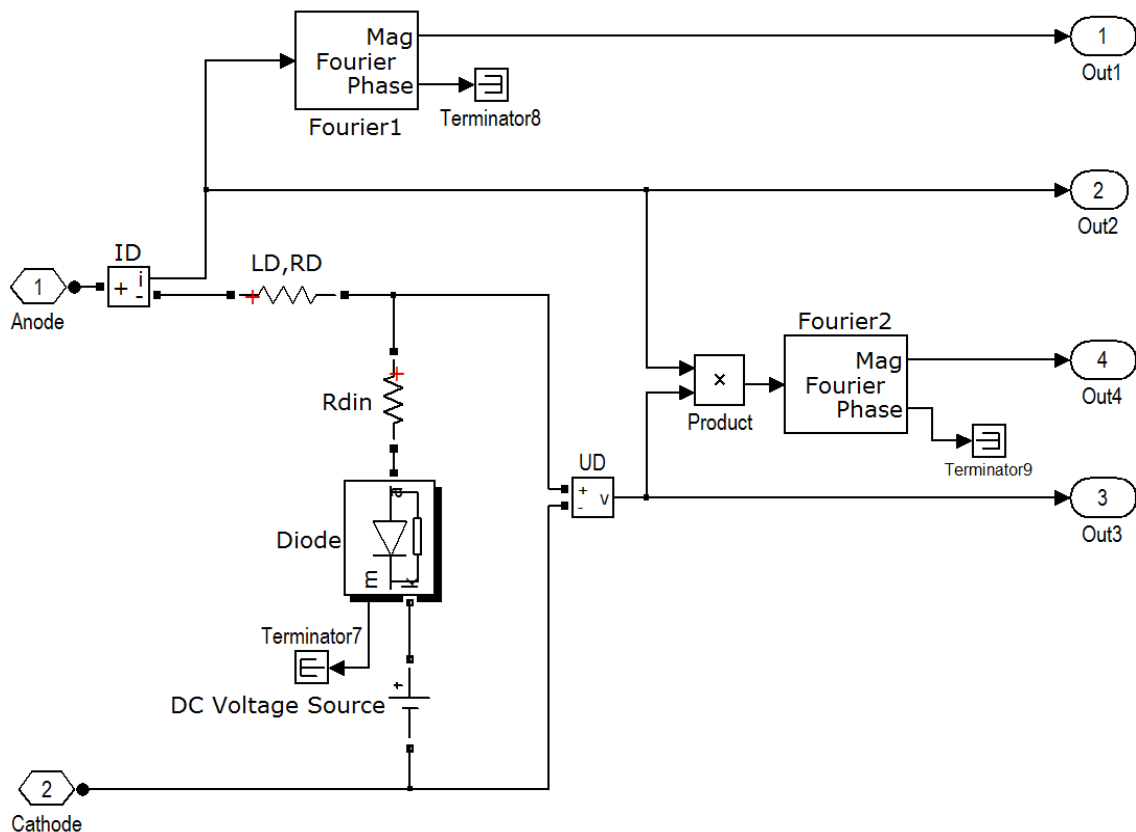


Рис. 2. Схема подсистемы High-Voltage Load

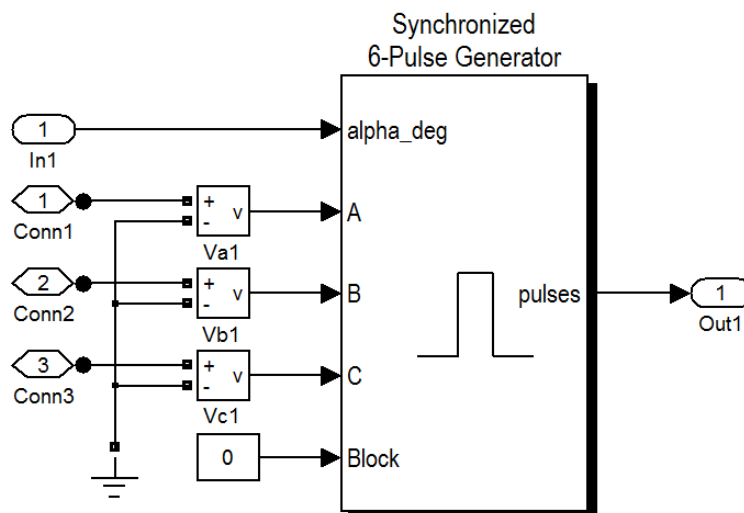
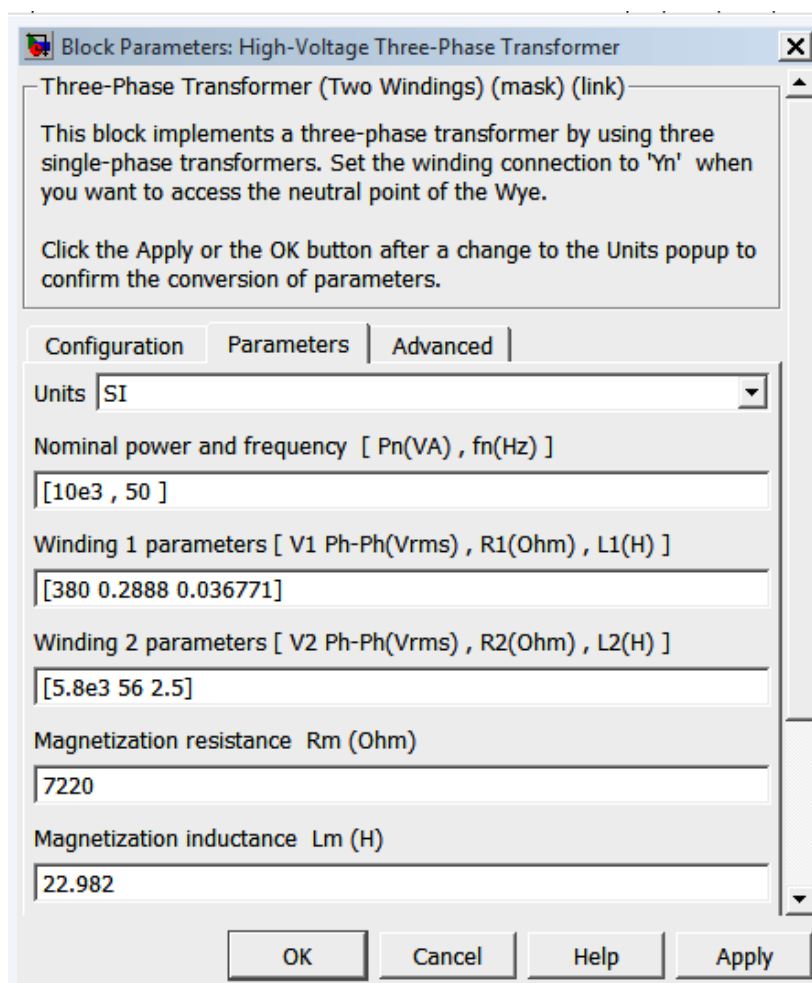


Рис. 3. Схема подсистемы Control

Информационная часть модели представлена блоками, которые позволяют рассчитывать средние значения тока в анодной цепи магнетрона и потребляемую магнетроном мощность, а также визуализировать результаты моделирования. С помощью имитационной модели (рис. 1) можно провести исследование влияния величины напряжения питающей сети, параметров повышающего трансформатора, угла управления тиристорами регулятора на режим работы магнетронного генератора. Имеется также возможность полу-

чить данные о влиянии регулируемого источника анодного напряжения на питающую сеть.

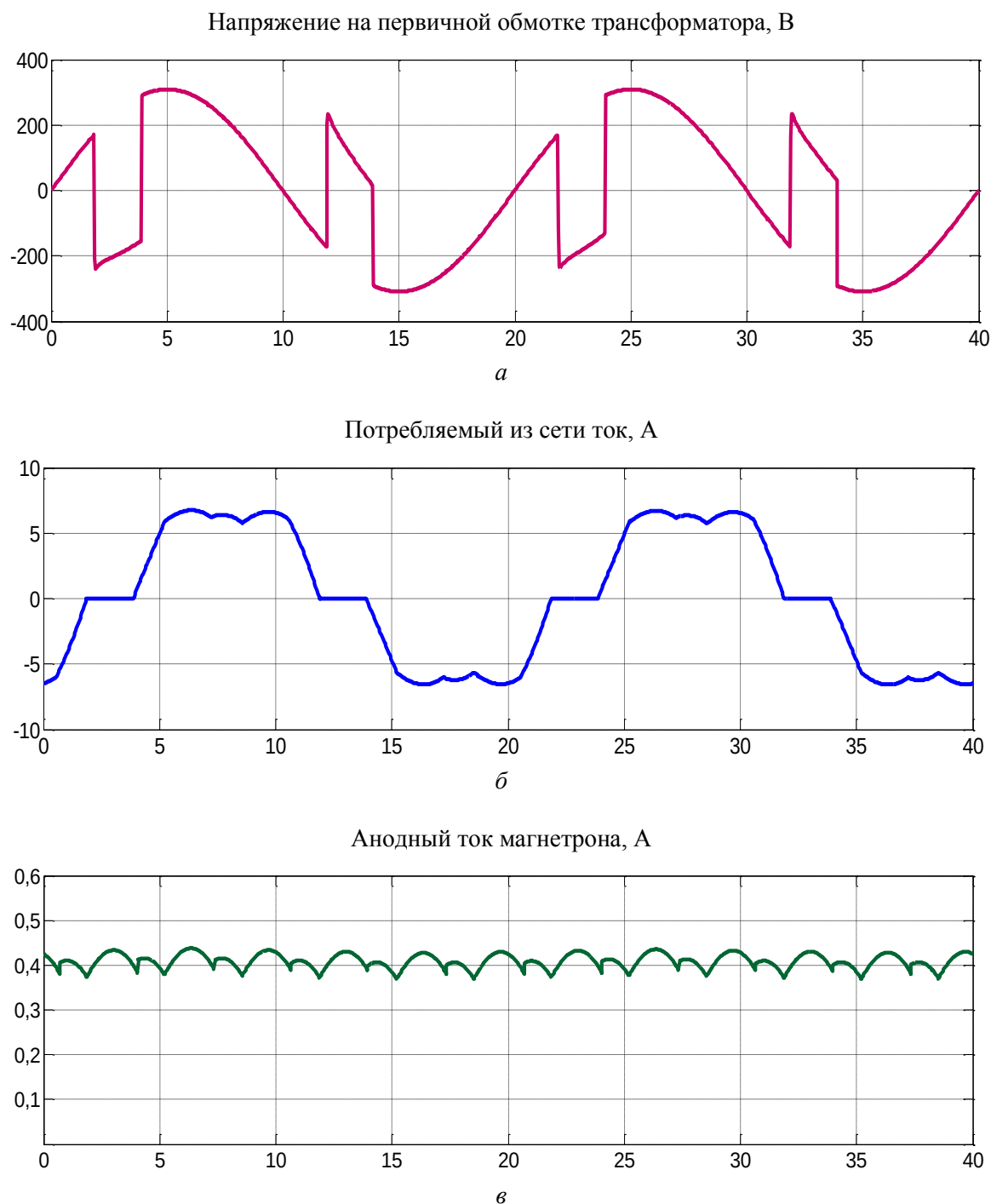
Для тестирования имитационной модели был взят пакетированный магнетрон E3328 фирмы Toshiba мощностью 3 кВт [4]. Исходя из параметров этого магнетрона при моделировании принято пороговое напряжение 4500 В, динамическое сопротивление 200 Ом. Параметры модели повышающего трансформатора представлены на рис. 4.



**Рис. 4.** Окно настройки параметров модели повышающего трансформатора

На рис. 5 показаны виртуальные осциллограммы напряжения на первичной обмотке повышающего трансформатора, потребляемого из сети тока и анодного тока магнетрона для угла управления тиристорами 70 эл. град. При моделировании предполагалось, что источник анодного напряже-

ния подключен к трехфазной сети 50 Гц с напряжением 380 В. Индуктивность и активное сопротивление сети составляли 100 мкГн и 0,01 Ом соответственно. Номинальная мощность повышающего трансформатора 10 кВА, коэффициент трансформации равен 0,0655.

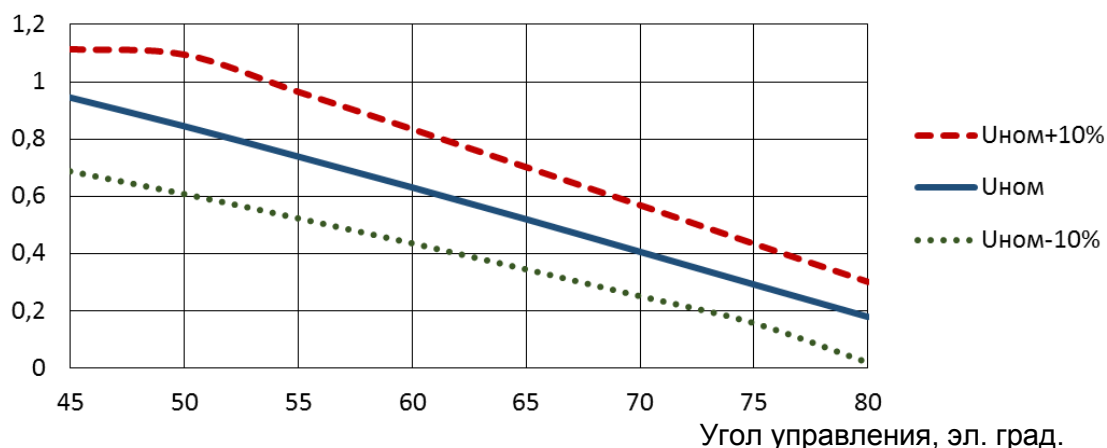


**Рис. 5.** Виртуальные осциллограммы. По оси абсцисс – время в миллисекундах

На рис. 6 показаны графики регулировочной характеристики, под которой понимается зависимость среднего значения анодного тока магнетрона от угла управления тиристорами регулятора. Графики получены для трех значений величины сетевого напряжения. Из этих графиков видно, что за счет импульсно-фазового управления тиристорами можно изменять

анодный ток магнетрона в широких пределах, при этом с увеличением угла управления анодный ток уменьшается. Нижняя граница угла управления зависит от величины сетевого напряжения. При напряжении, которое превышает номинальное значение на 10 %, эта граница для указанных выше параметров имитационной модели составляет 50 эл. град.

Среднее значение анодного тока, А



**Рис. 6.** Регулировочные характеристики источника анодного напряжения

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Архангельский Ю.С.** Справочная книга по СВЧ электротермии / Ю.С. Архангельский. Саратов: Изд-во «Научная книга», 2011. 506 с.

2. **Артюхов И.И.** Магнетронные генераторы для установок СВЧ нагрева / И.И. Артюхов, М.А. Фурсаев. Саратов, СГТУ, 2000. 48 с.

3. **Черных И.В.** Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink / И.В. Черных. М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. 288 с.

4. TOSHIBA Industrial Magnetron E3328. [http://www.hokuto.co.jp/eng/products/ind\\_magnetron/pdf/E3328\\_E.pdf](http://www.hokuto.co.jp/eng/products/ind_magnetron/pdf/E3328_E.pdf)

**Артюхов Иван Иванович** – доктор технических наук, профессор кафедры «Электроснабжение и электротехнология» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

**Земцов Артем Иванович** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» филиала Самарского государственного технического университета в г. Сызрани, докторант Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

**Гордеев Егор Сергеевич** – магистрант кафедры «Электроснабжение и электротехнология» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

**Ivan I. Artyukhov** – Dr. Sc., Professor, Department of Power Supply for Industrial Facilities, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

**Artem I. Zemtsov** – Ph.D., Associate Professor, Department of Power Supply for Industrial Enterprises, Part of Samara State Technical University in Syzran

**Egor S. Gordeev** – Undergraduate, Department of Power Supply for Industrial Facilities, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

*Статья поступила в редакцию 01.11.16, принята к опубликованию 18.11.16*

# ЭЛЕКТРОДИНАМИКА

УДК 538.911; 533.951

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СОЛИТОННЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ ЯДРА ЗАРЯЖЕННОЙ ДИСЛОКАЦИИ В ПОЛУПРОВОДНИКЕ N-ТИПА

С.Г. Гестрин, Е.В. Щукина, А.С. Межоннова

## A MATHEMATICAL MODEL FOR SOLITON PERTURBATIONS OF CHARGED DISLOCATIONS IN n-TYPE SEMICONDUCTORS

S.G. Gestrin, E.V. Shchukina, A.S. Mezonnova

*Построена математическая модель, позволяющая исследовать волновые процессы в дырочном газе, находящемся в электрическом поле, созданном распределением заряда доноров и акцепторов вблизи отрицательно заряженной дислокации в полупроводниковом кристалле n-типа. Показано, что решение уравнения Кортевега-де-Вриза описывает уединенные волны, распространяющиеся вдоль оси цилиндра Ридера. Получена оценка скорости солитона, для значений физических параметров, характеризующих полупроводниковый кристалл и область вблизи дислокации.*

**Ключевые слова:** солитон, уравнение Кортевега-де-Вриза, полупроводник, дефект кристаллической структуры, заряженная дислокация

При описании длинноволновых процессов во многих системах, имеющих различную физическую природу, в том числе в твердых телах, возникают нелинейные эволюционные уравнения. Так, в работах [1-3] в рамках сильно нелинейной теории локализованные волны использовались для объяснения образования и движения дефектов типа дислокаций и их скоплений. В работе [4] уравнение колебаний нелинейной струны (уравнение Буссинеска) при-

*The presented mathematical model allows for the study of wave excitation inside hole gas of an electric field produced by distribution of charged donors and acceptors concentrated close to the negatively charged dislocation line in the n-type semiconductor crystal. It is shown that solution to the Korteweg-de-Vries equation describes solitary waves propagating along the axis of the Reed's cylinder. The obtained estimates refer the soliton speed for the values of physical parameters characterizing the semiconductor crystal and the area near the dislocation line.*

**Keywords:** soliton, Korteweg-de-Vries equation, semiconductor, defect of crystal structure, charged dislocation

менялось для описания солитонного возбуждения ангармонической цепочки атомов, распространяющегося вдоль линейного дефекта кристаллической структуры.

Целью настоящей работы является исследование длинноволновых возмущений физических параметров, характеризующих дырочный газ в p-области, окружающей отрицательно заряженную дислокацию в полупроводнике n-типа. Ниже впервые показано, что в слабо нелинейном случае

уравнение таких волн совпадает с уравнением Кортевега-де-Вриза (КдВ). Решение уравнения КдВ, как известно, описывает уединенные волны (однопараметрические солитоны) в различных физических системах, однако впервые основная характеристика солитона, которой является скорость его движения, выражена через параметры ядра дислокационной системы в полупроводнике.

Для получения нелинейного уравнения, описывающего волновые процессы в дырочном газе, в работе использован метод последовательных приближений. Основу нулевого приближения при этом составляют соотношения, которые являются следствием известной модели Рида [5-7], широко применяемой для описания строения области вблизи заряженной дислокации в полупроводниках. В модели Рида [7] предполагается, что в полупроводниковом кристалле п-типа заряд отрицательно заряженной дислокации экранируется положительным зарядом доноров, при этом электроны вытесняются за пределы цилиндрической области, называемой цилиндром Рида.

Если кроме доноров кристалл содержит некоторое количество акцепторов, то благодаря наличию дырок и их притяжению к дислокации, вдоль нее формируется узкая область из р-материала, в которой концентрация дырок на много превосходит концентрацию электронов [5]. Данная область может оказывать существенное влияние на свойства всей дислокационной системы. Из уравнений гидродинамики, описывающих дырочный газ, найдено выражение, характеризующее распределение концентрации дырок в области ядра дислокации. Впервые получены оценки ширины р-области при различных значениях температуры кристалла.

Найдена система уравнений, которая описывает волны в газе дырок внутри р-области. Для ее решения использована стандартная процедура поиска решения в виде разложения в ряд по малому параметру и перехода к безразмерным переменным [8]. Полученное в слабо нелиней-

ном режиме уравнение для волн стационарного профиля в дырочном газе совпадает с КдВ, что доказывает возможность существования уединенных волн, распространяющихся вдоль дислокации. Приведены оценки дислокационной системы и скорости движения солитона. Наконец, кратко сформулированы основные полученные результаты.

Известно, что в полупроводнике п-типа дислокации проявляют акцепторные свойства [5-7] и захватывают электроны из зоны проводимости, в результате чего на них появляется отрицательный заряд. Пусть  $a_s$  – расстояние между соседними захваченными электронами. В случае, если  $a_s$  меньше среднего расстояния между донорными или акцепторными примесями, то дислокация будет проявлять себя как отрицательно заряженная линия с линейной плотностью заряда  $\sigma_D = -e/a_s$ . Дислокация отталкивает от себя электроны проводимости, что приводит к образованию вдоль нее цилиндрической положительно заряженной области радиуса  $R$ . Данный радиус, называемый радиусом Рида [7], может быть определен из очевидного условия

$$e\pi R^2 (n_d - n_a) \approx e/a_s = |\sigma_D|. \quad (1)$$

Здесь  $n_d$ ,  $n_a$  – концентрации доноров и акцепторов соответственно,  $e$  – элементарный заряд. Запишем для области  $r \leq R$  уравнение Пуассона

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} r \frac{d\phi_0}{dr} \approx -\frac{e}{\varepsilon \varepsilon_0} (n_d - n_a), \quad (2)$$

где  $\phi_0$  – потенциал электрического поля внутри цилиндра Рида,  $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость кристалла. Решение уравнения (2), полученное с учетом граничных условий

$$\phi_0(R) = 0, \quad (d\phi_0/dr)|_{r=R} = 0, \quad (3)$$

имеет вид [5,6]:



$$\phi_0 \approx -\frac{\pi e}{4\pi\epsilon\epsilon_0}(n_d - n_a)R^2 \left( 2\ln \frac{R}{r} - \left( 1 - \frac{r^2}{R^2} \right) \right) = \frac{\sigma_D}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \left( 2\ln \frac{R}{r} - \left( 1 - \frac{r^2}{R^2} \right) \right). \quad (4)$$

Заметим, что при  $r \rightarrow 0$  потенциал  $\phi_0 \rightarrow -\infty$ , что связано с модельным предположением о локализации отрицательного заряда на линии дислокации.

Если учесть, что отрицательный заряд дислокации не расположен строго вдоль линии, как это делается в модели Рида, а распределен равномерно внутри дислокационной трубки с конечным радиусом  $r = r^*$ , то выражение (4) в области  $r < r^*$  заменяется на

$$\phi_0^* \approx \frac{|\sigma_D|}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \left( -2\ln \frac{R}{r^*} - \frac{r^{*2}}{R^2} + \frac{r^2}{r^{*2}} \right). \quad (5)$$

В области  $r > r^*$  потенциал, как и в модели Рида, определяется формулой (4). При этом  $\phi_0^*(0) = \text{const}$ , а на поверхности дислокационной трубки выполняется условие непрерывности

$$\phi_0^*(r^*) = \phi_0(r^*). \quad (6)$$

При получении формул (4) и (5) считалось, что дырки внутри цилиндра Рида отсутствуют. На самом деле, как отмечалось в [5], их наличие может существенно влиять на свойства всей дислокационной системы. В дальнейшем будем считать, что распределение дырок в  $p$ -области формируется в заданном потенциале, определяемом формулами (4) и (5), а их собственный потенциал  $\phi_{0p} \ll \phi_0, \phi_0^*$ . Таким образом, формулы (4) и (5) составляют основу нулевого приближения при рассмотрении распределения дырок, а также их волнового движения.

Запишем уравнение движения единицы объема дырочного газа вблизи дислокации

$$\rho \left[ \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v}, \Delta) \vec{v} \right] = \frac{\rho e}{m} \vec{E} - \Delta p \quad (7)$$

где  $\vec{v}$ ,  $m$ ,  $\rho$  – соответственно скорость, эффективная масса и плотность дырок,  $\vec{E}$  – напряженность электрического поля,  $p$  – давление дырочного газа. Совместно с (7) будем рассматривать уравнение неразрывности

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{v}) = 0 \quad (8)$$

Ниже будем изучать движение дырок в электрическом поле, созданном распределением заряда вблизи дислокации. В области  $r < R$  потенциал электрического поля представим в виде

$$\phi(r, z, t) \approx \phi_0(r) + \phi_{0p}(r) + \phi'(r, z, t). \quad (9)$$

Здесь  $\phi_0$  определяется соотношением (4) для области  $r^* \leq r \leq R$  и  $\phi_0 = \phi_0^*(r)$  при  $r < r^*$  (5),  $\phi_{0p}$  – потенциал, создаваемый стационарным распределением дырок в ядре дислокации, а наличие слагаемого  $\phi'(r, z, t)$  связано с волновыми процессами в газе дырок. В нулевом приближении, считая  $p_0 = n_{p0} k_B T$ , где  $k_B$  – постоянная Больцмана,  $T$  – температура дырочного газа, из (7) получим

$$\vec{E}_0 = \frac{\nabla p_0}{n_{p0}} = k_B T \frac{\nabla n_{p0}}{n_{p0}}, \quad e \nabla \phi_0 = -k_B T \nabla \ln n_{p0}. \quad (10)$$

Отсюда

$$n_{p0} = A \exp\left(-\frac{e\phi_0}{k_B T}\right). \quad (11)$$

Подставляя сюда  $\phi_0$  из (4), для области  $r^* \leq r \leq R$  имеем

$$n_{p0}(r) = n_{p0}(R) \left(\frac{R}{r}\right)^{\frac{e|\sigma_D|}{2\pi\epsilon_0\epsilon k_B T}} \exp\left[-\frac{e|\sigma_D|}{4\pi\epsilon_0\epsilon k_B T} \left(1 - \frac{r^2}{R^2}\right)\right]. \quad (12)$$

В (12)  $n_{p0}(R)$  – концентрация дырок на поверхности цилиндра Рида, совпадающая с

их невозмущенной концентрацией в кристалле. Из (11) и (5) находим, что при  $r < r^*$

$$n_{p0}(r) = n_{p0}(R) \left(\frac{R}{r^*}\right)^{\frac{e|\sigma_D|}{2\pi\epsilon_0\epsilon k_B T}} \exp\left[\frac{e|\sigma_D|}{4\pi\epsilon_0\epsilon k_B T} \left(\frac{r^{*2}}{R^2} - \frac{r^2}{r^{*2}}\right)\right]. \quad (13)$$

Таким образом, формулы (12) и (13) задают распределение дырок внутри цилиндра Рида. На рис. 1 и рис. 2 представлены безразмерные функции  $\phi 1(x) = e\phi_0(x)/k_B T$  и  $n1(x) = n_{p0}(x)/n_{p0}(R)$ , соответственно, где  $x \equiv r/R$ ,  $e|\sigma_D|/4\pi\epsilon_0\epsilon k_B T = 0,6$ ,  $r^*/R = 0,01$ . Рис. 3 построен при  $e|\sigma_D|/4\pi\epsilon_0\epsilon k_B T = 1$ .

Из рис. 1 и рис. 2 видно, что находящиеся в потенциальной яме, созданной распределением заряда вблизи заряженной дислокации, дырки формируют узкое облако положительного заряда. Радиус данного облака  $r_0 \approx 0,1R$ . С понижением температуры (рис. 3) радиус облака уменьшается  $r_0 \approx 0,01R$ , а его граница становится более резко выраженной.

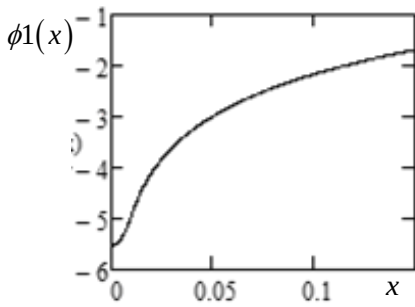


Рис. 1

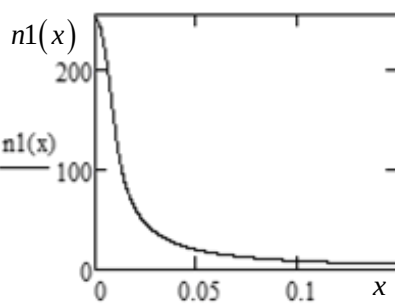


Рис. 2

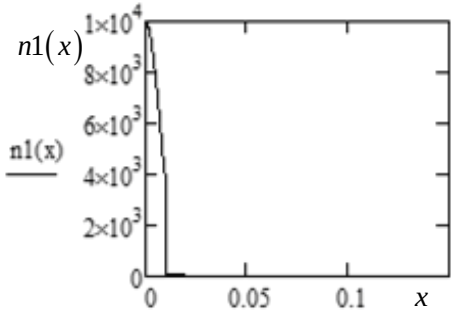


Рис. 3

В дальнейшем истинное распределение дырок вблизи дислокации  $n_{p0}(x)$  будем заменять осредненным по поперечному сечению облака распределением:

$$\bar{n}_{p0} = 2\pi \int_0^{r_0} n_{p0}(r) r dr / \pi r_0^2$$

Уравнение для входящего в правую часть (9) потенциала  $\phi'(r, z, t)$ , связанного с волновым движением дырок в р-области, может быть записано в приближенном виде

$$\frac{\partial^2 \phi'(r, z, t)}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r \frac{\partial \phi'(r, z, t)}{\partial r} \approx -\frac{e}{\epsilon_0 \epsilon} (n_p - \bar{n}_{p0}), \quad (14)$$

где истинное распределение концентрации дырок в облаке  $n_{p0}(r)$  заменено для простоты на среднее значение  $\bar{n}_{p0}$ . Потенциал электрического поля  $\phi'(r, z, t)$  представим в виде ряда

$$\phi'(r, z, t) = \sum_n \phi_n(z, t) J_0(k_{\perp n} r), \quad (15)$$

где  $z$  – продольная координата,  $r$  – радиальная координата,  $J_0$  – функция Бесселя нулевого порядка,  $k_{\perp n}$  – корни уравнения  $J_0(k_{\perp n} R) = 0$ .

Предположим, что в слабо нелинейном случае доминирует низшая поперечная мода [8]:

$$\phi'(r, z, t) \approx \phi(z, t) J_0(k_{\perp} r), \quad (16)$$

где  $k_{\perp} \approx 2,405/R$ .

Воспользуемся разложением функции Бесселя в окрестности нуля

$$J_0(k_{\perp} r) \approx 1 - \frac{k_{\perp}^2 r^2}{4} + \dots \quad (17)$$

Подставляя (16) и (17) в (14), находим

$$\frac{\partial^2 \phi'}{\partial z^2} - k_{\perp}^2 \phi' \approx -\frac{e}{\varepsilon_0 \varepsilon} (n_p - \bar{n}_{p0}). \quad (18)$$

Добавим к (18) уравнение движения (7) и уравнение непрерывности (8)

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{e}{m} \frac{\partial \phi'}{\partial z}, \quad \frac{\partial n_p}{\partial t} + \frac{\partial (n_p v)}{\partial z} = 0. \quad (19)$$

Линейные волны, описываемые этой системой, характеризуются дисперсионным уравнением  $\omega^2 = \omega_p^2 k^2 / (k^2 + k_{\perp}^2)$ , которое при  $k \ll k_{\perp}$  имеет вид

$$\theta = \tilde{\omega} \tilde{t} - \tilde{k} \tilde{z} = \left( \tilde{k} - \frac{\tilde{k}^3}{2} \right) \tilde{t} - \tilde{k} \tilde{z} = \tilde{k} (\tilde{t} - \tilde{z}) - \frac{\tilde{k}^3 \tilde{t}}{2} = \varepsilon^p \kappa (\tilde{t} - \tilde{z}) - \frac{\varepsilon^{3p} \kappa^3 \tilde{t}}{2} = -\kappa \xi - \frac{\kappa^3 \tau}{2}. \quad (24)$$

$$\omega \approx \omega_p \left( \frac{k}{k_{\perp}} - \frac{1}{2} \frac{k^3}{k_{\perp}^3} \right), \quad (20)$$

где  $\omega_p$  – плазменная частота дырок.

В безразмерных переменных  $\tilde{v} = v/v_0$ ,  $\tilde{n}_p = n_p/n_{p0}$ ,  $\tilde{\phi} = e\phi'/mv_0^2$ ,  $\tilde{t} = \omega_p t$ ,  $\tilde{z} = \omega_p z/v_0$ ,  $v_0 = \omega_p/k_{\perp}$ , система (18), (19) приводится к виду

$$\begin{aligned} \tilde{\phi}_{\tilde{z}\tilde{z}} - \tilde{\phi} &= -(\tilde{n}_p - 1), \\ \tilde{v}_{\tilde{t}} + \tilde{v} \tilde{v}_{\tilde{z}} &= -\tilde{\phi}_{\tilde{z}}, \end{aligned} \quad (21)$$

$$\tilde{n}_{\tilde{p}} + (\tilde{n}_p \tilde{v})_{\tilde{z}} = 0.$$

Дисперсионное соотношение (20) принимает вид

$$\tilde{\omega} \approx \tilde{k} - \frac{\tilde{k}^3}{2}, \quad (22)$$

где  $\tilde{\omega} = \omega/\omega_p$ ,  $\tilde{k} = k/k_{\perp}$

Решения будем искать в виде рядов по малому параметру  $\varepsilon$  [8]:

$$\begin{aligned} \tilde{n}_p &= 1 + \sum_{i=1}^{\infty} \varepsilon^i n_{pi}, \\ \tilde{v} &= \sum_{i=1}^{\infty} \varepsilon^i v_i, \end{aligned} \quad (23)$$

$$\tilde{\phi} = \sum_{i=1}^{\infty} \varepsilon^i \phi_i.$$

Рассмотрим длинные волны, то есть будем считать, что  $\tilde{k} = \varepsilon^p \kappa$ , где  $\kappa$  – величина порядка 1.

Фаза волны

Здесь введены новые пространственная и временная переменные [8]:

$$\xi = \varepsilon^p (\tilde{z} - \tilde{t}), \quad \tau = \varepsilon^{3p} \tilde{t}. \quad (25)$$

При этом осуществляется переход в новую систему координат, движущуюся со скоростью  $v_0 = \omega_p / k_\perp$ . Единственный вариант, дающий нетривиальное решение в первом порядке, как известно [8], состоит в том, что выбирают  $p = 1/2$ . Подставляя соотношения (23) в (21), находим:

$$v_{1\tau} + \frac{3}{2} v_{1\xi} + \frac{1}{2} v_{1\xi\xi\xi} = 0. \quad (26)$$

Вернемся к функции  $\tilde{v} \approx \varepsilon v_1$  и переменным  $\tilde{t} = \tau / \varepsilon^{3/2}$ ,  $\eta = (\tilde{z} - \tilde{t}) = \xi / \varepsilon^{1/2}$

$$\tilde{v}_{\tilde{t}} + \frac{3}{2} \tilde{v}_{\tilde{\eta}} + \frac{1}{2} \tilde{v}_{\tilde{\eta}\tilde{\eta}\tilde{\eta}} = 0. \quad (27)$$

Учитывая, что  $\eta = \tilde{z} - \tilde{t} = k_\perp (z - v_0 t) = k_\perp \lambda$ ,  $\tilde{v} = v / v_0$  и переходя к функции  $a = 3v/2$ , преобразуем (27) к стандартному виду уравнения КдВ

$$a_t + aa_\lambda + \frac{1}{2} \frac{v_0}{k_\perp^2} a_{\lambda\lambda\lambda} = 0. \quad (28)$$

Решение (28), описывающее волны стационарного профиля  $a = a(\lambda - u_0 t)$ , имеет вид

$$a = a_1 ch^{-2} \left( \frac{(z - (v_0 + u_0)t)}{2} \sqrt{\frac{a_1 2k_\perp^2}{3v_0}} \right), \quad (29)$$

где  $u_0 = a_1/3$ .

Окончательно находим

$$v = v^* ch^{-2} \left( \frac{k_\perp (z - (v_0 + v^*/2)t)}{2} \sqrt{\frac{v^*}{v_0}} \right). \quad (30)$$

Данное решение описывает уединенную волну (солитон). Постоянная  $v^*$  дает амплитуду солитона, а его ширина убывает с ростом амплитуды  $\propto v^{*-1/2}$ . Скорость солитона увеличивается с ростом его амплитуды  $V = v_0 + v^*/2$ . Для ее оценки воспользуемся следующими значениями параметров:  $n_d - n_a = 10^{21} \text{ м}^{-3}$ ,  $\varepsilon = 15,8$ ,  $a_s = 36 \cdot 10^{-10} \text{ м}$ ,  $\bar{n}_{p0} = 2 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-3}$ ,  $m = 0,3m_e = 2,73 \cdot 10^{-32} \text{ кг}$ ,  $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$ ,  $v^* = 0,2v_0$ ,  $|\sigma_D| = 4,4 \cdot 10^{-11} \text{ Кл/м}$ . При этом находим: плазменную частоту для р-области –  $\omega_p = 1,16 \cdot 10^{13} \text{ с}^{-1}$ , радиус Риды –  $R = 3 \cdot 10^{-7} \text{ м}$ , радиус р-области –  $r_0 \approx 0,1R = 3 \cdot 10^{-8} \text{ м}$  (достигается при  $T = e|\sigma_D|/0,6 \cdot 4\pi\varepsilon_0\varepsilon k_B = 477^0 \text{ К}$ ),  $k_\perp \approx 2,405/R = 8,1 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$ ,  $v_0 = \omega_p/k_\perp = 1,43 \cdot 10^6 \text{ м/с}$ ,  $V = 1,58 \cdot 10^6 \text{ м/с}$ .

По результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

1. Построена аналитическая модель, позволяющая описывать слабо нелинейные волновые процессы в дырочном газе внутри р-области, расположенной вблизи ядра отрицательно заряженной дислокации в полупроводнике п-типа при наличии в нем некоторого количества акцепторов.

2. В рамках построенной модели найдено аналитическое выражение для концентрации дырок в р-области и показано, что в слабо нелинейном режиме волны стационарного профиля в дырочном газе удовлетворяют уравнению Кортевега-де-Вриза, то есть представляют собой солитоны, распространяющиеся вдоль оси цилиндра Риды. Скорость солитона выражена через основные параметры дислокационной системы: радиус цилиндра Риды, и плазменную частоту дырок в р-области.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Аэро Э.Л. Нелинейная теория локализованных волн в сложных кристалличе-

ских решетках как дискретно-континуальных системах/ Э.Л. Аэро, А.Н. Булыгин

//Вычислительная. механика сплошных сред, 2008 Т.1.№1. С.14-30.

2. **Аэро Э.Л.** Нелинейная теория деформирования упругих тел с микроструктурой сложной решетки/ Э.Л. Аэро //Вестник Нижегородского университета, 2011 №4(2). С.378 -379.

3. **Naimark O.B.** Defect induced transitions as mechanisms of plasticity and failure in multifield continua / O.B. Naimark // Advances in multifield theories of continua with substructure. Ed.: G. Capriz, P. Mariano. – Boston: Birkhauser, 2004. – P. 75-114.

4. **Гестрин С.Г.** Излучение звуковых волн ангармонической цепочкой атомов в

ядре дислокации / С.Г. Гестрин, Е.В. Щукина // Изв. ВУЗов. Физика. 2016. Т.59 №3. С.75-82

5. **Бардсли У.** Влияние дислокации на электрические свойства полупроводников / У. Бардсли // Успехи физических наук, 1961 Т.LXXIII. Вып.1. С.121-167.

6. **Шикин В.Б.** Заряженные дислокации в полупроводниковых кристаллах / В.Б. Шикин, Ю.В. Шикина // Успехи физических наук, 1995.Т.165,№8.С.887-917.

7. **Рыскин Н.М.** Нелинейные волны / Н.М. Рыскин, Д.И. Трубецков. М.:Наука, 2000. 272с.

**Гестрин Сергей Геннадьевич** – доктор физико-математических наук, профессор кафедры «Физика» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

**Щукина Елена Вячеславовна** – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Физика» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

**Межоннова Анна Сергеевна** – аспирантка кафедры «Физика» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

**Sergey G. Gestrin** – Dr. Sc., Professor, Department of Physics, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

**Elena V. Shchukina** – PhD, Associate Professor, Department of Physics, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

**Anna S. Mezhonova**– Postgraduate, Department of Physics, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

*Статья поступила в редакцию 09.11.16, принята к опубликованию 18.11.16*

### К СВЕДЕНИЮ ЧИТАТЕЛЕЙ!

В журнале можно опубликовать материалы научно-технических конференций, круглых столов, выставок по тематическим направлениям журнала.

**ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ВОЗМУЩАЮЩИХ ФАКТОРОВ  
НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ФОКУСИРОВКИ  
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ В ЗАДАЧАХ СВЧ ТЕХНОЛОГИЙ**

**Ю.Е. Седельников, Д.В. Никишина, О.В. Потапова, К.Н. Халикова**

**ESTIMATION OF DISTURBING FACTORS IN THE EFFICIENCY OF  
ELECTROMAGNETIC FIELD FOCUSING WHEN MODELING  
MICROWAVE TECHNOLOGY PROBLEMS**

**Y. Y. Sedelnikov, D. V. Nikishina, O. V. Potapova, K. N. Khalikov**

*В работе проводится изучение влияния разбросов параметров материалов и отклонений апертурных распределений на величину положительных эффектов при использовании антенн, сфокусированных в область ближнего излучаемого поля. Установлено, что использование фокусировки излучения в средах с выраженными диссипативными свойствами целесообразно при умеренных значениях отклонения амплитудно-фазового распределения в антеннах и параметров среды.*

**Ключевые слова:** сфокусированные антенны, отклонение параметров материалов, погрешности фаз и амплитуд токов, неоднородность параметров, пространственное распределение, напряженность электрического поля, коэффициент направленного действия

Проведенными исследованиями показана перспективность использования принципа фокусировки излучающего поля для осуществления целенаправленного СВЧ/КВЧ воздействия на различные биологические материалы и в задачах радиоволновой диагностики [1-3]. На практике всегда имеют место неконтролируемые отклонения как электрофизических параметров материалов, так и параметров устройств возбуждения электромагнитных полей. Указанные отклонения имеют непредсказуемый характер, а корректное

*The work deals with a research into the impact of varying material parameters and deviations in aperture distributions by the amount of positive effects when using antennas focused on the radiating near field zone. It is found that application of beam focusing in the medium with distinct dissipative properties is advisable at moderate deviation values of amplitude-phase distribution in antennas and medium parameters.*

**Key words:** Focused antenna, deviation of material parameters, errors of the phases and amplitudes of the currents, heterogeneity parameters, spatial distribution, electric field intensity, directivity factor

описание их влияния может осуществляться только на основе вероятностных представлений. Просматривается явная аналогия с антенной техникой, для которой учет влияния возмущающих факторов рассматривается статистической теорией антенн (СТА) [4].

СТА устанавливает связи случайных отклонений апертурных распределений и параметров среды распространения радиоволн на характеристики электромагнитных полей, формируемых антеннами. Несмотря на смысловое сходство, конкретные ре-

зультаты СТА не могут быть непосредственно перенесены на задачи фокусировки излучения антенн в зоне ближнего излученного поля, характерные для многих вариантов реализации аппаратуры СВЧ технологий. Это связано с тем, что классическая СТА преимущественно оперирует с электромагнитными полями, создаваемыми антеннами в дальней зоне излучения, отчасти в зоне Френеля, причем при отсутствии либо малых потерях в среде распространения. Во многих задачах СВЧ технологий электромагнитные поля должны создаваться в зоне ближнего излученного поля. Для указанной зоны исследований по оценке влияния погрешностей реализации апертурных распределений излучающих токов и параметров среды до настоящего времени практически не проводилось.

Цель работы состоит в предварительном изучении влияния разбросов параметров материалов и отклонений апертурных распределений в ситуациях, характерных для применения сфокусированных антенн в составе аппаратуры СВЧ технологий. Ключевым моментом является вопрос о том, в какой мере неизбежное наличие

возмущающих факторов способно повлиять на достижение положительных эффектов при использовании сфокусированных антенн.

### Статистический анализ сфокусированных электромагнитных полей

В целях наглядности ограничимся простейшим случаем двумерной фокусировки электромагнитного поля линейной антенной (рис. 1).

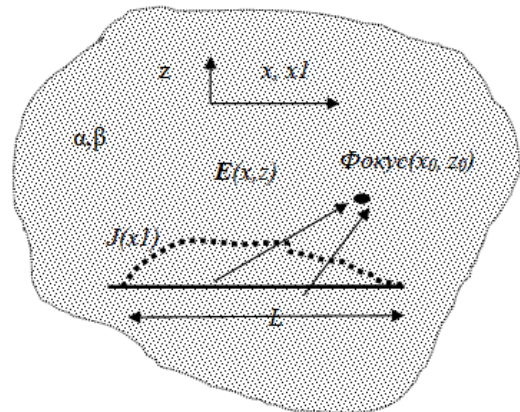


Рис. 1. Линейная сфокусированная антенна

Связь апертурного распределения излучающих токов  $J(x_1)$  и напряженности возбуждаемого ими электрического поля  $E(x, z)$  имеет вид [3]:

$$E(x, z) = \int_0^L g(x_1, x, z) J(x_1) \frac{\exp(j\beta(r(x_1, x, z) - r(x_1, x_0, z_0)) \exp(-\alpha(r(x_1, x, z)))}{r(x_1, x, z)} dx_1, \quad (1)$$

где  $r(x_1, x, z)$  и  $r(x_1, x_0, z_0)$  - расстояния от точки апертуры до точки наблюдения и фокусировки соответственно;  $g(x_1, x, z)$  - значение напряженности электрического поля в точке наблюдения, создаваемого элементарным источником апертуры, расположенным в точке  $x_1$ ;  $\beta$  и  $\alpha$  - коэффициенты фазы и затухания в среде.

Формирование требуемого поля при заданных параметрах среды  $\alpha(\varepsilon, \sigma)$ ,  $\beta(\varepsilon, \sigma)$  и положения точки фокусировки  $(x_0, z_0)$  обеспечивается выбором размеров антенны и апертурного распределения  $J(x_1)$  [3]. В реальности формирование расчетных излучающих токов всегда осуществляется с некоторой погрешностью  $\Delta J$ :

$J(x_1) \xrightarrow{\Delta} \tilde{J}(x_1, \Delta J)$ . Электрические параметры среды также имеют отклонения  $\Delta\varepsilon$  и  $\Delta\sigma$ , в результате чего  $\alpha(\varepsilon, \sigma) \xrightarrow{\Delta} \tilde{\alpha}(\varepsilon, \sigma_1)$  и  $\beta(\varepsilon, \sigma) \xrightarrow{\Delta} \tilde{\beta}(\varepsilon, \sigma_1)$ . Указанные отклонения приводят к искажению картины сфокусированного поля:  $E(x, z) \xrightarrow{\Delta} \tilde{E}(x, z, \Delta J, \Delta\varepsilon, \Delta\sigma)$ , что и определяет потребность в ее оценке.

В классической статистической теории антенн ряд важных результатов получен и представлен в аналитическом виде. В зоне ближнего излученного поля наиболее целесообразно прибегнуть к прямому статистическому моделированию значений  $\tilde{E}(x, z)$  с использованием разумных моделей отклонений параметров токов и среды

[5]. Конечным результатом является получение оценок среднеквадратического значения напряженности поля:

$$E_{cp}(x, z) = \sqrt{m(|\tilde{E}(x, z)|^2)} \quad (2)$$

и среднего значения КНД в точке фокусировки:

$$КНД_{cp} = m\left(КНД(|\tilde{E}(x, z)|^2)\right). \quad (3)$$

Рассмотрим три случая.

### 1. Отклонение амплитуд и фаз токов в апертуре.

Моделью погрешностей амплитудно-фазового распределения токов является представление функции апертурного распределения в виде:

$$\tilde{J}(x_1) = J(x_1)(1 + \delta J(x_1)e^{i\Delta\Psi(x_1)}), \quad (4)$$

где  $\delta J(x_1)$  и  $\Delta\Psi(x_1)$  – относительное отклонение функции амплитудного и абсолютного фазового апертурных распределений токов.

Представление (4) практически эквивалентно представлению (5), использующему величину абсолютного отклонения функции амплитудного распределения  $\Delta J(x_1)$

$$\tilde{J}(x_1) = [J(x_1) + \Delta J(x_1)]e^{i\Delta\Psi(x_1)}, \quad (5)$$

если среднеквадратические значения относительного отклонения  $\sigma_{\delta J}$  и абсолютного

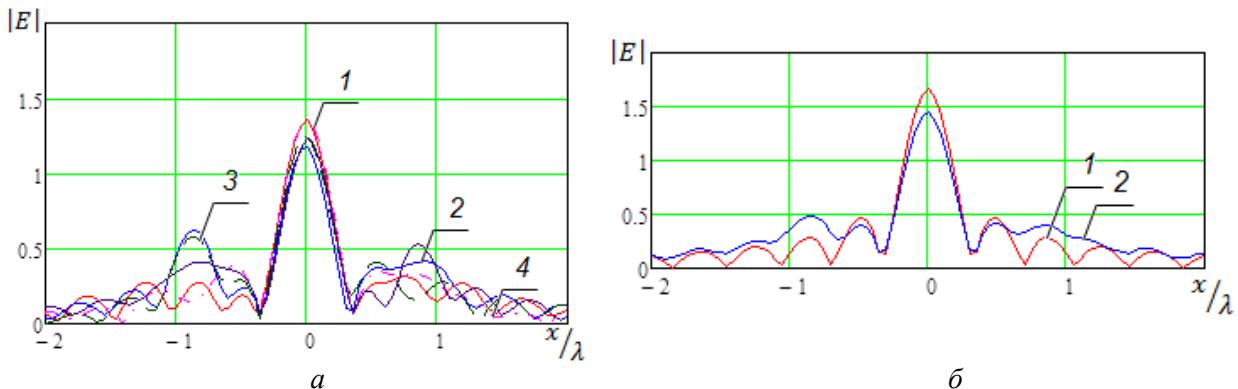
$\sigma_{\Delta J}$  находятся в соотношении  $\sigma_{\delta J} = \frac{\sigma_{\Delta J}}{|J_{cp,кв}|}$ ,

где  $J_{cp,кв}$  – среднеквадратическое значение функции амплитудного распределения  $J(x_1)$ .

Случайные функции  $\delta J(x_1)$  и  $\Delta\Psi(x_1)$  аппроксимируются постоянными значениями  $\Delta\Psi_n$  и  $\delta J_n$  на  $N$  интервалах, соответствующих интервалу корреляции  $\rho_k$  и характеризуются некоррелированными значениями с плотностью распределения  $w(\Delta\Psi)$  и  $w(\delta J)$ . Нахождение требуемых оценок (4) – (5) осуществляется путем многократных расчетов для различных реализаций значений  $\Delta\Psi_n$  и  $\delta J_n$  согласно соотношению (1) с последующей статистической обработкой. Наибольший интерес представляют относительно небольшие апертуры, так как фокусировка крупноапертурных антенн при значительных потерях в среде неэффективна [3].

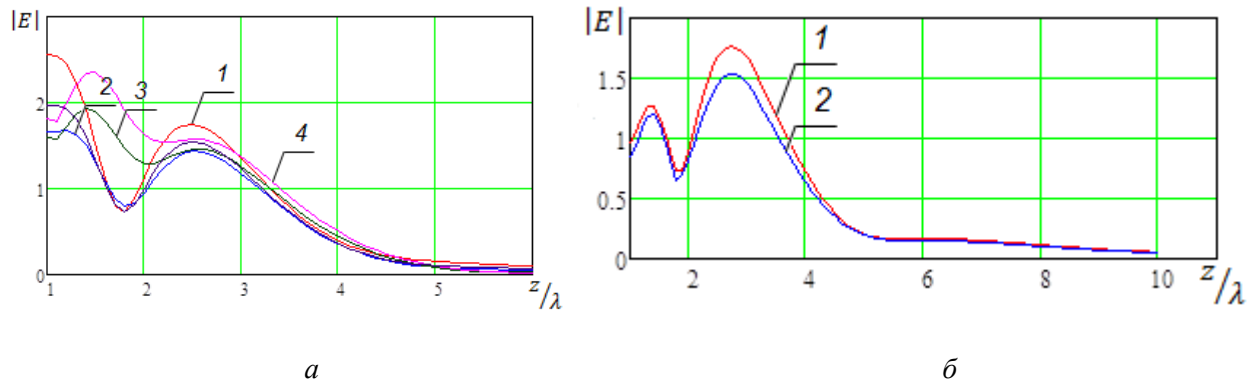
На рис. 2 и 3 приведены типичные результаты для случая равномерного распределения погрешностей токов:

$w(\Delta\Psi) = \frac{1}{2\Delta\Psi_m}$  и  $w(\delta J) = \frac{1}{2\delta J_m}$  и значения  $\rho_k = \lambda_{срел}$ .



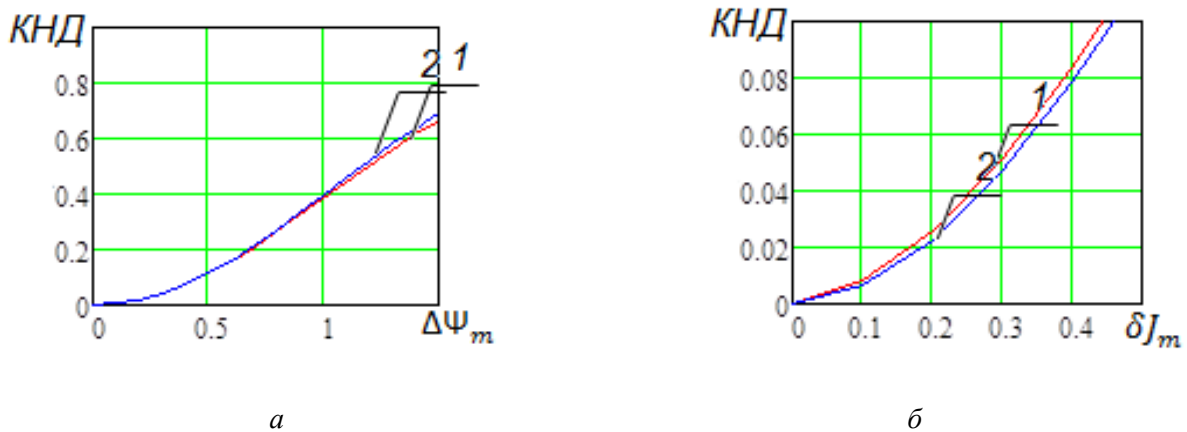
**Рис. 2.** Пространственное распределение модуля напряженности электрического поля в фокальной плоскости вдоль апертуры с равномерным амплитудным распределением  $L/\lambda = 6$ ,  $\alpha\lambda_{срел} = 0.5$ ,  $\Delta\Psi_m = 0.75\text{ рад}$ , точка фокуса  $(0, 3\lambda_{срел})$ : а – реализации (кривые 1, 2, 3, 4), б – исходное (кривая 1) и среднее (кривая 2) пространственное распределение в фокальной плоскости вдоль апертуры





**Рис. 3.** Пространственное распределение модуля напряженности электрического поля в поперечном направлении: *а* – реализации (кривые 1, 2, 3, 4), *б* – исходное (кривая 1) и среднее (кривая 2) пространственное распределение в фокальной плоскости вдоль апертуры

На рис. 4 приведена зависимость относительного снижения КНД.



**Рис. 4.** Изменение КНД вследствие отклонения параметров фазового и амплитудного распределения для значений фокусного расстояния  $z_0/\lambda = 1$  (кривые 1 *а* и *б*) и  $z_0/\lambda = 5$  (кривые 2 *а* и *б*)

## 2. Отклонение значений электрических параметров среды.

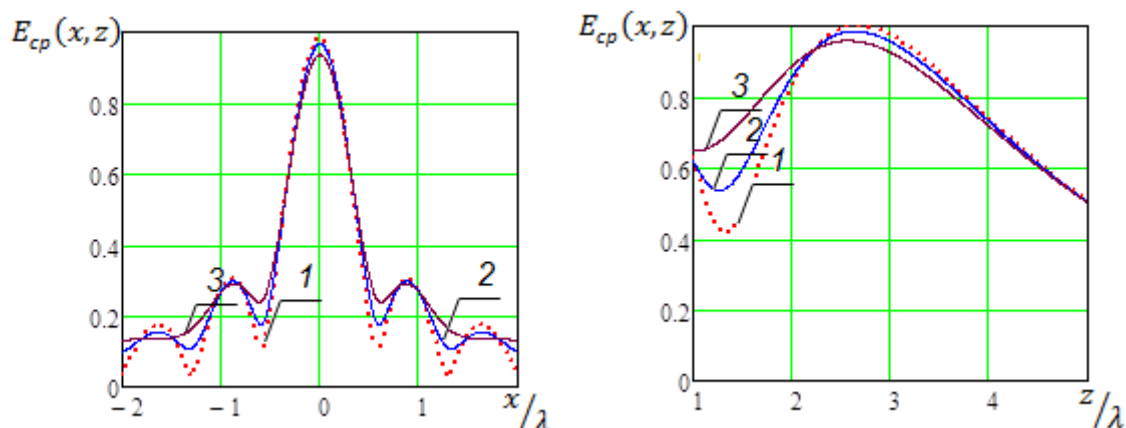
Среда рассматривается как однородная с отклонениями электрических параметров от номинальных:  $\tilde{\beta}(x, z) = \beta(1 + \delta\beta)$  и  $\tilde{\alpha}(x, z) = \alpha(1 + \delta\alpha)$ , где относительные отклонения  $\delta\beta$  и  $\delta\alpha$  – некоррелированные случайные величины с плотностями распределения  $w(\delta\beta)$  и  $w(\delta\alpha)$ . Моделирование их влияния осуществляется аналогично предыдущему случаю.

На рис. 5 представлены пространственные распределения величин  $E_{cp}(x, z)$  для двух значений  $\delta\beta_m$  и в отсутствии отклонений в направлении вдоль и поперек

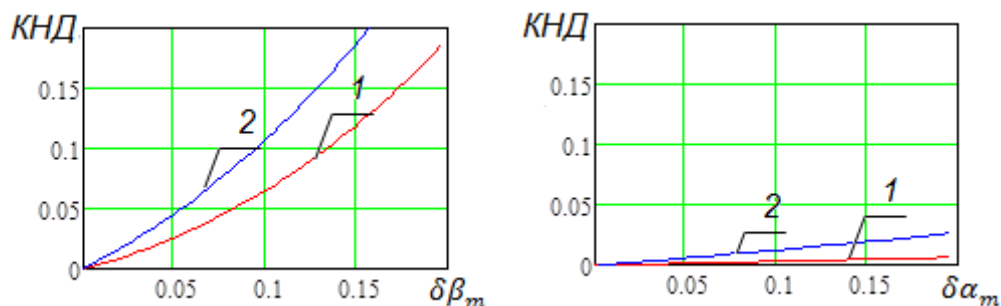
апертуры.

Общий характер искажений пространственного распределения напряженности электрического поля при отклонениях величины коэффициента затухания аналогичен, но выражен значительно слабее.

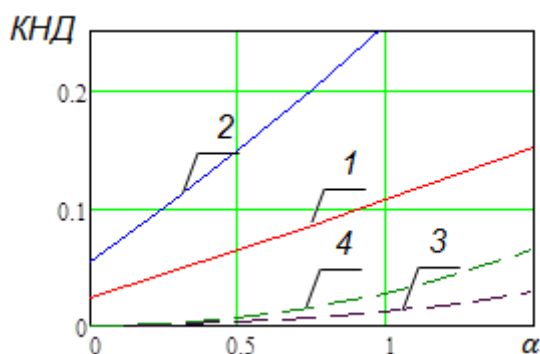
Отклонения значений коэффициентов фазы и затухания приводят к снижению коэффициента направленного действия в различной мере. Как и следовало ожидать, при равных относительных разбросах влияние отклонений коэффициента фазы имеет преобладающий характер, причем этот эффект проявляет тенденцию к усилению по мере роста потерь в среде и фокусного расстояния (рис. 6, 7).



**Рис. 5.** Пространственные распределения ( $\cdots$  – при наличии отклонений коэффициента фазы в отсутствии погрешностей (кривая 1) и значений  $\delta\beta_m = 15\%$  (кривая 2) и  $\delta\beta_m = 25\%$  (кривая 3))



**Рис. 6.** Относительное снижение КНД в зависимости от максимальных отклонений коэффициента фазы и затухания (апертура с равномерным амплитудным распределением  $L/\lambda = 6$ ,  $\alpha\lambda_{ср\epsilon d} = 0,5$ ,  $\alpha\lambda_{ср\epsilon d} = 1$ , фокус –  $(0,5\lambda_{ср\epsilon d})$  кривая 1 –  $\alpha = 0,5$ , кривая 2 –  $\alpha = 1$ )



**Рис. 7.** Относительное снижение КНД в зависимости от коэффициента затухания в среде (кривые 1, 2 –  $\delta\beta_m = 0.1$ , кривые 3, 4 –  $\delta\alpha_m = 0.1$ )

### 3. Неоднородность материала.

Неоднородный материал характеризуется случайными изменениями коэффициентов затухания и фазы в пределах интересующего объема  $\alpha = \tilde{\alpha}(x, z)$  и  $\beta = \tilde{\beta}(x, z)$ . Модель случайных отклонений согласно

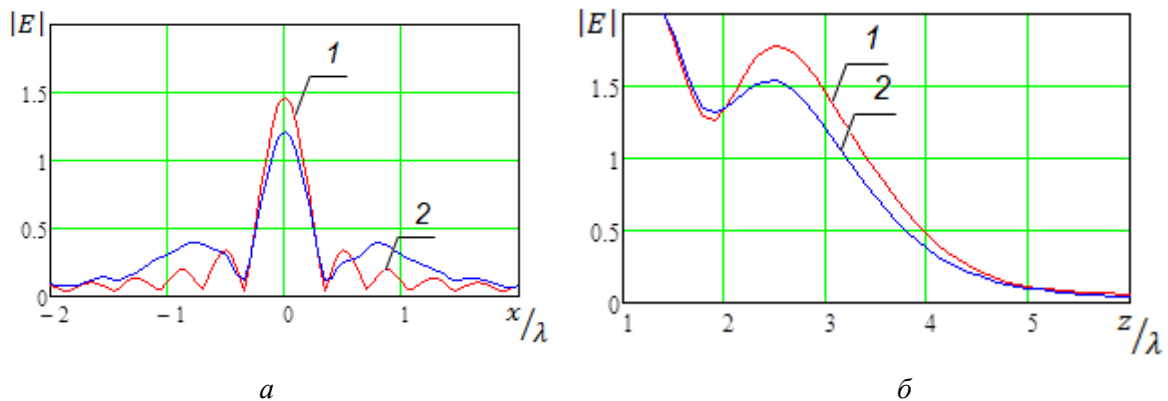
[5] представим следующим образом. Материал в рассматриваемом объеме рассматривается как состоящий из набора участков, однородных в их пределах со случайным значением электрических параметров  $\tilde{\alpha}_k(x_k, z_k) = \alpha(1 + \delta\alpha_k)$  и  $\tilde{\beta}_k(x_k, z_k) = \beta(1 + \delta\beta_k)$ .

Значения отклонений  $\delta\alpha_k$  и  $\delta\beta_k$  в соседних участках некоррелированы и характеризуются одинаковыми законами плотности распределения  $w(\delta\alpha)$  и  $w(\delta\beta)$ . Размеры локально однородных участков равны и соответствуют интервалу корреляции  $\rho_{кор}$  случайных функций  $\tilde{\alpha}(x, z)$  и  $\tilde{\beta}(x, z)$ .

Оценка влияния параметров  $\rho_{кор}$  и плотности распределения  $w(\delta\alpha)$  и  $w(\delta\beta)$  осуществляется также прямым статистиче-

ским моделированием. Результат – средние пространственные распределения напряженности поля в окрестности точки фокусировки и значения среднего КНД. При моделировании величины  $\delta\alpha$  и  $\delta\beta$  рассматривались как случайные, равномерно распределенные в интервалах  $[-\delta\alpha_m, \delta\alpha_m]$  и  $[-\delta\beta_m, \delta\beta_m]$ .

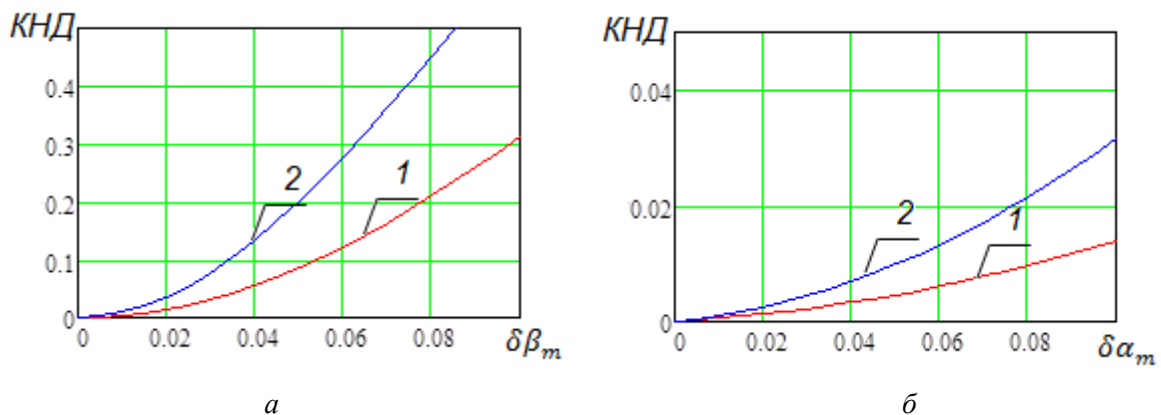
На рис. 8 представлены пространственные распределения в отсутствии отклонений и средние пространственные распределения в направлении вдоль и поперек апертуры.



**Рис. 8.** Пространственные распределения в отсутствии отклонений (кривая 1 а и кривая 1 б) и средние пространственные распределения: а – в направлении вдоль (кривая 2), б – поперек апертуры (кривая 2) (распределение отклонений – равномерное с максимальными значениями  $\delta\alpha_m = 0.1$  и  $\delta\beta_m = 0.1$ ,  $\alpha = 0.5$  и  $\rho_{кор} = \lambda_{среды}$ )

Отклонения параметров среды приводят к заметному снижению КНД. На рис. 9 приведены зависимости относительного

снижения КНД вследствие неоднородного состава материала.



**Рис. 9.** Зависимость относительного снижения КНД от максимального отклонения относительных значений коэффициентов фазы и затухания для точки фокусировки  $(0, 3\lambda_{сред})$  (кривые 1 а и б) и для точки фокусировки  $(0, 5\lambda_{сред})$  (кривые 2 а и б) (остальные параметры соответствуют предыдущим примерам)

На основании предварительного анализа влияния возмущающих факторов на эффективность фокусировки в зоне ближнего излученного электромагнитного поля, для характерных ситуаций ее применения, можно сформулировать следующие выводы.

1. Наличие отклонений параметров токов в апертурах и отклонения параметров среды заметно и в различной мере влияют на искажения сфокусированного электромагнитного поля.

2. Наличие погрешностей фаз и амплитуд токов, формируемых в апертурах сфокусированных антенн, не превышающих значений порядка  $\pi/4$  и 10% соответственно, не приводит к существенному снижению эффективности фокусировки.

3. Отклонение значений коэффициентов фазы в однородной среде оказывают более выраженный эффект ухудшения фокусирующих свойств по сравнению с равными относительными отклонениями коэффициента затухания. При характерных электрических размерах антенн, используемых для фокусировки излучения в среды с умеренным затуханием, относительное снижение КНД, не превышающее  $10 \div 20\%$  имеет место при отклонениях ко-

эффициента фазы до величин порядка 10%. Влияние отклонений коэффициента затухания на снижение КНД – почти на порядок меньшее.

4. Неоднородность электрофизических параметров среды дает наибольший вклад в снижение качества фокусировки, причем преобладающее влияние оказывают отклонения коэффициента фазы. При разбросе значений коэффициента фазы, превышающих  $5 \div 10\%$ , эффективность фокусировки значительно снижается. Влияние разбросов значений коэффициента затухания проявляется в значительно меньшей степени, то есть допустимые максимальные отклонения их могут быть, по крайней мере, в несколько раз большими.

5. Проведенный предварительный анализ свидетельствует о том, что использование фокусировки излучения в средах с выраженными диссипативными свойствами целесообразно в случаях, когда требуется осуществить локальную концентрацию интенсивности создаваемого электромагнитного поля, что при умеренных значениях отклонения амплитудно-фазового распределения в антеннах и параметров среды практически реализуемо.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Низкоинтенсивные СВЧ технологии (Проблемы и реализации) / Под ред. Г.А. Морозова и Ю.Е. Седельникова. М.: «Радиотехника», 2003. 112 с.

2. **Архангельский Ю.С.** Справочная книга по СВЧ электротермии. Саратов: «Научная книга» 2011. 560 с.

3. Антенны, сфокусированные в зоне ближнего излученного поля. Основы теории и технические приложения. / Под ред.

Ю.Е. Седельникова и Н.А. Тестоедова. Красноярск: Изд-во СибГАУ, 2015. 308с.

4. **Шифрин Я.С.** Вопросы статистической теории антенн. /Я.С. Шифрин М.: «Советское радио», 1970. 384 с.

5. **Маслов О.Н.** Комплексное моделирование статистических характеристик поля апертурной случайной антенны / О.Н. Маслов, А.С. Раков // Антенны. – 2015. № 1 (212). С. 41-49.

**Седельников Юрий Евгеньевич** – заслуженный деятель науки и техники РТ, доктор технических наук, профессор кафедры «Радиоэлектронные и телекоммуникационные системы» Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева (КАИ).

**Yu. E. Sedelnikov**– Honored Master of Science and Engineering of Tatarstan Republic, Dr. Sc., Professor, Department of Radioelectronic and Telecommunication Systems, Tupolev Kazan National Research Technical University (KAI)

**Никишина Дарья Владимировна** – аспирант кафедры «Радиоэлектронные и телекоммуникационные системы» Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева (КАИ).

**Потапова Ольга Владимировна** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Радиоэлектронные и телекоммуникационные системы» Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева (КАИ).

**Халикова Ксения Наильевна** – аспирант кафедры «Радиоэлектронные и телекоммуникационные системы» Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева (КАИ).

**Daria V. Nikishina** – Postgraduate, Department of Radioelectronic and Telecommunication Systems, Tupolev Kazan National Research Technical University (KAI)

**Olga V. Potapova** – PhD, Associate Professor, Department of Radioelectronic and Telecommunication Systems, Tupolev Kazan National Research Technical University (KAI)

**Ksenia N. Khalikova** – Postgraduate, Department of Radioelectronic and Telecommunication Systems, Tupolev Kazan National Research Technical University (KAI)

*Статья поступила в редакцию 14.11.16, принята к опубликованию 18.11.16*



# СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

УДК 621.791.7:681.5(045)

## МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЦЕССА УПРАВЛЕНИЯ СОВРЕМЕННЫМ СВАРОЧНЫМ ОБОРУДОВАНИЕМ

С.К. Сперанский, И.В. Родионов, А.А. Потапов

## METHODOLOGICAL APPROACHES TO AUTOMATING CONTROL PROCESSES OF MODERN WELDING EQUIPMENT

S.K. Speransky, I.V. Rodionov, A.A. Potapov

*Предложены интеллектуальные технологии для управления современным сварочным оборудованием на основе нечеткой логики, нейронных сетей и эволюционных алгоритмов оптимизации. Описываются методика построения нечетких систем и блок-схема процедуры генетического программирования для принятия наилучшего решения при выборе функции принадлежности.*

Ключевые слова: *генетический алгоритм, нечеткие множества, нейронные сети*

Для подавляющего большинства объектов управления построение точных математических моделей практически невозможно ввиду их плохой формализуемости. Это касается и сварочных процессов, которые отличаются многосвязностью, стохастичностью, нелинейностью, нестационарностью, наличием сильных возмущений [1]. Традиционный аппарат управления ими не может учесть всех этих особенностей. В этом случае хорошие результаты демонстрируют системы, построенные на интеллектуальных принципах с использование нечеткой логики, нейронных сетей, эволюционных алгоритмах оптимизации (генетических, иммунных, алгоритмов на основе поведенческих реакций). В их основе лежит попытка некоторой формали-

*This article describes intelligent technologies used to control modern welding equipment based on fuzzy logic, neural networks, and evolutionary optimization algorithms. The article provides a block diagram of genetic programming procedures for making best decisions.*

Keywords: *genetic algorithm, fuzzy logic, neural networks*

зации деятельности головного мозга человека и функционирования живых организмов [2].

Использование естественного языка со всем набором имеющихся в нем средств для выражения человеческих способов рассуждений и принятия решений с помощью качественных представлений, понятий и оценок типа «мало», «много», «медленно», «очень медленно» и т.д. позволяет всесторонне и компактно описать общую смысловую постановку задач управления, возникающих в высокоэффективных технологических процессах. Логико-лингвистические модели, полученные в результате интерпретации этих описаний в терминах теории нечетких множеств, могут служить конструктивной основой для разра-

ботки алгоритмов и систем интеллектуального управления для обработки концентрированными потоками энергии, функционирующими в условиях неполной информации.

Статья посвящена разработке методических основ построения систем нечеткого управления сложными сварочными системами. В ней рассмотрены основные этапы синтеза интеллектуальных алгоритмов нечеткого управления и анализируются вопросы организации и особенности нечеткого вывода. Данный подход позволяет с единых методологических позиций формировать и исследовать, как модель объекта, так и алгоритм нечеткого управления.

**Работа нечеткого логического алгоритма.** Построение нечетких систем основано на имитации действий высококвалифицированного оператора при помощи органов управления на сварочном агрегате.

Сначала исходную входную информацию необходимо преобразовать к виду, удобному для дальнейшего применения в нечеткой логике. При этом используются лингвистические переменные, описывающие входную ситуацию и управляющие решения на качественном уровне (например, «*скорость сварки*» – «*высокая*», «*напряжение*» – «*среднее*», «*подача свариваемых деталей*» – «*немного уменьшить*»). Возможные значения лингвистических переменных называются термами. Например, у лингвистической переменной «*Напряжение*» термы – «*Низкое*», «*Среднее*», «*Высокое*». Эти лингвистические переменные задаются на некоторой количественной шкале (*фазификация*), при помощи которой определяются степени соответствия входных и выходных данных рассматриваемым понятиям. Для этого используются функции принадлежности  $\mu$ , принимающие значения от 0 до 1 в зависимости от степени достоверности входного числового значения. В качестве переменных при сварке является вектор входных значений  $X = (x_1, x_2)$ , где  $x_1$  – скорость перемещения свариваемых деталей;  $x_2$  – переменная тока.

Графически функция принадлежности может быть представлена в различных формах: колоколообразной, треугольной, трапецидальной [3]. В нашем случае будем использовать треугольные функции принадлежности (рис. 1).

Математическая запись треугольной функции принадлежности имеет вид:

$$\left\{ \begin{array}{ll} 1, & \text{if } x \leq a \\ 1 - 2\left(\frac{x-a}{b-a}\right), & \text{if } a \leq x \leq \frac{a+b}{2} \\ 2\left(\frac{b-x}{b-a}\right), & \text{if } \frac{a+b}{2} \leq x \leq b \\ 0, & \text{if } x \geq b \end{array} \right\},$$

где  $a, b, c$  – параметры функции.

Кроме этого задается набор правил, ставящих в соответствие входной ситуации определенное управляющее воздействие. Основой систем управления с нечеткой логикой является получение нечетких выводов на основе продукционных правил, широко используемых в экспертных системах. Такое правило состоит из предпосылки и заключения и формулируется в нечеткой логике в виде «если..., то...» на основе нечетких множеств. Входная часть правила находится после слова «если» и называется предпосылкой, а выходная часть правила находится после слова «то» и называется заключением, которое является нечетким выводом. Правила нечеткой логики составляются на основе базы знаний, полученных в общем случае различными средствами и методами: применение экспертных оценок, использование экспериментальных данных, анализом математических моделей и т.д. В нечеткой логике правило  $R$  «если  $A$ , то  $B$ » отображается в виде нечеткой импликации  $R = A \rightarrow B$ . Далее действует механизм нечеткого логического вывода, в основе которого лежит операция композиции нечеткого множества, представляющего входную ситуацию со сформированным нечетким соответствием. Композицию можно представить как аналог умножения вектор – строки на мат-

рицу, только вместо операции умножения используется расширенное представление логической операции *И*, а вместо операции сложения – расширенное *ИЛИ*, то есть взятие минимума или максимума соответственно. В результате определяется нечеткое множество управляющих воздействий. Последним этапом алгоритма нечеткого управления является дефазификация – процесс перевода нечетких данных в конкретные физические управляющие величины.

Наибольшее практическое применение имеет определение центра тяжести нечетких множеств (рис. 1).

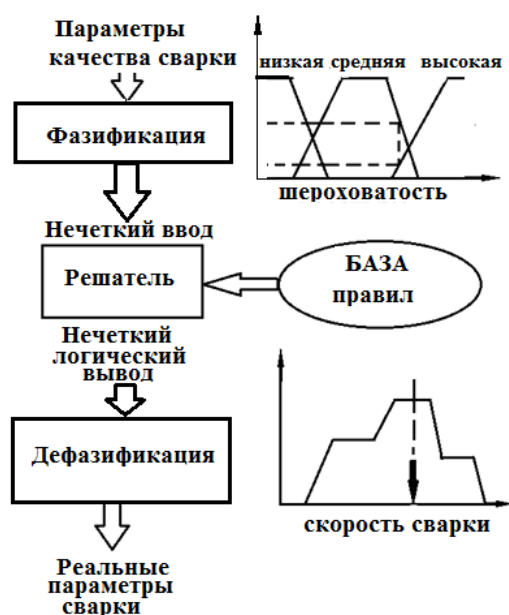


Рис. 1. Блок-схема применения нечетких множеств в сварке

При этом

$$\text{Выход} = \frac{\int_U Y \mu(y) dy}{\int_U \mu(y) dy}$$

Порой полученный результат не дает однозначного представления о состоянии системы. Неточность объясняется тем, что начальные параметры функций принадлежности были выбраны приближенно. Для повышения точности выходного результата требуется более точная подстройка функций принадлежности.

Для этого лингвистическую информацию об объекте представляют в виде специальной нейронечеткой сети.

**Нейронные сети в задаче управления сварочными процессами.** Нейронные сети, как правило, используются для аппроксимации зависимостей, в которых неизвестен точный аналитический вид связей между входами и выходами. Поставленная задача решается в процессе обучения нейронной сети, которое состоит из следующих этапов: обучение ИНС, проверка расчетных данных в диапазоне обучения ИНС, проверка расчетных данных вне диапазона обучения ИНС. Высоким качеством обучения ИНС считают приобретенную ее способность моделировать функцию, связывающую значения входных и выходных переменных за пределами обучающей выборки. Обычно она состоит из нескольких слоев, которые выполняют следующие функции. При функционировании нейронной сети выделяют два главных режима работы – *обучение* и *рабочий*. При первой подаче очередного эталонного входного образа (скорость сварки, напряжение на аноде, тип материала) выходной сигнал (качество сварки) отличается от эталонного. Блок обучения оценивает величину ошибки и корректирует коэффициенты межнейронных связей с целью ее уменьшения. При каждой последующей подаче этого же эталонного входного образа ошибка уменьшается. Процесс продолжается до тех пор, пока ошибка не достигнет требуемого значения.

Процесс обучения представляет собой решение задачи оптимизации, целью которой является минимизация функции ошибки на данном множестве примеров путем выборки коэффициентов межнейронных связей.

Входной слой – входы объекта идентификации. Для исследуемого объекта рассматриваются два входных параметра ( $x_1$  – скорость,  $x_2$  – напряжение). Внутренние слои представлены базисными нейронами и моделируют функции принадлежности.

Выходные слои формируют значения выходной переменной и выполняют опе-



рацию нахождения среднего, то есть выполняют преобразование результатов нечеткого логического вывода в четкое число. Обучение нейронной сети состоит в подборе таких весов, которые минимизируют различие между результатами нейронечеткой аппроксимации и реальным поведением объекта.

Задача обучения ИНС является многоэкстремальной, поэтому все классические методы оптимизации, основанные на гра-

диенте целевой функции, не могут гарантировать нахождение наилучшего решения. Для повышения качества аппроксимации рекомендуется использовать эволюционные алгоритмы глобальной оптимизации. Самыми известными из них являются генетические алгоритмы (ГА).

**Использование генетического алгоритма в оптимизации нейронных сетей.** Работа алгоритма приведена на рис. 2, 3.

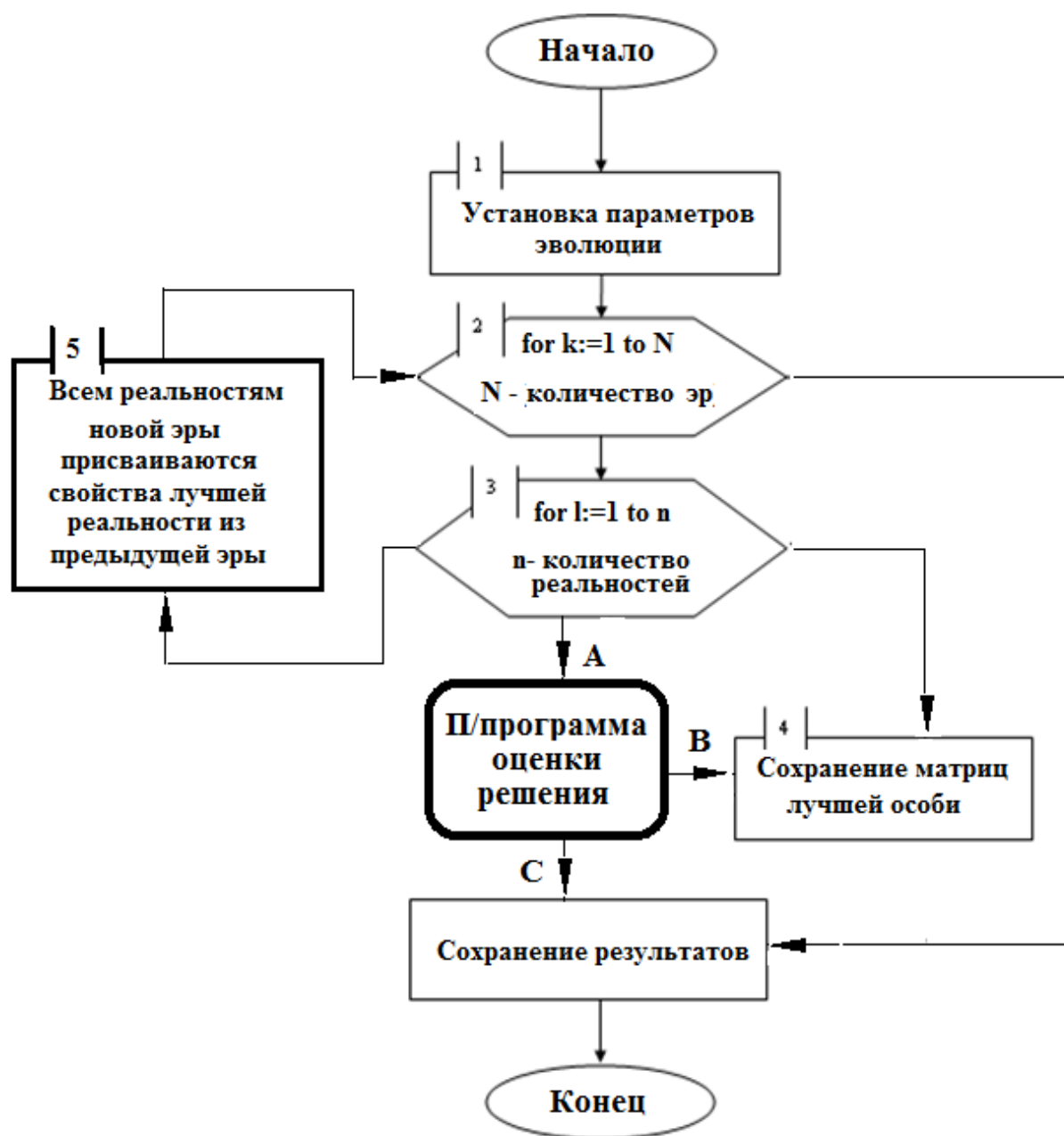


Рис. 2. Блок-схема процедуры генетического программирования

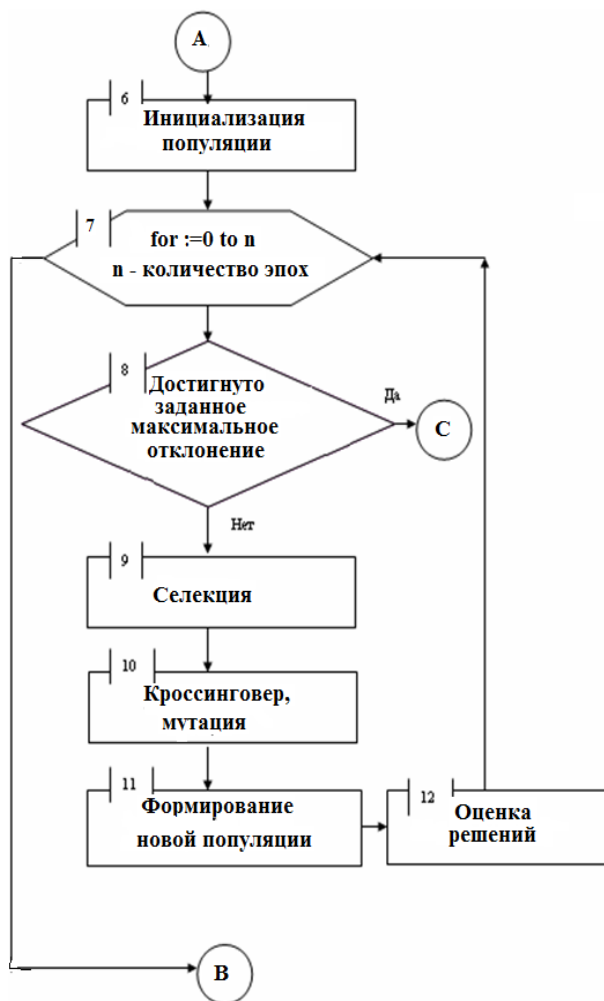


Рис. 3. Подпрограмма поиска оптимальных решений с помощью ГА

Она состоит из следующих шагов:

- инициализация, или выбор исходной популяции хромосом;
- оценка приспособленности хромосом в популяции;
- проверка условия остановки алгоритма;
- селекция хромосом;
- применение генетических операторов;
- формирование новой популяции;
- выбор наилучшей хромосомы.

При разработке алгоритма нами введены новые понятия: *эра* - промежуток времени, состоящий из  $N$  эпох, *реальность* - направление развития популяции за период эры. Эти понятия служат для описания улучшений в традиционном генетическом алгоритме. В каждый момент времени существуют  $K$  реальностей, каждой из которых поставлена в соответствие

совокупность нейронных сетей. В момент начала новой эры происходит определение наилучшей совокупности сетей и параметрами остальных нейронных сетей становятся параметры наилучшей. Последующее обучение начинается в отличие от начального момента с определенных значений достигнутой наилучшей совокупности. Критериями остановки обучения служат прохождение определенного количества эр или достижение максимально требуемого отклонения. Следует отметить, что разделение на эры позволяет не только найти наиболее оптимальное решение, но и распределить решение задачи для сети из нескольких компьютеров.

С математической точки зрения задача обучения нейронных сетей сводится к продолжению функции, заданной в конечном числе точек на всю область определения. При таком подходе входные данные сети считаются аргументами функции, а ответ сети – значением функции. Описанный алгоритм обладает тем свойством, что если долго пропускать через нейронную сеть все пары входных и выходных векторов, то придем к такому распределению весов, при котором для каждого входного вектора обеспечивается выработка правильного выходного вектора.

Нейронная сеть и генетический алгоритм реализованы в среде программирования Delphi. В диалоговом окне (рис. 4) устанавливается конфигурация нейронной сети, количество тренировочных пар, количество эпох, количество слоев, адрес, откуда считываются параметры лучевой сварки, и адрес, куда записываются качество сварки. В левой стороне окна показан процесс обучения нейронной сети с каждой итерацией, количество которых задается в окне «количество эпох». Это отклонение подсчитывается по специальной формуле и, как видно из рисунка, с каждой итерацией приближается к нулю. Достоинство данной программы состоит в том, что для обучения и настройки сети можно задавать произвольное количество входных параметров сварки, а на выходе получать один – качество сварки.

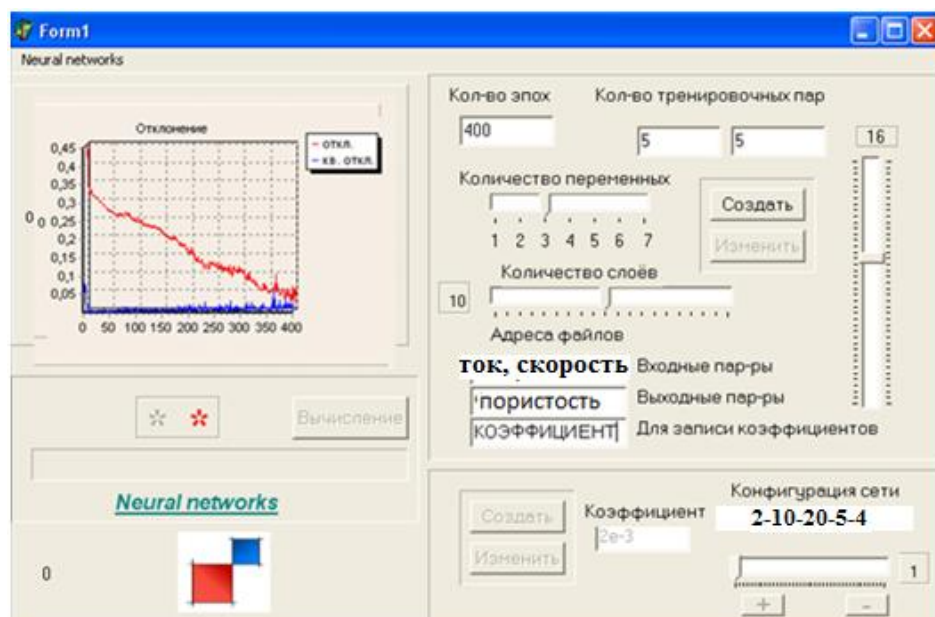


Рис. 4. Диалоговое окно для нейронечеткого управления процессом сварки в среде Delphi

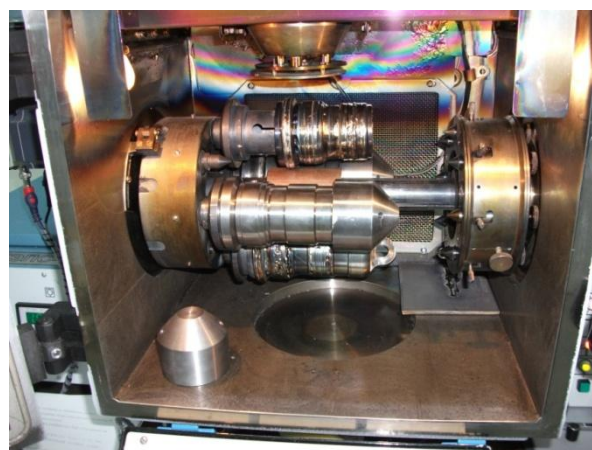
**Экспериментальные исследования.** Полученные алгоритмы и программы в настоящее время апробируются в существующей установке для электронно-лучевой сварки УЭЛС-905 (рис. 5 а), разработанной в ОАО «Тесар-Инжиниринг».

Установка предназначена для прецизионной сварки в вакууме точных деталей и

узлов из конструкционных сталей, алюминия, меди и сплавов, тугоплавких и активных металлов толщиной от 0,05 до 5 мм в условиях серийного производства. Для повышения производительности в камере смонтирован восьмипозиционный шпиндель деталей с горизонтальной и вертикальной осью вращения (рис. 5 б).



а



б

Рис. 5. Установка УЭЛС-905 (а) и ее вакуумная камера (б)

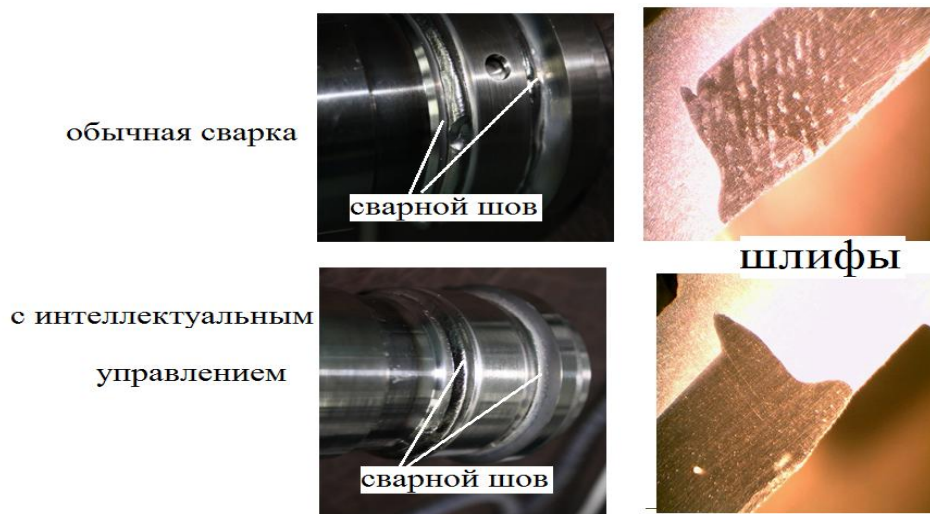
Установка оснащена координатным столом для сварки прямоугольных контуров и системой наблюдения посредством видеокамеры и монитора. Программно перемещающаяся верхняя плита, с расположенной на ней электронно-лучевой пуш-

кой, позволяет получать линейные сварочные швы и обеспечивает наведение луча на стык в процессе сварки кольцевых швов при максимальном использовании объема камеры.

В ходе эксперимента были сварены

гидроцилиндры для авиационной промышленности. При этом улучшилась равномерность шва, а прочность соединения

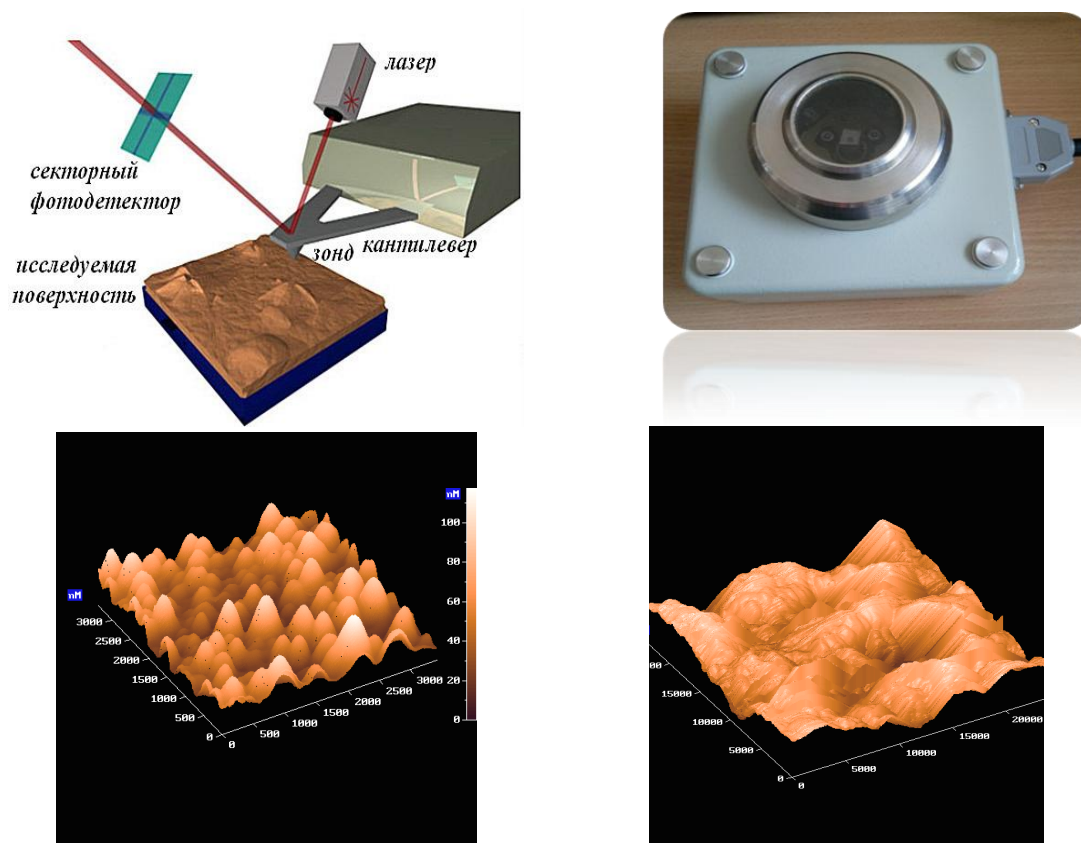
повысилась в 1,5 раза. Наверху (рис. 6) – шов неравномерный с разрывами, а внизу – равномерный без нарушений сплошности.



**Рис. 6.** Качество шва при обычной схеме управления (вверху) и при интеллектуальном подходе (внизу)

Качество процесса сварки на морфологическом уровне (рис. 7, внизу) при различных режимах оценивалось с помощью

атомно-силового микроскопа СММ2000 (рис. 7, вверху).



**Рис. 7.** Исследование качества сварки, полученной при различных режимах



Планируется использовать описанные подходы для управления универсальными сварочными установками УПС-904 и УСК-904. Первая (рис. 8, слева) предназначена для автоматизированной прецизионной аргоно-дуговой сварки узлов приборного типа из чёрных и цветных металлов. Установка может работать в импульс-

ном или непрерывном режимах и формировать герметичные и вакуумно-плотные швы с минимальной зоной термического влияния. Вторая (рис. 8, справа) предназначена для герметизации узлов приборного типа в заданной по давлению и составу атмосфере камеры.



Рис. 8. Современное сварочное оборудование, выпускаемое ОАО «Тесар-Инжиниринг»

Итак, на примере электронно-лучевой сварки рассмотрено применение нейронной сети и генетического алгоритма оптимизации для процесса подстройки функций принадлежности и повышения точности нечеткого выхода.

Приведенный анализ показывает, что описанная методика позволяет решать задачи управления любым высокоэффективным технологическим процессом обработ-

ки концентрированными потоками энергии, которые обычно характеризуются нелинейностью и нестационарностью.

В работе предложен современный нейросетевой подход в управлении сложным сварочным оборудованием, распространение которого на другие технологии обработки концентрированными потоками энергии позволит повысить как производительность обработки, так и качество.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Рыкалин Н.Н. Основы электронно-лучевой обработки материалов / Н.Н.Рыкалин, И.В.Зуев, А.А.Углов. М.:Машиностроение, 1978. 239с.

2. Еременко Ю.И. Введение в искусственный интеллект /Ю.И. Еременко. Ста-

рый Оскол: ООО «ТНТ», 2008. 480 с.

3. Методы робастного, нейро-нечеткого и адаптивного управления. / Под ред. Н.Д. Егупова. М.:Изд-во МГТУ им. Баумана, 2002. 744 с.

**Сперанский Сергей Константинович** – кандидат технических наук, доцент кафедры "Сварка и металлургия" Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

**Sergey K. Speransky** – PhD, Associate Professor, Department of Welding and Metallurgy, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

**Родионов Игорь Владимирович** – доктор технических наук, заведующий кафедрой «Сварка и металлургия» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

**Igor V. Rodionov** – D. Sc., Professor, Head: Department of Welding and Metallurgy, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

**Потапов Александр Алексеевич** – доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник Института радиотехники и электроники имени В.А. Котельникова РАН.

**Aleksandr A. Potapov** – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Chief Research Scientist, V.A. Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics of RAS

*Статья поступила в редакцию 10.11.16, принята к опубликованию 18.11.16*

УДК 004.932.2

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ФРАКТАЛЬНЫХ СИГНАТУР ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ ОКСИДИРОВАНИЯ**

**А.А. Потапов, И.В. Родионов, С.К. Сперанский, В.А. Герман**

### **USING THE FRACTAL SIGNATURE TO CONTROL ELECTRO- THERMAL OXIDATION PROCESSES**

**A. A. Potapov, I. B. Rodionov, And S. K. Speransky, V. A. German**

*В работе на основе полученных экспериментальных результатов доказано существование на термооксидированной поверхности титановых изделий фрактальных кластеров с различными количественными параметрами, и в связи с этим предложен новый подход к автоматизации электротермического процесса оксидирования с использованием нейронных сетей в контуре управления.*

*Ключевые слова: функциональные покрытия, фракталы, термооксидирование*

*The paper presents experimental results which show the existence of fractal clusters with various quantitative parameters over thermal oxidized coatings. We propose a new approach to automation of the electro-oxidation process using neural networks in the control loop.*

*Keywords: functional coatings, fractals, thermal oxidized process*

Проблема формирования качества поверхности, и такой важнейшей его характеристики как шероховатость приобретает особую актуальность в связи с созданием новых технологий обработки материалов. Она является откликом структуры поверхностного слоя на воздействие того или иного физического процесса.

При использовании PVD и CVD методов получения функциональных покрытий возникают значительные трудности в описании и оценке шероховатости поверхностных слоев профильным методом [1]. Форма элементов шероховатости, их распределение на обрабатываемой площади поверхности сильно отличается от традиционного представления о них, сформированного в условиях процесса обработки резанием, как о периодическом чередовании выступов и впадин. Элементы шероховатости, возникающие при взаимодействии материала с потоками теплоты, высокими давлениями, весьма специфичны и имеют грибообразную, гребешковую, бутылкообразную и т.п. формы. Распределение этих элементов на обрабатываемой поверхности не носит периодического характера и имеет различные плотности вероятностей.

Не имея методики оценки топографических свойств таких поверхностей и их геометрических характеристик, адекватно отражающей реальные процессы формирования поверхностного рельефа, невозможно удовлетворительно предсказать поведение этой поверхности в процессе эксплуатации детали или изделия. Особая заинтересованность в такой оценке проявляется в прогнозировании эксплуатационных характеристик изделий медицинского назначения с повышенными требованиями по надежности и безопасности функционирования. Все это ставит задачу разработки новых подходов к оценке шероховатости функциональных поверхностей.

Одним из возможных направлений поиска таких подходов является использование теории фракталов, а в качестве оценочного количественного параметра – фрактальной (дробной) размерности  $D$  и

фрактальных сигнатур [2]. Данная работа была поставлена с целью проверки этих предположений. Фрактал с математической точки зрения – это отображение или множество, получаемое бесконечным рекурсивным процессом, имеющее свойства самоподобия, и аналитически описывается дробными производными и интегралами. Геометрически фракталы – это объекты (линии, поверхности, тела), имеющие сильно изрезанную структуру и масштабную инвариантность (скейлинг), то есть на малых масштабах они выглядят в среднем также, как и на больших. Фрактальные дробные размерности и сигнатуры  $D$  характеризуют не только топологию объектов, но и отражают процессы эволюции динамических систем и связаны с их свойствами. По своему содержанию контуры всех фрактальных покрытий отражают суть динамических процессов, протекающих при обработке концентрированными потоками энергии.

При исследовании электротермических процессов, связанных с формированием металлооксидных поверхностных слоев изделий реакционным взаимодействием металлической матрицы с газовой средой (атмосфера воздуха, перегретый водяной пар, смеси газов) установлено, что характерным для них является образование слоистых столбчатых структур, а также крупных и нитевидных оксидных кристаллов.

Возникновение таких форм рельефа связывается с проявлением нелинейных кинетических закономерностей в условиях, далеких от термодинамического равновесия (при температурах электротермического модифицирования (оксидирования), находящихся в диапазоне от 150°C до 1100°C, и различном давлении среды). Получение покрытий из газовой фазы – сложный многостадийный процесс, включающий стадии массо- и теплопереноса, адсорбции и десорбции, собственно стадию химической реакции термораспада металлоорганических соединений, а также стадии формирования твердой фазы и кристаллизации. Существенный вклад в обра-

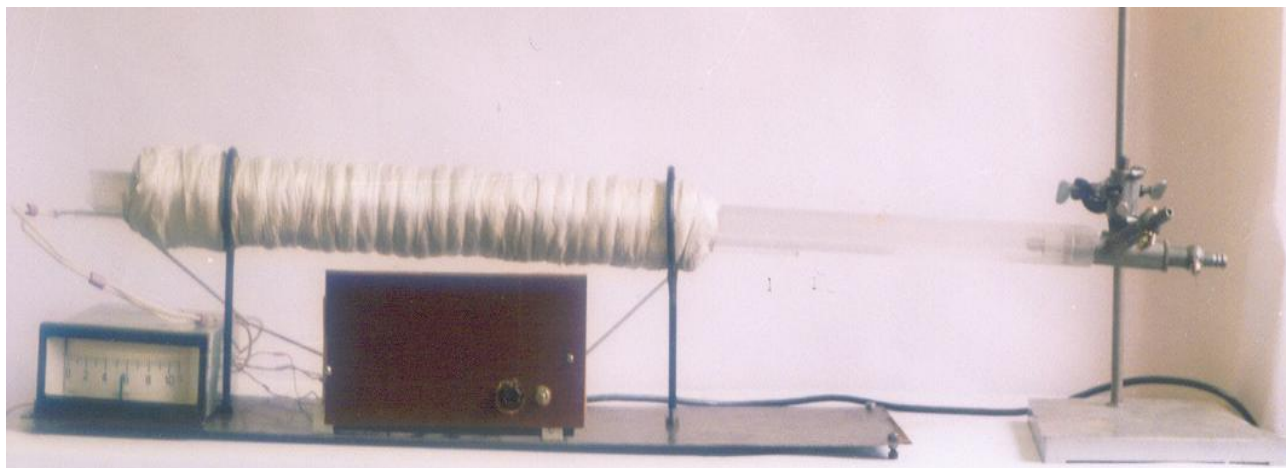
зование поверхностных структур разного типа вносят несовершенства строения решетки обрабатываемого материала, которые, в свою очередь, влияют на плотность и равномерность распределения элементов рельефа по площади обработки, а также на начало процесса растворения или осаждения.

Таким образом, в формировании рельефа поверхности принимают участие как внешняя рабочая среды, так и исходная структура обрабатываемого материала.

**Экспериментальные исследования.** Для эксперимента были изготовлены образцы из титана ВТ1-00 в виде прямоугольных пластин толщиной 1 мм, площадью рабочей поверхности 200 мм<sup>2</sup>. Перед электротермическим процессом оксидирования на воздухе поверхность образ-

цов подвергалась подготовке путем ультразвукового обезжиривания в моющем растворе, промывки и сушки, а также обдувки струей порошкового корунда  $Al_2O_3$ . Благодаря этому обеспечивалась высокая степень очистки поверхности с созданием в поверхностном слое пластических микрорелеформаций и внутренних напряжений, усиливающих окисление металла.

Последующее формирование оксидных покрытий на титановых образцах проводилось с применением способа воздушно-термического оксидирования. Для этого была изготовлена экспериментальная трубчатая электропечь сопротивления в виде кварцевой трубки диаметром 40 мм с нихромовым спиральным нагревательным элементом и специальной теплоизоляцией (рис. 1).



**Рис. 1.** Экспериментальная установка для электротермического оксидирования на воздухе

Значения напряжения на нихромовом нагревателе задавались с помощью лабораторного автотрансформатора и соответствовали определенным значениям температуры воздушной атмосферы в рабочей зоне электропечи. Режим оксидирования предусматривал нагрев изделий в печи до температуры 400 и 500<sup>0</sup>С с выдержкой 30 мин при каждой температуре и нормальном давлении воздуха.

Измерение фрактальной размерности  $D$  и кепстеров поверхности оксидированных образцов проводилось по специальной методике, разработанной в ИРЭ РАН [3]. Для приближенного измерения фрактальной

размерности Хаусдорфа - Безиковича, на исходном множестве (выборке)  $x(t)$  устанавливается некоторая мера - длина графика выборки. Далее выборка измеряется с помощью образца фиксированной длины  $\delta$ . Затем измеряется выборка образцом длины  $2\delta$ . В итоге мы получим две оценки длины  $A$  на масштабе  $\delta$  - в виде  $A_1$  и на масштабе  $2\delta$  - в виде  $A_2$ . Размерность кривой вычисляется по формуле:

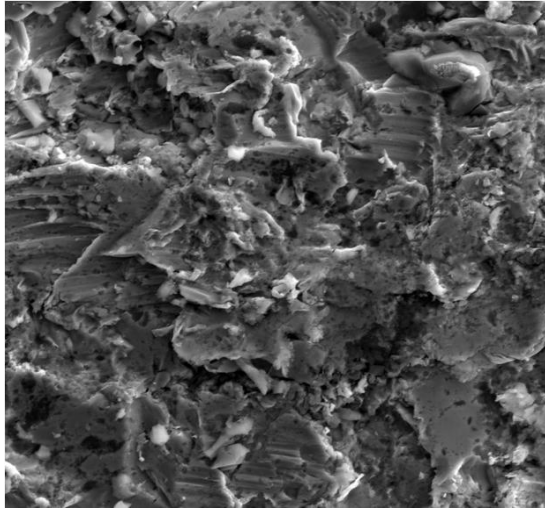
$$D_{x(t)} = \log_2 \frac{A_1}{A_2}.$$

Использование операции «Исключаю-

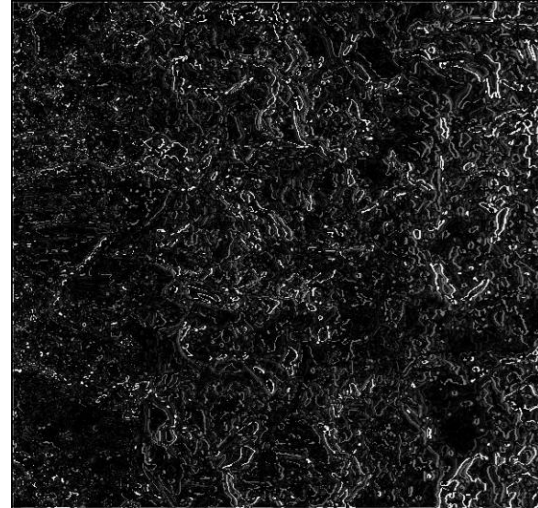


щее ИЛИ» к полученному изображению позволяет выделить: элементы одного размера, определить области с высокой концентрацией элементов, получить исходное изображение в необходимом масштабе.

Результаты экспериментов при разных температурных режимах оксидирования в электропечи сопротивления представлены на рис. 2 и 3.



*a*



*б*



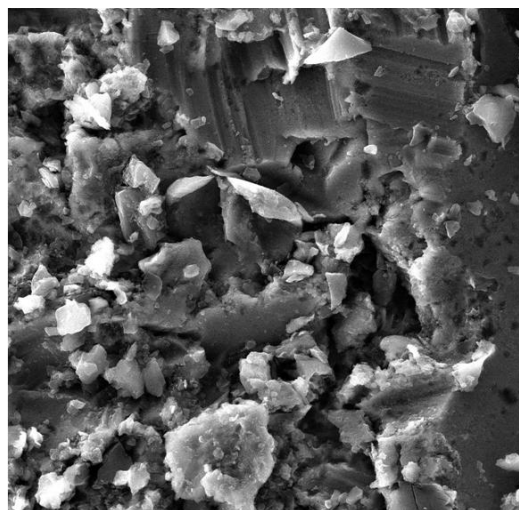
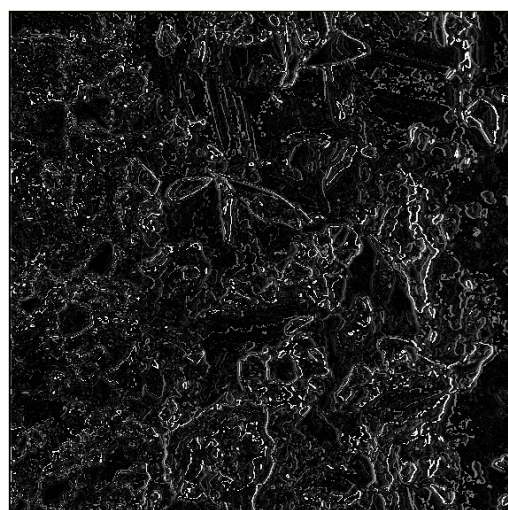
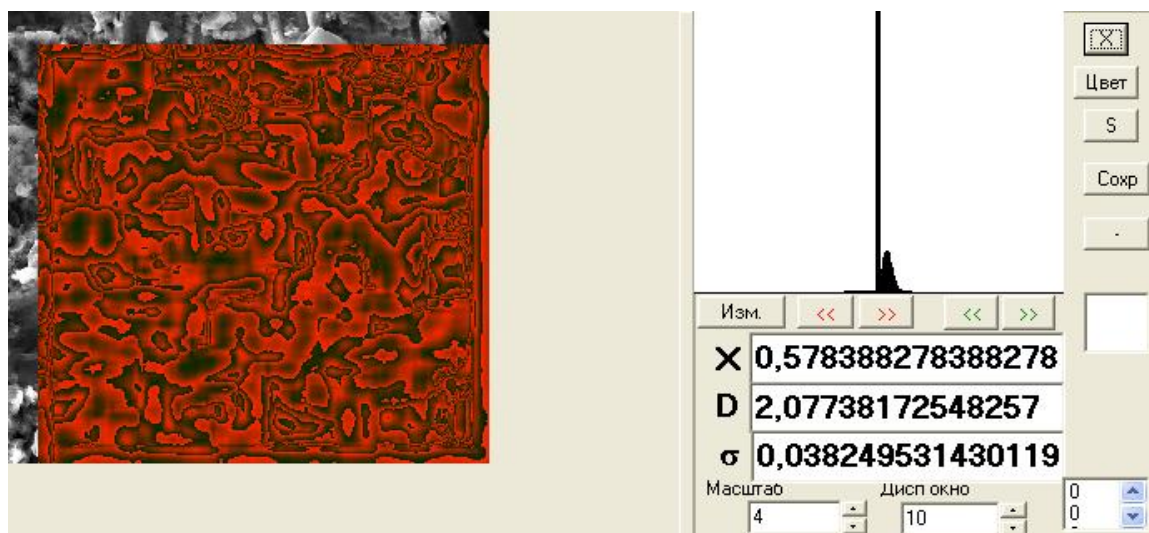
*в*

**Рис. 2.** Фрактальная обработка поверхности титанового образца, подвергнутого электротермическому оксидированию на воздухе при  $t = 400^{\circ}\text{C}$ ,  $\tau = 30$  мин. *a* – исходное изображение, *б* – результат предварительной градиентной обработки, *в* – обработка изображения с вычислением оценки фрактальной размерности  $D = 2,1079$

На фрактальных сигнатурах показано среднее значение фрактальной размерности  $D$  при ее среднеквадратической величине  $\sigma$ .

В режиме кластеризации, задавая тре-

буемый диапазон локальных фрактальных размерностей  $\Delta D$ , мы на экране компьютера получаем поле фрактальных размерностей, для которых все значения  $D_i \in \Delta D$  отображаются черным цветом.

*a**б**в*

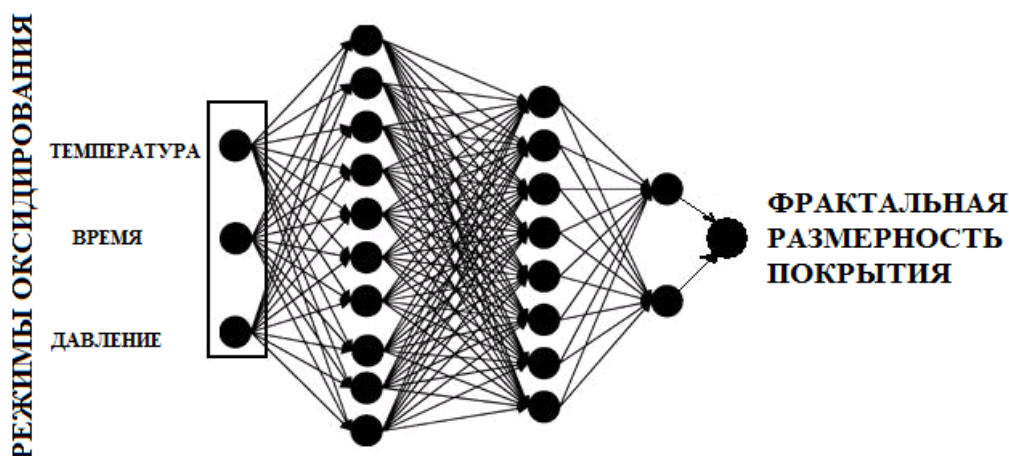
**Рис. 3.** Фрактальная обработка поверхности титанового образца, подвергнутого электротермическому оксидированию на воздухе при  $t = 500^{\circ}\text{C}$ ,  $\tau = 30$  мин. *a* – исходное изображение, *б* – результат предварительной обработки, *в* – обработка изображения с вычислением оценки фрактальной размерности  $D = 2,0773$

Программная реализация методов вычисления фрактальных характеристик позволяет непосредственно на экране компьютера отображать экспериментальные распределения локальных фрактальных размерностей. Цвет каждой точки изображения образца прямо пропорционален значениям  $D_i$ . Все измерения получаются в большой палитре псевдоцветов. При этом на двумерном изображении поверхности образца псевдоцветом выделяются все кластеры с заданной величиной  $D$  фрак-

тальной размерности.

Итак, при электротермических процессах оксидирования титановых изделий в различных реакционных газовых средах целесообразно использовать искусственную нейронную сеть в контуре управления (рис. 4), которая не производит вычислений, а трансформирует входные режимы оксидирования (температуру, время и давление рабочей среды) в выходной образ – фрактальную размерность покрытия.





**Рис. 4.** Использование нейронной сети в контуре управления электротермическим процессом оксидирования

Установка весовых коэффициентов нейронной сети осуществлялась на примерах, сгруппированных в обучающие множества. Такое множество состояло из обучающих пар (200-250), в которых каждому эталонному значению входного образа соответствует желаемое (эталонное) значение выходного образа.

Таким образом, в данной работе на основании проведенных экспериментов впервые предложен метод оценки качества оксидированных титановых изделий с использованием различных фрактальных характеристик. При этом шероховатость поверхности и поверхностный слой материала рассматривается как единая иерархическая мультифрактальная структура.

Предложенная модель позволяет не

только прогнозировать механизмы формирования шероховатости и физико-механических свойств поверхностного слоя, но и управлять ими с использованием нейронных сетей для получения заданных эксплуатационных свойств изделий различного функционального назначения.

Дальнейшее исследование должно вестись в направлении создания базы данных покрытий, полученных различными способами (плазменным, газовым, ионным и так далее) с их количественной характеристикой - фрактальной размерностью (экспертная система). Имея такую информацию, можно задавать технологические режимы и получать соответствующие им покрытия.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Фомин А.А.** Физико-химические и технологические основы наноинженерии металлооксидных и оксидно-керамических покрытий на металлах и сплавах медицинского назначения. / А.А. Фомин, И.В. Родионов, Е.Ю. Пошивалова. Саратов: Издательский дом «Райн-Экспо», 2014. 302с.

2. **Потапов А.А.** Фракталы в радиофи-

зике и радиолокации. М.: Логос, 2002. 664 с.

3. **Потапов А.А.** Новейшие методы обработки изображений / А.А. Потапов, Ю.В. Гуляев, С.А. Никитов, А.А. Пахомов, В.А. Герман. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. 496 с.

**Потапов Александр Алексеевич** – доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник Института радиотехники

**Aleksander A. Potapov** – Dr. Sc., Professor, Senior Fellow at V.A. Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics of the

и электроники имени В.А. Котельникова РАН.

**Родионов Игорь Владимирович** – доктор технических наук, заведующий кафедрой «Сварка и металлургия» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

**Сперанский Сергей Константинович** – кандидат технических наук, доцент кафедры "Сварка и металлургия" Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

**Герман Алексей Викторович** – кандидат физико-математических наук, Институт радиотехники и электроники имени В.А. Котельникова РАН.

Russian Academy of Sciences

**Igor V. Rodionov.** – D.Sc., Professor, Head: Department of Welding and Metallurgy, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

**Sergey K. Speransky** – PhD, Associate Professor, Department of Welding and Metallurgy, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

**Aleksey V. German** – PhD, at V.A. Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics of the Russian Academy of Sciences

*Статья поступила в редакцию 16.11.16, принята к опубликованию 18.11.16*

### УВАЖАЕМЫЕ ЧИТАТЕЛИ!

В разделе «Летопись» можно опубликовать воспоминания, рассказ, информацию об ученых, преподавателях, представителях промышленности, бизнеса, работающих в области электротехнологии.

# ЛЕТОПИСЬ

## ЮРИЙ СЕРГЕЕВИЧ АРХАНГЕЛЬСКИЙ



*Архангельский Юрий Сергеевич, доктор технических наук профессор, заслуженный деятель науки РФ, почетный работник высшего профессионального образования РФ, профессор кафедры «Электроснабжения и электротехнология» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.*

*Родился 6 декабря 1936 г. в Саратове, в 1954 г. окончил с золотой медалью среднюю школу № 18 в Саратове, а 1959 г. – физический факультет Саратовского государственного университета им. Н.Г. Чернышевского по специальности «Радиоэлектроника», получил квалификацию «физик – исследователь». Окончил аспирантуру СГУ по кафедре радиофизика.*

*Защитил в СГУ кандидатскую диссертацию по специальности «Электронная техника и приборы» и докторскую диссертацию в ЛЭТИ по специальности «Электротермические процессы и установки».*

*В СПИ – СГТУ работает с сентября 1968 г. С 1968 г. по 1980 г. – доцент кафедры электроники, с 1980 г. по 1982 г. – заведующий кафедрой автоматизированных систем управления. С 1982 г. по 1992 г. – заведующий кафедрой электроснабжения промышленных предприятий, в 1992 г. создал кафедру автоматизированных электротехнологических установок и систем и заведовал ею до февраля 2011 г., с 2011 г. по 2015 г. – профессор кафедры автоматизированных электротехнологических установок и систем, с сентября 2015 г. по ноябрь 2016 г. – профессор кафедры электроснабжения промышленных предприятий. С 1990 г. по 1997 г. – проректор по учебной работе СГТУ.*

*Научные труды по теории установок СВЧ диэлектрического нагрева, математическому моделированию технологических процессов СВЧ электротермических установок, электродинамике и технике СВЧ, тепломассопереносу в СВЧ электромагнитном поле, метрологии и измерениям на СВЧ и в СВЧ электротехнологических установках, нетепловой СВЧ модификации полимеров, технико – экономической оптимизации СВЧ электротехнологического оборудования и теории тепловых шумов электровакуумных приборов.*

*Один из основоположников отечественной СВЧ электротехнологии.*

С Юрием Сергеевичем Архангельским я познакомился в январе 1994 года во время служебной командировки на ПО «Тантал».

Но услышал о нем от И.А. Рогова в Москве еще в 1993 году, приехав в командировку, чтобы познакомиться с советскими учеными, которые создали научное направление: «Использование энергии СВЧ в народном хозяйстве». Среди них были академик Н.Д. Девятков, П.Ф. Бородин, И.И. Девяткин, И.А. Рогов, С.В. Некрутман и другие. Именно И.А. Рогов обратил мое внимание на то, что среди первых ученых, которые разрабатывали теорию моделирования СВЧ нагрева, рекомендации и правила проектирования СВЧ установок, был Ю.С. Архангельский.

Общение с Ю.С. Архангельским привело меня к решению, что использование СВЧ и КВЧ техники в технологии является очень перспективным.

В Казани я подал представление ректору КАИ о преобразовании Отраслевой лаборатории Минрадиопрома СССР при КАИ в научно-исследовательский центр прикладной электродинамики (НИЦ ПРЭ). Приказ был издан, и я был назначен его директором – научным руководителем.

Книги и научные труды, подаренные Ю.С. Архангельским, убедили меня в том, что Саратовский куст исследователей и разработчиков реальной аппаратуры и комплексов СВЧ в то время был очень силен.

Следствием встреч в Москве и Саратове стало проведение в мае 1995 г. в Казани первой Всероссийской конференции «Микроволновые технологии в народном хозяйстве». В конференции приняли участие специалисты по антеннам СВЧ из Москвы, Таганрога, Свердловска, Харькова, Владимира, Минска, Саратова и Казани.

Примечательно, что путь, пройденный Ю.С. Архангельским за эти годы, был тернист, но достигнутые им результаты вызывают у нас восхищение его талантом и трудолюбием.

Приведу лишь краткий обзор сделанного им:

- сформулирована и решена самосогласованная задача электродинамики и тепломассопереноса, а на ее базе разработаны способы синтеза рабочих камер и математического моделирования технологических процессов с использованием СВЧ энергии;

- позднее эта задача была дополнена уравнениями термомеханики, что дало возможность рассчитывать разрушение диэлектриков в СВЧ электромагнитном поле;

- затем эта задача была дополнена технико-экономической оптимизацией структуры и элементной базы СВЧ электротехнологического оборудования;

- был предложен новый класс рабочих камер – камеры с бегущей волной и разработаны методы расчета оптимальных камер этого типа;

- была предложена терминологическая база СВЧ электротермии;

- разработаны методы и средства измерений в СВЧ электротермии (СВЧ электротехнологии);

- разработана теория камер лучевого типа с рупорными излучающими системами;

- высказана и доказана гипотеза о наличии так называемой нетепловой модификации полимеров;

- начата разработка социального аспекта СВЧ электротехнологии.

Издано 20 книг, в том числе учебник с грифом «Установки сверхвысокочастотного диэлектрического нагрева» и справочник по гранту РФФИ «Справочная книга по СВЧ электротермии». Статьи и патенты уже не считаю.

Вызывает восхищение служение Ю.С. Архангельского своему университету, которое у всех на виду: руководство тремя кафедрами, в том числе и созданной им кафедрой «Автоматизированные электротехнологические установки и системы», проректор по учебной работе, создатель научной школы СВЧ электротехнологов России с официальным номером НИИ 9553.2006.8., которая остается единственной в СГТУ г. Саратове и Нижнем Поволжье.

И поздравляя Юрия Сергеевича с юбилеем, провозглашаю СЛАВА ДОСТОЙНЫМ!.

*Г.А. Морозов, д.т.н., профессор, г. Казань.*

## Кто Вы, Юрий Сергеевич?

**«ВЭ»** Юрий Сергеевич! Редакция журнала «Вопросы электротехнологии» поздравляет Вас с юбилейным днем рождения и просит ответить на наши вопросы.

**Ю.С.А.** Спасибо большое. Спрашивайте. Попробую ответить.

**«ВЭ»** Юрий Сергеевич, Вы работали в метрологическом отделе НИИ электронной промышленности, в СПИ-СГТУ на кафедрах электроники, автоматизированных систем управления, электроснабжения промышленных предприятий, автоматизированных электротехнологических установок и систем. Так это же разные специальности! Метрология, электроника, системы управления, электроснабжение, электротехнология. Вы кто, Юрий Сергеевич?

**Ю.С.А.** Физик.

**«ВЭ»** А на каких еще кафедрах могли бы работать физики? Вот Вы, например.

**Ю.С.А.** Я? ... Разве что на кафедрах физики, математики, теоретических основ электротехники, метрологии и измерений, материаловедения... Не удивляйтесь. Нас так в те годы учили... В 90-е кто-то из физиков ушел в бизнес, а кто-то стал банкиром... Когда я прохожу мимо корпуса физфака СГУ, я с большой теплотой и благодарностью вспоминаю о своих преподавателях.

**«ВЭ»** Во всех этих переходах с одного места работы на другое насколько Вы были свободны в принятии решения? Или это были добровольно-принудительные, как говорится, решения? Как обстоятельства повлияли на принимаемые Вами решения?

**Ю.С.А.** В повседневной жизни в том или иной мере те или иные обстоятельства всегда оказывают влияние на принимаемое решение. Без этого влияния разве может родиться интерес к чему-нибудь? Например, в школе я заинтересовался устройством самолетов, а окончив школу, сказал родителям, что хочу стать авиаконструктором. «Решай сам. Тебе придется уехать в Москву. Мама без тебя изведется», – ска-

зал отец. И я решил поступать СГУ на физический факультет.

**«ВЭ»** А почему не в Саратовский политехнический институт?

**Ю.С.А.** Может быть предчувствовал, что в СПИ придется переходить с кафедры на кафедру, а потому надо стать физиком (смеется).

Когда написал докторскую диссертацию по, как тогда говорили, СВЧ нагреву, ректор А.И. Андрущенко предложил мне перейти с кафедры электроники на соседнюю кафедру АСУ на должность заведующего кафедрой. Когда защитил в ЛЭТИ диссертацию, ректор, не дожидаясь решения ВАК, предложил должность заведующего кафедрой ЭПП на энергетическом факультете. У этих кафедр в те годы были проблемы, ректор поставил передо мной конкретные задачи, речь шла о интересах СПИ, и я не мог не согласиться на эти переходы. В чем - то мое решение можно назвать добровольно-принудительным, но в результате я получил опыт административной работы, и новый, избранный коллективом ректор В.В. Петров предложил мне работу проректором по учебной работе.

**«ВЭ»** За годы Вашей работы в ректорате СПИ получил статус технического университета, была проведена реформа гуманитарного образования, вуз перешел на новые учебные планы, отвечающие ГОС первого поколения, была открыта первая в СГТУ гуманитарная специальность «Социальная работа», ряд новых технических специальностей и соответствующих выпускающих кафедр, в том числе специальность и кафедра «Автоматизированные электротехнологические установки и системы». Но Вы по собственному желанию ушли из ректората. Почему?

**Ю.С.А.** В середине 1996 г. неожиданно выяснилось, что по одному принципиальному вопросу у нас с ректором разные взгляды. До конца года найти выход из

создавшейся ситуации не удалось, и в начале 1997 г. я подал заявление с просьбой освободить меня от обязанностей проректора по учебной работе. С сентября 1997 г. круг моих административных обязанностей сузился до обязанностей заведующего кафедрой АЭУ.

**«ВЭ»** В 2011 г. Вы по собственному желанию оставили должность заведующего кафедрой АЭУ, а летом 2015 г. вернулись профессором на кафедру ЭПП.

**Ю.С.А.** Реформы высшей школы в нашем вузе я принимал близко к сердцу, оно и не выдержало. Врачи посоветовали избегать стрессовых ситуаций. Но лишившись административного ресурса, я вдруг обнаружил, что одного научного авторитета недостаточно, чтобы выполнять намеченное, и я вернулся на кафедру ЭПП.

**«ВЭ»** Юрий Сергеевич, а как Вы пришли в СВЧ электротехнологию?

**Ю.С.А.** Вы не поверите, из-за начального интереса к самолетам. Поступив в СГУ, я для специализации выбрал кафедру радиофизики. Раз уж не буду строить самолеты, займусь радиолокацией, чтобы наблюдать за их полетами. Представьте себе, на пятом курсе в списке тем дипломных работ, предложенных нам, я нашел тему из одного саратовского НИИ, в которой речь шла о распространении электромагнитной волны над водой. Так это же дальняя радиолокация! Я выбрал эту тему и только на преддипломной практике в НИИ узнал, что речь идет о распространении электромагнитной волны в волноводе, частично заполненном слоем проточной воды, то есть о расчете широкополосной согласованной нагрузки калориметрического ваттметра для измерения наибольшей в те годы СВЧ мощности. Так впервые я столкнулся с задачей нагрева диэлектрика в электромагнитном поле, но не для термообработки, а для измерений и метрологии. Ведь СВЧ калориметрические ваттметры используются как эталоны измерителей мощности.

Тема захватила меня, и я попросил распределить меня на работу в тот самый НИИ. После защиты кандидатской диссер-

тации в НИИ у меня осталась метрологическая тематика, а мне хотелось расширить исследования по нагреву диэлектриков в СВЧ электромагнитном поле, и я перешел на кафедру электроники СПИ. На одном из саратовских заводов в то время разрабатывали первый отечественный СВЧ пастеризатор молока в потоке. Меня привлекли к этой работе, я заменил в моей согласованной нагрузке воду на молоко, и ваттметр превратился в СВЧ пастеризатор.

В ту пору работающих в области СВЧ нагрева было немного, раз в месяц все собирались на семинаре у д.т.н., профессора И.А. Рогова в Московском технологическом институте мясной и молочной промышленности. Я познакомился там с И.И. Девяткиным, первым защитившим докторскую диссертацию по СВЧ нагреву. В СПИ была создана при кафедре электронике научная лаборатория с десятью штатными сотрудниками, ставшая вскоре одной из наиболее доходных в те годы в СПИ научных подразделений, работающих по хозяйственным договорам с промышленными предприятиями Саратова, Москвы, Подмосковья. О наших работах в области СВЧ электротермии стало известно, о СПИ заговорили как об институте с глубокими исследованиями в области СВЧ электротермии.

**«ВЭ»** Каковы Ваши основные результаты исследований в области СВЧ электротехнологии?

**Ю.С.А.** Сформулирована и решена самосогласованная краевая задача электродинамики и тепломассопереноса. Разработаны методы анализа и синтеза оптимальных рабочих камер СВЧ электротермических установок, математического моделирования таких технологических процессов в СВЧ электромагнитном поле, как нагрев, сушка, пастеризация и стерилизация в периодическом и методическом режимах. Предложен новый тип рабочих камер – камеры с бегущей волной на прямоугольном, круглом и коаксиальном волноводах, частично заполненных обрабатываемым диэлектриком. Построены теоретические основы проектирования СВЧ электротер-



мических установок на камерах с бегущей волной, камерах лучевого типа, гибридных камерах. Разработаны принципы технико-экономической оптимизации элементной базы и структуры СВЧ электротермических установок. Доказана нетепловая СВЧ модификация полимеров и разработаны методы расчета рабочих камер для такой модификации.

Наконец, удалось создать достаточно полную термодинамическую базу СВЧ электротехнологии.

**«ВЭ»** Какие из Ваших публикаций Вам наиболее дороги?

**Ю.С.А.** Все мои книги мне по-своему дороги. Первую книгу «Применение тонких поглощающих пленок в измерительной технике СВЧ» я написал с В.А. Коломейцовым в 1975 г. В ней изложена теория цилиндрических пленочных резисторов с естественным и принудительными водяными охладителями. Недавно мне понадобились некоторые сведения из этой книги, я увлекся, прочитал ее всю и чуть было не вернулся к работе в области метрологии и измерений.

В 1983 г. вышла в свет наша с И.И. Девяткиным книга «Сверхвысокочастотные нагревательные установки для интенсификации технологических процессов». В ней изложена постановка и решение краевая задача электродинамики и тепломассопереноса, приведены конструкции СВЧ электротермических установок.

Книгу «СВЧ электротермия» я начал писать еще до работы в ректорате, но потом был большой перерыв, и вышла она в свет лишь в 1998 г. Ее я чаще всего предлагаю прочитать студентам и аспирантам, потому что в ней изложены теоретические основы СВЧ электротермии.

В 2000-е годы вышли в свет девять книг. Среди них книга, написанная с С.В. Тригорлым «СВЧ электротермические установки лучевого типа», в которой сформулирована краевая задача электродинамики, тепломассопереноса и термомеханики. В книге «Эффективность электротехнологических установок», написанной с В.А. Толстовым, рассмотрены вопросы

энергетической и экономической эффективности СВЧ электротермических установок и их проектирования на базе технико-экономических оптимизационных процедур. Вопросы измерений в СВЧ электротехнологии рассмотрены в книге «Измерения в СВЧ электротехнологических установках», написанной с С.Г. Калгановой и Р.К. Яфаровым, и в книге «Измерения в СВЧ электротехнологии», написанной с С.Г. Калгановой.

Наконец, с 2010 г. вышли в свет учебник с грифом УМО «Установки сверхвысокочастотного диэлектрического нагрева», «Справочная книга по СВЧ электротермии», изданная при финансовой поддержке ФФИ, книга «Ущерб и резервирование в СВЧ электротермии» написанная совместно с А.В. Доценко. В книге «СВЧ модификация полимеров» написанной совместно с Е.М. Гришиной, В.А. Лаврентьевым, С.К. Слепцовой, показано наличие так называемой нетепловой СВЧ модификации.

**«ВЭ»** А какие книги планируете издать?

**Ю.С.А.** Идет редактирование книги «Технико-экономический и социальный аспекты электротехнологии» написанной совместно с Е.В. Колесниковым, и книги «Камеры лучевого типа», написанной с С.В. Тригорлым, серии «СВЧ электротехнология».

**«ВЭ»** В №3 и №4 за 2014 г. и в №1 за 2015 г. в нашем журнале Вы опубликовали свою работу «История СВЧ электротехнологии». Не собираетесь написать книгу на эту тему?

**Ю.С.А.** Я пытался, все, что получилось, изложено у Вас. Для написания книги нужно собирать и систематизировать материал, нужны командировки в Москву, Подмосковье, Харьков, Казань. Я пытался найти молодого историка, кто написал бы на эту тему кандидатскую диссертацию. И тут один из сотрудников нашего университета, историк, предложил мне написать мемуары и дал прочитать книгу профессора Н.А. Троицкого «Книга о любви (записки историка)». Я прочитал

ее на одном дыхании, долго был под впечатлением от прочитанного. Как он пишет о своей любви к истории, СГУ, Саратову! Как корректно и в то же время свободно пишет о людях, с которыми его сводила судьба. И я написал «Книгу о любви (записки физика)».

«ВЭ» И какова рукопись?

Ю.С.А. В ладонь.

«ВЭ» Кто-нибудь читал?

Ю.С.А. В издательстве...

«ВЭ» СГТУ?

Ю.С.А. Нет. И один мой давний товарищ.

«ВЭ» И что они Вам сказали?

Ю.С.А. В издательстве согласились книгу издать, а товарищ, возвращая рукопись спросил, когда выйдет в свет моя книга.

«ВЭ» И когда?

Ю.С.А. Я все время что-то добавляю, сокращаю, переписываю.

«ВЭ» Юрий Сергеевич, а сколько у Вас учеников?

Ю.С.А. Кафедры, где я работал, выпустили несколько тысяч инженеров, специалистов, бакалавров и магистров. С моим участием написаны и защищены четыре докторских и шестнадцать кандидатских диссертаций. В двух докторских и пятнадцати кандидатских диссертациях я был научным консультантом и руководителем. Немного. Но при переходе с кафедры на кафедру я терял время на создание научной лабораторной базы и научного коллектива. На этом я потерял лет пятнадцать.

«ВЭ» Кто из Ваших учеников добился наибольших успехов?

Ю.С.А. Вячеслав Александрович Коломейцев и Евгений Владимирович Колесников. С В.А. Коломейцевым я познакомился на осенних сельскохозяйственных работах, на которые меня, аспиранта, направляли во главе отряда перешедших на второй курс студентов кафедры радиотехники СГУ. Веселым, остроумным, работоспособным был студент Коломейцев. Я ему тогда предложил, когда начнет заниматься научной работой, обратиться к моему научному руководителю А.И. Шты-

рову.

В.А. Коломейцев стал аспирантам СПИ. Сейчас он доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, создал в СГТУ кафедру «Радиотехника», был ее заведующим, сейчас работает на ней профессором.

С Е.В. Колесниковым я познакомился, перейдя на кафедру ЭПП. Он только что окончил эту кафедру и работал на ней ассистентом. Он активно включился в исследования в области СВЧ электротехнологии и скоро защитил кандидатскую диссертацию по теории и конструкции вертикальных СВЧ сушилок сыпучих материалов. В работе он был активным и находчивым. Помню, у нас возникли трудности с расчетом движения сыпучих материалов под действием силы тяжести трубах и бункерах. Когда с этой проблемой справились, встал вопрос об экспериментальной проверке расчетов. Е.В. Колесников использовал для этих целей киносъемку движения окрашенных в разный цвет слоев сыпучего материала по стеклянным трубам. Пленки проявлялись и отснятые кадры проецировались на большой экран, и Е.В. Колесников с помощью линейки и секундомера определял параметры движения сыпучего материала. На эти эксперименты приходили посмотреть коллеги с соседних кафедр. Перейдя на работу на производство, Е.В. Колесников продолжил сотрудничество с кафедрой АЭУ и написал докторскую диссертацию о технико-экономических расчетах в СВЧ электротермии, энергосбережении и энергоаудите. Сейчас у него ответственная работа в Москве.

«ВЭ» А есть среди Ваших учеников такие, кто не оправдал Ваших надежд.

Ю.С.А. Есть.

«ВЭ» Юрий Сергеевич, а что ждет СВЧ элекротехнологию? В 70е-80е годы это научно-техническое направление бурно развивалось, а с началом 90-х заказов на НИР и ОКР практически не стало, многие научные группы в вузах распались, лаборатории в ОКБ закрылись или были перепрофилированы. И хотя в 2006 году Ваша научная школа была признана ведущей на-

учной школой РФ в области инженерных и технических наук, что ждет СВЧ электро-технологию?

**Ю.С.А.** Да, с началом 90-х годов спрос на СВЧ электротехнологические установки упал из-за высоких цен на источники СВЧ энергии. Жалко, однако в нашем вузе продолжает работать школа В.А. Коломейцева, начались работы в области СВЧ электротехнологии на кафедре ТММ. Я вернулся на кафедру ЭПП. Что касается научного коллектива, для успеха нужны молодые, предприимчивые люди. Сейчас у ме-

ня работает аспирант А. Федоров, в следующем году собирается поступать в аспирантуру студентка В. Юдина. У нее уже есть план кандидатской диссертации, публикации. Дай Бог удачи молодым людям, и СВЧ электротехнология не пропадет.

**«ВЭ»** Юрий Сергеевич, Вы верующий?

**Ю.С.А.** Мой дед и прадед были священниками, а я – физик.

**«ВЭ»** Спасибо, Юрий Сергеевич, за ответы. Желаем Вам здоровья и успехов во всех Ваших делах.



## К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ

Приглашаем к сотрудничеству ученых, преподавателей, сотрудников научных коллективов кафедр и лабораторий вузов, научно-исследовательских институтов, аспирантов, студентов, руководителей промышленных предприятий, разработчиков новой продукции, инвесторов, представителей органов власти.

По вопросам публикации статей в научно-техническом журнале «Вопросы электротехнологии» обращаться по телефонам:

8 (8452) 99-87-63 — Архангельский Юрий Сергеевич (главный редактор),

8 (937) 224-08-05 — Вырыханов Денис Александрович (ответственный секретарь).

Просьба направлять публикации по адресу:

Россия, 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77, ком. 1/133а, гл. редактору журнала «Вопросы электротехнологии» Архангельскому Ю.С. и по электронной почте [eltech@sstu.ru](mailto:eltech@sstu.ru).

### Требования к оформлению публикаций

Печатный вариант публикации предоставляется объемом до 10 стр. формата А4; поля: сверху и снизу по 25 мм, справа и слева по 20 мм, через одинарный интервал, шрифт Times New Roman 12, абзацный отступ 0,63 см, формат файла \*.doc, редактор Microsoft Word 2003.

Иллюстрации (рисунки, графики) выполняются в формате .jpg, располагаются в тексте статьи и должны иметь номер и подпись. Рисунки и фотографии должны иметь контрастное изображение.

Таблицы располагаются непосредственно в тексте статьи. Каждая таблица должна иметь номер и заголовок.

Формулы и буквенные обозначения величин должны быть набраны в редакторе формул **Microsoft Equation 3.0** и иметь нумерацию.

Размерность всех величин, принятых в статье, должна соответствовать Международной системе единиц измерений (СИ). Не следует употреблять сокращенных слов, кроме общепринятых (т.е., и т.д., и т.п.). Допускается введение предварительно расшифрованных сокращений.

**ОБЯЗАТЕЛЬНО** наличие индекса УДК и списка использованных источников, оформленного по ГОСТ 7.1-2003 и включающего: фамилию и инициалы автора, название статьи, название журнала, том, год, номер или выпуск, страницы, а для книг — фамилии и инициалы авторов, точное название книги, место издания (город), издательство, год издания, количество страниц.

Также предоставляется информация об авторах (**ФИО полностью, почетные звания, ученая степень, ученое звание, должность, место работы, телефон, e-mail**), название статьи, аннотация и ключевые слова. Данная информация дублируется на **английском языке**.

Специалисты в технических и естественнонаучных отраслях к публикации **ОБЯЗАТЕЛЬНО** прилагают экспертное заключение.

Публикации принимаются в течение всего года.

Публикации, не отвечающие перечисленным требованиям, к рассмотрению не принимаются. Рукописи и электронные носители авторам не возвращаются.

Редакция оставляет за собой право производить редакционные изменения, не искажающие основное содержание статьи.

За дополнительной информацией обращайтесь на сайт журнала «Вопросы электротехнологии» [www.sstu.ru/nauka/nauchnye-izdaniya/voprosy-elektrotekhnologii](http://www.sstu.ru/nauka/nauchnye-izdaniya/voprosy-elektrotekhnologii)

Редактор Л.А. Скворцова  
Компьютерная верстка – В.И. Ермолаев  
Перевод на английский язык – А.Х. Аскарова

---

Почтовый адрес: 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77  
Телефон: (8452) 99-87-63  
E-mail: eltech@sstu.ru

---

Подписано в печать \_\_.\_\_.2016  
Формат 60×84 1/8 Бум. офсет.  
Усл. печ. л. 11,5 Уч. изд. л. 5,1  
Тираж 500 экз. Заказ 121 Цена свободная  
Отпечатано в Издательстве СГТУ, 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77.  
E-mail: izdat@sstu.ru  
Полная электронная версия журнала размещена в системе РИНЦ  
в открытом доступе на платформе eLIBRARY.RU  
**Подписной индекс 70841** (каталог «Газеты. Журналы» на 2-е полугодие 2016 г.)  
Свидетельство о регистрации СМИ *ПИ № ФС77-54621 от 01.07.2013*

---

Editor L.A. Skvortsova  
Computer-assisted layout by V.I. Ermolaev  
Translation into English by A.H. Askarova

---

Address: 77 Politekhnikeskaya Str., 410054, Saratov, Russia  
Tel.: (8452) 99-87-63  
E-mail: eltech@sstu.ru

---

Print date: \_\_.\_\_.2016  
Paper size: 60×84 1/8 Offset-Print  
Conventional printed sheet 11,5 Publication base sheet 5,1  
Circulation: 500 printed copies Order 121 Subscription and individual copies: open rates  
Published by SSTU Publishing, 410054 Saratov, 77 Politekhnikeskaya Str.  
Online at [www.eLIBRARY.RU](http://www.eLIBRARY.RU)  
The certificate of media source registration: *PI No. FS77-54621 dated 1 July 2013*

