



ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА

СЕРИЯ 1

СВЧ - ТЕХНИКА

ВЫПУСК 1 (548)

2021

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА

СЕРИЯ 1

СВЧ-ТЕХНИКА

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СБОРНИК

Выпуск 1(548)

2021

Издается с 1950 г.

Главный редактор

д.т.н. А.А. Борисов

Редакционная коллегия:

к.т.н. **С.В. Щербаков** (*зам. главного редактора*);
к.т.н. **С.А. Зайцев** (*зам. главного редактора*);
к.ф.-м.н. **А.В. Галдецкий**; д.т.н. **П.В. Куприянов**;
д.т.н. **Н.А. Лябин**; д.ф.-м.н. **С.П. Морев**;
д.ф.-м.н. **А.И. Панас**;
д.ф.-м.н. **А.Б. Пашковский**; д.т.н. **К.Г. Симонов**;
В.П. Стебунов (*ответственный секретарь*);
к.т.н. **С.Б. Александров**, АО «ГЗ «Пульсар», г. Москва;
д.т.н. **Л.И. Бабак**, ТУСУР, г. Томск;
д.т.н. **А.В. Баранов**, АО «НПП «Салют», г. Нижний Новгород;
к.ф.-м.н. **В.Н. Вьюгинов**, АО «Светлана-Электронприбор», г. Санкт-Петербург;
д.ф.-м.н. **К.С. Журавлев**, ИФП СО РАН, г. Новосибирск;
д.т.н. **В.М. Исаев**, АО «Российская электроника», г. Москва;
к.т.н. **П.П. Куцько**, АО «НИИЭТ», г. Воронеж;
д.т.н. **И.Е. Лысенко**, ИНЭП ИТА ЮФУ, г. Таганрог;
д.т.н. **П.П. Мальцев**, ИСВЧ ПЭ РАН, г. Москва;
д.ф.-м.н. **А.В. Медведь**, ФИРЭ РАН, г. Фрязино;
к.т.н. **В.М. Миннебаев**, АО «НПП «Пульсар», г. Москва;
к.ф.-м.н. **В.И. Роговин**, АО «НПП «Алмаз», г. Саратов;
д.ф.-м.н. **Д.А. Усанов**, «СГУ им. Н.Г. Чернышевского», г. Саратов;
к.т.н. **А.Ю. Ющенко**, АО «НИИПП», г. Томск

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (регистрационный номер ПИ № ФС 77-73640 от 7 сентября 2018 г.).

Решением Президиума Высшей аттестационной комиссии Министерства образования и науки Российской Федерации журнал «Электронная техника», серия 1 «СВЧ-техника», издаваемый АО «НПП «Исток» им. Шокина» с 1950 года, включен в «Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней кандидата и доктора наук».

© АО «НПП «Исток» им. Шокина», 2021 г.

ELEKTRONNAYA TEKHNIKA

(Electronic Engineering)

SERIES 1

SVCH-TEKHNIKA

(Microwave Engineering)

COLLECTION OF RESEARCH & TECHNICAL ARTICLES

Issue 1(548)

2021

Founded in 1950

Editor-in-chief

D.T.Sc. **A.A. Borisov**

Editorial staff:

C.T.Sc. **S.V. Scherbakov** (deputy editor-in-chief);
C.T.Sc. **S.A. Zaitsev** (deputy editor-in-chief);
C.Ph.M.Sc. **A.V. Galdetsky**; D.T.Sc. **P.V. Kupriyanov**;
D.T.Sc. **N.A. Lyabin**; D.Ph.M.Sc. **S.P. Morev**;
D.Ph.M.Sc. **A.I. Panas**;
D.Ph.M.Sc. **A.B. Pashkovsky**; D.T.Sc. **K.G. Simonov**;
V.P. Stebunov (executive secretary);
C.T.Sc. **S.B. Alexandrov**, JSC «SP «Pulsar», Moscow;
D.T.Sc. **L.I. Babak**, TUSUR, Tomsk;
D.T.Sc. **A.V. Baranov**, JSC «SPE «Salut», Nizhny Novgorod;
C.Ph.M.Sc. **V.N. Vyuginov**, JSC «Svetlana-Elektronpribor», St. Petersburg;
D.Ph.M.Sc. **K.S. Zhuravlev**, IPh SB RAS, Novosibirsk;
D.T.Sc. **V.M. Isaev**, JSC «Russian Electronics», Moscow;
C.T.Sc. **P.P. Kutsko**, JSC «NIIET», Voronezh;
D.T.Sc. **I.E. Lysenko**, INEP ITA SFU, Taganrog;
D.T.Sc. **P.P. Maltsev**, IMWF SE RAS, Moscow;
D.Ph.M.Sc. **A.V. Medved'**, IRE RAS, Fryazino;
C.T.Sc. **V.M. Minnebaev**, JSC «RPC «Pulsar», Moscow;
C.Ph.M.Sc. **V.I. Rogovin**, JSC «RPC Almaz», Saratov;
D.Ph.M.Sc. **D.A. Usanov**, «SSU named after N.G. Chernyshevsky», Saratov;
C.T.Sc. **A.Yu. Yuschenko**, JSC «NIIPP», Tomsk

The journal is registered by the Federal Service for supervision in the field of communications, information technologies and mass media (certificate III № ФС 77-73640 dated September 7, 2018).

By the Resolution of the Presidium of the Higher Attestation Commission of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation the journal «Elektronnaya Tekhnika», series 1 «SVCH-tekhnika» being published in JSC «RPC «Istok» named after Shokin» since 1950, has been included into the «List of reviewed scientific publications in which the principal scientific results nominated for candidate's thesis and doctoral thesis must be published».

© Joint Stock Company «Research and Production Corporation «Istok» named after A.I. Shokin», 2021

СОДЕРЖАНИЕ

Электровакuumные приборы

Калина В.Г., Будзинский Ю.А. – Циклотронное защитное устройство. Построение 3D-резонатора секции ЦЗУ, двухзвенной фильтрующей системы с заданной полосой частот..... 6

Медведков И.П., Роговин В.И., Семенов С.О. – Математическое моделирование распространения шумовых сигналов в лампах бегущей волны методом крупных частиц..... 20

Катоды и материалы

Капустин В.И., Ли И.П., Шуманов А.В., Москаленко С.О. – Применение спектроскопии потенциалов появления при исследовании материалов для катодов СВЧ-приборов..... 34

Медицинская электроника

Казаринов К.Д., Полников И.Г. – Микроволновое излучение способно стимулировать движение внутриклеточной жидкости..... 45

Краткие сообщения

Балыко А.К., Терешкин Е.В., Балыко И.А. – «Непростые» простые числа..... 53

Экономика

Мамонтова Е.В. – Система управления отходами на промышленном предприятии..... 60

История

Балыко А.К., Балыко Т.А. – Вместе с «Истоком»..... 66

CONTENTS

Electrovacuum devices

- Kalina V.G., Budzinsky Yu.A.* – Cyclotron protective device. Construction of a 3D resonator of a CPD section, a two-link filtering system with a preset frequency band..... 6
- Medvedkov I.P., Rogovin V.I., Semenov S.O.* – Mathematical modeling of the propagation of noise signals in traveling wave tubes by the method of large particles..... 20

Cathodes and materials

- Kapustin V.I., Li I.P., Shumanov A.V., Moskalenko S.O.* – Application of the appearance potentials spectroscopy in studying the materials for cathodes of microwave devices..... 34

Medical electronics

- Kazarinov K.D., Polnikov I.G.* – Microwave radiation is able to stimulate the motion of intracellular fluid..... 45

News in brief

- Balyko A.K., Tereshkin E.V., Balyko I.A.* – «Non-simple» prime numbers..... 53

Economics

- Mamontova E.V.* – Waste management system at an industrial enterprise..... 60

History

- Balyko A.K., Balyko T.A.* – Together with «Istok»..... 66

ЭЛЕКТРОВАКУУМНЫЕ ПРИБОРЫ

УДК 621.385.6

ЦИКЛОТРОННОЕ ЗАЩИТНОЕ УСТРОЙСТВО.

Построение 3D-резонатора секции ЦЗУ,
двухзвенной фильтрующей системы с заданной полосой частот

В. Г. Калина, Ю. А. Будзинский

АО «НПП «Исток» им. Шокина», г. Фрязино

Приведены методика расчёта, формулы и пример построения по модели двухзвенного полосового фильтра нагруженного сопротивлением электронного луча 3D-резонатора циклотронного защитного устройства с заданной полосой пропускания. Погрешность исполнения заданной полосы пропускания – менее 1 %.

КС: защита СВЧ приёмных устройств, циклотронный резонанс, двухзвенный полосовой фильтр, компьютерное 3D электромагнитное моделирование

CYCLOTRON PROTECTIVE DEVICE.

Construction of a 3D resonator of a CPD section,
a two-link filtering system with a preset frequency band

V. G. Kalina, Yu. A. Budzinsky

JSC «RPC «Istok» named after Shokin», Fryazino

The method of calculation, formulas and an example of constructing a 3D-resonator of a cyclotron protective device of the preset pass band according to the model of a two-link pass band filter loaded with electron beam resistance are presented. The error of the preset pass band is less than 1%.

Keywords: protection of microwave receivers, cyclotron resonance, two-link band pass filter, computer 3D electromagnetic modeling

1. ВВЕДЕНИЕ

Циклотронные защитные устройства (ЦЗУ) существенно превосходят твердотельные устройства по допустимой мощности входного СВЧ-импульса и газоразрядные защитные устройства по времени восстановления параметров после окончания импульса.

ЦЗУ с характеристикой двухзвенного полосового фильтра отличаются необходимой для серийных устройств компактностью и простотой настройки.

В статье приведена методика построения 3D-резонатора ЦЗУ, нагруженного сопротивлением электронного луча, как двухзвенного полосового фильтра с остро пульсирующей характеристикой.

Даны две группы формул расчёта LCR- и 3D-модели резонатора с электронным лучом по до-

пустимому коэффициенту стоячей волны. Ведущий параметр расчёта – полоса пропускания системы либо резонансное сопротивление циклотронных колебаний луча.

Построение 3D-резонатора опирается на расчёт исходной двухзвенной LCR-модели, элементы которой учитывают характеристическое сопротивление содержащего цепь связи с внешним трактом резонатора и ограничения по величине тока, напряжения, полосы частот, КСВН.

2. КОНСТРУКЦИЯ РЕЗОНАТОРА

Конструкция и принцип действия ЦЗУ изложены в ряде работ, например в статье [1].

Напомним кратко о структуре ЦЗУ. Устройство построено в виде двух отдельных секций – объёмных резонаторов, через которые протекает электронный луч.

Один из резонаторов соединён коаксиальной линией с антенным трактом, другой – с приёмным устройством. Секция ЦЗУ, относящаяся к антенному тракту, связана со второй секцией электронным лучом, проходящим через отрезок миниатюрного волновода, предельная частота которого многократно больше рабочей частоты.

Электронный луч находится в продольном статическом магнитном поле, определяющем частоту циклотронных колебаний луча.

3D-резонатор и циклотронные колебания луча, как связанные параллельный и последовательный резонаторы, образуют двухзвенную резонансную систему, определяющую частотную характеристику секции и ЦЗУ.

Принимаемые сигналы малой мощности беспрепятственно передаются через секции электронным лучом к приёмному устройству, за вычетом малых потерь на отражение и в металле проводников.

Мощные сигналы разрушают электронный луч и к приёмному устройству поступают глубоко ослабленными, проходя через отрезок миниатюрного волновода с высокой предельной частотой.

Секции ЦЗУ выполнены на основе резонатора Куччия – цилиндрического резонатора, по диаметру которого расположены две ламели. Торцы ламелей образуют ёмкостный зазор, в котором электронный луч взаимодействует с электрическим полем сигнала.

Одна из двух ламелей резонатора соединена S-образным проводником с центральным проводником коаксиальной линии внешнего тракта (рис. 1).

Ведущие электрические параметры резонатора ЦЗУ: характеристическое сопротивление и частота резонанса – определяются диаметром и длиной резонатора, размерами ламелей, формой и величиной зазора между ламелями.

Размеры зазора устанавливают исходя из условий связи луча с резонатором и характеристического сопротивления резонатора.

Сопротивление резонатора зависит от размеров ламелей и формы перехода от ламелей к зазору, влияющей как на индуктивность, так и на ёмкость рассеяния ламелей.

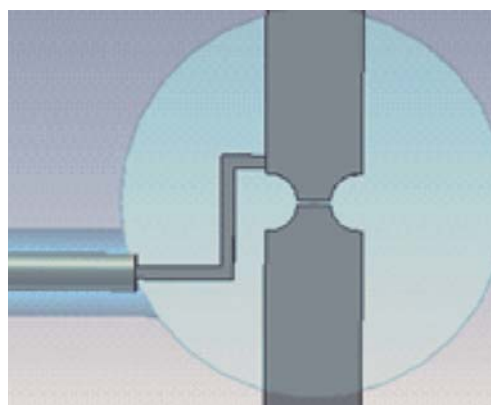


Рис. 1. Структура резонатора

3. ФОРМУЛЫ РАСЧЁТА LCR-МОДЕЛИ СЕКЦИИ ЦЗУ

Расчёт секции ЦЗУ в виде LCR-модели двух- или трёхзвенного полосового фильтра с остро пульсирующей частотной характеристикой КСВН представлен в ряде публикаций авторов, например в статье [2]. Расчёт базируется на ряде формул, определяющих элементы и частотные характеристики модели, ток и напряжение ускорения электронного луча. Задача расчёта – определение условий построения и возможности реализации 3D-секции с необходимыми параметрами.

Ниже даны две систематизированные группы формул расчёта LCR-модели секции как двухзвенной фильтрующей системы, исходя из работы [2]. Построение модели, с наглядной оценкой предстоящего результата непосредственно по формулам, опирается на выбранный параметр – сопротивление циклотронных колебаний электронного луча либо полоса пропускания системы, с указанием в обоих случаях максимально допустимого значения КСВН в пределах полосы.

Вещественное сопротивление электронного луча и полоса пропускания системы связаны соотношением [2]:

$$R_c = 2\pi f_0 \rho_v \frac{\delta}{\Delta F}, \quad (1a)$$

$$\Delta F = \frac{2\pi f_0 \delta}{R_c} \rho_v, \quad (1б)$$

где R_c – сопротивление электронного луча при циклотронном резонансе, Ом; f_0 – центральная частота полосы пропускания, Гц; $\rho_v = \sqrt{\frac{L_v}{C_v}}$ – характеристическое сопротивление параллельного контура с элементами L_v и C_v LCR-модели объёмного резонатора секции ЦЗУ, Ом; ΔF – полоса пропускания по уровню максимально допустимой величины КСВН σ_{\max} в пределах полосы, Гц; δ – безразмерная функция величины КСВН σ_{\max} (см. Приложение).

Вид функции $\delta(\sigma_{\max})$ для двухзвенной фильтрующей системы с остро пульсирующей частотной характеристикой КСВН показан на рис. 2.

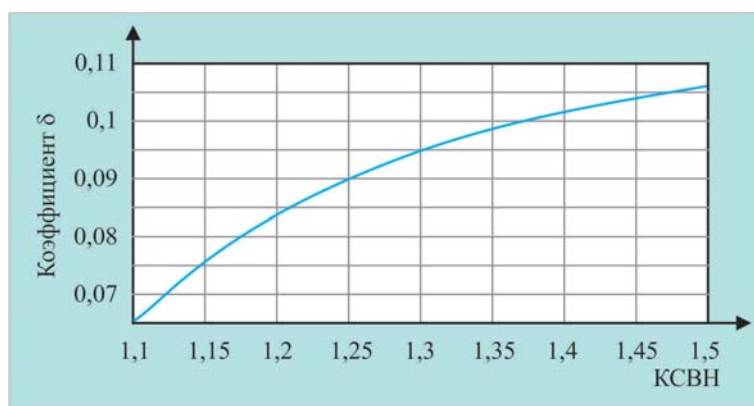


Рис. 2. График функции $\delta(\sigma_{\max})$

Сопротивление электронного пучка в зазоре между ламелями 3D-модели представлено в LCR-модели сопротивлением последовательного резонатора [2], рис. 3.

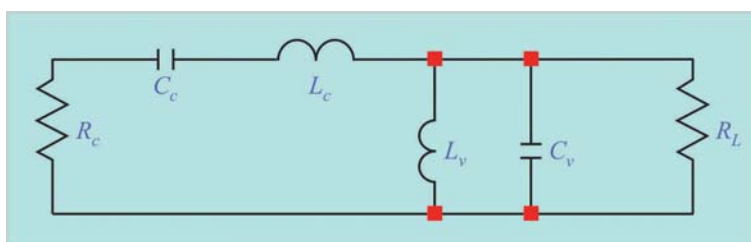


Рис. 3. Структура двухзвенной LCR -модели секции ЦЗУ. Элементы R_c , L_c , C_c последовательного и L_v , C_v параллельного резонаторов моделируют сопротивление электронного луча между ламелями и объёмный резонатор секции, элемент R_L – сопротивление внешнего тракта, приведенное к ламелям резонатора

LCR -модель, базовая для построения 3D-резонатора, не полностью отвечает 3D-модели резонатора, не учитывает находящийся в объёмном резонаторе проводник, связывающий ламели с коаксиальным трактом.

Построение 3D-резонатора с предварительным определением индуктивности проводника, как показывает практика многоступенчатого расчёта взаимозависимых параметров системы, избыточно трудоёмко.

Между тем в ограниченном диапазоне частот существующие конструкции резонатора ЦЗУ с проводником связи могут быть приближённо определены как монорезонансная система.

3D-резонатор, содержащий проводник связи, ниже рассматривается как единая резонансная система, характеристическое сопротивление и частота резонанса которой определяют необходимые значения комплексного сопротивления луча, частотную характеристику и полосу пропускания системы.

Комплексное сопротивление, ток и напряжение ускорения луча 3D-модели резонатора при этом определяются по формулам расчёта двухзвенной фильтрующей LCR -системы, элементы которой установлены на основе характеристического сопротивления резонатора, содержащего проводник связи.

3.1. Формулы расчёта элементов модели на основе вещественного сопротивления электронного луча R_c

Элементы сопротивления электронного луча с циклотронными колебаниями:

– вещественное сопротивление луча R_c , Ом:

$$R_c = 2\pi f_0 \rho_v \frac{\delta}{\Delta F}; \quad (2)$$

– индуктивность L_c , Гн, и ёмкость C_c , Ф, последовательного сопротивления луча:

$$L_c = \frac{\rho_c}{2\pi f_0} = \frac{R_c^2}{2\pi f_0 \rho_v} \sigma_{\max}, \quad (3)$$

$$C_c = \frac{1}{2\pi f_0 \rho_c} = \frac{\rho_v}{2\pi f_0 R_c^2} \frac{1}{\sigma_{\max}}, \quad (4)$$

где ρ_c – характеристическое сопротивление колебаний луча, Ом:

$$\rho_c = \sqrt{\frac{L_c}{C_c}} = \frac{R_c^2}{\rho_v} \sigma_{\max}. \quad (5)$$

Три вещественных сопротивления модели: луча R_c , циклотронного резонанса ρ_c и параллельного резонатора ρ_v – связаны соотношением, позволяющим оценить достоверность численного расчёта:

$$R_c^2 = \rho_c \rho_v / \sigma_{\max}. \quad (6)$$

Ток луча между ламелями, A , и напряжение ускорения луча, B , определяются соотношениями:

$$I_0 = \left(\frac{2}{R_c}\right)^3 \left(2\pi f_0 k_1 \rho_v \frac{d}{\sigma_{\max}}\right)^2, \quad (7)$$

$$V_0 = \left(2\pi f_0 k_1 \frac{\rho_v}{R_c} \frac{l}{\sigma_{\max}}\right)^2. \quad (8)$$

Здесь d – величина зазора между ламелями, м; l – длина пути луча вдоль зазора между ламелями, м; $k_1 = \left[2\pi(2e_m)^{0,5}\right]^{-1} = 2,6835 \cdot 10^{-7}$ – расчётный коэффициент [1]; $e_m = 1,7588 \cdot 10^{11}$ – величина заряда электрона по отношению к его массе.

Величина напряжения V_0 определена без наблюдаемого в экспериментах влияния контактной разности потенциалов катода.

Необходимое сопротивление, Ом, параллельного (объёмного) резонатора модели с заданными значениями частоты, тока и сопротивления луча, величины зазора и КСВН определяется соотношением

$$\rho_v = \sqrt{I_0 \left(\frac{R_c}{2}\right)^3 \frac{\sigma_{\max}}{2\pi f_0 k_1 d}}. \quad (9)$$

Вычисленные значения тока и напряжения могут быть проверены на основе известной формулы

$$R_c = 8 \frac{V_0}{I_0} \frac{d^2}{l^2}. \quad (10)$$

3.2. Формулы расчёта элементов модели на основе полосы пропускания ΔF

Элементы сопротивления луча с циклотронными колебаниями:

– вещественное сопротивление луча, Ом;

$$R_c = 2\pi f_0 \rho_v \frac{\delta}{\Delta F}; \quad (11)$$

– индуктивность, Гн, и ёмкость, Ф, сопротивления луча:

$$L_c = \frac{\rho_c}{2\pi f_0} = 2\pi f_0 \rho_v \left(\frac{\delta}{\Delta F}\right)^2 \sigma_{\max}. \quad (12)$$

$$C_c = \frac{1}{2\pi f_0 \rho_c} = \frac{1}{(2\pi f_0)^3 \rho_v} \left(\frac{\Delta F}{\delta} \right)^2 \frac{1}{\sigma_{\max}}, \quad (13)$$

где ρ_c – характеристическое сопротивление луча, Ом:

$$\rho_c = \sqrt{\frac{L_c}{C_c}} = \left(2\pi f_0 \frac{\delta}{\Delta F} \right)^2 \rho_v \sigma_{\max}. \quad (14)$$

Ток, A , и напряжение, B , ускорения электронного луча:

$$I_0 = \frac{4}{\pi f_0 \rho_v} (k_1 d)^2 (\Delta F)^3 \eta, \quad (15)$$

$$V_0 = \left(k_1 \frac{l}{\sigma_{\max}} \frac{\Delta F}{\delta} \right)^2, \quad (16)$$

где

$$\eta = \frac{1}{\sigma_{\max}^2 [\delta(\sigma_{\max})]^3}. \quad (17)$$

Необходимое сопротивление, Ом, параллельного (объёмного) резонатора

$$\rho_v = \frac{4}{\pi} \frac{1}{f_0 I_0} \left(k_1 \frac{d}{\sigma_{\max}} \right)^2 \left(\frac{\Delta F}{\delta} \right)^3. \quad (18)$$

Полоса пропускания секции при заданных значениях частоты, тока луча, сопротивления резонатора, величины зазора между ламелями, допустимой величины КСВН определяется, согласно (15), выражением

$$\Delta F = \delta \left[\frac{\pi f_0 \rho_v}{4} I_0 \left(\frac{\sigma_{\max}}{k_1 d} \right)^2 \right]^{1/3}. \quad (19)$$

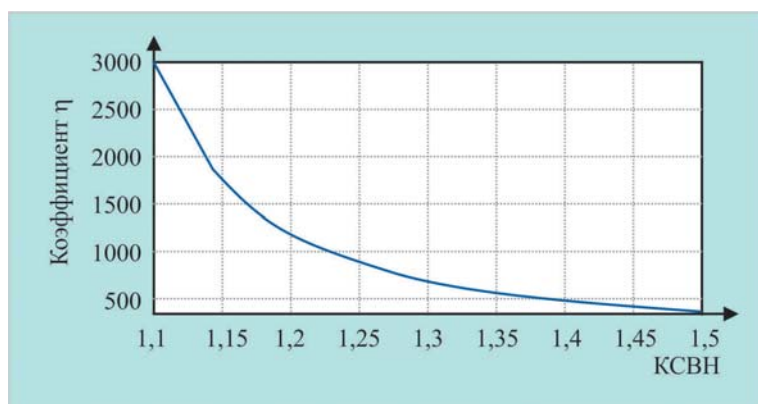
Наглядная зависимость параметров модели от величины КСВН σ_{\max} , вещественного R_c и характеристического ρ_c сопротивлений луча, полосы частот ΔF и сопротивления параллельного резонатора ρ_v двухзвенной фильтрующей системы с остро пульсирующей характеристикой позволяет оценить степень влияния каждой переменной непосредственно по формуле до проведения численного расчёта.

Так, при вариации нагрузки модели внешним трактом, с изменением величины КСВН σ_{\max} , соответствующая вариация коэффициента δ (см. рис. 2) ведёт к пропорциональному изменению полосы пропускания системы ΔF :

$$\Delta F = 2\pi f_0 \rho_v \frac{\delta}{R_c}. \quad (20)$$

Ток электронного луча системы с полосой пропускания ΔF , см. формулу (15), существенно зависит от множителя η , функции σ_{\max} .

График и таблица значений функции $\eta(\sigma_{\max})$ двухзвенной фильтрующей системы с остро пульсирующей частотной характеристикой показаны на рис. 4.

Рис. 4. График функции $\eta(\sigma_{\max})$ Значения функции $\eta(\sigma_{\max})$

| КСВН σ_{\max} | Коэффициент η |
|----------------------|--------------------|
| 1,1 | 3030 |
| 1,145 | 1810 |
| 1,181 | 1350 |
| 1,212 | 1090 |
| 1,24 | 930 |
| 1,266 | 810 |
| 1,29 | 730 |
| 1,312 | 660 |
| 1,334 | 600 |
| 1,355 | 560 |
| 1,376 | 525 |
| 1,395 | 400 |
| 1,505 | 370 |

По мере уменьшения требуемого коэффициента пульсаций σ_{\max} ток луча в системе с полосой ΔF возрастает пропорционально коэффициенту $\eta(\sigma_{\max})$. Как показывает рис. 4, умеренное уменьшение величины КСВН, например от $\sigma_{\max} = 1,18$ до $\sigma_{\max} = 1,14$, ведёт к увеличению коэффициента $\eta(\sigma_{\max})$ в 1,35 раза с соответствующим увеличением необходимого тока луча.

Повышенное требование уменьшения КСВН, например от $\sigma_{\max} \approx 1,24$ до $\sigma_{\max} = 1,1$, ведёт к необходимости существенного возрастания тока луча, в 3,27 раза.

4. МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ 3D-МОДЕЛИ РЕЗОНАТОРА

Построение 3D-модели резонатора с заданной полосой пропускания включает в себя три этапа.

1. Выбор конструкции резонатора и размера щели между ламелями:

- определяется характеристическое сопротивление LCR -модели резонатора и вещественное сопротивление R_c при максимальном токе луча;
- строится 3D-модель резонатора с повышенным характеристическим сопротивлением (пониженным током луча) и частотой резонанса, практически равной заданному значению f_0 ;
- сопротивление нагрузки ламелей R_c корректируется соответственно вариации сопротивления резонатора, см. (1а);
- размеры соединительного проводника и резонатора корректируются по условию величины КСВН $\sigma = \sigma_{\max}$ и практического равенства частоты резонанса заданному значению f_0 .

2. Построение LCR -модели:

- расчёт LCR -модели, величины тока и напряжения ускорения луча;
- построение и контроль частотной характеристики модели;
- оценка возможности реализации необходимой полосы пропускания при заданном ограничении тока луча.

3. Контрольный расчёт 3D-модели:

- ламели резонатора нагружены комплексным сопротивлением луча, установленным при расчёте LCR -модели;

– проверяется реализация заданной частотной характеристики, полосы пропускания, допустимости электрического режима.

5. ПРИМЕР ПОСТРОЕНИЯ 3D-МОДЕЛИ РЕЗОНАТОРА

5.1. Условия построения 3D-резонатора

Примем условия построения 3D-резонатора с проводником связи: центральная частота $f_0 = 14,5$ ГГц, полоса частот $\Delta F = 800$ МГц, допуск на максимальное значение КСВН в пределах полосы пропускания $\sigma_{\max} = 1,24$ (потери передачи сигнала на отражение $|\Delta S_{12}| \leq 0,05$ дБ), ток электронного пучка $I_0 < 300$ мкА.

Форма резонатора – цилиндр. Проводник связи ламелей с внешним трактом – лента сечением $0,4 \times 0,2$ мм. Размеры коаксиальной линии внешнего тракта: $1,38 \times 0,6$ мм.

Исходя из опыта разработок ЦЗУ в различных диапазонах частот, принимаем высоту d зазора между ламелями резонатора с частотой $f_0 = 14,5$ ГГц равной 70 мкм, длину l и ширину w зазора соответственно $1,5$ и $0,5$ мм.

Минимально необходимое сопротивление резонатора, согласно формуле (18), равно

$$\rho_v = \frac{4}{\pi} \frac{1}{I_0 f_0} \left(\frac{\Delta F}{\delta} \right)^3 \left(\frac{k_1 d}{\sigma_{\max}} \right)^2 =$$

$$= \frac{4}{\pi} \frac{1}{300 \cdot 10^{-6} \cdot 14,5 \cdot 10^9} \left(\frac{800 \cdot 10^6}{0,088882} \right)^3 \left(\frac{2,6835 \cdot 10^{-7} \cdot 70 \cdot 10^{-6}}{1,24} \right)^2 = 49 \text{ (Ом)}. \quad (21)$$

Зазор ламелей резонатора нагружен вещественным сопротивлением луча, формула (1а):

$$R_c = \frac{2\pi f_0}{\Delta F} \rho_v \delta = \frac{2\pi \cdot 14,5 \cdot 10^9}{800 \cdot 10^6} 49 \cdot 0,088882 = 495,98 \text{ (Ом)}. \quad (22)$$

Обеспечение комплекса взаимозависимых требований: полоса частот $\Delta F = 800$ МГц, величина КСВН $\sigma_{\max} = 1,24$, частота резонанса $f_0 = 14,5$ ГГц при сопротивлении луча $R_c(\rho_v) = 495,98$ Ом и резонатора $\rho_v \geq 49$ Ом – нуждается в оптимизации конструкции: многоступенчатом подборе размеров резонатора и соединительного проводника S-образной формы.

Степень оптимизации параметров 3D-резонатора содержит ряд операций:

– коррекция конструкции резонатора: частота резонанса устанавливается практически равной заданному значению f_0 ;

– расчёт сопротивления резонатора с последующей корректировкой вещественного сопротивления нагрузки ламелей, согласно значению ρ_v , см. формулу (1а);

– корректировка соединительного проводника: величина КСВН резонатора на частоте f_0 устанавливается практически равной σ_{\max} .

Построение 3D-модели резонатора с проводником связи в условиях требования $\rho_v > 49$ Ом привело к следующим размерам конструкции: диаметр резонатора – $5,768$ мм, толщина – $2,5$ мм; сечение ламелей – $1,5 \times 1,5$ мм. Проводник ламелей в области зазора имеет направленные к торцам резонатора боковые вырезы диаметром $0,9$ мм; центр выреза отстоит на $0,7$ мм от оси проводника. Размеры зазора: высота $h = 70$ мкм, ширина $w = 0,5$ мм, длина $l = 1,5$ мм. Сопротивление резонатора $\rho_v = 57,876$ Ом.

Полосковый проводник, связывающий ламель с коаксиальной линией, выполнен в виде трёх ступеней соединительной полоски толщиной 0,2 мм, шириной 0,4 мм. Первая ступень, направленная перпендикулярно ламелям, имеет длину относительно оси ламелей 1,46 мм, ось полоски отстоит от центра резонатора на 0,625 мм. Третья ступень, перпендикулярная ламелям, расположена на высоте -1,0 мм относительно центра резонатора, на оси коаксиальной линии. Вторая ступень параллельна оси ламелей, расположена на расстоянии от 0,725 до -1,1 мм от диаметра резонатора, соединяет первую и третью ступени на расстоянии 1,365 мм от оси ламелей.

Конструкция резонатора с проводником связи и коаксиальной линией внешнего тракта показана на рис. 5.

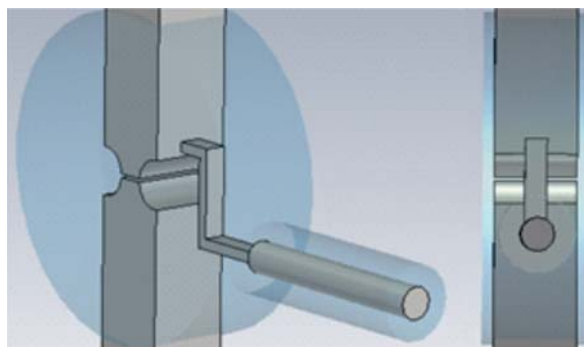


Рис. 5. Конструкция резонатора с характеристическим сопротивлением $\rho_v = 57,876 \text{ Ом}$

5.2. Построение LCR-модели секции ЦЗУ

LCR-модель, как исходную структуру расчета сопротивления резонатора и электрического режима секции ЦЗУ, определим на основе данных 3D-резонатора с $\rho_v = 57,876 \text{ Ом}$, частотой резонанса $f_0 = 14,5 \text{ ГГц}$, высотой зазора $d = 70 \text{ мкм}$, длиной ламели $l = 1,5 \text{ мм}$.

Оценим полосу пропускания LCR-модели при максимально допустимом токе луча 300 мкА.

При токе луча 300 мкА рассматриваемая система двухзвенного полосового фильтра, согласно (19), имеет полосу пропускания

$$\Delta F = \delta \left[\frac{\pi f_0 \rho_v}{4} I_0 \left(\frac{\sigma_{\max}}{k_1 d} \right)^2 \right]^{1/3} =$$

$$= 0,088882 \left[\frac{\pi \cdot 14,5 \cdot 10^9 \cdot 57,876}{4} 300 \cdot 10^{-6} \left(\frac{1,24}{2,6835 \cdot 10^{-7} \cdot 70 \cdot 10^{-6}} \right)^2 \right]^{1/3} = 845,77 \text{ (МГц)}. \quad (23)$$

Определим необходимое для полосы пропускания $\Delta F = 800 \text{ МГц}$ сопротивление колебаний луча для LCR-модели с $\rho_v = 57,876 \text{ Ом}$, а также значения тока и напряжения ускорения луча.

Вещественное сопротивление колебаний луча, согласно (1а),

$$R_c = \frac{2\pi f_0}{\Delta F} \rho_v \delta = \frac{2\pi \cdot 14,5 \cdot 10^9}{800 \cdot 10^6} 57,876 \cdot 0,088882 = 585,42 \text{ (Ом)}. \quad (24)$$

Характеристическое сопротивление циклотронных колебаний луча, как последовательного резонатора, согласно (5),

$$\rho_c = \sigma_{\max} \frac{R_c^2}{\rho_v} = 1,2396 \frac{585,42^2}{57,876} = 7342,73 \text{ (Ом)}. \quad (25)$$

Индуктивность и ёмкость сопротивления луча, согласно (3) и (4):

$$L_c = \frac{\rho_c}{2\pi f_0} = \frac{7342,73}{2\pi \cdot 14,5 \cdot 10^9} = 8,0595295 \cdot 10^{-8} \text{ (Гн)}, \quad (26)$$

$$C_c = \frac{1}{2\pi f_0 \rho_c} = \frac{1}{2\pi \cdot 14,5 \cdot 10^9 \cdot 7342,73} = 1,4948395 \cdot 10^{-15} \text{ (Ф)}. \quad (27)$$

Сопротивление нагрузки

$$R_L = R_c \sigma_{\max} = 585,42 \cdot 1,24 = 725,921 \text{ (Ом)}. \quad (28)$$

Индуктивность и ёмкость параллельного резонатора с $\rho_v = 57,85 \text{ Ом}$:

$$L_v = \frac{\rho_v}{2\pi f_0} = \frac{57,876}{2\pi \cdot 14,5 \cdot 10^9} = 6,35259 \cdot 10^{-10} \text{ (Гн)}, \quad (29)$$

$$C_v = \frac{1}{2\pi f_0 \rho_v} = \frac{1}{2\pi \cdot 14,5 \cdot 10^9 \cdot 57,876} = 1,8965 \cdot 10^{-13} \text{ (Ф)}. \quad (30)$$

Ток и напряжение ускорения луча, согласно (7) и (8):

$$I_0 = \frac{4}{\pi f_0 \rho_v} \left(k_1 \frac{d}{\sigma_{\max}} \right)^2 \left(\frac{\Delta F}{\delta} \right)^3 =$$

$$= \frac{4}{\pi \cdot 14,5 \cdot 10^9 \cdot 57,876} \left(2,6835 \cdot 10^{-7} \frac{70 \cdot 10^{-6}}{1,24} \right)^2 \left(\frac{800 \cdot 10^6}{0,088882} \right)^3 = 253,88 < 300 \text{ (мкА)}, \quad (31)$$

$$V_0 = \left(k_1 \frac{l}{\sigma_{\max}} \frac{\Delta F}{\delta} \right)^2 = \left(2,6835 \cdot 10^{-7} \frac{1,5 \cdot 10^{-3}}{1,24} \frac{800 \cdot 10^6}{0,088882} \right)^2 = 8,537 \text{ (В)}. \quad (32)$$

Оценим точность расчёта данных системы, согласно (10):

$$R_c = 8 \frac{V_0 d^2}{I l^2} = 8 \frac{8,537}{258,88 \cdot 10^{-6}} \frac{(70 \cdot 10^{-6})^2}{(1,5 \cdot 10^{-3})^2} = 585,84. \quad (33)$$

Ток луча $I_0 = 254 \text{ мкА}$ меньше допустимого значения 300 мкА .

Схема и частотная характеристика LCR-модели показаны на рис. 6 и 7.

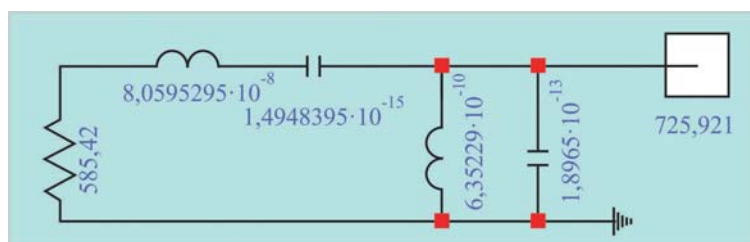


Рис. 6. Схема LCR -модели с сопротивлением резонатора $\rho_v = 57,876$ Ом, сопротивлением луча $\rho_c = 7342,7$ Ом и сопротивлением нагрузки $R_L = 729,51$ Ом. Полоса частот ΔF по уровню КСВН $\sigma_{\max} = 1,24$ равна 800 МГц

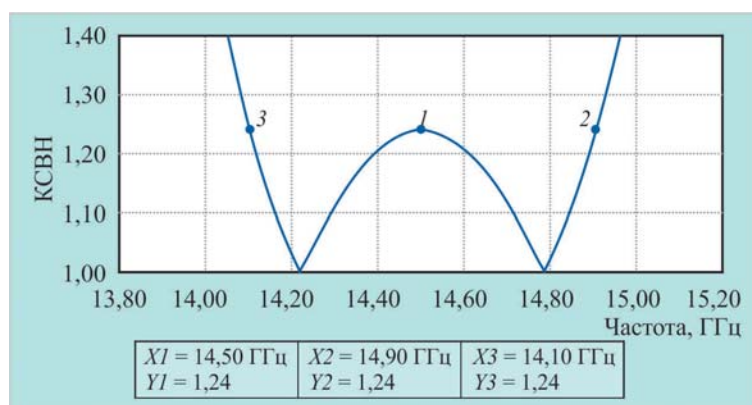


Рис. 7. Частотная характеристика КСВН рассматриваемой LCR -модели с полосой частот $\Delta F = 800$ МГц по величине КСВН $\sigma_{\max} = 1,24$ при сопротивлении резонатора $\rho_v = 57,876$ Ом

5.3. Контрольный расчёт 3D-резонатора секции ЦЗУ

Расчёт LCR -модели резонатора определил необходимые значения тока, напряжения ускорения и сопротивления луча, показал возможность создания секции ЦЗУ с заданной полосой пропускания по допустимой величине КСВН и тока луча.

Выполним завершающий, контрольный расчёт нагруженного сопротивлением луча 3D-резонатора с проводником связи: определим сопротивление резонатора ρ_v , согласно найденному значению ρ_v вычислим компоненты R_c , L_c , C_c последовательного резонатора, имитирующего сопротивление циклотронных колебаний луча.

Вычислив частотную характеристику КСВН резонатора, связанного с внешним трактом S-образным проводником и нагруженного сопротивлением луча, оценим точность реализации заданной полосы пропускания.

Следуя расчёту сопротивления резонатора по сокращённой формуле Гинзтона [3], см. далее (35), вычислим частотную характеристику 3D-резонатора с проводником связи при шунтировании зазора ламелей сопротивлением R_{c0} :

$$R_{c0} = R_c \cdot \sigma_{\max} = 586,024 \cdot 1,24 = 726,884 \text{ (Ом)}, \quad (34)$$

которое, согласно (28), обеспечивает высокое согласование резонатора с внешним трактом (рис. 8).

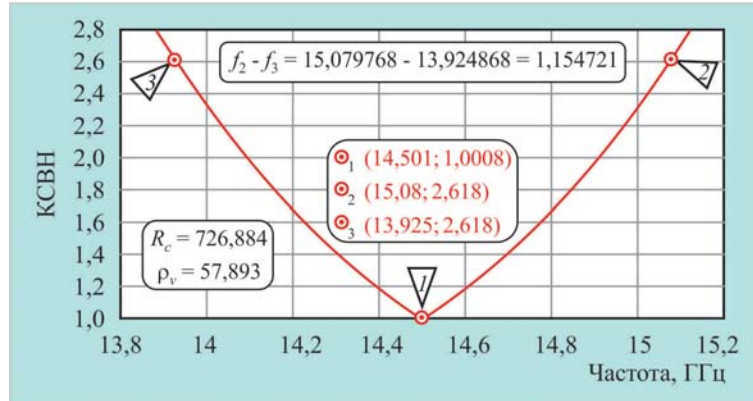


Рис. 8. Частотная характеристика КСВН резонатора, согласованного с внешним трактом на центральной частоте f_0 . Ламели резонатора нагружены вещественным сопротивлением $R_{c0} = 726,884$ Ом

Характеристическое сопротивление резонатора с проводником связи определим согласно разнице частот f_2 и f_3 , отмеченных по уровню КСВН $\sigma = 2,618$ (см. рис. 8):

$$\rho_v = \frac{\Delta_1 F}{f_0} R_{c0} = \frac{f_2 - f_3}{f_0} R_{c0} = \frac{15,079768 - 13,924856}{14,50056} 726,88 = 57,893 \text{ (Ом)}. \quad (35)$$

Определим элементы комплексного сопротивления луча при характеристическом сопротивлении резонатора $\rho_v = 57,876$ Ом:

$$R_c = \frac{2\pi f_0}{\Delta F} \rho_v \delta = \frac{2\pi \cdot 14,50056 \cdot 10^9}{800 \cdot 10^6} 57,893 \cdot 0,088882 = 586,024 \text{ (Ом)}, \quad (36)$$

$$L_c = \frac{R_c^2}{2\pi f_0 \rho_v} \sigma_{\max} = \frac{586,024^2}{2\pi \cdot 14,50056 \cdot 10^9 \cdot 57,893} 1,24 = 8,0734956 \cdot 10^{-8} \text{ (Гн)}, \quad (37)$$

$$C_c = \frac{\rho_v}{2\pi f_0 R_c^2} \frac{1}{\sigma_{\max}} = \frac{57,893}{2\pi \cdot 14,50056 \cdot 10^9 \cdot 586,024^2} \frac{1}{1,24} = 1,4921377 \cdot 10^{-15} \text{ (Ф)}. \quad (38)$$

Частотная характеристика КСВН 3D-модели при нагрузке ламелей комплексным сопротивлением Z_c , имитирующим сопротивление луча:

$$Z_c = R_c + i \left(2\pi f L_c - \frac{1}{2\pi f C_c} \right), \quad (39)$$

приведена на рис. 9.

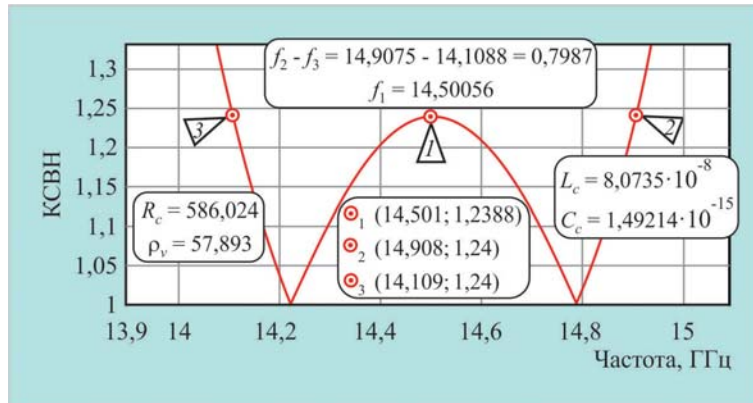


Рис. 9. Частотная характеристика КСВН 3D-модели резонатора, нагруженного сопротивлением луча, согласно условию $\sigma_{\max} = 1,24$. Полоса пропускания $\Delta F = 799$ МГц достаточно точно соответствует требуемому значению 800 МГц. Границы частотной характеристики смещены относительно центральной частоты в сторону высоких частот на 1 % величины полосы: резонатор 3D-модели шунтирован индуктивностью соединительного проводника

5.4. Электрический режим модели

Ток и напряжение ускорения луча резонатора отвечают значениям, известным из практики разработок секции ЦЗУ как двухзвенной фильтрующей системы:

$$I_0 = \left(\frac{2\pi f_0 \rho_v k_1 d}{\sigma_{\max}} \right)^2 \left(\frac{2}{R_c} \right)^3 = \left(\frac{2\pi \cdot 14,501 \cdot 10^9 \cdot 57,876 \cdot 2,6835 \cdot 10^{-7} \cdot 70 \cdot 10^{-6}}{1,24} \right)^2 \left(\frac{2}{585,484} \right)^3 = 254,363 < 300 \text{ (мкА)}, \quad (40)$$

$$V_0 = \left(\frac{2\pi f_0 k_1 l \rho_v}{R_c \sigma_{\max}} \right)^2 = \left(\frac{2\pi \cdot 14,501 \cdot 10^9 \cdot 2,6835 \cdot 10^{-7} \cdot 1,5 \cdot 10^{-3} \cdot 57,876}{585,484 \cdot 1,24} \right)^2 = 8,548 \text{ (В)}. \quad (41)$$

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлена унифицированная методика построения 3D-модели резонатора секции ЦЗУ с заданной остро пульсирующей частотной характеристикой. Построение резонатора основано на расчёте его LCR-модели, определенной с учетом размера щели между ламелями и сопротивления резонатора.

Резонатор ЦЗУ, содержащий сервисную цепь связи с внешним трактом, и сопротивление электронного луча упрощённо рассматриваются как двухзвенная фильтрующая система.

Расчёт LCR-модели секции ЦЗУ определяет параметры и доступность построения 3D-модели резонатора, отвечающей ограничениям по величине тока, напряжения, полосы частот, КСВН.

Опорный параметр расчёта LCR- и 3D-модели – полоса пропускания системы либо резонансное сопротивление электронного луча – принимается по выбору конструктора модели.

Погрешность исполнения заданной полосы пропускания, в рамках принятых для ЦЗУ значений КСВН $\sigma_{\max} = 1,1 \dots 1,5$, для известных конструкций секции с зазором между ламелями высотой, многократно меньшей ширины, составляет менее 1 %.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Коэффициент δ формул расчёта элементов LCR-модели секции ЦЗУ с остро пульсирующей частотной характеристикой [2]

| Коэффициент передачи $-\Delta S_{12}$, дБ | КСВН σ_{\max} | Коэффициент δ |
|---|-------------------------|-------------------------|
| 0,01 | 1,1 | 0,064904 |
| 0,02 | 1,145 | 0,074937 |
| 0,03 | 1,181 | 0,081076 |
| 0,04 | 1,212 | 0,085479 |
| 0,05 | 1,24 | 0,088882 |
| 0,06 | 1,266 | 0,091631 |
| 0,07 | 1,29 | 0,093917 |
| 0,08 | 1,312 | 0,095859 |
| 0,09 | 1,334 | 0,097534 |
| 0,1 | 1,355 | 0,099 |
| 0,11 | 1,376 | 0,1003 |
| 0,12 | 1,395 | 0,10143 |
| 0,13 | 1,415 | 0,10246 |
| 0,14 | 1,433 | 0,10338 |
| 0,15 | 1,452 | 0,10421 |
| 0,16 | 1,47 | 0,10496 |
| 0,17 | 1,487 | 0,10564 |
| 0,18 | 1,505 | 0,10637 |

ЛИТЕРАТУРА

1. Будзинский, Ю. А. Расчёт рабочей полосы частот циклотронного защитного устройства / Ю. А. Будзинский, С. В. Быковский, В. Г. Калина // Электронная техника. Сер.1. СВЧ-техника. – 2010. – Вып.1 (504). – С. 70 – 87.
2. Калина, В. Г. Модель с заданной полосой пропускания / В. Г. Калина, Ю. А. Будзинский, С. В. Быковский // Электронная техника. Сер.1. СВЧ-техника. – 2019. – Вып.1 (540). – С. 44 – 56.
3. Калина, В. Г. Циклотронное защитное устройство. Расчёт характеристического сопротивления резонатора / В. Г. Калина, Ю. А. Будзинский, С. В. Быковский // Электронная техника. Сер.1. СВЧ-техника. – 2016. – Вып. 3 (530). – С. 31 – 39.

Статья поступила 16 декабря 2020 г.

УДК 621.385

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
РАСПРОСТРАНЕНИЯ ШУМОВЫХ СИГНАЛОВ
В ЛАМПАХ БЕГУЩЕЙ ВОЛНЫ МЕТОДОМ КРУПНЫХ ЧАСТИЦ**

И. П. Медведков¹, В. И. Роговин^{1,2}, С. О. Семенов^{1,2}

¹Акционерное общество «Научно-производственное предприятие «Алмаз», г. Саратов

²ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский государственный университет»

Разработаны метод и программа расчета нестационарных процессов в электронно-оптических системах методом крупных частиц, позволяющие проводить анализ распространения гармонических модуляций тока и скорости крупных частиц в электронном потоке в области электронной пушки и дрейфа. Проведено сравнение результатов численного расчета с аналитическим решением для плоского диода. Определены границы линейности процесса распространения модуляций. Модифицирована программа расчета взаимодействия модулированного пучка с ВЧ-полем спиральной замедляющей системы для определения усиления шумовых сигналов. Проведен расчет распространения и усиления шумового сигнала в спиральной ЛБВ средней мощности. Показана возможность расчета шумовых характеристик ЛБВ методом крупных частиц.

КС: электронно-оптическая система, нестационарный расчет, волны тока и скорости в электронном потоке, усиление шумового сигнала

**MATHEMATICAL MODELING
OF THE PROPAGATION OF NOISE SIGNALS
IN TRAVELING WAVE TUBES BY THE METHOD OF LARGE PARTICLES**

I. P. Medvedkov¹, V. I. Rogovin^{1,2}, S. O. Semenov^{1,2}

¹SC «RPE «Almaz», Saratov

²FSEI HE «National Research Saratov State University»

A method and program for calculating non-stationary processes in electron-optical systems by the method of large particles has been developed, which makes it possible to analyze the propagation of harmonic modulations of the current and the velocity of large particles in the electron flow in the region of the electron gun and drift. The results of numerical calculations with the analytical solution for a flat diode are compared. The boundaries of linearity of the modulation propagation process are determined. The program for calculating the interaction of a modulated beam with the HF field of a spiral slowing system is modified to calculate the amplification of noise signals. The calculation of the propagation and amplification of a noise signal in a spiral TWT of average power is carried out. The possibility of calculating the noise characteristics of TWT by the method of large particles is shown.

Keywords: electron-optical system, nonstationary calculation, current and velocity waves in the electron flow, gain of the noise signal

1. ВВЕДЕНИЕ

Расчет шумовых характеристик ламп бегущей волны (ЛБВ) проводился еще при разработке малошумящих приборов и был основан на одномерных аналитических моделях распростране-

ния флуктуаций тока и скорости, начиная от катода и до начала ЗС [1]. Основные источники шумов: дробовой шум Шотки и скоростной шум Рэка, имеющие статистический характер, при таком анализе часто заменялись на одночастотную модуляцию тока и скорости с эквивалентными шумовыми параметрами, например [2], что позволяло значительно упростить анализ.

И сегодня вопросы уменьшения собственных шумов современных ЛБВ с большим коэффициентом усиления для систем связи также остаются актуальными. Также собственные шумы являются фактором, серьезно ограничивающим коэффициент усиления широкополосных ЛБВ, работающих в непрерывном режиме и имеющих большой перепад коэффициента усиления в полосе частот [3].

Современные ЛБВ используют мощные, сходящиеся в области пушки электронные потоки, и были сделаны попытки учета сходимости пучка при расчете шумовых характеристик приборов.

В работе [4] для расчета коэффициента шума ЛБВ со сходящимся потоком к ранее разработанным моделям был добавлен аналитический расчет промежутка катод – анод со сходящимся коническим потоком, а коэффициент шума ЛБВ рассчитывался по тем же формулам, как и ранее. В [5] в расчет коэффициента шума ЛБВ добавлена поперечная температура пучка на основе модели многоскоростного электронного потока, с учетом его сходимости.

Исследование влияния конструкции замедляющей системы (ЗС) на усиление шумового сигнала по одномерной же модели проведено в [6, 7], но не рассматривались вопросы согласования электронной пушки и ЗС.

При исследованиях малошумящих ЛБВ с однородным магнитным полем соленоида было отмечено уменьшение уровня шумов как при увеличении фокусирующего магнитного поля, так и при введении магнитного поля на катод ЛБВ [1]. Имеющиеся экспериментальные данные [8, 9] показали возможность уменьшения шумовой мощности ЛБВ с фокусировкой МПФС примерно на 15...20 дБ за счет введения небольшого магнитного поля на катоде, и этот эффект не удается объяснить с применением существующих моделей. Так, в соответствии с [5], расширение пучка за счет магнитного поля на катоде в ЛБВ уменьшает коэффициент шума всего на несколько децибел.

Таким образом, существующие модели расчета не позволяют анализировать шумовые характеристики современных ЛБВ с учетом их конструктивных особенностей: с неламинарным пучком, магнитным полем на катоде и т. д.

Целью настоящей работы является математическое моделирование процесса распространения и усиления шумового сигнала в спиральной ЛБВ с использованием метода крупных частиц.

2. МЕТОД РАСЧЕТА

При разработке программы расчета электронных пушек был использован алгоритм программы расчета многоступенчатых коллекторов в нестационарном режиме [10].

Моделирование временного процесса осуществляется, как и в [10], алгоритмом «шаг за шагом». Решение уравнения Пуассона в осесимметричной расчетной области проводится методом интегральных уравнений. В программе используются три сетки, которые можно располагать только в области нахождения пучка, в результате чего существенно уменьшается время решения задачи. Одна сетка, сферическая, располагается непосредственно на поверхности сферического катода, а две другие, прямоугольные, – далее, в области анода и пролетного канала. Применена согласованная схема распределения заряда по узлам сетки и численного вычисления напряженности поля по 12-точечной схеме, что позволяет устранить эффект самодействия

частиц [11] и уменьшить собственные шумы программы. Вычисление тока катода проводится по закону степени $3/2$. Из каждой точки старта на катоде вылетает набор частиц, образующих пространственный веер, величина которого определяется тепловыми скоростями электронов. Используемые уравнения движения частиц позволяют рассчитывать движение частиц с учетом магнитного фокусирующего поля в области пушки и за анодом в области пролетного канала. Также возможен расчет пушек с магнитным полем на катоде.

Расчет распространения флуктуаций тока и скорости проводится в два этапа. На первом этапе фактически решается стационарная задача (т. е. модуляция пучка на катоде отсутствует), но во временной области методом установления. Расчет может проводиться до определенного числа временных шагов или до достижения критерия сходимости, по которому в определенном сечении характеристики пучка на соседних временных шагах число частиц, прошедших через сечение, ток потока, радиусы и скорости частиц совпадают с заданной точностью. На втором этапе вводится гармоническая модуляция начальных токов и компонент скорости частиц в точках старта на катоде, вычисленных на первом этапе, с заданными амплитудами и начальными фазами. Временной период модуляции T разбивается на N интервалов, и в каждый интервал с катода вылетает набор частиц со своими характеристиками.

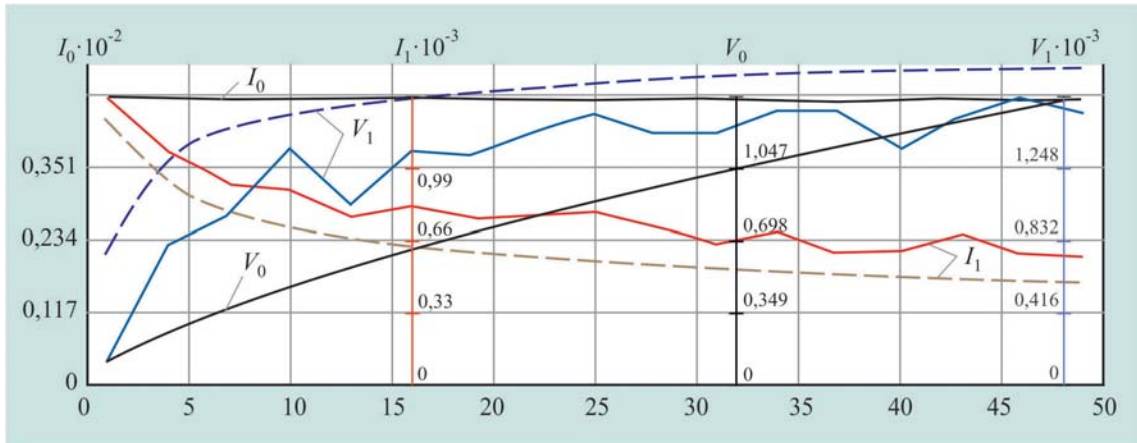
При проведении расчетов на втором этапе в заданных по координате Z сечениях в течение каждого временного интервала T происходит запись частиц, пересекающих это сечение, затем проводится Фурье-обработка записанного потока и вычисляются амплитуды гармоник тока и скорости и их начальные фазы.

3. РАСЧЕТ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ФЛУКТУАЦИЙ ТОКА И СКОРОСТИ В ПЛОСКОМ ДИОДЕ

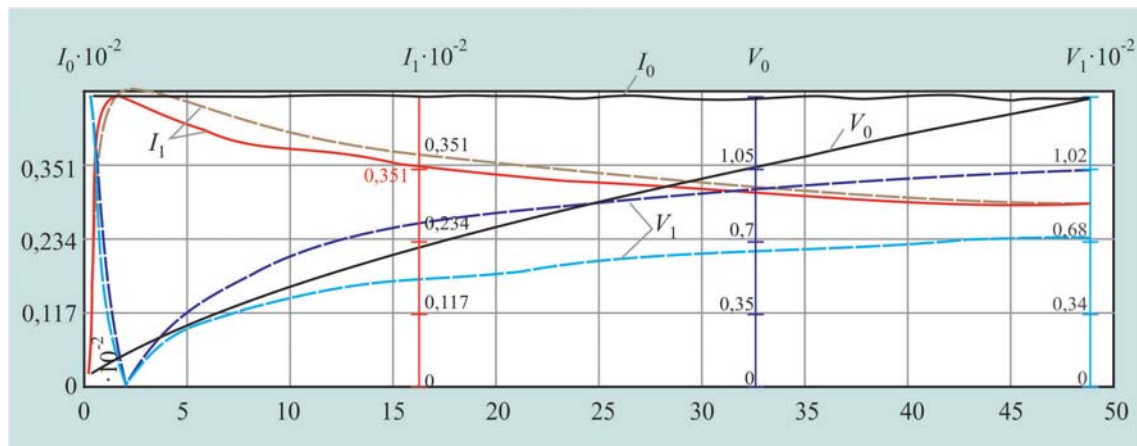
В работе [2] в одномерном приближении было получено аналитическое решение распространения гармонических модуляций тока и скорости, задаваемых на катоде, в плоском бесконечном диоде. В наших расчетах плоский бесконечный диод был заменен пушкой Пирса с плоским катодом, результаты расчета электронного потока в которой приведены на рис. 1. При диаметре катода 20 мм, расстоянии катод – анод 50 мм, напряжении на аноде -4 кВ рассчитанное по программе значение тока в стационарном режиме (73,9 мА) близко к полученному по аналитическим формулам значению (74,2 мА).

Далее в точках старта, расположенных на расстоянии 0,3 мм от катода, вводилась высокочастотная модуляция на частоте 2,65 ГГц отдельно скорости крупных частиц и отдельно тока. Частота была выбрана из условия, чтобы в промежутке между катодом и анодом образовалось 8...10 сгустков частиц.

Для определения границ линейности процесса образования волн тока и скорости была проведена серия расчетов, когда в точках старта изменялась величина модуляции тока и начальной скорости частиц A . Чтобы можно было считать процесс линейным, он должен подчиняться соотношению $F(\alpha A) = \alpha F(A)$. Каждая из модуляций (по току и по скорости отдельно) создает две волны модуляций по току и по скорости, смещенных по фазе друг от друга на 90° [12], поэтому сравнивались величины первых гармоник скорости и тока в нескольких сечениях между катодом и анодом. Варьирование величины начальной модуляции показало, что существует область примерно в интервале от 5 до 70 % относительно стационарных значений, в которой выполняется указанное соотношение.



а)



б)

Рис. 1. Зависимости постоянных составляющих I_0 и V_0 , амплитуд первых гармоник тока I_1 и скорости V_1 по длине расчетной области при начальной модуляции 30 % по скорости (а) и по току (б):

— расчет по программе; - - - расчет по формулам работы [2]

На рис. 1, а приведены результаты расчетов распространения волн тока и скорости при 30%-ной модуляции скорости частиц в точках старта. В соответствии с [2], на длине 2,4 мм амплитуда первой гармоники скорости частиц равна нулю, а первая гармоника тока достигает максимального значения. Эти формулы были получены в линейном приближении, когда в промежутке катод – анод распространяются только первые гармоники тока и скорости. При численных расчетах в электронном потоке возникают не только первые, но и высшие гармоники (табл. 1). Помимо этого, в пространственно ограниченном потоке возникает набор волн пространственного заряда [12], что также ведет к отличиям результатов численного расчета и расчета по аналитическим формулам.

Таблица 1

**Относительные амплитуды
второй и третьей гармоник тока и скорости**

| Относительные амплитуды | Сечение Z, мм | | | | |
|-------------------------|---------------|------|------|-------|------|
| | 0,4 | 2,4 | 10 | 20 | 40 |
| I_2/I_1 | 0,44 | 0,54 | 0,27 | 0,16 | 0,15 |
| I_3/I_1 | 0,16 | 0,18 | 0,19 | 0,32 | 0,43 |
| V_2/V_1 | 0,19 | 1,3 | 0,23 | 0,15 | 0,04 |
| V_3/V_1 | 0,054 | 0,78 | 0,09 | 0,015 | 0,1 |

Хорошее качественное и приемлемое количественное соответствие рассчитанных по программе и по аналитическим формулам первых гармоник тока и скорости наблюдается и при начальной модуляции пучка по току (рис. 1, б).

4. РАСЧЕТ ЭЛЕКТРОННОЙ ПУШКИ ЛБВ

На рис. 2 приведен расчет формирования электронного потока в области электронной пушки и входной области МПФС для ЛБВ, параметры которой приведены в [13]. При напряжениях анода и фокусирующего электрода 4070 и -16,69 В [13] расчетное значение тока пучка в установившемся режиме составило 128,5 мА, что отличается от среднего, измеренного для серии приборов значения всего на 1 %. Частота модуляции тока и скорости потока на катоде равнялась 10 ГГц. Шаг расчета по времени составлял 1/30 периода модуляции пучка.

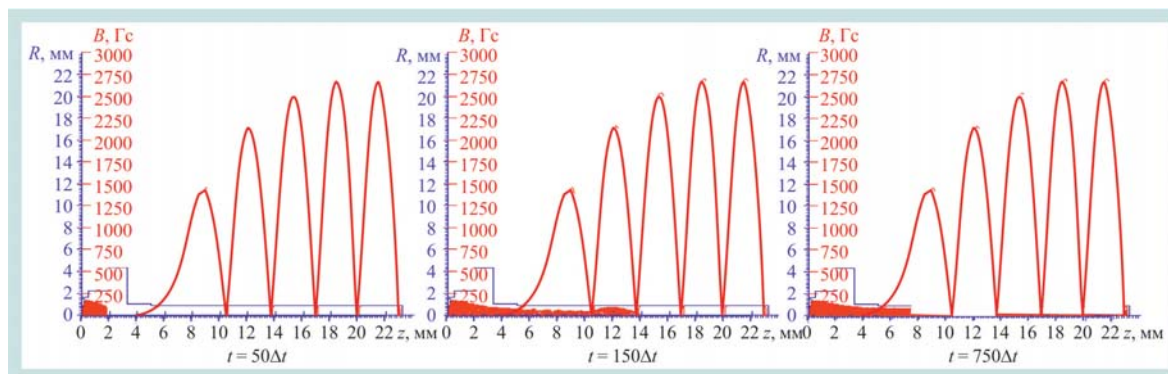


Рис. 2. Конфигурация электродов пушки, распределение магнитного поля и положение крупных частиц в расчетной области в различные моменты времени

Были рассмотрены два случая электронно-оптической системы: с экранированным от магнитного поля катодом и с полем на катоде 10 Гс отрицательной полярности при амплитуде магнитного поля МПФС 2700 Гс. Все нечетные магниты МПФС имели поле положительной полярности, четные – отрицательной.

Введение поля на катоде указанной величины слабо влияет на конфигурацию пучка и поведение первых гармоник тока и скорости по длине расчетной области (рис. 3). Аналитические

одномерные модели [1] предсказывали существование минимума шумового тока в области за анодом электронной пушки. Как видно из рис. 3, такой минимум существует и при расчете электронной пушки со сходящимся потоком. При $Z = 12 \dots 13$ мм амплитуда первой гармоники тока имеет минимальное значение, а первой гармоники скорости – максимальное при $Z = 15$ мм.

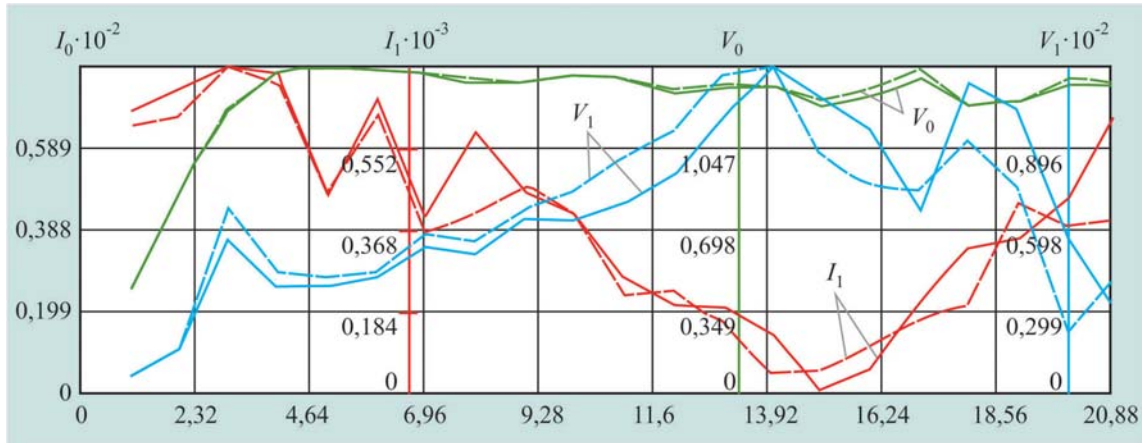


Рис. 3. Зависимости постоянных составляющих тока I_0 и продольной скорости V_0 , первой гармоники тока I_1 и скорости V_1 по длине расчетной области без магнитного поля (сплошные линии) и с магнитным полем (пунктир) на катоде

Постоянные составляющие тока и скорости для случаев магнитного поля на катоде и без него практически не отличаются. Положение минимумов первой гармоники тока совпадает, при этом величина гармоники в случае отсутствия поля на катоде несколько меньше почти во всей области. Положения максимумов первой гармоники скорости отличаются примерно на 2 мм, и, так же как и для тока, величина гармоники скорости без магнитного поля меньше по величине.

Полученные данные о поведении первой гармоники тока могут быть использованы для расчета коэффициента шума ЛБВ по методике [1] с применением корней дисперсионного уравнения спирали или для задания входных данных для его расчета по методике [9] вместо использовавшихся величин шумов на катоде.

Как и в случае плоского диода, определялись границы линейности процесса, которые по значениям получились близкими к приведенным выше значениям. Нарушения линейности при малых значениях модуляции связаны, на наш взгляд, с погрешностями вычислений самой программы. Например, величина модуляции по скорости крупных частиц 5 % в приведенной конструкции пушки с выбранными точками старта крупных частиц соответствует величине потенциала 0,4 В, что составляет $1 \cdot 10^{-4}$ от напряжения на аноде пушки, т. е. погрешность вычисления потенциала можно оценить как не более 0,01 %. При значениях модуляции более 60 %, нарушения линейности происходили из-за обгона частиц и далее быстрого разрушения волн тока и скорости.

Процесс будет линейным также в случае выполнения условия $F(A + B) = F(A) + F(B)$. Для его проверки были проведены расчеты распространения волн тока и скорости при 50%-ной начальной модуляции отдельно по току и по скорости и одновременной модуляции со сдвигом начальных фаз гармоник тока и скорости 45° . Суммарные гармоники тока и скорости и их фазы при сложении случаев модуляции по одному параметру находились как сложение векторов (сум-

ма I и V) и сравнивались со случаем расчета одновременной модуляции пучка по току и скорости (расчет I и V). В табл. 2 приведены результаты сравнения для двух сечений по координате $Z=8$ и 18 мм, расположенных до и после минимума первой гармоники тока. Отличия в величинах первых гармоник тока и скорости и их фаз не превышают 12 % и $12,2^\circ$ соответственно.

Отметим, что в табл. 2 значения гармоник тока и скорости приведены в нормированном виде.

Таблица 2

**Амплитуды первых гармоник и начальных фаз
при расчете отдельно модуляций по току и скорости и одновременной модуляции**

| Координата по Z , мм | Вид модуляции | I_1 | Фаза I_1 , град | V_1 | Фаза V_1 , град |
|------------------------|---------------|------------------------|-------------------|------------------------|-------------------|
| 8 | I | $0,3855 \cdot 10^{-3}$ | 27,39 | $0,8682 \cdot 10^{-2}$ | 99 |
| | V | $0,2104 \cdot 10^{-2}$ | 48,06 | $0,3394 \cdot 10^{-1}$ | 135,4 |
| | Сумма $I+V$ | $0,2468 \cdot 10^{-2}$ | 44,9 | $0,4125 \cdot 10^{-1}$ | 128,23 |
| | Расчет $I+V$ | $0,2554 \cdot 10^{-2}$ | 54,6 | $0,4282 \cdot 10^{-1}$ | 138,6 |
| 18 | I | $0,4419 \cdot 10^{-3}$ | 231,5 | $0,2982 \cdot 10^{-2}$ | 131,5 |
| | V | $0,1914 \cdot 10^{-2}$ | 258,8 | $0,3064 \cdot 10^{-1}$ | 179,8 |
| | Сумма $I+V$ | $0,2316 \cdot 10^{-2}$ | 253,8 | $0,3267 \cdot 10^{-1}$ | 175,9 |
| | Расчет $I+V$ | $0,2257 \cdot 10^{-2}$ | 265,6 | $0,3701 \cdot 10^{-1}$ | 185,5 |

Из табл. 2 видно, что при одинаковой относительной модуляции тока и скорости характеристик крупных частиц на катоде амплитуды первых гармоник волн тока и скорости, возникающих при модуляции только по скорости, примерно в 5...10 раз больше, чем при модуляции только по току, причем в рассмотренном случае модулируется полный ток электронного пучка 128 мА, а величина модуляции по скорости эквивалентна нескольким вольтам.

Также исследовалось влияние числа разбиений N периода T на величины и распределения гармоник тока и скорости по длине расчетной области, которое показало, что для корректного расчета гармоник тока и скорости достаточно, чтобы на период интересующей гармоники приходилось 25...30 временных шагов.

5. РАСЧЕТ УСИЛЕНИЯ ШУМОВЫХ СИГНАЛОВ

Для расчета процесса усиления шумового сигнала в ЛБВ была использована двумерная программа расчета процесса взаимодействия электронного потока с электромагнитной волной [14], которая была модифицирована для корректного учета многоскоростного характера электронного пучка и показала свою эффективность в целом ряде применений [15]. Расчет усиления шумовых сигналов отличается от расчета процесса усиления входного сигнала ненулевыми начальными условиями для электронного пучка и нулевой входной мощностью, поэтому алгоритм программы был изменен для учета начальной модуляции пучка по скорости и по плотности и введена возможность задания на входе в спиральную ЗС нестационарного пучка, полученного при расчете области электронной пушки. Дополнительное слагаемое, возникающее из-за наличия магнитного поля или начальных азимутальных скоростей крупных частиц на

катоде пушки и используемое при расчете азимутальной скорости частиц в цилиндрической системе координат, также передается в программу [15]. Помимо этого, была введена возможность непосредственного задания на входе ЗС двумерного пучка с модуляцией по гармоническому закону тока и скорости электронов для вычисления матрицы передачи сигнала аналогично [9].

Запись электронного потока была проведена при расчете электронной пушки (см. рис. 2) в сечениях, соответствующих максимумам магнитного поля в третьей, четвертой и пятой ячейках МПФС с координатами по $Z = 15,5, 18,5$ и $21,5$ мм соответственно. В дальнейшем будем называть эти сечения № 1, № 2 и № 3. Отметим, что ввод энергии анализируемой ЛБВ расположен в середине четвертого магнита МПФС, т. е. в сечении № 2.

Спиральная ЗС ЛБВ с внутренним диаметром 1,1 мм имела две секции, разделенные одним поглотителем, шаг в выходной секции был уменьшен на 3 % относительно входной секции. При расчете режима обычного усиления сигнала на частоте 10 ГГц, группировка электронов в сгустки и соответственно первая гармоника сгруппированного тока появляются лишь в области поглотителя, а выходная мощность (электронный КПД) начинает расти в выходной секции ЗС. Электронный КПД ЛБВ в режиме насыщения составил 14,35 % (рис. 4).

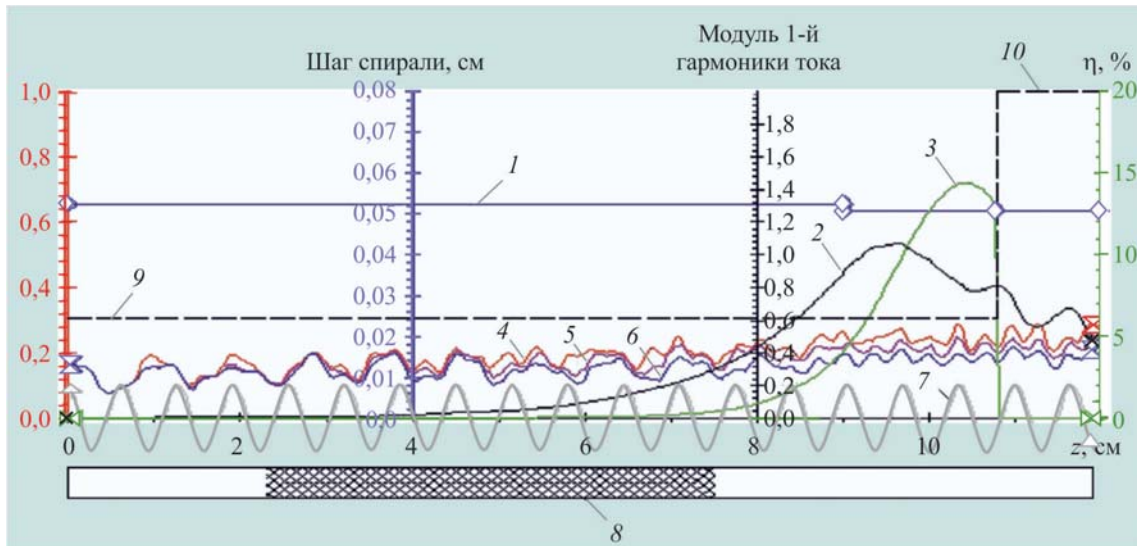
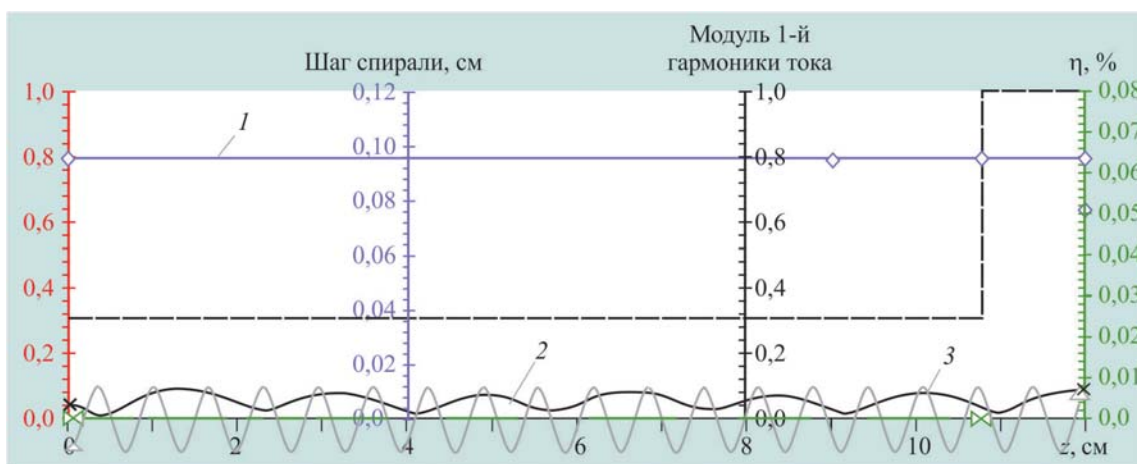


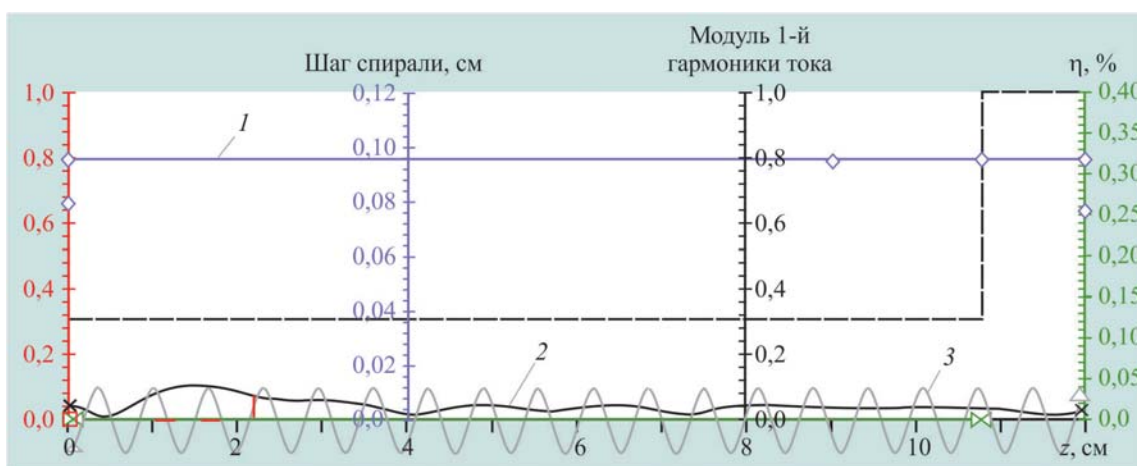
Рис. 4. Зависимости расчетных параметров по длине ЗС:

1 – шаг спирали; 2 – модуль первой гармоники тока; 3 – электронный КПД; 4...6 – огибающие, соответствующие 100, 99 и 95 % тока пучка; 7 – магнитное поле МПФС; 8 – локальный поглотитель; 9 – пролетный канал; 10 – расширение пролетного канала за выводом энергии

Для проверки работоспособности модифицированной программы [15] была проведена серия расчетов с отключением взаимодействия модулированного пучка с ВЧ-полем спиральной ЗС, т. е. при дрейфе пучка с фокусировкой полем МПФС. В соответствии с [12], в пучке должны распространяться незатухающие волны пространственного заряда. Наблюдаемые биения амплитуды первой гармоники сгруппированного тока для случая экранированного катода (рис. 5, а) доказывают наличие таких волн, длина которых хорошо согласуется с аналитическими оценками [12]. Введение магнитного поля на катоде пушки нарушает процесс распространения волн пространственного заряда при дрейфе пучка (рис. 5, б) и соответственно должно влиять на процесс усиления шумового сигнала.



а)



б)

Рис. 5. Зависимости расчетных параметров по длине ЗС
электронной пушки с экранированным катодом (а) и с полем на катоде (б):
1 – шаг спирали; 2 – модуль первой гармоники тока; 3 – магнитное поле МПФС

При расчете усиления шумовых сигналов величина рассчитанного электронного КПД эквивалентна шумовой мощности на выходе ЛБВ в отсутствие входного сигнала.

Далее начало спиральной ЗС помещалось в указанные выше сечения и на вход подавался модулированный электронный пучок, соответствующий этому сечению.

Для варианта электронной пушки с экранированным катодом величина первой гармоники тока на входе ЗС увеличивается с ростом номера сечения от минимального значения до максимального (рис. б), а наименьшее значение электронного КПД достигается при положении начала ЗС в сечении № 2 (табл. 3).

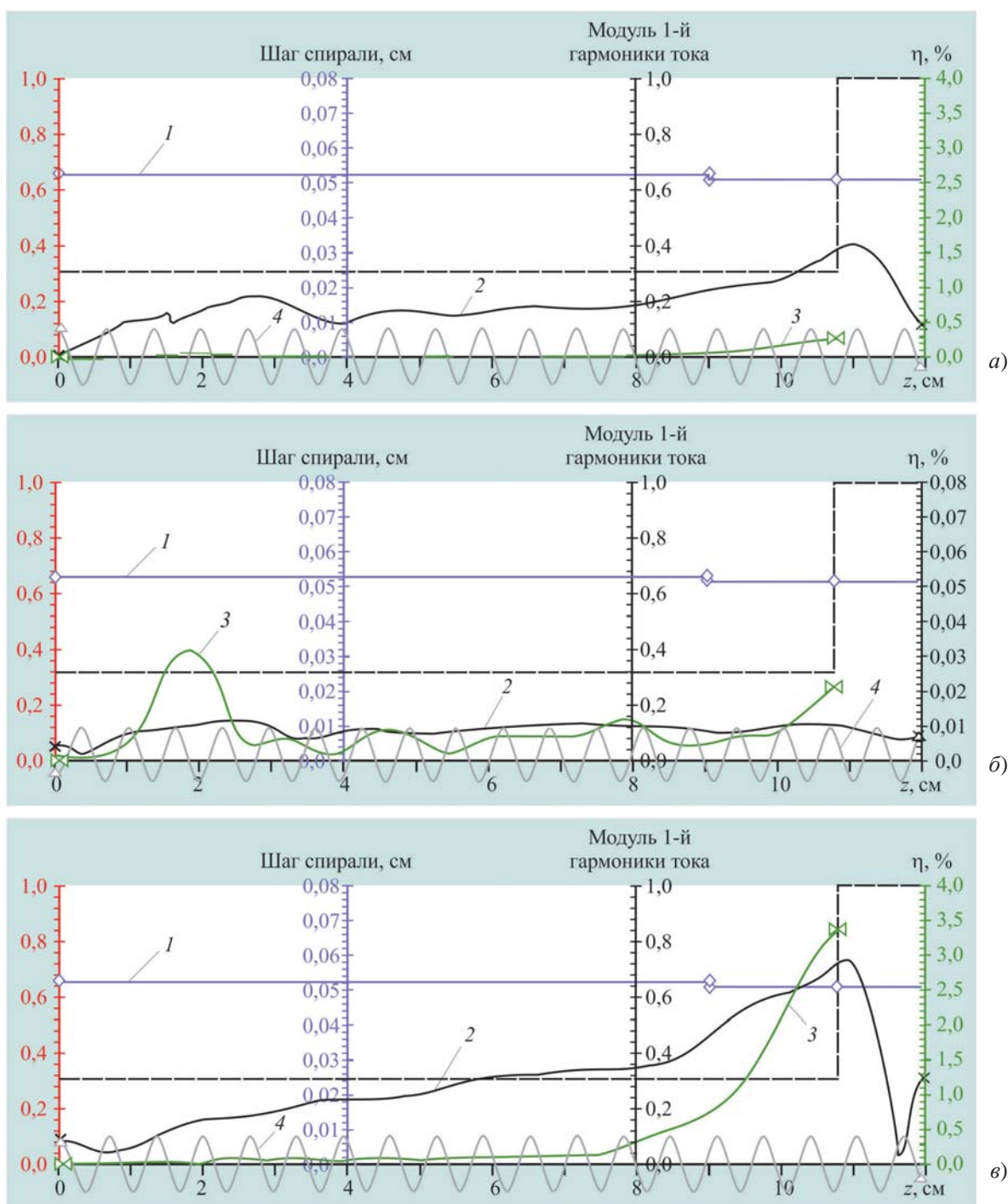


Рис. 6. Зависимости расчетных параметров по длине ЗС электронной пушки с экранированным катодом:

a – начало ЗС в сечении № 1; *б* – в сечении № 2; *в* – в сечении № 3; 1 – шаг спирали; 2 – модуль первой гармоники тока; 3 – электронный КПД; 4 – магнитное поле МПФС

Таблица 3

Результаты расчетов шумовой мощности при различных положениях начала ЗС

| Магнитное поле на катоде пушки | Сечение по Z | | |
|--------------------------------|---------------|---------------|---------------|
| | № 1 (15,5 мм) | № 2 (18,5 мм) | № 3 (21,5 мм) |
| $B_k = 0$ | 0,27 % | 0,02 % | 3,34 % |
| $B_k = -10$ Гс | 0,0028 % | 0,035 % | 0,57 % |

Введение магнитного поля на катод пушки изменяет характер зависимости величины шумовой мощности от положения начала ЗС. Минимальное значение электронного КПД достигается для сечения № 1, когда величина гармоники тока на входе ЗС имеет минимальное значение (см. табл. 3), причем значение КПД в 100 раз меньше, чем для варианта без магнитного поля, и в 7 раз меньше по сравнению с лучшим вариантом для экранированного катода. Величины первой гармоники тока и шумовой мощности на выходе ЛБВ растут с увеличением величины гармоники тока на входе ЗС (рис. 7).

Также были проверены работа программы при изменении параметров ЗС и их влияние на процесс усиления шума. Например, для случая экранированной пушки и начала ЗС в сечении № 3, при расчете варианта ЗС без поглотителя энергии, электронный КПД уменьшился до 1,8 %, увеличение скачка шага до 9 % привело к росту электронного КПД до 5,3 %.

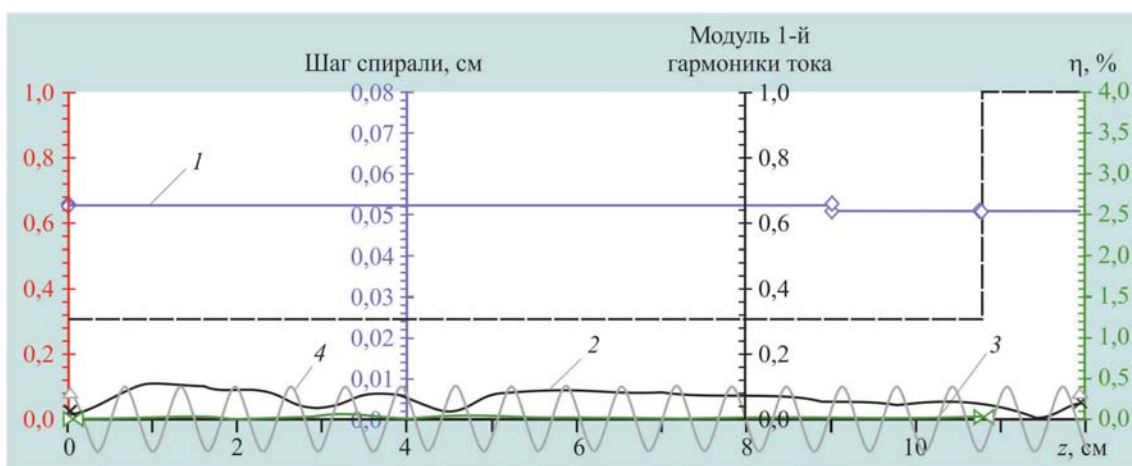
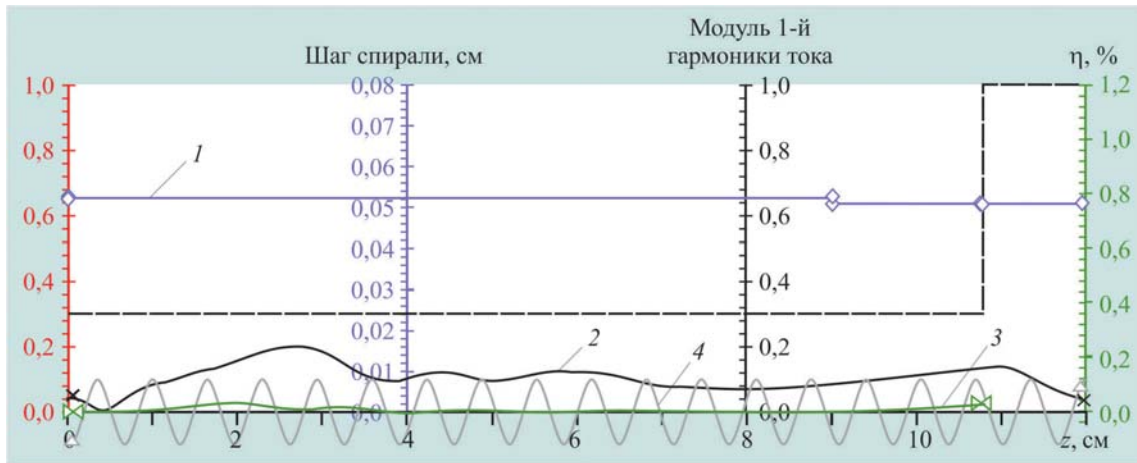
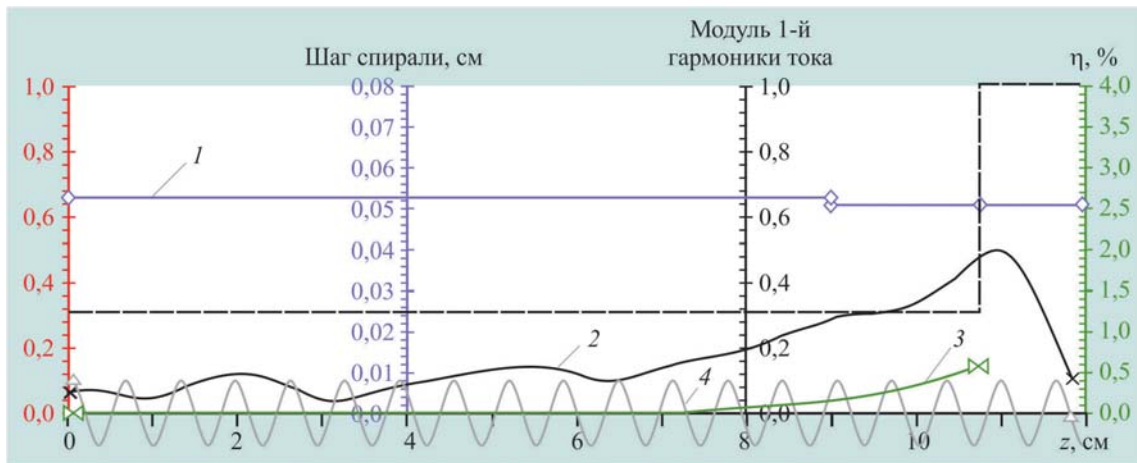


Рис. 7. Зависимости расчетных параметров по длине ЗС при магнитном поле на катоде -10 Гс (см. также с. 31):

a – начало ЗС в сечении № 1; *б* – в сечении № 2; *в* – в сечении № 3; *1* – шаг спирали; *2* – модуль первой гармоники тока; *3* – электронный КПД; *4* – магнитное поле МПФС



б)



в)

Рис. 7. Зависимости расчетных параметров по длине ЗС при магнитном поле на катоде -10 Гс (окончание):

a – начало ЗС в сечении № 1; *б* – в сечении № 2; *в* – в сечении № 3; *1* – шаг спирали; *2* – модуль первой гармоники тока; *3* – электронный КПД; *4* – магнитное поле МПФС

Во всех рассмотренных случаях величина электронного КПД, соответствующего шумовой мощности, была значительно меньше КПД в режиме насыщения, т. е. режим усиления шумовой мощности можно считать линейным или близким к нему.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработаны метод и программа расчета нестационарных процессов в электронно-оптических системах методом крупных частиц, позволяющие анализировать распространение гармониче-

ских модуляций тока и скорости крупных частиц в области электронной пушки и дрейфа пучка, а также переходные процессы.

Проведённое сравнение рассчитанных по разработанной программе и по аналитическим формулам, полученным в линейном приближении для одной гармоники, зависимостей величин первых гармоник тока и скорости в плоском диоде для случаев модуляции по току и по скорости показало их хорошее качественное и приемлемое количественное соответствие.

Рассмотрены критерии линейности и определены интервалы изменения величин модуляций тока и скорости на катоде, когда процесс распространения волн тока и скорости можно считать линейным, и критерии разбиения периода модуляций для корректного вычисления гармоник.

Проведенные исследования показали возможность расчета шумовых характеристик спиральных ЛБВ методом крупных частиц. Разработана программа, позволяющая проводить анализ процесса усиления шума в ЛБВ на основе двумерной нелинейной модели. Показано существенное влияние на процесс усиления шума параметров замедляющей системы и магнитного поля на катоде электронной пушки.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Смуллин, Л. Д.** Шумы в электронных приборах / Л. Д. Смуллин, Г. А. Хаус // Энергия. – 1964. – 484 с.
2. **Smullin, L. D.** Propagation of disturbances in one – dimensional accelerated electron streams / L. D. Smullin // Journal of Applied Physics. – 1951. – Vol. 22, No 12. – P. 1496 – 1498.
3. **Бондаренко, С. М.** Широкополосные спиральные лампы бегущей волны и комплексированные устройства / С. М. Бондаренко, В. П. Кудряшов, Ф. П. Кузьмин, А. Д. Рафалович // Радиотехника. – 2001. – № 2. – С. 37 – 45.
4. **Liao, F. J.** An investigation of the noise figure of power traveling wave tubes / F. J. Liao // Acta Electronica Sinica. – 1978. – No 1. – P. 1 – 13.
5. **Данилов, А. Б.** Уменьшение коэффициента шума в мощных широкополосных лампах бегущей волны со сходящимся пучком / А. Б. Данилов, С. П. Морев, А. Д. Рафалович, В. И. Роговин // Радиотехника и электроника. – 2004. – Т. 49, № 8. – С. 1006 – 1011.
6. **Лазерсон, А. Г.** Электронное подавление шумов в лампах с бегущей волной О-типа / А. Г. Лазерсон, М. З. Шляхтер // Радиотехника и электроника. – 1991. – Т. 36, № 3. – С. 528 – 533.
7. **Лазерсон, А. Г.** Нелинейные искажения и шумы в лампе с бегущей волной с неоднородными замедляющими системами при различных типах дисперсии фазовой скорости взаимодействующей волны / А. Г. Лазерсон, М. З. Шляхтер // Радиотехника и электроника. – 1991. – Т. 36, № 8. – С. 1538 – 1544.
8. **Алексеева, Н. А.** Применение электронной пушки с магнитным полем на катоде для уменьшения шумов в ЛБВ / Н. А. Алексеева, Д. И. Кириченко, И. П. Медведков, В. И. Роговин, П. Д. Шалаев // Радиотехника. – № 8. – 2018. – С. 79 – 83.
9. **Алексеева, Н. А.** Уменьшение шумов в мощной ЛБВ X -, Ku -диапазонов / Н. А. Алексеева, В. И. Роговин, Л. А. Штерн // Матер. междунар. научно-техн. конф. «Актуальные проблемы электронного приборостроения». – Саратов: Изд. СГТУ, 2018. – Т. 1. – С. 194 – 200. – ISBN 978-1-5386-4332-7.
10. **Журавлева, В. Д.** Расчет нестационарных процессов в электронно-оптических системах / В. Д. Журавлева, С. О. Семенов // Прикладная физика. – 2006. – № 4. – С. 60 – 65.
11. **Семенов, С. О.** О схемах распределения заряда, вычисления силы и эффекте самодействия частиц в задачах электронной оптики / С. О. Семенов // Матер. междунар. научно-техн. конф. «Актуальные проблемы электронного приборостроения». – Саратов: Изд. СГТУ, 2006. – С. 57 – 65. – ISBN 1-4244-0246-8.
12. **Шевчик, В. Н.** Волновые и колебательные явления в электронных потоках на сверхвысоких частотах / В. Н. Шевчик, Г. Н. Шведов, А. В. Соболева». – Саратов: Изд. СГТУ, 1962. – 335 с.

13. **Журавлева, В. Д.** Исследование влияния поперечной составляющей магнитного поля на токопрохождение пучка в ЭОС ЛБВ / В. Д. Журавлева, С. О. Семенов // Матер. междунар. научно-техн. конф. «Актуальные проблемы электронного приборостроения». – Саратов: Изд. СГТУ, 2010. – С. 66 – 72. – ISBN 978-5-9999-0531-4.

14. **Манькин, И. А.** Двумерный расчет взаимодействия аксиально-симметричных электронных потоков с волной в ЛБВО на основе модели с большим числом частиц / И. А. Манькин, Б. Л. Ушерович // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. – 1978. – Вып. 6. – С. 36 – 50.

15. **Ильина, Е. М.** Анализ трансформации электронного сгустка в широкополосной лампе бегущей волны на основе усовершенствованной двумерной модели / Е. М. Ильина, С. П. Морев, В. И. Роговин и др. // Радиотехника и электроника. – 1999. – Т. 44, № 10. – С. 1271 – 1274.

Статья поступила 21 декабря 2020 г.

==== НОВЫЕ КНИГИ ====

АЛЯМОВСКИЙ А. А. SOLIDWORKS Simulation и FloEFD. Практика, методология, идеология. – М.: ДМК Пресс, 2020. – 658 с. – ил.

Книга продолжает серию публикаций, посвященных решению инженерных задач в среде SOLIDWORKS Simulation, включающей инструменты для анализа прочности – собственно Simulation; гидрогазодинамики и теплопередачи – Flow Simulation, кинематики и динамики механизмов – Motion. Материал основан на практическом опыте автора. Каждая глава посвящена отдельному объекту, представляющему определенный класс конструкций и обладающему методической ценностью. Изложение начинается с постановки задачи, затем следует анализ с точки зрения пригодности имеющихся инструментов. Подробно описаны построение расчетной модели в рамках реального технического задания, вычислительный процесс, получение результатов, их анализ и интерпретация.

Издание в первую очередь будет полезно инженерам, которым требуется понимание объектов через моделирование процессов, происходящих в них и вокруг них.

КАТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

УДК 620.186.12, 620.186.14, 54.061

ПРИМЕНЕНИЕ СПЕКТРОСКОПИИ ПОТЕНЦИАЛОВ ПОЯВЛЕНИЯ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ КАТОДОВ СВЧ-ПРИБОРОВ

В. И. Капустин¹, И. П. Ли², А. В. Шуманов², С. О. Москаленко²

¹РТУ «Московский институт радиотехники, электроники и автоматики»

²АО «Плутон», г. Москва

Разработана прецизионная цифровая система регистрации зависимости коэффициента вторичной электронной эмиссии (КВЭЭ) от энергии первичных электронов для исследования материалов катодов СВЧ-приборов, которая при шаге 0,1 эВ и двойном цифровом дифференцировании зависимости КВЭЭ от энергии позволяет регистрировать спектры потенциалов появления, отражающие положение электронных уровней и типы химических связей элементов из состава поверхности материалов с разрешением 0,1...0,2 эВ. Создана библиотека спектров элементов для основных типов катодных материалов.

КС: спектроскопия потенциалов появления (СПП), вторично-электронная эмиссия (ВЭЭ), поверхность материалов, катоды СВЧ-приборов

APPLICATION OF THE APPEARANCE POTENTIALS SPECTROSCOPY IN STUDYING THE MATERIALS FOR CATHODES OF MICROWAVE DEVICES

V. I. Kapustin¹, I. P. Li², A. V. Shumanov², S. O. Moskalenko²

¹RTU Moscow Institute of Radio Engineering, Electronics and Automatics

²JSC «Pluton», Moscow

A precision digital system for registering the dependence of the secondary electron emission coefficient (SEEC) on the energy of primary electrons has been developed for studying the materials for cathodes of microwave devices. This system with a step of 0.1 eV and double digital differentiation of SEEC dependence on the energy makes it possible to register the appearance potential spectra displaying the position of electronic levels and types of chemical bonds of elements from the composition of the surface of materials with a resolution of 0.1...0.2 eV. A library of the elements spectra for the main types of cathode materials has been created.

Keywords: appearance potentials spectroscopy (APS), secondary electron emission (SEE), surface of materials, cathodes of microwave devices

1. ВВЕДЕНИЕ

Традиционно для исследования состава поверхности катодных материалов и типа химических связей между элементами материала используют методы Оже-спектроскопии или электронной спектроскопии для химического анализа (ЭСХА). Вместе с тем типичная глубина анализа в методе ЭСХА, оптимальном для исследования типа химических связей, составляет 10...50 Å, что не дает информации о составе и химических состояниях первого монослоя материала, то есть собственно о поверхности материала, а в методе Оже-спектроскопии, имеющем локальность анализа до 10 Å, затруднена интерпретация типа химических состоя-

ний на поверхности из-за того, что в общем случае в формировании Оже-пика участвуют три электронных уровня химического элемента с различными значениями химических сдвигов. Кроме того, такого рода исследовательские установки характеризуются очень высокой стоимостью.

Еще в середине 70-х годов прошлого века в работе [1] и независимо в работах [2–3] для исследования состава поверхности материалов был предложен метод спектроскопии потенциалов появления (СПП). Сущность метода состояла в двойном дифференцировании зависимости коэффициента вторичной электронной эмиссии (КВЭЭ) материала от энергии первичных электронов. Физически при развертке энергии первичных электронов в момент достижения энергии значения, равного расстоянию от какого-либо электронного уровня материала до уровня Ферми для металлов и адсорбционных систем и дна зоны проводимости для диэлектриков, на указанной зависимости появлялась ступенька, проявляющаяся при двойном дифференцировании в виде пика, по структуре аналогичного Оже-пику, но относящегося к одному электронному уровню атома материала. Именно данное обстоятельство, особенно при регистрации спектров СПП в области малых энергий первичных электронов, позволяет определять не только состав поверхности материала, но и химические состояния атомов на поверхности материала. Однако ранние работы [1–3] были выполнены с использованием аналоговой методики двойного дифференцирования, что не обеспечивало данному методу приемлемую чувствительность и разрешающую способность, поэтому метод СПП не получил широкого распространения в практике научных исследований.

Целью данной работы является развитие метода СПП в варианте цифровой регистрации спектров и создание библиотеки спектров СПП химических элементов, характерных для основных типов катодных материалов: оксидно-никелевых, металлопористых, палладий-бариевых, осмированных металлопористых, скандатных, оксидно-иттриевых и т. д.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ АППАРАТУРА

На рис. 1 приведена конструкция блока измерения вторично-эмиссионных свойств катодных материалов. В состав блока входит электронная пушка, обеспечивающая формирование электронного пучка с энергией электронов в диапазоне 10...2000 эВ и током пучка до 2...3 мкА, и коллекторная система в составе полусферического коллектора электронов и двух полусферических сеток. В составе электронной пушки применен скандатный катод, позволяющий проводить его повторное активирование после вскрытия установки на воздух.

На рис. 2 приведена схема блока измерений и системы регистрации при исследовании вторично-эмиссионных свойств материалов. Здесь 1 – подогреватель катода электронной пушки; 2 – катод электронной пушки; 3 – модулятор; 4 – первый анод; 5 – фокусирующий электрод (второй анод); 6 – третий анод; 7 – коллектор электронов; 8 – вторая сетка; 9 – первая сетка; 10 – корпус держателя образцов; 11 – исследуемый материал; 12 – подогреватель; 13 – термopара; 14 – блок регулирования температуры образца; 15 – источник питания накала электронной пушки; 16 – источник питания модулятора электронной пушки; 17 – источник питания первого анода; 18 – источник питания фокусирующего электрода (второго анода); 19 – источник ускоряющего напряжения; 20 – источник потенциала смещения на сетках; 21 – источник питания смещения на коллекторе; 22 – усилитель токов первичных и вторичных электронов; 23 – управляющий микропроцессор; 24 – компьютер. Область А – электронная пушка; область Б – коллектор вторичных электронов и антидинаatronные сетки; область В – держатель образца материала. Резисторы R_1 и R_2 безындуктивные и с минимальной собственной емкостью

номиналом 1 кОм. Конденсаторы C_1 и C_2 имеют емкостное сопротивление много меньше 1 кОм при модуляции электронного пучка импульсами длительностью примерно 5 мкс и скважностью 500...1000.

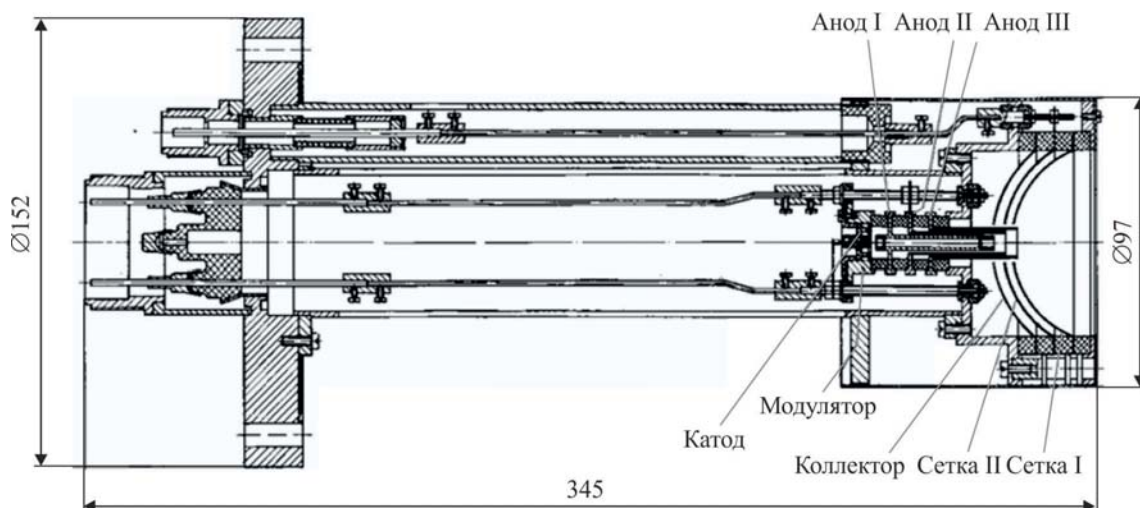


Рис. 1. Конструкция блока измерения вторично-эмиссионных свойств катодных материалов

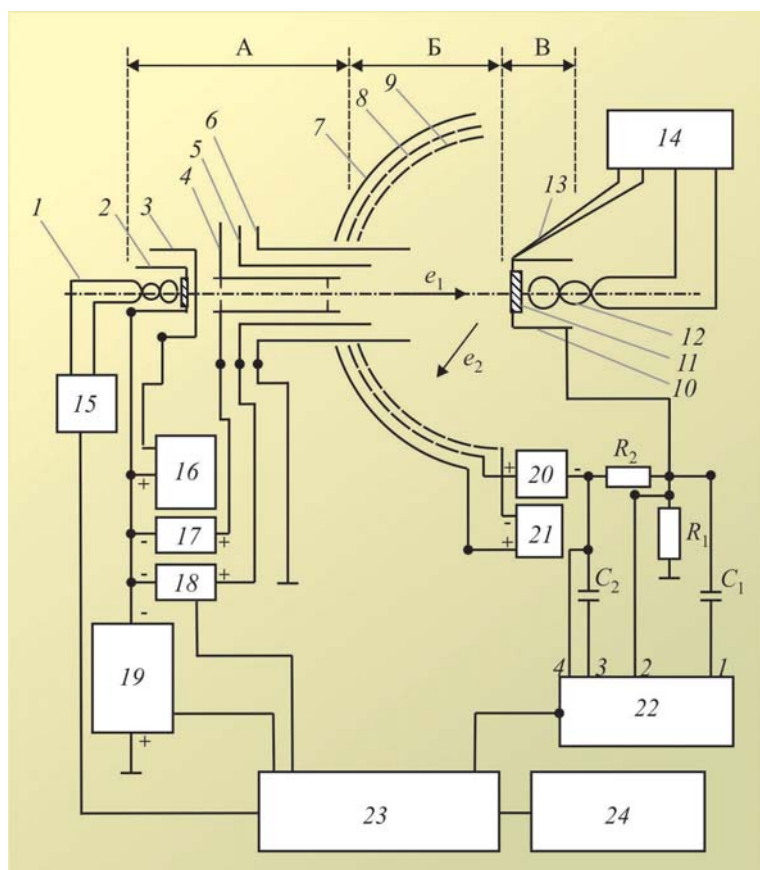


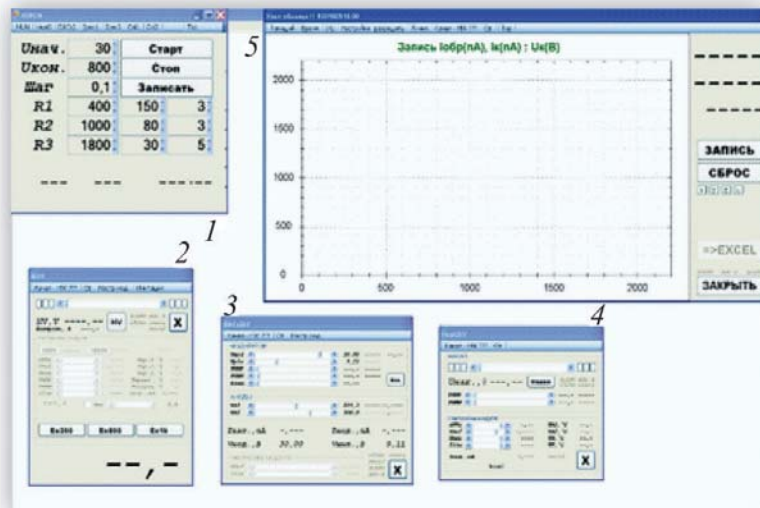
Рис. 2. Схема системы измерения вторично-эмиссионных свойств материалов

Функционирование блока измерения вторично-эмиссионных параметров катодных материалов осуществляется по следующим алгоритмам:

– для активирования катода электронной пушки (скандат-бариевый катод) после вскрытия блока на воздух на подогреватель подается напряжение выше номинала (номинальное напряжение – 6,3 В) – примерно 8,0...8,5 В (блок 15), на модулятор подается напряжение около +20 В (блок 16, активация с отбором тока катода) и контролируется ток модулятора. Активация завершается примерно через 10 мин, при этом ток модулятора достигает 0,3...0,5 мА (расстояние катод – модулятор составляет 0,14 мм);

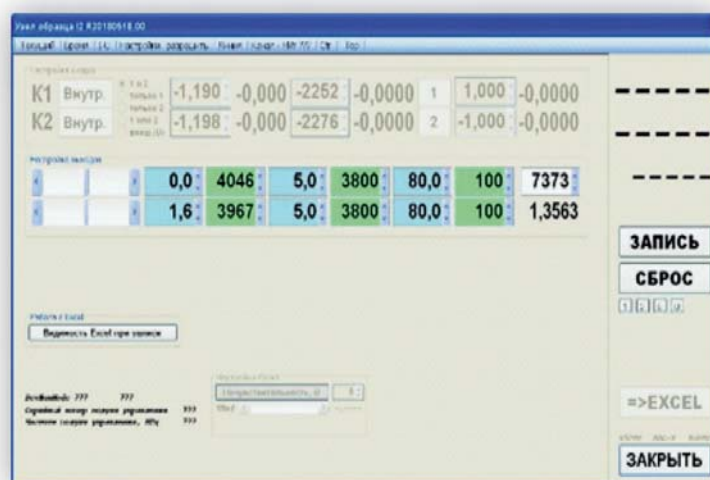
– регистрация вторично-эмиссионных характеристик катода осуществляется либо в импульсном режиме (материалы, содержащие оксидную фазу), либо в режиме постоянного тока (материалы металлического типа). В первом случае плата 22 регистрирует импульсный сигнал первичного тока по каналу 1, а суммы импульсного первичного и вторичного токов – по каналу 2. Во втором случае первичный ток (постоянный) регистрируется платой 22 по каналу 3, а сумма первичного и вторичного (постоянного) токов – по каналу 4.

На рис. 3 приведен вид панели управления измерительной системой, которая включает главное окно запуска режима измерений 1, панель управления ускоряющим напряжением 2, панель управления режимом работы электронной пушки 3, окно управления накалом электронной пушки 4 и панель управления и регистрации параметров вторичной электронной эмиссии 5. Одно дополнительное окно предназначено для цифровой визуализации первичного и вторичного тока, второе окно – для управления напряжением на коллекторе вторичных электронов, третье окно – для управления напряжениями на сетках.



а)

Рис. 3. Вид окна управления электронной пушкой (а) и окон регистрации (б) (см. также с. 38)



б)

Рис. 3. Вид окна управления электронной пушкой (а) и окон регистрации (б) (окончание)

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Приготовление экспериментальных образцов материалов, которые содержат на поверхности микропримеси химических элементов, характерных для различных типов катодов (барий, стронций, кальций, палладий, вольфрам, молибден, осмий, рений, никель, кислород), и технологические примеси (углерод, хлор, сера, кремний, алюминий), представляется достаточно сложной задачей. Поэтому для изготовления тестового образца, позволяющего осуществить регистрацию наличия указанных примесей на поверхности материала, нами был использован эффект перепыления материалов в вакууме с нагретой поверхности (катодный материал) на другую (подложка), более холодную.

В один держатель образцов (манипулятор установки содержит три нагреваемых держателя образцов) был помещен образец из молибдена, обезжиренный в трихлорэтилене. Два остальных держателя образцов в течение года использовали для измерения термоэмиссионных параметров различных катодных материалов (оксидно-никелевые, металлопористые, осмированные, палладий-бариевые, скандатные и т. д.) при их нагреве до 1200 °С. При термоэмиссионных измерениях вакуумную камеру периодически вскрывали на воздух для смены образцов, после чего камеру прогревали при температуре до 200 °С. Откачку вакуумной системы проводили последовательно форвакуумным масляным насосом (применение не обязательно), цеолитовым насосом с охлаждением жидким азотом, магниторазрядным насосом. Форвакуумный насос использовался совместно с азотной ловушкой для минимизации возможного попадания паров масла на поверхность образцов материалов.

На рис. 4 приведена зависимость КВЭЭ тестового образца – молибдена с возможными загрязнениями поверхности продуктами перепыления с катодных материалов различных типов – в интервале энергий первичных электронов 30...800 эВ, с шагом регистрации 0,1 эВ.

Собственно двойное цифровое дифференцирование этой зависимости и дает спектр СПП поверхности материала. На рис. 4 видно, что максимальный КВЭЭ тестового материала, равный 1,90, существенно превышает значение 1,20 для чистого материала, что косвенно и подтверждает наличие примесей других материалов на поверхности, прежде всего оксидного типа, характеризующихся высокими значениями КВЭЭ.

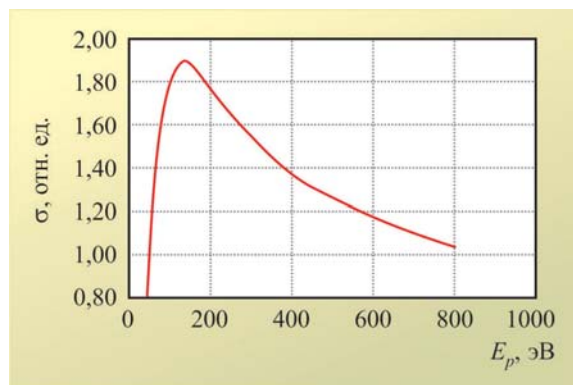


Рис. 4. Зависимость КВЭЭ экспериментального образца от энергии первичных электронов

На рис. 5...10 приведены участки спектра СПП тестового образца для различных диапазонов энергий первичных электронов. Положение пиков, как и в Оже-спектроскопии, определяли по отрицательному выбросу пика, а его ширину – по расстоянию между положительным и отрицательным выбросами. В области энергий 30...50 эВ ширина пиков не превышала 0,2 эВ, при более высоких энергиях – 0,1 эВ. Пики на фоне шумов выделяли по их интенсивности между положительными и отрицательными выбросами: она должна была превышать среднюю интенсивность шумов не менее чем в 1,5 раза. В таблице дана сводка положения пиков загрязняющих элементов на поверхности тестового образца. Там же дано положение электронных уровней для чистых элементов из работы [4].

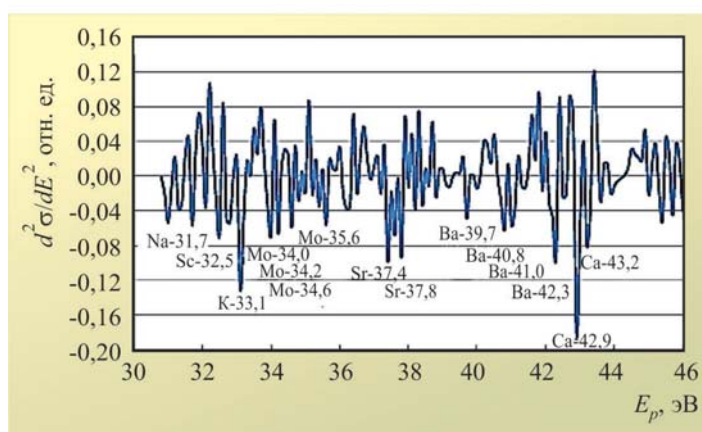


Рис. 5. Спектр СПП в интервале 30...46 эВ

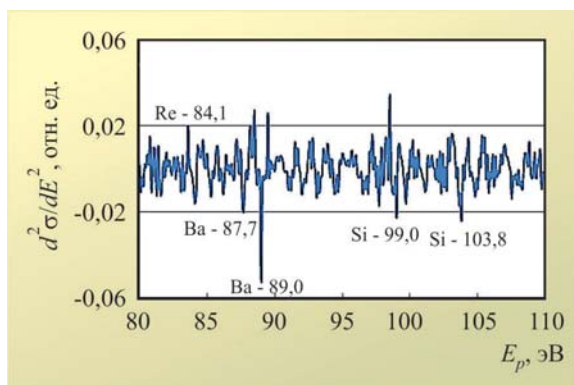


Рис. 6. Спектр СПП в интервале 80...110 эВ

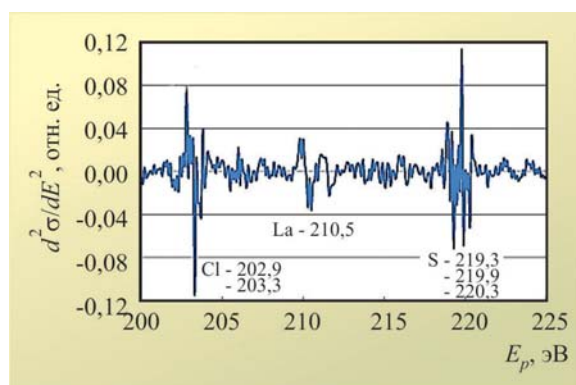


Рис. 7. Спектр СПП в интервале 200...225 эВ

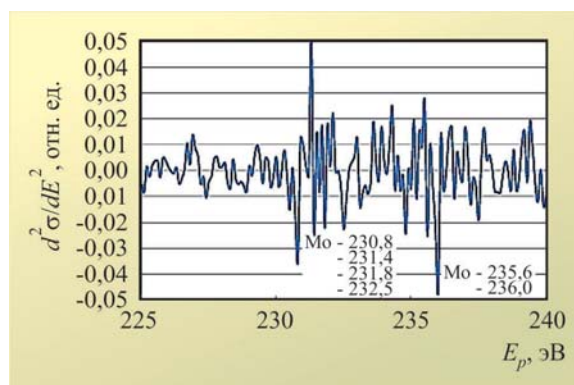


Рис. 8. Спектр СПП в интервале 225...240 эВ

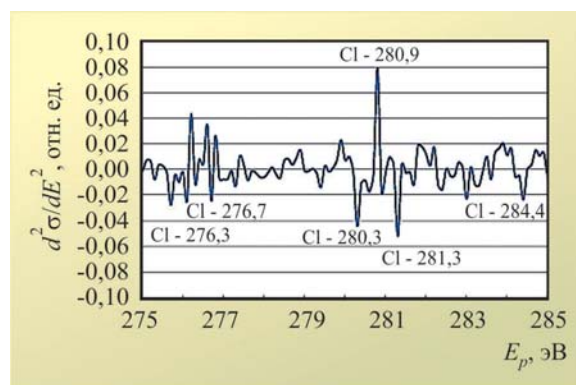


Рис. 9. Спектр СПП в интервале 275...285 эВ

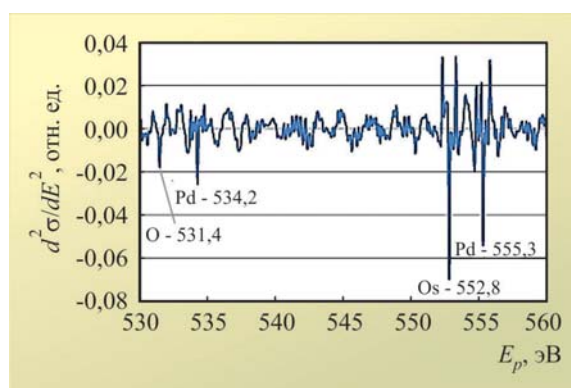


Рис. 10. Спектр СПП в интервале 530...560 эВ

**Библиотека спектров потенциалов появления элементов
из состава катодов**

| Атом | Уровень | Энергия связи, эВ (фаза) | | |
|---------------------------|-----------------------|---------------------------|---|---|
| | | Элемент [4] | Поверхность | Объем |
| Ba | 4d _{3/2} | 40 | 39,7 (BaO) | 41,0 (BaO) |
| | | | 40,8 (BaO ₂) | 42,3 (BaO ₂) |
| | 4s _{1/2} | 90 | 87,7 (BaO) | 89,0 (BaO) |
| | 3p _{3/2} | 192 | 193,9 (BaO) | 196,3 (BaO) |
| | | | 195,2 (BaO ₂) | 198,1 (BaO ₂) |
| | 3p _{1/2} | 253 | 252,3 (BaO) | 254,4 (BaO) |
| 253,4 (BaO ₂) | | | 256,5 (BaO ₂) | |
| Ca | 4s _{1/2} | 44 | 42,9 (CaO) | 43,2 (CaO) |
| | 2p _{1/2} | 350 | 350,7 (CaO) | – |
| Sr | 4s _{1/2} | 38 | 37,4 (SrO) | 37,8 (SrO) |
| Sc | 3p _{1/2,3/2} | 32 | 32,5 (Sc ₂ O ₃) | – |
| | 2p _{3/2} | 402 | 404,1 (Sc ₂ O ₃) | – |
| | 2p _{1/2} | 407 | 408,7 (Sc ₂ O ₃) | – |
| Y | 2p _{1/2} | 313 | 314,2 (Y ₂ O ₃) | 414,6 (Y ₂ O ₃) |
| La | 2p _{3/2} | 206 | 210,5 (La ₂ O ₃) | – |
| Mo | 4p _{1/2,3/2} | 35 | 43,0 (MoO ₂) | 34,6 (MoO ₂) |
| | | | 34,2 (MoO ₃) | 35,6 (MoO ₃) |
| | 3d _{3/2} | 227 | 230,8 (MoO ₂) | 231,8 (MoO ₂) |
| | | | 231,4 (MoO ₃) | 232,5 (MoO ₃) |
| | 3d _{3/2} | 230 | 235,6 (MoO ₃) | 236,0 (MoO ₃) |
| 3p _{3/2} | 293 | 293,2 (MoO ₃) | – | |
| W | 4s _{1/2} | 246 | 244,2 (WO ₂) | 245,2 (WO ₂) |
| | | | 244,6 (WO ₃) | 245,9 (WO ₃) |
| | 3d _{3/2} | 426 | – | 433,9 (WO ₃) |
| Re | 4d _{3/2} | 83 | 84,1 (Re ₂ O ₇) | – |
| | 3d _{3/2} | 445 | – | 446,6 (Re ₂ O ₇) |
| Pd | 3s _{1/2} | 335 | 336,1 (PdO) | 338,7 (PdCl ₂) |
| | 2p _{1/2} | 531 | – | 534,3 (PdCl ₂) |
| | 2s _{1/2} | 547 | 555,3 (Pd) | – |
| Os | 3d _{3/2} | 469 | – | 477,9 (OsO ₂) |
| | 3p _{3/2} | 547 | – | 552,8 (OsO ₂) |
| Ni | 3s _{1/2} | 112 | 112,7 (Ni) | 1154,4 (Ni) |
| | | | 115,4 (NiO) | 116,1 (NiO) |
| Al | 2s _{1/2} | 118 | 121,0 (Al ₂ O ₃) | 122,8 (Al ₂ O ₃) |
| K | 3s _{1/2} | 34 | 33,1 (K ₂ O) | – |
| | 2s _{1/2} | 377 | 378,0 (K ₂ O) | – |
| Na | 2p _{1/2,3/2} | 31 | 31,7 (Na ₂ O) | – |

Продолжение таблицы

| Атом | Уровень | Энергия связи, эВ (фаза) | | |
|----------------|------------|--------------------------|--|--------------------|
| | | Элемент [4] | Поверхность | Объем |
| Cl | $2p_{1/2}$ | 202 | 202,9 (Cl) | 203,3 (Cl) |
| | $2s_{1/2}$ | 270 | 267,5 (Cl) | – |
| 276,3 (Cl – O) | | | 276,7 (Cl – O) | |
| P | $2p_{1/2}$ | 136 | 140,4 (P_2O_3) | 142,6 (P_2O_3) |
| | $2s_{1/2}$ | 189 | 189,6 (P) | – |
| Si | $2p_{3/2}$ | 99 | 99,0 (Si) | 103,8 (SiO_2) |
| | $2s_{1/2}$ | 149 | 146,5 (Si) | 147,5 (Si) |
| | | | 149,5 (SiO) | 155,4 (SiO) |
| | | | 152,7 (SiO_2) | 157,7 (SiO_2) |
| C | $1s_{1/2}$ | 284 | 280,3 (C) | 284,4 (C) |
| | | | 280,9 (MoC) | 281,3 (MoC) |
| S | $2p_{1/2}$ | 165 | 164,3 (S) | 173,2 (S – O) |
| O | $1s_{1/2}$ | 532 | 531,4 (O) | – |
| Ar | $2s_{1/2}$ | 320 | 322,1; 322,7; 323,1; 323,8 (Ar – Me – O) | |

Известно [5], что при энергии электронов 30...100 эВ их глубина проникновения в твердое тело без рассеяния составляет 4...5 Å, то есть первичные электроны в данном диапазоне энергий будут зондировать только первый и второй монослой материала, которые условно можно назвать поверхностью и объемом материала. При росте энергии электронов до 500 эВ глубина их проникновения возрастает до 7...8 Å, то есть первичные электроны будут зондировать первый монослой (поверхность) и второй – третий монослой (объем). При этом высокая чувствительность к первому монослою остается. Кроме того, так как каждый электронный уровень при наличии окружения из других химических элементов или нахождении его на поверхности сдвигается по-разному, то при расшифровке пиков в спектре СПП учитывали следующие обстоятельства:

- если элемент находится в верхнем монослое, то энергия связи электронов на уровнях уменьшается, но тем меньше, чем глубже уровень;
- если рядом с элементом находится более электроотрицательный элемент, то энергия связи электронов на уровнях увеличивается также в зависимости от глубины уровня;
- если рядом с элементом находится более электроположительный элемент, то энергия связи электронов на уровнях уменьшается также в зависимости от глубины уровня.

Ниже рассмотрим особенности регистрации химических элементов, характерные для различных типов катодных материалов, методом СПП.

Барий, кальций, стронций. Данные элементы входят в состав большинства катодных материалов. Их появление на поверхности тестового образца молибдена связано с перепылением с оксидно-никелевых и металлопористых катодов, которые нагревали до 1200 °С при термоэмиссионных измерениях. Метод СПП позволяет надежно разделять поверхностные атомы указанных элементов и атомы в объеме (втором – третьем монослое) пленки на поверхности тестового образца по химическим сдвигам как «мелких», так и «глубоких» электронных уровней указанных элементов.

Скандий, иттрий, лантан. Появление скандия на поверхности тестового образца обусловлено перепылением его с катода электронной пушки измерительного блока и с поверхности скандатных катодов, термоэмиссия которых была исследована в других держателях образцов, а иттрия и лантана – с поверхности исследованных катодных материалов, содержащих оксиды указанных элементов. Метод СПП также позволяет надежно регистрировать химические сдвиги электронных уровней указанных элементов в состояниях на поверхности и в объеме материала.

Молибден. Данный элемент является основой материала тестового образца. Метод СПП позволяет надежно регистрировать химические состояния данного элемента в объеме и на поверхности пленки, в частности различать оксиды MoO_2 и MoO_3 .

Вольфрам, рений, палладий, осмий, никель, алюминий на поверхности тестового образца являются продуктами перепыления с оксидно-никелевых, металлопористых, палладий-бариевых, осмированных катодов и катодов, содержащих интерметаллид Re_2Sc . Данные СПП по палладию для уровня $3s_{1/2}$ с погрешностью 0,1 эВ совпадают с полученными нами методом ЭСХА.

Калий и натрий. Калий является микропримесью в молибдене, обусловленной особенностями технологии его промышленного производства. Натрий мог появиться на поверхности тестового образца при монтаже в держатель.

Хлор на поверхности тестового образца является следами применения трихлорэтилена при его обезжиривании (проведено намеренно для исследования чувствительности СПП к хлору).

Фосфор. Источник появления его на поверхности тестового образца не установлен.

Кремний, углерод, сера. Их следы на поверхности тестового образца обусловлены намеренным применением масляного форвакуумного насоса для предварительной откачки вакуумной системы при некоторых циклах измерения термоэмиссионных свойств материалов.

Кислород. Его наличие в спектрах СПП обусловлено тем, что кислород входит в состав всех оксидных фаз на поверхности тестового образца. Низкая интенсивность пика кислорода обусловлена низкой плотностью электронных состояний на $1s_{1/2}$ электронном уровне кислорода.

Аргон. Высоковакуумная откачка вакуумной системы осуществляется магниторазрядным насосом с относительно низкой скоростью откачки по аргону, чем и обусловлено появление адсорбированных атомов аргона на поверхности тестового образца. Так как все химические элементы на поверхности тестового образца являются по отношению к аргону электроотрицательными элементами, это и приводит к появлению нескольких пиков, сдвинутых вправо.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Метод спектроскопии потенциалов появления при реализации цифровой методики регистрации спектров СПП обладает чувствительностью к первому и второму – третьему монослоям поверхности материала, разрешением по положению пиков СПП на уровне 0,2 эВ для «мелких» и 0,1 эВ для «глубоких» электронных уровней и позволяет регистрировать химические сдвиги электронных уровней, то есть обладает чувствительностью к фазовому составу поверхности материала.

2. Создана библиотека спектров СПП (положение электронных уровней) для химических элементов, характерных для основных типов катодных материалов: оксидно-никелевых, металлопористых, металлопористых осмированных, скандатных, палладий-бариевых, материалов на основе оксидов иттрия и лантана.

3. Создана библиотека спектров СПП (положение электронных уровней) для химических элементов, которые могут появляться на поверхности катодов на этапах их изготовления: калия, натрия, хлора, фосфора, кремния, углерода, серы.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Webb, C.** Appearance potential spectroscopy of layer materials / C. Webb, P. M. Williams // Surf. Sci. – 1975. – Vol. 53, No 110. – P. 110 – 120.
2. **Савицкий, Е. М.** Высоковакуумная разборная установка для автоматического определения термо- и вторично-эмиссионных свойств материалов / Е. М. Савицкий, И. В. Буров, В. И. Капустин // Сплавы редких металлов с особыми физико-химическими свойствами. – М.: Наука, 1975. – С. 148 – 152.
3. **Савицкий, Е. М.** Установка для автоматической регистрации коэффициента вторичной электронной эмиссии металлических материалов / Е. М. Савицкий, И. В. Буров, В. И. Капустин // Приборы и техника эксперимента. – 1977. – № 2. – С. 169 – 171.
4. **Зигбан, К.** Электронная спектроскопия / К. Зигбан, К. Нордлинг, А. Фальман и др.; пер. с англ. под ред. И. Б. Боровского. – М.: Мир, 1971. – 496 с.
5. Электронная и ионная спектроскопия твердых тел / Под редакцией Л. Филмэнса, Дж. Вэнника, В. Декейсера; пер. с англ. под ред. В. И. Раховского. – М.: Мир, 1981. – 468 с.

Статья поступила 21 декабря 2020 г.

=== НОВЫЕ КНИГИ ===

ГРИБАНОВ А. Н., КУЗНЕЦОВ И. А., КУРУШИН А. А. Асимптотические методы электродинамики. – М.: СОЛОН-Пресс, 2020. – 336 с.

Методы геометрической и физической оптики, а также равномерной теории дифракции позволяют расширить возможности тестовой электродинамической системы ANSYS HFSS при моделировании антенных систем, размеры которых составляют десятки и сотни длин волн. Несколько программ было добавлено в систему ANSYS, в том числе программы Savant, EMIT и др.

Предлагаемое учебное пособие предназначено для начальных шагов освоения программы студентами и специалистами СВЧ. Может служить хорошим дополнением к уже опубликованным книгам, посвященным САПР СВЧ.

УДК 576:532.59

МИКРОВОЛНОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ СПОСОБНО СТИМУЛИРОВАТЬ ДВИЖЕНИЕ ВНУТРИКЛЕТОЧНОЙ ЖИДКОСТИ

К. Д. Казаринов, И. Г. Полников

ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, г. Фрязино

Представлены результаты экспериментов на нативных и искусственных мембранных системах, демонстрирующие влияние микроволн низкой интенсивности на движение потоков жидкости в экспериментах *in vitro*. Биологическая значимость полученных результатов подтверждается современными представлениями о наличии конвективных потоков в цитоплазме, возникающих под влиянием тепловой неоднородности.

КС: микроволны, сетевой стандарт 5G, биоэффекты микроволн, механизм биологического действия микроволнового излучения, конвективное движение цитоплазмы

MICROWAVE RADIATION IS ABLE TO STIMULATE THE MOTION OF INTRACELLULAR FLUID

K. D. Kazarinov, I. G. Polnikov

FIRE named after V.A. Kotelnikov, RAS, Fryazino

The results of experiments on native and artificial membrane systems are presented, demonstrating the effect of low-intensity microwaves on the movement of fluid flows in *in vitro* experiments. The biological significance of the obtained results is confirmed by modern concepts of the availability of convective flows in the cytoplasm, arising under the influence of thermal inhomogeneity.

Keywords: microwaves, 5G network standard, bioeffects of microwaves, mechanism of biological action of microwave radiation, convective movement of cytoplasm

1. ВВЕДЕНИЕ

Документ Еврокомиссии по оперативному созданию сетей 5G нацелен на коммерческое крупномасштабное развертывание нового формата не позднее конца 2020 года. Несколько стран планируют предварительные эксперименты, направленные на тестирование системы на частотах 6 ГГц, после чего произойдет внедрение частот, превышающих 30 ГГц (КВЧ-излучение). Сети 5G будут обеспечивать связь для повышенного количества устройств: около 1 миллиона приборов на 1 км². Такая плотность подключения устройств должна быть обеспечена увеличением количества установленных антенн, которые никогда ранее не использовались в таких масштабах. Хотя стандартизованные уровни воздействия микроволновых электромагнитных полей не должны превышать допустимых пределов, принятых в европейских странах, реальное воздействие на здоровье новых коммуникационных технологий активно обсуждается общественностью [1–2].

Анализ известных литературных данных подтвердил способность микроволнового излучения вызывать окислительный стресс в организме человека за счет увеличения продукции активных форм кислорода [3–5]. При этом необходимо отметить, что биологические эффекты были также зарегистрированы при уровнях воздействия ниже нормативных пределов, что вызывает дополнительные опасения и растущие сомнения в безопасности применяемых стандартов [6–7]. Доказательства пагубного действия микроволнового излучения на биологические объекты постепенно накапливаются, и они, хотя в некоторых случаях все еще являются предварительными или противоречивыми, ясно указывают на существование многоуровневых взаимодействий между излучением и биологическими системами [8]. Проведенный анализ экспериментальных результатов изучения биологической чувствительности микроволнового излучения низкой интенсивности показал также отсутствие устойчивой зависимости между интенсивностью, частотой излучения, продолжительностью воздействия и обнаруженными эффектами [9]. Авторы данной работы указывают на то, что существует потребность в исследованиях, касающихся локального нагрева небольших поверхностей, например, кожи или глаз. Анализ ситуации показывает, что, для того чтобы будущие исследования были полезны для оценки безопасности, необходимо значительно улучшить планирование экспериментов и их реализацию, которую можно было бы воспроизвести в других опытах.

Микроволновое излучение все чаще признается новой формой загрязнения окружающей среды. Как и в случае с другими распространенными токсическими воздействиями, изучение воздействия электромагнитного излучения на здоровье людей может столкнуться с определенными трудностями в эпидемиологическом плане, так как больше не остается не подвергавшейся воздействию контрольной группы людей. Поскольку это первое поколение людей, которые на протяжении всей жизни подвергались воздействию микроволнового излучения промышленного происхождения, то истинные последствия для здоровья последующих поколений станут известны спустя многие годы [10]. Учитывая сложность вопроса оценки экспериментальных данных изучения биологической чувствительности микроволн, полученных различными авторами, становится еще более актуальной задача изучения первичных механизмов возможных эффектов воздействия электромагнитного излучения. Тогда, несмотря на сложность общей картины взаимодействия микроволн с организмом человека, можно будет определить на физическом уровне первичное звено восприятия излучения биологической системой.

2. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В живых клетках диффузия и направленный транспорт белков считаются основными движущими силами перемещения внутриклеточной жидкости. Вызывает интерес гипотеза о том, что конвективный поток, стимулированный градиентом температуры, может играть значительную роль во внутриклеточном движении ионов, молекул и органелл, вызывая внутриклеточное перемешивание и выступая в качестве дополнительного механизма переноса. Литературные данные последних лет показывают, что конвективные эффекты в клетках действительно могут иметь место. Хотя конвекция традиционно не считалась важной движущей силой перемещения внутриклеточной жидкости, в свете недавних наблюдений значительных внутриклеточных градиентов температуры была проведена более тщательная оценка этого механизма.

Сообщалось о работах по обнаружению направленного движения внутриклеточной жидкости не только в клетках растений и грибов [11], но и в клетках млекопитающих [12] при исследо-

ваниях в области репродуктивной биологии и регенеративной медицины. Было установлено, что в клетке существуют области локального нагрева, которые создают условия для образования градиента плотности в цитоплазме, а следовательно, и возможность конвективной циркуляции.

В последнее время большое внимание исследователей привлекали флуоресцентные термодатчики, которые функционируют как термометры в живых клетках. Эти новые инструменты, содержащие чувствительные к температуре молекулы, позволили проводить внутриклеточную термометрию. С помощью флуоресцентных термодатчиков были обнаружены интригующие пространственно-временные колебания температуры органелл клетки [13–16].

Результаты измерения внутриклеточной температуры с высоким разрешением показали, что ядро клетки и специфические органеллы представляют собой локальные источники тепла, запускающие процесс изменений температуры цитоплазмы [17–18]. В ядре репликация ДНК, транскрипция и процессинг РНК могут вносить вклад в локальный термогенез [19]. В митохондриях локальное тепловыделение, вероятно, является результатом активного энергетического метаболизма [20].

В работе [21] предпринята попытка с помощью трехмерного компьютерного моделирования оценить движение цитозольной жидкости в пределах клеточного пространства, что позволило визуализировать результирующее поле течения цитоплазмы и вычислить скорости, характеризующие конвективное движение. Такой подход был необходим для оценки теоретической возможности преобладания температурной конвективной циркуляции над случайным диффузионным движением в клетке.

Известно, что 70 % клеточного объема составляет вода [22–23], и на этом основании использовались значения коэффициента теплового расширения, теплопроводности и удельной теплоемкости воды для оценки объемных свойств цитозольной жидкости. Ранее было обнаружено, что коэффициенты диффузии мелких частиц находятся в диапазоне $1 \dots 150 \text{ мкм}^2/\text{с}$ [24]. Предполагалось, что для более крупных везикул в цитоплазме движение будет незначительным при отсутствии активных транспортных механизмов из-за наблюдаемых низких скоростей диффузии. Кроме того, характер и скорость потока, вероятно, будут зависеть от размера и формы клетки, местоположения ядра, а также температуры и распределения митохондрий или другого местного источника тепла. В любом случае представленные данные значительных температурных различий между цитоплазмой, ядром и митохондриями [20] оказались достаточными для теоретических исследований внутриклеточного транспорта по конвективному механизму.

Учитывалось, что кластеризация митохондрий связана как с увеличением количества активных форм кислорода (АФК), так и с АТФ-зависимым синтезом белка, который, как известно, происходит в быстро делящихся клетках [25–26].

Результаты расчета конвективного движения жидкости цитозоля в клетке при использовании выбранной модели показали, что при температуре ядра, равной температуре внешней клеточной мембраны ($37 \text{ }^\circ\text{C}$), поток остается неподвижным. При температуре ядра всего лишь $37,1 \text{ }^\circ\text{C}$ максимальные скорости конвективных потоков могут достигать $0,003 \text{ мкм}/\text{с}$. При $38 \text{ }^\circ\text{C}$ эти скорости становятся $0,03 \text{ мкм}/\text{с}$. Если локальная ядерная температура $50 \text{ }^\circ\text{C}$ будет биологически возможной, то станет реальной скорость потока до $0,39 \text{ мкм}/\text{с}$. Вопрос заключается в том, позволяют ли скорости потоков цитозоля такой величины конкурировать с диффузией и может ли этот конвективный поток потенциально способствовать клеточному транспорту, метаболизму и общему функционированию клеток? Например, для размеров клетки 10 мкм и скорости

потока 0,01 мкм/с вещества с коэффициентом диффузии менее 0,1 мкм²/с могут подвергаться влиянию внутренней циркуляции. Учитывая диапазон коэффициентов диффузии, описанный в литературе, можно говорить о том, что активный перенос за счет конвекции может иметь смысл даже в небольших клетках [21].

При экспериментальном исследовании биологического действия КВЧ-облучения на модельные мембранные системы нами был установлен конвективный механизм обнаруженных эффектов ускорения мембранного транспорта [27]. Было показано, что КВЧ-излучение способно стимулировать ионную проницаемость бимолекулярных липидных мембран (БЛМ) в том случае, если узким местом процесса переноса становится стадия проводимости в примембранных неперемешиваемых слоях. Эффект КВЧ-облучения проявлялся только в случае модифицированных БЛМ (рис. 1), у которых ионная проводимость была увеличена за счет введения селективных индукторов ионного транспорта (валиномицина или 2,4-динитрофенола). Включение КВЧ-облучения обратимо снижало сопротивление БЛМ, и этот эффект возрастал при увеличении разности потенциалов, приложенной к мембране.

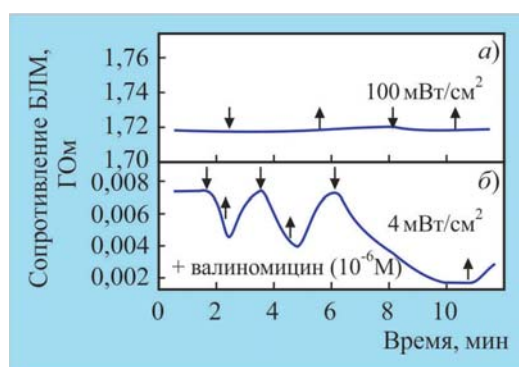


Рис. 1. Изменение электрического сопротивления БЛМ при КВЧ-облучении:
 а – немодифицированная БЛМ; б – БЛМ, модифицированная валиномицином (10^{-6} М);
 стрелками показано включение (вниз) и выключение (вверх) КВЧ-облучения,
 длина волны облучения – 8,5 мм

Явление вынужденной конвекции было обнаружено нами при исследовании ряда мембранных модельных и нативных систем в водных средах в условиях КВЧ-облучения: процессов перекисного окисления липидов, транспорта ионов кожей лягушки, лизиса дрожжевых клеток и др. [28].

В наших экспериментах было обнаружено, что КВЧ-излучение низкой интенсивности увеличивает выход из клеток в среду продуктов нуклеопротеидной природы с максимумом поглощения 260 нм. Дозовая зависимость (рис. 2) показывает проявление эффекта при интенсивности облучения порядка 1 мВт/см² и отсутствие зависимости от мощности излучения при интенсивности 10 мВт/см². Возможно, в данном случае ускорение лизиса при фотохимическом процессе связано с ускорением процесса переноса продуктов реакции в водной фазе под действием КВЧ-излучения. В пользу такого предположения свидетельствуют данные о таком же увеличении лизиса дрожжевых клеток при механическом перемешивании суспензии, а также сведения о важности гидродинамических эффектов при фотолизе везикулярных структур [27].

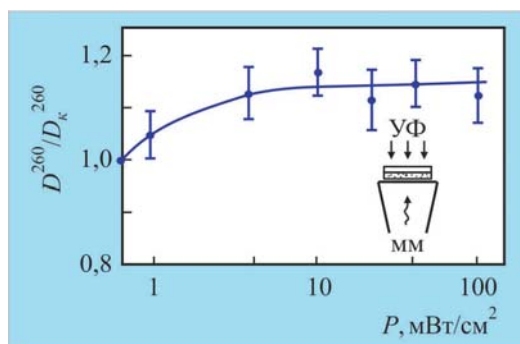


Рис. 2. Зависимость степени фотоллиза клеток от интенсивности СВЧ-облучения. Оптическая плотность надосадочной жидкости для препарата, который не облучался СВЧ, принята за 1, длина волны облучения – 8,5 мм

С учетом вышеизложенного можно попытаться объяснить эффекты СВЧ-излучения в экспериментах с участием химических реакций в мембранах, учитывая возможность доставки реагентов к месту реакции. Например, скорость накопления продуктов перекисного окисления липидов (ПОЛ) в суспензии липосом [29]. В результате окисления фосфолипидов увеличивается проницаемость мембран для ионов и других важных биологических веществ (один из механизмов патологии клетки). Независимо от способа инициирования окисления липидов модельных мембран и метода физико-химического контроля эффекта, СВЧ-излучение приводило к ускорению процессов ПОЛ и дозовая зависимость имела пороговый характер от значений ниже 1 мВт/см². Предполагается, что данный эффект связан с увеличением скорости доставки кислорода к месту реакции ПОЛ.

Визуальные методы наблюдения позволили нам обнаружить перемещение слоев воды вблизи поверхности, на которую падает микроволновое излучение. Наблюдалось под микроскопом движение взвешенных в воде частиц, например эритроцитов в физиологическом растворе в тонкой кварцевой кювете, облучаемой микроволнами. Также была обнаружена конвекция в воде, стимулированная СВЧ-излучением, вблизи плоской вертикальной стенки кварцевой кюветы. Вода была помечена следами от капель туши.

Наиболее интересные результаты по обнаружению конвекции нами были получены при изучении кинетических особенностей реакций обратимой фотодимеризации акридина [30]. Микроволновое излучение интенсивностью 20 мВт/см² усиливало распад димеров, а дальнейшее повышение интенсивности облучения до 50 мВт/см² приводило к качественно новому явлению: наблюдались затухающие колебания интенсивности люминесценции с периодом в несколько минут. Наблюдаемые явления мы связывали с изменением режима вынужденной конвекции водного раствора в измерительной ячейке.

Аналогичные результаты были представлены в экспериментальной работе [31], выполненной в Филадельфийском центре биомедицинской физики и посвященной изучению конвекции в водном растворе малой толщины при СВЧ-облучении. Авторы данной работы наблюдали колебания температуры в фиксированной точке объема водного раствора при поглощении СВЧ-излучения различной интенсивности. При увеличении мощности микроволнового излучения температура вначале монотонно возрастала, затем наблюдался колебательный процесс изменения температуры водной среды в наблюдаемой точке, который мог при определенных условиях

(при увеличении скорости конвективного движения воды и теплообмена в экспериментальной кювете) привести даже к некоторому снижению температуры. В то же время следует отметить, что в условиях этих же экспериментов в кювете, заполненной гелем (т. е. при отсутствии режима вынужденной конвекции среды), температура облучаемого объекта монотонно повышалась, выходя на плато через время, равное приблизительно 40 мин после начала облучения [31].

В наших исследованиях движения водного раствора в экспериментальной кювете с помощью оптических методов были получены оценки скорости воды (термокапиллярная конвекция) при КВЧ-облучении границы жидкости. Точка касания светлым слоем пограничного слоя жидкости за время 1 мин перемещалась на 0,9 мм (15 мкм/с), что указывало на изменившееся распределение температуры и течение воды при падающей мощности микроволнового излучения около 5 мВт/см². В других экспериментах при КВЧ-облучении потоков водных растворов в капилляре мы установили зависимость скорости потока от интенсивности КВЧ-облучения [32]. Таким образом, было установлено, что КВЧ-излучение способно ускорять водные потоки в эксперименте *in vitro* и это увеличение связано, скорее всего, с изменением температуры пограничного слоя воды в капилляре.

Работа выполнена в рамках госзадания ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенные в данной работе результаты экспериментальных исследований показывают возможность регулирования с помощью КВЧ-облучения низкой интенсивности скорости потоков водных растворов в модельных биологических объектах *in vitro*, а многочисленные данные об обнаруженных эффектах движения внутриклеточной цитоплазматической жидкости при наличии градиентов температуры, создаваемых ядром клетки, митохондриями и другими внутриклеточными источниками тепла, подтверждают такую возможность в экспериментах *in vivo*.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Sagar, S.** Radiofrequency electromagnetic field exposure in everyday microenvironments in Europe: A systematic literature review / S. Sagar, S. Dongus, A. Schoeni et al. // *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology*. – 2017.
2. **Urbiniello, D.** Radiofrequency electromagnetic field (RF-EMF) exposure levels in different European outdoor urban environments in comparison with regulatory limits / D. Urbiniello, W. Joseph, A. Huss et al. // *Environment International*. – 2014. – Vol. 68. – P. 49 – 54.
3. **Kazemi, E.** Effect of 900 MHz electromagnetic radiation on the induction of ROS in human peripheral blood mononuclear cells / E. Kazemi, S. M. Mortazavi, Ali-Ghanbari A. et al. // *Journal of Biomedical Physics & Engineering*. – 2015. – Vol. 5, No 3. – P. 105 – 114.
4. **Sun, Y.** Mitochondrial DNA damage and oxidative damage in HL-60 cells exposed to 900 MHz radiofrequency fields / Y. Sun, L. Zong, Z. Gao, S. Zhu, J. Tong, Y. Cao // *Mutation Research*. – 2017. – No 797 – 799. – P. 7 – 14.
5. **Chauhan, P.** Microwave radiation (2.45 GHz)-induced oxidative stress: whole-body exposure effect on histopathology of wistar rats / P. Chauhan, H. N. Verma, R. Sisodia, K. K. Kesari // *Electromagnetic Biology and Medicine*. – 2017. – Vol. 36, No 16. – P. 20 – 30.
6. **Starkey, S. J.** Inaccurate official assessment of radiofrequency safety by the advisory group on nonionising radiation / S. J. Starkey // *Reviews on Environmental Health*. – 2016. – Vol. 31, No 4. – P. 493 – 503.

7. **Redmayne, M.** International policy and advisory response regarding children's exposure to radio frequency electromagnetic fields (RF-EMF) / M. Redmayne // *Electromagnetic Biology and Medicine*. – 2016. – Vol. 35, No 2. – P. 176 – 185.
8. **Ciaula, Di.** 5G communication systems: Are there health implications? / Di. Ciaula, A. Towards // *Int. J. Hyg. Environ. Health*. – 2018. – № 221(3). – P. 367 – 375.
9. **Simko, M.** 5G wireless communication and health effects – a pragmatic review base on available studies regarding 6 to 100 GHz / M. Simko, M.-O. Mattsson // *Int. Environ. Res. Public Health*. – 2019. Sep 13. – Vol. 16(18). – P. 3406.
10. **Russell, C. L.** 5G wireless telecommunications expansion: public health and environmental implications / C. L. Russell // *Environ. Res.* – 2018, Aug. – Vol. 165. – P. 484 – 495.
11. **Shimmen, T.** Cytoplasmic streaming in plants / T. Shimmen, E. Yokota // *Curr. Opin. Cell. Biol.* – 2004. – Vol. 16, No 1. – P. 68 – 72.
12. **Parte, S.** Dynamics associated with spontaneous differentiation of ovarian stem cells in vitro / S. Parte et al. // *J. Ovarian Res.* – 2014. – No 7. – P. 25.
13. **Okabe, K.** Intracellular thermometry with fluorescent sensors for thermal biology / K. Okabe, R. Sakaguchi, B. Shi, S. Kiyonaka // *Pflugers. Arch.* – 2018. – Vol. 470, No 5. – P. 717 – 731.
14. **Voets, T.** Sensing with TRP channels / T. Voets, K. Talavera, G. Owsianik, B. Nilius // *Nat. Chem. Biol.* – 2005. – Vol. 1, No 2. – P. 85 – 92.
15. **Takeuchi, K.** Changes in temperature preferences and energy homeostasis in dystroglycan mutants / K. Takeuchi, Y. Nakano, U. Kato, M. Kaneda, M. Aizu, W. Awano, S. Yonemura, S. Kiyonaka, Y. Mori, D. Yamamoto, M. Umeda // *Science*. – 2009. – Vol. 323 (5922). – P. 1740 – 1743.
16. **Oyama, K.** Single-cell temperature mapping with fluorescent thermometer nanosheets / K. Oyama, M. Gotoh, Y. Hosaka, T. G. Oyama, A. Kubonoya et al. // *J. Gen. Physiol.* – 2020, Aug 3. – Vol. 152(8):e201912469.
17. **Tsuji, T.** Difference in intracellular temperature rise between matured and precursor brown adipocytes in response to uncoupler and β -adrenergic agonist stimuli / T. Tsuji, K. Ikado, H. Koizumi, K. Kajimoto // *Scientific Reports*. – 2017. – No 7. – P. 12889.
18. **Uchiyama, S.** A cationic fluorescent polymeric thermometer for the ratiometric sensing of intracellular temperature / S. Uchiyama et al. // *Analyst*. – 2015. – Vol. 140, No 13. – P. 4498 – 4506.
19. **Lamond, A. I.** Structure and function in the nucleus / A. I. Lamond, W. C. Earnshaw // *Science*. – 1998. – Vol. 280 (5363). – P. 547 – 553.
20. **Chretien, D.** Mitochondria are physiologically maintained at close to 50 degrees C / D. Chretien et al. // *PLoS Biol.* – 2018. – Vol. 16(1):e2003992.
21. **Howard, R.** Cytoplasmic convection currents and intracellular temperature gradients / R. Howard, A. Scheiner, J. Cunningham, R. Gatenby // *PLoS Comput. Biol.* – 2019, Nov. – Vol. 15 (11).
22. **Luby-Phelps, K.** Cytoarchitecture and physical properties of cytoplasm: volume, viscosity, diffusion, intracellular surface area / K. Luby-Phelps // *Int. Rev. Cytol.* – 2000. – Vol. 192. – P. 189 – 221.
23. **Luby-Phelps, K.** A novel fluorescence ratiometric method confirms the low solvent viscosity of the cytoplasm / K. Luby-Phelps et al. // *Biophys. J.* – 1993. – Vol. 65, No 1. – P. 236 – 242.
24. **Milo, R.** BioNumbers – the database of key numbers in molecular and cell biology / R. Milo, P. Jorgensen, U. Moran, G. Weber, M. Springer // *Nucleic. Acids. Res.* – 2010. – 38 (Database issue).
25. **Al-Mehdi, A. B.** Perinuclear mitochondrial clustering creates an oxidant-rich nuclear domain required for hypoxia-induced transcription / A. B. Al-Mehdi et al. // *Sci. Signal.* – 2012. – Vol. 5 (231). Doi:ra47 10.1126/scisignal.2002712.
26. **Berdanier, C. D.** Mitochondria in health and disease / C. D. Berdanier. – 2005. (Taylor & Francis/CRC Press, Boca Raton, FL:) pp xix. – 619 p.
27. **Казаринов, К. Д.** Исследование мембранотропной активности ЭМИ в широком диапазоне длин волн / К. Д. Казаринов // *Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника*. – 2018. – Вып. 2 (537). – С. 62 – 75.

28. **Kazarinov, K. D.** Interface convection in water as a primary mechanism of extra high frequency irradiation / K. D. Kazarinov, A. V. Putvinsky, V. S. Malinin // *Electricity and Magnetism in Biology and Medicine: Plenum publishing corporation*. N.Y. 1999. – P. 441 – 444.

29. **Казаринов, К. Д.** Воздействие электромагнитные полей микроволнового диапазона модифицирует сверхслабое свечение продуктов жизнедеятельности клеток / К. Д. Казаринов, А. В. Чеканов // *Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]*. – 2019, март. – № 3. – С.1 – 29.

30. **Дремина, Е. С.** Изучение действия микроволнового излучения на фотохимические процессы биомолекул в водных растворах / Е. С. Дремина, В. С. Шаров, И. Г. Полников, К. Д. Казаринов // *Электронная техника. Сер.1. СВЧ-техника*. – 2010.– № 3. – С. 57 – 63.

31. **Khizhnjak, E. P.** Temperature oscillation in liquid media caused by continuous (nonmodulated) millimeter wavelength electromagnetic irradiation / E. P. Khizhnjak, C. Ziskin // *Bioelectromagnetics*. – 1996. – Vol. 17. – P. 223 – 229.

32. **Kazarinov, K. D.** A dielectric waveguide technique for investigating strongly absorbing liquids in the microwave band / K. D. Kazarinov, M. V. Gorodezkaya, I. G. Polnikov // VII International Congress «Low and Superlow Fields and Radiations in Biology and Medicine», Saint-Petersburg, 2015. *Sci proceedings*. – 2015.– Vol. 7. – P. 53.

Статья поступила 17 ноября 2020 г.

=== НОВЫЕ КНИГИ ===

ЛЯПИН Л. В. Многослойные керамические платы ГИС СВЧ-диапазона на основе ЛТСС: учеб. пособие / Л. В. Ляпин, В. А. Иовдальский; под ред. А. А. Борисова. – М.: КУРС, 2020. – 192 с.

Учебное пособие посвящено вопросам совершенствования конструкции и технологии изготовления многослойных печатных плат (МПП) ГИС СВЧ-диапазона на основе низкотемпературной совместно обжигаемой керамики (ЛТСС). Рассмотрены вопросы конструирования и технологии изготовления таких МПП и перспективы и преимущества их использования в современных радиоэлектронных устройствах СВЧ-диапазона.

Пособие предназначено для студентов Российского технологического университета (МИРЭА) очной, очно-заочной и заочной форм образования квалификации «бакалавр» и «магистр», обучающихся по направлениям 2.11.03.03, 2.11.04.03 «Конструирование и технология электронных средств» и по направлениям 2.11.03.04, 2.11.04.04 «Электроника и нанoeлектроника»; дисциплины: «Технология производства электронных средств», «Элементная база радиоэлектронных средств», «Основы проектирования электронной компонентной базы», «Технология электронной компонентной базы», аспирантов и повышения квалификации инженерно-технических работников радиотехнических специальностей.

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 51

«НЕПРОСТЫЕ» ПРОСТЫЕ ЧИСЛА

А. К. Балыко, Е. В. Терешкин, И. А. Балыко

АО «НПП «Исток» им. Шокина», г. Фрязино

Получены аналитические выражения для конечной суммы обратных величин простых чисел, их квадратов, кубов и т. д. Статистическим методом найдено распределение расстояний между двумя соседними простыми числами.

КС: простые числа, распределение расстояний между простыми числами

«NON-SIMPLE» PRIME NUMBERS

A. K. Balyko, E. V. Tereshkin, I. A. Balyko

JSC «RPC «Istok» named after Shokin», Fryazino

Analytical expressions are obtained for a finite sum of the primes reciprocals, their squares, cubes, etc. The distribution of distances between two adjacent primes was found by a statistical method.

Keywords: prime numbers, distribution of distances between prime numbers

1. «Простые числа принадлежат множеству натуральных чисел. Евклид определял простые числа так: простое число есть измеряемое только единицей. Иными словами, простые числа не имеют других делителей, кроме единицы и самого себя. Числа, не являющиеся простыми, называются составными. Составное число n можно представить в виде произведения: $n = p_1^{a_1} \cdot p_2^{a_2} \dots p_m^{a_m}$, где p_i – простые числа, $m \geq 1$, $i \geq 1$. Число простых чисел в натуральном ряду бесконечно. Первым простое доказательство этому дал Евклид. Положим, что ряд простых чисел ограничен и исчерпывается числами $2, 3, 5, \dots, p$; в таком случае число $N = 2 \cdot 3 \cdot 5 \cdot \dots \cdot p + 1$ не делится ни на 2, ни на 3, ... ни на p , так как при делении на каждое из этих чисел мы получаем в остатке единицу. Основная трудность в нахождении всех простых чисел состоит в том, что не удаётся установить закон распределения простых чисел. Количество простых чисел, не превосходящих N , обозначается $\pi(N)$. Величина $\pi(N)/N$ называется средней плотностью простых чисел среди первых N натуральных чисел. С ростом N простые числа встречаются всё реже и реже. Л. Эйлер доказал, что предел отношения $\pi(N)/N$ при $N \rightarrow \infty$ равен 0. В 1800 г. Ж. Лежандр и К. Гаусс высказали гипотезу, согласно которой, $\pi(N) \approx N/\ln N$ и приближение тем лучше, чем больше N . Например, для $N = 1000$ количество простых чисел по формуле оценивается как $1000/\ln 1000 = 145$, а количество простых чисел, меньших 1000, равно 168. Гипотеза Лежандра – Гаусса была строго доказана только через сто лет» [1, 2].

2. В работе [3] мы рассмотрели периодические дроби – обратные величины простых чисел p . В данной статье мы найдем их сумму. Для этого воспользуемся формулами Л. Эйлера [4, 5] для суммы гармонического ряда

$$\sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k} = \infty \quad (1)$$

и произведения величин $\frac{p}{p-1} = \frac{1}{1-\frac{1}{p}}$:

$$\prod_{p=2}^{\infty} \left(\frac{1}{1-\frac{1}{p}} \right) = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k}. \quad (2)$$

Формула для суммы гармонического ряда конечного (N) числа чисел натурального ряда была получена также Л. Эйлером:

$$\sum_{k=1}^N \frac{1}{k} \approx \ln N + C, \quad (3)$$

где $C = 0,5772\dots$ – постоянная Эйлера.

Используя эту формулу, произведение (2) запишем в виде

$$\prod_{p=2}^{\sqrt{N}} \left(\frac{1}{1-\frac{1}{p}} \right) \approx \sum_{k=1}^N \frac{1}{k} \approx \ln N + C. \quad (4)$$

Ключевой идеей при переходе в (2) от бесконечности к конечному числу N является то, что верхний предел в произведении (4) принят нами равным \sqrt{N} , поскольку, чтобы определить простое или составное число N , достаточно рассмотреть все простые делители от 2 до \sqrt{N} . Например, число $143 = 11 \cdot 13$. Его возможные простые делители, меньшие $\sqrt{N} = 11,95$, – это 2, 3, 5, 7, 11; последующие делители 13, 17, 19 и т. д. можно не рассматривать, поскольку они превосходят \sqrt{N} , а $13 = 143/11$.

Логарифмируя правую и левую части формулы (4), получим

$$-\sum_{p=2}^{\sqrt{N}} \ln \left(1 - \frac{1}{p} \right) \approx \ln(\ln N + C). \quad (5)$$

Разлагая выражение $\ln \left(1 - \frac{1}{p} \right)$ в ряд Тейлора по величинам $\frac{1}{p} < 1$ и ограничиваясь первым членом разложения, получим выражение для суммы обратных величин простых чисел в интервале от 2 до \sqrt{N} :

$$\sum_{p=2}^{\sqrt{N}} \frac{1}{p} \approx \ln(\ln N + C) - E_1. \quad (6)$$

В этой формуле мы отнесли к E_1 все члены разложения второго и более высоких порядков малости. Оценим E_1 , например, для $N = 400$: $\ln(400) = 5,9895$; $\ln(\ln 400 + C) = 1,8824$; $\sum_{p=2}^{19} \frac{1}{p} = 1,4555$, $E_1 = 0,427$. E_1 для других значений N приведены в табл. 1.

Таблица 1

Зависимость $E_1(N)$

| N | 200 | 300 | 400 | 1000 | 2000 | 5000 | 10000 | 40000 |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| E_1 | 0,426 | 0,434 | 0,427 | 0,436 | 0,445 | 0,462 | 0,468 | 0,475 |

В отличие от гармонического ряда (3), где постоянная Эйлера C не зависит от N , величина E_1 изменяется. На наш взгляд, это связано с тем, что у гармонического ряда (3) расстояния между последовательными натуральными числами одинаковы (равны 1), что и позволяет получить значение постоянной Эйлера $C = 0,5772\dots$, не изменяющееся с N . Расстояния же между простыми числами изменяются от 2 (для чисел-близнецов) до достаточно больших чисел. Эти расстояния между числами изменяются случайным образом, поэтому E_1 , вообще говоря, принимает случайные значения с небольшим отклонением от некоторой средней величины.

Рассмотрим зависимость E_1 от N в виде $E_1 = c + \frac{d}{\sqrt{N}}$ и найдем параметры c и d . Для чисел $N = 10000$ и $N = 40000$, используя данные табл. 1, получаем систему двух уравнений $46,8 = 100 \cdot c + d$ и $95,0 = 200 \cdot c + d$, решая которую, находим: $c = 0,482$, $d = -1,41$. В результате получаем формулу: $\sum_{p=2}^{\sqrt{N}} \frac{1}{p} \approx \ln(\ln N + C) - c - \frac{b}{\sqrt{N}}$. Если вместо N положить N^2 , то радикалы исчезнут и формула примет окончательный вид:

$$\sum_{p=2}^N \frac{1}{p} \approx \ln(\ln N + \frac{C}{2}) + a + \frac{b}{N}, \quad (7)$$

где $a = \ln 2 - c = 0,211\dots$, $b = -d = 1,41\dots$

Для $N = 500$ мы вычислили сумму в левой части формулы (7) $\sum_{p=2}^{499} \frac{1}{p} = 2,0959$, расчет правой части (7) дает $\ln\left(\ln 500 + \frac{0,5772}{2}\right) + 0,211 + \frac{1,41}{N} = 2,0856$. Видно, что относительная ошибка между правой и левой частями составляет порядка 0,5 %.

Формула (7) для суммы обратных величин простых чисел конечного ряда отсутствует во всех известных авторам справочниках и монографиях [6–12].

3. Сумма (7) при $N \rightarrow \infty$ стремится к бесконечности, то есть ряд обратных величин простых чисел, как и гармонический ряд (3), расходится. Ряды обратных величин целых степеней (больших 1) натуральных чисел все сходящиеся, то есть их суммы имеют конечную величину при $N \rightarrow \infty$. Этому же стоит ожидать и от аналогичных рядов простых чисел. Применим приведенный выше метод для определения сумм степеней обратных величин простых чисел.

Для этого используем общую формулу Эйлера [4, 5]

$$\prod_{p=2}^{\infty} \frac{1}{\left(1 - \frac{1}{p^s}\right)} = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k^s} = \zeta(s), \quad (8)$$

где $\zeta(s)$ – функция Римана.

Для четных s известны аналитические выражения: $\zeta(2) = \pi^2/6$; $\zeta(4) = \pi^4/90$; $\zeta(6) = \pi^6/945$; $\zeta(8) = \pi^8/9450$ и т. д.; эти выражения однозначно связаны с числами Бернулли B_n . Для нечетных s известны численные значения сумм: $\zeta(3) = 1,2020569032\dots$; $\zeta(5) = 1,0369277551\dots$; $\zeta(7) = 1,0083492774$ и т. д. [6–9].

Логарифмируя уравнение (8) и разлагая затем логарифмическую функцию в ряд Тейлора, после несложных, но громоздких преобразований получаем формулу

$$\sum_{p=2}^{\infty} \frac{1}{p^2} \approx \ln \frac{\zeta(2)}{\sqrt{\zeta(4)} \cdot \sqrt[3]{\zeta(6)}} \approx \ln \frac{\pi}{2} = 0,4531273\dots \quad (9)$$

Отметим, что равенство (9) отличается от прямого (без преобразований) использования формулы (8):

$$\sum_{p=2}^{\infty} \frac{1}{p^2} \approx \ln \zeta(2) = \ln \frac{\pi^2}{6} = 0,497215\dots \quad (10)$$

Аналогичные выражения были получены нами для бесконечных рядов с другими степенями простых чисел (3, 4, 5 и т. д.).

Формула (9) и выражения с последующими степеням также отсутствуют в справочниках [6–10].

4. В литературе [1, 2] широко используется положение, что все простые числа содержатся в арифметических прогрессиях (сериях). По существу, это математическая форма решета Эратосфена. Наиболее часто говорится о числах из двух серий: $2 \cdot k \pm 1$ и $4 \cdot k \pm 1$ ($k = 0, 1, 2, 3, \dots$), в которых отсутствуют четные числа. Числа второй серии подробно изучал К. Гаусс. Поскольку $6 = 2 \cdot 3$, то в сериях вида $6 \cdot k \pm 1$ будут отсутствовать еще и числа, кратные 3. По аналогии, поскольку $30 = 2 \cdot 3 \cdot 5$, то в 8 сериях $30 \cdot k \pm 1$; $30 \cdot k \pm 7$; $30 \cdot k \pm 11$; $30 \cdot k \pm 13$ будут отсутствовать еще и числа, кратные 5 и т. д. Отметим, что $30 = 2 \cdot 15 = (30 - 13) + (30 - 17)$ (оба вычитаемые – простые числа). Следующие серии чисел $210 \pm m$, где m – все простые числа от 11 до 101, поскольку $210 = 2 \cdot 3 \cdot 5 \cdot 7 = 2 \cdot 105 = (210 - 101) + (210 - 109)$ (оба вычитаемые – простые числа). Далее $2310 = 2 \cdot 3 \cdot 5 \cdot 7 \cdot 11 = 2 \cdot 1155 = (2310 - 1129) + (2310 - 1181)$ (оба вычитаемые – простые числа) и т. д.

5. Используя числа вида $6 \cdot k \pm 1$ и формулу (7), нами была получена формула для числа простых чисел n , не превосходящих N :

$$n \approx \frac{N}{3} \left[\ln \left(\ln N + \frac{C}{2} \right) - a + \frac{b}{\ln(N)} \right], \quad (11)$$

где $a = 3,4788\dots$; $b = 14,3406\dots$

Формула (11) для $N < 104$ дает очень хорошее приближение для числа простых чисел, даже лучшее, чем $\pi(N)$, однако при дальнейшем увеличении N ошибка возрастает и более справедливой становится $\pi(N)$.

6. При рассмотрении списка простых чисел можно заметить, что многие из них оканчиваются одно- и двухзначными простыми числами (табл. 2).

Таблица 2

**Простые числа (кроме 2 и 5)
в 100 первых числах натурального ряда**

| | | | | | | | | | | | |
|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| 1 | 3 | 7 | 11 | 13 | 17 | 19 | 23 | 29 | 31 | 37 | 41 |
| 43 | 47 | 53 | 59 | 61 | 67 | 71 | 73 | 79 | 83 | 87 | 97 |

В табл. 2 простое число 2 исключено, так как оно дает четные числа, простое число 5 исключено, так как числа, оканчивающиеся на 5, всегда кратны 5, а число 1 отнесено к простым числам.

В натуральном ряду первой сотни ($m = 0$, где $m - 1$ – номер сотни) число простых чисел – 24, а число нечетных чисел и некрatных 5 равно 40, так что плотность простых чисел в первой сотне равна $24 \cdot 100\% / 40 = 60\%$. Во второй сотне ($m = 1$) имеем соответственно 8 и 20 чисел и плотность 40%. Величины плотностей простых чисел в натуральном ряду до 7800 представлены в табл. 3.

Таблица 3

Плотности простых чисел в натуральном ряду

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|----------|-------------|------|------|-------------|------|------|-------------|------|------|-------------|------|------|-------------|------|------|
| <i>m</i> | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 |
| % | 60 | 40 | 37,5 | 93,8 | 35,3 | 35,7 | 81,3 | 35,7 | 40 | 78,6 | 31,3 | 41,6 | 73,3 | 54,5 | 47 |
| <i>m</i> | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 |
| % | 91,7 | 40 | 58,3 | 83,3 | 46,2 | 50 | 100 | 53,3 | 40 | 90 | 36,4 | 40 | 71,4 | 58,3 | 36,4 |
| <i>m</i> | 30 | 31 | 32 | 33 | 34 | 35 | 36 | 37 | 38 | 39 | 40 | 41 | 42 | 43 | 44 |
| % | 83,3 | 30 | 54,5 | 93,3 | 36,4 | 57 | 84,6 | 45,4 | 45,4 | 100 | 40 | 44,4 | 93,8 | 33,3 | 36,4 |
| <i>m</i> | 45 | 46 | 47 | 48 | 49 | 50 | 51 | 52 | 53 | 54 | 55 | 56 | 57 | 58 | 59 |
| % | 83,3 | 41,7 | 50 | 75 | 46,7 | 33,3 | 84,6 | 60 | 30 | 84,6 | 35,7 | 58,3 | 70 | 43,7 | 42,8 |
| <i>m</i> | 63 | 64 | 65 | 66 | 67 | 68 | 69 | 70 | 71 | 72 | 73 | 74 | 75 | 76 | 77 |
| % | 93,3 | 12,5 | 36,4 | 90 | 41,7 | 50 | 76,9 | 44,4 | 30 | 100 | 22,2 | 36,4 | 80 | 33,3 | 70 |

Видно, что существуют серии из 100 чисел, в которых все простые числа оканчиваются двухзначными простыми числами (табл. 4).

Таблица 4

Серии из 100 простых чисел

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 2111 | 2113 | | | | 2129 | 2131 | 2137 | 2141 | 2143 | | 2153 | 2161 | | 2179 | | | |
| 3907 | 3911 | | 3917 | 3919 | 3923 | 3929 | 3931 | | | 3943 | 3947 | | | 3967 | | | 3989 | |
| 7207 | 7211 | 7213 | | 7219 | | 7229 | | 7237 | | 7243 | 7247 | 7253 | | | | 7283 | | 7297 |

Все серии из 100 простых чисел, у которых число сотен кратно 3 (в табл. 3 выделены жирным шрифтом), имеют плотности, превышающие 70%.

7. Как уже отмечалось, распределение расстояний между простыми числами в натуральном ряду носит случайный характер. Статистические данные представлены в табл. 5.

Таблица 5

Отношение $P = q/p$ числа (q) расстояний Δ между простыми числами к числу (n) простых чисел

| ΔN | 2 | 4 | 6 | 8 | 10 | 12 | 14 | 16 | 18 | 20 | 22 |
|------------|-------|-------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 3000 | 0,19 | 0,21 | 0,25 | 0,09 | 0,09 | 0,07 | 0,04 | 0,017 | 0,023 | 0,01 | 0,007 |
| 4000 | 0,22 | 0,2 | 0,24 | 0,09 | 0,1 | 0,073 | 0,04 | 0,02 | 0,02 | 0,007 | 0,01 |
| 5000 | 0,19 | 0,19 | 0,244 | 0,08 | 0,085 | 0,08 | 0,04 | 0,02 | 0,025 | 0,01 | 0,012 |
| 6000 | 0,183 | 0,183 | 0,247 | 0,08 | 0,09 | 0,08 | 0,04 | 0,025 | 0,025 | 0,008 | 0,008 |
| 7000 | 0,177 | 0,177 | 0,26 | 0,08 | 0,11 | 0,072 | 0,035 | 0,02 | 0,025 | 0,008 | 0,006 |
| 8000 | 0,174 | 0,175 | 0,245 | 0,08 | 0,1 | 0,078 | 0,04 | 0,024 | 0,03 | 0,008 | 0,009 |

На основании обработки этих статистических данных нами было получено распределение $P(\Delta)$, относящееся к так называемому обобщенному закону Рэлея:

$$P(\Delta) = 5 \cdot 10^{-3} \cdot \Delta^5 \cdot e^{-\frac{5}{6}\Delta}.$$

8. Распределение простых чисел в натуральном ряду – одна из самых интригующих загадок теории чисел. Американский математик Х. Улама записал числа натурального ряда в виде раскручивающейся спирали и заметил, что в получившейся «скатерти Улама» все простые числа располагаются на прямых, пересекающих эту скатерть. Другое наглядное распределение простых чисел получается, если числа натурального ряда расположить в виде треугольного «пионерского» галстука, см. ниже (простые числа выделены жирным шрифтом).

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-----|----|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|----|-----------|----|-----------|----|----|
| | | | | | | | | | 91 | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | 92 | 73 | 90 | | | | | | | | |
| | | | | | | | 93 | 72 | 57 | 74 | 89 | | | | | | | |
| | | | | | | 94 | 71 | 58 | 43 | 56 | 75 | 88 | | | | | | |
| | | | | 95 | 70 | 59 | 42 | 31 | 44 | 55 | 76 | 87 | | | | | | |
| | | | 96 | 69 | 50 | 41 | 32 | 21 | 30 | 45 | 54 | 77 | 86 | | | | | |
| | | 97 | 68 | 61 | 40 | 33 | 20 | 13 | 22 | 29 | 46 | 53 | 78 | 85 | | | | |
| | 98 | 67 | 62 | 39 | 34 | 19 | 14 | 7 | 12 | 23 | 28 | 47 | 52 | 79 | 84 | | | |
| 99 | 66 | 63 | 38 | 35 | 18 | 15 | 6 | 3 | 8 | 11 | 24 | 27 | 48 | 51 | 80 | 83 | | |
| 100 | 65 | 64 | 37 | 36 | 17 | 16 | 5 | 4 | 1 | 2 | 9 | 10 | 25 | 26 | 49 | 50 | 81 | 82 |

Числа здесь располагаются следующим образом: начиная от 1 делаем шаг вправо и ставим цифру 2, затем поднимаемся по диагонали влево и ставим 3, далее опускаемся по диагонали влево и ставим 4, делаем шаг по горизонтали и ставим 5, начинаем восхождение по диагонали вправо и ставим соответственно 6 и 7, спускаемся по диагонали вправо и ставим 8 и 9 и т. д.

В таком «галстуке» в основании располагаются все квадраты чисел натурального ряда (выделены курсивом).

Распределение чисел в «галстуке» наглядно показывает доказанное математическое утверждение, что между двумя квадратами располагается не менее одного простого числа.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Макарова, Н. В.** Простые числа / Н. В. Макарова. – Саратовский государственный университет, 2009. – 158 с.
2. **Михелович, Ш. Х.** Из истории теории чисел / Ш. Х. Михелович. – М.: Знание, 1970. – 30 с.
3. **Балько, А. К.** Свойства периодических дробей / А. К. Балько, Е. В. Терешкин, И. А. Балько // Электронная техника. Сер.1. СВЧ-техника. – 2020. – Вып. 3. – С. 108 – 113.
4. **Стюарт, И.** Величайшие математические задачи. / И. Стюарт; пер. с англ. – М.: Династия, 2015. – 458 с.
5. **Грасиан, Э.** Мир математики. Простые числа / Э. Грасиан; пер с англ. – М.: Де Агостини, 2014. – 144 с.
6. **Градштейн, И. С.** Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений / И. С. Градштейн, И. М. Рыжик. – М.: ГИФМЛ, 1963. – 1012 с.
7. **Двайт, Г. Б.** Таблица интегралов и другие математические формулы / Г. Б. Двайт; пер. с англ.; под ред. К. А. Семендяева. – М.: Наука, 1983. – 226 с.
8. **Бронштейн, И. Н.** Справочник по математике / И. Н. Бронштейн, К. А. Семендяев. – М.: Наука, 1986. – 543 с.
9. **Корн, Г.** Справочник по математике / Г. Корн, Т. Корн; пер. с англ.; под общ. ред. И. Г. Арамановича. – М.: Наука, 1968. – 720 с.
10. **Поля, Г.** Задачи и теоремы из анализа / Г. Поля, Г. Сеге; пер. с нем. Д. А. Райкова. – М.: Наука, 1978. – 820 с.
11. **Воробьев, Н. Н.** Теория рядов / Н. Н. Воробьев. – М.: Наука, 1979. – 407 с.
12. **Пойа, Д.** Математика и правдоподобные рассуждения / Д. Пойа; пер. с англ.; под ред. С. А. Яновской. – М.: Наука, 1975. – 465 с.

Статья поступила 25 декабря 2020 г.

=== НОВЫЕ КНИГИ ===

ЗИНОВЬЕВ Д. В. **Основы проектирования в КОМПАС-3D v17.** 2-е изд. / под ред. М. И. Азарова. – М.: ДМК Пресс, 2019. – 232 с.: ил.

Книга «Основы проектирования в КОМПАС-3D v17» рассчитана на начинающих пользователей. В ней представлены уроки по основам проектирования в этой программе. Однако опытным пользователям она также пригодится – поможет систематизировать ранее полученные знания и навыки и узнать неочевидные приемы проектирования.

Книга поможет вам:

- быстро «войти» в КОМПАС-3D;
- правильно проектировать в КОМПАС-3D;
- систематизировать свои знания о КОМПАС-3D.

ЭКОНОМИКА

УДК 658.567

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ОТХОДАМИ НА ПРОМЫШЛЕННОМ ПРЕДПРИЯТИИ

Е. В. Мамонтова

*Государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования Московской области «Технологический университет
имени дважды Героя Советского Союза, летчика-космонавта А. А. Леонова», г. Королёв*

При производстве продукции на промышленных предприятиях любой отрасли образуется большое количество отходов. Возникает проблема обращения с ними. Необходимо разработать такую систему управления отходами, реализация которой не только приносила бы экономическую выгоду предприятию, но и не наносила вред окружающей среде.

КС: отходы, система экологического менеджмента, экология, система управления отходами

WASTE MANAGEMENT SYSTEM AT AN INDUSTRIAL ENTERPRISE

E. V. Mamontova

*State Budgetary Educational Institution
of Higher Education of the Moscow Region «Technological University
named after twice Hero of the Soviet Union, pilot-cosmonaut A.A.Leonov», Korolev*

When manufacturing products at any industrial enterprise a large amount of waste is generated. There is a problem of handling them. It is necessary to develop such a waste management system the implementation of which would bring not only economic benefits to the enterprise but also would not harm the environment.

Keywords: waste, ecological management system, ecology, waste management system

В современных условиях быстрорастущей конкуренции среди промышленных предприятий радиоэлектронной отрасли, машиностроения или же электроэнергетики стоит делать акцент не только на повышение качества выпускаемой продукции, но и на последствия, которые приносит их деятельность. Предприятие должно гарантировать, что оно не нанесет сверхнормативный вред экологии в процессе производства продукции.

Предприятие может нанести сверхнормативный вред экологии из-за отсутствия системы экологической безопасности, то есть сброса стоков в водоемы, выброса неочищенных газов в атмосферу, а также неправильного обращения с отходами производства. Обращение с отходами – это деятельность объекта, образующего отходы, которая подразумевает под собой сбор, накопление, транспортировку, обработку, утилизацию, обезвреживание и размещение отходов [1]. В целях уменьшения риска негативного воздействия на окружающую среду предприятие должно:

- соблюдать требования законов, экологических норм и правил;
- обеспечивать разделение отходов по их видам и по принадлежности к классу опасности;
- обеспечивать в процессе накопления отходов условия безопасного их хранения до отправки в центры утилизации или на полигоны;
- соблюдать нормы предельного размещения отходов.

В общем виде система управления отходами представлена на рис. 1.



Рис. 1. Система управления отходами на предприятии

В соответствии с ГОСТ Р ИСО 14001–2016 «Системы экологического менеджмента. Требования и руководство по применению» [2], систему управления отходами, представленную на рис. 1, необходимо анализировать в части эффективности функционирования. Неверно выстроенная система управления отходами может повлечь к выплате штрафов и прекращению деятельности предприятия.

Автором был проведен анализ статистических данных по образованию, утилизации и обезвреживанию отходов в Российской Федерации для оценки состояния экологической обстановки (табл. 1) [3].

Таблица 1

Образование, утилизация и обезвреживание отходов в Российской Федерации

| Год | Образование отходов производства и потребления – всего, млн т | Утилизация и обезвреживание отходов производства и потребления, млн т |
|------|---|---|
| 2017 | 6220,6 | 3264,6 |
| 2018 | 7266,1 | 3818,4 |
| 2019 | 7750,9 | 3881,9 |

Судя по представленным в табл. 1 данным, можно говорить об увеличении количества отходов производства и потребления. Кроме того, в России за 2018 год было образовано в 2,8 раз больше отходов (7 266, 1 млн т), чем в Европейских странах (2 599, 44 млн т) [4].

Возрастающие объемы промышленных отходов наносят вред окружающей среде, так как промышленные отходы – это химически сложные вещества, которые природа не в силах «обработать» самостоятельно. Например, в радиоэлектронной промышленности образуются отходы в виде лома, содержащего в себе цветные металлы и требующего правильной утилизации. Отходы в машиностроении образуются в виде лома, стружки и опилок, шлаков и золы, шламов, осадков и пыли и составляют порядка 260 кг на тонну металла [5]. Для более детального представления, какое количество отходов может образоваться в машиностроении, рассмотрим табл. 2. Возьмем для примера металлургическое производство.

Таблица 2

Отходы производства и потребления от металлургического производства

| Год | Образование отходов производства и потребления – всего, млн т | Утилизация и обезвреживание отходов производства и потребления, млн т |
|------|---|---|
| 2017 | 150,802.2 | 74,046.0 |
| 2018 | 136,065.2 | 72,953.2 |
| 2019 | 155,308.7 | 76,745.2 |

Как видно из табл. 2, за 2019 год объем утилизированного мусора составил 49,42 %, что на 4,2 % меньше по сравнению с предыдущим периодом. Следовательно, удельный вес утилизации и переработки отходов можно повысить за счет проведения комплекса мер на предприятиях. По мнению автора, наилучшим решением для минимизации отходов является подход к обработке и удалению отходов. Для решения этой проблемы предлагается:

- введение в деятельность предприятия системы сепарации отходов с целью их повторного использования в дальнейших технологических операциях;
- проведение постоянного анализа изменений объема и состава получаемых отходов в целях разработки мер минимизации отходов.

В качестве примера мер по уменьшению количества отходов можно привести переработку металлической стружки в металлический порошок и его дальнейшее применение в металлургии [6].

Следовательно, для того чтобы эти меры были действенными, необходима четко выстроенная система управления отходами не только для государства в целом, но и для каждого предприятия любой отрасли.

Существует три стадии формирования системы управления отходами. Общая схема представлена на рис. 2.

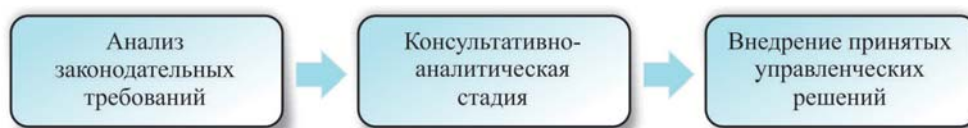


Рис. 2. Стадии формирования системы управления отходами (источник: составлено автором)

Первая стадия подразумевает под собой соблюдение законодательных требований, прописанных в части обращения с отходами. Вторая стадия, которую можно назвать консультативно-аналитической, включает в себя анализ документированных процедур и идентификацию отходов для поиска приоритетных направлений улучшения процессов, связанных с обращением с отходами. Результатом данного этапа служит разработка политики в области управления отходами, где вырабатывается стратегия мероприятий по минимизации отходов, по их обработке и применению технических и технологических решений, например использование справочников наилучших доступных технологий (Best Available Techniques – BAT). Третья стадия называется внедрение, то есть происходит внедрение принятых оптимальных решений по минимизации отходов путем применения технологий переработки, а также ресурсо- и энергосберегающих технологий. На последнем этапе анализируется полученный опыт в процессе использования принятых административных, управленческих решений, и итогом данного этапа будет принятая система управления отходами на предприятии в рамках целой системы экологического менеджмента. Разработка и сертификация такой системы дает конкурентные преимущества на международном и отечественном рынках.

По мнению автора, управление отходами следует рассматривать как часть интегрированной системы управления предприятием. Критерием надежности ее функционирования является систематическая и постоянная оценка эффективности и впоследствии ее совершенствование.

Управление отходами должно иметь принцип иерархии [7]. Рассмотрим основные подходы данного принципа:

1. На первом месте применяется подход по предотвращению или минимизации отходов, который позволяет экономить средства предприятия и снижать использование ресурсов. Например, можно мотивировать производителей к снижению количества упаковки.

2. Следующий подход подразумевает повторное использование отходов без изменения физического состояния, примером этого служит использование вторичной тары.

3. Другой подход подразумевает применение ресурсного потенциала отходов, то есть использование в качестве сырья при производстве вторичных материалов.

4. Получение энергетической ценности от отходов является еще одним способом управления отходами. О важности получения энергии от отходов свидетельствует строительство в период до 2022 года в Московской области заводов по переработке отходов в энергию [8].

5. Размещение или захоронение отходов тоже является одним из способов правильного обращения с ними. Но стоит отметить, что отходы перед захоронением необходимо предварительно подготовить путем термической, химической обработки, что требует определенных затрат.

Следует отметить, что в настоящее время практически на каждом предприятии существует проблема увеличения количества отходов на производстве. Для определения причин, влияющих на качество решения сформулированной проблемы, и выявления взаимосвязи между проблемой и факторами, на неё влияющими, автором был проведен причинно-следственный анализ с использованием диаграммы Исикавы [3]. Диаграмма представлена на рис. 3.

Исходя из вышеизложенного можно сформулировать следующие выводы.

1. Для решения проблемы минимизации отходов на предприятии необходимо минимизировать влияние ключевых причин увеличения количества отходов, внедрить систему вторичной переработки отходов и организовать рациональное использование сырья, что позволит поднять уровень экономического состояния предприятия.

2. Система управления отходами должна включать мероприятия по сбору, транспортировке,

переработке, рециркуляции или утилизации отходов, а также осуществлять контроль за данными процессами, и в первую очередь за изменением объема и состава получаемых отходов.

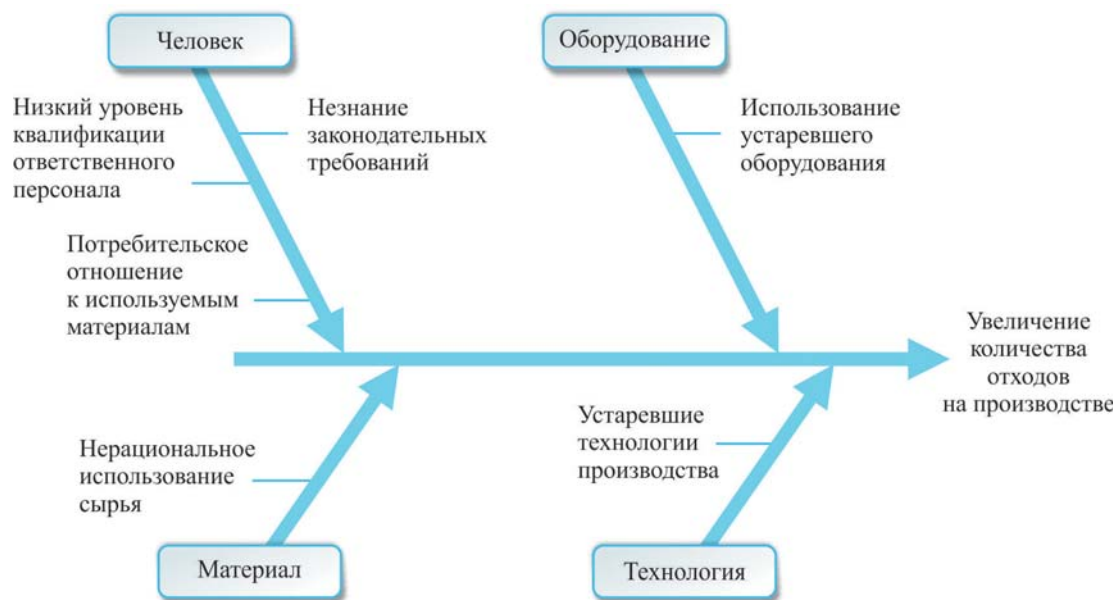


Рис. 3. Возможные причины увеличения количества отходов на производстве (источник: составлено автором)

Стоит отметить, что применение рециклинга позволит снизить энергетические и экономические затраты предприятия, а проблема увеличения количества отходов производства может быть решена при условии верно выстроенной системы управления на предприятии.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Российская Федерация. Законы.** Об отходах производства и потребления (с изменениями на 7 апреля 2020 года): федеральный закон № 89 (редакция, действующая с 14 июня 2020 года).
2. **ГОСТ Р ИСО 14001–2016.** Системы экологического менеджмента. Требования и руководство по применению. – М.: Стандартинформ, 2018.
3. Официальная статистика. Окружающая среда [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://rosstat.gov.ru/folder/11194> (дата обращения: 01.02.2021).
4. Generation of waste by waste category, hazardousness and NACE Rev. 2 activity [Электронный ресурс]. – URL: https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/env_wasgen/default/table?lang=en. (дата обращения: 01.02.2021).
5. Машиностроительные отходы [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.stud24.ru/ecology/mashinostroitelnye-othody/148831-435957-page1.html> (дата обращения: 01.02.2021).
6. **Литвинов, И. А.** Утилизация отходов машиностроительных производств. В 2 частях. / И. А. Литвинов, Г. Ф. Тарасов; под общ. ред. Ю. Ю. Логинова // Решетневские чтения: материалы XIII Междунар. науч. конф., посвящ. 50-летию Сиб. гос. аэрокосмич. ун-та им. академика М. Ф. Решетнева (10 – 12 ноября 2009, г. Красноярск). – Красноярск: Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т., 2009. – Ч. 1. – С. 336 – 338.

7. Минимизация образования отходов производства промышленными предприятиями как решение проблемы энергосбережения [Электронный ресурс]. – URL: <https://port-u.ru/component/k2/749-bugayan-s-a-minimizatsiya-obrazovaniya-otkhodov-proizvodstva> (дата обращения: 01.02.2021).

8. Энергия из отходов: новейшие технологии против мусора [Электронный ресурс]. – URL: <https://rostec.ru/news/energiya-iz-otkhodov-zelenye-tehnologii-protiv-musora/> (дата обращения: 01.02.2021).

Статья поступила 8 февраля 2021 г.

НОВЫЕ КНИГИ

Высокотехнологичная наноструктурная керамика на основе диоксида циркония / Жигачев А. О., Головин Ю. И., Умрихин А.В., Коренков В. В., Тюрин А. И., Родаев В. В., Дьячек Т. А., Фарбер Б. Я. Под общей редакцией Ю. И. Головина. Издание 2-е, испр. и доп. – М.: ТЕХНОСФЕРА, 2020. – 370 с.

Использование бадделеита особенно важно в рамках программы импортозамещения и повышения конкурентоспособности отечественной продукции.

В книге обобщены данные по возможному химическому составу, кристаллической и микроструктуре, а также свойствам керамических материалов на основе диоксида циркония. Рассмотрены наиболее развитые технологии получения этих керамик и композитов на их основе. Особое внимание уделено состоянию и перспективам практического применения циркониевых керамик в Российской Федерации. Монография состоит из четырех частей, каждая из которых освещает определенную область вопросов, связанных с керамическими материалами. Проведено детальное сравнение достоинств и недостатков керамики на основе диоксида циркония с существующими аналогами. Авторами приведен ряд оригинальных результатов по синтезу и исследованию физико-механических свойств наноструктурных инженерных циркониевых керамик на основе отечественного сырья – природного материала бадделеита, который в 6-7 раз дешевле традиционного циркониевого сырья (синтетического диоксида циркония), закупаемого сейчас за рубежом.

Книга написана коллективом авторов, имеющих опыт в области создания, исследования и реализации материалов и изделий на основе как химически чистого диоксида циркония, так и природного бадделеита с примесями. Рабочая группа включает в себя специалистов-материаловедов и технологов, представляющих две компании – НИИ «Нанотехнологии и наноматериалы» Тамбовского государственного университета имени Г. Р. Державина и совместное российско-американское предприятие ООО «Циркоа-РУС» – подразделение компании Zircoa Inc., которая вот уже в течение 65 лет разрабатывает и изготавливает изделия на основе диоксида циркония и на данный момент является лидером в производстве широкого спектра продуктов для различных отраслей индустрии. Миссия ООО «Циркоа-РУС» состоит в поставке циркониевой керамики высокого класса, которая позволит российской промышленности расширить границы существующих технологий.

Книга будет интересна широкому кругу читателей: от студентов естественно-научных специальностей до инженеров, технологов и медицинских работников, связанных с практическим применением циркониевой керамики.

Разработка методов синтеза, получение и подготовка оригинальных керамических образцов на основе бадделеита выполнены при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 16-19-10405). Оработка методик исследования и определение физико-механических характеристик осуществлены при поддержке гранта Министерства образования и науки Российской Федерации (проект № 16.2100.2017/ПЧ).

Разработка и реализация новых подходов и методов термографической диагностики и контроля осуществлены при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 20-19-00602).

ИСТОРИЯ

УДК 9

ВМЕСТЕ С «ИСТОКОМ»

А. К. Балыко

АО «НПП «Исток» им. Шокина», г. Фрязино

Т. А. Балыко, учитель истории

Общеобразовательная средняя школа №16, г. Щелково

Тридцать лет назад начальник лаборатории научно-производственного комплекса № 5 НПП «Исток», кандидат технических наук, лауреат Государственной премии Российской Федерации, ветеран Великой Отечественной войны Александр Михайлович Храпко в беседе с редактором газеты «Истока» «За передовую науку» поделился своими сокровенными мыслями: «Надо рассказывать о выдающихся «истоковцах»: ученых, разработчиках, технологах, инженерах, техниках, рабочих. То, что ими сделано, будет удивлять не одно поколение. В их самоотверженной работе была истинная сила советского народа. Каждый из них достоин пусть не каменного, но хотя бы словесного памятника».

В 2013 и 2018 годах вышли в свет эпохальные труды «НПП «Исток» 70 лет. От производственных побед – к мировым достижениям» (под редакцией А. А. Борисова и А. Н. Королева) и «НПП «Исток» 75 лет. Вчера, сегодня, завтра» (под редакцией А. А. Борисова). В книгах рассказывается о трудовой доблести нескольких тысяч сотрудников «Истока», прославивших могучее отечественное предприятие электронного приборостроения на весь мир. Конечно, подробно рассказать о всех легендарных «истоковцах» в ограниченных объемах этих книг было просто невозможно. В нашей статье мы продолжим рассказ о научной деятельности крупных ученых и производственников «Истока», внесших большой вклад в обороноспособность нашей страны.

ВЛАДИМИР ИВАНОВИЧ ВОЛК

В ряду выдающихся «истоковцев» заметное место занимают люди рабочих профессий. Самый замечательный из них – почетный гражданин города Фрязино, Герой Социалистического Труда, слесарь-инструментальщик Владимир Иванович Волк.

В. И. Волк родился 24 июля 1915 г. в Санкт-Петербурге. С малых лет познал он тяжесть физического труда, но этот труд пришелся юноше по душе. После окончания в 1933 году фабрично-заводского училища он несколько лет работал на заводе. В 1936 – 1938 годах был курсантом в танковой школе. С 1938 г. Владимир Иванович работал слесарем-инструментальщиком на фрязинском заводе «Радиолампа», был передовиком производства, стахановцем, выполнявшим норму на 300 %. В 1941 году завод был эвакуирован в г. Ташкент. Лучшие рабочие, в их числе и

В. И. Волк, вместе с заводом переехали работать в этот южный город. В 1944 году уже опытным слесарем Владимир Иванович возвратился во Фрязино и устроился на работу в цех 3 опытного завода при НИИ-160.

Более 40 лет жизни отдал он родному коллективу, стал в нем специалистом высочайшей квалификации. Не было, пожалуй, изделия, которого не могли бы изготовить «золотые» руки мастера. В. И. Волк впервые в нашей стране выполнил уникальные и сложнейшие штампы, которые широко использовались в производстве изделий электронной техники для оборонных отраслей промышленности. Высокая точность изготовления штампов позволила значительно повысить качество выпускаемых приборов, снизить процент брака. Владимиру Ивановичу всегда поручали самые ответственные технические задания, и он успешно их выполнял. Именно благодаря таким людям, как В. И. Волк, Советский Союз стал великой державой, с которой считались во всем мире.



В. И. Волк

Родина высоко оценила вклад в обороноспособность страны передового рабочего. За доблестный и самоотверженный труд Владимир Иванович был удостоен многих правительственных наград. В 1966 году ему было присвоено высокое звание Героя Социалистического Труда.

В. И. Волк находил время и для общественной работы. Он избирался депутатом Фрязинского городского Совета и Московского областного Совета депутатов. На этих постах он сделал много полезных дел для нашего города, внимательно и заботливо относился к просьбам фрязинцев.

Сотрудники «Истока» старшего поколения с любовью и уважением вспоминают отзывчивого, всегда спокойного рабочего – мастера «золотые» руки – Владимира Ивановича Волк.

ВИТАЛИЙ НИКОЛАЕВИЧ БАТЫГИН

Виталий Николаевич родился в 11 декабря 1930 года.

Бурное развитие электровакуумных приборов в начале 50-х годов выявило ряд технических и технологических проблем. В частности, в течение многих лет традиционным материалом-диэлектриком являлось стекло. Однако «пороки» стекла в какой-то момент стали тормозом к дальнейшему совершенствованию приборов. Многие проблемы снимались в результате применения вместо стекла керамики на основе окиси алюминия. В то же время, как показали исследования, в СВЧ-диапазоне и керамика должна была быть необычной, специфической.

В 1956 году работы по созданию такой вакуумно-плотной керамики на предприятии возглавил едва перешагнувший возраст молодого специалиста В. Батыгин. В сравнительно короткие сроки ему с сотрудниками (Х. У. Ченцова, В. П. Иванов и другие) удалось разработать технологию и получить керамический материал 22ХС с высоким содержанием окисла алюминия, выполненный на основе дешевого сырья – глинозема. Этот уникальный комплекс технологических работ лег в основу кандидатской диссертации, которую Виталий Николаевич успешно защитил в 1962 году.



В. Н. Батыгин

Дальнейшие работы в этом направлении, выполненные им совместно с А. В. Иноземцевой, О. А. Котюргинной и другими, позволили получить целый спектр керамических материалов (А-995, КТ-30 и т. п.), которые в силу своих высоких параметров начали широко применяться в электровакуумных приборах СВЧ.

За разработку и внедрение керамики ВК94-1 и металлокерамических узлов коллективу авторов в составе начальника отдела № 280 В. П. Иванова, начальников лабораторий В. Н. Батыгина, И. И. Метелкина, В. Г. Бравинского, начальника отдела № 180 Г. А. Метлина, главного инженера предприятия И. И. Девяткина, начальника цеха № 45 И. М. Панфилова в 1964 году была присуждена Ленинская премия.

Кандидат технических наук Александр Михайлович Алексеенко вспоминал: «50-е годы были временем бурного развития авиационной и ракетно-космической техники, которая требовала соответствующего радиоэлектронного обеспечения. В частности, высокую перестройку частоты

имели только что появившиеся в то время лампы обратной волны (ЛОВ). Однако из-за большого веса применение ЛОВ в ракетно-космической технике было затруднено. В 1959 г. мы получили авторское свидетельство на изобретение существенно облегченной конструкции ЛОВ (позднее она была запатентована в США, Англии, Франции и Италии). Исследование первых макетов показало, что реализация этого изобретения сопряжена с решением сложнейших теоретических и конструктивно-технологических задач...

Массу проблем сняли новые конструкции поглотителей СВЧ-энергии и фильтра питания на основе объемно-поглощающей керамики КТ-30, разработанной В. Н. Батыгиным и А. В. Иноземцевой. Разработанные приборы нашли широкое применение. Особенно хочется отметить создание системы мягкой посадки автоматических лунных станций «Луна-16», «Луна-17», в которой ЛОВ использовалась в качестве задающего генератора радиовысотомера, управляющего тормозными двигателями на заключительном этапе при подлете станции к Луне».

Поистине революционный переворот в твердотельной электронике произвели керамика А-995, А-945 К (подобие поликора) и монокристаллический сапфир, разработанные Виталием Николаевичем с сотрудниками. Число изготовленных на нашем и других предприятиях гибридно-интегральных схем, основой для которых являются эти материалы, исчисляется колоссальными масштабами.

Возглавив отдел 280, мощный коллектив единомышленников, среди которых были такие яркие представители отечественной школы керамической технологии, как И. И. Метелкин, А. М. Решетников, А. В. Иноземцева, О. А. Котюргина, В. Г. Бравинский, В. И. Куликов и другие, Виталий Николаевич, не снижая интенсивности исследований в традиционных направлениях, ставит и решает новые для «Истока» технологические задачи. Он внедряет уникальные типы керамик СВЧ (пиролитический нитрид бора, стеатитовая керамика и др.); ищет более совершенные технологические процессы и методы изготовления керамик (сушка с помощью

СВЧ-энергии, газовое травление); исследует керамические материалы и их сплавы с металлами, в том числе и на предмет их радиационной стойкости; разрабатывает методы контроля качества изделий из керамики; возглавляет работы по созданию диэлектрических резонаторов, керметов, монокристаллических структур и т. д.

В 1976 г. В. Н. Батыгин впервые в истории «Истока» был назначен главным технологом предприятия. Помимо огромной работы главного технолога по традиционным направлениям деятельности предприятия, Виталий Николаевич всегда думал о будущем его развитии. При нем на «Истоке» была создана современная машиностроительная база.

В. Н. Батыгин – автор 21 изобретения, имеет более 100 научных работ. Обзорные и оригинальные статьи Виталия Николаевича в журнале «Электроника СВЧ» («СВЧ-техника») и в настоящее время восхищают своей научной изысканностью, доступностью изложения и красотой языка. Без сомнения, они несут в себе печать высокой интеллигентности автора.

В 1982 году, в самом зените своей научной карьеры, В. Н. Батыгин принимает предложение генерального директора «Истока» С. И. Реброва стать его первым помощником – главным инженером предприятия. Для многих сотрудников такое решение было просто неожиданным. Выдающийся ученый, лауреат Ленинской премии переходит на чисто административную работу, где на первом месте – забота об энергообеспечении предприятия, руководство службами, далекими от научного поиска. Став генеральным директором «Истока», А. Н. Королев также находит в лице Виталия Николаевича надежную опору и высокопрофессионального помощника. За тридцатилетний период работы главным инженером предприятия В. Н. Батыгин не только превосходно справлялся с этой работой в относительно спокойное для нашего предприятия советское время, но и успешно управляет инженерными службами предприятия в труднейшее постсоветское время.

На протяжении многих лет Виталий Николаевич курировал совет молодых ученых и специалистов и совет ВОИР предприятия. Он проявлял живой интерес к жизни и творчеству молодых специалистов, ценил и уважал уникальных людей, изобретателей, ибо по духу он сам изобретатель. Именно в те годы впервые в истории предприятия золотой медалью ВДНХ был награжден В. Е. Паняев, серебряной – М. М. Трифонов. Виталий Николаевич поддержал идею создания на «Истоке» школы молодых изобретателей, которую возглавил И. И. Климачев. Сегодня они возглавляют научно-производственные предприятия. Обсуждая стороны деятельности молодого специалиста, он всегда на первое место ставил конкретный вклад специалиста в научную и производственную деятельность. Важно отметить, что свои замечания главный инженер предприятия всегда высказывал в уважительной форме. Все слова, сказанные выше, целиком относятся и к научно-общественной деятельности В. Н. Батыгина в качестве члена диссертационного совета при «Истоке», которым он являлся на протяжении 15 лет. Те же конкретность, умение определить в диссертации главное и те же интеллигентность и уважение к молодым ученым. Впрочем, эта черта присуща Виталию Николаевичу при общении с подчиненными любого возраста.

Поражает широта направлений деятельности Виталия Николаевича, восхищает его принципиальная гражданская позиция...

В середине 1993 года на «Исток» пришли представители городского комитета по имуществу и городского Совета депутатов. В конференц-зале собралась общественность предприятия – члены профкома и совета трудового коллектива (СТК). В. Н. Батыгин на этом собрании представлял дирекцию предприятия. Основная цель пришедших – склонить общественность включиться

в программу приватизации, имея в виду приватизацию «Истока» по примеру «Электронприбора» и других фрязинских предприятий (впоследствии развалившихся). У «истоковской» общест-венности не было тогда единой позиции. В своем жестком выступлении в защиту нашего предприятия Виталий Николаевич дал понять, что «Исток» никогда не пойдет по пути прива-тизации, ибо этот путь неминуемо приведет к развалу уникальнейшего предприятия. И хотя его выступление звучало диссонансом официальной политике в стране, он открыто высказал свою точку зрения и точку зрения дирекции «Истока».

Осенью того же года, на второй день после издания Президентом России Б. Н. Ельциным Указа № 1400 о роспуске Верховного Совета, собрались члены профкома и СТК. Звучали голоса некоторых сотрудников в поддержку Президента. Слово взял Виталий Николаевич, главный инженер, высокое должностное лицо государственного предприятия, и прямо заявил, что Указ Президента нарушает Конституцию России, а потому общественности предприятия надо открыто выступить против этого Указа. В результате было принято совместное решение профкома и СТК в поддержку Верховного Совета РФ и направлена с этим решением делегация к защитникам Белого дома в составе Н. И. Желудкова, А. С. Красильникова и А. К. Балько.

За большие заслуги перед СССР и Россией В. Н. Батыгин награжден орденами Трудового Красного Знамени и «Знак Почета», юбилейными медалями, знаком «Почетный радист СССР», имеет звание «Лучший изобретатель Московской области».

Уверены, что такого главного инженера, как Виталий Николаевич Батыгин, не было и нет ни на одном предприятии отрасли. Сотрудники «Истока» с гордостью произносят имя выдающегося ученого и организатора производства изделий электронной техники, прославившего наше славное предприятие.

НИКОЛАЙ ВАСИЛЬЕВИЧ ЧЕРЕПНИН

Н. В. Черепнин прожил долгую и плодотворную жизнь, которую, без сомнений, можно назвать научным подвигом. Он работал много, не считаясь с усталостью и болезнью – много лет Нико-лай Васильевич жил со стимулятором сердца. Работал с огромной самоотдачей, без колебаний шел на самые трудные участки, ибо знал, что результаты его труда необходимы стране, чтобы стать и быть сильной и независимой. Своим трудолюбием он заслужил искреннюю любовь и уважение среди сотрудников «Истока» и ученых всей страны.



Н. В. Черепнин

Своим трудолюбием он заслужил искреннюю любовь и уважение среди сотрудников «Истока» и ученых всей страны.

Н. В. Черепнин родился 7 марта 1908 года в деревне Вороницы Тверской губернии в семье сельского священника. В 1925 – 1926 гг. работал стрелочником на железной дороге. 1926 – 1930 гг. учился в Ленинградском электромеханическом учебном комбинате на факультете сильных токов. По окончании учебы, получив квалификацию инженера-электрика по электрооборудованию транспортных предприятий, он работал инженером на Забайкальской железной дороге.

В электровакуумной промышленности Николай Васильевич работал с 1932 года. Значительный период в его жизни связан с Ленинградским заводом «Светлана».

Свою деятельность на заводе он начал с должности начальника фотометрической лаборатории отдела технического контроля. Затем был назначен старшим технологом цеха приемно-усилительных ламп (ПУЛ) и позднее – старшим инженером – разработчиком этих ламп в Отраслевой вакуумной лаборатории при заводе «Светлана».

В 1941 году Николай Васильевич был эвакуирован вместе с заводом и его многочисленными сотрудниками в г. Новосибирск, где он сначала участвовал в организации нового электровакуумного завода, а через год был назначен начальником цеха по производству ПУЛ. В 1945 г. руководство Министерства промышленности средств связи командировало его в Берлин, где он работал вместе с Н. Д. Девятковым в Бюро электровакуумной техники при техническом отделе. По возвращении из Германии Н. В. Черепнин был назначен главным технологом завода «Светлана», где в ту пору ускоренными темпами разворачивалось производство различных типов ламп и других электровакуумных приборов. Обладая уникальным организаторским даром, Николаю Васильевичу удалось создать на заводе мощный коллектив единомышленников: технологов, конструкторов, инженеров, техников, рабочих, способный в короткие сроки решать сложнейшие производственные задачи, которые ставило перед заводом руководство страны. Многие его сотрудники позднее вслед за ним переехали из Ленинграда во Фрязино.

В 1952 году по постановлению Совета Министров СССР Н. В. Черепнин был переведен начальником отдела в НИИ-160 («Исток») для ускорения разработки и производства ПУЛ специального назначения.

В 1953 – 1954 гг. под его руководством была разработана серия миниатюрных пальчиковых ламп (серия «Анод»), которые по добротности, стабильности и эксплуатационной надежности превосходили все существующие в то время ПУЛ, благодаря чему они получили широкое применение в технике и промышленной электронике. Выпуск пальчиковых ламп на заводах страны составил 100 миллионов штук. В процессе создания этих ламп Н. В. Черепнин с сотрудниками предложили оригинальные конструктивные решения отдельных узлов, внесли дополнительные операции в существовавшие технологические маршруты, разработали новые методы контроля деталей и готовых ламп. Технология этой серии ламп стала типовой для всех заводов страны. В последующие годы Николай Васильевич продолжал активно работать над усовершенствованием миниатюрных ламп и созданием новых приборов. Особое значение для развития радиоэлектронной аппаратуры имели разработанные Н. В. Черепниным широкополосные лампы с большой крутизной (6Ж9П, 6Ж5П и др.) с применением мелкоструктурной сетки.

В 1959 году за большие заслуги перед отечественной наукой Н. В. Черепнину без защиты диссертации была присуждена ученая степень кандидата наук. Он обладал широкой эрудицией и глубокими знаниями в различных областях вакуумной электроники, в совершенстве владел немецким языком. Н. В. Черепнин – автор четырех монографий: «Электронные лампы для широкополосных усилителей» (1958 г.), «Вакуумные свойства материалов для электронных приборов» (1966 г.), «Основы очистки, обезгаживания и откачки в вакуумной технике» (1967 г.), «Сорбционные явления в вакуумной технике» (1970 г.). Каждая из этих книг на протяжении многих лет является настольной для разработчиков электронно-вакуумных приборов и устройств.

Н. В. Черепнин считался одним из лучших технологов страны. Многие видные отечественные технологи по праву считают его своим учителем. На протяжении многих лет он избирался членом диссертационного совета, руководил научным советом по предварительному рассмотрению

диссертаций, технологической секцией научно-технического совета «Истока» и технологическим семинаром предприятия. Его замечания и предложения были конкретны и всегда высказывались в уважительной форме. Николай Васильевич с большим вниманием относился к научной молодежи, принимая заинтересованное участие в качестве члена жюри в конференциях, выставках, конкурсах молодых специалистов и ученых предприятия. Он был активным членом редакции научно-технического сборника «Электроника СВЧ» (ныне «СВЧ-техника»).

В 1977 году Н. В. Черепнин был назначен начальником сектора технологической информации в информационно-техническом отделе предприятия. В 1987 г. был переведен в ведущие научные сотрудники этого отдела. При его непосредственном участии в отделе стали выходить сборники с сигнальной информацией о новых достижениях в области электроники СВЧ. Николай Васильевич сотрудничал с газетой «За передовую науку». Его статьи по истории предприятия, полемические заметки были проникнуты любовью и неравнодушием к судьбе родного «Истока». Он первый открыто рассказал о роли Л. П. Берия в становлении отечественной электроники, его жестких, но, как оказалось, выполнимых заданиях. В последние годы, уйдя на заслуженный отдых, Николай Васильевич продолжал творческую деятельность, принимал в своей квартире сослуживцев, учеников, друзей, обсуждал с ними научно-технические и жизненные проблемы.

За многолетний творческий труд Н. В. Черепнин награжден орденами Трудового Красного Знамени и «Знак Почета», медалью «За трудовую доблесть».

В 1998 году ему было присвоено высокое звание «Почетный гражданин города Фрязино».

Н. В. Черепнин скончался 1 августа 2001 года.

В 2012 году издательство «МЕДПРАКТИКА – М» выпустило книгу «Андрей Андреевич Захаров – полвека в электронике». Книга была приурочена к 100-летию со дня рождения выдающегося организатора отечественной электронной техники, дважды директора НИИ-160, заместителя министра Министерства электронной промышленности СССР. В книге приведено письмо Н. В. Черепнина, адресованное А. А. Захарову и датированное 10 октября 1997 г. Приведем его, поскольку оно показалось нам очень важным в биографии ученого. Заметим только, что в то время Николаю Васильевичу шел 90-й год.

Здравствуйте, Андрей Андреевич!

Получил Ваше письмо. Спасибо. Оно навеяло на меня горькие и радостные воспоминания о периодах работы под Вашим руководством на «Светлане» и в НИИ-160. Вначале пару слов «горьких». Это о моих догадках по поводу «позорного» лишения меня допуска к работе в качестве главного технолога завода.

В первых числах июня 1945 г. я и Оленин – работники Новосибирского завода № 617 командированы в Берлин. Нас одевают в солдатскую одежду и в кирзовые сапоги, но на погонах прикрепляют крупные майорские звезды. Нам не объяснили, зачем понадобился новый сорт майоров, которые не вооружены, не умеют стрелять и командовать. Эта бутафория, по видимому, предназначалась для морального давления на немцев. Вскоре, однако, бутафорскую одежду мы заменили на гражданские костюмы, сшитые у немецких портных, и нас, русских, нельзя было отличить от немцев (если только мы не оказывались словоохотливы).

В Берлине нас временно поселяют в одной из комендатур восточного (нашего, советского) сектора. Комендант жестко инструктирует нас о режиме пребывания в Германии. Немцы, побежденные, по его словам, ненавидят всех нас и все русское. Поэтому нам запрещается устанавливать с ними дружественные внеслужебные связи, а также запрещается посещать

западные секторы Берлина. Нарушение этого запрета опасно для нашей жизни, так как немцы мстительны.

В течение некоторого времени под эгидой Советской Военной Администрации создается институт (НИИ). Его задача – освоение немецкого опыта в электровакуумной отрасли. Для работы в нем привлекаются специалисты фирмы «Телефункен», которые проживали в основном в западных секторах Берлина. Этот институт имел две дирекции: немецкую под руководством крупного ученого, д-ра Штаймеля (позже он принудительно был отправлен в СССР, во Фрязино) и русскую, руководимую инженером с немецкой фамилией Вильдгрубе, что импонировало немцам. Мне в этом НИИ было поручено курировать отделы по разработке ПУЛ (приемно-усилительных ламп), электронно-лучевых и газоразрядных приборов.

Не прошло и года, как немецкие работники опровергли упомянутое утверждение коменданта о враждебности немцев. Они были трудолюбивы, честны при решении возложенных на них задач, дружелюбны по отношению к нам, любили во всем порядок. Вопреки запрету, происходило невольное сближение нас с немцами, причем не только на работе, но и в быту. Я осмелился бывать в западных секторах Берлина, где демонстрировались прекрасные итальянские, французские и американские фильмы (в числе последних – шедевры Чарли Чаплина), бывал в гостях у немецких специалистов, с которыми тесно контактировал по работе. Все это не прошло для меня даром. Меня отнесли к разряду неблагонадежных людей, что, по всей видимости, и стало причиной лишения допуска. Тут мне неясно одно: почему это произошло не сразу, когда я вернулся в Союз, а лишь два года спустя, когда я уже был главным технологом. Мое объяснение этому таково: я был все время под «колпаком», за мной наблюдали «невидимки», чтобы выявить, не появятся ли в моем поведении какие-нибудь более веские, более существенные, чем берлинские «компроматы», факты неблагонадежности, требующие более крутых (по сравнению с лишением допуска) мер пресечения.

Я понимал, что лишение допуска должно иметь и последствия. Мне, по-видимому, будет разрешено проживать лишь в зоне на расстоянии от Ленинграда более 101 км... А благодаря Вашему спасению я стал проживать на расстоянии всего лишь в 30 км от Москвы (и мог бы по предложению Шокина при желании перебраться в Москву). При Вашем содействии я приобрел авторитет почетного технолога в электровакуумной промышленности. Спасибо Вам. Это уже переход к радостным воспоминаниям.

Светлановский период работы и приобретенный там опыт в технологии помог мне справиться с задачей повышения надежности пальчиковых ламп серии «Анод». Мне повезло разгадать их болезнь. Она состояла в том, что уже в готовых лампах в определенных режимах, задаваемых радистами, и при смене их положения возникали короткие замыкания между электродами (иногда временные, а иногда и постоянные). Причиной этого явления были микрочастицы различного происхождения. Мне уже приходилось воевать с этой болезнью на «Светлане».

Для определения источников «зловредных» микрочастиц мною была придумана и внедрена в производство (записана в маршрутные карты) так называемая «пакетная тряска». Для ее осуществления лампы с автомата откачки отпаивались с длинным штенгелем (10 см).

Успеху по конструктивно-технологической доработке ПУЛ способствовало и то обстоятельство, что эта доработка велась непосредственно на производстве, минуя посредничество лабораторий, и в ней принимал активное участие коллектив опытного завода. Удивительно или, вернее, парадоксально, но положительную роль в решении возложенных на

меня задач сыграл сам Берия. Его «незримое присутствие» в НИИ-160 стимулировало весь ход работ. А осуществлялось такое присутствие посредством Б. А. Доброхотова – сотрудника аппарата Берия, который регулярно (не реже одного раза в месяц) приезжал в НИИ, знакомился с состоянием работ и рапортовал Берия. На рапортах всегда была его резолюция, о чем знала дирекция НИИ-160.

Такова была забота отца о благополучии своего сына Сергея, который использовал в своих разработках лампы серии «Анод». Я познакомился с сыном Берия. Он не унаследовал облика отца. Был мягок, вежлив и в спорах с военными при согласовании ТУ на ПУЛ зачастую примыкал к моему мнению.

Я был увлечен работой в НИИ. Был уверен в эффективности «лекарств», необходимых для лечения болезней ламп. Я не задумывался тогда над тем, какова была бы моя судьба, если бы у меня «не получилось» того, что требовалось в работе? Мне пришлось бы завершить свой жизненный путь где-нибудь в лагере на северо-востоке Сибири, на Колыме. Но, невзирая на Ваш высокий пост, если бы не «получилось», возможно, пострадали бы и Вы, как покровитель запятнавшего себя подчиненного со стажем неблагонадежности.

Будьте здоровы, Андрей Андреевич!

Ваш Н. Черепнин. 10.10.97».

ВЕРА ВЛАДИМИРОВНА БАКАКИНА



В. В. Бакакина

В двухтомном издании «Отечественная радиоэлектроника. Биографическая энциклопедия», в которую включены краткие биографии руководителей, ученых, специалистов, инженеров, работавших в разные годы и работающих в настоящее время на предприятиях радиоэлектронного комплекса и внесших весомый вклад в развитие радиоэлектронной техники СССР и Российской Федерации, среди сотрудников «Истока» значится и В. В. Бакакина, специалист высочайшей квалификации в области электровакуумных приборов, кандидат технических наук, лауреат Государственной премии СССР.

Родители Веры Владимировны были лесоводами, и вместе с ними она многократно меняла свое место жительства, исколесив едва ли не всю Московскую область. Восьмой класс закончила в Москве в тяжелейшее время, когда страна была охвачена заревом войны, и экстерном сдала экзамены за 9 класс. Без колебаний поступила она на подготовительные курсы в Московский энергетический институт, экстерном закончила 10 класс и в 1943 году поступила на электрофизический факультет этого института.

Трудовая и общественная деятельность Веры Владимировны не может не вызвать восхищения. Широта ее творческих интересов распространяется на многие области, охватить которые, казалось, не под силу одному человеку. Ей довелось работать с видными учеными и организаторами научной и производственной деятельности на «Истоке»: И. В. Лебедевым,

А. П. Федосеевым, С. И. Ребровым, Н. Д. Девятковым, А. С. Тагером, А. С. Победоносцевым и многими другими.

Дипломную работу она выполняла под руководством начальника отдела «Истока» А. П. Федосеева. В этом же отделе она осталась и после защиты диплома. Отношение ее к начальнику было двойственным. С одной стороны, Анатолий Павлович был, несомненно, незаурядной личностью. Своим примером работать много, творчески и эффективно он сумел создать вокруг себя сильный коллектив, в котором все сотрудники были искренне увлечены своей работой. С другой стороны, молодой специалистке не всегда нравилось, что начальник отдела слишком детально контролировал ее творческую деятельность, заставляя исполнять его замыслы.

В начале 50-х годов В. В. Бакакина перешла работать в другой отдел, в лабораторию Т. Б. Фогельсон. Отдел занимался газоразрядными приборами. Именно здесь начался период расцвета творческой активности Веры Владимировны. В короткие сроки ей удалось внедрить в разработку приборов чистую вакуумную технологию пайки – высокочастотную пайку стекла с коваром без применения мягких припоев и флюсов. Затем последовал целый цикл разработок и исследований широкополосных и сверхширокополосных коаксиальных разрядников дециметрового диапазона длин волн. Под ее руководством впервые на предприятии была создана автоматизированная установка для измерения СВЧ-параметров приборов при испытаниях их на долговечность, а также установка для измерения сверхрезкого изменения крутизны фронта СВЧ-импульсов. Исследования импульсного СВЧ-разряда позволили ей под руководством И. В. Лебедева подготовить и в 1961 году успешно защитить кандидатскую диссертацию. Прибор, разработанный В. В. Бакакиной, входил в состав аппаратуры космического корабля, пилотируемого первопроходцем космоса Юрием Алексеевичем Гагариным.

Практически сразу после защиты диссертации В. В. Бакакину назначают начальником лаборатории. В этот период со всей полнотой проявились ее способности изобретателя. За короткий период Верой Владимировной вместе с сотрудниками было получено 12 авторских свидетельств на изобретение различных типов коммутирующих приборов. Кстати, дух новатора не покидал ее и в последующие годы. Так, будучи заядлой автолюбительницей, она изобрела способ увеличения продолжительности работы аккумуляторов. Многолетняя интенсивная работа была высоко отмечена. В 1968 году в составе коллектива, в который от «Истока» входили С. И. Ребров, В. П. Беляев и Д. Я. Ашкенази, она была удостоена звания лауреата Государственной премии.

Новые грани таланта Веры Владимировны раскрылись после назначения ее в 1973 году начальником сектора в тематическом отделе. Со свойственной ей энергией и увлеченностью взялась Вера Владимировна за новое дело. В короткие сроки под ее руководством было сформировано более 50 научно-технических целевых программ (межотраслевых, отраслевых, программ подотрасли, предприятия) и первый 5-летний план подотрасли на 1975 – 1980 гг. И в дальнейшем, уже перейдя работать в отделение 10, она активно трудилась над составлением целевых программ по автоматизированному проектированию ИЭТ СВЧ и разработке приборов из высокотемпературных сверхпроводников.

Практически все аспиранты, кандидаты и доктора наук в той или иной мере соприкоснулись с деятельностью В. В. Бакакиной как ученого секретаря научно-квалификационного совета «Истока». Советом было аттестовано более 600 ученых и аспирантов, и для каждого нужно было собрать необходимые документы. Поистине титанический труд, выполненный скромной женщиной.

Задолго до выхода в свет многотиражки «За передовую науку», ежемесячно на 6 ватманских

листах выходила газета с тем же названием. Она вывешивалась в холле главного корпуса предприятия и всегда с интересом прочитывалась сотрудниками предприятия. 10 лет членом редколлегии стенной газеты работала В. В. Бакакина, а затем еще 10 лет главным редактором. Много лет она активно вела журналистскую деятельность. Ее статьи можно было увидеть в газетах «За передовую науку», «Ключь», «Время». Отдавая дань советским воинам, В. В. Бакакина собрала сведения о 108-й дивизии и о пути этой дивизии в начале Великой Отечественной войны. Результатом этого труда стали две рукописные брошюры, распространенные среди ветеранов. В качестве почетного гостя В. В. Бакакину постоянно приглашали на встречи ветеранов 108-й дивизии.

Вера Владимировна в период отпусков много путешествовала, объехала всю страну от Владивостока до Калининграда и от Норильска до Ташкента, причем зачастую на своей машине.

В 1992 году В. В. Бакакина уволилась с предприятия. Тем не менее, десять последующих лет она каждый день приходила на свое рабочее место, старательно и качественно делая возложенную на нее работу.

На протяжении многих лет она безвозмездно выполняла огромную работу по закреплению научных сотрудников «Истока» к Республиканской больнице в Москве. Ее услугами воспользовались более 300 кандидатов и докторов наук «Истока».

В. В. Бакакина, прожив почти 85 лет, скоропостижно скончалась 20 января 2010 г. Свою основную миссию она видела в служении науке и родному предприятию. Память о выдающейся женщине «Истока» навсегда останется в наших сердцах.

ИСАЙ САМОЙЛОВИЧ ФЕЛЬДБЛОМ

28 сентября 2008 года на 80-м году жизни ушел из жизни Исай Самойлович Фельдблом, основатель эстетического подхода к доступной широкому кругу читателей информации о новей-



И. С. Фельдблом

ших достижениях науки и техники фрязинских ученых, на протяжении четверти века успешно возглавлявший одно из самых важных подразделений «Истока» – отдел научно-технической информации (отдел 100) и одновременно занимающий пост ответственного секретаря научно-технического сборника «Электронная техника». Серия 1. «Электроника СВЧ» (ныне «СВЧ-техника»).

И. С. Фельдблом родился в 1928 году. В 1946 году он с отличием окончил среднюю школу в г. Ивантеевка Московской области и поступил учиться на физический факультет МГУ им. М. В. Ломоносова. В те годы физика была в почете у молодежи; она была окутана ореолом славы и таинственности, исходившей от квантовой механики и теории относительности. Вступительных экзаменов он не сдавал, а, как отличник, проходил только собеседование. На собеседовании член комиссии доктор физико-математических наук С. Я. Гвоздовер бросил на стол коробок спи-

чек, задал вопрос: «Почему он остановился?» – и моментально получил исчерпывающий ответ абитуриента: «Из-за трения».

Но вскоре Исая Самойлович понял, что понятия «синхрофазотрон» и «атомное ядро», хотя и были модными, но мало его волновали. В школе ему всегда нравились уроки литературы. А в Москве он занимался в основном тем, что ходил во МХАТ, Большой зал консерватории, Третьяковскую галерею. В читальном зале университета зачитывался критическими статьями в журналах «Новый мир», «Звезда», «Октябрь», «Знамя» и жадно поглощал все вновь вышедшие художественные произведения советской литературы.

В конце концов он покинул МГУ и уехал в Ленинград на филологический факультет Ленинградского государственного университета, который успешно закончил в 1952 году. По окончании университета И. С. Фельдблюм согласился с распределением и уехал работать учителем литературы в школу на станции Назаровка Рязанской области. Годы, которые он провел в Назаровке, дали ему очень многое. В частности, он начал писать рецензии на произведения советских писателей, которые публиковали в молодежной газете «Сталинец». Через три года он вернулся домой во Фрязино, обогащенный знаниями советской литературы и с женой – Любовью Сергеевной Шелогуровой, с которой прожил в любви и согласии много десятков лет, воспитав двух детей.

Во Фрязино его отец пошел к директору «Истока» М. М. Федорову, рассказал о талантливом сыне и Исаю Самойловича приняли на работу в отдел информации (отдел 100). Начальник отдела Д. Д. Оленин не то в шутку, не то всерьез спросил, знает ли он алфавит. И. С. Фельдблюм рассказал, что три года работал учителем, печатался в областной газете, а в университете учился у великих филологов – академика Щербы, профессоров Гуковского, Бялого, Жирмунского, Мордовченко и других. После такого перечня имен, отказа, конечно, не последовало. Вскоре отдел возглавил В. Ф. Коваленко, один из самых выдающихся ученых предприятия, лауреат Ленинской премии. Через год Вадим Федорович назначил И. С. Фельдблюма начальником редакционно-издательского бюро, а с 1974 года новый начальник отдела В. Б. Степанищев, уходя работать в партком предприятия, рекомендовал Исаю Самойловича на должность начальника отдела 100. Генеральный директор предприятия С. И. Ребров принял его рекомендацию без возражений. Так «гуманитарий» оказался во главе отдела, которым в разные годы руководили исключительно кандидаты технических наук.

«Переходной» процесс для него прошел практически безболезненно. Во-первых, за год учебы в МГУ он понял преимущества и особенности точного мышления. Во-вторых, В. Ф. Коваленко, Н. Д. Девятков, В. С. Лукошков, С. А. Зусмановский и Я. А. Юхвидин не жалели времени, методично обучая его всему, что он не понимал. Кроме того, его друзья Б. Т. Машин, А. М. Алексеенко, В. А. Парилов, Ю. А. Вецгайлис, Е. П. Остапченко, Г. И. Рукман, да, впрочем, все специалисты, с которыми ему приходилось иметь дело, с увлечением рассказывали ему о сложности задач СВЧ-техники и красоте их решений.

Став во главе отдела информации, Исая Самойлович ощутил все величие этого подразделения «Истока». Огромная научно-техническая библиотека с массой первоклассных книг и журналов; типография с надежной полиграфической базой; редакционно-издательское бюро, методично издававшее журнал «Электроника СВЧ», отчеты и другую научную продукцию; бюро переводов с небольшим коллективом высококлассных специалистов; уникальная выставка изделий электронной техники с сопровождающей ее рекламно-выставочной литературой; кино-фотолаборатория; лаборатория анализа новых публикаций в области СВЧ-электроники. По большому счету все эти направления являются скорее гуманитарными, нежели техническими.

А. К. Балько вспоминает:

В 1972 г. в лабораторию Р. А. Силина пришел И. С. Фельдблюм и спросил, кто из сотрудников знает немецкий язык. Откликнулись И. Ш. Белуга, Е. И. Голант и я. Он провел нас в «темную» комнату библиотеки, где находилось огромное число немецких книг, оставшихся со времени работы на «Истоке» немецких специалистов, и сказал: «Просмотрите книги и оставьте те, которые могут быть полезны нашим ученым». Остальные, как я понимал, должны будут уничтожить, поскольку в библиотеке не хватало места для все возрастающей советской научной продукции. Мы проработали целый день. Перед уходом Исая Самойлович принял нашу работу и в знак благодарности разрешил нам взять с собой любые понравившиеся нам немецкие книги. Я выбрал «Историю свечи» Майкла Фарадея, поскольку у меня уже был ее русский перевод. Теперь же, вспоминая этот эпизод, я сожалею, что не выбрал 10-томное издание трудов Альберта Эйнштейна на немецком языке.

За время работы начальником отдела Исая Самойлович выполнил исследования, которые по объему и глубине проработки материала вполне соответствовали кандидатской диссертации. Несколько статей из более 40 его научных публикаций были переведены на иностранные языки. Но жизнь как-то не подвела к защите диссертации. Как гуманитарий, он питал слабость к журнальной форме подачи материала. К основным его достижениям можно отнести перевод журнала «Электроника СВЧ» (ныне «СВЧ-техника») с четырехразового выхода в год до ежемесячного и перевод издания журнала из типографии издательства «Энергия» в Москве в «истоковскую» типографию, работу которой пришлось полностью перестроить. Впитавший все лучшие идеи И. С. Фельдблюма, журнал на протяжении многих лет является своего рода лицом «Истока». Все выдающиеся ученые-электронщики считают за честь опубликовать свои исследования в «СВЧ-технике». По инициативе Исая Самойловича в отделе стали готовиться и выходить ежемесячно информационные бюллетени «Сигнал» для инженерных работников и «Новости СВЧ-техники» для руководящих кадров. В духе времени при нем началось внедрение персональных компьютеров, что, конечно же, позволило существенно улучшить качество рекламной и другой литературы, ускорить ее выход.

Политика генерального директора «Истока» А. Н. Королева привела к постановке перед отделом ряда новых интересных задач, в частности выросло значение выставок и рекламы. «Островные» совещания главных конструкторов, которые готовил И. С. Фельдблюм, стали носить больше научно-экономический характер. От этого они стали более актуальными, а готовиться к ним было еще сложнее, чем раньше.

Ничем не измерить вклад Исая Самойловича в жизнь и культуру нашего города. Без него, возможно, не было бы уникальной и неповторимой фрязинской команды КВН, не было бы не меркнувших с годами фильмов о научном граде Фрязино, не было бы многих культурных мероприятий, в организации которых всегда чувствовалась его заботливая рука, не было бы написанных им талантливых миниатюр о фрязинских ученых, рецензий на их произведения и редких по глубине описаний их жизни и научной деятельности.

Брошюра «50 лет ГНПП «Исток». Научно-техническая биография. 1943 – 1945 гг.» формата журнала, изданная И. С. Фельдблюмом, сегодня видится нам поистине эпохальным явлением в истории предприятия.

Исая Самойлович всегда с огромным уважением относился к ученым и их работе. В одном из своих интервью он отмечал: «Их ум и талант предопределял возможность широкого охвата

проблем, стоящих вокруг конкретной физической задачи. Именно это позволяло им находить нетривиальные решения. В конце концов, первая и вторая сигнальные системы человека тесно связаны и управляются одним мозгом. Между правым и левым полушариями нет непреодолимых границ. Я убежден, что познать объективную реальность можно, лишь освещая ее из двух прожекторов: сухого, научного – дающего точность, и живого, образного – художественного».

Мы храним память о талантливом Исае Самойловиче, своей яркой жизнью вписавшем заметную страницу в жизнь «Истока» и Фрязино, человеку, олицетворявшем эпоху романтизма в отечественной электронике.

И. С. Фельдблум писал много о выдающихся «истоковцах». Мы приведем слова, написанные им в адресе по случаю 80-летия нашего академика.

Н. Д. Девятков провел огромный цикл работ по внедрению достижений электроники в практическую медицину. Самые видные медицинские светила страны хорошо знают его. А поскольку Николай Дмитриевич – очень доброжелательный и внимательный человек, то многие сотрудники «Истока» сумели пройти лечение в лучших клиниках и институтах Москвы, благодаря личным просьбам академика к директорам этих учреждений. Я лично многим обязан Николаю Дмитриевичу. Он не жалел на меня времени, воспитывая и образовывая из гуманитария сначала редактора научно-технических текстов, ответственного секретаря журнала «СВЧ-техника», а затем – начальника отдела информации. Николай Дмитриевич долгие годы был моим идейным руководителем, наставником, и все это время он много работал со мной, рассказывая не только о разработках «Истока», но и о физике сложных явлений в электронных приборах, об использовании электроники в медицине, о принципе действия военных радиоэлектронных систем.

Как главный редактор журнала «СВЧ-техника», Николай Дмитриевич ни на минуту не опускал планку высокой требовательности к публикуемым материалам, благодаря чему наш журнал стал аккумулятором действительно передового опыта в области микроволновой электроники, всесоюзной трибуной талантливых ученых и инженеров. Непреклонная непримиримость Н. Д. Девяткова к халтуре, поверхностности, небрежности, его, если можно так сказать, мягкая твердость – есть одна из главных черт русского интеллигента. На моей памяти, а я очень тесно сотрудничал с Н. Д. Девятковым, он ни разу не вспылал, не выругался, не стукнул кулаком по столу. Всегда ровный, выдержанный, подтянутый, Николай Дмитриевич учит самой своей манерой поведения, простотой речи, интеллигентностью манер.

Я многому у него научился, но, к сожалению, взял далеко не все, что можно было перенять. И тем не менее, без преувеличения могу сказать, что школа Н. Д. Девяткова оказала на мое формирование решающее влияние.

Спасибо, дорогой Николай Дмитриевич!

КОНСТАНТИН АЛЕКСЕЕВИЧ АМОСОВ

К. А. Амосов родился 19 февраля 1931 года в д. Заполье Торжокского района Тверской области в крестьянской семье.

В 1954 году закончил Ленинградский инженерно-экономический институт и был распределен во Фрязино на «Исток». Перечень его должностей на предприятии невелик: инженер, руководитель группы, заместитель начальника отдела, а с 1959 года и до конца жизни (1990 г.) заместитель генерального директора «Истока».



К. А. Амосов

Константин Алексеевич был человеком, несомненно, выдающимся, много сделавшим и для «Истока», и для Фрязино. Работал он, не считаясь со своим здоровьем, без усталости, ради того, чтобы «истоковцам» и фрязинцам жилось лучше.

Под его руководством и при личном участии на предприятии была введена образцовая система материально-технического снабжения, развита финансово-экономическая служба, непрерывно совершенствовалась работа транспорта. К. А. Амосов глубоко понимал характер ответственных научно-технических проблем, стоящих перед предприятием в развитии обороноспособности и народного хозяйства страны. Успешное завершение в 80-е годы уникальных работ, заложивших основу для производства на «Истоке» в настоящий момент основного изделия предприятия 50Э, во многом обязано лично К. А. Амосову и руководимым им службам.

Огромное внимание К. А. Амосов уделял решению социально-бытовых вопросов. Он внес решающий вклад в строительство школ и детских садов, стадиона и Дворца спорта, Дворца культуры, оздоровительного (пионерского) лагеря и санатория-профилактория «Приозерный», базы отдыха «Электрон» на Волге и пансионата «Самшит» на Черном море.

Отдавая дань уважения выдающемуся фрязинцу, именем Константина Алексеевича назван речной пароход, курсирующий на Волге между г. Дубной и базой отдыха «Электрон».

Генеральный директор «Истока» Сергей Иванович Ребров рассказывал: «Неоценимую помощь в строительстве ДК «Исток» оказывал мой заместитель К. А. Амосов. Достаточно сказать, что приобрести кресла в большой зрительный зал ДК удалось лишь после того, как Константин Алексеевич подписал разрешение лично у Председателя Совета Министров СССР А. Н. Косыгина. Да и в других вопросах материального обеспечения предприятия К. А. Амосов просто творил чудеса. Промышленность тогда жила на фондах и лимитах, определяемых Госпланом СССР. Безналичные средства в банках мало что значили, роль ценностей выполняли фонды на материалы и лимиты на строительство. К. А. Амосов был выдающимся человеком по части владения этими вопросами, но в то же время при их решении он отличался высочайшей честностью и порядочностью. Не случайно его почти 30 лет избирали народным заседателем Верховного Суда СССР. При этом он всегда оставался исключительно скромным работником и отзывчивым товарищем. В 15-тысячном коллективе «Истока» К. А. Амосов пользовался огромным, я бы даже сказал, уникальным уважением для начальника высокого ранга».

Иван Михайлович Панас в 1963 – 1972 годах был председателем профсоюзного комитета «Истока»: «Мы с С. И. Ребровым выбрали остров на Волге для размещения базы отдыха «Электрон», а с заместителем генерального директора «Истока» К. А. Амосовым объехали все краснодарское побережье Черного моря в поисках достойного «истоковцев» места для пансионата «Самшит». Самые теплые слова я отношу к Константину Алексеевичу, одному из близких мне по духу руководителей предприятия. Он был моложе меня на три года, но входил в ту же «команду С. И. Реброва». По моему мнению, им на «Истоке» был создан такой мощный

коллектив хозяйственников и снабженцев, для которого, казалось, не было невыполнимых задач. С гордостью замечу, что на протяжении двух десятиков лет мы с Константином Алексеевичем дружно работали в исполкоме Фрязинского городского Совета».

Руководивший в те годы комитетом ВЛКСМ «Истока» В. Н. Колодинский вспоминает: «Прямо под самый Новый год К. А. Амосов раздобыл для строительства дома на базе «Электрон» целый железнодорожный состав кирпича. Мороз в тот день стоял под 30 градусов. Но мы понимали, что дело было очень важное, и срочно собрали большой отряд комсомольцев. Они поехали в Дубну, разгрузили вагоны и перебросили кирпич на остров на Волге, где располагалась база отдыха».

Несмотря на решение важнейших производственных задач «Истока», К. А. Амосовым и его службами активно велось благоустройство города Фрязино: асфальтировались дороги, озеленялись улицы, строились детские площадки. Для него проблемы, связанные с этими объектами, были глубоко личными, он принимал их глубоко к сердцу и решал, как свои личные. Город был для него родным и близким, и он на протяжении многих лет делал все возможное для его процветания.

Константин Алексеевич относился к тем людям, которые были готовы отдать за воплощение лучших идеалов все, даже самое дорогое – здоровье. Фрязинцы верили ему, поэтому на протяжении многих лет избирали К. А. Амосова депутатом Фрязинского городского Совета. «Истоковцы» всецело доверяли ему, он был избран первым председателем совета трудового коллектива предприятия. К. А. Амосов свято относился к многочисленным общественным обязанностям, вызывая искреннее уважение своих избирателей. В 1990 г. он был избран депутатом и в новый (периода перестройки) Фрязинский Совет, единственный депутат из старого его состава, не побоявшись пройти все стадии острой предвыборной борьбы.

С 1962 года и до конца жизни К. А. Амосов избирался Верховным Советом СССР народным заседателем Верховного суда СССР. Честность, повышенное чувство справедливости, богатый жизненный опыт способствовали привлечению его к рассмотрению самых сложных и ответственных дел в стране, включая «хлопковое дело» и дело виновников Чернобыльской трагедии. Он лично выезжал после взрыва на Чернобыльскую АЭС.

Константин Алексеевич был человеком простым, скромным, веселым, отличным семьянином. Он был беззаветно предан дорогому для него «Истоку». Страстно любил природу, оберегал ее от нерадивого отношения окружающих.

К. А. Амосов прожил недолгую, но яркую жизнь. Он скоропостижно скончался в своем рабочем кабинете, немногим не дожив до 60 лет, оставив в памяти «истокцев» самые светлые о себе воспоминания.

Статья поступила 15 января 2021 г.

**ПРАВИЛА НАПРАВЛЕНИЯ, РЕЦЕНЗИРОВАНИЯ И ОПУБЛИКОВАНИЯ
НАУЧНЫХ СТАТЕЙ В НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОМ СБОРНИКЕ
«ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА», СЕРИЯ 1, «СВЧ-ТЕХНИКА»**

1. Статья должна иметь официальное направление от учреждения, в котором выполнена работа, и документ, подтверждающий возможность открытого опубликования (акт экспертизы).

2. Статья должна содержать:

- соответствующий индекс универсальной десятичной классификации литературы (УДК);
- инициалы и фамилии авторов;
- название;
- реферат;
- ключевые слова;
- текст самой статьи;
- список литературы;
- краткие сведения об авторах, включающие фамилию, имя, отчество (полностью), город, место работы, домашний и электронный адрес, телефон.

Объем публикуемой статьи, как правило, до 12 стр., включая иллюстрации.

3. Статья должна быть подготовлена в текстовом редакторе MS Word для Windows и передана в виде файла (формат .doc или .docs) по электронной почте, либо записанного на ФЛЭШ или оптическом (CD) носителе, и двух печатных экземпляров.

4. Форматирование статьи: одинарный межстрочный интервал, выравнивание текста по ширине, абзацный отступ – 0,7 см. При наборе текста используются только стандартные True Type шрифты – Times New Roman и Symbol. Размер шрифта основного текста – 12 пунктов, примечаний и ссылок – 10 пунктов. Устанавливаемый размер бумаги – А4 (210 × 297 мм).

Сложные формулы набираются только в «Редакторе формул» Word. Непосредственно в программе Word допускается использование только простых формул (символы с индексами, подстрочными и/или надстрочными). Не принимаются формулы, выполненные в виде рисунков. Расшифровка буквенных обозначений формул в тексте должна быть набрана в текстовом редакторе. Таблицы выполняются в формате Word.

5. Иллюстрации к статье представляются в виде отдельных файлов.

Рисунки выполняются в соответствии со следующими требованиями:

- растровые рисунки – в формате TIFF, разрешение не менее 300 точек/дюйм (для полутоновых фотографий допускается формат JPEG); векторная графика – в формате CorelDRAW, WMF;
- размер рисунка – не более 17 × 20 см;
- буквенные и цифровые обозначения на рисунках должны соответствовать обозначениям в тексте, причем начертание греческих и русских букв прямое, а латинских букв и цифр, обозначающих номера позиций, – курсивное;
- текстовая информация, не являющаяся неотъемлемой частью рисунка, и условные обозначения выносятся в текст статьи или в подпись к рисунку.

Фотографии (не более 18 × 24 см) принимаются в электронном виде.

На весь иллюстративный материал должны быть ссылки в тексте.

6. Следует строго соблюдать единообразие терминов, размерностей, условных обозначений, сокращений. Единицы измерения должны соответствовать системе СИ.

7. Формулы следует нумеровать в круглых скобках, например (2), литературные ссылки – в прямых, например [2], подстрочные замечания отмечаются звездочками *.

8. Таблицы должны иметь тематические заголовки. Все слова в заголовках граф даются без сокращений и в единственном числе.

9. Библиография составляется в соответствии с ГОСТ 7.1 – 2003 и дается общим списком в конце статьи.

10. Полученная статья направляется редакцией на рецензирование ведущим специалистам в данной научно-технической области.

11. Итоговое решение об одобрении или отклонении представленных в редакцию материалов принимается редакционной коллегией на основании заключения рецензентов, о чем авторы ставятся в известность.

12. Редакция направляет авторам представленных материалов копии рецензий или мотивированный отказ, а также обязуется направлять копии рецензий в Министерство образования и науки Российской Федерации при поступлении в редакцию издания соответствующего запроса. Рецензии на все опубликованные статьи хранятся в редакции издания 5 лет.

13. Плата с аспирантов за публикацию рукописей не взимается.

ПРОВОДИТСЯ ПОДПИСКА

на научно-технический сборник «Электронная техника», серия 1, «СВЧ-техника» на 2021 г. (4 вып. в год). Стоимость подписки – 9600 руб., включая НДС (20 %).

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (регистрационный номер ПИ № ФС 77-73640 от 7 сентября 2018 г.) и включен в перечень ВАК (перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней кандидата и доктора наук).

Для оформления подписки необходимо произвести оплату по указанным ниже банковским реквизитам: АО «НПП «Исток» им. Шокина», ОГРН 1135050007400, ИНН / КПП 5050108496 / 774550001, р/с 40702810700250010343, Банк АО АКБ «НОВИКОМБАНК», БИК 044525162, к/с 30101810245250000162 – и выслать копию платежного поручения и бланк-заказ по адресу: 141190, г. Фрязино, Московская обл., ул. Вокзальная, 2а, корпус 1, комната 65, этаж 2. АО «НПП «Исток» им. Шокина», ОНТИ; тел.: (495)465-86-12.

Счет-фактура высылается заказчику после получения оформленных документов на подписку.

ЗАКАЗ

Прошу принять подписку на научно-технический сборник «Электронная техника», серия 1, «СВЧ-техника» на 2021 г. и направлять по адресу:

Куда _____
(почтовый индекс, адрес)

Кому _____
(название организации)

Заказ оплачен платежным поручением № _____ дата _____
на сумму _____ за _____ экз.

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА

СЕРИЯ 1

«СВЧ-ТЕХНИКА»

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СБОРНИК

Редактор Хоточкина Л.Н.
Переводчик Барабанова Л.В.
Компьютерная верстка Земскова Л.А.
Коррекция рисунков Лазарева Т.В.

Подписано к печати 10.3.2021 г.
Отпечатано ИП Нуралиев Э.С.
г. Фрязино

Усл. п. л. 10,0
Уч.-изд. л. 10,5
Индекс 36292

Формат 60×88^{1/8}
Тираж 500
7 статей

АО «НПП «Исток» им. Шокина» 141190, г. Фрязино, Московская обл., ул. Вокзальная, д. 2а,
корпус 1, комната 65, этаж 2. Тел.: (495)465-86-12
E-mail: stebunov@istokmw.ru; info@istokmw.ru



Электронная техника. Сер. 1, СВЧ-техника, 2021, вып. 1(548), с. 82

**Подписной индекс 36292
в каталоге агентства «Роспечать»**

