Издается с ноября 2013 года
Выходит один раз в квартал

№ 3 (16)
Сентябрь 2017

ВОПРОСЫ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

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

Главный редактор **АРХАНГЕЛЬСКИЙ ЮРИЙ СЕРГЕЕВИЧ**
Зам. главного редактора **БЕКРЕНЕВ НИКОЛАЙ ВАЛЕРЬЕВИЧ**
Ответственный секретарь **ТРИГОРЛЫЙ СЕРГЕЙ ВИКТОРОВИЧ**

Редакционная коллегия

Ю.С. АРХАНГЕЛЬСКИЙ	д.т.н., профессор, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов
Н.В. БЕКРЕНЕВ	д.т.н., профессор, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов
Ю.В. ГУЛЯЕВ	д.ф.-м.н., профессор, академик РАН, ИРЭ имени В.А. Котельникова РАН, Москва
В.Б. ДЕМИДОВИЧ	д.т.н., профессор, СПбГЭТУ «ЛЭТИ», Санкт-Петербург
Л.С. ЗИМИН	д.т.н., профессор, СамГТУ, Самара
С.Г. КАЛГАНОВА	д.т.н., доцент, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов
В.А. КОЛОМЕЙЦЕВ	д.т.н., профессор, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов
В.Н. ЛЯСНИКОВ	д.т.н., профессор, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов
А.Н. МАКАРОВ	д.т.н., профессор, ТГТУ, Тверь
Г.А. МОРОЗОВ	д.т.н., профессор, КНИТУ-КАИ, Казань
Ю.П. ПЕРЕЛЫГИН	д.т.н., профессор, ПГУ, Пенза
А.Ф. РЕЗЧИКОВ	д.т.н., профессор, член-корреспондент РАН, ИПТМУ РАН, Саратов
И.В. РОДИОНОВ	д.т.н., доцент, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов
В.П. РУБЦОВ	д.т.н., профессор, НИУ «МЭИ», Москва
Ф.Н. САРАПУЛОВ	д.т.н., профессор, УрФУ, Екатеринбург
Ю.Б. ТОМАШЕВСКИЙ	д.т.н., профессор, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов
С.В. ТРИГОРЛЫЙ	к.т.н., доцент СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов
Г.Г. УГАРОВ	д.т.н., профессор, КТИ, Камышин
В.Н. ХМЕЛЕВ	д.т.н., профессор, БТИ, Бийск
В.А. ЦАРЕВ	д.т.н., профессор, СГТУ Гагарина Ю.А., Саратов

ISSN 2309-6020

© Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., 2017

Since November 2013
Published Quarterly

№ 3 (16)
September 2017

JOURNAL OF ELECTROTECHNICS

Scientific and Technical Publication

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

Editor-in-Chief: **ARKHANGELSKY YURIY SERGEEVICH**
Assistant to the Editor-in-Chief: **BEKRENEV NIKOLAY VALERYEVICH**
Chief Executive Officer **TRIGORLY SERGEI VIKTOROVICH**

Editorial Board Members

Yu. S. ARKHANGELSKY	Dr.Sc., Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov
N.V. BEKRENEV	Dr.Sc., Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov
Yu.V. GULYAEV	Dr.Sc., Professor, Academician of RAS, Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of RAS, Moscow
V.B. DEMIDOVICH	Dr.Sc., Professor, Saint Petersburg State Electrotechnical University "LETI", St.Petersburg
L.S.ZIMIN	Dr.Sc., Professor, Samara State Technical University, Samara
S.G. KALGANOVA	Dr.Sc., Associate Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov
V.A. KOLOMEITSEV	Dr.Sc., Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov
V.N. LYASNIKOV	Dr.Sc., Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov
A.N. MAKAROV	Dr.Sc., Professor, Tver State Technical University, Tver
G.A. MOROZOV	Dr.Sc., Professor, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI, Kazan
Yu. P. PERELIGIN	Dr.lSc., Professor, Penza State University, Penza
A.F. REZCHIKOV	Dr.Sc., Professor, Corresponding Member of RAS, Institute of Precision Mechanics and Control of RAS, Saratov
I. V. RODIONOV	Dr.Sc., Associate Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov
V.P. RUBTSOV	Dr.Sc., Professor, National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Moscow
F.N. SARAPULOV	Dr.Sc., Professor, Ural Federal University, Ekaterinburg
Yu. B. TOMASHEVSKY	Dr.Sc., Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov
S.V. TRIGORLY	PhD, Associate Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov
G.G. UGAROV	Dr.Sc., Professor, Kamishin Institute of Technologies, (branch) Volgograd State Technical University, Kamishin
V.N. KHMELEV	Dr.Sc., Professor, Biysk Technological Institute, Biysk
V.A. TSAREV	Dr.Sc., Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov

ISSN 2309-6020 © Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, 2017

СОДЕРЖАНИЕ

Уважаемый коллега! 5

ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЯ

Калганова С.Г., Архангельский Ю.С., Тригорлый С.В., Захаров В.В. Моделирование процессов СВЧ термообработки диэлектриков с применением пакета Comsol Multiphysics 6

Высоцкий Л.И. О некоторых неизотермических ламинарных течениях жидкостей 11

Добродум А.С., Архангельский Ю.С. СВЧ электротехнологические установки с гибридными камерами 16

Захаров В.В. Электротехнологические процессы СВЧ термообработки диэлектриков и методы их моделирования с учетом изменения физических свойств материалов, фазовых переходов и тепломассопереноса 22

Шляхов А.Д., Архангельский Ю.С. Экстренная сушка книг, пострадавших при тушении пожара 31

Архангельский Ю.С., Колесников Е.В., Юдина В.О. К вопросу о многофункциональности СВЧ электротехнологических установок на камерах лучевого типа 34

ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА

Сержанский В.С. Повышение энергоэффективности городского электротранспорта 40

Федоров Д.А., Вырыханов Д.А., Меньщиков И.А. Математическое моделирование электродинамического линейного двигателя 46

ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ

Чепляев Н.В., Архангельский Ю.С. Оптимизация схемы энергоснабжения комплекса оборудования сверхчастотного диэлектрического нагрева 52

ЭЛЕКТРОДИНАМИКА

Скворцов А.А. Квазианалитические выражения для определения волнового сопротивления лунарного волновода с однородным диэлектрическим заполнением 55

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Щелкунов А.Ю., Егоров И.С., Фомина М.А., Кошуро В.А., Фомин А.А., Родионов И.В. Сверхтвердые оксидные покрытия и особенности их получения на титане обработкой токами высокой частоты 59

ЛЕТОПИСЬ

Архангельский Ю.С. К вопросу о «тепловой смерти» Вселенной 65

Памяти Валентина Немкова. О человеке и ученом (1937-2017) 71

К сведению авторов 75

УВАЖАЕМЫЕ АВТОРЫ!

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

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

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

CONTENTS

Dear colleague! 5

ELECTROTHERMY

Kalganova S.G., Arkhangelsky Yu.S., Trigorly S.V., Zakharov V.V. Modeling microwave heat treatment processes of dielectrics using the Comsol Multiphysics software 6

Vysotsky L.I. Non-isothermal laminar flow of fluids 11

Dobrodum A.S., Arkhangelsky Yu.S. Application and performance calculations for the microwave electrical engineering units with hybrid chambers 16

Zakharov V.V. Electrotechnological processes for the microwave heat treatment of dielectrics and methods for their modeling using the changes in the physical properties of materials, phase transitions, and heat and mass transfer 22

Shlyakhov A.D., Arkhangelsky Yu.S. Emergency drying the books damaged during the fire-fighting operations 31

Arkhangelsky Yu.S., Kolesnikov E.V., Yudina V.O. Multifunctionality issues of microwave electrotechnological installations used in beam-type chambers 34

ELECTROMECHANICS

Serzhansky V.S. Improving the energy efficiency of urban electric transport 40

Fedorov D.A., Vyrikhanov D.A., Menshchikov I.A. Mathematical modeling of electrodynamic linear motors 46

ELECTRIC POWER SUPPLY

Cheplyaev N.V., Arkhangelsky Yu.S. Optimization of the power supply layout for microwave dielectric heating devices 52

ELECTRODYNAMICS

Skvortsov A.A. Quasi-analytical expression of the wave resistance in the dielectric-filled lunar waveguide 55

MATERIALS SCIENCE

Shchelkunov A.Yu., Egorov I.S., Fomina M.A., Koshuro V.A., Fomin A.A., Rodionov I.V. Superhard oxide coatings and key features of their application over titanium by treatment with high-frequency currents 59

CHRONICLE

Arkhangelsky Yu.S. The issues of death heat of the universe 65

Kalganova S.G., Arkhangelsky Yu.S. To the memory of Valentin Nemkov. A personality and a scientist.. 71

Information for Authors 75

DEAR AUTHORS!

Each article is provided with a short information about the author.

For this reason, please, send us the following information:

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

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

Уважаемый коллега!

В этом номере журнала собраны статьи, среди авторов которых студенты и аспиранты кафедры «Электроснабжение и электротехнология» (ЭЛЭТ) Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Кафедра ЭЛЭТ образована в 2016 году слиянием кафедр «Автоматизированные электротехнологические установки и системы» и «Электроснабжение промышленных предприятий».

Кафедра ведет очную и заочную подготовку бакалавров по профилям «Электротехнологические установки и системы», «Электроснабжение» направления «Электроэнергетика и электротехника», магистров по профилям «Электротермические процессы и установки с источниками питания и управлением», «Электроснабжение» направления «Электроэнергетика и электротехника» и аспирантов по научным специальностям 05.09.10 – Электротехнология и 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы.

ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЯ

УДК 621.365.5

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ СВЧ ТЕРМООБРАБОТКИ ДИЭЛЕКТРИКОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПАКЕТА COMSOL MULTIPHYSICS

С.Г. Калганова, Ю.С. Архангельский, С.В. Тригорлый, В.В. Захаров

MODELING MICROWAVE HEAT TREATMENT PROCESSES OF DIELECTRICS USING THE COMSOL MULTIPHYSICS SOFTWARE

S.G. Kalganova, Yu.S. Arkhangelsky, S.V. Trigorly, V.V. Zakharov

Рассмотрено применение пакета Comsol Multiphysics для моделирования СВЧ электротехнологических процессов. Предложена модель объемного распределения мощности внутренних источников теплоты и нестационарной теплопроводности для случая СВЧ термообработки плоского диэлектрика при движении излучающей системы. По результатам моделирования определена оптимальная скорость движения излучающей системы, при которой достигается требуемое распределение температуры в течение заданного времени.

Ключевые слова: *математическое моделирование, СВЧ термообработка, излучающая система, диэлектрики, уравнение теплопроводности, температурное поле, оптимизация технологического процесса*

The paper considers application of the mathematical package Comsol Multiphysics to simulate the microwave electro-technological processes. The proposed model deals with for the volume distribution of power of internal heat sources and transient heat conduction in the cases of microwave heat treatment of flat dielectrics when the radiating system is in motion. The simulation process helps to determine the optimum motion rate of the radiating system which is used to attain the desired temperature distribution within a specified time.

Keywords: *mathematical modeling, microwave heat treatment, radiating system, dielectrics, equation of heat conduction, temperature field, optimization of the technological process*

Для моделирования различных физических процессов применяют пакеты программ, основанные на использовании метода конечных элементов. Одним из таких программных пакетов является Comsol Multiphysics [1, 2]. Этот программный продукт позволяет моделировать взаимосвязанные физические процессы, а также учитывать изменение физических свойств материалов объектов от температуры, времени и других факторов, что весьма важно при моделировании различных электротехнологических процессов.

Данная работа посвящена применению пакета Comsol Multiphysics для моделирования сверхвысокочастотных (СВЧ) электротехнологических процессов. В зарубежных источниках имеются сведения об использовании пакета Comsol Multiphysics для решения задач термообработки диэлектриков в СВЧ камерах резонаторного типа (со стоячей волной) [3] и в волноводах, частично заполненных обрабатываемым диэлектриком [4]. В то же время для промышленных технологий большой интерес представляет использование камер лучевого типа с ру-

порными, волноводно-щелевыми и иными излучателями (излучающими системами), которые позволяют обрабатывать диэлектрики больших объемов, а сами излучатели могут перемещаться вдоль обрабатываемой поверхности (в процессах размораживания, термообработки грунта, создания дорожных покрытий и др.).

Рассмотрим моделирование с помощью пакета Comsol Multiphysics термообработки плоского диэлектрика в камере лучевого типа при движении излучателя над наружной поверхностью диэлектрика (рис. 1).

При моделировании СВЧ электротермических установок лучевого типа обычно задаются распределением плотности мощности вблизи излучателя, которое зависит от его типа, геометрии и диаграммы направленности [5]. Воспользуемся гауссовым распределением плотности СВЧ мощности по осям *Ox* и *Oz* (рис. 1). Распределение плотности мощности в направлении распространения электромагнитной волны (по оси *Oy*) определяется на основе решения задачи электродинамики. При термообработке диэлектрика, имеющего размер по оси *Oy*, значительно превышающий глубину проникновения электромагнитной волны, распределение плотности мощности в этом направлении подчиняется экспоненциальному закону.

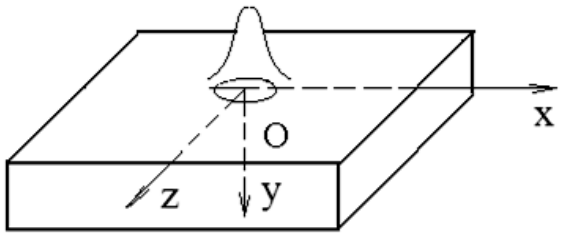


Рис. 1. Гауссово распределение внутренних источников теплоты по осям координат *Ox* и *Oy*

Таким образом, распределение плотности мощности (внутренних источников теплоты) в диэлектрике с учетом движения излучающей системы и принятых допущений можно представлять следующим образом:

$$q_v(x,y,z,t) = q_0 \frac{\exp\left[\dfrac{-(y-A-vt)^2}{2s^2}\right]}{\sqrt{2\pi}s} \cdot \frac{\exp\left[\dfrac{-z^2}{2s^2}\right]}{\sqrt{2\pi}s} \exp(-2\alpha y), \quad (1)$$

где *x, y, z* – декартовы координаты; *t* – время; α – коэффициент распространения электромагнитной волны; *v* – скорость движения излучающей системы относительно обрабатываемого диэлектрика; *s* – расстояние от оси симметрии до точки перегиба кривой распределения плотности мощности в направлении осей *Ox* и *Oz* (зависит от конструктивных особенностей излучающей системы); *A* – расстояние от начала координат до оси симметрии излучающей системы; q_0 – плотность мощности на наружной поверхности диэлектрика, которая определяется по соотношению

$$q_0 = \frac{P}{\int\limits_{-H/2}^{H/2} \frac{\exp\left[\dfrac{-x^2}{2s^2}\right]}{\sqrt{2\pi}s} dx \int\limits_{-B/2}^{B/2} \frac{\exp\left[\dfrac{-z^2}{2s^2}\right]}{\sqrt{2\pi}s} dz \int\limits_{0}^{L} \exp(-2\alpha y)\, dy}. \quad (2)$$

Здесь *P* – мощность СВЧ излучения; *H, B, L* – размеры обрабатываемого диэлектрика по осям координат *Ox, Oz* и *Oy* соответственно.

Нестационарный процесс СВЧ нагрева диэлектрика описывается уравнением теплопроводности:

$$\operatorname{div}\left[\lambda(\operatorname{grad} T)\right] + q_v(x,y,z,t) = c\rho\frac{\partial T}{\partial t}, \quad (3)$$

где *T* – температура; λ – коэффициент теплопроводности; *c* – удельная теплоемкость; ρ – удельная плотность.

Граничные условия имеют вид

$$\lambda(\partial T/\partial n) = h\,(T - T_B) \text{ на } S\,, \qquad (4)$$

где h – коэффициент теплоотдачи с наружной поверхности S диэлектрика, определяемый на основе известных критериальных зависимостей; T_B – температура окружающего воздуха.

Решение задачи теплопроводности (3) при граничных условиях (4), известной постоянной температуре объекта в начальный момент времени T_0 и распределении плотности мощности (2) проводится с использованием пакета Comsol Multiphysics.

В качестве примера рассматривалось моделирование нагрева грунта при неподвижной СВЧ излучающей системе и при ее движении с постоянной скоростью вдоль поверхности грунта в направлении оси Ox. В расчетах использовались следующие исходные данные: мощность СВЧ излучения P = 10 кВт; частота генератора 2450 МГц; теплофизические свойства грунта λ = 1,49 Вт/(м·К); c = 1150 Дж/(кГ·К); ρ = 2000 кГ/м^3; скорость движения излучающей системы v = 0,001…0,002 м/с; начальная температура и температура воздуха одинаковы ($T_B = T_0$ = 293 К); геометрические размеры H = 3 м; B = 0,5 м; L = 0,25 м.

При моделировании СВЧ нагрева грунта для случая неподвижного излучателя определялось необходимое время нагрева до заданной температуры T = 1460 К. Результаты моделирования представлены на рис. 2, где показано распределение температурного поля в продольном сечении грунта (по оси Ox). Как видно из рис. 2, время нагрева грунта до температуры 1460 К составляет 360 с. За это временя на поверхности грунта радиусом 5 см и в слое грунта глубиной 5 см температура повышается до 1200-1460 К.

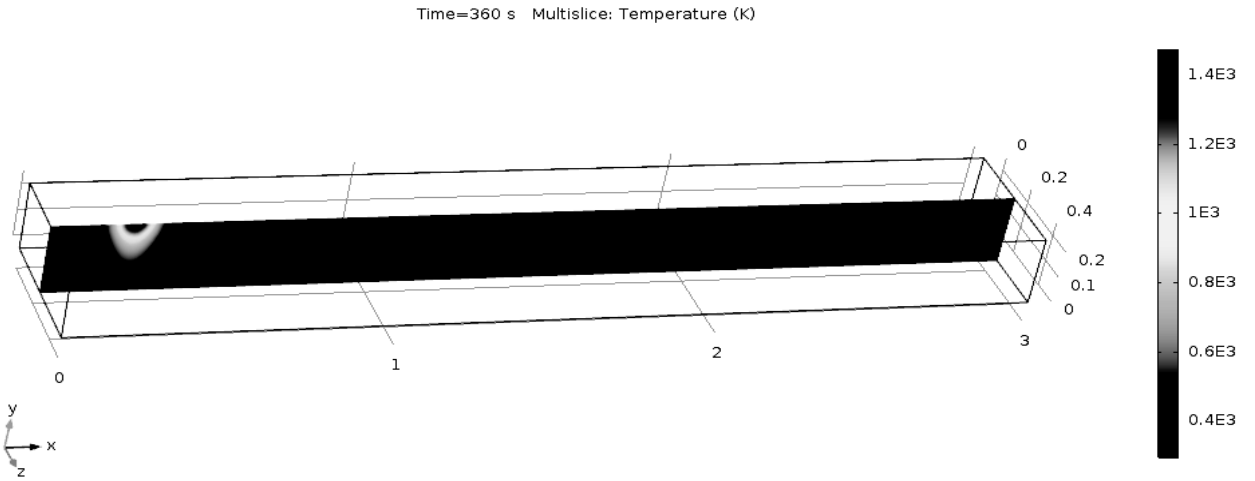


Рис. 2. Температурное поле в продольном сечении выделенного объема грунта при неподвижной излучающей системе для момента времени 360 с

Для случая нагрева грунта при движущейся излучающей системе определялась ее оптимальная скорость движения для достижения температуры 500-550 К на глубине до 5 см. Результаты моделирования в виде температурных полей на поверхности грунта, в продольном сечении и нескольких поперечных сечениях выделенного объема грунта приведены на рис. 3-5.

Установлено, что оптимальная скорость движения излучающей системы для достижения указанных выше температур нагрева составляет 0,0015 м/с. При этом до температуры 550-574 К нагревается слой грунта шириной до 4 см на поверхности.

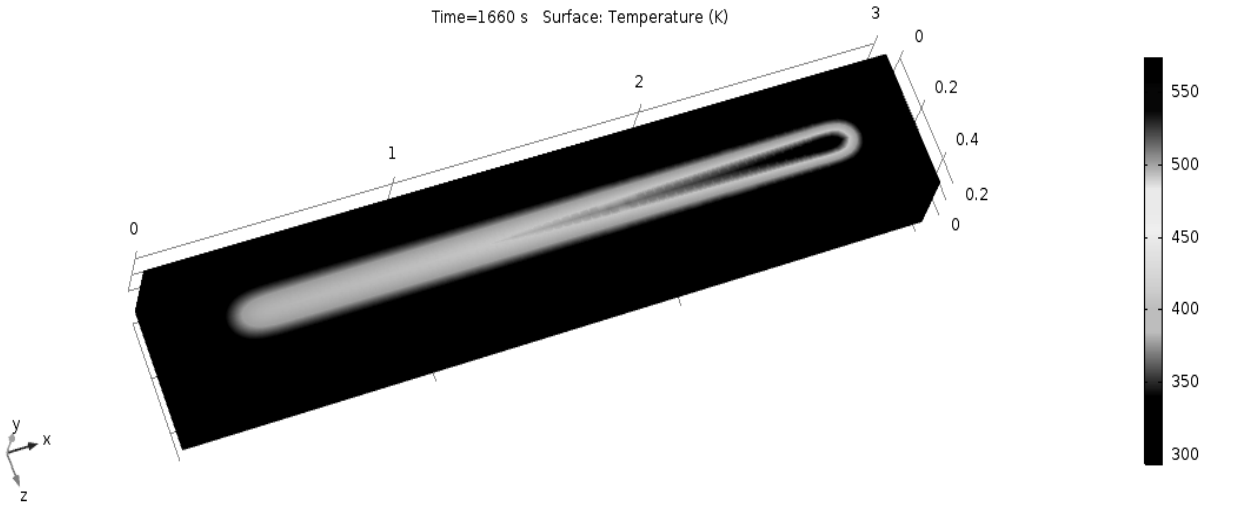


Рис. 3. Температурное поле на наружной поверхности выделенного объема грунта при движущейся излучающей системе для момента времени 1660 с

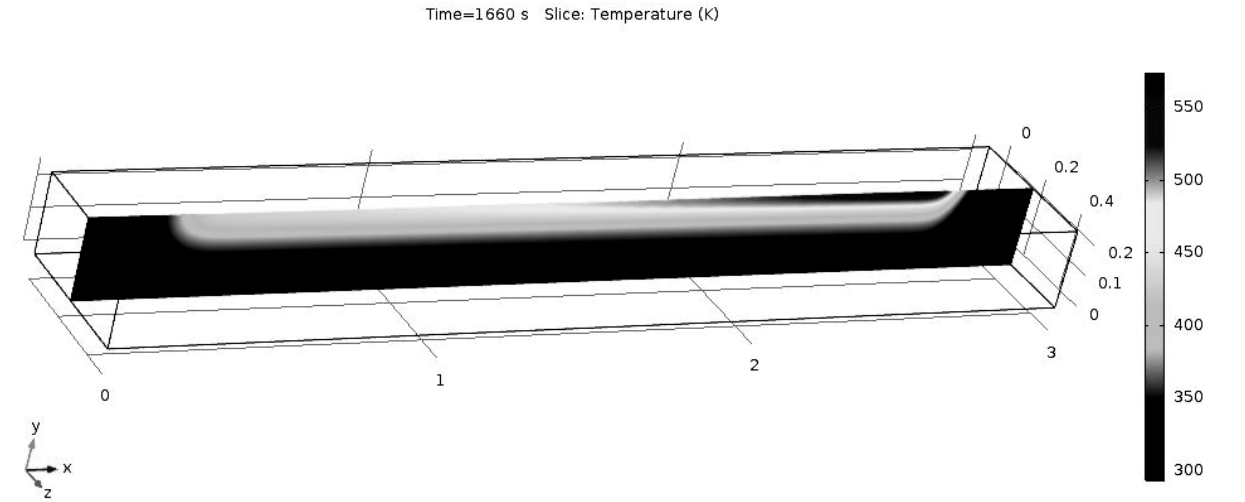


Рис. 4. Температурное поле в продольном сечении выделенного объема грунта при движущейся излучающей системе для момента времени 1660 с

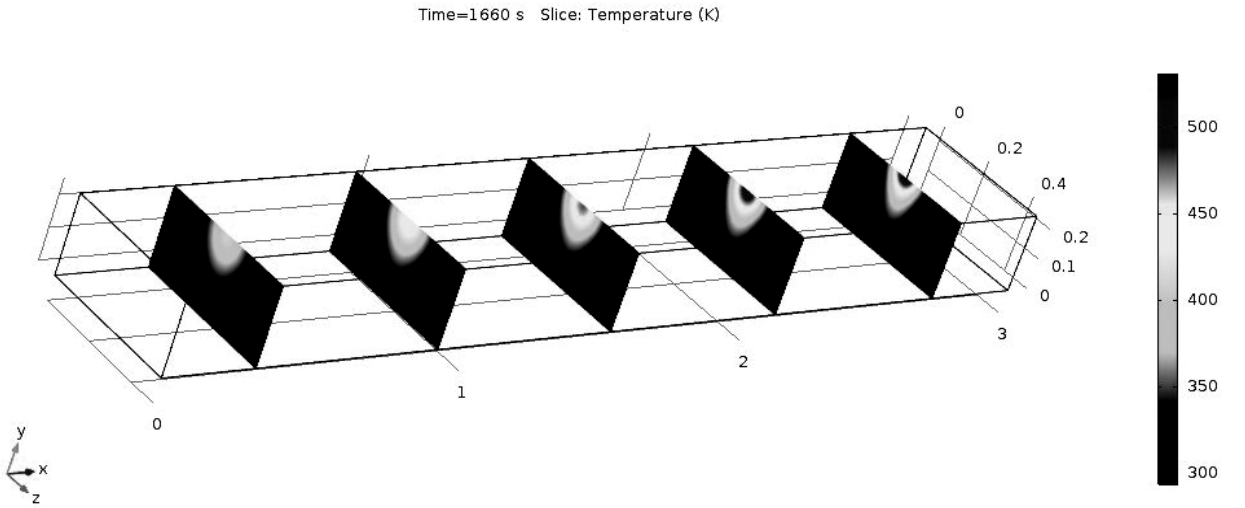


Рис. 5. Температурное поле в поперечных сечениях выделенного объема грунта при движущейся излучающей системе для момента времени 1660 с

Таким образом, пакет Comsol Multiphysics позволяет проводить математическое моделирование процессов СВЧ термообработки диэлектрических материалов в установках методического действия с учетом движения излучающей системы относительно обрабатываемого объекта и определять оптимальные параметры технологических процессов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Красников Г.Е. Моделирование физических процессов с использованием пакета Comsol Multiphisics / Г.Е. Красников, О.В. Нагорнов, Н.В. Старостин. М.: НИЯУ МИФИ, 2012.184 с.

2. Прахт В.А. Моделирование тепловых и электромагнитных процессов в электротехнических установках. Программа Comsol / В.А. Прахт, В.А. Дмитриевский, Ф.Н. Сарапулов. М.: Спутник+, 2011. 158 с.

3. Microwave oven [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.comsol.ru/model/microwave-oven-1424. Дата обращения 12.11.2016.

4. Modeling microwave heating during batch processing of a liquid sample in a singl [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.comsol.ru/paper/modeling-microwave-heating-during-batch-processing-of-a-liquid-sample-in-a-singl-25581. Дата обращения 12.11.2016.

5. **Архангельский Ю.С.** Компьютерное моделирование СВЧ электротермических процессов и установок / Ю.С. Архангельский, С.В. Тригорлый. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2006. 212 с.

Калганова Светлана Геннадьевна – доктор технических наук, заведующая кафедрой «Электроснабжение и электротехнология» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Svetlana G. Kalganova – Dr.Sc., Head: Department of Power Supply and Electrotechnologies, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

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

Yu. S. Arkhangelsky – Honored Worker of Science of the Russian Federation, Dr.Sc., Professor, Department of Power Supply and Electrotechnologies, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Тригорлый Сергей Викторович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение и электротехнология» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Sergey V. Trigorly – PhD, Associate Professor, Department of Power Supply and Electrotechnologies, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Захаров Вадим Валерьевич – аспирант кафедры «Электроснабжение и электротехнология» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Vadim V. Zakharov – Postgraduate, Department of Power Supply and Electrotechnologies, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 05.09.17, принята к опубликованию 20.09.17

УДК 532; 585-82

О НЕКОТОРЫХ НЕИЗОТЕРМИЧЕСКИХ ЛАМИНАРНЫХ ТЕЧЕНИЯХ ЖИДКОСТЕЙ

Л.И. Высоцкий

NON-ISOTHERMAL LAMINAR FLOW OF FLUIDS

L.I. Vysotsky

Изложены результаты анализа влияния на установившееся ламинарное течение жидкости в круглых трубах наведённого на него температурного поля. Рассмотрено влияние температурного поля на изменение основных параметров течения при сохранении значения гидравлического уклона. Изложено решение для случая течения между параллельными пластинами.

Ключевые слова: *неизотермическое ламинарное течение жидкости, температурное поле, СВЧ электротермические установки*

The article presents the results of analysis relating the effect of the temperature field on the steady laminar flow of fluid in circular pipes. The focus is made on the influence of the temperature field on the changes in the basic parameters of the flow, while maintaining the values of the hydraulic gradient. The proposed solution refers the cases of flow between the parallel plates.

Keywords: *non-isothermal flow of fluids, laminar flow, temperature field*

В технических приложениях встречаются случаи простейших ламинарных течений жидкостей как обычных, так и наделённых различными свойствами (например, электропроводностью и т.д.). К простейшим относятся равномерные течения в трубах кругового, прямоугольного, эллиптического и иных сечений, между параллельными пластинами и т.п. Определение параметров указанных течений (распределение скоростей, максимальной и средней скорости, расхода, распределение градиента скорости по сечению и других) производится на основе закона Ньютона о вязком трении и уравнений Навье – Стокса [1, 2]. Эти задачи подробно изучены, в том числе и при учёте теплопроводности. В последнем случае теплообменные процессы вносят свой вклад в специфику ламинарного течения и отклонения его от классического случая [1].

В последнее время появились способ воздействия на жидкость путём наложения на поток наведённого температурного поля и практически мгновенного изменения в потоке жидкости распределения температуры (например, в СВЧ электромагнитном поле). При этом кинематический коэффициент вязкости ν, зависящий от рода жидкости и температуры t, становится переменной величиной, что приводит к перераспределению и изменению всех параметров течения.

Проанализируем, как изменятся основные параметры ламинарных течений при заданном наведённом на них неким полем температуры при сохранении постоянства гидравлического уклона $i = \dfrac{\Delta p}{\rho g\, l} = \text{const}$.

Сначала рассмотрим влияние наведённого температурного поля на ламинарное течение в прямолинейной трубе круглого сечения. Классический случай, известный как течение Пуазейля, соответствует течению на участке трубы длиной L, радиус которой равен R, давление в начальном сечении равно p_1, а в конечном p_2, при ν = const (то есть при условии t = const). Решение

получается с помощью очевидных соотношений при следующей последовательности их использования.

1. Принимают условия: перепад давления $\Delta p = p_1 - p_2 = \text{const}$; расход $Q = \text{const}$; кинематический коэффициент вязкости $\nu = \text{const}$.

2. Интегрируя уравнение

$$\frac{du}{dr} = -\frac{\Delta p}{2\mu l} r = -\frac{g\,i}{2\nu} r, \qquad (1)$$

где u – скорость; r – текущий радиус; μ – динамический коэффициент вязкости; i – гидравлический уклон; g – ускорение свободного падения, получают закон распределения скоростей по поперечному сечению (Стокс, 1867):

$$u = -\frac{g\,i}{4\nu} R^2 \left(1 - \frac{r^2}{R^2}\right).$$

Для этого случая получают также такие зависимости:

– расход

$$Q = \frac{\pi g\,i}{8\nu} R^4$$

(эта формула была получена экспериментально Пуазейлем в 1840 г.);

– средняя скорость

$$V = \frac{Q}{\pi R^2} = \frac{g\,i\,R^2}{8\nu};$$

– максимальная скорость

$$u_м = \frac{g\,i\,R^2}{4\nu};$$

– отношение максимальной и средней скорости

$$\frac{u_м}{V} = 2;$$

– градиент скорости у стенки

$$\left(\frac{du}{dr}\right) = -\frac{g\,i\,R}{2\nu};$$

– число Рейнольдса

$$\mathrm{Re}_d = \frac{V d}{\nu}.$$

Далее проанализируем влияние, оказываемое наведённым полем температуры, на основные параметры течения при постоянном гидравлическом уклоне, то есть при одинаковых значениях перепада давления $\Delta p = p_1 - p_2 = \text{const}$ на расчётном участке длиной L. Пусть наведённое поле температуры описывается зависимостью $t = t(r)$, то есть распределение температуры t является осесимметричным. Для определённости выполним анализ, полагая, что жидкостью является вода. Тогда зависимость кинематического коэффициента вязкости ν от температуры выражается формулой Пуазейля

$$\nu = \frac{\nu_{0г}}{1 + a\,t(r) + b\,t(r)^2},$$

где $\nu_{0г}$ соответствует значению $t = 0$°C.

По Пуазейлю

$$\nu = \frac{0{,}01775}{1 + 0{,}0337\,t + 0{,}000221\,t^2}.$$

Присвоим параметрам течения при наведённом поле температуры индекс «*н*».

Тогда исходное уравнение (1) примет вид:

$$\frac{du_н}{dr} = -\frac{g\,i}{2\nu_{0г}} \left\{1 + t(r) + t(r)^2\right\} r. \qquad (2)$$

Найдём распределение скоростей интегрированием (2). Получим

$$u_н = -\frac{g\,i}{2\nu_{0г}} \int \left\{1 + t(r) + t(r)^2\right\} r\,dr + C. \qquad (3)$$

Постоянная интегрирования C находится из условия прилипания жидкости к стенке, то есть удовлетворения требования $u_н = 0$ при $r = R$.

Расход равен

$$Q_н = 2\pi \int_0^R u_н\,r\,dr. \qquad (4)$$

Соответственно средняя скорость определяется соотношением

$$V_н = \frac{Q_н}{\pi R^2}.$$

Значение $(u_н)_м$ получается из (3) при $r = 0$.

Градиент скорости на стенке находится из (2) при $r = R$. Гидравлический уклон определяется из выражения для $V_н$.

Значение коэффициента Дарси λ находится из формулы Дарси:

$$h_l = \lambda \frac{lV^2}{d\,2g}, \qquad (5)$$

тогда

$$\lambda_н = \frac{2g\,d}{lV_н^2}. \qquad (6)$$

Для количественной оценки степени влияния распределения температуры (в том числе, возможно, с учётом теплообмена) решим задачу для водного потока при следующих данных:

$$t(r) = t_{ст} + t_{дон}\frac{r}{R}. \qquad (7)$$

Это соответствует дополнительному нагреву воды по сравнению с начальным значением $t = t_{ст}$ на дополнительную величину $t_{дон}$ у стенки с линейным убыванием до нуля на оси трубы. В этом случае формула (3) примет вид

$$u_н = \frac{g\,i}{2\nu_{0г}}\left[\frac{r^2}{2}\left(1 + a\,t_{ст} + b\,t_{ст}^2\right) + \frac{r^3}{3R}\left(a\,t_{дон} + b\,t_{дон}\,t_{ст}\right) + \frac{r^4}{4R^2}b\,t_{дон}^2\right] + C$$

Из условия $u_н = 0$ находим C:

$$C = \frac{g\,i}{2\nu_{0г}}\left[\frac{R^2}{2}\left(1 + a\,t_{ст} + b\,t_{ст}^2\right) + \frac{R^3}{3}\left(a\,t_{дон} + b\,t_{дон}\,t_{ст}\right) + \frac{R^2}{4}b\,t_{дон}^2\right]$$

В итоге формула для $u_н$ принимает вид

$$u_н = \frac{g\,i\,R^2}{2\nu_{0г}}\left[\frac{1}{2}\left(1 - \frac{r^2}{R^2}\right)\left(1 + a\,t_{ст} + b\,t_{ст}^2\right) + \frac{1}{3}\left(1 - \frac{r^3}{R^3}\right)\left(a\,t_{дон} + b\,t_{дон}\,t_{ст}\right) + \frac{1}{4}\left(1 - \frac{r^4}{R^4}\right)b\,t_{дон}^2\right]. \qquad (8)$$

Градиент скорости найдётся из (2) при $r = R$ с учётом (7):

$$\frac{du_н}{dr} = -\frac{g\,i\,R}{2\,\nu_{0г}}\left\{1 + a(t_{ст} + t_{дон}) + b\,(t_{ст} + t_{дон})^2\right\}.$$

Отношение градиентов скорости у стенки при температурах на ней $t = t_{ст}$ и $t = t_{ст} + t_{дон}$ составит

$$\frac{\dfrac{du}{dr}}{\dfrac{du_н}{dr}} = \frac{1 + a\,t_{ст} + b\,t_{ст}^2}{1 + a\,(t_{ст} + t_{дон}) + b\,(t_{ст} + t_{дон})^2} < 1.$$

Это означает, что градиент скорости у стенки при нагреве жидкости увеличивается.

Найдём выражение для расхода $Q_н$ с помощью (4) (опуская простые промежуточные выкладки):

$$Q_н = \frac{\pi\,g\,i\,R^4}{2\nu_{0г}}\left[0{,}25\left(1 + a\,t_{ст} + b\,t_{ст}^2\right) + 0{,}2\left(a\,t_{дон} + b\,t_{дон}\,t_{ст}\right) + 0{,}1667\,b\,t_{дон}^2\right].$$

Соотношение расходов равно соотношению средних скоростей (9).

В соответствии с (6) определим среднюю скорость $V_н$:

$$V_н = \frac{g\,i\,R^2}{2\nu_{0г}}\left[0{,}25\left(1 + a\,t_{ст} + b\,t_{ст}^2\right) + 0{,}2\left(a\,t_{дон} + b\,t_{дон}\,t_{ст}\right) + 0{,}1667\,b\,t_{дон}^2\right].$$

Соотношение средних скоростей оказывается равным

$$\frac{V_н}{V}=\frac{4\nu_{ст}}{\nu_{0г}}\left[0{,}25\left(1+at_{ст}+bt_{ст}^2\right)+0{,}2\left(at_{доп}+bt_{доп}t_{ст}\right)+0{,}1667bt_{доп}^2\right]. \qquad (9)$$

Найдём значение максимальной скорости с помощью (8), полагая r =0:

$$(u_н)_м=\frac{giR^2}{2\nu_{0г}}\left[\frac{1}{2}\left(1+at_{ст}+bt_{ст}^2\right)+\frac{1}{3}\left(at_{доп}+bt_{доп}t_{ст}\right)+\frac{1}{4}bt_{доп}^2\right].$$

Отношение максимальных скоростей составит

$$\frac{u_м}{(u_н)_м}=\frac{1+at_{ст}+bt_{ст}^2}{\frac{1}{2}\left(1+at_{ст}+bt_{ст}^2\right)+\frac{1}{3}\left(at_{доп}+bt_{доп}t_{ст}\right)+\frac{1}{4}bt_{доп}^2}<1.$$

Наконец, отношение максимальной и средней скоростей равно

$$\frac{(u_н)_м}{V_н}=\frac{\frac{1}{2}\left(1+at_{ст}+bt_{ст}^2\right)+\frac{1}{3}\left(at_{доп}+bt_{доп}t_{ст}\right)+\frac{1}{4}bt_{доп}^2}{0{,}25\left(1+at_{ст}+bt_{ст}^2\right)+0{,}2\left(at_{доп}+bt_{доп}t_{ст}\right)+0{,}1667bt_{доп}^2}>1.$$

Рассмотрим второй случай простейшего ламинарного течения в прямоугольной трубе с соотношением сторон $\frac{B}{2H}>>1$, где B – ширина, а $2H$ – высота. Это течение хорошо аппроксимируется течением между параллельными плоскостями. В таком приближении исходное выражение имеет вид (при постоянной температуре t = const):

$$\frac{du}{dy}=-\frac{gi}{\nu}y,$$

где y – расстояние от оси.

Тогда введённые ранее параметры для данного течения имеют следующий вид:

– закон распределения скоростей

$$u=\frac{gi}{2\nu}H^2\left(1-\frac{y^2}{H^2}\right); \qquad (10)$$

– удельный расход

$$q=\frac{2gi}{3\nu}H^3;$$

– средняя скорость

$$V=\frac{g}{2H}=\frac{giH^2}{2\nu}; \qquad (11)$$

– максимальная скорость

$$u_м=\frac{giH^2}{3\nu}; \qquad (12)$$

– отношение максимальной и средней скоростей

$$\frac{u_v}{V}=1{,}5.$$

С учётом (11) и (12) формулу (10) можно записать так:

$$u=u_м\left(1-\frac{y^2}{H^2}\right)$$

или

$$u=1{,}5\left(1-\frac{y^2}{H^2}\right).$$

В случае наведения температурного поля на ламинарное течение воды между пластинами исходное уравнение примет вид

$$\frac{du_н}{dy}=-\frac{gi}{\nu_{0г}}\left\{1+t(y)+t(y)^2\right\}y. \qquad (13)$$

Интегрирование (12) приводит к закону распределения скоростей:

$$u_н=-\frac{gi}{\nu_{0г}}\int\left\{1+t(y)+t(y)^2\right\}y\,dy+C.$$

В случае распределения температуры по закону $t(y) = t_{ст} + t_{дон}\dfrac{y}{H}$, следуя тем же процедурам, что и в предыдущем случае, последовательно придём к формулам:

– для распределения скоростей

$$u_н = \frac{g\,i\,H^2}{2\nu_{0г}}\left[\frac{1}{2}\left(1-\frac{y^2}{H^2}\right)\left(1+a\,t_{ст}+b\,t_{ст}^2\right)+\frac{1}{3}\left(1-\frac{y^3}{H^3}\right)\left(a\,t_{дон}+b\,t_{дон}t_{ст}\right)+\frac{1}{4}\left(1-\frac{y^4}{H^4}\right)b\,t_{дон}^2\right];$$

– для максимальной скорости

$$(u_н)_м = \frac{g\,i\,H^2}{2\nu_{0г}}\left[\frac{1}{2}\left(1+a\,t_{ст}+b\,t_{ст}^2\right)+\frac{1}{3}\left(a\,t_{дон}+b\,t_{дон}t_{ст}\right)+\frac{1}{4}b\,t_{дон}^2\right];$$

– для расхода

$$Q_н = \frac{2g\,i\,H^4}{\nu_{0г}}\left[0{,}3333\left(1+a\,t_{ст}+b\,t_{ст}^2\right)+0{,}25\left(a\,t_{дон}+b\,t_{дон}t_{ст}\right)+0{,}2\,b\,t_{дон}^2\right];$$

– градиент скорости на стенке

$$\left(\frac{du_н}{dy}\right)_{ст} = -\frac{g\,i\,H}{\nu_{0г}}\left\{1+a\,(t_{ст}+t_{дон})+b\,(t_{ст}+t_{дон})^2\right\};$$

– средняя скорость

$$V_н = \frac{g\,i\,H^2}{\nu_{0г}}\left[0{,}3333\left(1+a\,t_{ст}+b\,t_{ст}^2\right)+0{,}25\left(a\,t_{дон}+b\,t_{дон}t_{ст}\right)+0{,}2\,b\,t_{дон}^2\right];$$

– отношение максимальной и средней скоростей

$$\frac{(u_н)_м}{V_н} = \frac{\dfrac{1}{2}\left(1+a\,t_{ст}+b\,t_{ст}^2\right)+\dfrac{1}{3}\left(a\,t_{дон}+b\,t_{дон}t_{ст}\right)+\dfrac{1}{4}b\,t_{дон}^2}{0{,}3333\left(1+a\,t_{ст}+b\,t_{ст}^2\right)+0{,}25\left(a\,t_{дон}+b\,t_{дон}t_{ст}\right)+0{,}2\,b\,t_{дон}^2}.$$

Рассмотренная процедура анализа влияния наведённого температурного поля на параметры простейших ламинарных течений жидкости одинаково применима и к другим возможным случаям. В частности, распределение температур $t(r)$ или $t(y)$ может быть задано иными формулами или даже таблично. В любом случае все вычисления доводятся до конца либо аналитически, либо численно.

Задачи поиска параметров ламинарных течений в трубах некругового сечения решены для случаев эллиптического, треугольного и других сечений. Однако в этом случае задача осложняется необходимостью использовать две, а не одну поперечные координаты.

Напомним, что полученные зависимости действительны лишь при условии, что числа Рейнольдса не должны превышать критического значения. Часто рекомендуемым является число $\mathrm{Re}_{кр} = 2300$. Так что должны выполняться условия

$$\mathrm{Re}_{d.k.} = \frac{V\,d}{\nu} = 2300$$

или

$$\mathrm{Re}_{H.кр.} = \frac{2VH}{\nu} = 2300.$$

Таким образом, проблема влияния наведённого температурного поля на параметры ламинарных течений решена и представлена в виде набора соответствующих им зависимостей. Выполнено сопоставление расчётных данных при одинаковых гидравлических уклонах.

Приведенные результаты могут быть использованы при проектировании СВЧ электротермических установок для нагрева жидкостей в потоке.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Лойцянский Л.Г.** Механика жидкости и газа / Л.Г. Лойцянский. М.: Наука, 1970. 904 с.

2. **Слезкин Н.А.** Динамика вязкой жидкости / Н.А. Слезкин. М.: Гостехиздат, 1955. 512 с.

Высоцкий Лев Ильич – заслуженный деятель науки и техники РСФСР, доктор технических наук, профессор кафедры «Теплоснабжение, вентиляция, водообеспечение и гидрогазодинамика» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Lev I. Vysotsky – Honored Master of Sciences and Engineering of the RSFSR, Dr. Sc., Professor, Department of Heat Services, Ventilation Systems, Water Supply, and Fluid and gas Dynamics Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 15.09.17, принята к опубликованию 20.09.17

УДК 621.365.5

СВЧ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ С ГИБРИДНЫМИ КАМЕРАМИ

А.С. Добродум, Ю.С. Архангельский

APPLICATION AND PERFORMANCE CALCULATIONS FOR THE MICROWAVE ELECTRICAL ENGINEERING UNITS WITH HYBRID CHAMBERS

A.S. Dobrodum, Yu.S. Arkhangelsky

Рассмотрены виды СВЧ модификации диэлектриков и производство, на котором может быть использована установка с гибридной рабочей камерой. Проведен расчёт производительности и мощности, потребляемой тепловой и нетепловой рабочими камерами, а также количества тепловых и нетепловых рабочих камер в одной установке.

Ключевые слова: *СВЧ электротехнологические установки, тепловая и нетепловая модификации, гибридная рабочая камера*

The article considers the various types of microwave modifications of dielectrics. The conducted analysis refers the production facilities where the given installations provided with hybrid operation chambers might be utilized. Calculations were made as for the capacity and output of the thermal and non-thermal working chambers, as well as the number of thermal and non-thermal working chambers in a single installation.

Keywords: *microwave electrical engineering installation, thermal and non-thermal modification, hybrid working chamber*

Разработка новых полимерных материалов является одним из актуальных направлений науки и техники, так как обеспечивает технический процесс в раз-

личных отраслях производства. Интерес представляет и поиск путей модификации традиционных материалов. Для модификации свойств полимеров используются электрофизические методы, такие как колебания звукового и ультразвукового диапазонов частот, виброобработка, токи высокой частоты, лазерное, электронное, ультрафиолетовое излучения. Исследования по применению электрофизических методов обработки материалов и изделий показали эффективность использования энергии сверхвысокочастотных (СВЧ) электромагнитных колебаний [1].

Так, СВЧ установка с гибридной рабочей камерой позволяет использовать энергию, оставшуюся при нетепловой модификации полимера, во второй рабочей камере для тепловой модификации другого диэлектрика, а не рассеивать её в балластной нагрузке. Дополнительно во вторую рабочую камеру при необходимости подводится энергия от второго (дополнительного) СВЧ генератора. СВЧ воздействие, в котором модифицирующий эффект достигается за счет нагрева объекта, обычно называют термическим (тепловым).

Нетепловое воздействие СВЧ электромагнитного поля впервые заметили медики и биологи. Было принято считать, что гибель микроорганизмов (биополимеров) наступает из-за их нагрева до температуры пастеризации (стерилизации), но в СВЧ электромагнитном поле биополимеры гибнут при более низкой температуре [2].

В дальнейшем было показано, что полимеры неживой природы под действием СВЧ электромагнитного поля получают новые свойства. Например, воздействие СВЧ электромагнитного поля на эпоксидный компаунд приводит к сокращению времени его отверждения в 10-50 раз. У волокнистого поликапроамида удельная разрывная нагрузка и относительное удлинение возрастают в 20 раз [3-5].

При воздействии СВЧ электромагнитных колебаний на молекулы полимера оказывают влияние весьма высокие частоты СВЧ электромагнитных колебаний, разрешенные к использованию в СВЧ установках технологического назначения, что и приводит к гибели биополимеров и образованию новых связей между молекулами полимеров неживой природы, например, и к увеличению прочностных характеристик материала в целом.

СВЧ модификация диэлектриков осуществляется в СВЧ электротехнологических установках [6, 7]. Технологический блок СВЧ электротермической установки состоит из одной (нескольких) рабочих камер и линий передачи. Основным элементом технологического блока является рабочая камера, так как в ней реализуется технологический процесс, и от её параметров зависит соблюдение требований к процессу нагрева и к качеству готового продукта.

Технологический блок СВЧ электротехнологической установки для нетепловой модификации полимера показан на рис. 1 [8]. Подобного рода установки представляют собой принципиально новый класс СВЧ электротехнологических установок.

Примером СВЧ электротехнологических установок нетеплового действия является установка для нетепловой модификации полимерных нитей. В этом технологическом процессе температура обрабатываемого объекта практически не меняется [4]. Как и СВЧ электротермическую установку, установку нетеплового действия запитывает один источник энергии. Особенностью данной установки является наличие балластной нагрузки, которая предназначена для поглощения не израсходованной на нетепловую модификацию энергии СВЧ электромагнитных колебаний. Если вместо балластной нагрузки использовать вторую рабочую камеру, в которой пришедшая из первой рабочей камеры СВЧ мощность используется для тепловой СВЧ модификации второго (другого) диэлектрика, у которого $\operatorname{tg}\delta > 0$ [9, 10], то можно повысить энергетическую эффективность СВЧ электротехнологической установки, обе рабочие камеры можно рассматривать как гибридную камеру.

Структурная схема такой установки показана на рис. 2 [8].

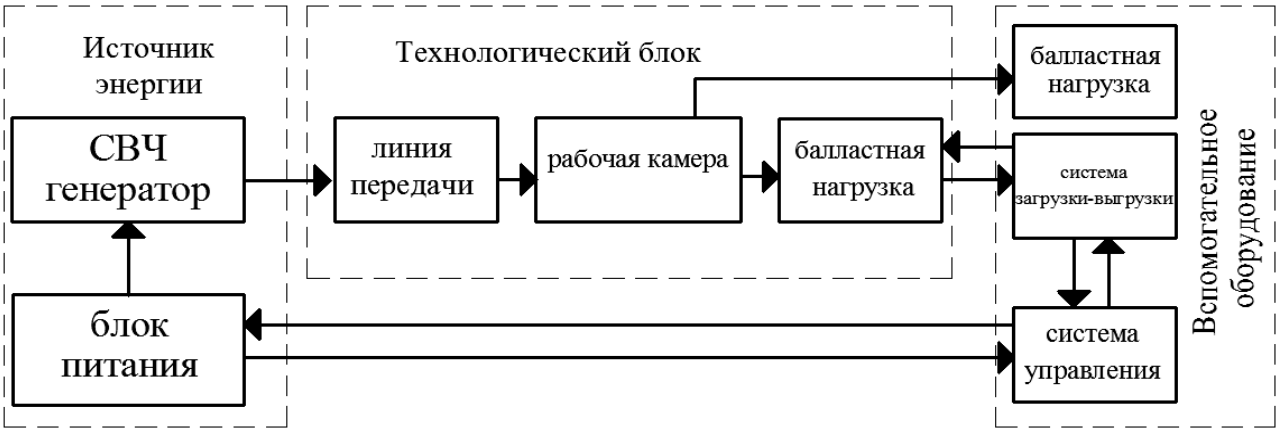


Рис. 1. Структурная схема СВЧ электротехнологической установки нетеплового действия

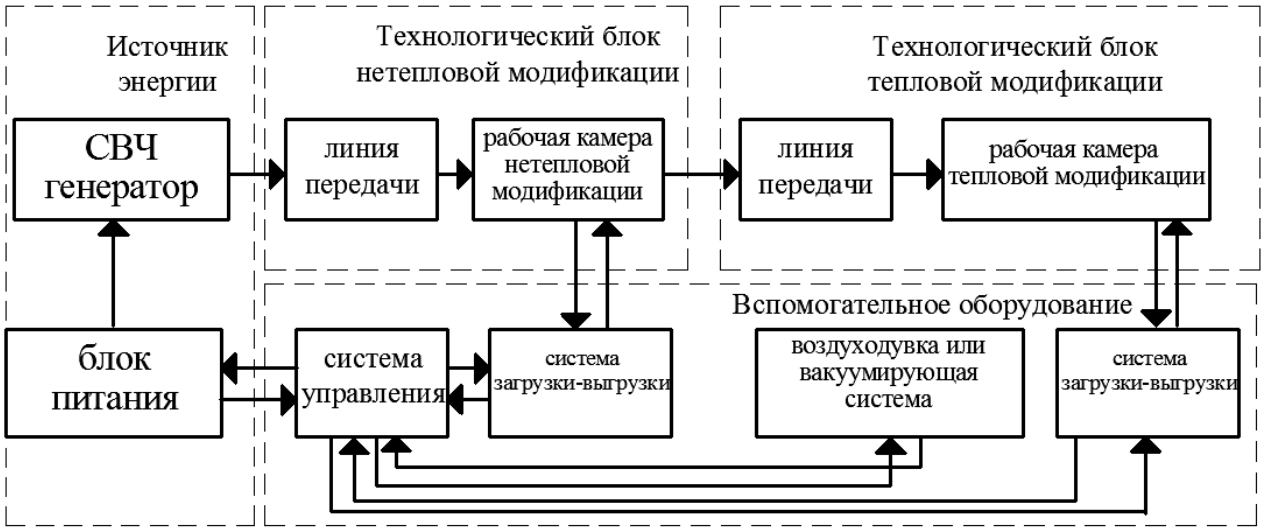


Рис. 2. Структурная схема СВЧ электротехнологической установки с гибридной рабочей камерой

Мощность, поступающую в рабочую камеру тепловой модификации, можно увеличить, используя несколько СВЧ генераторов, запитывающих рабочую камеру нетепловой СВЧ модификации (рис. 3 *а*) [8] или используя дополнительный СВЧ генератор, запитывающий рабочую камеру тепловой модификации (рис. 3 *б*) [10, 11].

Для технологического процесса нетепловой СВЧ модификации требуется определенная величина напряженности электрического поля электромагнитной волны в рабочей камере, что определяет СВЧ мощность, подаваемую в эту рабочую камеру. Тогда дополнительная СВЧ мощность, требующаяся в рабочей камере тепловой СВЧ модификации, определяется соотношением [8]

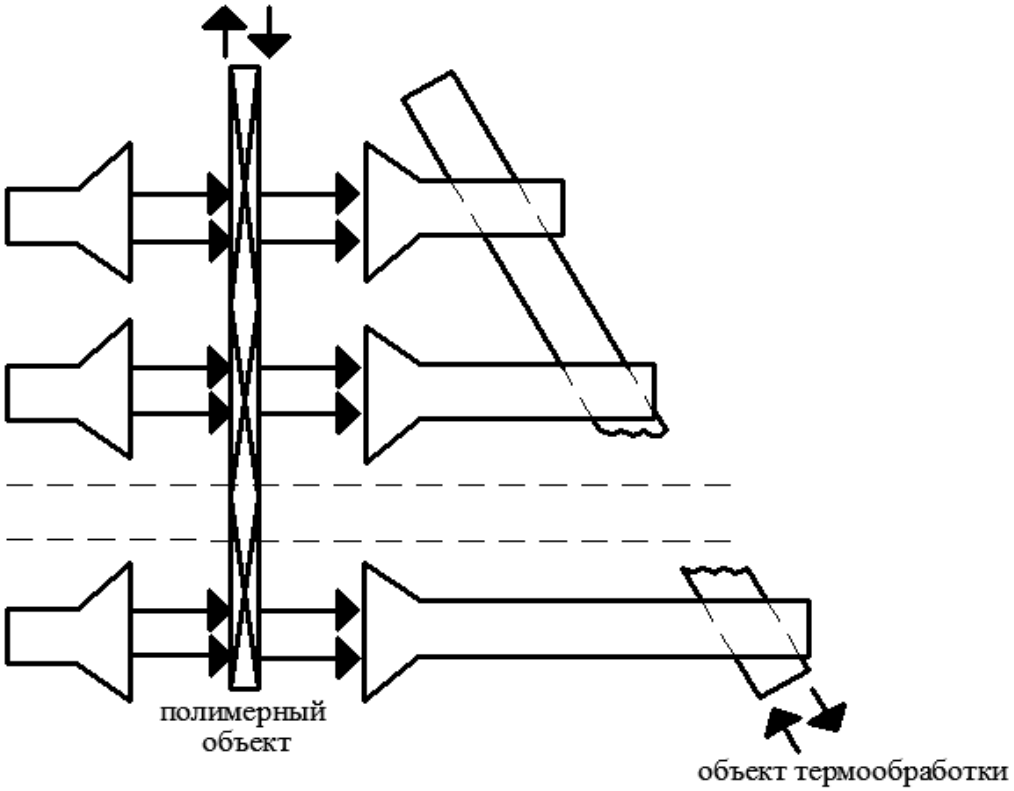
$$P_{доп} = P_{ТМ} - P_{СВЧ}, \qquad (1)$$

где $P_{ТМ}$ – СВЧ мощность, требуемая для тепловой модификации; $P_{СВЧ}$ – СВЧ мощность, требующая нетепловой модификации.

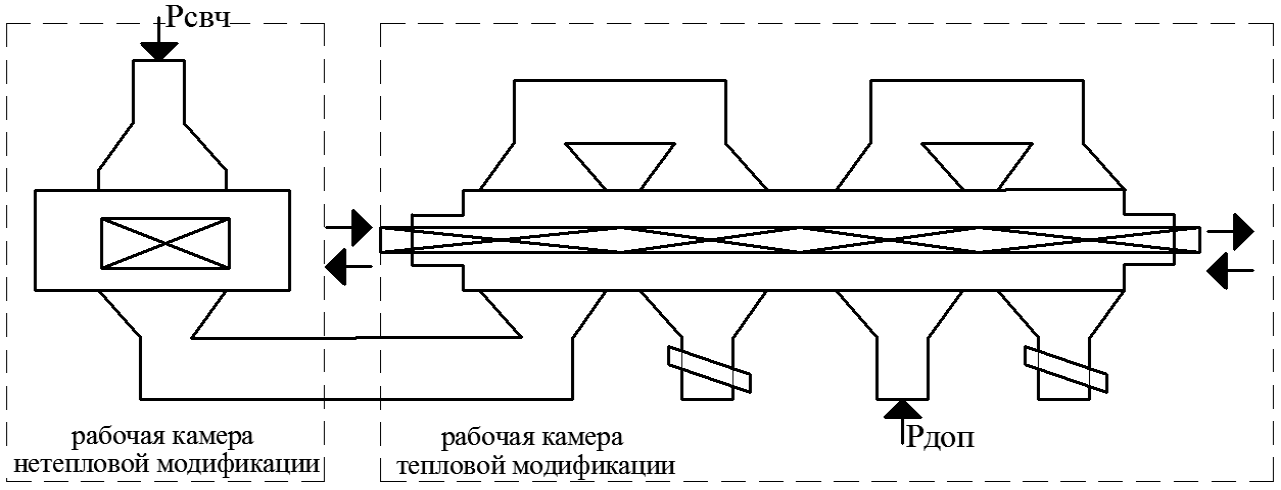
СВЧ электротехнологическая установка с гибридной рабочей камерой дороже установки тепловой или нетепловой модификации, но ее экономическая эффективность выше.

Как показано в работе [8], при проектировании СВЧ установки с гибридной

рабочей камерой предприятию, производящему продукцию с использованием нетепловой СВЧ модификации, нужно подобрать выпуск другой продукции, для которой требуется тепловая СВЧ модификация. Например, на предприятии, производящем синтетические нити или волокна, СВЧ установка с гибридной рабочей камерой может дополнительно осуществлять сушку мытой шерсти для изготовления шерстяных изделий с синтетической нитью. Производительность сушильной установки обычно задают по сухой шерсти.



а



б

Рис. 3. Технологические блоки СВЧ ЭТУ с гибридной рабочей камерой: а – установка с несколькими СВЧ генераторами рабочей камеры нетепловой СВЧ модификации; б – установка с дополнительным СВЧ генератором рабочей камеры тепловой модификации

Таким образом, при проектировании СВЧ установки необходимо рассчитать, какая мощность затрачивается для тепловой и какая – для нетепловой модификаций, и определить, какое количество камер необходимо для осуществления обоих процессов производства.

Шерсть после мойки в барках и отжима на валковых устройствах имеет влажность около 50%, так что масса шерсти перед сушкой составит

$$m_н = 1{,}5 m_ш, \qquad (2)$$

где $m_н$ – начальная масса шерсти; $m_ш$ – масса сухой шерсти.

Энергия, необходимая для тепловой модификации, равна

$$P_{TM} = \frac{c_{(ш+в)} m_н (t_{нагрева} - t_{окр.среды}) + r\, m_в}{\tau_м}. \qquad (3)$$

В практических расчетах обычно используют средние значения, так что $c_{(ш+в)}$ = 6,25 Дж/(кг°С) – средняя удельная теплоемкость шерсти и воды с учетом соотношения масс; $m_н$ – начальная масса шерсти, кг; $t_{нагрева}$ – температура нагрева, °С; $t_{окр.\ среды}$ – температура окружающей среды, °С; $m_в$ – масса воды, удаляемой в процессе сушки шерсти, кг; r – удельная теплота парообразования, Дж/кг; $\tau_м$ – время, с.

Для осуществления нетепловой модификации полимерной нити на частоте 2450 МГц в волноводе сечением 45-95 мм необходима мощность в 100 Вт [5], то есть в гибридной рабочей камере может быть несколько камер нетепловой модификации. Для определения количества рабочих камер нетепловой модификации необходимо знать, в какой пропорции нужно производить шерсть и полимерную нить.

В текстильной промышленности популярна смесь полимерной нити с шерстью. Их сочетание делает изделие более практичным. Шерсть уменьшает электризуемость синтетики. В отличие от стопроцентной шерсти ткань с нитью становится более прочной, меньше мнется и не подвергается усадке. Повышаются ветрозащитные свойства изделия, сохраняются теплозащитные свойства.

Сейчас в текстильной промышленности для производства материала используется 55% шерсти и 45% нити.

Выбрав соотношение между необходимым количеством нити и шерсти, определим количество нетепловых рабочих камер.

Если производительность тепловой рабочей камеры, высушивающей шерсть, равна 5 кг/ч, а шерсть составляет 55% готовой продукции, то производительность нетепловой рабочей камеры, модифицирующей нить, составит

$$X = \frac{5 \cdot 0{,}45}{0{,}55} = 4{,}1 \text{ кг/ч}, \qquad (4)$$

Если нетепловая модификация проводится на частоте 2450 МГц, рабочая камера собрана на прямоугольном волноводе сечением 45×90 мм, нить проходит рабочую камеру через щели, прорезанные в середине широких стенок волновода параллельно узким стенкам, время нетепловой модификации в таком случае равно $\tau_м$ = 10 с [5], а скорость нити в рабочей камере равна

$$\upsilon = \frac{b}{\tau_м}, \qquad (5)$$

где b – ширина узкой стенки волновода рабочей камеры, м; τ – время прохождения полимерной нити через рабочую камеру, с.

Общая длина нити в K нетепловых рабочих камерах равна

$$L = \upsilon \tau_м n K, \qquad (6)$$

где n – количество нитей в одной нетепловой рабочей камере, проходящих параллельно друг другу; K – количество нетепловых рабочих камер.

В таком случае соотношение, определяющее производительность нетепловой рабочей камеры, имеет вид

$$G = \frac{\pi R^2 L \rho b}{\tau_м}, \qquad (7)$$

где R – радиус одной нити, м; ρ – плотность нити, кг/м^3.

Так что при заданных G, r, ρ, $\tau_м$, n соотношение (7) дает возможность определить количество нетепловых рабочих камер K.

Следует сказать, что СВЧ электротехнологические установки с гибридной рабочей камерой позволят повысить экономическую эффективность того производства, где возможно их применение. Установка позволит получить максимальную выгоду с минимальными затратами и повысить качество выпускаемой продукции. Повысится конкурентоспособность предприятия.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Архангельский Ю.С.** Элементная база СВЧ электротермических установок / Ю.С. Архангельский, В.А. Воронкин. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2003. 213 с.

2. Влияние электромагнитных полей СВЧ диапазона на бактериальную клетку / В.В. Игнатов и др. Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 1978. 124 с.

3. **Лаврентьев В.А.** Влияние СВЧ электромагнитного поля на процесс отверждения эпоксидных смол / В.А. Лаврентьев, С.Г. Калганова // Современные проблемы радиоэлектроники: сб. науч. тр. Междунар. науч.-практ. конф. Красноярск: Крас. гос. техн. ун-т, 2002.

4. **Калганова С.Г.** Нетепловое действие СВЧ электромагнитного поля на диэлектрические объекты / С.Г. Калганова, Ю.С. Архангельский // Электротехнологические СВЧ установки: межвуз. науч. сб. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2000.

5. СВЧ модификация полимеров / Ю.С. Архангельский, Е.М. Гришина, В.А. Лаврентьев, С.К. Слепцова. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2012. 288 с.

6. **Архангельский Ю.С.** Установки сверхвысокочастотного диэлектрического нагрева / Ю.С. Архангельский. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2010. 280 с.

7. **Архангельский Ю.С.** Справочная книга по СВЧ электротермии / Ю.С. Архангельский. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2009. 564 с.

8. **Добродум А.С.** Терминологическая база, энергоэффективность и энергосбережение СВЧ электротехнологических установок / А.С. Добродум, А.В. Федоров, Ю.С. Архангельский, С.Г. Калганова // Вопрос электротехнологий. 2017. № 2 (14). С. 94-102.

9. **Архангельский Ю.С.** Гибридная СВЧ электротехнологическая установка / Ю.С. Архангельский, Е.М. Гришина // Логистика и экономика ресурсосбережения и энергосбережения в промышленности (МНПК ЛЭРЭП-2-2007): сб. науч. тр. Междунар. науч.-практ. конф. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2007. Т. 2. С. 227-280.

10. Патент РФ 86373, МКП H 05B6/64. Комбинированная установка для СВЧ обработки материалов с различными диэлектрическими свойствами / Ю.С. Архангельский, С.Г. Калганова, Е.М. Гришина, В.А. Лаврентьев; заявитель и патентообладатель Сарат. гос. техн. ун-т, № 2009100389/22; заявл. 11.01.2009; опубл. 27.08.2009. Бюл. № 24. 3 с.

11. Патент РФ 2591074, МКП F 26B 13/08. Установка для сушки шерсти в электромагнитном поле сверхвысокой частоты / М.В. Белова, А.А. Белов, Г.В Новикова, О.В. Михайлова, Н.А. Куторкина, Т.А. Лаврентьева; заявитель и патентообладатель Автономная некоммерческая организация высшего образования «Академия технологии и управления», № 2015102545/06; заявл. 27.01.2015; опубл. 10.07.2016. Бюл. № 19. 18 с.

Добродум Антон Сергеевич – студент магистратуры кафедры «Электроснабжение и электротехнология» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

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

Anton S. Dobrodum – Master Student, Department of Power Supply and Electrotechnologies, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Yu.S. Arkhangelsky – Honored Worker of Science of the Russian Federation, Dr.Sc., Professor, Department of Power Supply and Electrotechnologies, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 02.09.17, принята к опубликованию 20.09.17

УДК 621.365.5

ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ СВЧ ТЕРМООБРАБОТКИ ДИЭЛЕКТРИКОВ И МЕТОДЫ ИХ МОДЕЛИРОВАНИЯ С УЧЕТОМ ИЗМЕНЕНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ, ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДОВ И ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА

В.В. Захаров

ELECTROTECHNOLOGICAL PROCESSES FOR THE MICROWAVE HEAT TREATMENT OF DIELECTRICS AND METHODS FOR THEIR MODELING USING THE CHANGES IN THE PHYSICAL PROPERTIES OF MATERIALS, PHASE TRANSITIONS, AND HEAT AND MASS TRANSFER

V.V. Zakharov

Приведен обзор СВЧ электротехнологических процессов и установок для термообработки диэлектриков, а также методов их моделирования с учетом изменения физических свойств материалов, фазовых переходов и тепломассопереноса. Основное внимание уделено численному моделированию указанных процессов с применением актуальных вычислительных методов, реализованных в современном программном обеспечении.

Ключевые слова: *математическое моделирование, электротехнология, СВЧ нагрев, физические свойства, фазовый переход, тепломассоперенос*

The paper presents an overview of microwave electrotechnological processes and installations used for heat treatment of dielectrics, as well as the methods for their simulation taking into account the changes in the physical properties of materials, phase transitions, and heat and mass transfer. The focus is made on the numerical modeling of the given processes using the updated computational methods applied for the latest software programs.

Keywords: *mathematical modeling, electrotechnology, microwave heating, physical properties, phase transition, heat and mass transfer*

Применение СВЧ технологии в промышленности в ряде случаев сдерживается такими факторами, как высокая стоимость электроэнергии, недостаточные теоретические знания о взаимодействии СВЧ энергии с объектами обработки, отсутствие или несовершенство методик проектирования СВЧ установок, включая математические модели технологических процессов. Вместе с тем СВЧ технология представляет огромный потенциал в части повышения энергоэффективности и качества технологических процессов.

Приведем обзор процессов СВЧ термообработки диэлектриков, а также СВЧ электротехнологических установок, реализующих данные процессы.

В соответствии с [1] СВЧ электротермические установки классифицируются:

– по мощности: малой, средней и большой мощности;

– по режиму работы: автономные и работающие в технологической линии;

– по действию: периодического и методического действия;

– по назначению: для пастеризации и стерилизации, для нагрева, для сушки, для вулканизации и полимеризации, для дефростации, для разрушения, для научных исследований.

Рабочие камеры классифицируются в зависимости от соотношения характерного линейного размера рабочей камеры и длины волны, а также от режима распространения волны на камеры лучевого типа ($l >> \lambda$), камеры со стоячей и с бегущей волной ($l \sim \lambda$).

В основе математических моделей, описывающих процессы СВЧ термообработки диэлектриков, лежат уравнения электродинамики (уравнения Максвелла) [2] и теплопроводности (уравнение теплопроводности Фурье) [3] вместе с соответствующими начальными и граничными условиями. Система данных уравнений представляет собой связанную (самосогласованную) задачу электродинамики и теплопроводности [1]. В зависимости от конкретных областей применения математических моделей данная система уравнений может трансформироваться путем добавления уравнений тепломассопереноса (СВЧ сушка), термомеханики (разрушение материалов мощными СВЧ импульсами), гидродинамики (комбинированный СВЧ – конвективный нагрев) и др.

Математические формулировки моделей взаимодействия электромагнитного поля с поглощающими СВЧ энергию средами обобщены в работе [4]. В указанной работе приведены формулировки следующих моделей:

– связанная задача электродинамики и теплопроводности;

– связанная задача электродинамики и тепломассопереноса;

– связанная биотепловая задача;

– связанная задача с учетом экзотермических реакций;

– модель с учетом изменения агрегатного состояния (фазовый переход) нагреваемого материала и радиационных эффектов;

– связанная задача электродинамики, теплопроводности и свободной конвекции;

– связанная задача электродинамики, теплопроводности и термомеханики.

Для решения вышеперечисленных задач актуально применение численных методов моделирования:

– метод конечных разностей (далее – МКР) [5];

– метод конечных элементов (далее – МКЭ) [6, 7];

– метод граничных элементов [8].

В связи с появлением в последнее время современного программного обеспечения (ELCUT, COMSOL Multiphysics, ANSYS и др.), на наш взгляд, наиболее предпочтительным для решения вышеприведенных задач является метод конечных элементов (Finite Element Method, FEM – в зарубежной литературе) – численный метод решения дифференциальных уравнений с частными производными, а также интегральных уравнений, возникающих при решении задач прикладной физики.

Поскольку на текущий момент имеется большое количество публикаций, содержащих весьма подробные обзоры типов СВЧ электротехнологических установок и реализуемых в них процессов (например, работы [1, 9-12]), сконцентрируем внимание на тех СВЧ технологиях, для которых наиболее актуально математическое моделирование с учетом изменения физических свойств обрабатываемых диэлектриков, фазовых переходов и тепломассопереноса.

Изменение электро- и теплофизических свойств диэлектрика во время нагрева в зависимости от температуры особенно характерно для высокотемпературных процессов. К таким процессам, в частности, относится спекание керамики, при котором диапазон температур спекания может составлять 1000-2000°С. Некоторые авторы [13] приводят сведения о том, что СВЧ спекание керамики может протекать при более низких температурах и за более короткое время по сравнению с традиционными методами термообработки. Кроме того, при СВЧ спекании удается обеспечить однородную наноразмерную структуру готовых изделий, что достигается, в том числе, за счет равномерного объемного нагрева. С использованием технологии СВЧ спекания производят высоковольтные керамические

изоляторы [14], металлокерамические функциональные материалы для устройств оптоэлектроники, теплозащитных, антикоррозионных и износостойких покрытий, биоимплантов [15], высокотемпературные кабельные вводы, элементы радиоэлектронных устройств. Подробный обзор принципов и оборудования для высокотемпературной СВЧ обработки керамики приведен, например, в работе [16].

При спекании керамик, кроме равномерности нагрева, весьма значительным фактором является скорость нагрева. При нагревании предварительно уплотненного образца одновременно происходят процессы роста его зерен и их уплотнение. Рост зерен является нежелательным процессом, если требуется получение наноразмерной структуры изделия [17]. Чтобы максимально увеличить уплотнение зерен и при этом уменьшить их рост, применяют высокие скорости нагрева.

Поскольку большая часть керамик при температуре, близкой к комнатной, являются слабо поглощающими СВЧ энергию материалами (например, керамики на основе корунда), для обеспечения интенсивного нагрева применяется так называемый «гибридный» СВЧ нагрев. При этом спекаемое изделие помещается в оболочку из хорошо поглощающего СВЧ энергию материала (например, карбид кремния), называемую аппликатором. Таким образом, до критической температуры спекаемого изделия оно нагревается преимущественно косвенно за счет теплопроводности и излучением от аппликатора и лишь частично СВЧ излучением. По достижении критической температуры диэлектрические потери спекаемого материала возрастают, и нагрев происходит в основном за счет СВЧ излучения. Так, в работе [18] приведены результаты исследований многослойного аппликатора, состоящего из карбида кремния и корунда при спекании керамического образца из слабо поглощающего СВЧ излучение карбида циркония.

В большинстве технологий при спекании керамик используются рабочие камеры, работающие в режиме резонатора при рабочей частоте 2,45 ГГц, где в качестве источников СВЧ энергии применяются магнетроны. Кроме того, ряд исследований посвящен спеканию керамик с использованием гиротронных комплексов, работающих на частотах свыше 30 ГГц, например [19]. Данные технологии обеспечивают весьма высокое качество готовых изделий, однако представляют собой дорогостоящее высокотехнологичное оборудование.

Вопросы математического моделирования спекания керамических материалов в поле СВЧ в рабочей камере лучевого типа с волноводами связи рассмотрены в работе [20]. Математическое описание процесса представляет собой самосогласованную краевую задачу электродинамики и теплопроводности с учетом зависимости изменения физических свойств обрабатываемого материала от температуры. При этом фазовые переходы и микроуровневые процессы в модели не учитываются.

В работе [21] приведены результаты численного моделирования спекания циркониевой керамики в СВЧ камере на базе прямоугольного волновода. Анализировалось влияние теплоизоляции спекаемой заготовки, а также аппликатора из карбида кремния на возможность осуществления гибридного СВЧ нагрева. Выявлено, что аппликатор не экранирует спекаемую заготовку от электромагнитного поля и предварительно подогревает ее в диапазоне температур с низкими диэлектрическими свойствами, что позволяет осуществлять гибридный СВЧ нагрев.

Математическая модель включала связанную задачу электродинамики и теплопроводности с учетом уплотнения заготовки в процессе спекания (приведено дифференциальное уравнение изменения плотности заготовки в функции температуры). Температурные зависимости учитывались только для диэлектрической проницаемости. Остальные электро- и теплофизические свойства нагреваемого объекта задавались постоянными. Решение осуществлялось в трехмерной постановке с использованием МКЭ, реализованного в программном обеспечении COMSOL Multiphysics.

В работе [22] приведены результаты численного моделирования спекания циркониевой керамики в резонаторной камере для разных размеров спекаемого образца. Исследовано влияние размера образца на поглощение электромагнитной энергии. При моделировании решалась связанная задача электродинамики и теплопроводности. Электродинамическая задача решалась с помощью МКР, реализованного в программном обеспечении QuickWave-3D, задача теплопроводности решалась с помощью МКЭ, реализованного в программном обеспечении COMSOL Multiphysics.

В работе [23] приведены результаты численного моделирования СВЧ технологии производства кремниевых солнечных элементов, применяемых в фотовольтаике, телекоммуникационной промышленности. Рабочая камера представляет собой резонатор, включающий тигель для удержания образца кремния, патрубки для ввода и вывода инертного газа, ввод СВЧ энергии от прямоугольного волновода. Процесс получения кремниевых солнечных элементов является высокотемпературным (температура порядка 2000 °С). Для получения кремниевой продукции, которую можно использовать в качестве солнечных элементов требуется получение готового материала с чистотой порядка 99,9999%. С этой целью термообработка производится в среде инертного газа, наличие которого при прокачке через рабочую камеру приводит к теплопотерям конвекцией, что было учтено авторами статьи при математическом моделировании. Численное моделирование проводилось с помощью МКЭ, реализованного в программном обеспечении COMSOL Multiphysics. В данной работе не сообщается, учитывались ли в процессе моделирования изменения электро- и теплофизических свойств в процессе нагрева.

В работе [24] приведены результаты численного моделирования термообработки керамических изделий (чашек) в многомодовых камерах (камера лучевого типа с ограниченным объемом) большого объема (500-4000 л) с применением МКР в трехмерной постановке. Учитывалось влияние материалов и формы аппликаторов (цилиндрические и прямоугольные), а также количества полок с керамическими изделиями на распределение в них температурного поля. При решении с помощью МКР использовались конечно-разностные аналоги дифференциальных уравнений электродинамики и теплопроводности. Учитывались температурные зависимости диэлектрической проницаемости аппликаторов и обрабатываемых керамических изделий.

На основании вышеизложенного можно сделать вывод о том, что при математическом моделировании процессов спекания керамики необходимо учитывать не только изменения электро- и теплофизических свойств спекаемых изделий во время нагрева, но и учитывать изменения соответствующих свойств конструктивных элементов СВЧ камер – аппликаторов, огнеупоров, теплоизоляторов.

Одним из направлений использования СВЧ энергии в технологических целях является плавление различных материалов. Ряд работ, связанных с процессами СВЧ плавления (фазовый переход первого рода), посвящен проблеме плавления льда и снежно-ледяных масс. В работах [25, 26] экспериментально исследован процесс СВЧ оттаивания снежно-ледяной массы при различных расположениях слоев. Процессы СВЧ термообработки с фазовыми переходами применяются в пищевой промышленности при дефростации замороженных продуктов [27].

Фазовые переходы имеют место при плавлении асфальто-парафиновых отложений в трубах нефтяных скважин и при перекачке нефти в условиях пониженных температур и давлений. В работе [28] исследуется процесс СВЧ нагрева и плавления твердых отложений в трубе с учетом зависимости коэффициента затухания электромагнитной волны от температуры, порождающей нелинейность объемного источника тепла.

В [29] авторами приводится описание установки плавления жира в многорезонаторной СВЧ камере, а также уравнение, описывающее изменение содержания жира

в сферической резонаторной камере в процессе термообработки.

В работе [30] приведены результаты изучения процесса СВЧ плавления живицы – продукта жизнедеятельности деревьев, преимущественно хвойных, представляющего собой бесцветное вязкое смолистое вещество с характерным хвойным запахом, используемое в качестве сырья для производства бальзамов (в том числе лечебных), иммерсионного масла, основы для жевательных резинок, клея-пасты для проклейки бумаги. В результате проведенных исследований были определены оптимальные параметры плавления кедровой живицы: температура, СВЧ мощность и время, которые позволили получить продукт с высокими органолептическими показателями и химическим составом, близким к составу сырой живицы.

В работах [31, 32] приведены результаты экспериментальных исследований процесса СВЧ плавления базальта, которые позволили определить энергетические затраты, приведённые к весу нагреваемого образца базальта, которые составили 0,8 кВт·ч/кг, что практически на порядок меньше энергетических затрат на плавление базальта при традиционных технологиях.

СВЧ технологии, связанные с плавлением, в большинстве своем на текущий момент находятся на стадии исследований и широкого промышленного применения пока не получили. Однако, на наш взгляд, имеется потенциал применения данных технологий при производстве строительных материалов, сварке пластмассовых изделий, оттаивании грунта (особенно актуально в условиях Крайнего Севера), удалении асфальто-парафиновых и кристаллогидратных отложений в трубопроводах, нанесении диэлектрических композитов на металлические подложки, плавлении битума, плавлении жира (в пищевой промышленности) и др.

Для процессов плавления характерно наличие подвижной фазовой границы (фронта плавления), изменение положения которой приводит к изменению конфигурации электромагнитного поля, следовательно, влияет на распределение внутренних источников тепла, что необходимо учитывать при математическом моделировании данных процессов.

Весьма подробный обзор методов математического моделирования тепловых процессов плавления и кристаллизации (решение уравнения теплопроводности с учетом фазового перехода, без учета задачи электродинамики) приведен в работе [33]. Данные методы делятся на аналитические (например, метод Неймана, интегральный метод теплового баланса) и численные, основанные на сеточных методах МКР, МКЭ. Класс задач с подвижной фазовой границей (или фронтом плавления) получил название задач Стефана. Граничное условие четвертого рода (на фазовой границе) в уравнении теплопроводности также называют условием Стефана.

Численные методы моделирования фазовых переходов условно можно разделить на два типа: методы сквозного счета и методы с явным выделением фазовой границы [34].

Методы сквозного счета формулируются таким образом, чтобы условие Стефана неявно включалось в новую форму уравнений, которая применяется во всей зоне фиксированной области. К этим методам относятся метод кажущейся теплоемкости, метод эффективной мощности, интегральный тепловой метод, метод на основе источника, энтальпийный метод и т. д. Данные методы требуют задания некоторого диапазона температур фазового перехода, что адекватно описывает плавление и кристаллизацию материалов с примесями, однако не совсем корректно описывает задачи плавления и кристаллизации чистых материалов, для которых фазовый переход происходит при фиксированной температуре.

Методы с явным выделением фазовой границы являются более точными, однако требуют начального приближения положения и формы фазовой границы.

Как упоминалось выше, подавляющее большинство исследований в области СВЧ плавления посвящено проблеме плавления льда.

В работах [35, 36] рассмотрены вопросы численного моделирования фазовых переходов в плоскослоистой структуре при СВЧ плавлении льда. Задачи решались с применением МКР по неявной схеме на сетке, узловые точки которой совпадают с граничными точками слоев. Использовался метод фиксации фронта в узле пространственной сетки.

В работе [36] предложена математическая модель управления движением фазовой границы при плавлении льда с использованием СВЧ энергии. Целью задачи являлось обеспечение движения фазовой границы с заданной постоянной скоростью.

Проведенный анализ публикаций показал отсутствие на текущий момент каких-либо работ по математическому моделированию процессов СВЧ плавления с использованием МКЭ. При этом данный метод является наиболее перспективным для решения данного класса задач [37] и имеет следующие преимущества перед МКР:

– подходит для тел любой геометрической формы и для любой размерности пространства;

– позволяет выборочно повышать точность решения для отдельных областей геометрии путем уменьшения размера элементов в данных областях и, напротив, укрупнять размеры элементов для областей, где не требуется большая точность расчетов;

– подходит для решения связанных задач;

– реализован в доступном программном обеспечении, позволяющем автоматизировать расчеты и быстро получать наглядные результаты.

Актуальной задачей является адаптация существующих методов моделирования фазовых переходов в задачах теплопроводности к связанным задачам электродинамики и теплопроводности, решаемым с помощью МКЭ, и выбор наиболее подходящих методов для решения указанных задач.

Традиционно одним из наиболее распространенных направлений использования СВЧ, для которых характерен тепломассоперенос, является сушка. Основы теории сушки (в том числе сушки в переменном электромагнитном поле) заложены А.В. Лыковым [38, 39]. СВЧ сушка имеет очень широкие области применения: в сельском хозяйстве [40], в пищевой промышленности [41], при производстве керамики [42], в деревообрабатывающей промышленности [43], в полиграфической промышленности [44] и др.

В технологиях сушки СВЧ нагрев имеет следующие преимущества перед традиционными видами нагрева [10]:

– объемное тепловыделение способствует перемещению влаги из внутренних слоев обрабатываемого объекта к наружным;

– эффект саморегуляции СВЧ нагрева, заключающийся в том, что нагреву подвержены наиболее увлажненные участки обрабатываемого объекта, так как диэлектрические потери в данном случае обусловлены в основном влагосодержанием;

– безынерционность процесса СВЧ нагрева, обеспечивающая высокую точность регулирования нагрева.

В процессах сушки происходят тепломассоперенос, сопровождаемый изменением влагосодержания обрабатываемого объекта во время нагрева, фазовые переходы (при испарении влаги), что неизбежно приводит к изменению электро- и теплофизических свойств объектов сушки. Кроме того, при больших градиентах температуры, влагосодержания и давления в капиллярах возможны термомеханические явления, что приводит к образованию трещин, короблению и пр.

Следовательно, при математическом моделировании процессов сушки целесообразно учитывать вышеперечисленные явления.

В публикациях [45-47] приведены результаты моделирования СВЧ термообработки пищевых продуктов. С помощью МКЭ, реализованного в программном обеспечении Comsol Multiphysics, выполнено численное решение связанных задач электродинамики, тепломассопереноса, сохранения массы и энергии с учетом фазовых переходов. В перечисленных работах приведены основные дифференциальные уравнения, описывающие процесс СВЧ термообработки, результаты математиче-

ского моделирования и сопоставление результатов моделирования с экспериментальными данными. Численные и натурные эксперименты проводились для рабочих камер со стоячей волной на частоте 2,45 ГГц. В моделях не учитывались изменения электро- и теплофизических свойств в зависимости от температуры, предполагалось изначально равномерное влагосодержание по объему обрабатываемого объекта и отсутствие в объекте связанной воды. Тем не менее была выявлена качественная сходимость результатов моделирования с результатами экспериментов.

На основании приведенного обзора можно сделать вывод об актуальности разработки математических моделей СВЧ термообработки диэлектриков с учетом изменения их физических свойств в процессе нагрева, фазовых переходов и тепломассопереноса, направленных на создание энергоэффективных СВЧ электротехнологических установок и повышение качества выпускаемой продукции.

ЛИТЕРАТУРА

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

2. **Вайнштейн Л.А.** Электромагнитные волны / Л.А. Вайнштейн. М.: Радио и связь, 1988. 440 с.

3. **Исаченко В.П.** Теплопередача / В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел. М.: Энергия, 1968. 472 с.

4. **Комаров В.В.** Формулировки математических моделей процессов взаимодействия электромагнитных волн с диссипативными средами в СВЧ-нагревательных системах / В.В. Комаров // Физика волновых процессов и радиотехнические системы, 2010. Т. 13. № 4. С. 57-63.

5. **Кузнецов Г.В.** Разностные методы решения задач теплопроводности / Г.В. Кузнецов, М.А. Шеремет. Томск: Изд-во ТПУ, 2007. 172 с.

6. **Сегерлинд Л.** Применение метода конечных элементов / Л. Сегерлинд. М.: Мир, 1979. 392 с.

7. **Сильвестер П.** Метод конечных элементов для радиоинженеров и инженеров-электриков / П. Сильвестер, Р. Феррари. М.: Мир, 1986. 229 с.

8. **Бреббия К.** Применение метода граничных элементов в технике / К. Бреббия, С. Уокер. М.: Мир, 1982. 248 с.

9. **Архангельский Ю.С.** Сверхвысокочастотные нагревательные установки для интенсификации технологических процессов / Ю.С. Архангельский, И.И. Девяткин. Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 1983. 140 с.

10. **Архангельский Ю.С.** Компьютерное моделирование СВЧ электротермических процессов и установок / Ю.С. Архангельский, С.В. Тригорлый. Саратов: СГТУ, 2006. 212 с.

11. **Архангельский Ю.С.** СВЧ электротермические установки лучевого типа / Ю.С. Архангельский, С.В. Тригорлый. Саратов: СГТУ, 2000. 122 с.

12. Технология СВЧ-нагрева: потенциал и границы / И. Именохоев [электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.linn-high-therm.de/fileadmin/user_up load/pages/about_us/download/publications/white_papers/MikrowellenerwaermungRus.pdf. 02.09.2017.

13. **Argawal D.** Microwave Sintering of Ceramics, Composites and Metallic Materials, and melting of Glasses / D. Argawal // Transactions of The Indian Ceramic Society. 2006. Vol. 65(3) July-Semptember. P. 129-144.

14. **Shawn M.** Microwave Assist Sintering of Porcelain Insulators with Large Cross-section / M. Allan Shawn, Fall Morgana, Dr. Holly Shulman, Gary Carnahan // 33rd International Conference and Exposition on Advanced Ceramics and Composites Daytona Beach, Florida January 19. 2009.

15. **Быков Ю.В.** Создание металлокерамических функционально-градиентных материалов спеканием при микроволновом нагреве / Ю.В. Быков, С.В. Егоров, А.Г. Еремеев, И.В. Плотников, К.И. Рыбаков, В.Е. Семенов, А.А. Сорокин, В.В. Холопцев // Физика и химия обработки материалов. 2011. № 4. С. 52-61.

16. **Быков Ю.В.** Микроволновая высокотемпературная обработка материалов / Ю.В. Быков, К.И. Рыбаков, В.Е. Семенов // Вакуумная СВЧ электроника: сб. обзоров. Н. Новгород: Институт прикладной физики РАН, 2002. С. 26-33.

17. **Приседский В.В.** Наноструктурные керамические функциональные материалы / В.В. Приседский // Наукові праці ДонНТУ, 2014. Вып. № 1(22). С. 20-34.

18. **Lasri Jacob.** Energy Conversion during Microwave Sintering of a Multiphase Ceramic Surrounded by a Susceptor / Jacob Lasri, Peelamedu D. Ramesh, and Levi Schachter // Journal of the American Ceramic Society. Vol. 83 (6). 2000. P. 1465-68.

19. **Sudiana I. Nyoman** High Frequency Microwave Sintering of Alumina Ceramics / I. Nyoman Sudiana, Seitaro Mitsudo, Shunsuke Inagaki, La Ode Ngkoimani, Haji Aripin, Edi Cahyono // Recent Advances on Computational Science and Applications. Seoul, South Korea. September 5-7. 2015. P. 50-54.

20. **Кожевников В.Ю.** Математическое моделирование спекания керамических материалов в СВЧ электромагнитном поле / В.Ю. Кожевников // Вестник СГТУ. 2006. № 4 (19). Вып. 4. С. 109-117.

21. **Didier Bouvard** Multiphysics Simulation of Microwave Sintering in a Monomode Cavity / Didier Bouvard, Sylvain Charmond and Claude P. Carry // Advances in Modeling of Microwave Sintering. 12th Seminar Computer Modeling in Microwave Engineering & Applications, Grenoble, France, March 8-9, 2010 [электронный ресурс]. Режим доступа: https://web.wpi.edu/academics/math/CIMS/IMMG/Seminars/Past/Seminar12/Docs/Paper-12-4.pdf. свободный. 02.09.2017.

22. **Rosin A.** Modeling of Microwave Heating of Ceramic Materials with Respect to Changes in Sample Size / Andreas Rosin and Monika Willert-Porada // Multiphysics Models and Material Properties. 16th Seminar Computer Modeling in Microwave Power Engineering. Karlsruhe, Germany. May 12-13. 2014.

23. **Rezaii N.** Multiphysics Modeling jf a Microwave Furnace for Efficient Silicon Production / N.Rezaii, J.P. May (JPM Silicon GmbH) // Excerpt from the Proceedings of the 2016 COMSOL Conference in Munich [электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.comsol.com/paper/download/358561/rezaii_paper.pdf. 02.09.2017.

24. **Subirats M.** FDTD Simulation of Microwave Sintering in Large (50/4000 Liter) Multimode Cavities / M. Subirats, M.F. Iskander, M.J. White, J.O. Kiggans Jr // Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy. Vol. 32. № 3. 1997. P. 161-170.

25. **Лапочкин М.С.** Исследование процесса микроволнового нагрева различных фаз воды в виде трехслойных структур: теория и эксперимент / М.С. Лапочкин, О.Г. Морозов // Вестник МарГТУ. 2011. № 2. С. 24-29.

26. **Лапочкин М.С.** Повышение энергоэффективности микроволнового нагрева снежно-ледяной массы посредством применения водоотвода / М.С. Лапочкин, О.Г. Морозов, Г.А. Морозов // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2012. Т. 15. № 1. С. 84-88.

27. **Миклашевский В.В.** Способ равномерного СВЧ размораживания биообъектов / В.В. Миклашевский // Современные проблемы применения СВЧ энергии: тез докл. Междунар. науч.-техн. конф. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 1993. С. 6-8.

28. **Анфиногентов В.И.** Численное моделирование плавления асфальто-парафиновых отложений в трубе под действием СВЧ излучения / В.И. Анфиногентов, С.Р. Ганиева // Сеточные методы для краевых задач и приложения: материалы Десятой Междунар. конф. Казань, 2014. С. 86-88.

29. Математическое описание процесса плавления жира в СВЧ установке / М.В. Белова, Г.В. Новикова, И.Г. Ершова, А.А. Белов, О.В. Михайлова, Н.И. Махоткина // Естественные и технические науки. М.: Спутник+, 2015. № 6. С. 513-516.

30. **Хантургаев А.Г.** Изучение процесса плавления живицы в электромагнитном поле сверхвысоких частот / А.Г. Хантургаев, Т.И. Котова, Г.И. Хараев // Вестник ВСГУТУ. 2016. № 3. С. 61-65.

31. Оценка применимости микроволнового излучения для термообработки базаль-

та и изделий из него / В.Н. Нефедов, А.В. Мамонтов, В.П. Симонов, А.Е. Чебыкин // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2015. Т. 9. № 6. С. 70-73.

32. **Мамонтов А.В.** Термообработка теплоизоляционного материала из базальтового волокна с использованием СВЧ-энергии / А.В. Мамонтов, В.Н. Нефедов // Электронная техника. Сер. 1: СВЧ-техника. 2013. № 4 (519). С. 220-225.

33. **Huy H.** Mathematical modelling of solidification and melting: a review / Henry Huy and Stavros A Argyropoulos // Modelling Simul. Mater. Sci. Eng. 4 (1996). P. 371-396.

34. **Красношлык Н.А.** Численное решение задач с подвижными межфазными границами / Н.А. Красношлык, А.О. Богатырёв // Вісник Черкаського університету. 2011. Вип. 194. С. 16-31.

35. **Анфиногентов В.И.** Численное моделирование фазовых переходов в плоскослоистой структуре при СВЧ нагреве / В.И. Анфиногентов, А.А. Тахаув // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева, 2010. № 3. С. 159-163.

36. **Анфиногентов В.И.** Управление движением границы раздела фаз при СВЧ-нагреве снега / В.И. Анфиногентов, А.А. Тахаув // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. Казань, 2011. С. 66-70.

37. **Zhong. J**. Finite Element Eigenvalue Method for Solving Phase-Change Problems / J. Zhong., L.C. Chow, W.S. Chang // Thermophysics. 1991. Vol. 5. № 4. P. 589-598.

38. **Лыков А.В.** Теория тепло- и массопереноса / А.В. Лыков, Ю.А. Михайлов. М.; Л.: Госэнергоиздат, 1963. 472 с.

39. **Лыков А.В.** Теория сушки / А.В. Лыков. М.: Энергия, 1968. 472 с.

40. Сушка сельскохозяйственных продуктов в промышленных СВЧ установках / В.И. Комаров, М.Н. Молохов, О.Д. Садковская и др. // Применение СВЧ энергии в технологических процессах и научных исследованиях: тез. докл. Всесоюз. VI науч.-практ. конф. Саратов, 11-13 июня 1991. Саратов: Сарат. политехн. ин-т, 1991. С. 25-26.

41. Исследование процесса обезвоживания пищевых продуктов в микроволновых вакуумных установках / А.С. Иванов, В.А. Иванов, Г.С. Сапунов, В.Б. Янкевич // Актуальные проблемы электронного приборостроения: материалы Междунар. науч.-техн. конф. Саратов, 7-9 сентября 1998. Саратов: Сарат гос. техн. ун-т, 1999. Ч. III. С. 135-138.

42. Микроволновая технология сушки керамических материалов / А.А. Крупа, М.Е. Ильченко, В.А. Михайленко, В.А. Макогон // Стекло и керамика. 1993. № 1. С. 21-23.

43. Сушка пиломатериалов больших размеров в поле сверхвысокой частоты / А.М. Бомбин, А.Л. Гутман, В.И. Лисицын, В.В. Саушкин // Современные проблемы технологии деревообрабатывающей промышленности: тез. докл. науч. конф., посв. 35-летию фак. «Технол. деревообраб.». Воронеж. гос. лесотехн. акад., Воронеж, окт. 1995. Воронеж, 1995. С. 29-30.

44. СВЧ резонатор для сушки бумаги / В.Б. Байбурин, Б.Н. Максименко, А.А. Терентьев и др. // Актуальные проблемы электронного приборостроения: материалы Междунар. науч.-техн. конф. Саратов, 10-12 сентября 1996. Саратов: Сарат гос. техн. ун-т, 1996. Ч. 2. С. 59-60.

45. Simulation of Microwave Heating of Porous Media Coupled With Heat, Mass and Momentum Transfer / Jiajia Chen, Krishnamoorthy Pitchai, Sohan Birla, Jeyamkondan Subbiah, David Jones // Excerpt from the proceeding of the 2012th COMSOL Conference in Boston [электронный ресурс]. Режим доступа: http://microwave.unl.edu/custom/ Paper_COMSOL_2012.pdf. 02.09.2017.

46. **Arballo J.R.** Numerical Simulation of the Heat, Mass and Momentum Transfer during the Microwave Drying of Osmodehydrated Porous Material / R. Javier Arballo, A. Laura Campañone, H. Rodolfo // Mascheroni. Excerpt from the Proceedings of the 2014 COMSOL Conference in Curitiba [электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.comsol.com/paper/download/200371/arballo_abstract.pdf. 02.09.2017.

47. **Zhu H**. Three Dimensional (3D) Modeling of Heat and Mass Transfer during Micro-

wave Drying of Potatoes / Huacheng Zhu, Tushar Gulati and Ashim K. Datta // Excerpt from the proceeding of the 2013th COMSOL Conference in Boston [электронный ресурс]. Режим доступа: ttps://www.comsol.com/paper/download/181445/zhu_abstract.pdf. 02.09.2017.

Захаров Вадим Валерьевич – аспирант кафедры «Электроснабжение и электротехнология» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Vadim V. Zakharov – Postgraduate, Department of Power Supply and Electrotechnologies, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 15.09.17, принята к опубликованию 20.09.17

УДК 621.365.5

ЭКСТРЕННАЯ СУШКА КНИГ, ПОСТРАДАВШИХ ПРИ ТУШЕНИИ ПОЖАРА

А.Д. Шляхов, Ю.С. Архангельский

EMERGENCY DRYING THE BOOKS DAMAGED DURING THE FIRE-FIGHTING OPERATIONS

A.D. Shlyakhov, Yu.S. Arkhangelsky

Приведены результаты экспериментов по экстренной сушке книг в печах СВЧ и сопротивления.

Ключевые слова: *книги, пожар, вода, сушка, печи СВЧ и сопротивления*

The paper presents the results of experiments related with emergency drying of books in microwave ovens furnaces and resistance furnaces.

Keywords: *books, fire, water, drying, microwave ovens and resistance furnaces*

Намокшие при тушении пожара книги могут быть безвозвратно утеряны, если не принять меры по их спасению. Особенно остро стоит проблема спасения книг при пожаре в библиотеке. Кроме пожара, книги могут пострадать от воды и при авариях, например отопительной системы в книгохранилище. Во избежание подобных ситуаций следует строго соблюдать правила пожарной безопасности и эксплуатации систем отопления, но если книги намокли, нужно иметь технические средства для их сушки.

Известны установки для сушки бумаги, картона, но специализированных технических средств для спасения намокших книг пока нет. В работе [1] рассмотрены возможности сушки книг в таких ситуациях: экстренная сушка, замораживание книг с последующим размораживанием и сушкой, сублимационная сушка.

На кафедре «Электроснабжение и электротехнология» СГТУ имени Гагарина Ю.А. Были проведены эксперименты по сушке книг в печи сопротивления косвенного действия (рис. 1 *а*) и СВЧ печи (рис. 1 *б*).

Печь сопротивления имеет в нижней части нагревательные элементы, над которыми расположены 5 поддонов, в которых могут быть расположены подлежащие сушке книги форматом не более А4. Теплота от нагревателей передаётся книгам естествен-

ной конвекцией. Установка имеет три режима работы, потребляя от электрической сети (220 В, 50 Гц) 0,4; 0,6; 1,2 кВт. Эксперименты проводились в третьем режиме.

а *б*

Рис. 1. Печи, применявшиеся в экспериментах: а – печь сопротивления: б – СВЧ печь

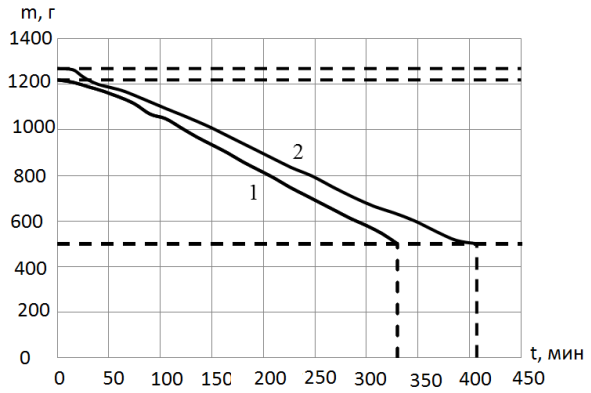
Для СВЧ сушки использовалась серийная бытовая СВЧ печь мощностью 800 Вт, потребляющая от электрической сети 1,4 кВт. Эти технические средства доступны по цене, малогабаритны, просты в эксплуатации и, на наш взгляд, удобны для сушки намокших книг.

Для экспериментов были выбраны книги с мягкой обложкой, содержащая 140 страниц с габаритами 19,7×14,2×1 см [2], из которых составлялась стопка в 4 книги объемом 1119 см^3. Вес стопки сухих книг 500 г. Сухие книги помещались в воду, вес стопки полностью мокрых книг увеличился на 720 г.

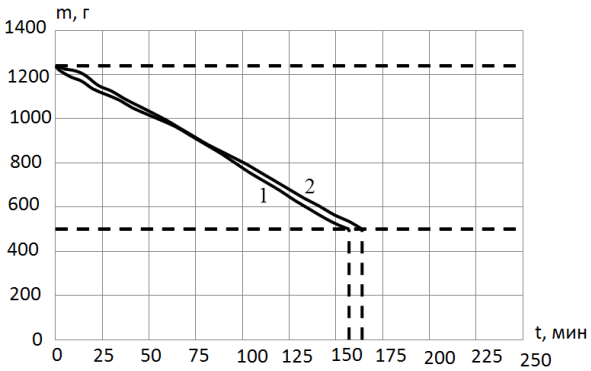
Сушка в печи сопротивления проводилась в нижнем поддоне, так как в нем нагрев и сушка книг проходили наиболее интенсивно. В процессе сушки стопки книг через равные промежутки времени извлекались из печи, взвешивались, измерялась температура внутри книг, находившихся в середине стопки, и проветривался поддон.

Аналогичная стопка книг проходила сушку и в СВЧ печи. В этом случае стопка книг нагревалась быстрее, чем в печи сопротивления, можно было наблюдать выделение пара при раскрытии каждой из четырёх книг, который легко удалялся проветриванием.

Если экстренная сушка невозможна из-за отсутствия нужного количества технических средств, то для спасения намокших книг их надо заморозить, хранить и можно не торопиться с сушкой [1]. Результаты экспериментов по сушке предварительно замороженных мокрых книг приведены на рис. 2.



а



б

Рис. 2. Зависимости массы стопки книг от времени сушки: *а* – печь сопротивления; *б* – СВЧ печь (1 – мокрые книги; 2 – замороженные книги)

В экспериментах использовались стрелочные весы и ртутный термометр.

Продолжительность сушки мокрых и замороженных книг приведены в таблице.

Продолжительность экстренной сушки и предварительно замороженных книг

Тип установки	Продолжительность сушки, мин	
	Экстренная	Замороженные книги
Печь сопротивления	330	407
СВЧ печь	57	164

Согласно таблице производительность СВЧ печи существенно выше, чем печи сопротивления. Объясняется это объемным тепловыделением энергии в диэлектрике, находящемся в электромагнитном поле.

Полученные результаты экспериментов по сушке книг позволяют определить количество тех или иных технических средств для сушки того или иного библиотечного фонда в случае пожара, при этом предпочтение следует отдать СВЧ установкам, специально разработанным для этой цели.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Маркелова К.Д.** Спасение книг, пострадавших при тушении пожара / К.Д. Маркелова, Ю.С. Архангельский // Вопросы электротехнологии. 2016. № 1. С. 13-17.

2. **Архангельский Ю.С.** Сверхвысокочастотные нагревательные установки для интенсификации технологических процессов / Ю.С. Архангельский, И.И. Девяткин. Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 1983. 140 с.

Шляхов Александр Дмитриевич – студент магистратуры кафедры «Электроснабжение и электротехнология» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

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

Alexander D. Shlyakhov – Master Student, Department of Power Supply and Electrotechnologies, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Yuri S. Arkhangelsky – Dr.Sc., Professor, Honored Worker of Science of the Russian Federation, Department of Power Supply and Electrotechnologies, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 01.07.17, принята к опубликованию 20.09.17

К СВЕДЕНИЮ ЧИТАТЕЛЕЙ!

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

УДК 621.365.5

К ВОПРОСУ О МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОСТИ СВЧ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ УСТАНОВОК НА КАМЕРАХ ЛУЧЕВОГО ТИПА

Ю.С. Архангельский, Е.В. Колесников, В.О. Юдина

MULTIFUNCTIONALITY ISSUES OF MICROWAVE ELECTROTECHNOLOGICAL INSTALLATIONS USED IN BEAM-TYPE CHAMBERS

Yu.S. Archangelsky, E.V. Kolesnikov, V.O. Yudina

Показана возможность построения многофункциональных СВЧ электротехнологических установок на камерах лучевого типа, используя принцип построения универсально-сборной аппаратуры и частотно-регулируемый электропривод.

Ключевые слова: *многофункциональность, СВЧ электротехнологические установки, камеры лучевого типа, универсально-сборная аппаратура, электропривод*

The paper considers the method for designing multifunctional microwave electrotechnological installations in beam-type chambers using the principle applied in the development of universal assembly devices and variable frequency electric drives.

Keywords: *multifunctionality, microwave electrotechnological installations, beam-type chambers, universal-assembly device*

СВЧ электротехнологические установки (СВЧ ЭТУ) на камерах лучевого типа (КЛТ) практически всегда предназначены для реализации какого-либо конкретного технологического процесса обработки того или иного диэлектрического материала, среды или изделия [1]. Если геометрические размеры излучателя зависят от частоты СВЧ генератора источника СВЧ энергии СВЧ ЭТУ, то компоновка, геометрические размеры, например, меандровой системы КЛТ зависят не только от частоты, но и от мощности СВЧ генератора, производительности установки, габаритов и диэлектрических параметров обрабатываемого диэлектрика, а в методических СВЧ ЭТУ еще и от параметров электропривода транспортной системы [1, 2]. Так что если в процессе эксплуатации СВЧ ЭТУ требуется изменить ее производительность, заменить обрабатываемый диэлектрик на объект другой геометрии или с иными диэлектрическими свойствами, имеющиеся СВЧ ЭТУ реализовать иной технологический процесс не смогут.

За годы исследований в области СВЧ электротехнологии решены задачи анализа и синтеза рабочих камер, математического моделирования технологических процессов, рассмотрены технико-экономический и социальный аспекты СВЧ электротехнологии [3-5], но вопросы многофункциональности СВЧ ЭТУ, по сути дела, пока что не рассматривались. Но если требуется менять количество выпускаемой продукции и даже менять ее ассортимент, то предприятию целесообразно иметь многофункциональную СВЧ ЭТУ, так что вопрос о разработке многофункциональных СВЧ ЭТУ является актуальным.

Многофункциональную СВЧ ЭТУ, на наш взгляд, следует строить по принципу построения универсально-сборной аппаратуры [6], когда в силу производственной необходимости можно менять структурные элементы аппаратуры, следовательно, СВЧ

ЭТУ должна состоять из легко меняемых блоков, а потому придется, видимо, отказаться от компактного оформления установки, такого, как, например, у бытовых СВЧ печей (рис. 1).

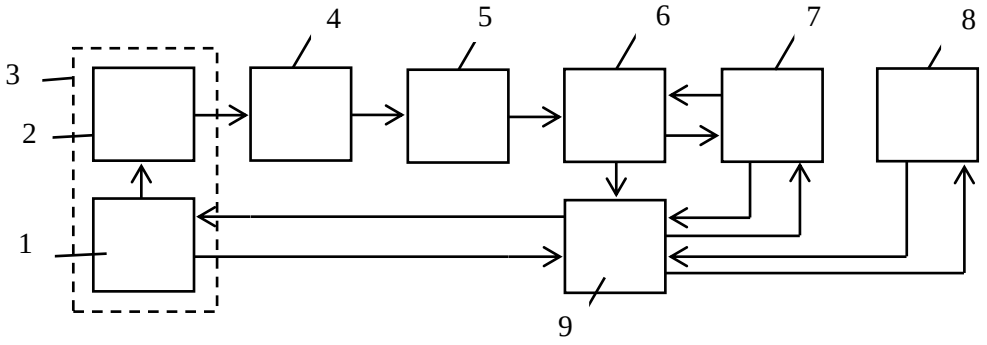


Рис. 1. Структурная схема СВЧ ЭТУ, построенной по принципу универсально-сборной аппаратуры: 1 – источник питания СВЧ генератора; 2 – СВЧ генератор; 3 – источник СВЧ энергии; 4 – ферритовый вентиль; 5 – линия передачи (волновод); 6 – рабочая камера; 7 – система загрузки-выгрузки; 8 – воздуходувка (система вакуумирования); 9 – система управления

Блочная структура СВЧ ЭТУ, показанная на рис. 1, позволяет, разумеется, заменить источник СВЧ энергии 3 на другой с СВЧ генератором 2, работающим на иной частоте, разрешенной к применению в СВЧ электротехнологии. Это, правда, требует замены ферритового вентиля 4, линии передачи (волновод) 5 и даже рабочей камеры 7, так что в этом случае по сути дела речь будет идти о покупке у производителя СВЧ ЭТУ нескольких аналогичных по структуре, но разных по параметрам установок. Такое оборудование вряд ли можно назвать многофункциональным. Речь должна идти об одной СВЧ ЭТУ, но тогда в таких установках должна быть возможность лучше всего плавно менять в широком диапазоне СВЧ мощность. Для этой цели многофункциональная установка должна быть укомплектована переменным СВЧ аттенюатором, включенным между СВЧ генератором 2 и рабочей камерой 6.

Основные изменения в многофункциональной СВЧ ЭТУ должна допускать рабочая камера 6. Структуру и даже геометрию рабочей камеры легче всего изменить у КЛТ.

Чтобы у КЛТ можно было менять конфигурацию, она должна собираться из отдельных универсальных элементов, различных по назначению, конструкторскому решению, но имеющих возможность взаимного сочленения с учетом габаритов и физико-химических свойств обрабатываемого объекта. Основными элементами конструкции такой рабочей камеры являются [7]:

– элементы каркаса рабочей камеры со стыковочными узлами, позволяющие собирать рабочую камеру разной конфигурации;

– металлические листы стенок рабочей камеры нескольких размеров, крепящиеся к корпусу рабочих камер с помощью специальных приспособлений с элементами защиты от излучений;

– набор рупорных излучателей с фланцам;

– волноводные элементы (повороты) и крепежные детали, позволяющие создавать, например, меандровые излучающие системы [2] той или иной длины;

– двери (в СВЧ ЭТУ, работающих в периодическом режиме) и шлюзы (для СВЧ ЭТУ, работающих в методическом режиме) для загрузки и выгрузки обрабатываемого объекта (шлюзы, в свою очередь, могут быть собраны из отдельных элементов);

– приспособления для размещения обрабатываемого объекта в СВЧ ЭТУ, работающих в периодическом режиме, и транспортные системы в СВЧ ЭТУ, работающих в методическом режиме (транспортные си-

стемы могут быть собраны из отдельных элементов);

– приспособления для размещения СВЧ ЭТУ в помещении.

На рис. 2 приведены примеры компоновки каркаса КЛТ, а на рис. 3 – примеры компоновки излучающей системы меандрового типа толкательной КЛТ.

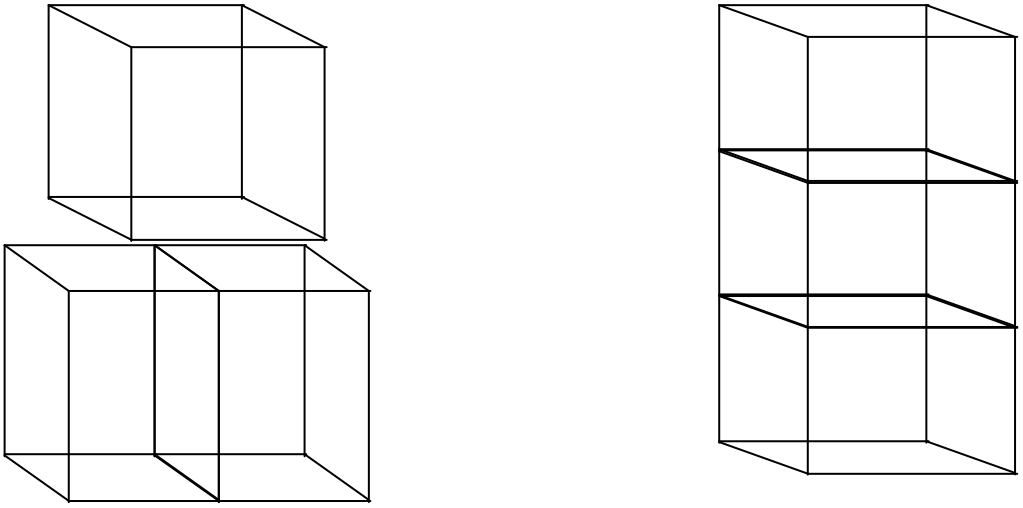


Рис. 2. Примеры компоновки каркаса КЛТ

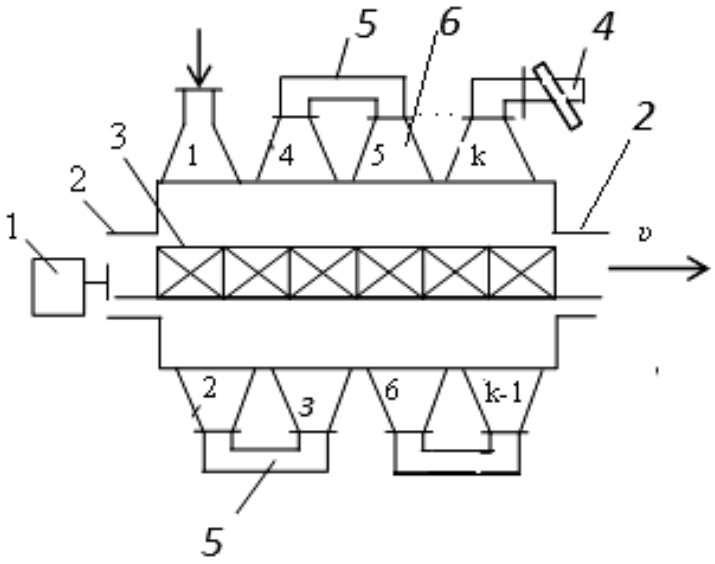


Рис. 3. Пример компоновки излучающей системы меандрового типа КЛТ методического действия: 1 – электропривод транспортной системы КЛТ; 2 – шлюз; 3 – обрабатываемый объект; 4 – балластная калориметрическая нагрузка; 5, 6 – волноводные повороты; *k* – номер рупора меандровой системы

Применение в транспортной системе частотно-регулируемого электропривода является еще одним способом построения многофункциональной СВЧ ЭТУ и не только толкательного типа.

По способу управления электродвигателем частотные преобразователи можно разделить на две группы: с векторным и скалярным управлением. Каждая модель имеет свои преимущества и недостатки.

На сегодняшний день сформировались два основных класса систем векторного управления – бездатчиковые системы (без датчика скорости на валу двигателя) и системы с обратной связью по скорости. Применение того или иного метода векторного управления определяется областью применения электропривода. При небольших диапазонах изменения скорости (не более 1:100) и требованиях к точ-

ности ее поддержания не более ± 0,5% применяют бездатчиковое векторное управление. Если же скорость вращения вала изменяется в широких пределах (до 1:10000 и более), имеются требования к высокой точности поддержания скорости вращения (до ± 0,02% при частотах вращения менее 1 Гц) или есть необходимость позиционирования вала, а также при необходимости регулирования момента на валу двигателя на очень низких частотах вращения, применяют методы векторного управления с обратной связью по скорости.

Мы предлагаем для СВЧ ЭТУ вариант векторного управления электроприводом. Он наиболее прост в реализации и экономичен, установка преобразователя частоты на электродвигатель обеспечит регулирование оборотов ротора электродвигателя, что позволит не только плавно (без скачков давления) и точно регулировать скорость с целью поддержания требуемых регламентом значений и решить проблему с обработкой объектов с разными диэлектрическими параметрами, но и решить задачу замедления и торможения элементов установки (толкателя), а также позволит избежать ручного контроля.

Системы векторного частотного управления асинхронным двигателем базируются на представлении физических переменных двигателя пространственными векторами, у которых могут изменяться как модули, так и положение в пространстве. Основой для реализации системы управления частотно-регулируемых асинхронных электроприводов с векторным управлением является структурная схема силового канала, составленная на основе двухфазной модели асинхронного двигателя во вращающейся системе координат, ориентированной по результирующему вектору потокосцепления ротора Ψ_2.

На рис. 4 приведена функциональная схемы систем управления электроприводов с векторным управлением.

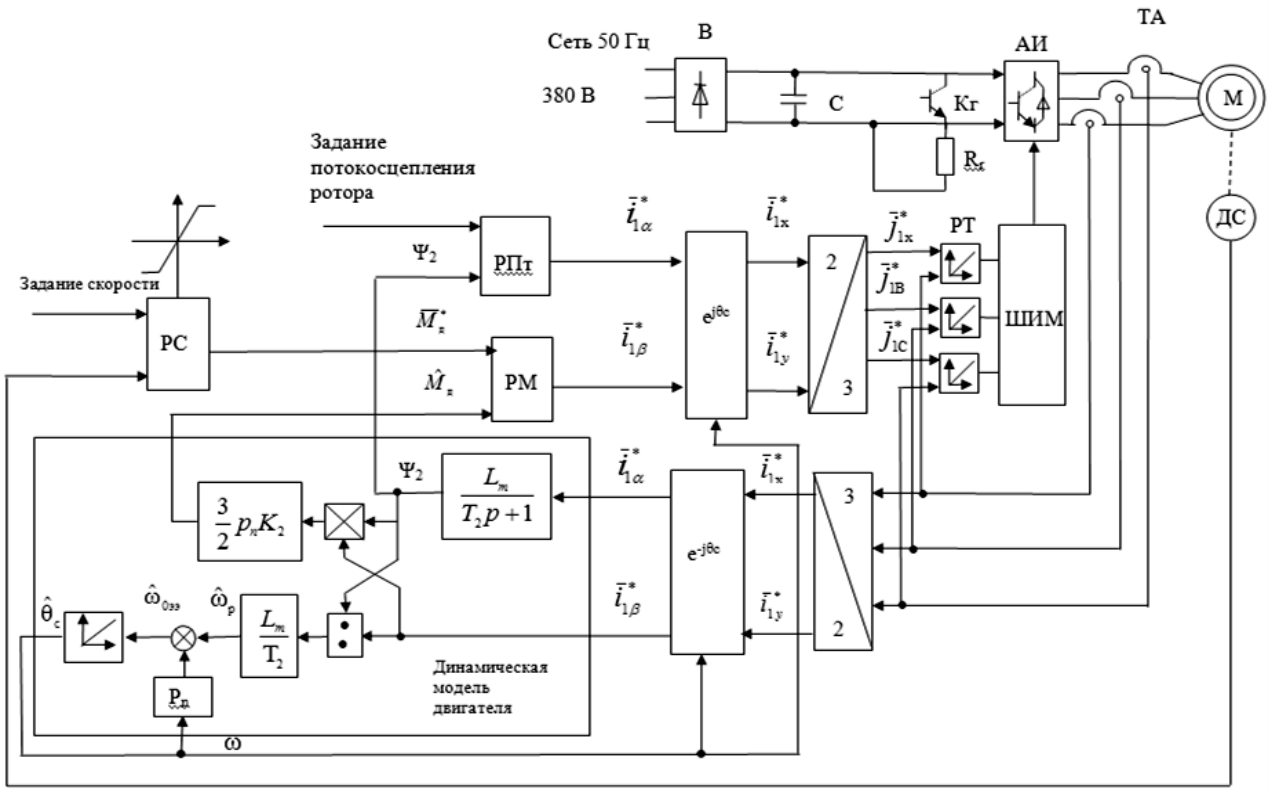


Рис. 4. Функциональная схема асинхронного электропривода

На схеме символом * обозначены сигналы задания и управления и приняты следующие обозначения:

– РС, РПТ, РТ – регуляторы скорости, потокосцепления и составляющих тока статора;

– УПК1, УПК2 – устройства преобразования координат, соответственно, прямого и обратного.

Для того чтобы обеспечить независимое управление потокосцеплением ротора и электромагнитным моментом (скоростью) двигателя, необходимо во вращающейся системе координат исключить взаимное влияние системы автоматического регулирования потокосцепления и системы автоматического регулирования скорости. Эта задача решается, как правило, блоком компенсации внутренних ЭДС двигателя.

Обратные связи по потокосцеплению и скорости могут быть выполнены с датчиками потока и скорости и без датчиков. В последнем случае значения потокосцепления и скорости находятся расчетным путем на основании эталонной модели электродвигателя. Датчики фазных токов двигателя (практически достаточно двух) аналогового типа, поэтому в измерительной цепи устанавливаются сглаживающие фильтры и АЦП. Полоса пропускания фильтров должна быть больше максимальной частоты питающего напряжения двигателя $f_{1макс}$.

Наличие фильтров в цепях измерения токов электродвигателя определяет инерционность обратных связей по току системы автоматического управления электропривода. Преобразование аналогового си-гнала в цифровой происходит с несущей частотой инвертора $f_{шим}$ и дополнительного запаздывания в контуры регулирования токов не вносит. Однако АЦП вносит квантование сигналов обратной связи по уровню, которое определяется разрядностью преобразователя. Информация о потокосцеплении Ψ_2 может быть получена путем измерения магнитного потока Ψ_m в воздушном зазоре машины с помощью встроенных датчиков магнитного потока (например, датчиков Холла), размещенных по осям α, β неподвижной системы координат, и фазных токов обмотки статора i_{1A}, i_{1B}, i_{1C} [8].

Структурная схема электропривода будет состоять из трех контуров: контур тока с обратной отрицательной связью, контур регулирования момента с обратной отрицательной связью и контур регулирования скоростью с обратной отрицательной связью.

Таким образом, предложенные нами способы модернизации СВЧ ЭТУ позволят построить многофункциональные СВЧ ЭТУ на КЛТ, используя принцип построения универсально-сборной аппаратуры и внедрения частотно-регулируемого управления электроприводом.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Архангельский Ю.С.** Камеры лучевого типа / Ю.С. Архангельский, С.В. Тригорлый. Саратов: Амирит, 2017. 198 с.

2. **Архангельский Ю.С.** Меандровые система в СВЧ электротехнологии / Ю.С. Архангельский, К.Н. Огурцов, Е.М. Гришина. Саратов: Научная книга, 2011. 210 с.

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

4. **Архангельский Ю.С.** Технико-экономический и социальный аспекты электротехнологии / Ю.С. Архангельский, Е.В. Колесников. Саратов: Амирит, 2017. 197 с.

5. **Архангельский Ю.С.** Справочная книга по СВЧ электротермии / Ю.С. Архангельский. Саратов: Научная книга, 2011. 560 с.

6. Опыт разработки электронных блоков универсально-сборной аппаратуры для панорамных измерительных установок / В.А. Антонов, В.Н. Бирюков, Я.Е. Нудельман, Г.Н. Селех // Обмен опытом в радиоэлектронной промышленности. 1965. Вып. 4.

7. **Тапилина Н.В.** Многофункциональная СВЧ электротермическая установка для термообработки продукции фермерских хозяйств / Н.В. Тапилина // Актуальные проблемы электронного приборостроения АПЭП-98: материалы Междунар. науч.-техн. конф. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 1998. С. 121-123.

8. **Дюбей Г.К.** Основные принципы устройства электропривода / Г.К. Дюбей. М.: Техносфера, 2009. 192 с.

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

Yuri S. Arkhangelsky – Dr.Sc., Professor, Honored Worker of Science of the Russian Federation, Department of Power Supply and Electrotechnologies, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Колесников Евгений Владимирович – доктор технических наук, профессор кафедры «Электроснабжение и электротехнология» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Evgenii V. Kolesnikov – Dr. Sc., Professor, Department of Power Supply and Electrotechnologies, Yuri Gagarin State technical University of Saratov

Юдина Виолетта Олеговна – аспирант кафедры Электроснабжение и электротехнология» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Violetta O. Yudina – Postgraduate, Department of Power Supply and Electrotechnologies, Yuri Gagarin State technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 30.06.17, принята к опубликованию 20.09.17

УВАЖАЕМЫЕ ЧИТАТЕЛИ!

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

ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА

УДК 621.318.3

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ГОРОДСКОГО ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТА

В.С. Сержанский

IMPROVING THE ENERGY EFFICIENCY OF URBAN ELECTRIC TRANSPORT

V.S. Serzhansky

Рассматривается метод повышения энергоэффективности городского электротранспорта, эксплуатируемого в сетях постоянного тока (трамваи, троллейбусы), с различными типами управления тяговым приводом. Моделируется внедрение суперконденсаторов как накопителей, направленных на эффективное использование энергии рекуперативного торможения. Приведены расчеты, обосновывающие эффективность применения суперконденсаторов.

Ключевые слова: *энергоэффективность, электрическая энергия, городской электротранспорт, системы управления*

The paper deals with the method for upgrading the energy efficiency of urban electric transport, operated in DC networks (trams, trolleybuses), with various types of traction drive control. Introduction of supercapacitors as storage devices aimed at efficient utilization of regenerative braking energy is simulated. The calculations substantiating the effectiveness of application the supercapacitors are given.

Keywords: *energy efficiency, electric power, urban electric transport, control systems*

Актуальность проблемы энергоэффективности заключается в том, что из-за роста цен на энергоносители с темпом 10-15% в год растут цены на электрическую энергию в пределах 6-8% ежегодно. В добавок к этому потери электрической энергии на городском электротранспорте достигают 50% от общей потребляемой энергии, что отражается на стоимости эксплуатации трамваев и троллейбусов.

Для наглядности уровня энергетических показателей рассмотрим основные типы системы управления городским электротранспортом.

Реостатно-контакторная система управления (РКСУ), меняя значение сопротивления якорной цепи двигателя постоянного тока, рассеивает часть мощности на сопротивлениях.

Простейшая схема РКСУ представлена на рис. 1.

Моделируя данную систему с помощью программного средства Matlab Simulink (рис. 2), получим данные, показанные на рис. 3.

При среднем значении тока I якорной цепи и сопротивлении каждой позиции r_1, r_2 потери энергии на каждой из позиций составляют

$$\Delta P = \sum I^2 r_n. \quad (1)$$

Отсюда ΔP = 27,5 кВт, а потребляемая мощность

$$S = U I = 75{,}4 \text{ кВт}. \quad (2)$$

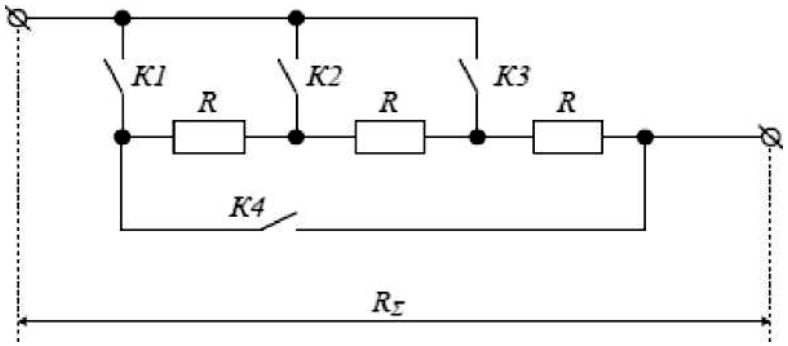


Рис. 1. Схема сопротивлений, разделённых на секции

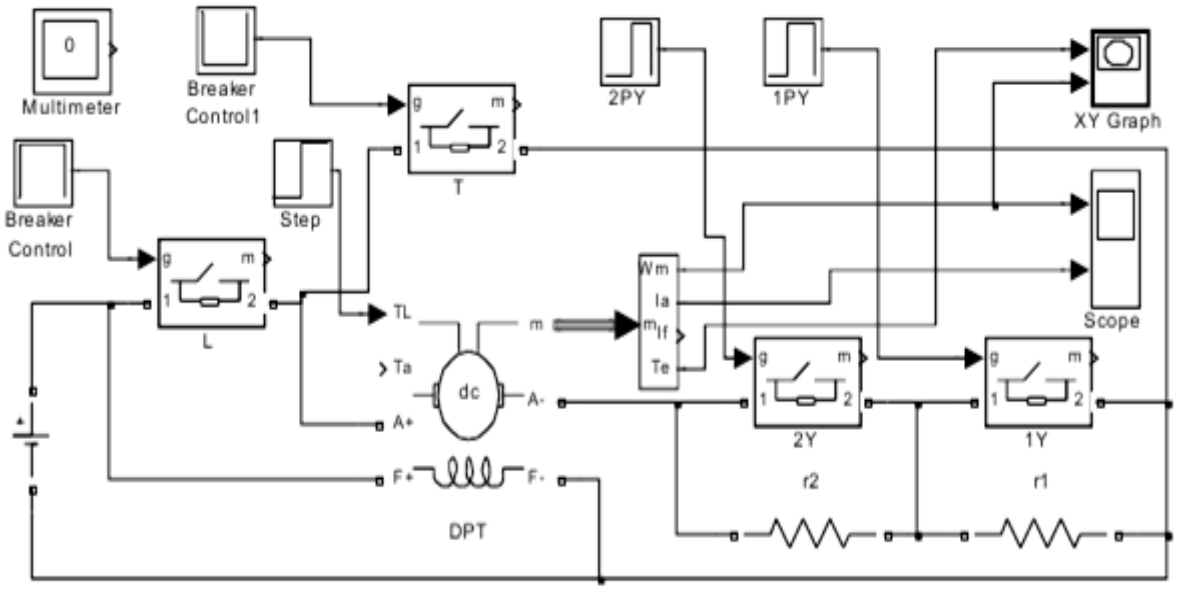


Рис. 2. РКСУ в программе Matlab Simulink

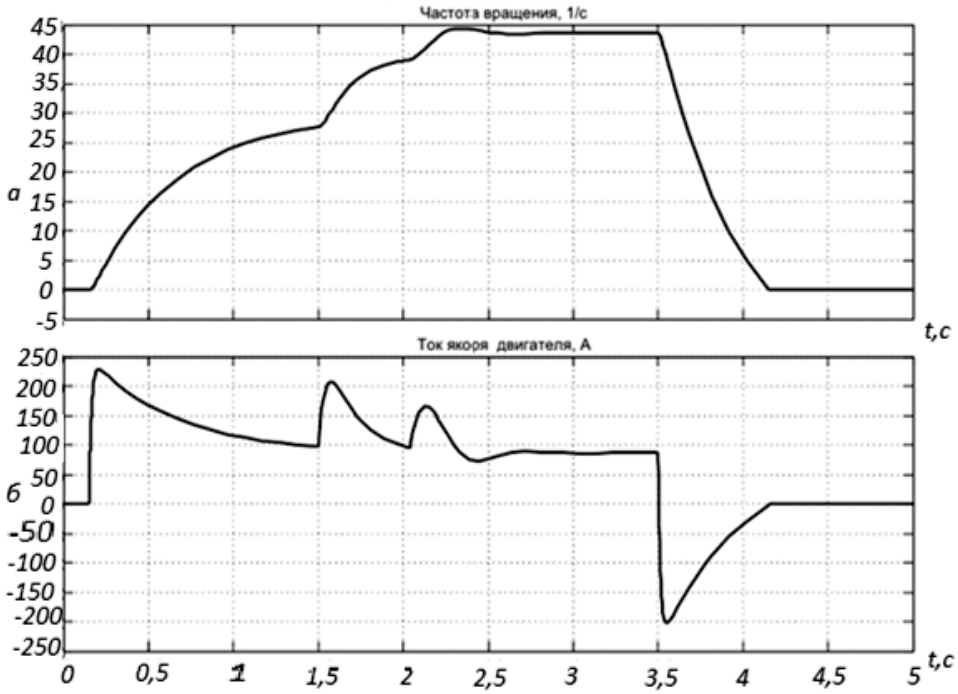


Рис. 3. Частота вращения двигателя *v* (*а*) и тока якоря от времени *t* (*б*)

Таким образом, КПД РКСУ равно

$$\eta = \frac{(S - \Delta P)}{S} \cdot 100\% = 63{,}5\%, \qquad (3)$$

следовательно, третья часть потребляемой энергии уходит на потери, что не соответствует ГОСТ 55364-2012, регламентирующему общие технические требования, предъявляемые к электротранспорту, эксплуатируемому в сетях постоянного тока. В соответствии с п. 4.7 КПД должен быть не ниже 85,7%.

Тиристорно-импульсная система управления (ТИСУ) (рис. 4) предназначена для импульсного регулирования цепи постоянного тока, периодически прерывая ток в силовой цепи с помощью тиристорного ключа, тем самым управляя моментом и скоростью вращения тягового двигателя электроподвижного состава.

Результаты моделирования ТИСУ с помощью программного средства Matlab Simulink (рис. 5) приведены на рис. 6.

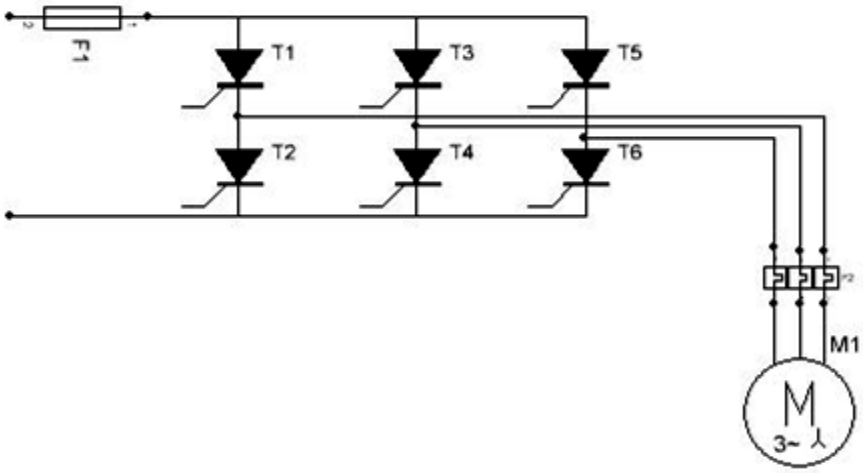


Рис. 4. Тиристорно-импульсная система управления

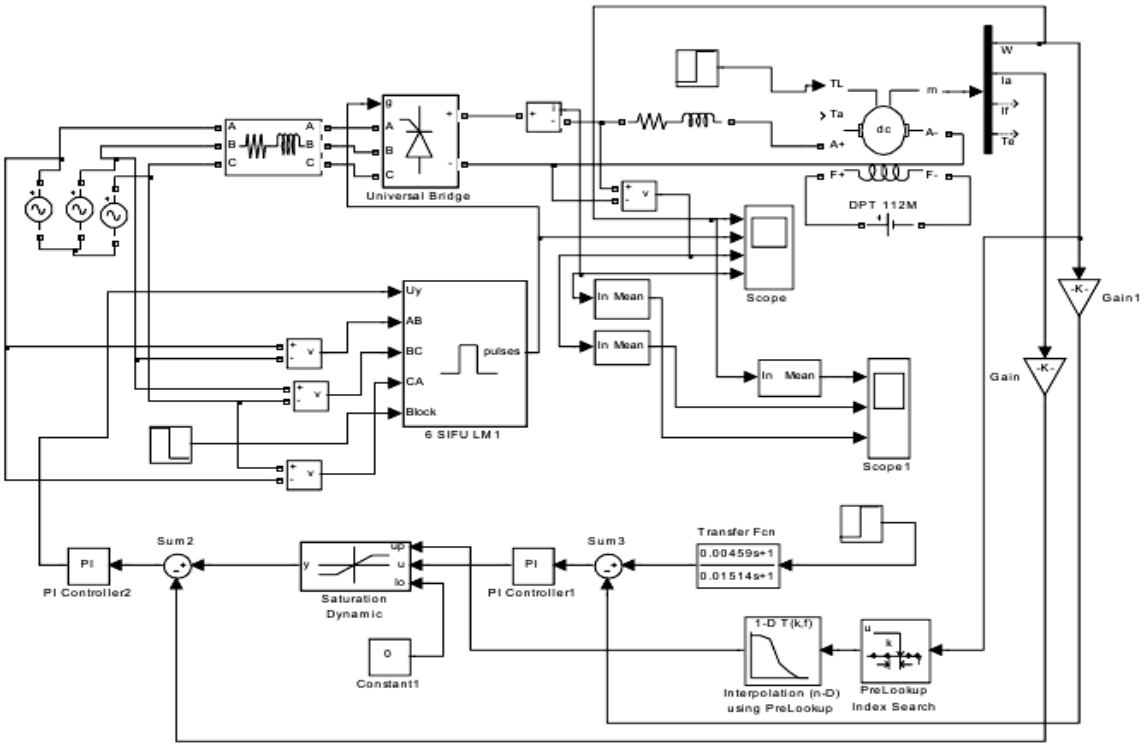


Рис. 5. ТИСУ в программе Matlab Simulink

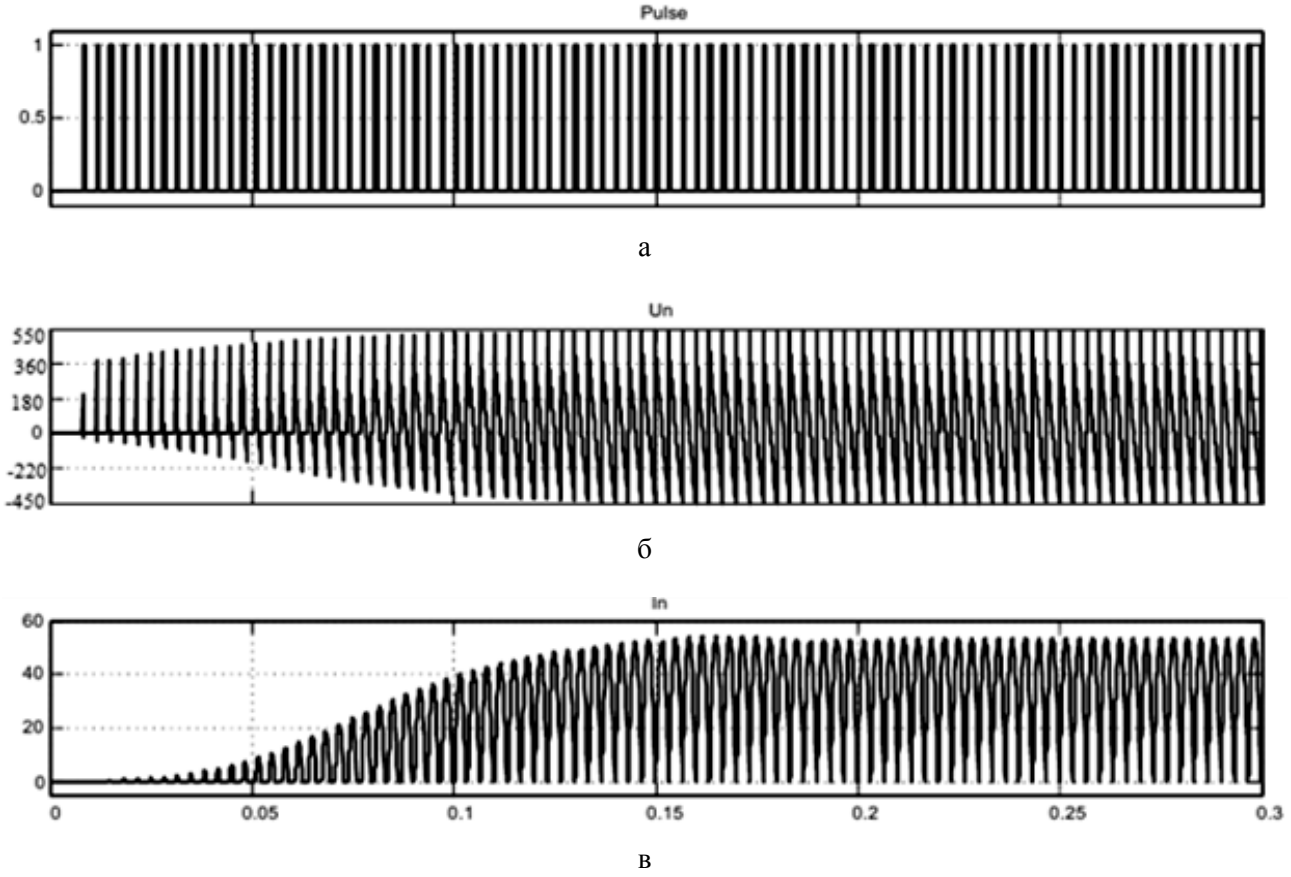


Рис. 6. Pulse – периодичность пульсаций (*а*), U_n – напряжение на двигателе (*б*), I_n – ток двигателя (*в*)

По полученным данным в программе Matlab Simulink построена таблица, отображающая значение коэффициента мощности от загрузки двигателя, выраженной в процентах.

Зависимость коэффициента мощности от загрузки двигателя

Загрузка, %	Коэффициент мощности *Км*, относительные единицы
	ТИСУ
5	0,45
20	0,74
40	0,67
60	0,8
80	0,73
100	0,82

Среднее значение коэффициента мощности равно 0,7, а учитывая механические потери в подшипниках скольжения (~0,97), общий КПД ТИСУ составит 0,68, так что потери мощности при данной системе управления составляют $\Delta P = 10{,}2$ кВт. Описанная система управления также не соответствует техническим требованиям ГОСТ 55364-2012.

Электронная система управления (ЭСУ) (рис. 7) является на сегодняшний день одной из экономичных систем управления тягой электропривода, поскольку в ней применяются силовые IGBT транзисторы, потери в которых достаточно малы и с их помощью можно достаточно эффективно задавать частоту и скважность управляющих импульсов для управления тяговым двигателем [1, 2], но при анализе ее энергоэффективности с помощью программы Matlab Simulink выяснилось, что среднее значение КПД данной системы не превышает 84%, что также ниже регламентируемого значения ГОСТ 55364-2012.

Рис. 8 иллюстрирует зависимости КПД ТИСУ и ЭСУ от загрузки.

Использование накопителей в виде суперконденсаторов. Средняя городская скорость эксплуатации трамваев и троллейбусов составляет не более 40 км/ч. Расчет-

ная энергия, необходимая для разгона трамвая до скорости 40 км/ч, составляет $p = 0{,}5m\,v^2 = 1{,}42$ МДж. С учетом потерь в РКСУ в 37% необходимая энергия равна $p = 2{,}25$ МДж. Энергия, которая допустима для конденсатора при торможении, составляет не более 38% от энергии торможения. Таким образом, накопленная энергия в конденсаторе при торможении равна 0,855 МДж. Следовательно, минимальный энергозапас конденсатора должен составлять около 0,9 МДж.

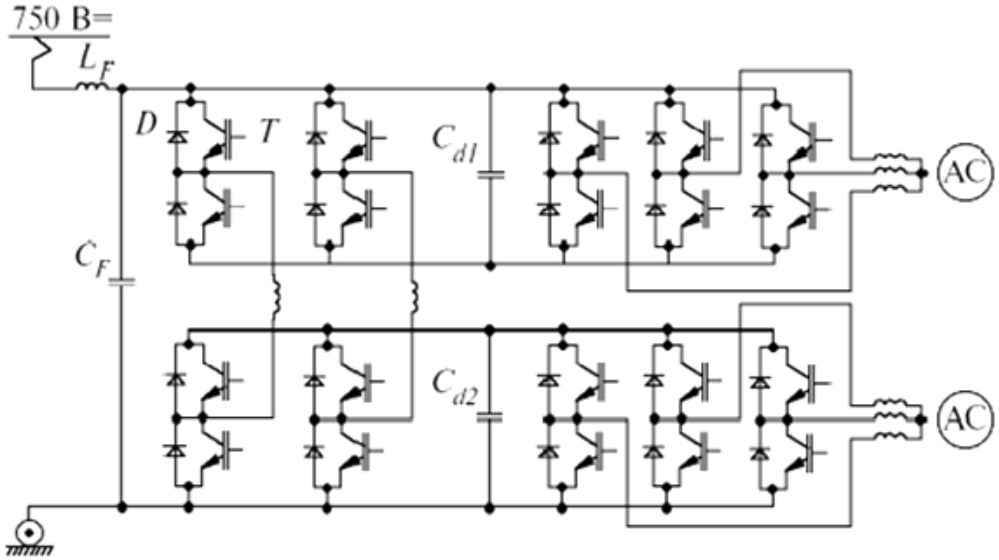


Рис. 7. Электронная система управления

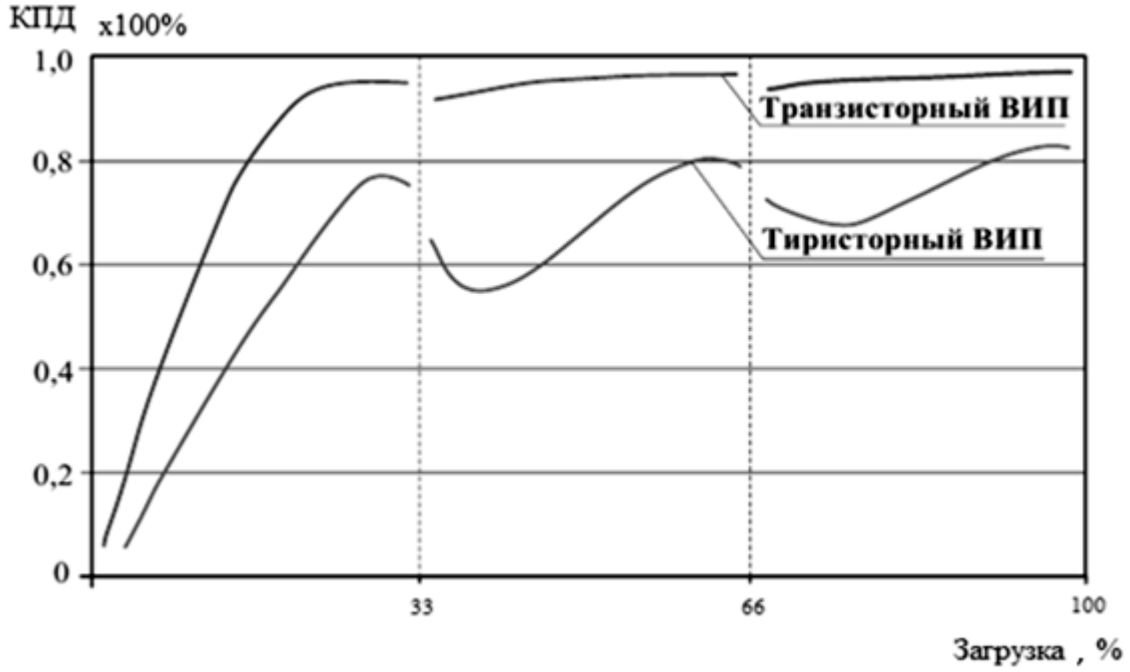


Рис. 8. Зависимости КПД ТИСУ и ЭСУ от загрузки

Разгон трамвая до 40 км/ч с учетом номинальной мощности электромотора 110 кВт будет длиться 20 с, что хорошо согласуется с характеристиками трамвая (11 с).

При длительности цикла движения (разгон-выбег-торможение-стоянка) примерно в 1 минуту средняя потребляемая мощность равна 37,5 кВт. Если мощность конденсатора будет составлять 72,5 кВт, то есть 66%

от номинальной мощности трамвая, то чтобы конденсатор мог поддерживать разгон в течение необходимого времени, его отдаваемая энергия при разряде должна составлять 1,45 МДж.

Необходимую энергию 1,45 МДж конденсатор будет накапливать при торможении, а также в момент выбега и стоянки трамвая.

Если при цикле выбег – торможение с помощью конденсаторов можно накапливать до 1,45 МДж энергии, то для полного цикла (разгон – выбег – торможение) необходимо 2,25 МДж, когда 0,83 МДж составляют потери.

При учете КПД суперконденсаторов в 95% и КПД троллейбуса с РКСУ 63% средняя потребляемая мощность при использовании суперконденсаторов составит 14,3 кВт.

От общей необходимой энергии 2,25 МДж потери составляют 14,3%.

Таким образом, КПД троллейбуса с системой РКСУ при использовании накопителя в виде суперконденсатора можно оценить в 85,7%, но в соответствии с ГОСТ Р 55364-2012 п. 4.7 КПД РКСУ = 0,857 все же ниже регламентируемого ГОСТ = 0,875.

Аналогично оценивая эффективность использования суперконденсаторов для ТИСУ и ЭСУ, получим значения, представленные на рис. 9, где отображены КПД каждой из систем управления до и после применения суперконденсаторов.

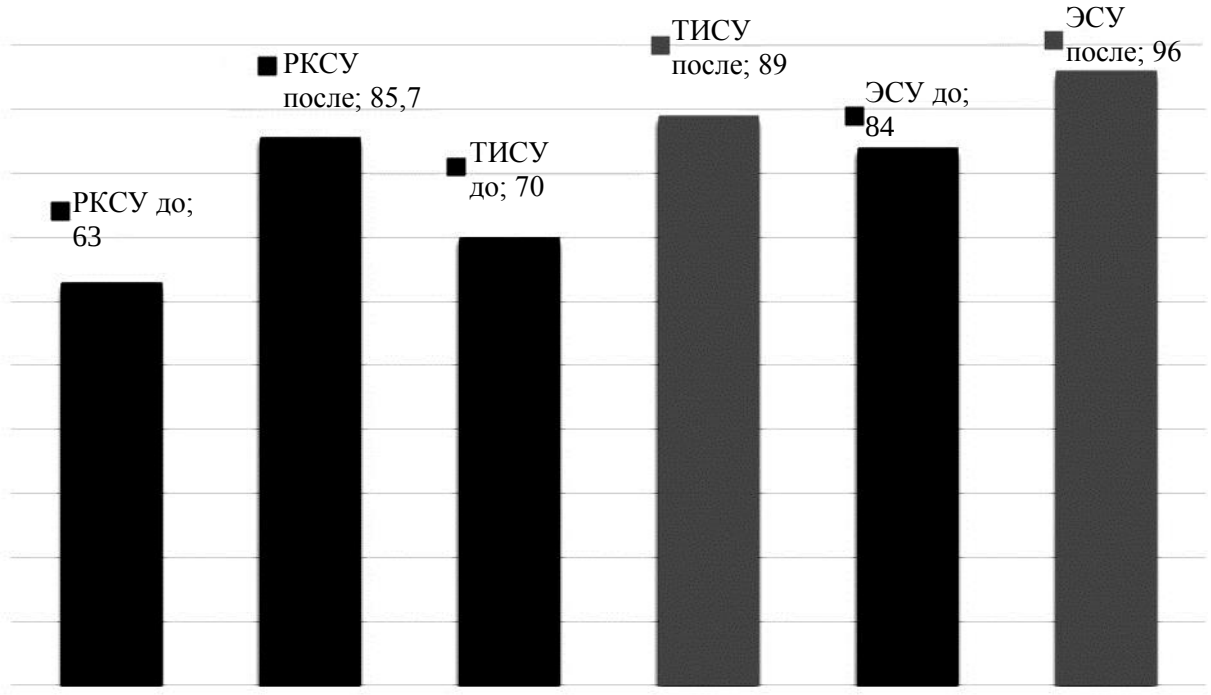


Рис. 9. Эффективность применения суперконденсаторов (до – КПД системы управления без использования суперконденсаторов, после – КПД системы управления с использованием суперконденсаторов)

Помимо повышения экономии электроэнергии, использование суперконденсаторов дает:

– существенное снижение бюджетных затрат на содержание предприятия городского транспорта;

– более плавное (без рывков) движение троллейбусов в режиме тяги и торможения;

– стабилизацию напряжения в контактной сети;

– повышение срока эксплуатации контактной сети;

– снижение тепловой нагрузки на окружающую среду;

– снижение затрат на модернизацию действующих и строительство новых тяговых подстанций.

В ходе исследования выяснилось, что модернизация ТИСУ и ЭСУ с помощью накопителей в виде суперконденсаторов по-

вышает энергоэффективность систем и позволяет соответствовать современным ГОСТ.

Что касается РКСУ, то её модернизация с применением суперконденсаторов повышает энергоэффективность, но эта система и после модернизации не удовлетворяет ГОСТ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Математическое моделирование работы электровоза с новой выпрямительной установкой возбуждения на IGBT-транзисторах / О.В. Мельниченко, А.О. Линьков, А.Ю. Портной, С.Г. Шрамко // Наука и техника транспорта, 2013. № 2. С. 21-28.

2. **Машинец О.Г**. Организация вычислительных устройств микропроцессорных систем управления ЭПС / О.Г. Машинец, С.П. Микуляк, К.И. Юренко // Вестник ВЭЛНИИ. 2004. № 1. С. 185-195.

Сержанский Вадим Сергеевич – студент магистратуры кафедры «Электроснабжение и электротехнология» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Vadim S. Serzhansky – Master Student, Department of Power Supply and Electrotechnologies, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 28.06.17, принята к опубликованию 20.09.17

УДК 621,318.3

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОГО ЛИНЕЙНОГО ДВИГАТЕЛЯ

Д.А. Федоров, Д.А. Вырыханов, И.А. Менщиков

MATHEMATICAL MODELING OF ELECTRODYNAMIC LINEAR MOTORS

D.A. Fedorov, D.A. Vyrikhanov, I.A. Menshchikov

Представлены результаты математического моделирования линейного электродинамического двигателя. Выявлены особенности процессов электромеханического преобразования энергии, а также направления поиска оптимальной конструкции двигателя.

Ключевые слова: *математическое моделирование, линейный электродинамический двигатель, электромеханическое преобразование энергии*

The results of mathematical modeling of the linear electrodynamic motor are presented. Characteristics of the processes of electromechanical transformation of energy, as well as the trends in the search of an optimal design of the motor are determined.

Keywords: *mathematical modeling, linear electrodynamic motor, electromechanical energy conversion*

Электродинамический принцип электромеханического преобразования энергии применяется во многих конструкциях электрических машин и аппаратов: выключателях, сейсмоисточниках, компрессорах, приводе ударных машин для резки, штамповки, вырубки и так далее. Наиболее простыми двигателями являются асинхронные машины, в которых токи вторичного контура индуцируются вследствие изменения токов в первичном контуре, подключенном к источнику питания. При этом относительная простота конструкции формирует более сложные рабочие процессы двигателя, так как электромагнитное усилие зависит от скорости изменения токов в первичном контуре и относительных пространственных координат ротора (якоря) в отличие от электромагнитных преобразователей энергии, у которых электромагнитное усилие является функцией мгновенного значения токов и пространственных координат. Проектирование электродинамических преобразователей усложняется при реализации вторичного контура в виде сложной конструкции, что усложняет функцию распределения плотности тока в отдельных ее частях по сравнению с короткозамкнутой обмоткой с постоянным окном намотки. В связи с этим анализ электродинамического принципа электромеханического преобразования энергии является актуальной задачей.

В статье приводятся результаты математического моделирования линейного электродинамического двигателя (ЛЭД), конструкция которого представлена на рис. 1, прототипом которой явился патент [1]. Целью работы является анализ влияния формы импульса тока на динамические показатели ЛЭД.

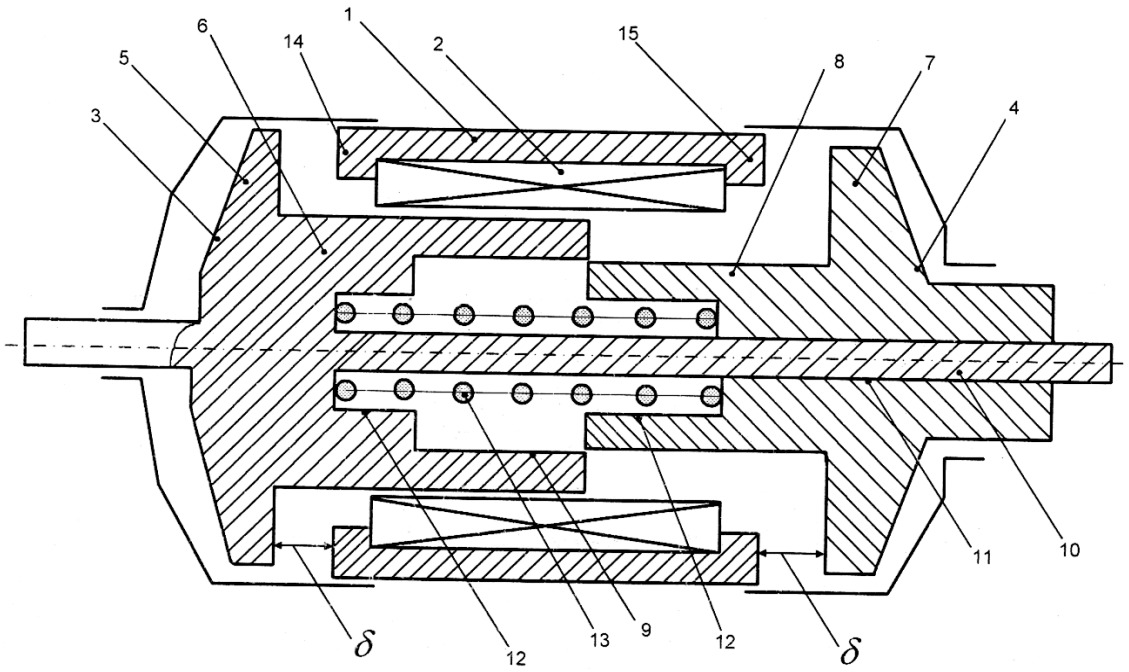


Рис. 1. Конструкция линейного электромагнитного двигателя

ЛЭД состоит из следующих основных частей: магнитопровод статора 1; обмотка возбуждения магнитного поля 2; ярмо левого якоря 3; ярмо правого якоря 4; шляпка левого якоря 5; тело левого якоря 6; шляпка правого якоря 7; тело правого якоря 8; стакан левого якоря 9; ось двигателя 10; направляющее отверстие правого якоря 11; стакан правого якоря 12; возвратная пружина 13; правый край магнитопровода статора 14; левый край магнитопровода статора 15. Якоря выполнены из бронзы, магнитопровод – из электротехнической стали, нитки обмотки – медные.

Принцип работы ЛЭД заключается в формировании электродинамического усилия между магнитопроводом статора 1, обмоткой 2 и якорями, правым и левым в от-

дельности. Усилие возникает вследствие взаимодействия токов в обмотке 2 и токов, индуцируемых в якорях изменением охватывающего их магнитного потока.

Определение электродинамических усилий, действующих на якоря ЛЭД, проведено с помощью специализированного программного обеспечения COMSOL Multiphase's [2].

Моделирование рабочих процессов ЛЭД производилось при следующих допущениях.

1. Конструкция ЛЭД упрощена исключением незначительных объемов, определяющих скос шляпки якорей, выступов для упора возвратной пружины и т.д. Учитывая симметричность конструкции относительно оси движения якорей, моделирование производилось в режиме 2-а задачи. Упрощенная конструкция представлена на рис. 2.

2. Для определения максимальных технических характеристик рассматриваемой конструкции динамическая зависимость тока в обмотке возбуждения и магнитного поля принималась заданной, то есть обмотка возбуждения подключалась к управляемому источнику тока.

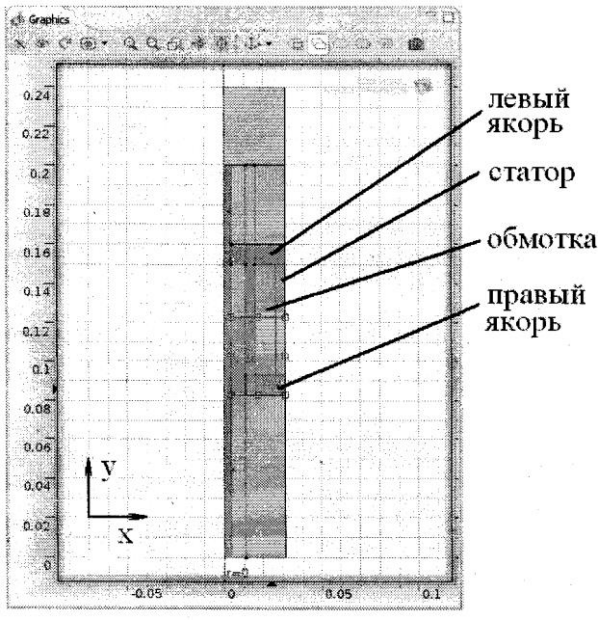


Рис. 2. Расчетная область ЛЭД

3. Влиянием электростатической составляющей электромагнитного усилия пренебрегаем, рассматривая только взаимодействие электрических токов.

4. Силой сопротивления движению якоря являлось только усилие возвратной пружины, силами трения и сопротивления воздуха пренебрегаем.

С помощью программы COMSOL Multiphase's определялись следующие параметры ЛЭД:

– распределение магнитного поля, описывается известным уравнением

$$\sigma\frac{\partial\overline{A}}{\partial t}+\nabla\times\left(\frac{\overline{B}}{\mu_0\,\mu_r}\right)-\sigma\,\overline{v}\times\overline{B}=\overline{j}_{cmp},\quad(1)$$

где σ – относительная электрическая проницаемость, $\overline{A}$ – векторный магнитный потенциал; $\overline{B}$ – вектор магнитной индукции; μ_0, μ_r – абсолютная магнитная проницаемость вакуума и относительная проницаемость материала в рассматриваемой точке поля; $\overline{v}$ – вектор пространственного движения материала в рассматриваемой точке поля; J_{cmp} – плотность сторонних токов;

$$\overline{B}=\nabla\times\overline{A},\quad(2)$$

а ось Z направлена перпендикулярно оси рис. 2;

– электромагнитное усилие F, действующее на якоря (сила Лоренца):

$$F=\int\left(\overline{j}\times\overline{B}\right)dV,\quad(3)$$

где $j=\sigma\left(\overline{v}\times B\right)+j_{cmp}$ – полная плотность тока в рассматриваемой точке поля; V – объем якоря;

– расчет изменения координаты якорей производился путем решения уравнений:

$$\begin{aligned}m_1\frac{d\,v_1}{dt}&=F_1-F_{conp},\\ m_2\frac{d\,v_2}{dt}&=F_2+F_{conp},\end{aligned}\quad(4)$$

где m_1, m_2 – массы соответственно левого и правого якорей; F_1, F_2 – электромагнитные усилия, действующие соответственно на левый и на правый якорь; F_{conp} – сила сопротивления движению якоря, формируемая возвратной пружиной.

При выбранном положительном направлении оси координат (рис. 2) для левого якоря данная сила направлена в отри-

цательную по оси координат сторону, для правого – в положительную.

Вычисления по пунктам 1 и 2 реализовывались с помощью специализированного расчетного блока «Magnetic Fields», пункт 3 рассчитывался посредством блока «Global ODEs and DAEs». Изменение геометрии модели при движении якорей учитывалось посредством блока «Moving Mesh». Решение производилось при независимой переменной времени t с помощью блока «Time Dependent».

Входным данным расчетов являлась плотность тока, задаваемая в окне обмотки возбуждения магнитного поля ЛЭД как функция, меняющаяся во времени.

На рис. 3 представлено распределение магнитной индукции, плотности индуцируемых токов и магнитной энергии в сечении ЛЭД.

На основании результатов расчета распределения физических полей в сечении ЛЭД можно сделать следующие выводы.

1. Наиболее важным элементом конструкции двигателя с точки зрения электромеханического преобразования энергии является внутренняя область обмотки, занимаемая стаканами якорей. В ней наблюдается максимальная плотность преобразуемой магнитной энергии.

2. Максимальная плотность индуцируемых токов в сечении якорей ЛЭД наблюдается в области стакана левого якоря, что объясняется близостью данной области к обмотке возбуждения магнитного поля.

3. Проектирование ЛЭД должно быть направлено, прежде всего, на определение оптимальной конфигурации стаканов якорей, так как взаимодействие индуцируемых в них токов между собой и с магнитным полем статора в наибольшей степени определяет интенсивность (и КПД) преобразования энергии в двигателе.

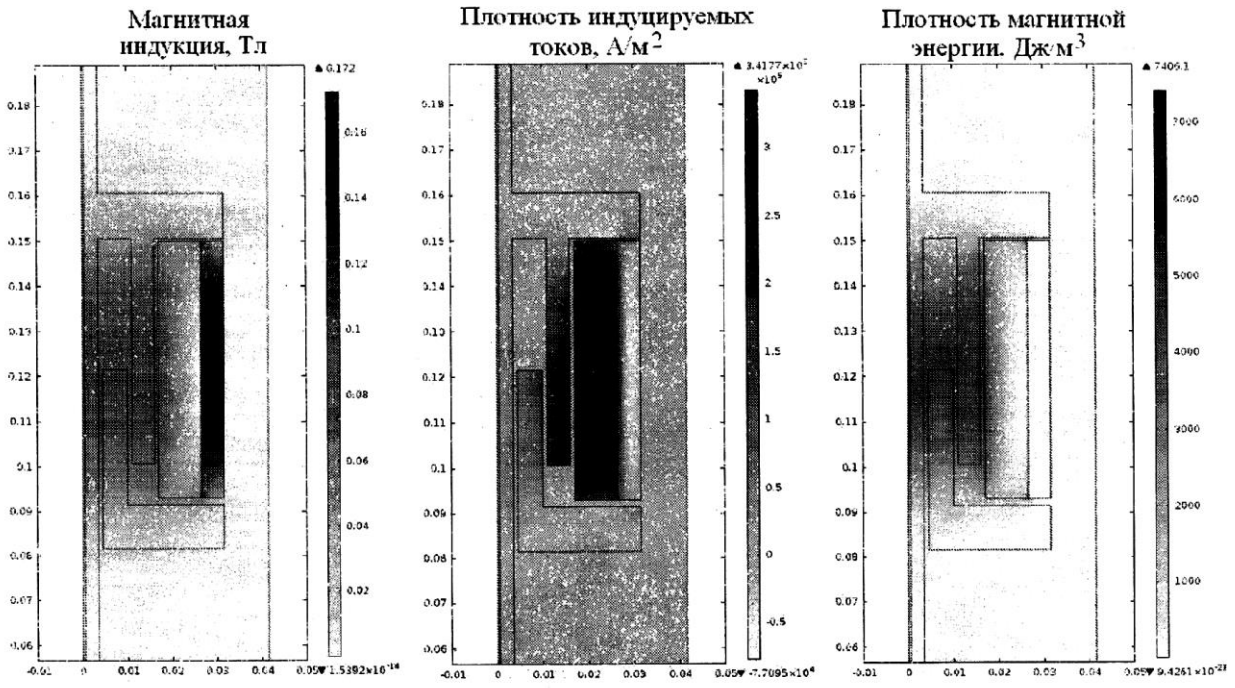


Рис. 3. Распределение магнитной индукции, плотности индуцируемых токов (в перпендикулярном плоскости рисунка направлении) и плотности магнитной энергии

4. Электродинамическое усилие взаимодействия индукционных токов якорей с магнитным полем статора стремится оттолкнуть якоря от статора. В то же время сонаправленность индуцированных токов в стаканах якорей приводит к их притяжению. Таким образом, проектирование оптимальной конструкции ЛЭД должно

вестись в направлении поиска оптимального соотношения между усилиями якоря. Работа, производимая силами, притягивающими якорь, должна формировать максимальный запас энергии индуцируемых токов в шляпках якорей (отталкивающих якоря от статора и друг от друга).

Противодействие указанных усилий должно приводить к предварительному накоплению магнитной энергии в пространстве двигателя, прежде чем якоря начнут движение, отталкиваясь от статора.

На рис. 4 представлены динамические зависимости реакции ЛЭДД при питании обмотки двигателя синусоидальным током с частотой 20 Гц.

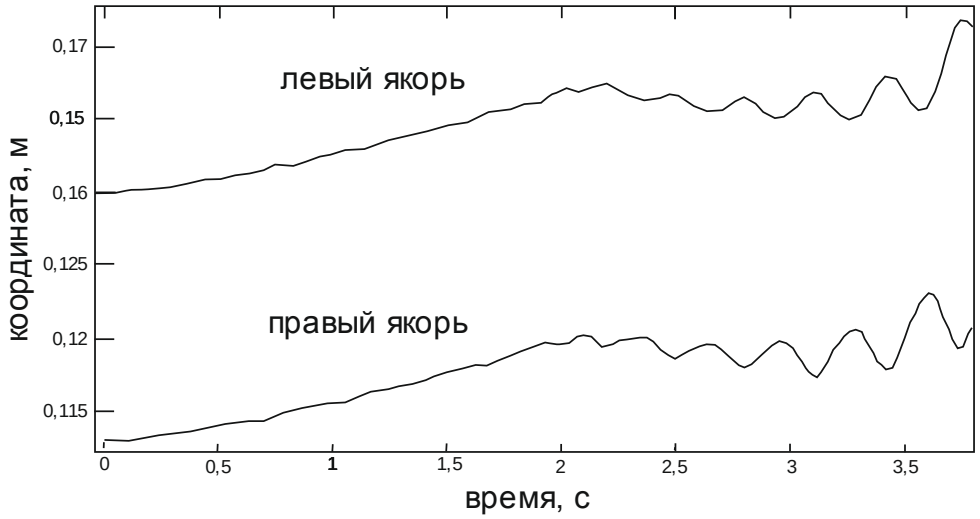


Рис. 4. Динамические характеристики координат якорей ЛЭД при питании обмотки синусоидальным током

Процесс работы двигателя можно разделить на два этапа.

1. Под действием электродинамических усилий якоря двигателя, связанные между собой пружиной, выходят на определенное расстояние от статора, характеризуемое равенством развиваемых ими электродинамических усилий. Левый якорь, обладающий большей площадью поперечного сечения, в объеме которого формируется относительно большая интенсивность индуцируемых токов, отходит на большее расстояние от статора. При этом правый якорь с меньшей площадью поперечного сечения занимает более близкое к статору положение.

2. После достижения баланса между развиваемыми якорями электродинамического усилия формируется колебательный процесс движения якорей, частота которого определяется отношением между собственной частотой механической системы соединенных пружиной якорей, и частотой поданного на обмотки тока.

Итак, на основании математических расчетов распределения физических полей в пространстве двигателя определены основные направления поиска оптимальной конструкции ЛЭД.

Электродинамическая система рассматриваемой конструкции ЛЭД характеризуется собственной частотой колебаний, определяемой механической и электромагнитной подсистемами двигателя. Выход двигателя на режим генерации колебаний происходит автоматически при достижении баланса между электродинамическими усилиями, формируемыми правым и левым якорями. Изменение электродинамических усилий происходит при совместном перемещении якорей, связанных между собой пружиной, относительно статора двигателя под действием отталкивающих электродинамических усилий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пат. РФ 2485662 НО2К33/10, ИО2КІ6/02, Н01І7/16. Электромагнитный двигатель возвратно-поступательного движения / Катаев А.Ф., Менщиков И.А.; заявитель и патентообладатель Сарат. гос. техн. ун-т имени Гагарина Ю.А. Заявка № 2011152957; заявл. 23.12.2011; опубл. 20.06.2013.

2. **Потапов Л.А.** Comsol Multiphysics: Моделирование электромеханических устройств / Л.А. Потапов, И.Ю. Бутарев. Брянск: БГТУ, 2011. 112 с.

Федоров Дмитрий Александрович – студент бакалавриата кафедры «Электроснабжение и электротехнология» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Вырыханов Денис Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение и электротехнология» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Менщиков Игорь Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение и электротехнология» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Dmitry A. Fedorov – Undergraduate, Department of Power Supply and Electrotechnologies, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Denis A. Vyrikhanov – PhD, Associate Professor, Department of Power Supply and Electrotechnologies, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Igor A. Menshchikov – PhD, Associate Professor, Department of Power Supply and Electrotechnologies, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 30.06.17, принята к опубликованию 20.09.17

УВАЖАЕМЫЕ АВТОРЫ!

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

ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ

УДК 621.365.5

ОПТИМИЗАЦИЯ СХЕМЫ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ КОМПЛЕКСА ОБОРУДОВАНИЯ СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНОГО ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО НАГРЕВА

Н.В. Чепляев, Ю.С. Архангельский

OPTIMIZATION OF THE POWER SUPPLY LAYOUT FOR MICROWAVE DIELECTRIC HEATING DEVICES

N.V. Cheplyaev, Yu.S. Arkhangelsky

Предложена технико-экономическая оптимизация комплекса оборудования СВЧ диэлектрического нагрева, основанная на зависимости прибыли от параметров технологического оборудования и цен на электроэнергию, комплектующие и выпускаемую продукцию.

Ключевые слова: *оптимизация, установка СВЧ диэлектрического нагрева, СВЧ мощность, прибыль, затраты*

The proposed technical and economic optimization refers the system of microwave dielectric heating devices, which is based on dependence of profits from the parameters of the processing equipment and prices for electricity, component parts and output products.

Keywords: *optimization, microwave dielectric heating installation, microwave power, profits, costs*

При расширении или создании нового производства приобретаемое или разрабатываемое технологическое оборудование должно обеспечить получение максимальной экономической эффективности (интегрального эффекта).

Согласно [1-3] интегральный эффект $Э_\Sigma$ при расчёте на год определяется соотношением

$$Э_\Sigma = \left[П Ц(1-\gamma_н-\gamma_{ндс}) - З\right](1-\gamma_у), \quad (1)$$

где $П$ – годовой объём продукции; $Ц$ – цена единицы продукции; $З$ – затраты; $\gamma_н$, $\gamma_{ндс}$, $\gamma_у$ – коэффициенты, учитывающие выплату налогов на прибыль, на добавленную стоимость, на выплаты дивидендов.

Затраты в (1), в свою очередь, равны

$$\begin{aligned} З = {} & C_С(1-\gamma_н-\gamma_{ндс}) + C_Э(1-\gamma_н) + \\ & + C_{зп}(1-\gamma_н-\gamma_{зп}) + C_{бр}(1-\gamma_н) + \\ & + K\left[1+i_{кр}+\gamma_{им}+(\kappa_{зч}+\kappa_а)(1-\gamma_н)\right], \end{aligned} \quad (2)$$

где $C_С$, $C_Э$, $C_{зп}$, $C_{бр}$ – затраты на приобретение сырья, на электроэнергию, заработную плату, брак; K – капиталовложения; $\gamma_{им}$, $\gamma_{зп}$, $i_{кр}$, $\kappa_а$, $\kappa_{зч}$ – коэффициенты, учитывающие выплату за имущество, начисления на заработную плату, банковский кредит, затраты на амортизацию, на запасные части.

Стоимость электроэнергии в (2) можно записать в виде

$$C_Э = P\, t\, T_Э, \quad (3)$$

где P – потребляемая мощность оборудования; t – время работы оборудования; $T_Э$ – тариф на электроэнергию.

Если заменить годовой объём продукции $П$ массой этой продукции, а также с уверенностью сказать, что мощность установок зависит от массы нагреваемой продукции, можно определить количество теплоты Q требуемое на нагрев этой продукции:

$$Q = \frac{Pt}{\cos\varphi} = c\,m(T_2 - T_1) = c\,П\,(T_2 - T_1), \quad (4)$$

где c – удельная теплоёмкость объекта термообработки; m – масса объекта; T_1, T_2 – начальная и конечная температуры объекта.

Используя соотношение (4), найдем годовой объём продукции $П$:

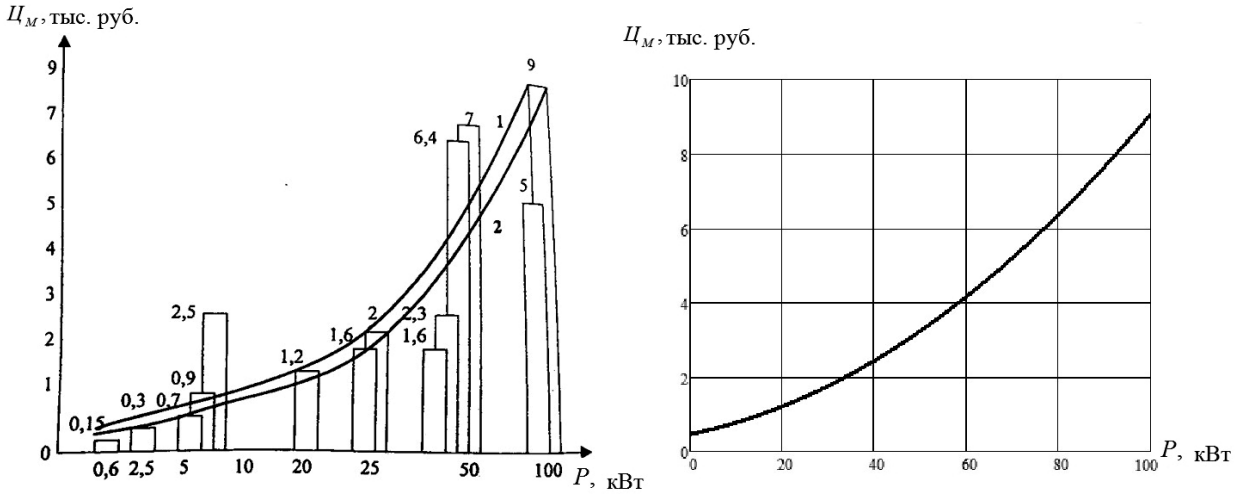
$$П = \frac{P\,t}{c \cdot \cos\varphi\,(T_2 - T_1)}. \quad (5)$$

Если учесть, что весь комплекс оборудования СВЧ диэлектрического нагрева состоит из источника питания, СВЧ генератора (магнетрона), рабочей камеры и вспомогательного оборудования, стоимость которых зависит от мощности, то соотношение (1) с учетом (2)-(5) можно записать в виде

$$Э_\Sigma(P) = \left[A_1 P - \left(A_2 P^2 + A_3 P + A_4\right) L_1\right] L_2, \quad (6)$$

где $A_1 = \dfrac{t\,Ц}{c \cdot \cos\varphi\,(T_2 - T_1)}$; $L_2 = (1 - \gamma_y)$; $A_2P^2 + A_3P + A_4$ – затраты на капиталовложения, представленные полиномом $aP^2 + bP\,c$, причём $A_2 = a$, $A_3 = b + t\,T_Э(1 - \gamma_н)$, $A_4 = c + + C_C\,(1 - \gamma_н - \gamma_{ндс}) + C_{зп}\,(1 - \gamma_н - \gamma_{зп}) + + C_{бр}\,(1 - \gamma_н)$; $L_1 = 1 + i_{кр} + \gamma_{им} + + (\kappa_{зч} + \kappa_а)\,(1 - \gamma_н)$.

Величины a, b, c находятся при помощи аппроксимации полиномом зависимости капиталовложения от СВЧ мощности генератора. Например, на рисунке приведены зависимость цен магнетрона $Ц_М(P)$ и её аппроксимация.



а б

Зависимость цены магнетрона от генерируемой мощности: *а* – цены магнетронов установок СВЧ диэлектрического нагрева в 1990 г. [4]; *б* – аппроксимирующая функция $Ц_м(P)$

Найдём величину P, при которой величина $Э_\Sigma$ максимальна. Продифференцировав соотношение (6), получим

$$\frac{\partial Э_\Sigma(P)}{\partial P} = A_1 L_2 - 2A_2 L_1 L_2 P - A_3 L_1 L_2, \quad (7)$$

Если в (7) $\dfrac{\partial Э_\Sigma(P)}{\partial P} = 0$, то величина P, при которой $Э_{\Sigma max}$, равна

$$P = \frac{A_1 - A_3 L_1}{2 A_2 L_1}. \quad (8)$$

Итак, при $A_1 > A_3 L_1$ соотношение (8) определяет оптимальную мощность P оборудования СВЧ диэлектрического нагрева,

при которой оно приносит максимальную прибыль, то есть обладает максимальной экономической эффективностью.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Гришина Е.М.** Технико-экономическая оптимизация структуры и параметров СВЧ электротермического оборудования на камерах лучевого типа / Е.М. Гришина, Ю.С. Архангельский // Вопросы электротехнологии. 2013. № 1 (1). С. 33-36.

2. **Гришина Е.М.** Технико-экономическая оптимизация структуры и параметров СВЧ электротермического оборудования, собранного на камерах с бегущей волной / Е.М. Гришина, Ю.С. Архангельский // Вопросы электротехнологии. 2014. № 1 (2). С. 33-36.

3. **Гришина Е.М.** Технико-экономическая оптимизация структуры и параметров СВЧ электротермического оборудования, собранного на камерах со стоячей волной / Е.М. Гришина, Ю.С. Архангельский // Вопросы электротехнологии. 2014. № 2 (3). С. 17-20.

4. **Архангельский Ю.С.** Элементная база СВЧ электротермического оборудования / Ю.С. Архангельский, В.А. Воронкин. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2003. 212 с.

Чепляев Николай Владимирович – студент магистратуры кафедры «Электроснабжение и электротехнология» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

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

Nikolay V. Cheplyaev – Master Student, PhD, Associate Professor, Department of Power Supply and Electrotechnologies, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Yuri S. Arkhangelsky – Honored Worker of Science, Dr. Sc., Professor, PhD, Associate Professor, Department of Power Supply and Electrotechnologies, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 11.09.17, принята к опубликованию 20.09.17

ЭЛЕКТРОДИНАМИКА

УДК 621.372.8

КВАЗИАНАЛИТИЧЕСКИЕ ВЫРАЖЕНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВОЛНОВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ЛУНАРНОГО ВОЛНОВОДА С ОДНОРОДНЫМ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ЗАПОЛНЕНИЕМ

А.А. Скворцов

QUASI-ANALYTICAL EXPRESSION OF THE WAVE RESISTANCE IN THE DIELECTRIC-FILLED LUNAR WAVEGUIDE

A.A. Skvortsov

Получены квазианалитические выражения, позволяющие рассчитать волновое сопротивление лунарного волновода с однородным диэлектрическим заполнением. Приведены результаты квазианалитического расчета волнового сопротивления полого лунарного волновода на бесконечно большой частоте, дающие наглядное представление о характере его изменения в зависимости от геометрических размеров рассматриваемой линии передачи.

Ключевые слова: *квазианалитические выражения, волновое сопротивление, бесконечно большая частота, лунарный волновод, прямоугольный волновод, критическая длина, основная волна*

The resulting quasi-analytical expression allows for calculation of the wave resistance in the lunar waveguide characterized for the homogeneous dielectric filling. The author presented the results of the quasianalytic approach to estimating the wave resistance of the hollow lunar waveguide at the infinity frequency. This provides a clear presentation to the character in its changes depending on geometric parameters of the considered transmission line.

Keywords: *quasi-analytical expression, wave resistance, infinity frequency, lunar waveguide, rectangular waveguide, critical length, principal wave*

В настоящее время лунарный волновод (ЛВ), относящийся к линиям передачи (ЛП) сложных сечений со скругленным емкостным зазором и обладающий рядом интересных свойств, находит применение в качестве базового элемента микроволновых систем различного назначения, включая СВЧ устройства для термообработки диэлектрических материалов [1, 2]. Одной из важных инженерных задач, решаемых при разработке СВЧ систем, выполненных на основе отрезков ЛП рассматриваемого поперечного сечения, является определение волнового сопротивления ЛВ, знание которого оказывается полезным при обеспечении согласования СВЧ трактов, расчете коэффициентов передачи шлейфовых разветвлений микроволновых устройств на связанных волноводах, анализе отражений от неоднородностей и т.п.

Анализ известной научно-технической литературы показал отсутствие универсальных алгоритмов расчета волнового сопротивления ЛВ. Определить волновое сопротивление рассматриваемой ЛП на основе точного аналитического решения внутренней краевой задачи электродинамики затруднительно из-за сложной формы по-

перечного сечения ЛВ, поэтому для его расчета необходимо применять численные или квазианалитические (приближенно-аналитические) методы.

Расчет волнового сопротивления ЛВ на основе таких численных подходов [1-8], как методы конечных элементов, конечных разностей, частичных областей, вариационный метод, метод интегральных уравнений и ряд других, несмотря на их универсальность, связан с использованием громоздкого математического аппарата, затрудняющего применение полученных результатов как для теоретических исследований, так и для практических целей. В отличие от численных подходов квазианалитические методы обладают наглядностью, возможностью выявить общие закономерности функционирования линий передачи и сравнительной простотой вычислений [1, 2, 7, 9, 10].

В работе [7] показано, что ЛВ можно рассматривать как прямоугольный волновод (ПрВ), свернутый в поперечной плоскости по дуге окружности. Эта модель дает возможность сопоставить рассматриваемую линию передачи с ПрВ, у которого размер широкой стенки равен $\pi\ (R + r) - t$, а узкой – $R - r$.

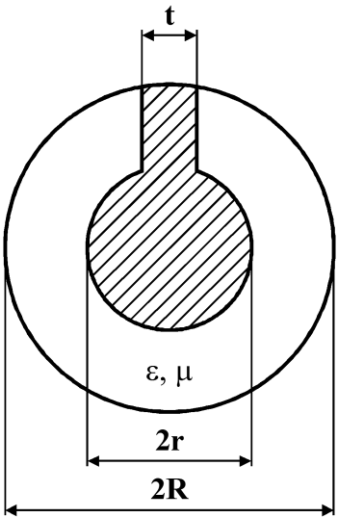


Рис. 1. Поперечное сечение ЛВ

Поскольку волновое сопротивление ПрВ определяется неоднозначно [10], то и волновое сопротивление ЛВ может быть найдено несколькими способами: через амплитуду напряжения U_0 бегущей волны и передаваемую мощность P

$$Z_{0P,U} = \frac{U_0^2}{2P} = \frac{2(R-r)}{\pi(R+r)-t}\frac{\sqrt{\mu\mu_0/\varepsilon\varepsilon_0}}{\sqrt{1-(\lambda/\lambda_{c1})^2}} = \frac{Z_{0\infty P,U}}{\sqrt{1-(\lambda/\lambda_{c1})^2}}, \quad (1)$$

через амплитуду силы тока I_0 бегущей волны и передаваемую мощность P

$$Z_{0P,I} = \frac{2P}{I_0^2} = \frac{\pi^2(R-r)}{8(\pi(R+r)-t)}\frac{\sqrt{\mu\mu_0/\varepsilon\varepsilon_0}}{\sqrt{1-(\lambda/\lambda_{c1})^2}} = \frac{Z_{0\infty P,I}}{\sqrt{1-(\lambda/\lambda_{c1})^2}}, \quad (2)$$

через амплитуды напряжения U_0 и силы тока I_0 бегущей волны

$$Z_{0U,I} = \frac{U_0}{I_0} = \frac{\pi(R-r)}{2(\pi(R+r)-t)}\frac{\sqrt{\mu\mu_0/\varepsilon\varepsilon_0}}{\sqrt{1-(\lambda/\lambda_{c1})^2}} = \frac{Z_{0\infty U,I}}{\sqrt{1-(\lambda/\lambda_{c1})^2}}, \quad (3)$$

где

$$\lambda_{c1} = 2\left(\pi(R+r)-t\right)\sqrt{\varepsilon\mu} \quad (4)$$

– критическая длина основной волны ЛВ с однородным диэлектрическим заполнением [8]; ε_0 и μ_0 – электрическая и магнитная постоянные; ε и μ – относительные диэлектрическая и магнитная проницаемости материала, заполняющего ПрВ; λ – рабочая длина волны; $Z_{0\infty P,U}$, $Z_{0\infty P,I}$ и $Z_{0\infty U,I}$ – значения волнового сопротивления ЛВ на бесконечно большой частоте при различных способах его определения.

Из выражений (1)-(3) следует, что волновые сопротивления, определяемые раз-

личными способами, связаны между собой очевидным соотношением

$$Z_{0P,U} \cdot Z_{0P,I} = \frac{U_0^2}{2P}\frac{2P}{I_0^2} = \frac{U_0^2}{I_0^2} = Z_{0U,I}^2, \quad (5)$$

откуда

$$Z_{0U,I} = \sqrt{Z_{0P,U} \cdot Z_{0P,I}}\,. \quad (6)$$

Необходимо отметить, что различие в числовых множителях значений волнового сопротивления ЛВ, вычисляемого по формулам (1)-(3), особой роли в расчетах не играет, поскольку согласование линий передачи определяется отношением волновых сопротивлений, в результате чего любой числовой коэффициент сокращается.

По формулам (1)-(3) проведен квазианалитический расчет волнового сопротивления ЛВ при различных значениях геометрических размеров и электрофизических параметров диэлектрического заполнения. В качестве примера, дающего наглядное представление о характере изменения волнового сопротивления ЛВ ($\varepsilon = \mu = 1$), определяемого выражением (1), на рис. 2 приведены результаты квазианалитического расчета

$$Z_{0\infty P,U} = \frac{2(R-r)}{\pi(R+r)-t}\sqrt{\frac{\mu\mu_0}{\varepsilon_0}}\,, \quad (7)$$

при различных значениях нормированных геометрических размеров r/R и t/R.

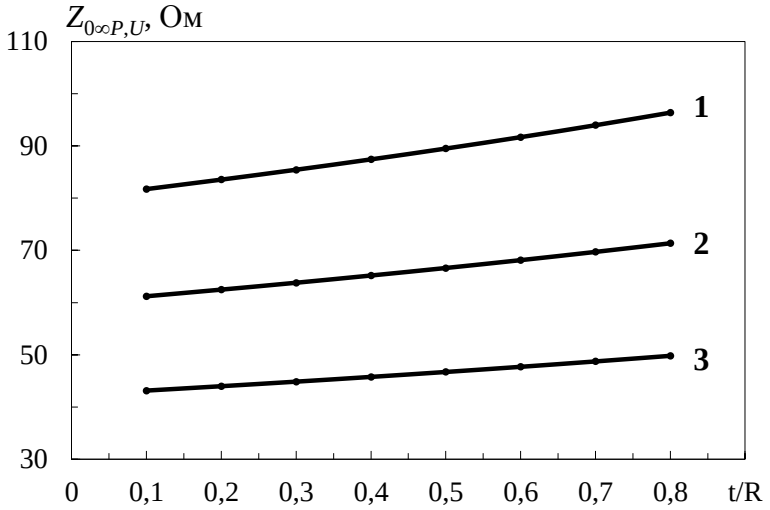


Рис. 2. Зависимость $Z_{0\infty P,U}$ ПВВР от t/R при различных r/R: 1 – r/R = 0,5; 2 – r/R = 0,6; 3 – r/R = 0,7

Таким образом, рассмотренные в работе выражения позволили установить в явном виде простые квазианалитические зависимости волнового сопротивления ЛВ от его геометрических размеров и электрофизических параметров однородного диэлектрического заполнения, которые могут быть с успехом использованы при проектировании СВЧ устройств различного назначения, выполненных на основе рассматриваемой ЛП. Кроме того, полученные в работе соотношения могут быть в дальнейшем использованы для квазианалитического расчета волнового сопротивления ЛВ с частичным диэлектрическим заполнением.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Коломейцев В.А**. Микроволновые системы с равномерным объемным нагревом. Ч. 1 / В.А. Коломейцев, В.В. Комаров. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 1997. 160 с.

2. Коломейцев В.А. Микроволновые системы с равномерным объемным нагревом. Ч. 2 / В.А. Коломейцев, В.В. Комаров, А.Р. Железняк. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2006. 232 с.

3. **Гальченко Н.А.** Волноводы сложных сечений и полосковые линии / Н.А. Гальченко, В.С. Михалевский, Г.П. Синявский. Ростов-н/Д.: Изд-во РГУ, 1978. 176 с.

4. Линии передачи сложных сечений / Г.Ф. Заргано, А.М. Лерер, А.М. Ляпин, Г.П. Синявский. Ростов-н/Д.: Изд-во РГУ, 1983. 320 с.

5. Волноводы сложных сечений / Г.Ф. Заргано, В.П. Ляпин, В.С. Михалевский и др. М.: Радио и связь, 1986. 124 с.

6. Расчет характеристик линий передачи / В.Б. Каток, В.И. Лозяной, А.Б. Олексенко и др. Днепропетровск: Изд-во ДГУ, 1985. 100 с.

7. **Вольман В.И.** Волноводы, обладающие широкой полосой одноволнового режима / В.И. Вольман, В.Б. Каток // Радиотехника и электроника. 1978. № 2. С. 285-290.

8. **Григорьев А.Д.** Электродинамика и микроволновая техника / А.Д. Григорьев. СПб.: Лань, 2007. 704 с.

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

10. **Лебедев И.В.** Техника и приборы СВЧ / И.В. Лебедев. М.: Высш. шк., 1970. Т. 1. 440 с.

Скворцов Алексей Анатольевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Радиоэлектроника и телекоммуникации» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Aleksei A. Skvortsov – PhD, Associate Professor, Department of Radioelectronics and Telecommunications, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 09.09.17, принята к опубликованию 20.09.17

К СВЕДЕНИЮ ЧИТАТЕЛЕЙ!

Экземпляры номеров журнала «Вопросы электротехнологии» можно приобрести в редакции журнала по адресу: 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77 (СГТУ имени Гагарина Ю.А., кафедра ЭЛЭТ, корпус 1, первый этаж, ком. 133а, тел. 8 (845 2) 99-87-63).

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

УДК 621.365, 621.794

СВЕРХТВЕРДЫЕ ОКСИДНЫЕ ПОКРЫТИЯ И ОСОБЕННОСТИ ИХ ПОЛУЧЕНИЯ НА ТИТАНЕ ОБРАБОТКОЙ ТОКАМИ ВЫСОКОЙ ЧАСТОТЫ

А.Ю. Щелкунов, И.С. Егоров, М.А. Фомина, В.А. Кошуро, А.А. Фомин, И.В. Родионов

SUPERHARD OXIDE COATINGS AND KEY FEATURES OF THEIR APPLICATION OVER TITANIUM BY TREATMENT WITH HIGH-FREQUENCY CURRENTS

A.Yu. Shchelkunov, I.S. Egorov, M.A. Fomina, V.A. Koshuro, A.A. Fomin, I.V. Rodionov

Представлены результаты получения сверхтвердых покрытий рутила на титане, которые могут использоваться для изготовления металлообрабатывающего инструмента и медико-технических изделий. Актуальность исследования связана с созданием высококачественных покрытий на титановых и слоистых сталь-титановых элементах, которые сформированы ресурсосберегающей технологией. За счет созданного покрытия конструкции металлообрабатывающих пластин будут иметь повышенную твердость, износостойкость и большой потенциал для внедрения в производство инструментальных сменных пластин и элементов трения медико-технических изделий. В ходе исследования структуры и механических свойств пластинчатых образцов с металлооксидными покрытиями Ti/TiO_2 установлено, что термообработка токами высокой частоты и оксидирование на воздухе позволяют получить субмикрометровую структуру с твердостью 45-65 ГПа, модулем упругости 450-900 ГПа и высокой износостойкостью.

Ключевые слова: *токи высокой частоты, модификация поверхности, оксидное покрытие, титан, сверхтвердые материалы*

The paper provides the analysis to fabrication of superhard rutile coatings over titanium, which can be used in manufacturing metal-working tools, as well as medical and technical products. The importance of the analysis is associated with creation of high-quality coatings over titanium and layered steel-titanium components formed by means of resource-saving technologies. Due to the given type of coating, the metalworking plates will be characterized for increased hardness, wear-resistance and might be invaluable in the production of cartridge-type tools and friction elements to the medical instruments. During the study of the structure and mechanical properties of plate-type samples with Ti/TiO_2 metal oxide coatings, it has been established that using heat treatment with high-frequency currents and air oxidation allows us to obtain a submicrometric structure with hardness at 45-65 GPa and elastic modulus at 450-900 GPa, as well as high-wearing features.

Keywords: *high-frequency currents, surface modification, oxide coating, titanium, superhard materials*

За последние десятилетия сфера применения технической керамики и функциональных металлокерамических материалов расширяется. Используется множество технологий получения тонких пленок и покрытий на инструментальных изделиях, например сменных пластинах резцов и фрез, а также медико-технических изделиях (имплантатах, металлических компонентах эндопротезов) [1, 2]. Структура керамических покрытий обязательно должна контролироваться по размеру элементов, в частности зерен пор и ультрадисперсных упрочняющих добавок, и степени дефектности (наличие концентраторов напряжений 1, 2 и 3 рода) посредством использования комплекса современных и высокоточных электронно-микроскопических методов визуализации структуры, микронаноиндентирования и прочих методов. Изученные параметры состава и структуры будут характеризовать механические свойства и эксплуатационные качества.

Металооксидные покрытия, сформированные на тугоплавких металлах (Ti, Zr, Ta), обладают уникальным комплексом физико-химических и биомеханических качеств. Они находят все большее применение при создании конструкций эндопротезов и других имплантатов. В ряде исследований для повышения прочности пористых керамических материалов используется модификация частицами субмикрометрового диапазона (менее 1 мкм), в частности твердыми (от 10 до 30 ГПа) добавками диоксида циркония (до 2-8%) или оксида алюминия (до 5-15%) [3].

Таким образом, современные керамические материалы и металлоизделия с покрытиями характеризуются определенными технологическими сложностями и ограниченными прочностными показателями. Разработка наукоемкой продукции должна учитывать большое количество факторов, действующих в реальных условиях эксплуатации, в частности условия трения, наличие сосредоточенных и циклических нагрузок, а также коррозионное и высокотемпературное влияние окружающей среды. Цель настоящей работы заключается в создании высокоэффективных элементов пар трения и ресурсосберегающей технологии получения на их поверхности контролируемой пористо-кристаллической структуры с высокой прочностью, твердостью и износостойкостью, которая представляет собой металлооксидную систему кислородно-насыщенного приповерхностного слоя и покрытия.

Экспериментальные образцы изготовлены в виде титановых пластин толщиной 2 мм и слоистых сборок типа «сталь – титан» суммарной толщиной 4-5 мм, полученных контактной сваркой. Поверхность образцов подвергалась чистовому точению и тонкому шлифованию. Далее поверхность металлических образцов модифицировалась высокотемпературным воздействием токов высокой частоты (ТВЧ) при температуре T = 1100-1150°С и продолжительности обработки t не более 30 с. Процесс обработки ТВЧ включал три стадии: интенсивный нагрев, выдержку и охлаждение вместе с керамической малогабаритной камерой (рис. 1).

Макроструктура титановых образцов меняется в зависимости от температуры обработки (рис. 2). При температуре обработки T = 1000-1050°С на поверхности титана образуется тонкое (около 1 мкм) покрытие, которое характеризуется высокой стабильностью структурных и механических показателей (рис. 2 *а*). При повышении температуры обработки до T = 1100-1150°С процесс окисления протекает в ускоренном (катастрофическом) режиме [4]. Оксидное покрытие за время нагрева до заданной температуры (t = 3-4 с) и выдержки (t = 30 с) достигает толщины около 40-50 мкм и самопроизвольно отделяется от поверхности (рис. 2 *б*).

Так как структура оксидного покрытия достаточно неоднородная, то после удаления окалины на поверхности остается подслой рутила (рис. 3 *а*). Данный подслой образован кристаллами призматической формы, средний размер которых достигает 0,4-0,6 мкм (рис. 3) [5].

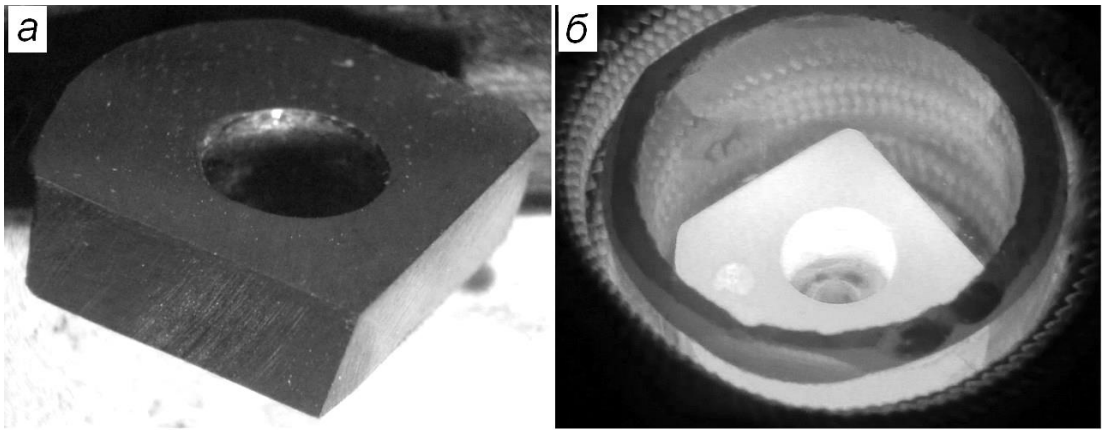


Рис. 1. Сталь-титановые образцы: а – макроструктура после шлифования и формирования режущих кромок; б – высокотемпературная обработка образца, располагаемого в кварцевой камере индукционного нагревателя (свечение соответствует T = 1100-1150°С)

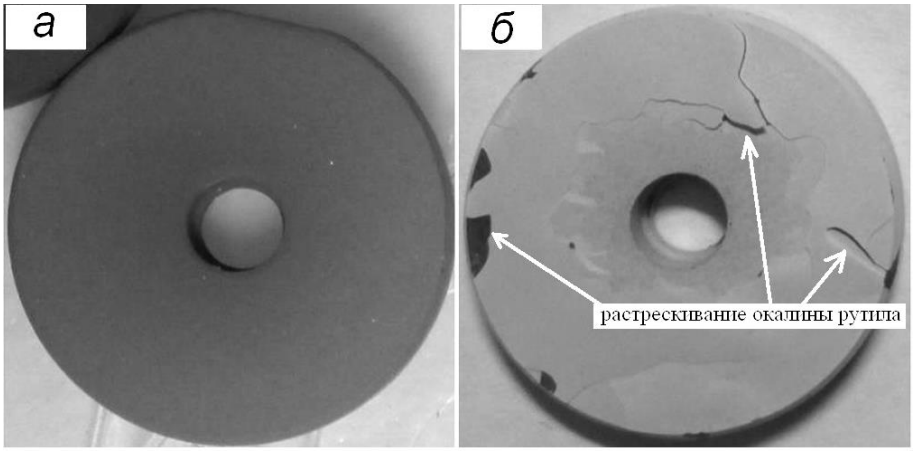


Рис. 2. Макроструктура титановых образцов после формирования тонких (а) и толстых (б) покрытий рутила

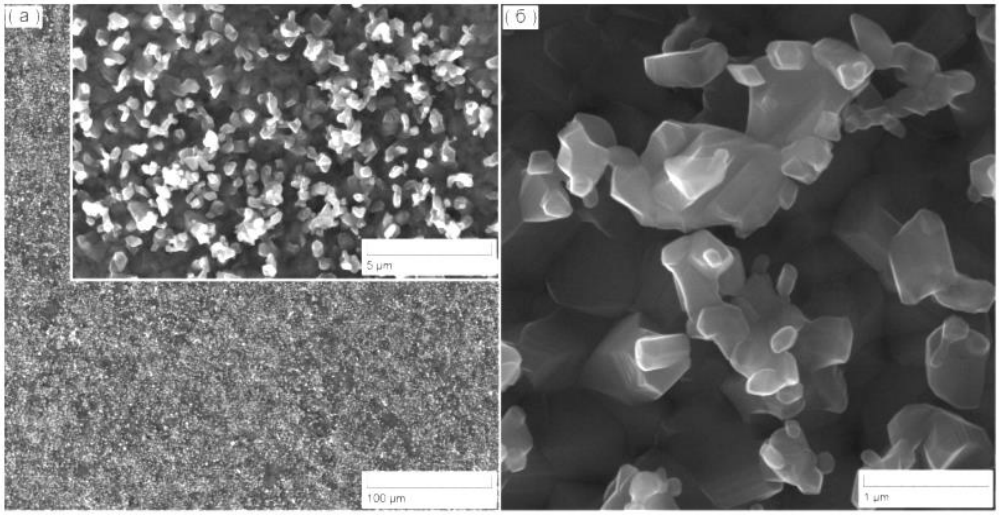


Рис. 3. Микро- (а) и субмикрометровая (б) структура сверхтвердого подслоя рутила

В результате механических испытаний методом микронаноиндентирования при малой нагрузке 10 мН средняя величина твердости покрытий достигает 50-78 ГПа, а модуля упругости – 450-900 ГПа (рис. 4). При нагрузке от 100 до 200 мН, используе-

мой в общепринятом методе измерения микротвердости согласно ГОСТ 9450-76, получены данные о средней величине твердости 45-65 ГПа. Приведенные значения твердости соизмеримы с известными данными для ряда сверхтвердых технических керамик, например нитрида бора (до 70 ГПа) и алмаза (до 100-150 ГПа). Большинство сверхтвердых материалов являются дорогостоящими, а их получение достаточно энергоемкое, поэтому предлагаемая технология является малозатратной и ресурсосберегающей.

Данное покрытие рутила, сформированное на титане, было опробовано в тестах на износостойкость при резании ряда конструкционных материалов, в частности хромоникелевой нержавеющей стали 40Х13 с твердостью 46 HRC. Использование образцов сталь-титановых пластин с тонкими покрытиями Ti/TiO_2 при токарной обработке обеспечивает производительную чистовую обработку при глубине резания до 0,5 мм (рис. 5).

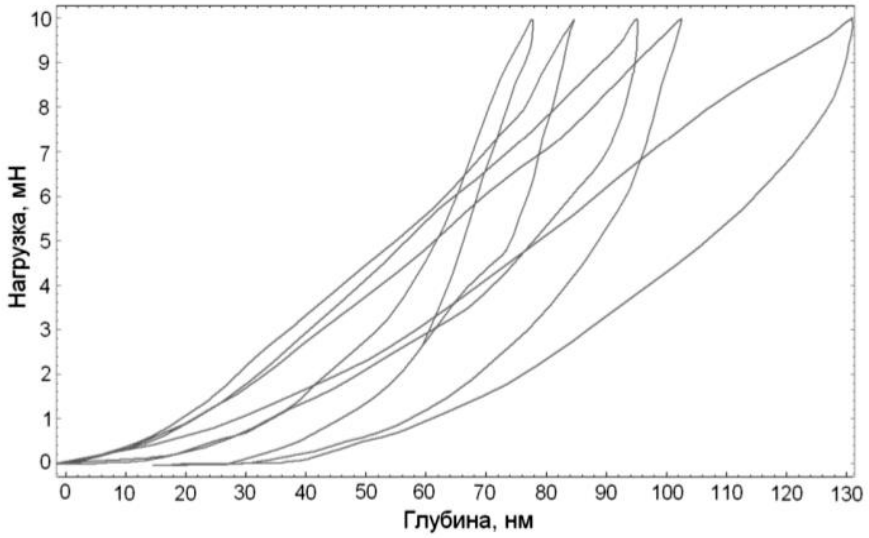


Рис. 4. Диаграммы «нагрузка-глубина», полученные при наноиндентировании сверхтвердого подслоя рутила (при малой нагрузке 10 мН)

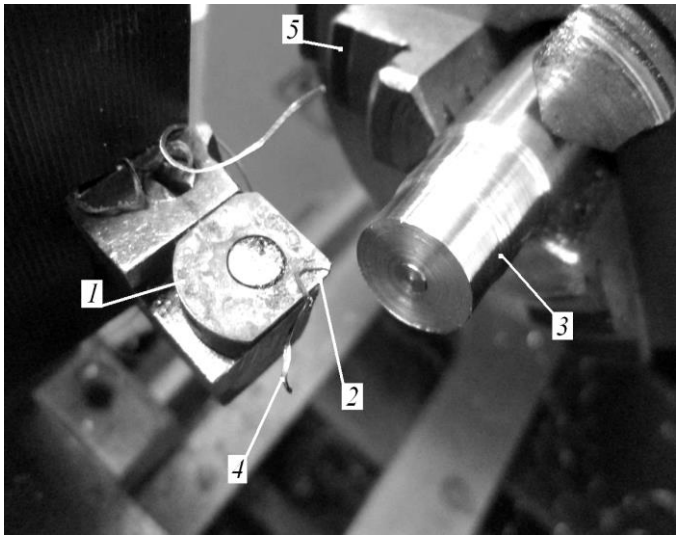


Рис. 5. Токарная обработка стали 40Х13 с использованием сталь-титановых пластин с покрытием Ti/TiO_2: 1 – резец; 2 – режущая кромка; 3 – проточенная поверхность стальной заготовки; 4 – стружка; 5 – трехкулачковый патрон

Предлагаемая технология обработки ТВЧ титановых и сталь-титановых образцов обеспечивает формирование на их поверхностях субмикрометровой металлооксидной структуры. Покрытие рутила характеризуется высокой твердостью около 45-65 ГПа и износостойкостью. Полученные характеристики поверхности образцов достигаются за счет высокотемпературной обработки ТВЧ в воздушной атмосфере при температуре около 1100-1150°С и выдержке не более 30 с.

Результаты исследования, касающиеся разработки технологии получения сверхтвердых покрытий на титановых образцах, получены при выполнении работ по проекту № 11378ГУ/2017 от 25.04.2017 программы «У.М.Н.И.К.» (исполнитель Щелкунов А.Ю.).

ЛИТЕРАТУРА

1. Composite ion-plasma coatings with nanodisperse reinforced phase: scientific and practical aspects of synthesis / B. Brzhozovskii, V. Martynov, E. Zinina, M. Brovkova // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2016. Vol. 116. P. 012007.

2. Composition, structure and mechanical properties of the titanium surface after induction heat treatment followed by modification with hydroxyapatite nanoparticles / A. Fomin, S. Dorozhkin, M. Fomina, V. Koshuro, I. Rodionov, A. Zakharevich, N. Petrova, A. Skaptsov // Ceramics international. 2016. Vol. 42. № 9. P. 10838-10846.

3. Zirconia ceramics with additions of alumina for advanced tribological and biomedical applications / M.H. Ghaemi, S. Reichert, A. Krupa, M. Sawczak, A. Zykova, K. Lobach, S. Sayenko, Y. Svitlychnyi // Ceramics International. 2017. Vol. 43. № 13. P. 9746-9752.

4. **Kofstad P.** High-temperature oxidation of metals / P. Kofstad. Wiley, New York, 1966. 340 p.

5. Superhard oxide coatings formed on titanium treated by high-frequency currents / A.A. Fomin, M.A. Fomina, I.V. Rodionov, V.A. Koshuro, E.Yu. Poshivalova, A.Yu. Shchelkunov, A.A. Skaptsov, A.M. Zakharevich, V.S. Atkin // Technical Physics Letters. 2015. Vol. 41. № 9. P. 909-911.

Щелкунов Андрей Юрьевич – студент Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Егоров Иван Святославович – студент Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Фомина Марина Алексеевна – студентка Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Кошуро Владимир Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Сварка и металлургия» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Фомин Александр Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Сварка и металлургия» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Andrey Yu Shchelkunov – Undergraduate, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Ivan S. Egorov – Undergraduate, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Marina A. Fomina – Undergraduate, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Vladimir A Koshuro – PhD, Associate Professor, Department of Welding and Metallurgy, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Aleksander A. Fomin – PhD, Associate Professor, Department of Welding and Metallurgy, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

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

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

Статья поступила в редакцию 09.09.17, принята к опубликованию 20.09.17

ЛЕТОПИСЬ

К ВОПРОСУ О «ТЕПЛОВОЙ СМЕРТИ» ВСЕЛЕННОЙ

Ю.С. Архангельский

… Излученная в мировое пространство тепловая энергия должна иметь возможность каким-то путем … снова сосредоточиться и начать активно функционировать.
… Вот вечный круговорот, в котором движется материя …

Ф. Энгельс
(«Диалектика природы»)

При проектировании электротермического оборудования обычно проводят математическое моделирование изменения температуры обрабатываемого объекта во времени. А как изменяется распределение теплоты во Вселенной?

В разговоре о будущем Вселенной нужно говорить об эволюции. Эволюция в широком смысле – представление об изменениях, их направленности, порядке, закономерностях, причем определенное состояние рассматривается как результат длительного развития. В узком смысле в отличие от революции эволюция – представление о медленных, постепенных изменениях.

Применительно ко Вселенной эволюция – это количественные и качественные изменения, которые претерпевает Вселенная за очень длительные промежутки времени. С другой стороны, эволюция Вселенной – предмет космологии, раздела астрономии, изучающей происхождение и развитие космических тел и систем на их основе. В космологии используют методы исследований, развитые как в физике, так и в философии.

Наука о природе – физика – изучает простейшие и вместе с тем наиболее общие свойства материального мира. Философия – форма общественного познания, мировоззрения, система идей, взглядов на мир и место в нем человека. О философии говорят, что она подводит итог познания мира в целом, что ее задача – выразить содержание эпохи и соотнести его со всей историей человечества.

В космологии одним из наиболее развитых разделов является звездная космология (звездная эволюция), изучающая изменение во времени физических характеристик и химического состава звезд. Но если говорить об эволюции Вселенной, то надо признать, что вопрос о направлении эволюции, о ее прогрессе или регрессе постоянно был в центре внимания физиков и философов. И было бы неверно говорить об общепризнанном неизбежном прогрессе в эволюции Вселенной. Есть сторонники теорий о сотворении и неизбежности конца мира. К ним относится теория о так называемой «тепловой смерти» Вселенной.

Возникшая в середине XIX века, эта теория сразу привлекла к себе внимание физиков, философов и церковных иерархов. Споры вокруг этой теории то возникали, то затухали, то вспыхивали вновь. Интерес к проблеме прогресса в эволюции Вселенной последний раз резко возрос, и не только среди профессионалов, в пятидесятые годы XX века после сенсационных результатов исследований профессора Н.А. Козырева в

области механики. В те годы у нас в стране и за рубежом появилось много отзывов на выводы, к которым пришел Н.А. Козырев.

На наш взгляд, в проблеме прогресса в эволюции Вселенной вопрос о «тепловой смерти» Вселенной занимает ключевое место, здесь еще рано ставить точку, а поэтому интересно по прошествии шестидесяти лет проанализировать все «за» и «против» этой теории.

Термодинамика. Постулат Клаузиуса. Физика не сразу пришла к пониманию взаимопревращения различных видов энергии. Осмысление этого началось с изучения теплоты. Промышленный переворот в начале XIX века, паровая машина – все это требовало пристального изучения теплоты.

Уже в 1824 г. основоположник нового раздела физики – термодинамики – Сади Карно писал в мемуарах «Размышления о движущей силе огня и машинах, способных развивать эту силу» (Париж, 1824 г.): «… если тело, испытав любые изменения и ряд превращений, возвращается в прежнее состояние в отношении плотности и температуры, то оно будет обладать тем же количеством теплоты, какое и имело первоначально… Это положение никогда не подвергалось сомнению: оно … подтверждено многочисленными измерениями».

Но только в 1843 г. Джоулем был впервые установлен механический эквивалент теплоты, а годом позже Р. Майером было сделано обобщение количественного соотношения между теплотой и работой в принцип взаимопревращаемости теплоты и работы, иными словами, был количественно оценен эффект взаимоперехода двух видов энергии – тепловой и механической. Так началось становление закона сохранения энергии, в обосновании которого большое значение имели опыты Э. Ленца по изучению преобразования электрической работы в теплоту (1844 г.) и исследования Гельмгольца (1847 г.).

Каждая форма энергии имеет свои специфические особенности, проявляющиеся при взаимных превращениях различных форм энергии. А закон сохранения энергии применительно к тепловым процессам, носящий название первого начала термодинамики, как раз и не указывает на эти особенности; на условия перехода, ничего не говорит о направленности тепловых процессов. Ответ на вопрос о направленности тепловых процессов дает второе начало термодинамики. В 1851-1852 гг. Томсон развил принцип Карно, доказав, что этот принцип универсальный, характерный для всех тепловых процессов. Стройная система термодинамики на основе закона сохранения энергии и принципа Карно-Томсона была построена Р. Клаузиусом вскоре после работы Томсона. Он же дал математическую формулировку второму началу термодинамики, которое, как известно, гласит, что теплота не может сама собой переходить от более холодного к более горячему телу без поступления теплоты извне. Разность температур, где-либо возникая, всегда выравнивается, теплота рассеивается, теряя свою способность производить работу. После того как Клаузиус ввел количественную меру рассеивания теплоты – энтропию, второе начало термодинамики стало утверждать стремление энтропии в изолированной физической системе к некоторому максимуму, присущему состоянию равновесия системы, то есть запрещается самопроизвольное уменьшение энтропии.

В 1852 г. Томсон, а затем и Клаузиус распространили второе начало термодинамики на Вселенную и пришли к выводу, что раз закон роста энтропии, бесспорно, господствует в космосе, бесконечно давно должно было произойти выравнивание температуры между космическими объектами и замирание всех физических процессов, наступление «тепловой смерти». Этот конец неминуем, он должен был наступить бесконечно давно. Но раз такого конца еще нет, значит мир существует не бесконечно, значит был момент сотворения мира, есть его творец. Этот вывод физиков привлек внимание церковных иерархов.

И это характерно: успехи науки столь велики, что никто, в том числе и церковь, не может оспаривать значений научных открытий и достижений.

Клаузиус загадал естествоиспытателям и философам трудную загадку. Прошло более полутора столетий со времени пророчества Клаузиуса, однако вряд ли можно считать эту загадку полностью решённой.

Флуктуационная гипотеза Больцмана. Статистическая физика и бесконечность Вселенной. Как же учёные-естествоиспытатели и философы распутывали узел, завязанный Клаузиусом?

Все материалисты, естественно, сходились во мнении, что второе начало термодинамики никак не является «термодинамическим доказательством бытия божия», так как это «термодинамическое доказательство» попросту противоречит всему духу материализма. Но не искоренять же одну веру другой!

Ученые, высказывающиеся за прогресс в эволюции Вселенной, против теории «тепловой смерти» Вселенной, по-разному аргументируют своё мнение, но всё же можно выделить три подхода к решению проблемы.

Один из подходов, раскрывающий до некоторой степени диалектику второго начала термодинамики и поэтому имеющий принципиальный интерес, связан с именем Людвига Больцмана. Среди его интересов термодинамика занимала видное место. Положив в основу своих рассуждений представление о теплоте как энергии беспорядочного движения частиц материи, этот австрийский физик пришел к статистическому толкованию термодинамики.

Создание статистики Больцмана – одно из крупных достижений физики и крупное завоевание материализма, первый удар по теории «тепловой смерти» Вселенной. Статистика впервые придала ясный физический смысл процессу передачи теплоты от тела к телу, и раскрылся смысл понятия энтропии. Согласно статистике температура связана со средней скоростью в хаосе молекулярного роя. Это перераспределение кинетической энергии контролируется законом сохранения энергии.

Что касается энтропии, то она характеризует вероятность исхода физических событий, происходящих при огромном числе случайных взаимодействий частиц, то есть второе начало оказывается приложением теории вероятности к расчёту поведения огромного скопления частиц материи. Это, конечно, сузило область применения второго начала, так как оно оказалось неприложимо к отдельным атомам и молекулам. Это и понятно, ибо физические понятия и законы испытывают глубокое качественное изменение при переходе от макроскопических к микрофизическим явлениям. С другой стороны, статистическое толкование позволило распространить второе начало на процессы в масштабах космоса, и в этом смысле область применения второго начала значительно расширилась.

Статистический характер второго начала допускает и самопроизвольный переход теплоты от более холодного тела к более горячему, ибо вероятность такого явления отлична от нуля. Другими словами, в системе, внутри которой всюду одинаковая температура (система находится в равновесии), возможны отклонения от состояния равновесия – флуктуации, так что принципиально нельзя противопоставлять необратимость и обратимость физических процессов: необратимость появляется только потому, что число процессов в одном направлении чрезвычайно преобладает, по второму началу термодинамики, над числом процессов в обратном направлении.

Больцман верил в прогресс в эволюции Вселенной и первым обратил внимание на кроющееся во втором начале единство двух противоположностей – обратимости и необратимости физических процессов с термодинамической точки зрения. Именно в борьбе этих двух противоположностей Больцман видел решение задачи Клаузиуса, залог прогресса в эволюции Вселенной.

Необозримо огромные промежутки времени, через которые в погруженной в оцепенение Вселенной происходит отклонение от положения равновесия, учёный называл зонами. По этой причине гипотеза Больцмана известна как «гипотеза зон».

Вечность холодного покоя и вспышка деятельности! Сам Больцман писал в своих «Лекциях по теории газов»: «… во Вселенной, которая в общем виде находится в теп-

ловом равновесии, то есть мёртвая, то тут, то там должны существовать сравнительно небольшие области протяжённости нашего звёздного пространства (назовём их единичными мирами), которые в течение сравнительно короткого времени эры значительно отклоняются от теплового равновесия…» [1].

Совершенно очевидна огромная ценность гипотезы Больцмана в историческом аспекте. Позднее многие учёные подметили её недостатки и акцентировали на них внимание естествоиспытателей и философов.

Главный недостаток гипотезы зон в том, что она не только не устраняет идею неизбежности теплового равновесия во Вселенной в будущем, а даже предполагает это событие в настоящем. Так, Э. Кольман замечает: «… вся гигантская наблюдаемая нами область Вселенной далека от теплового равновесия. А между тем вероятность флуктуаций несравненно меньшего размера как в ту, так и в другую сторону была бы, согласно Больцману, гораздо больше. Между тем именно этих флуктуаций меньшего размера мы не наблюдаем» [2].

Большинство критиков гипотезы Больцмана сходятся на том, что непригодность этой гипотезы есть свидетельство неприменимости статистических закономерностей Больцмана к бесконечно большим объектам, то есть ко Вселенной. Так, Л. Ландау и Е. Лифшиц считают, что: «Согласно результатам статистики, Вселенная должна была бы находиться в состоянии полного статистического равновесия… Между тем ежедневный опыт убеждает нас в том, что свойства природы не имеют ничего общего со свойствами равновесной системы, а астрономические данные показывают, что то же самое относится и ко всей доступной нашему наблюдению колоссальной области Вселенной… Это противоречие между действительным поведением Вселенной и требованиями статистики… указывает на полную неприменимость теории к исследуемому объекту – миру как целому» [3].

Однако сила статистики Больцмана и его гипотезы так велика, что и во второй половине XX века среди учёных немало последователей Больцмана в решении вопроса о путях эволюции Вселенной. Так, проф. Я. Терлецкий отчасти справедливо замечает, что гипотеза Больцмана «… представляет из себя пока что единственную попытку объяснить возможность существования необратимых процессов во Вселенной, отправляясь от концепции обратимых элементарных законов природы» [4].

Но сам дальше Больцман не идет и полностью стоит на стороне флуктуационной гипотезы.

Проф. И. Плоткин и проф. К. Станюкович развивают идеи Больцмана. Их работы интересны еще и тем, что они – удар по имеющей некоторое хождение тенденции советовать физике не заниматься «актуальной бесконечностью», ибо человеческий опыт ограничен конечными системами. В статье «О флуктуационной гипотезе Больцмана» [5] И. Плоткин справедливо замечает, что такой взгляд на задачи физики «отрицает космологию как науку», снимает с обсуждения вопрос о «тепловой смерти» Вселенной, проблему эволюции Вселенной, что признавало бы существование проблем, принципиально выходящих за рамки возможностей человеческого познания.

При осуществлении предельного перехода в статистических закономерностях к бесконечно большим системам И. Плоткин рассуждает так: «В основе статистической интерпретации второго начала термодинамики лежит, как известно, идея Больцмана о том, что каждое состояние макросистемы может быть реализовано определенным множеством способов; разным состояниям системы соответствуют разные множества способов реализации. Количество способов реализации каждого данного состояния является мерой возможности нахождения системы в этом состоянии. Состояние равновесия системы отличается от всех прочих состояний наименьшей вероятностью, то есть наибольшим количеством способов реализации. Такое различие между вероятностями разных состояний существует, однако, только у конечных систем (состоящих из конечного числа частиц). Если же число входящих в систему частиц бесконечно, то,

очевидно, бесконечным является и множество способов реализации любого состояния системы. Какое же состояние такой системы является состоянием равновесия» [5].

Итак, прогресс эволюции Вселенной И. Плоткин видит в новизне и неповторимости каждого следующего состояния, все бесконечное множество которых эта система не может реализовать даже за вечность.

В то же время проф. К. Станюкович считает, что представление Вселенной как системы, состоящей из частиц одного класса (что и предполагается в работах И. Плоткина), неминуемо приводит к возможности нахождения такой системы сколь угодно близко от состояния равновесия и, следовательно, снова приводит к «тепловой смерти». По мнению К. Станюковича: «Только структурность Вселенной, только развитие и бесконечное разнообразие материи делает невозможным её стремление к равновесию» [6].

Сейчас можно считать установленной значительную неоднородность видимой части Вселенной. Это говорит о том, что следует отдать предпочтение теории К. Станюковича, который как раз пытается учитывать неоднородность структуры Вселенной. Но К. Станюкович признает возрастание энтропии в каждой конечной области Вселенной, хотя и не признает равновесного состояния всей Вселенной.

На наш взгляд, это дает право относиться к выводам И. Плоткина и К. Станюковича о решении загадки Клаузиуса с осторожностью. Тем более вряд ли можно считать исчерпанным спор о конечности или бесконечности Вселенной.

Своим возникновением этот спор обязан открытию в 1919 г. американским астрономом Хабблом явления красного смещения спектральных линий далеких галактик, что означает расширение видимой части Вселенной. Физики, астрономы и философы до сих пор много спорят о том, какова геометрия Вселенной. Модель пульсирующей Вселенной, открытие Зельмана в 1953 г. недопустимости противопоставления понятий «конечная» и «бесконечная» в отношении неизотропной модели Вселенной – все это заставляет вслед за Э. Кольманом считать, что «Мы не должны просто отбросить с порога допущение, будто Вселенная пространственно конечна… Наши фактические данные не дают нам ответа на вопрос о пространственной бесконечности или пространственной конечности Вселенной» [2].

Это не позволяет считать выводы И. Плоткина и К. Станюковича достаточно аргументированными, ибо в основу этих выводов положено представление о бесконечности Вселенной. К тому же решение проблемы прогресса эволюции Вселенной в духе И. Плоткина или К. Станюковича несколько уводит в сторону от обсуждения странно одностороннего процесса рассеяния энергии, деградации, смерти Вселенной.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Больцман Л.** Лекции по теории газов / Л. Больцман. М.: ГИТТЛ, 1956. 525 с.

2. **Кольман Э.** Ленин и новейшая физика / Э. Кольман. М.: Госполитиздат, 1961. 61 с.

3. **Ландау Л.** Статическая физика / Л. Ландау, Е. Лифшиц. М: ГИТТЛ, 1951. Т. 3.

4. **Терлецкий Я.** Динамические и статистические законы физики / Я. Терлецкий. М.: Изд-во МГУ, 1950. 82 с.

5. **Плоткин И.** О флуктуационной гипотезе Больцмана / И. Плоткин // Вопросы философии. 1959. № 4. С. 139.

6. **Станюкович К.** К вопросу о термодинамике Вселенной / К. Станюкович // Труды IV совещания по вопросам космогонии. М.: Изд-во АН СССР, 1953.

Продолжение следует

ПАМЯТИ ВАЛЕНТИНА НЕМКОВА. О ЧЕЛОВЕКЕ И УЧЕНОМ

(1937 – 2017)

В мае 2017 года ушел из жизни великий ученый профессор Валентин Сергеевич Немков, внук советского учёного в области высокочастотной техники, члена-корреспондента АН СССР Вологдина Валентина Петровича. Мировое научное сообщество электротехников и электротехнологов с его уходом потеряло выдающегося эксперта в этой области, всенародно и всемирно известного и высокопочитаемого учёного, на международном уровне способствовавшего в течение многих лет внедрению индукционных технологий в промышленность.

До войны семья Немковых жила в Ленинграде на Крестовском острове, в деревянном доме с мезонином. Часть дома принадлежала деду, Валентину Петровичу Вологдину. Когда грянула война и возникла угроза Ленинграду, началась эвакуация части населения, прежде всего детей.

Валентин Немков вспоминал: «Детей академиков, членов-корреспондентов и некоторых профессоров собрали перед зданием Дома учёных на Дворцовой набережной, недалеко от Зимнего дворца. Погода была пасмурной. В ожидании автобуса, который повёз нас на железнодорожный вокзал, мы с братом увидели, как вверх по Неве шёл небольшой катер с пушкой на носу; он контрастно вырисовывался на фоне Петропавловской крепости. С этого для нас началась война» [1].

Эвакуация семьи Немковых прошла в Пермском крае. Там же, в селе Слудки, Валентин в сентябре 1944 года пошел в школу. После блокады вернулись в Ленинград, в свой дом, который чудом уцелел. «Казалось бы…», – вспоминает Валентин Немков, «…непосредственно в нашей семье никого на фронте не убили, но война тяжёлым катком прокатилась и по нам. Не будь войны, не был бы контужен отец, не умер бы Санчик (младший брат), не родилась бы у матери мёртвая девочка в 1943 году из-за недоедания, тяжелой работы. Да многое было бы иначе. Недаром простые люди всегда говорили и говорят: Мир вам!»

Дочь Валентина Немкова Татьяна Петрова рассказывает об отце: «… он был маленьким мальчиком, когда началась Великая Отечественная война. А для меня остается любимым папой, который в детстве катал меня на плечах, всегда был рядом, помогал, поддерживал, направлял. Рассказывал мне удивительные мифы Древней Греции, читал «Илиаду» Гомера, гонял со мной на лыжах. При этом он много работал в Ленинградском электротехническом институте (ЛЭТИ), занимался научной работой, писал книги по индукционному нагреву металлов, стал профессором, учил студентов и аспирантов. Это все было частью и моей жизни…» [1].

С 1995 года В.С. Немков проживал в США. Являлся директором научно-исследовательского отдела компании Fluxtrol, Inc. (Мичиган, США), научным руководителем проекта по разработке и продвижению индукционных технологий на западном рынке.

Со многими учеными Валентина Немкова связывали не только научные интересы, но и личные дружеские отношения.

Так вспоминает о своем лучшем друге директор департамента Электротехники (Dipartimento di Ingegneria Elettrica) профессор Lupi Sergio: «Впервые я встретил Валентина в Падуе в 1974 году, когда в качестве молодого ученого он прибыл на наш факультет в рамках совместной работы.

Преодолев недоверие некоторых из моих коллег к приехавшему из коммунистического Советского Союза незнакомцу, я приступил к плодотворному научному сотрудничеству с Валентином на протяжении девяти месяцев его пребывания в Падуе. Мы очень подружились, почти каждый вечер он был желанным гостем в нашем доме. После ужина мы оставались на кухне и много времени проводили за беседой.

Спустя два года, в 1976 году, я приехал на несколько месяцев в Ленинград в электротехнический институт «ЛЭТИ». Так как я приехал из капиталистической страны, Валентин нёс ответственность за моё пребывание и был единственным человеком, уполномоченным приглашать меня из университета к себе домой. Это позволило мне еще ближе узнать человеческие качества Валентина. Вместе мы посетили самые важные музеи Москвы и Ленинграда, и я оценил его глубокую культуру, любовь к искусству и прекрасному.

В 1989, 1993 годы мы возобновили наше сотрудничество, когда Валентин приезжал в Падуанский университет в качестве уже приглашённого профессора для проведения интенсивных курсов для студентов в рамках курса электротермии. Впоследствии мы стали легче и чаще устанавливать деловые и научные контакты, что привело к разработке нескольких совместных исследовательских программ, а также к презентации большого количества совместных докладов.

В те же годы началось также сотрудничество Валентина Немкова с Международным союзом по применению электричества (*UIE*) в рамках рабочей группы «Индукционный нагрев». Первой работой в *UIE* стала подготовка книги «Индукционный нагрев – промышленное применение», которая должна была привлечь внимание промышленных потребителей к новым достижениям этой технологии. Данная работа требовала множества встреч и частых деловых и научных контактов, что позволило членам комитета построить долгосрочную и крепнущую с годами дружбу с партнерами. Среди друзей Валентина Немкова директор института Электронагрева (Institut für Elektrowärme) профессор Mühlbauer Alfred, директор института Ганноверского университета профессор Bernard Nacke и позднее профессора Egbert Baake, дружба с которыми зародилась во время работы Международного союза по применению электричества (*UIE*).

Работа над книгой осветила не только интерес Валентина к детальному изучению любого научного аспекта применения индукционного нагрева, но также его увлечённость и талант распространения своих глубоких знаний.

Мне бы хотелось вспомнить ещё об одном: о вкладе Валентина в публикацию книги профессора А. Мюльбауэра «История индукционного нагрева и плавки». Для этого труда Валентин являлся не только источником всей информации об историческом развитии этой технологии в России, но также он, несомненно, внёс значительный вклад в подготовку окончательной версии текста. В частности, после смерти профессора А. Мюльбауэра, когда последние корректуры перед печатанием ещё не были готовы, Валентин благородно взял на себя эту непростую задачу по завершению этого важного научного труда в части корректировки и подготовки текста к печати.

Важной вехой нашей дружбы с Валентином была его тесная связь с Падуанским университетом и нашей лабораторией электротермии. Он всегда с интересом следил за деятельностью лаборатории, постоянно поддерживая нас советом, и щедро делился знаниями. В частности, он внес большой вклад в организацию международной конференции по электромагнитным источникам нагрева (HES) в качестве члена научного комитета. И, наконец, на каждой конференции он представлял несколько статей с результатами своих исследований.

Хотелось упомянуть о двух фундаментальных книгах по индукционному нагреву, в написание которых Валентин внёс значительный вклад. Одной из этих книг является книга «Установки индукционного нагрева» (1981), авторами которой являются А.Е. Слухоцкий, В.С. Немков, Н.А. Павлов и А.В. Бамунэр; второй – «Теория и расчет установок индукционного нагрева» (1988), написанная Валентином в соавторстве с Демидовичем В.Б. По моему мнению, каждый студент, исследователь или инженер, который планирует заниматься вопросом индукционного нагрева, должен изучать и знать эти две фундаментальные книги.

Среди множества выдающихся личностей, которых я встречал за всю свою преподавательскую и исследовательскую жизнь, я всегда считал Валентина самым лучшим экспертом в мире в области индукционного нагрева» [2].

Валентин Немков был достойным продолжателем знаменитой русской ленинградской школы индукционного нагрева, история которой берёт своё начало в первой половине двадцатого века и связана с именем его дедушки профессора Вологдина В.П. и продолжается после Второй Мировой войны до 70-х гг. профессором Слухоцким А.Е. и далее учениками Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) (СПбГЭТУ «ЛЭТИ»).

ЛИТЕРАТУРА

1. **Немков В.С.** К 70-летию ПОБЕДЫ. Воспоминания о жизни в деревне Плотники Ильинского района Молотовской области с осени 1941 по осень 1946 г. Знай и люби свой край! / В.С. Немков // Кузьминки: Издание Ильинской межпоселенческой библиотеки имени А.Е. Теплоухова. № 9, 15 августа 2015 г. С. 6-7.

2. **Lupi S.** In Memory of Valentin Nemkov / **S. Lupi** // Proceedings of the XVIII InternationalUIE-Congress «Electrotechnologies for Matrial Processing» (Hannover, June 6-9, 2017), Hannover, Germany, 2017. P. 1-2.

Заведующая кафедрой «Электроснабжение и электротехнология»
СГТУ имени Гагарина Ю.А. д.т.н. Калганова С.Г.

Не стало Валентина Сергеевича. Для родных, близких, друзей и знакомых Валентина Сергеевича это горе… Мы познакомились за год до защиты своих докторских диссертаций в одном и том же диссертационном совете ЛЭТИ. Когда приезжал в ЛЭТИ, мы всегда встречались, подолгу разговаривали, рассказывали о себе, делились новостями. С ним было интересно, он всегда был нацелен на работу, уверен в успехе… Я был на защите Валентином Сергеевичем его докторской диссертации, и это помогло мне в защите моей диссертации на следующем заседании диссертационного совета.

Потом жизнь развела нас по разным дорогам. Валентин Сергеевич уехал в США, а я остался в России, учу электриков и электротехнологов для отечественной промышленности. Больше мы не общались… Известие о кончине Валентина Сергеевича я воспринял с горечью. Перед моими глазами до сих пор все тот же Валентин Сергеевич, нацеленный на работу, верящий в успех… Вечная память Валентину Сергеевичу. Пусть земля ему будет пухом.

Профессор кафедры «Электроснабжение и электротехнология»
СГТУ имени Гагарина Ю.А. Архангельский Ю.С.

К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ

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

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

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

8 (927) 623-03-25 – Тригорлый Сергей Викторович (ответственный секретарь).

Просьба направлять публикации по адресу:

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

Требования к оформлению публикаций

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

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

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

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

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

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

Публикации принимаются в течение всего года.

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

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

За дополнительной информацией обращайтесь на сайт журнала «Вопросы электротехнологии» **www.sstu.ru/nauka/nauchnye-izdaniya/voprosy-elektrotekhnologii**

Редактор Л.А. Скворцова
Компьютерная верстка О.В. Пачина, Ю.Л. Жупилова
Перевод на английский язык А.Х. Аскарова

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

Подписано в печать 25.09.2017
Формат 60×84 1/8 Бум. офсет.
Усл. печ. л. 9,5 Уч. изд. л. 4,1
Тираж 500 экз. Заказ 64 Цена свободная
Отпечатано в Издательстве СГТУ, 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77.
E-mail: izdat@sstu.ru
Полная электронная версия журнала размещена в системе РИНЦ
в открытом доступе на платформе eLIBRARY.RU
Подписной индекс 70841 (каталог «Газеты. Журналы» на 1-е полугодие 2018 г.)
Свидетельство о регистрации СМИ *ПИ № ФС77-54621 от 01.07.2013*

Editor L.A. Skvortsova
Computer-assisted layout by O.V. Pachina, Yu.L. Zhupilova
Translation into English by A.H. Askarova

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

Print date: 25.09.2017
Paper size: 60×84 1/8 Offset-Print
Conventional printed sheet 9,5 Publication base sheet 4,1
Circulation: 500 printed copies Order 64 Subscription and individual copies: open rates
Published by SSTU Publishing, 410054 Saratov, 77 Politekhnicheskaya Str.
Online at www.eLIBRARY.RU
The certificate of media source registration: PI *No. FS77-54621 dated 1 July 2013*