

Издается с ноября 2013 года
Выходит один раз в квартал

№ 3 (4)

Сентябрь 2014

ВОПРОСЫ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

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

Главный редактор

д.т.н., профессор **Ю.С. АРХАНГЕЛЬСКИЙ**

Зам. главного редактора

д.т.н., профессор **В.А. ЦАРЕВ**

Ответственный секретарь

к.т.н. **В.С. АЛЕКСЕЕВ**

Редакционный совет

Ю.С. АРХАНГЕЛЬСКИЙ

д.т.н., профессор кафедры «Автоматизированные электротехнологические установки и системы» СГТУ имени Гагарина Ю.А.

Н.А. БУШУЕВ

д.э.н., генеральный директор ОАО НПП «Алмаз», г. Саратов

С.М. ЛИСОВСКИЙ

д.т.н., профессор, министр промышленности и энергетики правительства Саратовской области

А.А. СЫТНИК

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

В.А. ЦАРЕВ

д.т.н., профессор кафедры «Электронные приборы и устройства» СГТУ имени Гагарина Ю.А.

Редакционная коллегия

И.Н. АНТОНОВ

д.т.н., профессор кафедры «Автоматизированные электротехнологические установки и системы» СГТУ имени Гагарина Ю.А.

Н.В. БЕКРЕНЕВ

д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Техническая механика и детали машин» СГТУ имени Гагарина Ю.А.

В.Н. ЛЯСНИКОВ

д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Физическое материаловедение и технология новых материалов» СГТУ имени Гагарина Ю.А.

А.Н. ПЛОТНИКОВ

д.э.н., профессор, заведующий кафедрой «Прикладная экономика и управление инновациями» СГТУ имени Гагарина Ю.А.

Н.И. ЛОВЦОВА

д.с.н., профессор, заведующая кафедрой «Социология, социальная антропология и социальная работа» СГТУ имени Гагарина Ю.А.

Ю.Б. ТОМАШЕВСКИЙ

д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Системотехника» СГТУ имени Гагарина Ю.А.

Г.Г. УГАРОВ

д.т.н., профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» СГТУ имени Гагарина Ю.А.

В.А. ЦАРЕВ

д.т.н., профессор кафедры «Электронные приборы и устройства» СГТУ имени Гагарина Ю.А.

Б.К. СИВЯКОВ

д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Электротехника и электроника» СГТУ имени Гагарина Ю.А.

В.С. АЛЕКСЕЕВ

к.т.н., ассистент кафедры «Автоматизированные электротехнологические установки и системы» СГТУ имени Гагарина Ю.А.

Since November 2013
Published Quarterly

№ 3 (4)
September 2014

JOURNAL OF ELECTROTECHNICS

Scientific and Technical Publication

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

Chief Editor
Assistant to the Chief Editor
Chief Executive Officer

Dr.Sc., Professor **YU.S. ARKHANGELSKIY**
Dr.Sc., Professor **V.A. TSAREV**
PhD **V.S. ALEKSEEV**

Editorial Advisory Committee

YU.S. ARKHANGELSKIY	Dr. Sc., Professor at Department of Automated Installations and Systems in Electrotechnology, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov
N.A. BUSHUEV	Dr.Sc., Director General at JSC <i>Almaz</i>
S.M. LISOVSKIY	Dr.Sc., Professor at Department of Welding and Metallurgy, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Minister for Industry and Energy in Saratov oblast
A.A. SYTNIK	Dr.Sc., Professor, First Vice-Rector, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov
V.A. TSAREV	Dr.Sc., Professor at Department of Electronics, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Editorial Board Members

I.N. ANTONOV	Dr.Sc., Professor at Department of Automated Installations and Systems in Electrotechnology, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov
N.V. BEKRENEV	Dr. Sc., Professor, Head at Department of Engineering Mechanics and Machine Elements, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov
V.N. LYASNIKOV	Dr.Sc., Professor, Head at Department of Materials Science and Innovative Materials Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov
A.N. PLOTNIKOV	Dr. Sc., Professor, Head at Department of Applied Economics and Innovation Management, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov
N.I. LOVTSOVA	Dr. Sc., Professor, Head at Department of Sociology, Social Anthropology and Social Work, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov
YU.B. TOMASHEVSKY	Dr. Sc., Professor, Head at Department of System Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov
G.G. UGAROV	Dr. Sc., Professor at Department of Power Supply for Industrial Enterprises, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov
V.A. TSAREV	Dr.Sc., Professor at Department Electronics, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov
B.K. SIVYAKOV	Dr.Sc., Professor at Department of Electrical and Electronics Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov
V.S. ALEKSEEV	PhD, Assistant Lecturer at Department of Automated Installations and Systems in Electrotechnology, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

СОДЕРЖАНИЕ

ЭЛЕКТРОТЕРМИЯ

Веденькин Д.А., Морозов Г.А., Морозов О.Г., Насыбуллин А.Р., Самигуллин Р.Р., Самошин Р.Э. Лабораторный комплекс по переработке нефтесодержащих отходов с применением СВЧ технологий	5
Насыбуллин А.Р., Морозов О.Г., Морозов Г.А., Данилаев М.П., Самошин Р.Э. Термодеструкция полистирола в электромагнитном поле СВЧ диапазона	13
Злобина И.В., Коломейцев В.А., Бекренев Н.В. Обоснование рациональной удельной мощности СВЧ излучения для термической обработки многокомпонентных диэлектрических материалов типа мясного фарша с добавлением муки нута	19
Архангельский Ю.С., Гришина Е.М. Выравнивание нагрева диэлектрика в камере лучевого типа СВЧ электротермической установки	27
Колесников Е.В., Архангельский Ю.С. СВЧ электротехнологическая установка для обработки трансформаторного масла	30
Колесников Е.В., Архангельский Ю.С. Выбор типа рабочей камеры СВЧ электротехнологической установки для обработки трансформаторного масла	33
Коломейцев В.А., Дрогайцева О.В., Никуйко Д.Н., Тяжлов В.С. Аналитическое решение внутренней краевой задачи электродинамики для рабочей камеры бытовых СВЧ печей при многоцелевом способе возбуждения электромагнитного поля.	37

ЭЛЕКТРОФИЗИКА

Чеснокова Е.В., Калякин А.М. Применение метода анализа размерностей к изучению электрогидравлического эффекта	46
--	----

ИЗМЕРЕНИЯ

Самигуллин Р.Р., Морозов О.Г., Морозов Г.А., Веденькин Д.А., Насыбуллин А.Р., СВЧ анализаторы фракционного состава сырой нефти: анализ состояния, определение направлений, методов и средств совершенствования	49
---	----

СОЦИАЛЬНЫЙ АСПЕКТ

Гришина Е.М., Архангельский Ю.С. Интересуются ли студенты-электрики научной работой?	56
---	----

Международная научно-техническая конференция «Актуальные проблемы электронного приборостроения» АПЭП-2014	58
Сивяков Б.К. Фазостабильная ЛБВ	59
Гришина Е.М., Архангельский Ю.С. Гибридные камеры лучевого типа СВЧ электротехнологических установок	62
Артюхов И.И., Бочкарева И.И., Молот С.В. Обеспечение электромагнитной совместимости группы частотно-регулируемых электроприводов с источниками питания	64
Фёдоров А.В., Архангельский Ю.С. Применение полупроводниковых генераторов в СВЧ электротехнологических установках	70
Гришина Е.М., Архангельский Ю.С. Применение широкополосных генераторов в СВЧ электротермических установках	74
Злобина И.В., Коломейцев В.А. Применение СВЧ излучения для термической обработки диэлектрических органических материалов с неоднородными структурой и составом	77
Бржозовский Б.М., Зинина Е.П., Мартынов В.В. Воздействие низкотемпературной плазмы на поверхности сложного профиля (физические и математические аспекты)	82
Яфаров Р.К., Шаныгин В.Я. Поверхностное структурирование кристаллов кремния (100) после СВЧ плазмохимического травления в хладоне-14	87
Мошкин В.И., Угаров Г.Г., Шестаков Д.Н., Помялов С.Ю. Математическое моделирование импульсных линейных электромагнитных двигателей	91

ЛЕТОПИСЬ

Ильин Г.И. Геннадий Александрович Морозов	96
100 лет со дня рождения А.И. Андрущенко	98
Архангельский Ю.С. История СВЧ электротехнологии	100
Дмитриева О.Н., Архангельский Ю.С. Николай Алексеевич Троицкий	111
К сведению авторов	115

CONTENTS

ELECTROTHERMY

Vedenkin D.A., Morozov G.A., Morozov O.G., Nasibullin A.R., Samigullin R.R., Samoshin R.E. Laboratory Complex For Processing Oily Waste Using Microwave Technology	5
Nasybullin A.R., Morozov O.G., Morozov G.A., Danilaev M.P., Samoshin R.E. Thermal Degradation Of Polystyrene In The Microwaverange Electromagnetic Field.....	13
Zlobina I.V., Kolomeytsev V.A., Bekrenev N.V. On Rational Specific Capacity Of Microwave Radiation For Thermal Treatment Of Minced Meat Type Multicomponent Dielectric Materials With Added Chickpea Flour.	19
Arkhangelskiy Yu. S., Grishina E.M. Leveling The Dielectric Heating In A Beam Type Microwave Of Electrothermal Unit.....	27
Kolesnikov E.V., Arkhangelskiy Yu. S. Microwave Electrotechnological Unit For Transformer Oil Treatment.....	30
Kolesnikov E.V., Arkhangelskiy Yu. S. Selecting A Working Chamber For A Microwave Electrotechnological Plant To Treat Transformer Oil.....	33
Kolomeytsev V.A., Drogaytseva O.V., Nikuyko D.N., Tyazhlov V.S. An Analytical Solution To The Inner Boundary Electrodynamics Problem With Working Chambers Of Consumer Microwave Ovens Under Multipassage Electromagnetic Field Excitation.....	37

ELECTROPHYSICS

Chesnokova E.V., Kalyakin A.M. A Method To Study Dimensional Analysis Of Electro-Hydraulic Effect	46
--	----

MEASUREMENTS

Samigullin R.R., Morozov O.G., Morozov G.A., Vedenkin D.A., Nasybullin A.R. Microwave Analysers Into Fractional Composition Of Crude Oil: Analysis Of Oils, Orientation, Methods And Techniques For Improvement.....	49
---	----

SOCIAL ASPECT

Grishina E.M., Arkhangelskiy Yu. S. Do Electrical Engineering Students Take An Interest In Research Work?.....	56
---	----

International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering APEDE-2014

Sivakov B.K., Kudryashov A.G. Phase-stable TWT	59
Grishina E.M., Arkhangelskiy Yu.S. Hybrid Cameras For Beam-Type Microwaves In Electrotechnological Units.....	62
Artyukhov I.I., Bochkareva I.I., Molot S.V. Assuring Electromagnetic Compatibility In Frequency-Regulated Electric Drives With Power Supply Sources	64
Fedorov A.V., Arkhangelskiy Yu.S. Using Semiconductor Generators In Microwave Electrotechnological Plants.....	70
Grishina E.M., Arkhangelskiy Yu.S. Using Broadband Generators In Microwave Electrothermal Installations	74
Zlobina I.V., Kolomeytsev V.A. Using Microwave Radiation For Thermal Treatment Of Dielectric Organic Materials With Heterogeneous Composition And Structure	77
Brzhozovskiy B.M., Zinina E.P., Martynov V.V. Impact Of Low Temperature Plasma On Complex Profile Surfaces (Physical And Mathematical Aspects).....	82
Yafarov R.K., Shanygin V.Ya. Surface Structuring Of Silicon Crystals (100) After Microwave Plasma-Chemical Etching In Freon-14.....	87
Moshkin V.I., Ugarov G.G., Shestakov D.N., Pomyalov S.Y. Mathematical Simulation Of Electromagnetic Pulse Linear Motors.....	91

CHRONICLE

Ilyin G.I. Gennadiy Aleksandrovich Morozov	95
A.I. Andryushchenko: 100 th Anniversary Of The Birth	98
Arkhangelskiy Yu.S. History of Microwave Electrotechnology	100
Dmitrieva O.N., Arkhangelskiy Yu.S. Nikolai Alekseevich Troitskiy	111
Information for Authors.....	115

ЭЛЕКТРОТЕРМИЯ

УДК 621.365.55

ЛАБОРАТОРНЫЙ КОМПЛЕКС ПО ПЕРЕРАБОТКЕ НЕФТЕСОДЕРЖАЩИХ ОТХОДОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ СВЧ ТЕХНОЛОГИЙ

Д.А. Веденькин, Г.А. Морозов, О.Г. Морозов, А.Р. Насыбуллин,
Р.Р. Самигуллин, Р.Э. Самошин

LABORATORY COMPLEX FOR PROCESSING OILY WASTE USING MICROWAVE TECHNOLOGY

D.A. Vedenkin, G.A. Morozov, O.G. Morozov, A.R. Nasibullin,
R.R. Samigullin, R.E. Samoshin

Рассматриваются методы переработки нефтесодержащих отходов, в том числе с помощью СВЧ излучения. Приводятся характеристики лабораторного комплекса, его структурная схема и особенности работы. Рассмотрены результаты экспериментов по СВЧ переработке нефтесодержащих отходов при облучении их с различными уровнями мощности, приведены методы по улучшению распределения электромагнитного поля в объеме рабочей камеры на основе сфокусированного излучения.

Ключевые слова: СВЧ-технологии, переработка, нефтешламы, нефтесодержащие отходы, фокусирующие антенны, лабораторный комплекс

Актуальность проблемы переработки нефтяных шламов обуславливается двумя основными задачами: во-первых, обеспечение промышленной и экологической безопасности, во-вторых, использование содержащегося в их составе сырья (углеводородов, редких металлов и других полезных ископаемых). По составу нефтешламы представляют собой устойчивые много-

The paper discusses the methods for oily waste processing using the microwave radiation, and gives the characteristics for the laboratory complex, its block diagram and working features. We consider the results of experiments referring microwave processing of oily waste when exposed to various irradiation rates. The provided graphs illustrate the methods used to improve electromagnetic field distribution within a working chamber on the basis of focused radiation.

Keywords: Microwave technologies, processing, oil sludge, oily waste, focused antennas, laboratory complex

компонентные образования, состоящие из различных нефтепродуктов, воды и минеральных включений в виде песка, ила, окислов металлов и пр. Технология их переработки состоит из двух отдельных процессов: переработки жидких нефтешламов в товарную нефть и деструкции нефтешламов, представленных донными осадками и загрязненными грунтами. Такая схема по-

звolyет собрать и концентрировать нефтешламы непосредственно на месте их утилизации и хранить с минимальным ущербом для окружающей среды. В настоящее время активно разрабатываются методы переработки нефтешламов с использованием СВЧ энергии. Исследование воздействия СВЧ электромагнитных полей на нефтяные шламы и водонефтяные эмульсии, направленное на повышение эффективности переработки нефтяных шламов, является сутью предлагаемой работы.

Переработка нефтесодержащих отходов представляет собой сложную техническую и технологическую задачу, обусловленную прежде всего устойчивостью нефтяной эмульсии, значительным содержанием механических примесей, неоднородностью перерабатываемого сырья.

В целом все методы переработки нефтешламов можно классифицировать по принципу, на котором основано их разделение на составляющие компоненты:

- механические (отстаивание, гидрообработка при нагревании, центробежное разделение, очистка нефтешламов в декантере и т.п.);
- физико-химические (метод экстракции, применение скиммеров и пр.);
- термические (сжигание, пиролиз);
- биохимические (активизация метаболической активности почвенных микроорганизмов, внедрение специально подобранных штаммов микроорганизмов);
- комбинированные методы.

Естественно, каждый из приведенных методов переработки нефтешламов обладает своими достоинствами и недостатками, рассмотрение которых выходит за рамки данной статьи.

Применение СВЧ электромагнитных волн в качестве теплоносителя для нагрева тел различной природы является одним из способов повышения эффективности нефтехимических процессов. Снижение энер-

гозатрат и времени, увеличение экологической безопасности стимулируют проведение исследований по применению СВЧ электромагнитных волн в химической технологии как на стадии реакционных превращений, так и в процессах разделения. Электромагнитное поле, проникая в объект, взаимодействует с заряженными частицами и вызывает их колебания. В физических средах с потерями возникают токи смещения и токи проводимости, что, в свою очередь, обуславливает нагрев материала изнутри.

СВЧ нагрев является чистым методом нагрева, поскольку при его использовании отсутствуют какие-либо продукты сгорания и не применяется конвективный нагрев. Кроме того, легкость, с которой СВЧ энергия преобразуется в теплоту, позволяет получить очень высокие скорости нагрева. При этом в материале не возникает разрушающих нагрузок. Способность СВЧ энергии преобразовываться в теплоту в одних материалах лучше, чем в других, позволяет конструировать рабочие камеры, которые не загрязняют обрабатываемое изделие и не вступают с ним в реакцию. Генераторное оборудование является полностью электронным и работает практически безынерционно. Благодаря этому количество СВЧ энергии и момент ее приложения можно мгновенно изменять.

Рассмотрим возможности использования СВЧ излучения как фактора, влияющего на химические превращения в обрабатываемой технологической среде. Известно, что твердые вещества поглощают СВЧ излучение в количестве достаточном для проведения химического синтеза в твердом состоянии, при этом наблюдается значительная интенсификация данного процесса. В табл. 1 показан ряд синтезов, осуществляемых с помощью СВЧ излучения.

Синтез в твердом состоянии под воздействием СВЧ излучения

Продукт	Исходные материалы	СВЧ синтез, мин	Обычный синтез, ч
KVO_3	K_2CO_3, V_2O_5	7	12
$CuFe_2O_4$	CuO, Fe_2O_3	30	23
$BaWO_4$	BaO, WO_3	30	2
$YBa_2Cu_3O_7$	$Y_2O_3, Ba(NO_3)_2, CuO$	70	24

Энергия для проведения синтеза в твердом состоянии появляется в результате трансформации электромагнитной энергии в теплоту. Выбор частоты излучения, обеспечивающей минимальные изменения значений диэлектрических постоянных, способствует созданию условий для стабильного протекания процесса. Сведения по химическим превращениям в СВЧ поле более ограничены. Исследования показывают, что продукты, получаемые посредством СВЧ нагрева веществ, сходны с продуктами, полученными обычным нагреванием, а время достижения температуры реакции и длительность реакции значительно меньше [1].

В качестве объекта проводимых экспериментальных исследований выступают углеводородсодержащие отходы, представляющие собой смесь земли, воды и нефти. Перерабатываемые отходы содержат в своем составе практически весь типичный спектр химических соединений, характерный для шламов нефтехимических производств, представляющих реальную экологическую проблему.

Исследование сосредоточено на единственно приемлемом способе воздействия на сложную органо-неорганическую смесь – тепловом воздействии, поскольку извлечь органическую составляющую другими способами (экстракция, отстой и т.д.) в короткий промежуток времени практически невозможно. Стратегия проводимых экспериментов такова, что сначала необходимо воспользоваться летучестью органической фазы, нагревая нефтешлам. При этом вместе с легколетучей частью будет испаряться и влага. Далее, ориентируясь на структуру испаренных

фракций, их следует отделять друг от друга в зависимости от возможности использования в виде сырья.

Остаток, который после испарения углеводородсодержащей составляющей становится ещё более вязким и содержащим большее, чем в исходном отходе, количество неорганических включений, требует для своей переработки новых подходов. Также становится возможным его применение в качестве компаунда, например, при производстве асфальтобетона.

Процесс перегонки, применяемый в лабораторной установке, требует плавного разогрева с минимумом разницы температуры колбы и отхода. На лабораторной установке скорость нагрева лежит в пределах 7-10°C/мин, что позволяет избежать неприемлемого температурного градиента на границе колба/отход.

Принципиальная схема лабораторной установки представлена на рис. 1.

Температура колбы определяется датчиком на основе волоконно-оптической решетки Брэгга (рис. 1, поз. 7).

В рабочей камере (резонаторе) СВЧ установки располагался реактор с сырьем, представляющий собой круглодонную колбу, изготовленную из кварцевого стекла, прозрачного для СВЧ излучения. В реактор предварительно загружался углеводородсодержащий отход. В силу токсичности летучих фракций эксперименты проводились в вытяжном шкафу.

Лабораторная установка позволяет осуществлять визуальный контроль за процессами, происходящими в кварцевой колбе. На рис. 2 представлена колба с осажденными на ее поверхности твердыми составляющими нефтешлама.

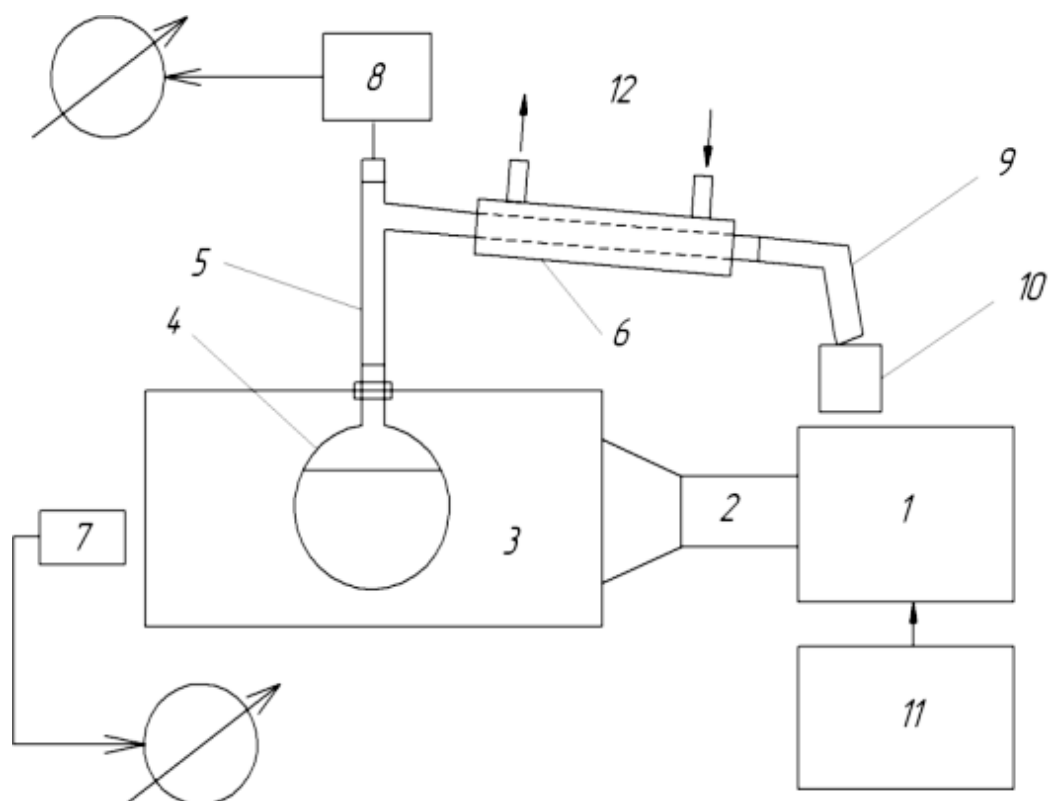


Рис. 1. Принципиальная схема лабораторной установки: 1 – СВЧ генератор; 2 – соединительный волновод; 3 – СВЧ резонаторная камера; 4 – круглодонная колба; 5 – насадка Вюрца; 6 – обратный холодильник; 7 – датчик температуры на решетке Брэгга; 8 – контактный датчик температуры на решетке Брэгга; 9 – алонж; 10 – приемник; 11 – компьютер; 12 – охлаждающий поток воды

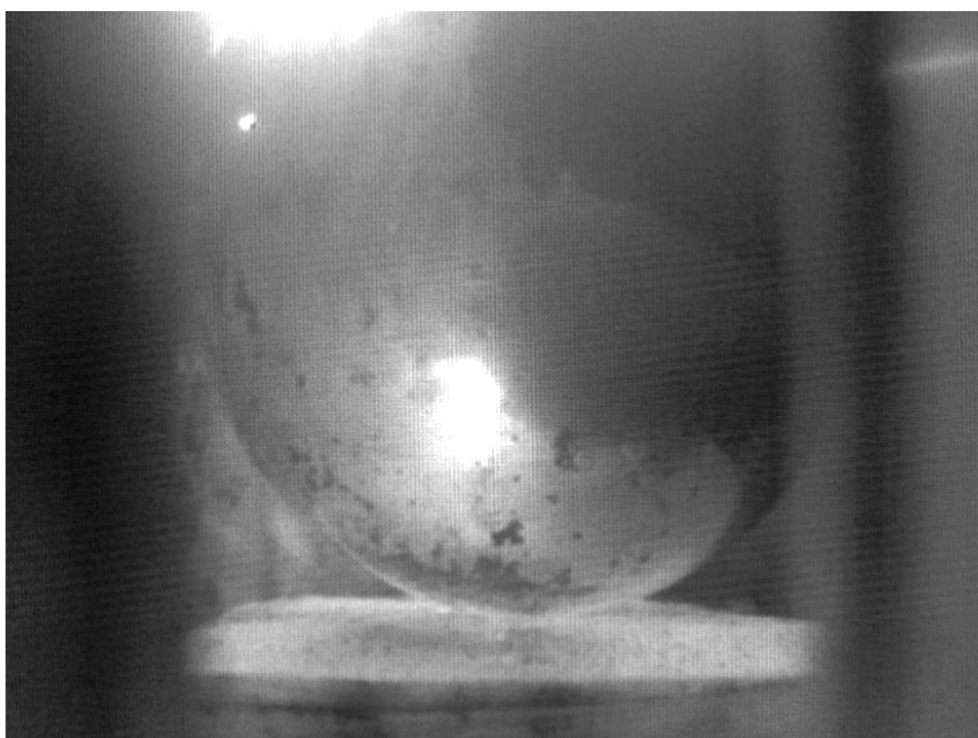


Рис. 2. Колба, размещенная в камере обработки

Таблица 2

Соотношения массы конденсата и максимальной мощности обработки

№	Масса отхода, г	Доля входной СВЧ мощности, %	Время нагрева, м	Масса конденсата, г	Масса остатка, г	Масса испарившегося вещества, г
1	150	80	60	54,6	95,3	0,1
2	150	70	60	58,2	82,8	9
3	150	75	60	41,3	107,4	1,3
4	150	60	60	37,6	112,4	0
5	150	90	60	50,3	98,7	1
6	150	45	60	51,5	97,4	1,1

Результаты проведенных экспериментов представлены в табл. 2.

Из табл. 2 видно, что при проведении второго эксперимента получено максимальное количество конденсата и минимальное количество остатка. Результаты

обработки по второму эксперименту представлены на рис. 3. Обратим внимание на тот факт, что в пробирке на рис. 3 а представлена примерно одна четвертая часть от общей массы полученного конденсата.



а



б

Рис. 3. Результаты обработки нефтешлама с помощью СВЧ энергии: а – полученный конденсат; б – замазученный остаток

В процессе проведения экспериментов обработка проводилась с пятиминутными интервалами, в пределах каждого интервала подаваемая мощность была постоянной. Распределение мощности нагрева по пятиминутным интервалам для каждого из экспериментов приведено в табл. 3. На рис. 4 приведены графики распределения мощности обработки.

Обращая внимание на график 2, представленный на рис. 4, и учитывая, что во втором эксперименте произошло выделение максимального количества конденсата, заметим, что в процессе СВЧ обработки нефтешламов важным является осуществление так называемого сту-

пенчатого нагрева, при котором на некоторых соседних интервалах времени значение мощности обработки остается постоянным. Объяснить это можно тем, что в этом случае происходит интенсивное выпаривание определенной нефтяной фракции без ее разложения. Таким образом, при проектировании реакторов по переработке большого количества нефтесодержащих отходов становится важным обеспечить комплексный контроль за распределением температурного поля внутри обрабатываемого сырья и обеспечивать локальный нагрев некоторой области или областей в объеме нефтешлама.

Распределение мощности облучения по пятиминутным интервалам

t, мин	Доля P, %					
	1	2	3	4	5	6
5	25	10	25	30	30	5
10	30	20	30	50	50	10
15	35	30	40	50	70	10
20	40	45	50	50	75	15
25	45	55	60	50	80	20
30	50	55	65	50	85	25
35	55	60	70	60	90	30
40	60	60	75	60	90	35
45	65	60	75	60	90	40
50	70	60	65	60	90	45
55	75	65	55	60	90	45
60	80	70	50	60	90	45

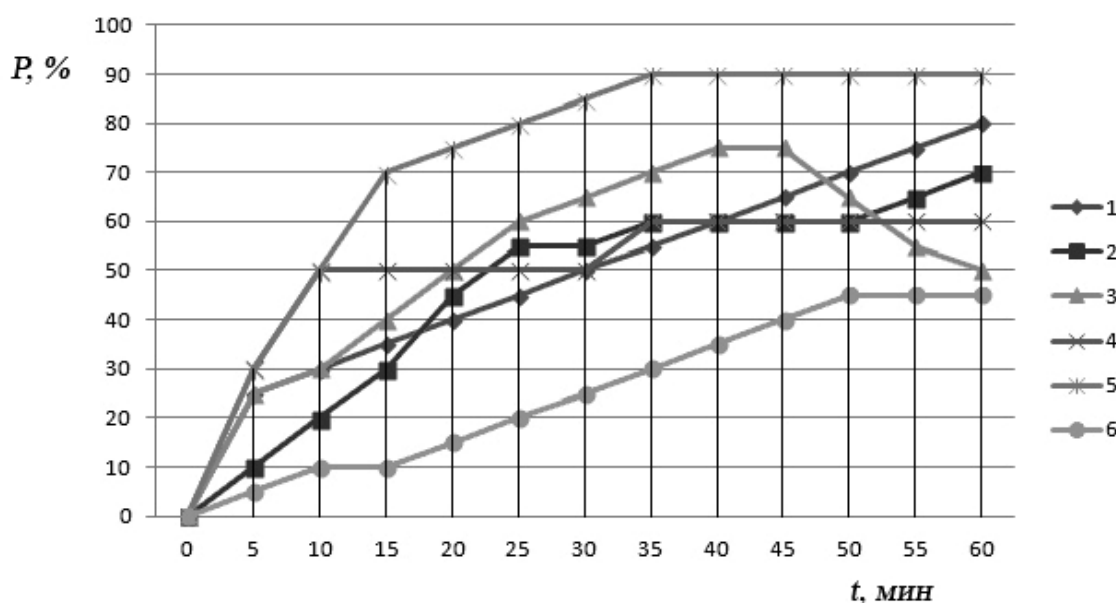


Рис. 4. Распределение мощности обработки по пятиминутным интервалам

Одним из вариантов решения подобной задачи является использование группы излучателей, представляющих собой антенную решетку, сфокусированную в зоне ближнего излученного поля. Существует ряд работ [2, 3], в которых описываются свойства подобных сфокусированных антенных систем, рассматриваются зависимости размеров области фокусировки от размеров антенной решетки, влияния погрешностей фазы на размеры области фокусировки излучения и эффективность работы сфокусированной апертуры. Контроль за распределением

температур в обрабатываемом объеме может быть организован на базе волоконно-оптических датчиков реализованных на волоконных решетках Брэгга. Существуют работы, например [4], в которых показана возможность относительно простой реализации подобного датчика. Также имеются работы, например [5], в которых показана возможность реализации подобного датчика в диапазоне СВЧ. С помощью подобного датчика становится возможным отслеживать уровень жидкого нефтешлама в камере обработки.

Следует отметить, что применение СВЧ технологий не ограничивается исключительно обработкой жидких веществ. СВЧ обработка также применяется для переработки термопластичных и термореактивных полимерных материалов, процессов формования и обработки различных полимеров [6-8].

В результате работы был предложен вариант построения лабораторного комплекса

по переработке нефтесодержащих отходов с помощью СВЧ технологий. Предлагаемый комплекс позволяет в автоматизированном режиме проводить обработку нефтешламов, регулировать продолжительность обработки, интервалы времени и скорость нарастания температуры в колбе. Представлены результаты проведенных экспериментов и рассмотрены пути модернизации лабораторного комплекса.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Бахонина Е.И.** Подготовка в СВЧ поле катализаторного шлама, содержащего углеводороды, для дальнейшей утилизации / Е.И. Бахонина, И.Х. Бикбулатов, Р.Р. Даминев и др. // Окружающая среда для нас и будущих поколений: тез. докл. IX Междунар. конф. Самара: Изд-во СамГТУ, 2004. С. 37-38.

2. **Веденькин Д.А.** Сфокусированные антенные решетки в составе радиоэлектронных средств группы малоразмерных беспилотных летательных аппаратов: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Д.А. Веденькин. Казань: Казан. гос. техн. ун-т им. А.Н. Туполева, 2012.

3. **Веденькин Д.А.** Активные сфокусированные антенные решетки для радиотехнических средств малоразмерных летательных аппаратов / Д.А. Веденькин, Ю.Е. Седельников // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2008. Т. 11. № 4. С. 40-46.

4. **Куприянов В.Г.** Маломодовое зондирование датчиков на основе волоконных решеток Брэгга / В.Г. Куприянов и др. //

Научно-технический вестник Поволжья. 2013. №4. С. 200-204.

5. **Морозов О.Г.** Двухчастотный метод определения параметров резонансных датчиков СВЧ-диапазона / О.Г. Морозов и др. // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. 2014. № 1 (20). С. 76-86.

6. **Морозов Г.А.** Функционально адаптивные СВЧ-технологии в задачах переработки термопластичных полимерных материалов / Г.А. Морозов и др. // Вестник МарГТУ. 2011. № 3 (13). С.13-25.

7. **Морозов Г.А.** Микроволновая обработка термореактивных и термопластичных полимеров / Г.А. Морозов и др. // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2011. Т. 14. № 3. С. 114-121.

8. **Морозов Г.А.** Формование изделий из радиопрозрачных материалов с использованием СВЧ-излучения / Г.А. Морозов и др. // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2012. Т. 14. № 1-2. С. 573-576.

Веденькин Денис Андреевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Радиофотоника и микроволновые технологии» Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева (КАИ)

Морозов Геннадий Александрович – доктор технических наук, профессор кафедры «Радиоэлектронные и телекоммуникационные системы» Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева (КАИ)

Denis A. Vedenkin – Ph.D., Associate Professor, Department of Radiophotonics and Microwave Technologies, A.N. Tupolev National Research Technical University of Kazan

Gennadiy A. Morozov – Dr.Sc., Professor, Department of Electronic and Telecommunication Systems, A.N. Tupolev National Research Technical University of Kazan

Морозов Олег Геннадьевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Радиофотоника и микроволновые технологии» Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева (КАИ), директор НИИ Прикладной электродинамики, фотоники и живых систем

Насыбуллин Айдар Ревкатович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Радиофотоника и микроволновые технологии» Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева (КАИ)

Самигуллин Рустем Разяпович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Радиофотоника и микроволновые технологии» Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева (КАИ)

Самошин Руслан Эдуардович – студент Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева (КАИ)

Oleg G. Morozov – Dr.Sc., Professor, Head: Department of Radiophotonics and Microwave Technologies, A.N. Tupolev National Research Technical University of Kazan, Director: Scientific Research Institute for Applied Electrodynamics, Photonics and Living Systems

Aidar R. Nasybullin – Ph.D., Associate Professor, Department of Radiophotonics and Microwave Technologies, A.N. Tupolev National Research Technical University of Kazan

Rustem R. Samigullin – Ph.D., Associate Professor, Department of Radiophotonics and Microwave Technologies, A.N. Tupolev National Research Technical University of Kazan

Ruslan E. Samoshin – Master's Degree Student, A.N. Tupolev National Research Technical University of Kazan

Статья поступила в редакцию 06.09.14, принята к опубликованию 18.09.14

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.

ТЕРМОДЕСТРУКЦИЯ ПОЛИСТИРОЛА В ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ПОЛЕ СВЧ ДИАПАЗОНА

А.Р. Насыбуллин, О.Г. Морозов, Г.А. Морозов,
М.П. Данилаев, Р.Э. Самошин

THERMAL DEGRADATION OF POLYSTYRENE IN THE MICROWAVE RANGE ELECTROMAGNETIC FIELD

A.R. Nasybullin, O.G. Morozov, G.A. Morozov,
M.P. Danilaev, R.E. Samoshin

Обсуждаются вопросы реализации термодеструкции материалов из полистирола, инициируемой косвенным нагревом в интенсивном электромагнитном поле СВЧ диапазона с применением углеродных термопреобразующих элементов. Приводятся результаты теоретического анализа с привлечением аппарата математического моделирования и экспериментального исследования деполимеризации полистирола.

Ключевые слова: полистирол, стирол, деполимеризация, СВЧ нагрев, математическое моделирование

Полистирол является термопластичным полимерным материалом, нашедшим широкое применение во многих отраслях промышленности, начиная от производства бытовых товаров и заканчивая строительными материалами. В связи с этим остро стоит вопрос об утилизации и переработке бывших в употреблении материалов из полистирола. Перспективной технологией переработки полистирола, позволяющей получить исходный мономер – стирол, является химическая переработка (деполимеризация или термодеструкция), инициируемая нагревом полимера до высоких температур. Конечный продукт реакции может быть применен при повторном получении полистирола или в производстве других материалов. В [1] предло-

The article discusses thermal degradation of polystyrene materials initiated indirectly by heating in an intense electromagnetic field of a microwave using carbon thermal converting elements. We provide the results of theoretical analysis based on mathematical modeling and experimental study of polystyrene depolymerization.

Keywords: polystyrene, styrene, depolymerization, microwave heating, mathematical modeling

жен метод получения углеродных субмикронных частиц в плазме газового давления атмосферного давления с использованием продуктов деполимеризации полистирола. В качестве источника тепловой энергии в реакции термодеструкции полистирола возможно применение электромагнитного поля СВЧ диапазона высокой интенсивности.

СВЧ химия в последние два десятилетия активно развивается как зарубежными, так и российскими исследователями [2, 3]. В основе этого направления лежит интенсификация химических реакций энергией электромагнитных колебаний СВЧ диапазона. В качестве преимуществ использования СВЧ поля по сравнению с традиционными методами передачи теплоты в хими-

ческих реакциях можно указать объемность нагрева и его селективность. Результат воздействия энергии СВЧ проявляется в ускорении протекания реакции и увеличении количества выходного продукта. Показателем эффективности преобразования энергии СВЧ поля является высокое значение фактора потерь у применяемого реагента, определяемого как мнимая часть комплексной диэлектрической проницаемости:

$$\dot{\epsilon} = \epsilon' + j\epsilon'' = \epsilon' + j\left(\epsilon_p'' + \frac{\sigma}{\omega}\right), \quad (1)$$

где σ – удельная проводимость, ω – круговая частота. Потери в веществе могут быть обусловлены как инерционностью поляризации (зависит от ϵ_p''), так и наличием свободных зарядов (зависит от σ). Большинство реакционных агентов, нашедших применение в СВЧ химии, относятся к полярным диэлектрикам, то есть обладающим большим ϵ_p'' .

Деполимеризация полимера в СВЧ поле с использованием полярного диэлектрика показана в [4, 5] на примере реакции гликолиза полиэтилентерефталата. Полистирол деполимеризуется при нагреве до температуры выше 200°C, приводящем примерно к 50-60% выходу мономера и ряду низкомолекулярных продуктов. Полистирол обладает низкими потерями в СВЧ диапазоне. По этой причине непосредственный нагрев полимера в электромагнитном поле невыполним. Нагреть полистирол можно с помощью термотрансформаторов, то есть веществ с высокими потерями в СВЧ диапазоне, способных передавать преобразованную теплоту нагреваемому продукту [6]. В работе предлагается в качестве подобного вещества использовать активный уголь (АУ), характеризующийся высокой удельной проводимостью на СВЧ.

Теоретическую оценку характеристик и свойств процесса нагрева полистирола и термотрансформатора в СВЧ поле предложено провести на основе математического моделирования нагрева диэлектрической среды с помощью энергии электромагнит-

ного поля, сводящегося к совместному решению уравнений Максвелла и нестационарной теплопроводности. Речь идет о плоскостойком диэлектрике, на который по нормали падает плоская электромагнитная волна. Количество слоев определяется конкретной исследуемой структурой, а именно относительным расположением частиц полимера и термотрансформатора.

После завершения переходных процессов в каждом слое имеются две плоские волны – падающая E_n и отраженная E_o , распространяющиеся вдоль оси z в положительном и отрицательном направлениях соответственно. Обозначим через E_n^0 комплексную амплитуду напряженности электрического поля, падающего на плоскостойкую структуру из воздуха. Тогда комплексная амплитуда напряженности магнитного поля будет определяться волновым сопротивлением воздуха w_0 :

$$H_n^0 = E_n^0 / w_0, \quad (2)$$

где $w_0 = \sqrt{\mu_0 / \epsilon_0}$.

Комплексные амплитуды полей в i -м слое представим в виде

$$\begin{aligned} E_i(z) &= t_i \exp(-ik_i z) + r_i \exp(ik_i z), \\ H_i(z) &= t_i \exp(-ik_i z) - r_i \exp(ik_i z) w_i, \end{aligned} \quad (3)$$

где $t_0 = 1$; $r_n = 0$; $i = 0, 1, \dots, n$; n – количество слоев.

При единичной амплитуде падающей из воздуха волны на плоскостойкую структуру коэффициенты t_i и r_i являются соответственно коэффициентами прохождения и отражения, w_i – волновое сопротивление i -го слоя, k_i – коэффициент распространения в i -м слое.

Используя граничные условия на границе раздела сред, получим систему уравнений для определения коэффициентов прохождения и отражения. Тепловые источники в диэлектрике распределены в соответствии с функцией тепловых потерь

$$q(z) = \frac{1}{2} \omega \epsilon'' \epsilon_0 |E|^2, \quad (4)$$

где ω – круговая частота (рад/с), ϵ'' – мнимая часть комплексной диэлектрической проницаемости, ϵ_0 – диэлектрическая постоянная.

Температурное поле в плоскостойкой структуре, состоящей из 2 слоев, описыва-

ется системой дифференциальных уравнений теплопроводности:

$$\begin{cases} c_1 \rho_1 \frac{\partial T_1}{\partial t} = \lambda_1 \frac{\partial^2 T_1}{\partial z^2} + q_1(z, t), t > 0, 0 < z < h_1, \\ c_1 \rho_1 \frac{\partial T_1}{\partial t} = \lambda_1 \frac{\partial^2 T_2}{\partial z^2} + q_2(z, t), t > 0, h_1 < z < h'_2. \end{cases} \quad (5)$$

где c_1, c_2 – теплоемкости первой и второй среды (Дж/кг·К); ρ_1, ρ_2 – плотности первой и второй среды (кг/м³); λ_1, λ_2 – коэффициенты теплопроводности первой и второй среды (Вт/м·К); T_1, T_2 – функции температурного поля в первом и втором слое; $h'_2 = h_1 + h_2$; h_1, h_2 – толщина первого и второго слоя (м), t – время (с).

В работе исследованы две модели нагрева полистирола: первая – слой частиц полистирола находится над слоем АУ, оба слоя толщиной 100 мм; вторая – один слой толщиной 100 мм, состоящий из смеси

частиц полистирола и АУ. Наличие в математической модели слоя гетерогенной смеси двух компонент приводит к необходимости расчета эффективного значения комплексной диэлектрической проницаемости смеси, определенного по формуле Лихтенеккера. На рис. 1 а показано распределение температуры в двухслойной структуре первой модели, на рис. 1 б – в однослойной структуре второй модели при времени нагреве 120 с и напряженности падающей волны 5000 В/м.

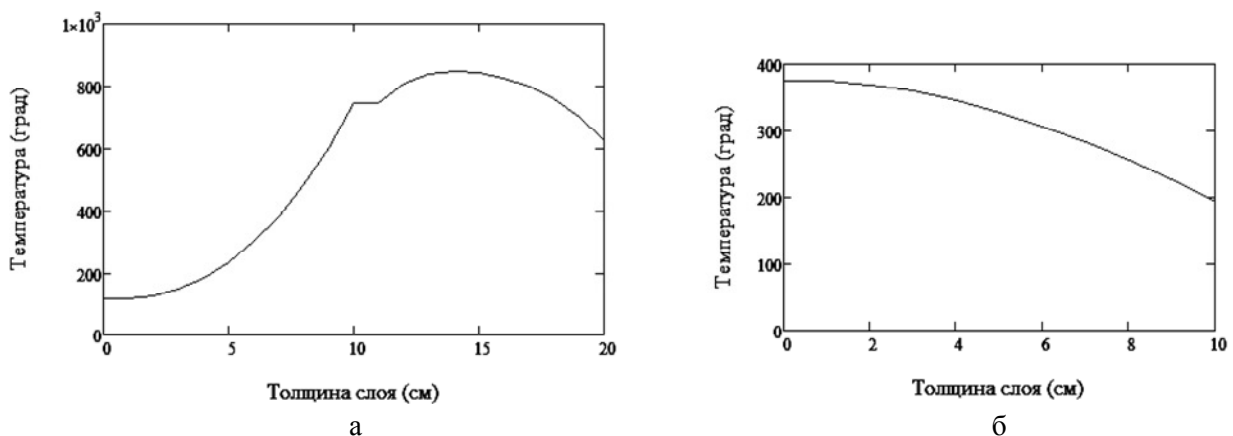


Рис. 1. Распределение температурного поля при нагреве полистирола и АУ в СВЧ поле

Моделирование показывает, что большая равномерность температурного поля достигается при перемешивании частиц полистирола и АУ. Дальнейшее увеличение равномерности нагрева возможно при существовании подстилающего слоя из АУ, позволяющего увеличить температуру полистирола в нижней части слоя.

Для исследования процесса деполимеризации полистирола в СВЧ поле в присутствии АУ проведен эксперимент по получению мономера – стирола и других низкомолекулярных продуктов из отходов полистирольных материалов. Цель экспе-

римента заключалась в оценке состава конечного продукта и определении его процентного выхода. Суть эксперимента состояла в выделении летучих фракций при нагреве смеси полимера и АУ в СВЧ поле с последующим конденсированием при атмосферном давлении. Разработана лабораторная установка СВЧ возгонки, структурная схема которой показана на рис. 2. Частота электромагнитных колебаний СВЧ генератора 1 составляла 2,45 ГГц. В установке предусмотрена возможность изменения выходной мощности СВЧ генератора с шагом ~ 7 Вт при мак-

симальной выходной мощности 700 Вт. Генератор соединен с рабочей камерой) с помощью прямоугольного волновода 2 с рупорным переходом для обеспечения согласования с нагрузкой. Рабочая камера 3 представляет собой двухмодовый резонатор, в котором расположен реакционный сосуд 4 из термостойкого стекла. При нагреве полимера в реакционном сосуде летучие фракции попадают в холодильник 6

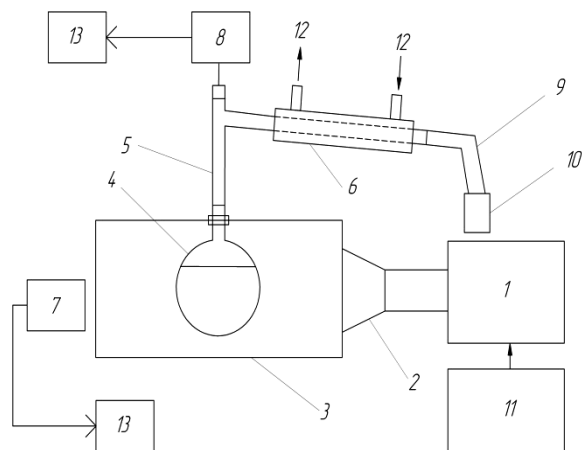


Рис. 2. Структурная схема и внешний вид установки для деполимеризации полистирола: 1 – СВЧ генератор; 2 – соединительный волновод; 3 – СВЧ резонаторная камера; 4 – круглодонная колба; 5 – насадка Вюрца; 6 – холодильник; 7 – ИК датчик температуры; 8 – контактный датчик температуры; 9 – алонж; 10 – приемник; 11 – компьютер; 12 – охлаждающий поток воды; 13 – индикатор измеряемого параметра

Деполимеризация полистирола происходила при температуре $\sim 260^{\circ}\text{C}$. Температура контролировалась контактным методом с помощью термометра с ценой деления 2°C а также бесконтактным методом с помощью пирометра с точностью измерения $0,1^{\circ}\text{C}$. Массовый выход конечного продукта, содержащего мономер стирола и ряд низкомолекулярных фракций из отходов полистирола, составил $\sim 60\%$. При соотношении полистирола и АУ 3:1 и массе полистирола 30 г через 4-6 секунд после начала нагрева формировалась газообразная фаза, которая далее конденсировалась в виде желтоватой жидкости. Общее время деполимеризации составляло 7 мин.

Идентификация конечного продукта деполимеризации полистирола проводилась с применением Фурье-инфракрасной спектроскопии на приборе TENSOR 27

и, охлаждаясь, конденсируются в сосуда-приемнике 10. Реакционный сосуд соединен с холодильником через насадку Вюрца 5 с установленным в ней контактным датчиком температуры 8. Управление работой генератора производится с персонального компьютера 11 через интерфейс RS-485 с возможностью задания выходной мощности магнетрона с отклонением не менее 1%.

(Bruker, Германия) в диапазоне волновых чисел $7500\text{--}370\text{ см}^{-1}$. Анализировались ИК-Фурье спектры одного образца конечного продукта для трех случаев:

- непосредственно после деполимеризации (рис. 3);
- после испарения летучих компонентов с поверхности вещества, находящегося в вытяжном шкафу, за промежуток времени 2 часа (рис. 4);
- после испарения летучих компонентов с поверхности вещества, находящегося в вытяжном шкафу, за промежуток времени 19 часов.

ИК-Фурье спектр образца после испарения летучих фракций за промежуток времени 19 часов практически не отличается от аналогичного за промежуток времени 2 часа. Изображенный на рис. 4 спектр соответствует смеси низкомолекулярных продуктов: димера, тримера и оли-

гомеров стирола. Отличие указанного спектра от представленного на рис. 3 объ-

ясняется наличием в нем элементов летучей фракции – мономера стирола.

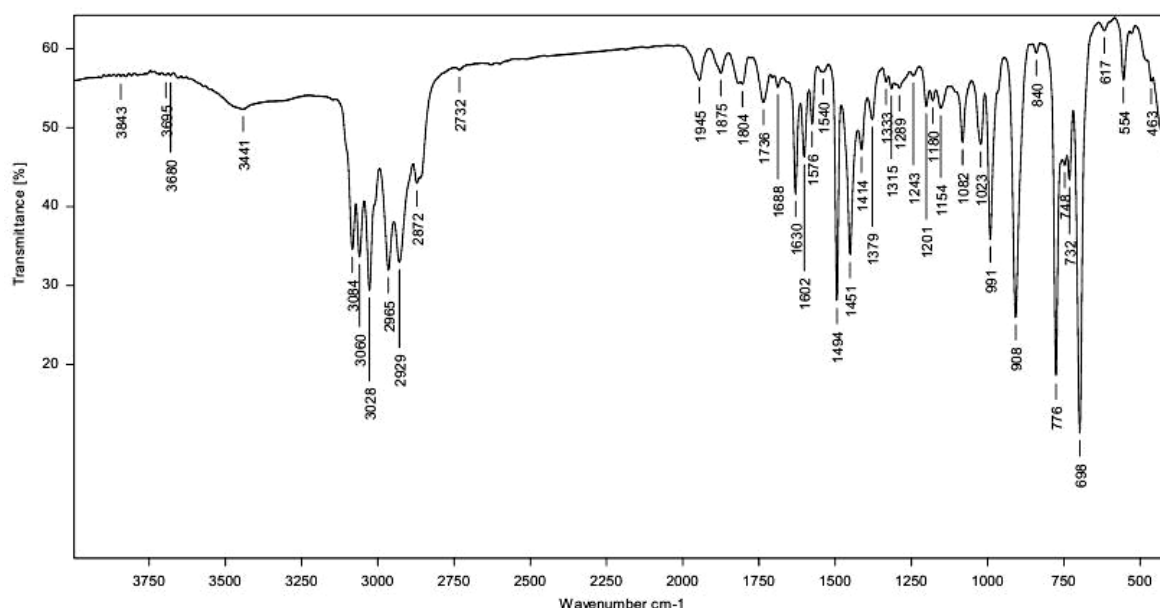


Рис. 3. ИК-Фурье спектр конечного продукта деполимеризации

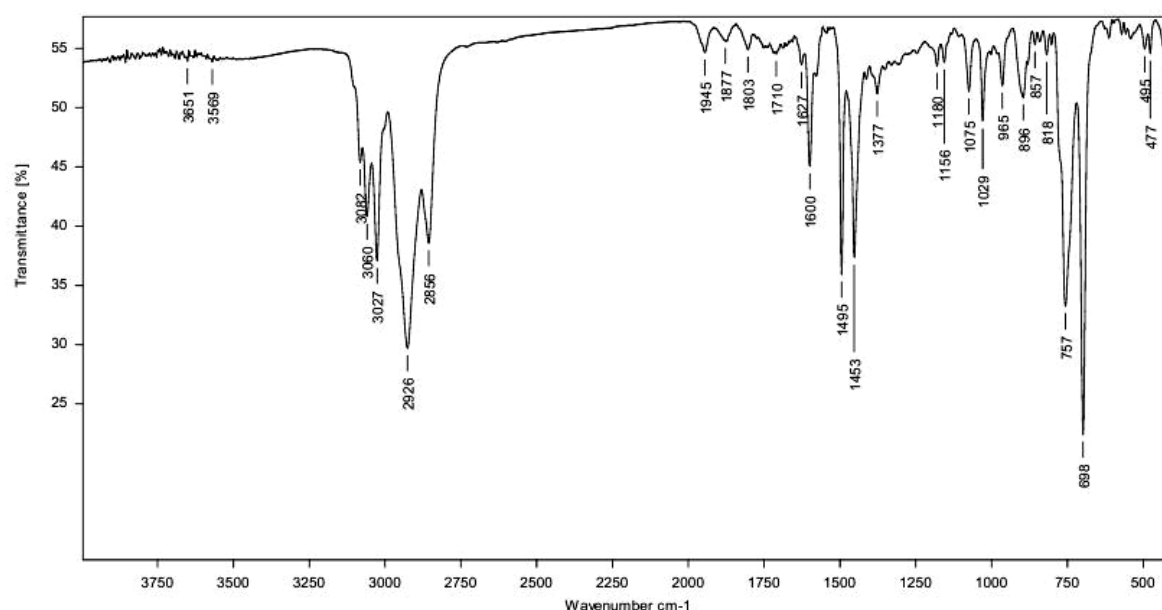


Рис. 4. ИК-Фурье спектр конечного продукта деполимеризации после испарения летучих компонентов

Анализ полученных ИК-спектров показал наличие в образце мономера стирола (~15%), олигомеров стирола (~60%), а также иных продуктов деполимеризации (~25%).

Таким образом, проведенные теоретические и экспериментальные исследования

показывают возможность применения электромагнитного поля СВЧ диапазона высокой интенсивности при косвенном СВЧ нагреве полистирола в присутствии термотрансформирующих элементов, позволяющем получить 60% выход конечного продукта.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект РФФИ № 12-08-97035-р_поволжье_а), заданий № 11.34.2014/К и № 3.1962.2014/К на выполнение государ-

ственных работ в сфере научной деятельности в рамках проектной части государственного задания Министерства образования и науки РФ.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Богослов Е.А.** Формирование углеродных дендритов в барьерном газовом разряде атмосферного давления / Е.А. Богослов и др. // Технические науки – от теории к практике. 2014. № 32. С. 140-147.

2. **Brittany L. Hayes** – Microwave Synthesis: Chemistry at the Speed of Light. CEM Publishing, 2002.

3. **Насыбуллин А.Р.** Разработка и исследование СВЧ-устройств для технологий переработки полиэтилентерефталата: автореф. дис. канд. техн. наук / А.Р. Насыбуллин. Казань: Казан. гос. техн. ун-т им. А.Н. Туполева, 2012.

4. **Морозов Г.А.** Функционально адаптивные СВЧ-технологии в задачах перера-

ботки термопластичных полимерных материалов / Г.А. Морозов и др. // Вестник МарГТУ. 2011. № 3 (13). С. 13-25.

5. **Морозов Г.А.** Микроволновая обработка термореактивных и термопластичных полимеров / Г.А. Морозов и др. // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2011. Т. 14. № 3. С. 114-121.

6. **Морозов Г.А.** Формование изделий из радиопрозрачных материалов с использованием СВЧ-излучения / Г.А. Морозов и др. // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2012. Т. 14. № 1-2. С.573-576.

Насыбуллин Айдар Ревкатович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Радиофотоника и микроволновые технологии» Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева (КАИ)

Морозов Олег Геннадьевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Радиофотоника и микроволновые технологии» Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева (КАИ), директор НИИ Прикладной электродинамики, фотоники и живых систем

Морозов Геннадий Александрович – доктор технических наук, профессор кафедры «Радиоэлектронные и телекоммуникационные системы» Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева (КАИ)

Данилаев Максим Петрович – доктор технических наук, профессор кафедры «Радиоэлектронные и квантовые устройства» Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева (КАИ)

Aidar R. Nasybullin – Ph.D., Associate Professor, Department of Radiophotonics and Microwave Technologies, A.N. Tupolev National Research Technical University of Kazan

Oleg G. Morozov – Dr.Sc., Professor, Head: Department of Radiophotonics and Microwave Technologies, A.N. Tupolev National Research Technical University of Kazan, Director: Scientific Research Institute for Applied Electrodynamics, Photonics and Living Systems

Gennadiy A. Morozov – Dr.Sc., Professor, Department of Electronic and Telecommunication Systems, A.N. Tupolev National Research Technical University of Kazan

Maxim P. Danilaev – Dr.Sc., Professor, Department of Electronic and Quantum Devices, A.N. Tupolev National Research Technical University of Kazan

Самошин Руслан Эдуардович – студент Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева (КАИ)

Ruslan E. Samoshin – Master's Degree Student, A.N. Tupolev National Research Technical University of Kazan

Статья поступила в редакцию 06.09.14, принята к опубликованию 18.09.14

УДК 621.9.047/048

ОБОСНОВАНИЕ РАЦИОНАЛЬНОЙ УДЕЛЬНОЙ МОЩНОСТИ СВЧ ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ ТИПА МЯСНОГО ФАРША С ДОБАВЛЕНИЕМ МУКИ НУТА

И.В. Злобина, В.А. Коломейцев, Н.В. Бекренев

ON RATIONAL SPECIFIC CAPACITY OF MICROWAVE RADIATION FOR THERMAL TREATMENT OF MINCED MEAT TYPE MULTICOMPONENT DIELECTRIC MATERIALS WITH ADDED CHICKPEA FLOUR

I.V. Zlobina, V.A. Kolomeytsev, N.V. Bekrenev

На основе критериального уравнения, связывающего мощность подводимой энергии со свойствами мясного изделия с добавлением муки нута и временем достижения кулинарной готовности, получена зависимость, позволяющая теоретически определить величину удельной мощности СВЧ излучения, достаточную для окончательной обработки изделий с минимальными энергетическими затратами. Экспериментально определены условия СВЧ термической обработки изделий требуемого качества, показавшие незначительное (не более 14%) расхождение с теоретическими.

Ключевые слова: мясные кулинарные изделия, мука нута, термический процесс, критериальное уравнение, СВЧ нагрев, мощность

Based on the criterion equation combining the input energy capacity, properties of meat products with added chickpea flour and production time, the authors found the dependence allowing to theoretically estimate the rate of specific capacity for microwave radiation sufficient to finish the products at minimum energy consumption rate. Experiments helped determine conditions for microwave thermal treatment of products possessing the required quality, which differ insignificantly (about 14%) compared to theoretically achieved data.

Keywords: meat culinary products, chick-pea flour, thermal process, criteria equation, microwave heating, power

СВЧ технологии широко применяются в различных областях техники, в том числе для термической обработки диэлектриче-

ских материалов, в частности для окончательной обработки продуктов питания [1-3]. Однако технологические возможно-

сти СВЧ нагрева для окончательной обработки неоднородных по составу и структуре изделий, содержащих компоненты, отличающиеся по своим теплофизическим и электрофизическим свойствам типа фаршевых систем с растительными добавками на основе бобовых культур, в частности нута, еще мало изучены. В то же время применение таких изделий является весьма перспективным вследствие высокого содержания белка, пищевых волокон, β -каротина, макроэлементов (калия, магния, кальция, железа) и селена [4].

Целью наших исследований явилось определение рациональной удельной мощности СВЧ излучения для термической обработки неоднородных по структуре и составу изделий, обеспечивающей требуемые качественные характеристики при высокой эффективности процесса.

Полученное нами ранее [5] критериальное уравнение процесса термической обработки мясных рубленых кулинарных изделий было преобразовано с учетом того, что в СВЧ электротермии основным режимным параметром является удельная поглощенная мощность. Экспериментально были установлены для процесса СВЧ термической обработки указанных изделий следующие диапазоны характеристических коэффициентов критериального уравнения: $A = 0,22-0,63$; $\alpha = 0,64-0,67$; $\beta = 0,23-0,36$. В результате получили выражение для определения требуемой удельной мощности промышленной СВЧ установки для термической обработки:

$$P_{уд} = \frac{0,22 \cdot 10^{-7} t^{10,12} c^{7,4} \lambda^{2,67}}{\mathcal{E}^{11,63} \tau^{1,74} \rho^{1,21} m}, \quad (1)$$

где $\mathcal{E}$ – удельные затраты энергии на процесс приготовления исследуемого объекта; c – удельная теплоемкость; λ – коэффициент теплопроводности; ρ – плотность изделия; t – температура; τ – время кулинарной готовности изделия; m – масса изделий в рабочей камере установки.

Расчетом по (1) с учетом экспериментально определенных значений c , λ и ρ нами определена в зависимости от температуры и времени кулинарной готов-

ности изделий при обеспечении минимальных энергетических затрат, которые предварительно были определены для исследуемых изделий на уровне 3150 Дж/кг·К для различных рецептур фаршевых систем удельная мощность СВЧ термической обработки, равная 14,1-14,9 Вт/см³.

Экспериментально исследовали кинетику температуры образцов и изменение их структуры в зависимости от удельной мощности и времени обработки.

В экспериментах использовали СВЧ печь Samsung MW71ER-1 с потребляемой мощностью 1150 Вт с магнетроном OM75S(31) с частотой излучения 2450 МГц. Обработку осуществляли при следующих установленных мощностях: 100, 300, 450 и 600 Вт. Образцы представляли собой фаршевые системы формой, близкой к цилиндру, длиной 3 см и диаметром 2 см. С учетом объема обрабатываемых образцов и используемых уровней мощности удельная мощность СВЧ излучения составляла соответственно 10,6; 31,9; 47,8 и 63,8 Вт/см³. Использовали образцы трех составов: контрольный, с заменой 5% мяса мукой нута и с заменой 20% хлеба мукой нута. Методика эксперимента была принята следующей. Образцы в камеру СВЧ печи помещали охлажденными до температуры 5°C. Образец помещали в середину стеклянной тарелки и измеряли температуру электронным лабораторным термометром ЛТ-300 с пределом измерений от –50°C до +300°C на глубине 8-10 мм от поверхности путем погружения шупа термометра в фарш. Тарелку с образцом помещали в рабочую камеру СВЧ печи и устанавливали время обработки 1 мин. Затем по истечении 1 минуты тарелку с образцом вынимали из рабочей камеры и измеряли температуру в сохранившейся лунке. Далее образец вновь помещали в камеру на 1 минуту. Эксперимент повторяли до суммарного времени СВЧ воздействия, равного 4 минутам. Таким образом, получены значения прироста температуры за каждую минуту обработки, позволяющие оценить ее ки-

нетику при различной удельной мощности. Обработывали по три образца одинакового состава. После обработки образцы разрезали вдоль и изучали пористо-агломерированную структуру и состояние материала при помощи компьютерного анализатора изображений микроструктур АГПМ-6М с программным обеспечением Metallograph.

Обработкой результатов экспериментов получены следующие эмпирические зависимости температуры от времени и удельной мощности при обработке контрольных образцов:

$$\text{при } P_{y\partial} = 10,6 \text{ Вт/см}^3 \quad t = 26\tau^{0,52},$$

$$\text{при } P_{y\partial} = 31,9 \text{ Вт/см}^3 \quad t = 45\tau^{0,809},$$

$$\text{при } P_{y\partial} = 47,8 \text{ Вт/см}^3 \quad t = 55\tau^{0,896},$$

$$\text{при } P_{y\partial} = 63,8 \text{ Вт/см}^3 \quad t = 63,4\tau^{0,958}.$$

Итак, с увеличением удельной мощности температура образца нарастает более интенсивно, ее зависимость от времени становится практически линейной и более резко поднимается уже на первой минуте нагрева. Графическое отображение полученных зависимостей представлено на рис. 1.

Можно сделать вывод, что даже при значительных временах обработки интенсивность в $10,6 \text{ Вт/см}^3$ является недостаточной для достижения приемлемой температуры кулинарной готовности в

(343-353)К или (70-80)°С, которая определяется из критериального уравнения [5]. С другой стороны, более значительные удельные мощности из исследуемого диапазона вызывают такие высокие температуры, которые при средних и больших временах обработки приводят к необратимым изменениям структуры и свойств фаршевой системы, фактически приводя к браку. При малых временах хотя и обеспечивается приемлемая температура (78,8°С при $P_{y\partial} = 31,9 \text{ Вт/см}^3$), равномерность обработки оказывается невысокой, структура – неоднородная, что связано с затуханием волны излучения частотой 2450 МГц. Изложенное не позволяет рекомендовать данные технологические режимы для практического использования.

Получены эмпирические зависимости температуры от удельной мощности при времени обработки 60 и 360 секунд (рис. 2, 3):

$$t = 8,04 P_{y\partial}^{0,497}, \quad (2)$$

$$t = 6,73 P_{y\partial}^{0,967}. \quad (3)$$

Видно, что тенденция увеличения степени влияния удельной мощности при росте времени обработки, отмеченная ранее, сохраняется.

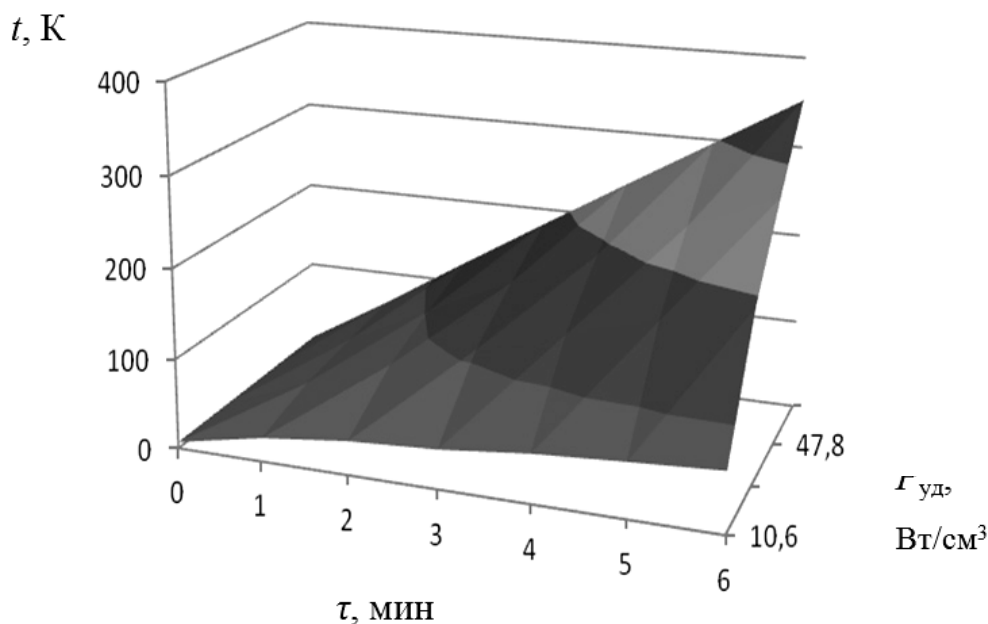


Рис. 1. Зависимость температуры образца от времени обработки и удельной мощности

Удельная мощность, необходимая для доведения образца до готовности за время 1 и 6 минут с поддержанием температуры 80°C, определяется из выражений, полученных путем решения выражений (2) и (3) относительно $P_{y\partial}$:

$$P_{y\partial} = \frac{t^{2,012}}{66,27}; \quad (4)$$

$$P_{y\partial} = \frac{t^{1,033}}{7,167}. \quad (5)$$

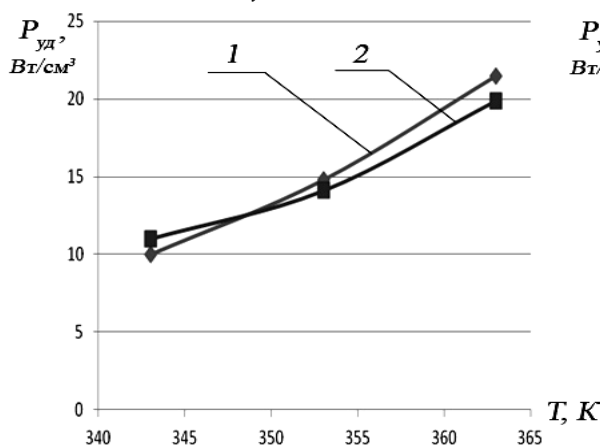


Рис. 2. Зависимость удельной мощности от температуры при времени воздействия СВЧ излучения 360 мин: 1 – образец с заменой 5% мяса мукой нута, 2 – образец с заменой 20% хлеба мукой нута

При подстановке соответствующих значений получим: $P_{y\partial 1} = 101,8$ Вт/см³ и $P_{y\partial 6} = 12,9$ Вт/см³.

С учетом значений удельной мощности при времени обработки 1 и 6 минут получим выражение для эмпирической зависимости $P_{y\partial}$ от времени:

$$P_{y\partial} = 101,8 \tau^{-1,153}. \quad (6)$$

Определим расхождение с теоретическим значением, указанным ранее:

$$\Delta = \frac{P_{y\partial}^m - P_{y\partial}^p}{P_{y\partial}^m} 100\% = \frac{14,89 - 12,9}{14,89} = 13,4\%$$

Полученное расхождение можно считать приемлемым для сложного многофакторного процесса СВЧ термической обработки материалов с неоднородной структурой и составом, что позволяет использовать зависимость (1) для предварительного определения удельной мощности СВЧ излучения для обработки различных пищевых систем в зависимости от требований к эффективности процесса, свойств материала и требуемой температуры.

Были обработаны образцы (контрольный, с заменой 5% мяса и с заменой 20% хлеба) при удельной мощности 14 Вт/см³

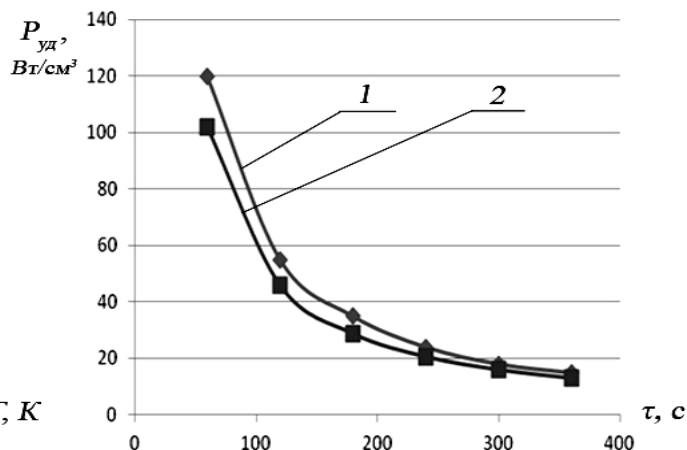


Рис. 3. Влияние заданного времени СВЧ обработки на удельную мощность при температуре нагрева 348-350 К: 1 – теоретическая зависимость, 2 – экспериментальная зависимость

(среднее значение между определенными теоретически и экспериментально) и изучены при различном увеличении в сравнении с образцами, обработанными СВЧ с меньшей и большей удельной мощностью. Образцы, полученные при $P_{y\partial} = 47,8$ Вт/см³ и $P_{y\partial} = 63,8$ Вт/см³, не рассматривались в виду явной потери ими потребительских свойств.

Внешний вид структуры образцов и отдельных агломератов представлен на рис. 4-5.

Поверхность образцов, обработанных при $P_{y\partial} = 10,6$ Вт/см³, имеет следующие особенности: в основном светлая поверхность, рыхлая; пустоты слабо просматриваются (заполнены деформировавшимися агломератами); встречаются отдельные сильнее прогретые участки (стрелка на рисунках), отличающиеся темным цветом и твердостью; структура производит впечатление влажной; при большом увеличении поверхность отдельного агломерата крупнорельефная; на ней заметны отдельные небольшие поры или трещины (отмечены стрелкой); видны сохранившиеся части жира или соединительной ткани (отмечены окружностью); определяется сильная остаточная влажность.

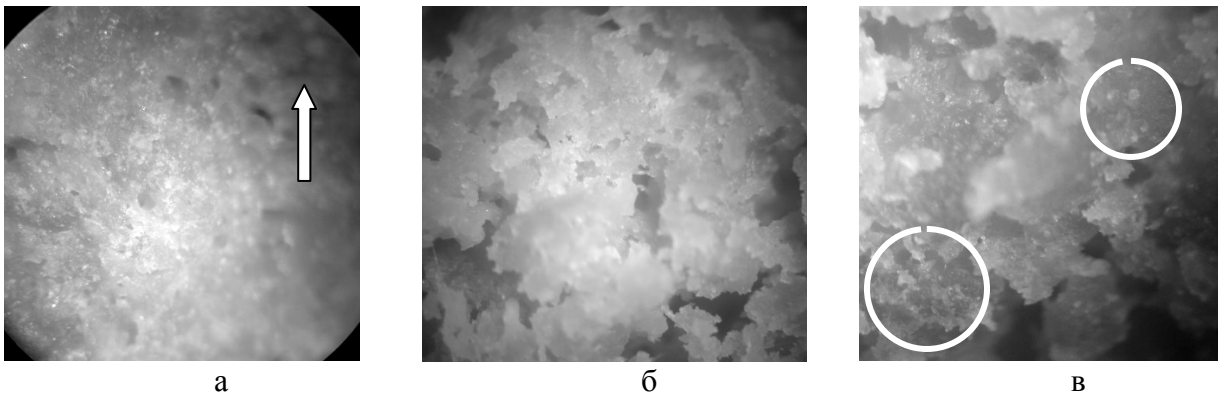


Рис. 4. Влияние удельной мощности СВЧ излучения на структуру контрольного образца при времени обработки 4 мин. Увеличение $\times 12$. $P_{уд} = 10,6 \text{ Вт/см}^3$ (а), $P_{уд} = 14 \text{ Вт/см}^3$ (б), $P_{уд} = 31,9 \text{ Вт/см}^3$ (в)

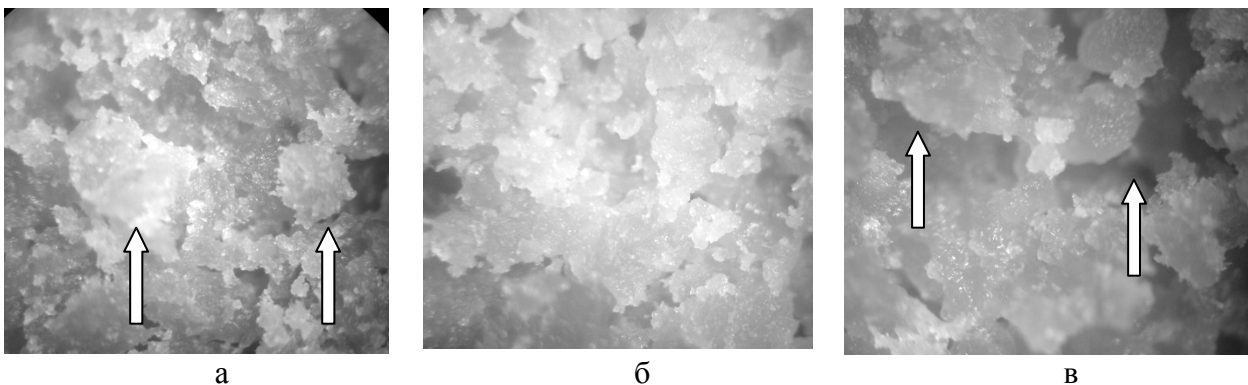


Рис. 5. Влияние удельной мощности СВЧ излучения на структуру образца с заменой 5% мяса мукой нута при времени обработки 4 мин. Увеличение $\times 12$. $P_{уд} = 10,6 \text{ Вт/см}^3$ (а), $P_{уд} = 14 \text{ Вт/см}^3$ (б), $P_{уд} = 31,9 \text{ Вт/см}^3$ (в)

Поверхность образцов, обработанных при $P_{уд} = 14 \text{ Вт/см}^3$, сильно структурирована (агломераты и поры, однопорядковые по размерам, но размеры пор в 1,5-2 раза меньше агломератов); поры глубокие, размеры относительно небольшие; агломераты однотонно темные по всему сечению образца, имеют сходную твердость; при рассмотрении определяется сохранение влажности (сока). Поверхность агломерата относительно однородного темного цвета; рельеф микрозернистый; жировые компоненты практически растопились и создали среднюю влажность; подобными характеристиками обладают до 80-90% агломератов. Поверхность образцов, обработанных при $P_{уд} = 31,9 \text{ Вт/см}^3$, образована системой небольших по размерам агломератов и пор (по-видимому, проявлялись кавитационные процессы и взрывное испарение жидкости); при этом небольшие агломераты связаны в конкреции; цвет агломератов темный, коричнево-красный, по мере удаления от поверхности цвет светлеет; структура сухая, особенно в приповерхностных

слоях; твердость агломератов снижается от поверхности к средним слоям. Поверхность агломерата интенсивно темная с развитым микрорельефом, включающим зерна и лунки, по-видимому, образовавшиеся в результате кавитационных процессов при взаимодействии с излучением и при взрывном испарении жидкости; в целом поверхность сухая; отмечаются сильно прожаренные и изменившие цвет жировые фрагменты, не растопившиеся вследствие скоротечности процесса.

Структура образца, обработанного при $P_{уд} = 10,6 \text{ Вт/см}^3$, достаточно рыхлая, образована агломератами и порами; размеры пор в среднем превышают размеры агломератов, мелкие поры не наблюдаются; в структуре наблюдаются частицы нута; цвет образца светлый; влажность повышенная; в окрестностях частиц нута наблюдается местное затемнение цвета и некоторое увеличение твердости агломератов. Поверхность агломерата при большом увеличении относительно ровная, гранулированная, светло-розового цвета; заметна

выступающая влага. Цвет поверхности образца, обработанного при $P_{y0} = 14 \text{ Вт/см}^3$, относительно однородно темный; твердость агломератов повышенная; размеры пор в среднем соответствуют размерам агломератов: количество пор увеличенное по сравнению с обработкой на минимальных режимах. Поверхность агломерата при большом увеличении имеет коричневатую более темную окраску; в ней заметны микропоры и отдельные крупные гранулы. Цвет поверхности образца, обработанного при $P_{y0} = 31,9 \text{ Вт/см}^3$, интенсивно темный, коричневый; в окрестности частиц нута характер структуры имеет вид прижогов и повышенную твердость; наряду с мелкими порами присутствуют и крупные, причем, как правило, вблизи частиц нута; в глубинных зонах образца цвет постепенно становится сходным с цветом материала при обработке СВЧ средней удельной мощности. Поверхность агломерата при большом увеличении темно-коричневая; отмечаются многочисленные микроразры-

вы и микропоры; производит впечатление сухой.

Образцы с заменой 20% хлеба мукой нута имеют в целом аналогичные особенности. Отличие заключается в мелкогранулированной поверхности агломератов и более мелкопористой структуре.

В целом полученные результаты свидетельствуют о том, что при использовании рациональной для данного материала удельной мощности СВЧ излучения введение в состав фаршевой системы муки нута способствует выравниванию температуры по объему образца и формированию более однородной пористо-агломерированной структуры. При высоких значениях удельной мощности введение нута, напротив, вызывает фрагментарное повышение температуры в окрестностях частиц нута.

Для объяснения описанных результатов может быть предложена следующая физическая модель нагрева образцов с содержанием муки нута при различных удельных мощностях (рис. 6).

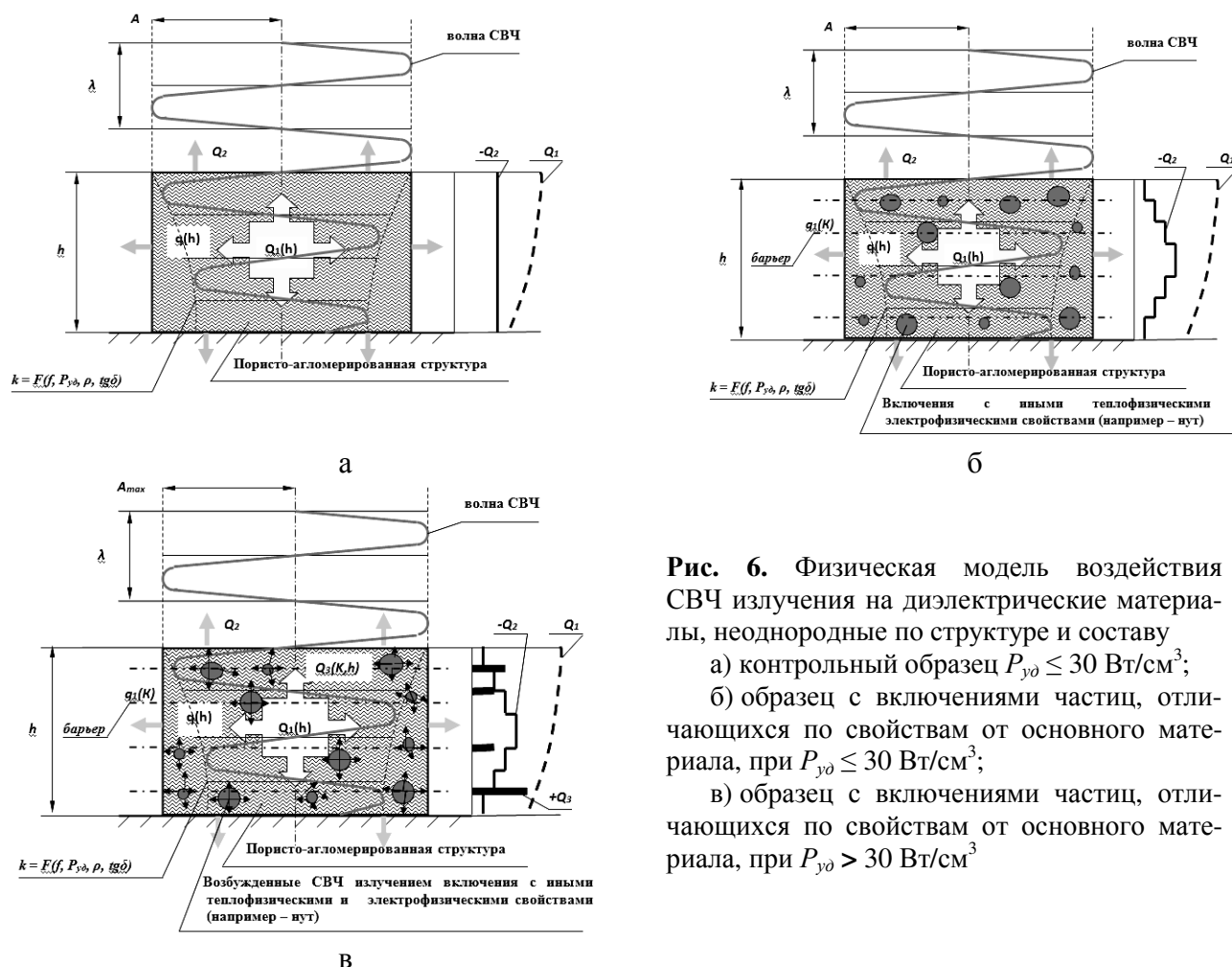


Рис. 6. Физическая модель воздействия СВЧ излучения на диэлектрические материалы, неоднородные по структуре и составу

а) контрольный образец $P_{y0} \leq 30 \text{ Вт/см}^3$;

б) образец с включениями частиц, отличающихся по свойствам от основного материала, при $P_{y0} \leq 30 \text{ Вт/см}^3$;

в) образец с включениями частиц, отличающихся по свойствам от основного материала, при $P_{y0} > 30 \text{ Вт/см}^3$

Физический механизм нагрева продуктов питания, представляющих собой диэлектрики, содержащие в более или менее достаточном количестве воду, упрощенно состоит в поглощении энергии СВЧ волн обрабатываемым веществом за счет сил трения, возникающих в электромагнитном поле, между молекулами воды при их поляризации [2]. Процесс поляризации понимается как вынужденный, происходящий за счет падающего СВЧ излучения. Энергия электромагнитной волны затрачивается на выполнение работы сил трения между молекулами в процессе их поляризации и колебаний. Данная энергия, как любая, затрачиваемая на преодоление сил трения, переходит во внутреннюю потенциальную энергию в виде теплоты. Нарастание этой энергии в отличие от процессов обычной термической обработки происходит не за счет теплового потока от внешнего источника, то есть с поверхности, а практически одновременно во всем объеме тела. Тело, подвергнутое СВЧ воздействию, само становится источником теплового излучения во внешнюю среду.

За счет эффекта затухания электромагнитной волны, как и любого другого волнового процесса, по мере удаления от поверхности образца происходит снижение поглощенной мощности и, соответственно, снижение уровня разогрева. В соответствии с изложенным для процесса нагрева контрольного образца можно предположить наличие следующего теплового баланса:

$$Q_1(h) - [Q_2 - q_2(I)] = q(h), \quad (7)$$

где $Q_1(h)$ – количество теплоты, выделившееся в объеме образца в результате поглощения СВЧ энергии; Q_2 – количество теплоты, перешедшее из внутренних областей образца к поверхности в результате теплопередачи и выделившееся в окружающую среду; $q_2(I)$ – количество теплоты, задержанное на границах пустот (пор) в структуре образца, пропорциональное пористости материала; $q(h)$ – количество теплоты, остающееся в объеме образца за счет притока СВЧ энергии.

Приняв излучение теплоты во внешнюю среду постоянным и определяемым

только составом и структурой образца, то есть $Q_2 = \text{const}$, получим увеличение остаточной теплоты в объеме образца при росте удельной мощности СВЧ излучения, иначе – повышение температуры. Поскольку, как указано выше, имеем затухание электромагнитной волны с увеличением расстояния от поверхности, температура по мере удаления от источника нагрева будет снижаться.

При замене части мясного фарша мукой нута в составе облучаемого объекта появляется распределенный в объеме компонент с отличающимися от основного материала механическими, электрофизическими и теплофизическими свойствами. Если принять допущение о равномерном распределении частиц нута в объеме мясного фарша, то можно предположить следующее. В случае использования малых и средних удельных мощностей СВЧ излучения частицы нута могут выступать в роли своеобразного теплового барьера на пути потока теплоты, излучаемого нагретым телом, то есть поток теплоты из внутренних областей тела к внешним может замедлиться и стать менее интенсивным за счет рассеяния в окрестностях частиц нута. Также может сыграть свою роль отмеченное в ходе изучения структуры образцов увеличение пористости образцов с добавками нута после СВЧ обработки по сравнению с контрольными. Микропоры, обладая повышенным тепловым сопротивлением, также будут препятствовать распространению теплового потока во внешнюю среду. Таким образом, для этого случая можно записать следующее уравнение теплового баланса:

$$Q_1(h) - [Q_2 - q_1(k) - q_2(I)] = q(h),$$

где $q_1(k)$ – тепловой поток, рассеянный в окрестностях частиц нута или задержанный ими, пропорциональный концентрации частиц k .

Из данного выражения следует, что чем больше количество теплоты, задержанное частицами нута и порами, тем меньше теплота, отдаваемая в окружающую среду и больше остаточная теплота, формирующая повышенную равномерность термического воздействия от поверхности до глубинных

областей образца. Это способствует выравниванию термического воздействия и повышению качества изделия.

При использовании высоких удельных мощностей СВЧ излучения характер зависимости отличается от описанной тем, что происходит зональное резкое увеличение температуры. Тепловой баланс СВЧ обработки образцов с добавлением муки нута при использовании максимального режима СВЧ излучения может быть описан следующим выражением:

$Q_1(h) + Q_3(k, h) - [Q_2 - q_1(k) - q_2(IT)] = q(h)$,
где $Q_3(k, h)$ – дополнительное количество теплоты, выделившееся в окрестностях частиц нута.

Таким образом, предложенная гипотеза позволяет объяснить характер зависимостей температуры в образцах с добавлением нута и отмеченные выше особенности пористо-агломерированной структуры (рис. 4, 5). С учетом достаточности для кулинарной готовности изучаемых объектов температуры порядка $(70-80)^\circ\text{C}$ и равномерности прогрева не хуже 85%, а также вполне удовлетворительного совпадения теоретических и экспериментальных результатов можно рекомендовать для СВЧ обработки данных изделий удельную мощность СВЧ излучения $13-15 \text{ Вт/см}^3$.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Архангельский Ю.С.** Сверхвысоко-частотная электротехнология. Саратовская школа электротехнологов / Ю.С. Архангельский // Вестник СГТУ. 2011. № 4 (3). С. 5-15.

2. **Рогов И.А.** Сверхвысоко-частотный нагрев пищевых продуктов / И.А. Рогов, С.В. Некрутман. М.: Агропромиздат, 1986. 361 с.

3. **Kachmar M.** Microwave Heating: 50MW and Counting / M. Kachmar // Micro-waves & RF. sept. 1992. P. 41-44.

4. **Злобина И.В.** Обогащение мясных кулинарных изделий растительным белком / И.В. Злобина, Н.М. Птичкина // Научный электронный архив. URL: <http://forum2009.rae.ru/26/337> (дата обращения: 30.04.2013).

5. **Злобина И.В.** Исследование мясных кулинарных изделий с добавлением муки нута / И.В. Злобина, Н.М. Птичкина // Технология и товароведение инновационных пищевых продуктов. 2012. № 3(14). С. 30-36.

Злобина Ирина Владимировна – ассистент кафедры «Техническая механика и детали машин» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Коломейцев Вячеслав Александрович – доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки Российской Федерации, профессор кафедры «Радиоэлектроника и телекоммуникации» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Бекренев Николай Валерьевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Техническая механика и детали машин» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Irina V. Zlobina – Assistant Lecturer, Department of Technical Mechanics and Machine Parts, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Vyacheslav A. Kolomeytsev – Dr. Sc., Professor, Honored Master of Sciences of the Russian Federation, Department of Radio Electronics and Telecommunications, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Nikolay V. Bekrenev – Dr. Sc., Professor, Head: Department of Technical Mechanics and Machine Parts, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 02.09.14, принята к опубликованию 18.09.2014

ВЫРАВНИВАНИЕ НАГРЕВА ДИЭЛЕКТРИКА В КАМЕРЕ ЛУЧЕВОГО ТИПА СВЧ ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ

Ю.С. Архангельский, Е.М. Гришина

LEVELING THE DIELECTRIC HEATING IN A BEAM TYPE MICROWAVE OF ELECTROTHERMAL UNIT

Yu.S. Arkhangelskiy, E.M. Grishina

Рассмотрена возможность выравнивания СВЧ нагрева плоского диэлектрика в камере лучевого типа СВЧ электротермической установки с рупорным излучателем за счет подвода СВЧ энергии к этому слою с другой стороны с помощью второго рупорного излучателя, запитываемого от второго СВЧ генератора.

Ключевые слова: диэлектрик, СВЧ нагрев, камера лучевого типа, рупорный излучатель, СВЧ генератор

Если к плоскому слою диэлектрика в камере лучевого типа (КЛТ) СВЧ электротермической установки (СВЧ ЭТУ) СВЧ-энергия с помощью рупорного излучателя подводится с одной стороны диэлектрика, прошедшая слой диэлектрика СВЧ мощность на другой стороне слоя с помощью приемной рупорной системы направляется в балластную нагрузку (рис. 1 а), то диэлектрик будет нагреваться неравномерно, так как прошедшая в слой диэлектрика СВЧ мощность изменится по закону

$$P(x) = P e^{-2\alpha x},$$

где P – СВЧ мощность, прошедшая в диэлектрик, α – коэффициент затухания в слое диэлектрика, причем [1]

$$\alpha = \frac{2\pi\sqrt{\epsilon'}}{\lambda} \sqrt{\frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \delta} - 1 \right)}.$$

The paper considers a possibility for equalizing microwave heating of thin-film dielectric in a beam-type microwave installed into electrothermal unit provided with a horn-type radiator. The procedure is conducted by supplying the given layer with microwave energy provided from the opposite side using a second horn-type radiator, which is powered by a second microwave generator.

Keywords: dielectric, microwave heating, luggage radial type, horn emitter, a microwave generator

Здесь λ – длина волны генератора; ϵ' и $\operatorname{tg} \delta$ – относительная диэлектрическая проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь слоя нагреваемого диэлектрика.

Выравнить нагрев диэлектрика можно с помощью второй излучающей системы, подводящей СВЧ энергию от второго СВЧ генератора к противоположной стороне диэлектрика (рис. 1 б) [1, 2]. Рассмотрим имеющиеся здесь возможности.

Наибольшая неравномерность имеет место при толщине слоя диэлектрика $l \rightarrow \infty$, так как нагреваться будут поверхностные слои диэлектрика, а центральная его часть станет нагреваться больше всего лишь за счет теплопроводности диэлектрика (рис. 2 а). Правда, при этом КПД КЛТ максимален, и в пренебрежении отражениями от границ воздуха и диэлектрика $\eta \rightarrow 1$.

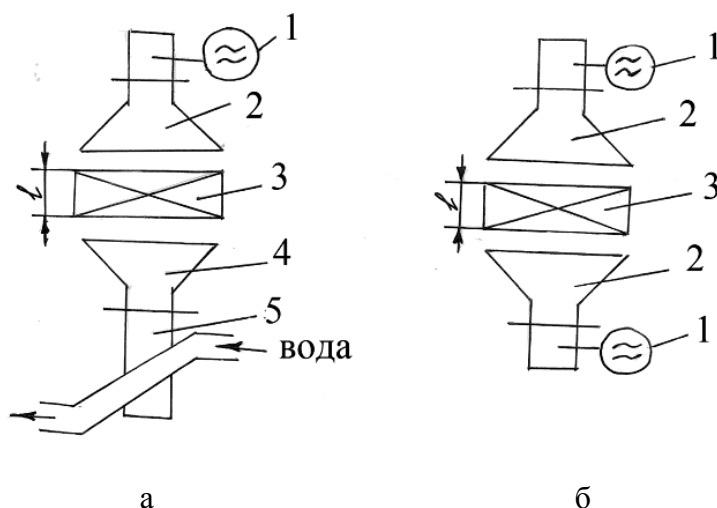


Рис. 1. КЛТ СВЧ ЭТУ: а – с одним СВЧ генератором; б – с двумя СВЧ генераторами (1 – СВЧ генератор; 2 – излучающий рупор; 3 – нагреваемый диэлектрик; 4 – приемный рупор; 5 – балластная калориметрическая нагрузка)

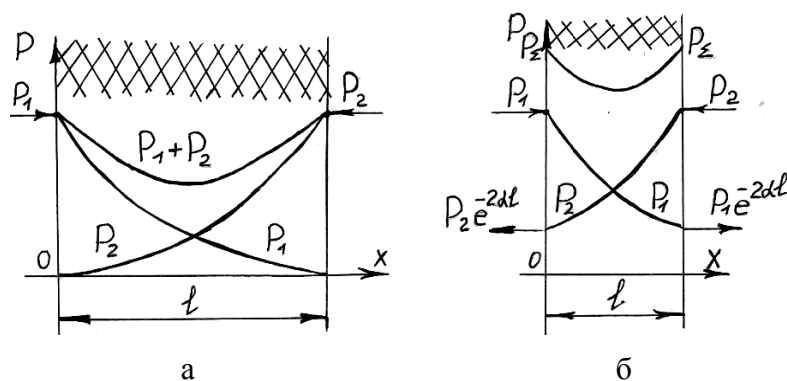


Рис. 2. Распределение СВЧ мощности от двух некогерентных СВЧ генераторов в нагреваемом диэлектрике: а – диэлектрик с $l \rightarrow \infty$; б – диэлектрик с $l_{\min}$

Равномерность СВЧ нагрева слоя диэлектрика тем выше, чем меньше толщина слоя l (рис. 2 б). Но существует минимально допустимая толщина слоя $l_{\min}$: величина прошедшей сквозь слой диэлектрика мощности должна быть безопасной для СВЧ генератора на противоположной стороне слоя. Для этого СВЧ генератора прошедшая сквозь слой СВЧ-мощность эквивалентна отраженной от нагрузки, на которую генератор работает надежно. В СВЧ ЭТУ в качестве СВЧ генератора обычно применяют магнетрон, для которого максимально допустимый коэффициент отражения по напряжению от нагрузки $K_{cmU} = 3$ [3]. В этом случае, если генераторы работают на одной частоте, то

$$\begin{aligned} P_1 e^{-2\alpha l} = 0,75 P_2 &\Rightarrow l_{\min 1} = \frac{1}{2\alpha} \ln \frac{1,33 P_1}{P_2}, \\ P_2 e^{-2\alpha l} = 0,75 P_1 &\Rightarrow l_{\min 2} = \frac{1}{2\alpha} \ln \frac{1,33 P_2}{P_1}. \end{aligned} \quad (3)$$

Из двух значений $l_{\min}$ следует выбрать наибольшее, так как в этом случае оно будет минимально допустимо для СВЧ генератора с большей СВЧ мощностью, а для генератора с меньшей СВЧ мощностью оно будет тем больше допустимо.

Выравнивание нагрева можно оценить с учетом (1) по зависимости

$$P_{\Sigma} = P_1 e^{-2\alpha x} + P_2 e^{-2\alpha x(l_{\min} - x)}, \quad (4)$$

причем при

$$x_{\min} = \frac{l_{\min}}{2} + \frac{1}{4\alpha} \ln \frac{P_1}{P_2}, \quad (5)$$

с учетом (4) имеем

$$P_{\Sigma \min} = P_1 e^{-2\alpha x_{\min}} + P_2 e^{-2\alpha x(l_{\min} - x_{\min})}. \quad (6)$$

Если $P_1 = P_2 = P$, то по (3) с учетом (2) и (5)

$$l_{\min} = \frac{0,032\lambda}{\sqrt{\epsilon' \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \delta} - 1}}, \quad (7)$$

$$x_{\min} = 0,5l_{\min}, \quad (8)$$

а $P_{\Sigma \min}$ рассчитывается по (6) с учетом (8), так что

$$P_{\Sigma \min} = (P_1 + P_2) e^{-2\alpha l_{\min}},$$

где $l_{\min}$ определяется по соотношению (7), а при $P_1 = P_2 = P$, то есть

$$P_{\Sigma \min} = 2P e^{-2\alpha x_{\min}}$$

Таким образом, применение СВЧ энергоподвода к плоскому слою диэлектрика с двух сторон позволяет выравнять СВЧ нагрев диэлектрика при сохранении надежной работы обоих СВЧ генераторов.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Архангельский Ю.С.** Камеры лучевого типа СВЧ электротехнологических установок / Ю.С. Архангельский, К.Н. Огурцов, Е.М. Гришина. Саратов: Изд. дом «Полиграфия Поволжья», 2010. 229 с.

2. СВЧ модификация полимеров / Ю.С. Архангельский, Е.М. Гришина,

В.А. Лаврентьев, С.К. Слепцова. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2012. 288 с.

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

Гришина Екатерина Михайловна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматизированные электротехнологические установки и системы» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

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

Ekaterina M. Grishina – Ph.D., Associate Professor, Department of Automated Electro-technical Plants and Systems, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Yuri S. Arkhangelskiy – Dr. Sc., Professor, Honoured Master of Sciences of the Russian Federation, Department of Automated Electro-technical Plants and Systems, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 04.09.14, принята к опубликованию 18.09.2014

К СВЕДЕНИЮ ЧИТАТЕЛЕЙ!

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

СВЧ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ОБРАБОТКИ ТРАНСФОРМАТОРНОГО МАСЛА

Е.В. Колесников, Ю.С. Архангельский

MICROWAVE ELECTROTECHNOLOGICAL UNIT FOR TRANSFORMER OIL TREATMENT

E.V. Kolesnikov, Yu. S. Arkhangelskiy

Приведена конструкция СВЧ электро-технологической установки для обезвоживания трансформаторного масла, параметры установки и трансформаторного масла с водой.

Ключевые слова: трансформаторное масло, вода, СВЧ электротехнологическая установка, конструкция, параметры

Перед заливкой в трансформатор трансформаторное масло (ТМ) подлежит очистке. Из ТМ в первую очередь требуется удалить воду, так как вода ухудшает электроизоляционные свойства ТМ. Наиболее испытанным способом удаления воды является поглощение воды в ТМ с помощью адсорбера, в качестве которого используется силикагель. СВЧ электромагнитное поле в зоне взаимодействия смеси ТМ и воды интенсифицирует процесс адсорбции.

СВЧ электротехнологическая установка (СВЧ ЭТУ) для обработки ТМ в потоке

The paper presents a microwave electro-technological system designed for dehydration of transformer oil. It also includes parameters for the system and water-mixed transformer oil.

Keywords: transformer oil, water, microwave electrotechnological unit, design parameters

должна удовлетворять следующим требованиям:

- содержание в ТМ воды на входе: 200 г/т,
- содержание в ТМ воды на выходе: 5 г/т,
- температура нагрева ТМ: от 20 до 60°C,
- мощность СВЧ генератора: 0,8-1 кВт,
- частота СВЧ генератора: 2450 МГц,
- адсорбция: силикагель.

Параметры ТМ с водой и силикагелем в указанных пропорциях приведены в табл. 1 и на рис. 1.

Таблица 1

Параметры трансформаторного масла с водой

Параметр	ТМ	Вода	Смесь ТМ и воды
Диэлектрическая проницаемость, ϵ'	2,2-2,3	66-76	2,26
Тангенс угла диэлектрических потерь, $\operatorname{tg} \delta$	0,005-0,026	0,12-0,21	0,016
Плотность, ρ (кг/м ³)	889-900	983-998	845
Удельная теплоемкость, $c_{\text{уд}}$ (Дж/кг·К)	1460	4210	1461
Вязкость	$(8-30) \cdot 10^{-6}$	$(0,556-1) \cdot 10^{-6}$	$19,2 \cdot 10^{-6}$

В табл. 1 параметры смеси ТМ и воды рассчитаны по формуле

$$A = A_1 \xi_1 + A_2 \xi_2,$$

где A – параметр смеси; $A_{1,2}$ – параметры компонента смеси; $\xi_{1,2}$ – содержание компоненты в смеси.

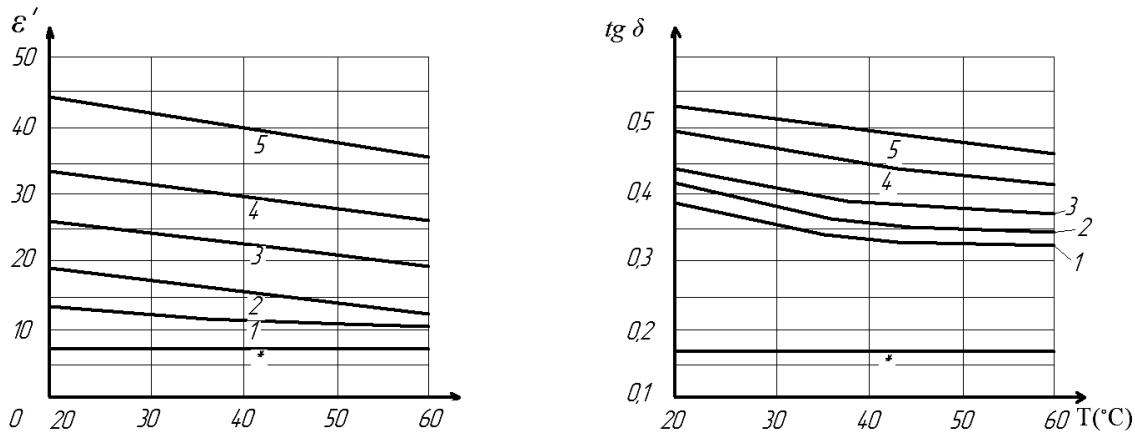


Рис. 1. Зависимости диэлектрических параметров силикагеля с водой от температуры при разном влагосодержании: 1 – $U = 0,75$ кг/кг; 2 – $U = 1$ кг/кг; 3 – $U = 1,2$ кг/кг; 4 – $U = 1,4$ кг/кг; 5 – $U = 1,5$ кг/кг; * – силикагель без добавления воды

Наибольшее распространение в СВЧ ЭТУ получили камеры со стоячей волной (КСВ). К их достоинствам относится многофункциональность: в них могут обрабатываться тела разной формы и с разными ϵ' и $\text{tg } \delta$. К недостаткам КСВ следует отнести наличие в ней стоячей волны, из-за чего в КСВ распределение СВЧ энергии по объему рабочей камеры неравномерное [1, 2].

Конструкция КСВ СВЧ ЭТУ для обработки ТМ показана на рис. 2. Она представляет собой прямоугольный резонатор, передняя стенка которого крепится к корпусу болтами и при выключенной СВЧ ЭТУ открывает доступ внутрь КСВ. СВЧ энергия в КСВ ЭТУ подается, как и в бытовых СВЧ печах, через отверстие связи,

расположенное в верхней стенке резонатора. Энергия к отверстию от СВЧ генератора подводится по прямоугольному волноводу сечением 90×45 мм. СВЧ генератор с источником питания размещен рядом с рабочей камерой и крепится на общем с ней шасси. Камера и источник СВЧ энергии закрыты общим металлическим кожухом.

Внутри КСВ на дне размещается диэлектрическая емкость из радиопрозрачного материала. На дне емкости располагается слой черной резины, являющийся поглотителем СВЧ энергии. В процессе наладки СВЧ ЭТУ возможен подбор толщины резины.

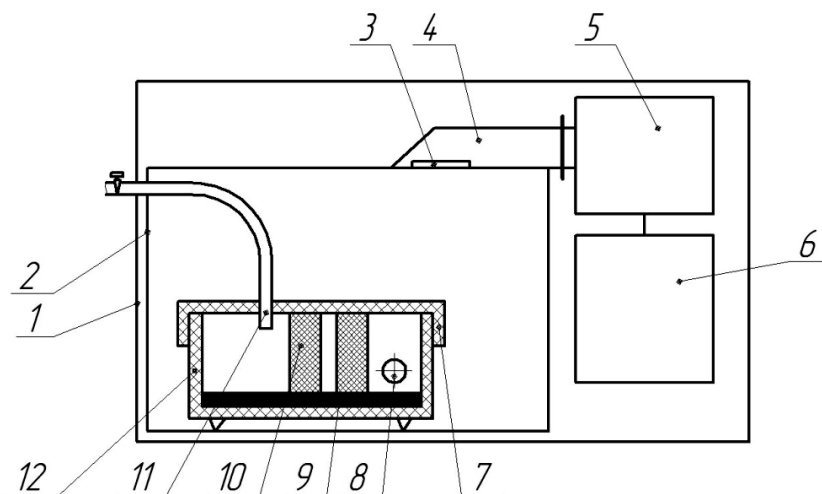


Рис. 2. КСВ и СВЧ ЭТУ: 1 – кожух СВЧ ЭТУ; 2 – корпус КСВ; 3 – отверстие связи; 4 – линия связи; 5 – СВЧ генератор; 6 – источник питания; 7 – крышка диэлектрической емкости; 8 – штуцер слива; 9 – слой резины; 10 – фильтры с силикагелем; 11 – штуцер входной; 12 – диэлектрическая емкость

ТМ в КСВ подается через штуцер с вентилем в боковой стенке КСВ. Внутри КСВ ТМ от штуцера в диэлектрическую емкость подается по радиопрозрачной трубке и по такой же трубке отводится из КСВ через штуцер с вентилем в задней стенке КСВ.

Диэлектрическая емкость устанавливается в КСВ до включения СВЧ ЭТУ и подключается к штуцерам вентилями. Внутри емкости размещается фильтр (фильтры) с

находящимся в нем (в них) силикагелем. Количество и расположение фильтров подбираются экспериментально, причем все ТМ, поступающее в диэлектрическую емкость, должно пройти через фильтры.

Управление СВЧ ЭТУ может осуществляться с помощью клавиатуры, расположенной на передней панели источника СВЧ энергии, или клавиатура может быть вынесена в удобное место в стороне от СВЧ ЭТУ с помощью кабеля.

ЛИТЕРАТУРА

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

2. **Архангельский Ю.С.** Элементная база СВЧ электротермического оборудо-

вания / Ю.С. Архангельский, В.А. Воронкин. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2003. 213 с.

Колесников Евгений Владимирович – доктор технических наук, профессор кафедры «Автоматизированные электротехнологические установки и системы» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

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

Evgeny V. Kolesnikov – Dr. Sc., Professor, Department of Automated Electrotechnical Plants and Systems, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Yuri S. Arkhangelskiy – Dr.Sc., Professor, Honoured Master of Sciences of the Russian Federation, Department of Automated Electrotechnical Plants and Systems, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 04.09.14, принята к опубликованию 18.09.2014

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.

ВЫБОР ТИПА РАБОЧЕЙ КАМЕРЫ СВЧ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ТРАНСФОРМАТОРНОГО МАСЛА

Е.В. Колесников, Ю.С. Архангельский

SELECTING A WORKING CHAMBER FOR A MICROWAVE ELECTROTECHNOLOGICAL PLANT TO TREAT TRANSFORMER OIL

E.V. Kolesnikov, Yu.S. Arkhangelskiy

Рассмотрены возможности применения различных типов рабочих камер в СВЧ электротехнологической установке для удаления воды из трансформаторного масла.

Ключевые слова: трансформаторное масло, вода, рабочие камеры, СВЧ электротехнологическая установка

Перед заливкой в трансформатор из трансформаторного масла (ТМ) удаляют воду. Оценим возможность применения для этих целей СВЧ электротехнологической установки. В первую очередь речь должна идти о выборе типа рабочей камеры.

Камеры с бегущей волной. КБВ на нерегулярном круглом волноводе (рис. 1) была предложена именно для обработки жидкости в потоке (пастеризация молока). Но для нее необходимо, чтобы у обрабатываемой среды диэлектрические параметры удовлетворяли неравенству [1]

$$\epsilon' \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \delta} \gg 1, \quad (1)$$

где ϵ' – относительная диэлектрическая проницаемость среды, $\operatorname{tg} \delta$ – тангенс угла диэлектрических потерь среды.

Параметры ТМ с водой этому неравенству не удовлетворяют ($\epsilon' \approx 2,26$, $\operatorname{tg} \delta \approx 0,016$), то есть такую рабочую камеру для СВЧ обработки ТМ применять нельзя.

КБВ на регулярном прямоугольном волноводе (рис. 2) пригодны для обработки проточных сред, у которых неравенство (1) не удовлетворяется, то есть такие рабо-

We consider proposals related with various working chambers applied in microwave electrotechnological units and utilized for dehydration of transformer oil.

Keywords: transformer oil, water, working chambers, microwave electrotechnological unit

чие камеры для СВЧ обработки ТМ применять можно.

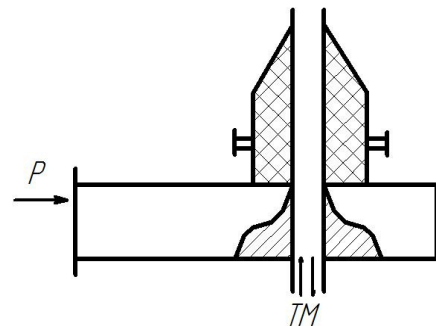


Рис. 1. КБВ на нерегулярном круглом волноводе

Поток ТМ перемещается в КБВ плоским слоем по диэлектрической прямоугольной трубке или по диэлектрическому прямоугольному желобу.

Определим длину L такого волновода. Она зависит от КПД η по использованию СВЧ энергии, который мы считаем приемлемым. Так, если P – мощность СВЧ генератора, то

$$\eta = \frac{P - P e^{-2\alpha L}}{P} \Rightarrow L = \frac{1}{2\alpha} \ln \frac{1}{1 - \eta},$$

где α – коэффициент затухания электромагнитной волны, распространяющейся по волноводу, причем

$$\alpha = \frac{\pi^2 d \epsilon' \operatorname{tg} \delta}{2a \lambda \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2}}.$$

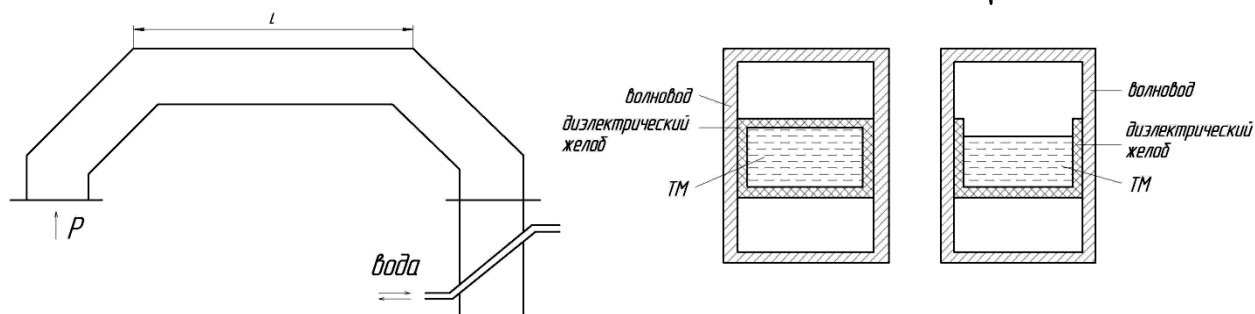


Рис. 2. КБВ на регулярном прямоугольном волновод

Здесь λ – длина волны СВЧ генератора; d – толщина слоя ТМ в волновод; a – широкая стенка волновода, причем связь между d и a имеет вид [1]

$$\frac{d}{a} \leq 0,1..0,15.$$

В табл. 1 приведены зависимости $L(\eta)$ для стандартного волновода, имеющего на частоте 2450 МГц сечение $a \times b = 9 \times 4,5$ см при $d = 0,1a$ и $d = 0,15a$.

Таблица 1

Зависимости $L(\eta)$ для прямоугольного волновода сечением $9 \times 4,5$ см, работающего на частоте 2450 МГц

d/a	η , %	0	20	40	60	80	90	95	97,5	100
0,1	L , м	0	1,12	3,12	4,61	8,1	11,59	15,08	18,55	∞
0,15	L , м	0	0,75	2,08	3,07	5,4	7,75	10,05	12,37	∞

Оценки $\eta_{\max}$ и $\eta_{\min}$, которые встречаются в СВЧ электротехнологии. Обычно при этом говорят о потерях СВЧ энергии от отражения СВЧ электромагнитной волны от рабочей камеры.

Тогда

$$\eta = 1 - |\Gamma|^2 = 1 - \left(\frac{K_{cmU} - 1}{K_{cmU} + 1} \right)^2,$$

где Γ – коэффициент отражения от рабочей камеры; K_{cmU} – коэффициент стоячей волны по напряжению рабочей камеры.

$K_{cmU \max}$, при котором отражения становятся опасными для СВЧ генератора, равен 2, так что $\eta_{\min} = 0,89$, а наилучшее согласование рабочей камеры с генератором, которое можно достичь, соответствует $K_{cmU} \approx 1,15$, отчего $\eta_{\max} = 0,995$.

Если в КБВ на прямоугольном регулярном волновод согласиться на $\eta_{\min} = 0,89$, то $L \approx 11$ м, а при $\eta_{\max} = 0,995$ $L > 19$ м. В лю-

бом случае такую длину рабочей камеры надо признать чрезмерной.

Эта длина может быть уменьшена, если изогнуть прямоугольный волновод меандром (рис. 3).

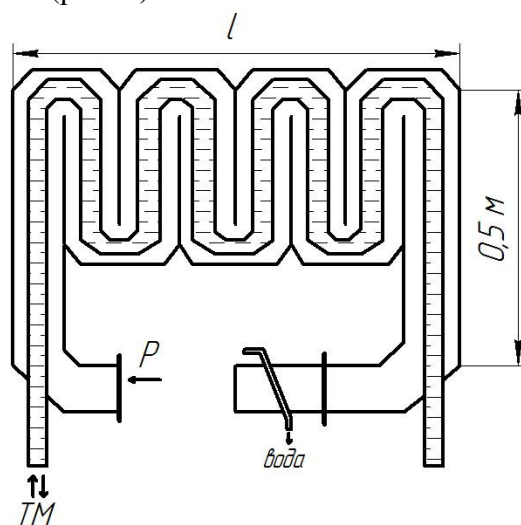


Рис. 3. КБВ на прямоугольном волновод, изогнутом меандром

Таблица 2

Зависимости $L(\eta)$ для прямоугольного волновода, изогнутого меандром

d/a	η , %	0	20	40	60	80	90	95	97,5	100
0,1	l , м	0	0,124	0,288	0,411	0,698	0,985	1,272	1,559	∞
0,15	l , м	0	0,083	0,206	0,312	0,452	0,657	0,922	1,026	∞

В табл. 2 приведена длина l волновода, изогнутого меандром, при ширине камеры 0,5 м.

Применение меандровой системы, естественно, укорачивает КБВ на прямоугольном волноводе, но резко возрастают

металлоемкость и стоимость такой рабочей камеры.

Камера лучевого типа. Рассмотрим далее КЛТ с ограниченным объемом (рис. 4).

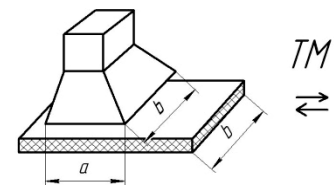
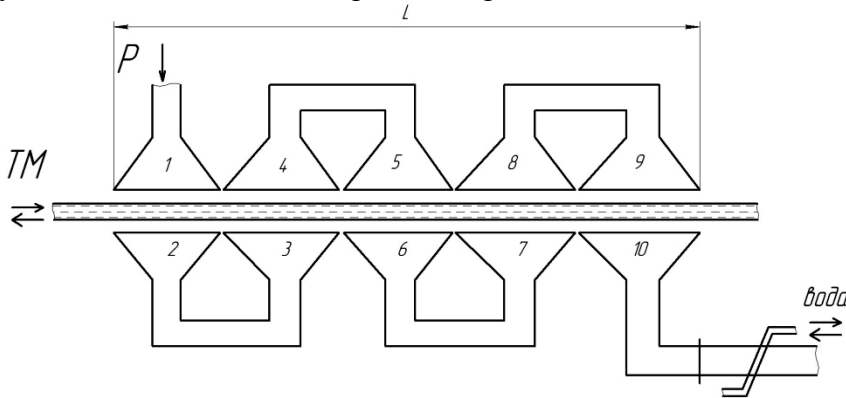


Рис. 4. КЛТ с пирамидальными рупорами, собранные меандром

$\epsilon'' = \epsilon' \operatorname{tg} \delta$ ТМ невелико, а потому отражением электромагнитной волны от поверхности слоя ТМ между рупорами можно пренебречь [2]. В таком случае на участке между рупорами 1 и 2 поглотится СВЧ мощность

$$P_{\text{погл}} = P(1 - e^{-2\alpha d}),$$

где d – толщина слоя ТМ между рупорами.

Но $2\alpha d < 1$ и тогда

$$P_{\text{погл}} = 2\alpha d P,$$

где при $\operatorname{tg} \delta \ll 1$ [1]

$$\alpha = \frac{2\pi\sqrt{\epsilon'} \operatorname{tg} \delta}{\lambda},$$

тогда при N пар рупоров

$$\eta = \frac{P_{\text{погл}}}{P} = \frac{2\pi\sqrt{\epsilon'} \operatorname{tg} \delta Nd}{\lambda}. \quad (2)$$

Если считать, что соседние рупоры расположены вплотную друг к другу, то

$$N = \frac{L}{a}, \quad (3)$$

где a – ширина апертуры рупора в направлении движения ТМ по трубе или желобу между рупорами.

Тогда из (2) с учетом (3)

$$L = \frac{a\lambda\eta}{2\pi d\sqrt{\epsilon'} \operatorname{tg} \delta}. \quad (4)$$

Но у пирамидального рупора на частоте 2450 МГц $a = 10$ см, тогда по (4)

$$L = 812,1 \frac{\eta}{d}, \quad (5)$$

где толщина слоя ТМ d в см, и эта величина подлежит дополнительному определению.

Для сопоставления длины КЛТ, рассчитанной по (5), выберем d в (5) той же величины, что и в КБВ с a – широкая стенка волновода

$$d = \begin{cases} 0,1a \\ 0,15a \end{cases} \Rightarrow d = \begin{cases} 0,9 \text{ см} \\ 1,35 \text{ см} \end{cases}.$$

Тогда зависимости $L(\eta)$ для КЛТ, аналогичные приведенным в табл. 1 для КБВ, будут соответствовать табл. 3.

Зависимости $L(\eta)$ для КЛТ

d , см	η , %	0	20	40	60	80	90	95	97,5	100
0,9	L , м	0	1,8	3,61	5,41	7,22	8,12	8,57	8,8	9,0
1,35	L , м	0	1,20	2,41	3,61	4,81	5,41	5,72	5,87	6,0

Камера со стоячей волной. КСВ для обработки ТМ (рис. 5) отличается, например, от обычных бытовых СВЧ печей наличием диэлектрической емкости, через которую должно прокачиваться ТМ. Из-за малого $\text{tg } \delta$ ТМ такая рабочая камера без дополнительного поглотителя применяться не может.

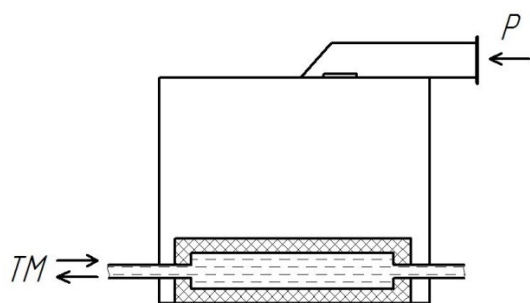


Рис. 5. КСВ на прямоугольном резонаторе

Рабочие камеры с силикагелем. Для удаления воды из ТМ рекомендуется использовать адсорбент, например силикагель. Силикагель – микропористое тело, получаемое прокаливанием геля поликремниевой кислоты, состоит из SiO_2 .

Рассмотрим влияние силикагеля на поглощение СВЧ энергии в рабочей камере с ТМ. В этом случае силикагель представляет собой фильтр (диэлектрическая коробка с отверстиями в стенках с силикагелем) той или иной формы, помещенный в рабочую камеру на пути потока ТМ. В рабочих камерах такой фильтр представляет плоский слой, рас-

положенный в СВЧ электромагнитном поле поперек потока ТМ. Этот слой влияет на поглощение СВЧ мощности, и это поглощение зависит от типа рабочей камеры, расположения фильтра, от ϵ' и $\text{tg } \delta$ силикагеля. Согласно [1], силикагель в начальный момент имеет $\epsilon' \approx 2,5-3$, $\text{tg } \delta \approx 0,13-0,14$, то есть он практически радиопрозрачен, но ϵ' по сути не отличается от ТМ, а по $\text{tg } \delta$ он близок к воде. Со временем в результате поглощения воды его диэлектрические свойства существенно меняются. Так, при влагосодержании $U > 1$ мг/кг у силикагеля $\epsilon' > 20$, и $\text{tg } \delta > 0,35$ с тенденцией роста ϵ' и $\text{tg } \delta$ по мере поглощения силикагелем воды. Так что со временем фильтр начинает существенно влиять на поглощение СВЧ мощности.

Однако сведения о параметрах процесса поглощения силикагелем воды из ТМ отсутствуют. Требуются, по-видимому, специальные экспериментальные исследования, как зависит, скажем, поглощение воды от размеров частиц силикагеля, скорости прохождения потока через фильтр заданной толщины, влияние на поглощение СВЧ энергии влагосодержания и т.п. В отсутствие этих сведений не удастся определить оптимальную толщину слоя фильтра, время, через которое следует в фильтре менять силикагель, и рекомендуемую температуру ТМ и силикагеля.

ЛИТЕРАТУРА

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

2. Архангельский Ю.С. Камеры лучевого типа СВЧ электротехнологиче-

ских установок / Ю.С. Архангельский, К.Н. Огурцов, Е.М. Гришина. Саратов: Изд. дом «Полиграфия Поволжья», 2010. 229 с.

Колесников Евгений Владимирович – доктор технических наук, профессор кафедры «Автоматизированные электротехнологические установки и системы» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Evgeny V. Kolesnikov – Dr. Sc., Professor, Department of Automated Electrotechnical Plants and Systems, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

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

Yuri S. Arkhangelskiy – Dr.Sc., Professor, Honoured Master of Sciences of the Russian Federation, Department of Automated Electrotechnical Plants and Systems, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 04.09.14, принята к опубликованию 18.09.2014

УДК.621.396.96

АНАЛИТИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ ВНУТРЕННЕЙ КРАЕВОЙ ЗАДАЧИ ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ ДЛЯ РАБОЧЕЙ КАМЕРЫ БЫТОВЫХ СВЧ ПЕЧЕЙ ПРИ МНОГОЩЕЛЕВОМ СПОСОБЕ ВОЗБУЖДЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

В.А. Коломейцев, О.В. Дрогайцева, Д.Н. Никуйко, В.С. Тяжлов

AN ANALYTICAL SOLUTION TO THE INNER BOUNDARY ELECTRODYNAMICS PROBLEM WITH WORKING CHAMBERS OF CONSUMER MICROWAVE OVENS UNDER MULTIPASSAGE ELECTROMAGNETIC FIELD EXCITATION

V.A. Kolomeytsev, O.V. Drogaytseva, D.N. Nikuyko, V.S. Tyazhlov

Приведено решение внутренней краевой задачи электродинамики для прямоугольного резонатора, на нижней стенке которого расположена прямоугольная диэлектрическая пластина, при возбуждении ЭМ поля в резонаторе посредством многощелевой системы возбуждения. Полученное решение позволяет провести анализ электродинамических свойств системы возбуждения и определить пути оптимизации многощелевой системы, направленной на повышение равномерности нагрева диэлектрического материала и КПД СВЧ печи.

The paper provides a solution to the inner boundary electrodynamics problem with a rectangular resonator provided with a rectangular dielectric plate located on the bottom wall. Electromagnetic field within the resonator cavity is excited by means of a multislot system. The given solution allows for analysis of electrodynamic properties of the excitation system, and finding methods for optimization of the multislot system, intended to upgrade uniformity of heating dielectric materials, and efficiency of the microwave oven.

Ключевые слова: *электромагнитное поле; продольная и поперечная поляризация; собственные резонансные частоты; частота возбуждения ЭМГ поля; сторонние токи и заряды; E и H-типы колебаний; метод частичных областей*

Структура электромагнитного (ЭМ) поля в рабочей камере (РК), представляющей собой прямоугольный резонатор, частично заполненный диэлектрическим материалом, во многом определяется конструкцией системы возбуждения ЭМ поля и местом её расположения на поверхности РК (верхний, нижний, боковой способы возбуждения). В первых отечественных СВЧ печах СП-23-1 ЗИЛ использовался верхний способ возбуждения, при котором СВЧ мощность поступает от магнетронного генератора в РК через окно связи, представляющее собой прямоугольную щель, расположенную в центре верхней стенки РК. Электромагнитная энергия подводится к одиночной щели с помощью прямоугольного волновода сечением 45×90 мм (рабочая длина волны 12,24 см). При данном способе возбуждения нагреваемый продукт находится в дальней зоне возбуждения, в которой ЭМ поле в основном определяется электродинамическими свойствами резонатора [1], что приводит к неравномерности нагрева, поскольку итоговое ЭМ поле определяется суперпозицией стоячих типов колебаний, которые характеризуются резкой неоднородностью пространственного распределения. В современных печах окно связи расположено в центре боковой стенки резонаторной камеры, при этом часть продукта находится в ближней зоне возбуждения, в которой ЭМ поле в основном определяется сторонними токами (токи смещения в щелевом отверстии), при этом в данной области продукта наблюдается максимальное поглощение СВЧ мощности и соответственно его нагрев. Противолежащий участок продукта находится в дальней зоне возбуждения, в которой наблюдается минимальное поглощение СВЧ мощности вследствие затуха-

Keywords: *electromagnetic field; longitudinal and transverse polarization; self-resonant frequency; excitation frequency of electromagnetic fields; E- and H-type oscillations, method of partial regions*

хания ЭМ поля, связанного с рассеиванием ЭМ энергии продуктом.

В СВЧ печах, чтобы устранить неравномерность нагрева, используют механическое перемещение нагреваемого материала (вращение поддона с продуктом).

Как показано в [2], при отсутствии вращения поддона с продуктом неравномерность нагрева при боковом способе возбуждения несколько выше, чем при верхнем способе возбуждения. Механическое перемещение приводит к заметному улучшению равномерности нагрева.

Основная цель данной работы – обеспечить заданный уровень равномерности нагрева обрабатываемого материала без использования механического перемещения поддона с продуктом посредством использования и оптимизации многощелевой системы возбуждения ЭМ поля, расположенной на верхней стенке РК.

Использование многощелевых систем возбуждения ЭМ поля в бытовых СВЧ печах позволяет повысить их функциональные возможности в достижении требуемого уровня равномерности нагрева диэлектрического материала, обеспечивающего заданный электротехнологический процесс термообработки. Практическая реализация имеющихся здесь возможностей требует комплексного исследования электродинамических свойств распределённых систем возбуждения ЭМ поля в резонаторных структурах, частично заполненных диэлектрическим материалом, что достигается на основе решения неоднородной внутренней краевой задачи электродинамики (ВКЗЭ). Математическая модель процесса взаимодействия ЭМ поля с диэлектрическим материалом в прямоугольном резонаторе может быть представлена в следующем виде:

$$\nabla^2 \vec{\Phi}_{iq}(\vec{r}, \tau) - \mu \sigma_q \frac{\partial \vec{\Phi}_{iq}(\vec{r}, \tau)}{\partial \tau} - \mu \epsilon_i \frac{\partial^2 \vec{\Phi}_{iq}(\vec{r}, \tau)}{\partial \tau^2} = \vec{F}_{iq}(\vec{r}, \tau), \quad (1)$$

$$\vec{\Phi}_{iq}(\vec{r}, \tau) = \begin{cases} \vec{E}_{iq}(\vec{r}, \tau) & \text{при } i = 1, \\ \vec{H}_{iq}(\vec{r}, \tau) & \text{при } i = 2, \end{cases} \quad (2)$$

$$\sigma_q = \begin{cases} \sigma & \text{при } q = 1, \\ 0 & \text{при } q = 2, \end{cases} \quad \epsilon_q = \begin{cases} \epsilon & \text{при } q = 1, \\ \epsilon_0 & \text{при } q = 2, \end{cases} \quad (3)$$

$$\vec{F}_{iq}(\vec{r}, \tau) = \begin{cases} \mu \frac{\partial \vec{j}_{cm}(\vec{r}, \tau)}{\partial \tau} + \frac{1}{\epsilon_0} \text{grad } \rho_{cm}(\vec{r}, \tau) & \text{при } i = 1 ; q = 2, \\ -\text{rot } \vec{j}_{cm}(\vec{r}, \tau) & \text{при } i = 2 ; q = 2, \\ 0 & \text{при } i = 1; 2 ; q = 1, \end{cases} \quad (4)$$

где $\vec{E}(\vec{r}, \tau), \vec{H}(\vec{r}, \tau)$ – векторы напряжённости электрического и магнитного полей ($q = 1$ в обрабатываемом материале; $q = 2$ в воздушной среде); ϵ_0, ϵ – абсолютные диэлектрические проницаемости воздуха и обрабатываемого материала; μ_0, μ – магнитная проницаемость воздуха и материала; σ – удель-

ная электропроводность материала; $\vec{r}$ – радиус вектор, определяющий положение рассматриваемой точки в пространстве; τ – время. Система уравнений Гельмгольца (1) решается при граничных условиях на металлической поверхности резонатора S_1 и поверхности раздела сред S_2 [3]:

$$\begin{aligned} \vec{E}_\tau(\vec{r}, \tau) &= 0; \quad \frac{\partial \vec{H}_n(\vec{r}, \tau)}{\partial n} = 0 \Big|_{\text{на } S_1}, \\ \vec{E}_{\tau 1}(\vec{r}, \tau) &= \vec{E}_{\tau 2}(\vec{r}, \tau); \quad \vec{H}_{\tau 1}(\vec{r}, \tau) = \vec{H}_{\tau 2}(\vec{r}, \tau) \Big|_{\text{на } S_2}, \end{aligned} \quad (5)$$

где $\vec{E}_\tau(\vec{r}, \tau)$ и $\vec{H}_\tau(\vec{r}, \tau)$ – тангенциальные составляющие векторов напряжённости электрического и магнитного полей; $\vec{H}_n(\vec{r}, \tau)$ – нормальная составляющая век-

тора магнитного поля. При решении неоднородной ВКЗЭ принципиальное значение имеют начальные условия:

$$\vec{E}(\vec{r}, \tau) = \vec{\Phi}_1(\vec{r}); \quad \vec{H}(\vec{r}, \tau) = \vec{\Phi}_2(\vec{r}) \Big|_{\tau=0}. \quad (6)$$

Решение системы уравнений (1), удовлетворяющее граничным условиям (5) и начальным условиям (6), позволит исследовать распределение ЭМ поля в РК и определить удельную плотность тепловых источников в объёме прямоугольной диэлектрической пластины при щелевом способе возбуждения. При этом из решения однородной ВКЗЭ определяется класс соб-

ственных ортонормированных функций, являющихся основой решения неоднородной ВКЗЭ. Для продольной поляризации E_y, H_y и диэлектрической пластины, лежащей на нижней стенке РК, решение скалярных уравнений для заданных компонент можно представить в следующем виде для Е-типа колебаний ($E_y \neq 0, H_y = 0$):

$$\begin{aligned} E_{y1mnp}(x, y, z) &= \frac{1}{\chi_{\perp mp}^2} \cdot E_{y0mnp} \sin \frac{m\pi}{a} x \cdot \cos K_{y1n} y \cdot \sin \frac{p\pi}{l} z \quad - \text{для материала,} \\ E_{y2mnp}(x, y, z) &= \frac{1}{\chi_{\perp mp}^2} \cdot E_{y0mnp} \sin \frac{m\pi}{a} x \cdot \cos K_{y2n} (b - y) \cdot \sin \frac{p\pi}{l} z \quad - \text{для воздушной среды,} \end{aligned} \quad (7)$$

Соответственно для Н-типов колебаний ($E_y = 0, H_y \neq 0$):

$$H_{y1mp}(x, y, z) = \frac{1}{\chi_{\perp mp}^2} \cdot H_{y0mp} \cos \frac{m\pi}{a} x \cdot \sin K_{y1n} y \cdot \cos \frac{p\pi}{l} z \quad - \text{ для материала,} \quad (8)$$

$$H_{y2mp}(x, y, z) = \frac{1}{\chi_{\perp mp}^2} \cdot H_{y0mp} \cos \frac{m\pi}{a} x \cdot \sin K_{y2n} (b - y) \cdot \cos \frac{p\pi}{l} z \quad - \text{ для воздушной среды,}$$

где $\chi_{\perp mp} = \sqrt{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{p\pi}{l}\right)^2}$ – поперечное волновое число; a, b, l – размеры прямоугольного резонатора по координатным направлениям x, y, z ; K_{y1n}, K_{y2n} – волно-

вые числа в направлении оси Y соответственно в диэлектрическом материале и воздушной среде, которые определяются следующим дисперсионным уравнением [4]:

$$\operatorname{tg} K_{y1n} (b - d) = -\frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} \cdot \frac{K_{y2n}}{K_{y1n}} \cdot \operatorname{tg} K_{y2n} d \quad - \text{ для } E \text{ – типов колебаний;} \quad (9)$$

$$\operatorname{tg} K_{y1n} (b - d) = -\frac{K_{y1n}}{K_{y2n}} \cdot \operatorname{tg} K_{y2n} d \quad - \text{ для } H \text{ – типов колебаний;}$$

при этом волновые числа K_{y1n}, K_{y2n} связаны между собой соотношением

$$K_{y2n} = \sqrt{\omega^2 \Delta \epsilon \mu + K_{y1n}^2}; \quad (10)$$

которое следует из обобщённого волнового дисперсионного уравнения [5]; ω – круговая частота; $\Delta \epsilon = \epsilon_1 - \epsilon_2$; d – толщина

диэлектрической пластины. Уравнения (9) имеют бесконечное множество корней, которые могут быть найдены графоаналитическим методом или посредством построения функций:

$$f_{n1} = \operatorname{tg} K_{y1n} (b - d) + \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} \sqrt{\frac{\omega^2 \Delta \epsilon \mu}{K_{y1n}^2} + 1} \cdot \operatorname{tg} \sqrt{\frac{\omega^2 \Delta \epsilon \mu}{K_{y1n}^2} + 1} \cdot (K_{y1n} d) \quad \text{для } E \text{ – типов;} \quad (11)$$

$$f_{n2} = \operatorname{tg} K_{y1n} (b - d) + \operatorname{tg} K_{y1n} (b - d) + \operatorname{tg} \sqrt{\frac{\omega^2 \Delta \epsilon \mu}{K_{y1n}^2} + 1} \cdot (K_{y1n} d) \quad \text{для } H \text{ – типов;}$$

Нулевые значения функций f_{n1} и f_{n2} и определяют корни дисперсионных уравнений.

При решении неоднородной ВКЗЭ необходимо знать структуру сторонних токов, то есть правую часть уравнений Гельмгольца – $\vec{j}_{cm}$. Из теории возбуждения известно, что излучающая щель должна быть перпендикулярна линиям поверхностного тока, текущего на нижней широкой стенке волновода в максимуме амплитуды тока, которые отстоят друг от друга на расстоянии

$L = \Lambda_B / 2$, где Λ_B – длина волны в волноводе. Структура поверхностных токов, текущих на стенках прямоугольного волновода, определяется соотношением [3]:

$$\vec{j}_{нов}(\vec{r}, \tau) = -[\vec{n} \cdot \vec{H}(\vec{r}, \tau)]; \quad (12)$$

где $\vec{n}$ – нормаль к нижней стенке волновода. Как было отмечено выше, передача СВЧ мощности от генератора к щелевой системе возбуждения происходит на основной волне H_{10} , длина которой определяется

$$\Lambda_B = \frac{\lambda_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_{кр}}\right)^2}}, \quad (13)$$

где λ_0 – рабочая длина волны; $\lambda_{кр} = 2a$ – критическая длина волны H_{10} ; a_0 – размер широкой стенки волновода. Соотношение (3) в совокупности с условием $L = \Lambda_B / 2$ определяет количество излучающих щелей на верхней стенке РК. Так, в волноводе сечением 45×90 мм, практически используемом во всех СВЧ нагревательных устройствах на частоте 2450 МГц ($\Lambda_B = 16,68$ см) в РК с размером верхней стенки 300×280 мм (СВЧ печь MS-192U производства фирмы LG (Южная Корея)), могут быть размещено 3 щели. Увеличить число излучающих щелей можно путём увеличения размера широкой стенки волновода.

Так, в волноводе 45×110 мм могут быть расположены 4 щели. Заметим, что условие $L = \Lambda_B / 2$ обеспечивает не только максимум излучения СВЧ мощности, но и электромагнитную совместимость в многощелевой системе возбуждения. Сторонний ток, то есть ток, текущий в щели – ток смещения, определяется, как показано в [6], поверхностным током, текущим на нижней стенке волновода:

$$\vec{j}_{cm}(\vec{r}, \tau) = \vec{j}_{nos}(\vec{r}, \tau) \Big|_{S_3}; \quad (14)$$

где S_3 – поверхность излучающей щели. Таким образом определяется неоднородная часть уравнений (1).

Рассмотрим решение неоднородного волнового уравнения Гельмгольца для Н-типов колебаний. Для продольной поляризации E_y , H_y данное уравнение имеет вид

$$\nabla^2 H_{qy}(x, y, z, \tau) + \epsilon_q \mu \frac{\partial^2 H_{qy}(x, y, z, \tau)}{\partial \tau^2} = F_{2qy}(x, y, z, \tau), \quad (15)$$

где

$$F_{2qy}(x, y, z, \tau) = \begin{cases} \frac{\partial(j_x(x, y, z, \tau))_{cm}}{\partial z} - \frac{\partial(j_z(x, y, z, \tau))_{cm}}{\partial x}; & \text{при } q = 2, \\ 0. & \text{при } q = 1, \end{cases} \quad (16)$$

Решение уравнения (15) представим в виде суперпозиции ортонормированных

функций (8), удовлетворяющих граничным условиям (5):

$$H_{yq}(x, y, z, \tau) = \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{p=0}^{\infty} T_{mnp}(\tau) \cdot \cos \frac{m\pi}{a} x \cdot F_{2qy}(y) \cdot \cos \frac{p\pi}{l} z, \quad (17)$$

где

$$\Phi_{2qyn}(y) = \begin{cases} \sin K_{y2n} y; & \text{при } q = 1, \\ \sin K_{y2n} (b - y); & \text{при } q = 2. \end{cases} \quad (18)$$

Подставляя (17) в (15), получим:

$$\sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{p=0}^{\infty} (T_{mnp}''(\tau) + \omega_{mnp}^2 T_{mnp}(\tau)) \cdot \cos \frac{m\pi}{a} x \cdot F_{2qy}(y) \cdot \cos \frac{p\pi}{l} z = \frac{1}{\epsilon_q \mu} \cdot F_{2qy}(x, y, z, \tau). \quad (19)$$

Соотношение (19) есть разложение функции источника F_{2qy} в ряд Фурье по

собственным ортонормированным функциям – $(\Phi_{2qyn})_{mnp}$, где

$$(\Phi_{2qyn})_{mnp} = \cos \frac{m\pi}{a} x \cdot F_{2qy}(y) \cdot \cos \frac{p\pi}{l} z. \quad (20)$$

Применяя обратное преобразование Фурье, определим временную составляющую разложения (19):

$$\begin{aligned} \vartheta_{qmnpr}(\tau) &= \frac{1}{\varepsilon_q \mu} \cdot \frac{1}{(W_q^2)_{mnpr}} \int_0^a \int_0^b \int_0^l (F_{2qy}(x, y, z, \tau))_{mnpr} \cdot (\varphi_{2qy}(x, y, z, \tau))_{mnpr} dx dy dz, \\ (W_q^2)_{mnpr} &= \int_0^a \int_0^b \int_0^l (\varphi_{2qy}(x, y, z, \tau))_{mnpr}^2 dx dy dz. \end{aligned} \quad (22)$$

Здесь $(W_q)_{mnpr}$ – норма собственных ортонормированных функций $(\varphi_{2qy})_{mnpr}$. Решение неоднородного уравнения (20) про-

$$T_{mnpr}''(\tau) + \omega_{mnpr}^2 T_{mnpr}(\tau) = \vartheta_{qmnpr}(\tau); \quad (21)$$

где

$$T_{mnpr}(\tau) = \frac{1}{\omega_{mnpr}} \int \vartheta_{qmnpr}(\tau) \cdot \sin \omega_{mnpr}(\tau - \xi) d\xi + c_0, \quad (23)$$

где ω_{mnpr} – резонансная частота H_{mnpr} типа колебания; c_0 – постоянная, которая определяется из начального условия (6). Заметим, что магнетрон в СВЧ печи генерирует гармонические колебания частотой $\nu = 2450 \text{ МГц} \pm 2,5\%$. Следовательно, и сторонние токи в щелях, возбуждающие ЭМ поле в РК, также изменяются по гармоническому закону.

Рассмотрим случай, при котором неоднородная часть уравнения (21) – функция источника изменяется во времени по следующему закону:

$$\vartheta_{qmnpr}(\tau) = \vartheta_{0mnpr} \cdot \sin \omega \tau. \quad (24)$$

$$H_{yq}(x, y, z, \tau) = \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{p=0}^{\infty} \frac{\vartheta_{0mnpr}}{(\omega_{mnpr}^2 - \omega^2)} \cdot \sin \omega \tau \cdot \cos \frac{m\pi}{a} x \cdot \varphi_{2qyn}(y) \cdot \cos \frac{p\pi}{l} z. \quad (26)$$

Остальные компоненты электромагнитного поля Н-типов колебаний на основании принципа поляризационной двойст-

ведём методом вариации произвольной постоянной или методом Лагранжа [7]. В результате получим

Подставляя выражение (24) в соотношение (23) и проводя интегрирование, а также подставляя после интегрирования $\tau = \xi$, получим

$$T_{mnpr}(\tau) = \frac{\vartheta_{0mnpr}}{(\omega_{mnpr}^2 - \omega^2)} \sin \omega \tau. \quad (25)$$

Далее, подставляя соотношение (25) в решение неоднородной ВКЗЭ (17), получим окончательно выражение, определяющее структуру продольной составляющей $H_{yq}(x, y, z, \tau)$ магнитного поля:

венности [8] определяются на основании первых двух уравнений Максвелла

$$\begin{aligned} E_x &= j \frac{\omega \mu}{\chi_{\perp}^2} \cdot \frac{\partial H_y}{\partial z}, & E_z &= -j \frac{\omega \mu}{\chi_{\perp}^2} \cdot \frac{\partial H_y}{\partial x}, \\ H_x &= \frac{1}{\chi_{\perp}^2} \cdot \frac{\partial^2 H_y}{\partial x \partial y}, & H_z &= \frac{1}{\chi_{\perp}^2} \cdot \frac{\partial^2 H_y}{\partial z \partial y}. \end{aligned} \quad (27)$$

Подставляя решение (26) в соотношение (27), определим структуру ЭМГ поля Н-типов колебаний прямоугольного ре-

зонатора, частично заполненного диэлектрической пластиной:

$$\begin{aligned}
 E_{xq}(x, y, z, \tau) &= - \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{p=0}^{\infty} \left(\frac{p\pi}{l} \right) \cdot \frac{\vartheta_{0mnp}}{(\omega_{mnp}^2 - \omega^2)} \cdot \cos \omega \tau \cdot \cos \frac{m\pi}{a} x \cdot F_{2qy}(y) \cdot \sin \frac{p\pi}{l} z \cdot \frac{1}{\chi_{\perp mp}^2}, \\
 E_{zq}(x, y, z, \tau) &= \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{p=0}^{\infty} \left(\frac{m\pi}{a} \right) \cdot \frac{\vartheta_{0mnp}}{(\omega_{mnp}^2 - \omega^2)} \cdot \cos \omega \tau \cdot \sin \frac{m\pi}{a} x \cdot F_{2qy}(y) \cdot \cos \frac{p\pi}{l} z \cdot \frac{1}{\chi_{\perp mp}^2}, \\
 H_{xq}(x, y, z, \tau) &= - \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{p=0}^{\infty} \left(\frac{m\pi}{a} \right) \cdot \frac{\vartheta_{0mnp}}{(\omega_{mnp}^2 - \omega^2)} \cdot \sin \omega \tau \cdot \sin \frac{m\pi}{a} x \cdot F'_{2qy}(y) \cdot \cos \frac{p\pi}{l} z \cdot \frac{1}{\chi_{\perp mp}^2}, \\
 H_{zq}(x, y, z, \tau) &= \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{p=0}^{\infty} \left(\frac{p\pi}{l} \right) \cdot \frac{\vartheta_{0mnp}}{(\omega_{mnp}^2 - \omega^2)} \cdot \sin \omega \tau \cdot \cos \frac{m\pi}{a} x \cdot F'_{2qy}(y) \cdot \sin \frac{p\pi}{l} z \cdot \frac{1}{\chi_{\perp mp}^2},
 \end{aligned} \tag{28}$$

где

$$\varphi_{2qyn}(y) = \begin{cases} \sin K_{y1n} y; & \text{при } q = 1, \\ \sin K_{y2n}(b - y); & \text{при } q = 2. \end{cases} \tag{29}$$

Аналогично решается ВКЗЭ для поляризации E_y , H_y может быть представлена Е-типов колебаний. Уравнение Гельмгольца для Е-типов колебаний при продольной

$$\nabla^2 E_{qy}(x, y, z, \tau) + \varepsilon_q \mu \cdot \frac{\partial^2 E_{qy}(x, y, z, \tau)}{\partial \tau^2} = F_{1qy}(x, y, z, \tau), \tag{30}$$

где

$$F_{1qy}(x, y, z, \tau) = \begin{cases} \mu \frac{\partial j_{cm,y}}{\partial \tau} + \frac{1}{\varepsilon} \cdot \frac{\partial \rho_{cm,y}}{\partial y}; & \text{при } q = 2, \\ 0; & \text{при } q = 1, \end{cases} \tag{31}$$

при этом сторонние заряд и ток связаны между собой уравнением непрерывности, которое имеет вид [9]:

$$\operatorname{div} \vec{j}_{cm}(x, y, z, \tau) = - \frac{\partial \rho_{cm}(x, y, z, \tau)}{\partial \tau}. \tag{32}$$

Соотношение (32) позволяет выразить источник электрического поля в уравнении (30) через сторонний ток, так же как и в уравнении (15). Представим решение волнового уравнения (30) в виде

$$E_{yq}(x, y, z, \tau) = \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{p=0}^{\infty} T_{mnp}^*(\tau) \sin \frac{m\pi}{a} x \varphi_{1qy}(y) \sin \frac{p\pi}{l} z. \tag{33}$$

Подставляя (33) в (30), получим

$$\sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{p=0}^{\infty} (T_{mnp}^{*''}(\tau) + \omega_{mnp}^2 T_{mnp}^*(\tau)) \sin \frac{m\pi}{a} x \cdot \varphi_{1qy}(y) \sin \frac{p\pi}{l} z = F_{1qy}(x, y, z, \tau). \tag{34}$$

Используя обратное преобразование Фурье, получим

$$T_{mnp}^{*''}(\tau) + \omega_{mnp}^2 T_{mnp}^*(\tau) = \vartheta_{qmnp}^*(\tau), \tag{35}$$

где

$$\vartheta_{qmnp}^*(\tau) = \frac{1}{\varepsilon_q \mu} \cdot \frac{1}{(W_q^2)_{mnp}^*} \int_0^a \int_0^b \int_0^l (F_{1qy}(x, y, z, \tau))_{mnp} (\varphi_{1qy}(x, y, z, \tau))_{mnp} dx dy dz, \tag{36}$$

$$(W_q^2)_{mnp}^* = \int_0^a \int_0^b \int_0^l (\varphi_{2qy}^2(x, y, z, \tau))_{mnp}^* dx dy dz.$$

Здесь $(W_q)_{mnp}^*$ – норма собственных ортонормированных функций $(\phi_{1qy}(x, y, z))_{mnp}$.

При этом решение неоднородного уравне-

$$E_{yq}(x, y, z, \tau) = \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{p=0}^{\infty} \left(\frac{\vartheta_{0mnp}^*}{(\omega_{mnp}^2 - \omega^2)} \right) \cdot \cos \omega \tau \cdot \sin \frac{m\pi}{a} x \phi_{1qyn}(y) \cdot \sin \frac{p\pi}{l} z. \quad (37)$$

Используя принцип поляризационной двойственности, остальные компоненты

$$\begin{aligned} H_x &= -j \frac{\omega \epsilon}{\chi_{\perp}^2} \cdot \frac{\partial E_y}{\partial z}, & H_z &= j \frac{\omega \epsilon}{\chi_{\perp}^2} \cdot \frac{\partial E_y}{\partial x}, \\ E_x &= \frac{1}{\chi_{\perp}^2} \cdot \frac{\partial^2 E_y}{\partial x \partial y}, & E_z &= \frac{1}{\chi_{\perp}^2} \cdot \frac{\partial^2 E_y}{\partial z \partial y}. \end{aligned} \quad (38)$$

Подставляя решение (37) в соотношение (38), определим структуру электромагнитного поля Е-типов колебаний в

$$\begin{aligned} E_{xq}(x, y, z, \tau) &= \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{p=0}^{\infty} \frac{1}{\chi_{\perp mnp}^2} \left(\frac{m\pi}{a} \right) \cdot \left(\frac{\vartheta_{0mnp}^*}{(\omega_{mnp}^2 - \omega^2)} \right) \cdot \cos \omega \tau \cdot \cos \frac{m\pi}{a} x \phi'_{1qyn}(y) \cdot \sin \frac{p\pi}{l} z, \\ E_{zq}(x, y, z, \tau) &= \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{p=0}^{\infty} \frac{1}{\chi_{\perp mnp}^2} \left(\frac{p\pi}{l} \right) \cdot \left(\frac{\vartheta_{0mnp}^*}{(\omega_{mnp}^2 - \omega^2)} \right) \cdot \cos \omega \tau \cdot \sin \frac{m\pi}{a} x \phi'_{1qyn}(y) \cdot \cos \frac{p\pi}{l} z, \\ H_{xq}(x, y, z, \tau) &= \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{p=0}^{\infty} \frac{\omega \epsilon}{\chi_{\perp mnp}^2} \left(\frac{p\pi}{l} \right) \cdot \left(\frac{\vartheta_{0mnp}^*}{(\omega_{mnp}^2 - \omega^2)} \right) \cdot \sin \omega \tau \cdot \sin \frac{m\pi}{a} x \phi_{1qyn}(y) \cdot \cos \frac{p\pi}{l} z, \\ H_{zq}(x, y, z, \tau) &= - \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{p=0}^{\infty} \frac{\omega \epsilon}{\chi_{\perp mnp}^2} \left(\frac{m\pi}{a} \right) \cdot \left(\frac{\vartheta_{0mnp}^*}{(\omega_{mnp}^2 - \omega^2)} \right) \cdot \sin \omega \tau \cdot \cos \frac{m\pi}{a} x \phi_{1qyn}(y) \cdot \sin \frac{p\pi}{l} z, \end{aligned} \quad (39)$$

где

$$\phi_{1qn}(y) = \begin{cases} \cos K_{y1n} y, \\ \cos K_{y2n} (b - y), \end{cases} \quad \phi'_{1qn}(y) = \begin{cases} -K_{y2n} \sin K_{y2n} y; & \text{при } q = 1, \\ -K_{y1n} \sin K_{y1n} (b - y); & \text{при } q = 2. \end{cases} \quad (40)$$

Соотношения (37), (39) представляют собой решение неоднородной ВКЗЭ для Е-типов колебаний в прямоугольном резонаторе с диэлектрической пластиной, расположенной на нижней стенке резонатора при продольной поляризации ЭМ поля – E_y, H_y и позволяют определить совместно с решением ВКЗЭ для Н-типов (соотношения (26), (28)) пути оптимизации распределённых многощелевых систем возбуждения, направленные на достижение высокого уровня равномерности нагрева и КПД СВЧ печи.

Итак, получено аналитическое решение внутренней краевой задачи электродинамики для прямоугольного волновода, час-

ния (35), полученное методом Лагранжа, имеет вид

ЭМ поля определяются из уравнений Максвелла:

прямоугольном резонаторе, частично заполненном диэлектрическим материалом при продольной поляризации E_y, H_y :

точно заполненного прямоугольной диэлектрической пластиной, расположенной на нижней стенке резонатора при действии распределённой многощелевой системы возбуждения ЭМ поля. Решение получено при использовании принципа поляризационной двойственности и, в частности, путём применения продольной поляризации E_y, H_y , составляющие векторов напряжённости которой ортогональны поверхности раздела сред. Показано, что при данном виде поляризации решение ВКЗЭ может быть представлено в виде суперпозиции Е и Н-типов колебаний, определяемой на основе ортонормированных функций для частично заполненного диэлектрическим

материалом прямоугольного резонатора. Полученное решение можно использовать для оптимизации распределённых систем возбуждения ЭМ поля в рабочей камере

СВЧ печи, направленной на повышение равномерности нагрева и КПД без использования механического перемещения продукта (вращения поддона с продуктом).

ЛИТЕРАТУРА

1. **Марков Г.Т.** Возбуждение электромагнитных волн / Г.Т. Марков, А.Ф. Чаплин. М.: Энергия, 1967. 367 с.

2. **Коломейцев В.А.** Экспериментальное исследование уровня неравномерности нагрева диэлектрических материалов и поглощенной мощности в СВЧ-устройствах резонаторного типа / В.А. Коломейцев, Ю.А. Кузьмин, Д.Н. Никуйко, А.Э. Семёнов // Электромагнитные волны и электронные системы. 2013. Т. 18. № 12. С. 25-31.

3. **Пименов Ю.В.** Техническая электродинамика / Ю.В. Пименов, В.И. Вольман. М.: Радио и связь, 2000. 536 с.

4. **Коломейцев В.А.** Создание СВЧ нагревательных установок с многоцелевой системой возбуждения / В.А. Коломейцев, Д.Н. Козлов, А.Э. Семёнов // Успехи современной радиоэлектроники. 2008. № 9. С. 69-74.

5. **Григорьев А.Д.** Электродинамика и техника СВЧ / А.Д. Григорьев. М.: Высш. шк., 1990. 335 с.

6. **Коломейцев В.А.** Взаимодействие электромагнитных волн с поглощающими средами и специальные СВЧ системы равномерного нагрева: дис. ... д-ра техн. наук / В.А. Коломейцев. Саратов: СГТУ, 1999. 439 с.

7. **Анго А.** Математика для электро и радиоинженеров / А. Анго. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит-ры, 1965. 678 с.

8. **Егоров Ю.В.** Частично заполненные прямоугольные волноводы / Ю.В. Егоров. М.: Сов. радио, 1967. 216 с.

9. **Фальковский О.Н.** Техническая электродинамика / О.Н. Фальковский. М.: Связь, 1978. 432 с.

Коломейцев Вячеслав Александрович – заслуженный деятель науки РФ, доктор технических наук, профессор кафедры «Радиоэлектроника и телекоммуникации» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Тяжлов Виталий Семенович – кандидат физико-математических наук, доцент, заместитель генерального директора ЗАО «НПЦ «АЛМАЗ-ФАЗОТРОН»

Никуйко Дмитрий Николаевич – аспирант кафедры «Радиоэлектроника и телекоммуникации» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Дрогайцева Ольга Викторовна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Радиоэлектроника и телекоммуникации» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Vyacheslav A. Kolomeytsev – Dr. Sc., Professor, Honored Master of Sciences of the Russian Federation, Department of Radio Electronics and Telecommunications, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Vitaly S. Tyazhlov – PhD, Associate Professor, Deputy Director General of ZAO NPTs Almaz-Phazotron

Dmitry N. Nikuiko – Postgraduate, Department of Radioelectronics and Telecommunications, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Olga V. Drogaitseva – PhD, Associate Professor, Department of Radioelectronics and Telecommunications Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 10.09.14, принята к опубликованию 18.09.2014

УДК 621.7.044.4

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА АНАЛИЗА РАЗМЕРНОСТЕЙ К ИЗУЧЕНИЮ ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА

Е.В. Чеснокова, А.М. Калякин

A METHOD TO STUDY DIMENSIONAL ANALYSIS OF ELECTRO-HYDRAULIC EFFECT

E.V. Chesnokova, A.M. Kalyakin

Рассматривается применение метода анализа размерностей для решения задач, связанных с электрогидравлическим эффектом ввиду значительных трудностей при их аналитическом рассмотрении. Конкретное выражение приводится для скорости изменения давления в процессе электрогидравлического эффекта.

Ключевые слова: электрогидравлический эффект, метод анализа размерностей, скорость, давление

The paper considers a method for dimension analysis to find solutions relating electro-hydraulic effect, due to significant challenges connected with their analytical study. The authors propose an expression to the rate of pressure changes in the process of electrohydraulic effect.

Keywords: electro-hydraulic effect, dimension analysis method, velocity, pressure

Электрогидравлические преобразователи энергии, основанные на высоковольтном разряде в жидкости, нашли широкое применение в машиностроении, перерабатывающих отраслях, приборостроении [1]. В этих областях технологические объекты, находящиеся в зоне разряда, подвергаются значительным силовым воздействиям (давлениям), от интенсивности которых и зависит эффективность технологических процессов. В связи с этим актуальным является определение силовых и энергетических характеристик электрогидравлических преобразователей.

Ввиду значительных трудностей при аналитическом рассмотрении задач, связанных с электрогидравлическим эффектом (ЭГЭ), авторами было решено применить метод анализа размерностей (МАР). Для установления основ физического со-

держания явления была использована монография [1]. Обычно известны энергия заряда конденсатора и длина искрового промежутка. Энергия, запасенная в конденсаторе, равна

$$E = \frac{1}{2} C \varphi_{12}^2,$$

где C – емкость конденсатора, φ_{12} – разность потенциалов между пластинами.

Одной из основных величин, требующих определения, является давление p , при этом необходимо учитывать, что ЭГЭ – процесс нестационарный.

Предположим, что E и p удовлетворяют соотношению

$$E = f(p, V, l), \quad (1)$$

где p – давление, V – скорость движения жидкости, l – расстояние от искрового промежутка до рассматриваемой точки.

Однако МАР показывает, что скорость в (1) не входит, а (1) имеет вид

$$E = K L^3 p, \quad (2)$$

где K – безразмерный постоянный множитель, L – расстояние между электродами.

Но (2) не отвечает физике явления, так как ЭГЭ в воздухе, например, не существует, а при разряде в жидкости скорость вблизи разряда должна существовать.

Другое соотношение

$$p = f(M, E, l, \dots), \quad (3)$$

где M – модуль упругости жидкости, не может быть получено МАР, так как в обеих частях соотношения (3) присутствуют величины одинаковой размерности (p и M), а такие зависимости не могут быть получены МАР [2].

Соотношения, связывающие E , p , V , найдем следующим образом. Сначала определим гидравлические параметры в зависимости от энергии конденсатора, а затем найдем давление в данной точке.

На первой стадии определяем скорость изменения объема зоны разряда в жидкости с учетом модуля упругости M , то есть найдем вид зависимости

$$\frac{dw}{dt} = f(N, M, \rho), \quad (4)$$

где ρ – плотность жидкости, N – мощность ЭГЭ, w – объем зоны разряда.

После применения стандартной процедуры [2] получаем

$$\frac{dw}{dt} = \frac{N}{M}. \quad (5)$$

На второй стадии решения примем во внимание уравнение неразрывности. Оно связывает изменение плотности ρ во времени, скорость и расстояние [3]:

$$\frac{d\rho}{dt} = -m \frac{1}{w^2} \frac{dw}{dt}, \quad (6)$$

где m – масса жидкости в цилиндре искрового разряда ($m = \text{const}$).

Как известно, МАР предполагает известную физику явления. В нашем случае представления о физических процессах при ЭГЭ не совсем полные, но очевидно, что давление должно уменьшаться с расстоянием.

Введем в качестве искомой величины скорость изменения давления во времени и представим ее в следующем виде:

$$\frac{dp}{dt} = f\left(\frac{d\rho}{dt}, r, V\right), \quad (7)$$

где dp/dt – изменение плотности во времени, r – расстояние, V – скорость распространения волны изменения давления.

Применение стандартной процедуры МАР [2] показывает, что аргумент r лишний и он не входит в (7), так что

$$\frac{dp}{dt} = K \frac{d\rho}{dt} V^2. \quad (8)$$

Подставляя в (8) выражения (6) и (5), получаем

$$\frac{dp}{dt} = K V^2 m \frac{1}{w^2} \frac{N}{M}, \quad (9)$$

где безразмерная постоянная величина K может принимать как положительные, так и отрицательные значения.

Таким образом, полученное выражение для скорости изменения давления в процессе ЭГЭ позволит определять силовые и энергетические характеристики электрогидравлических преобразователей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Юткин Л.А. Электрогидравлический эффект и его применение в промышленности / Л.А. Юткин/ Л.: Машиностроение. Ленингр. отд., 1986. 253 с.
2. Калякин А.М. Дополнение к методу анализа размерностей в задачах гидравлики / А.М. Калякин, Е.В. Чеснокова // Ин-

женерно-строительный журнал. 2013. № 2. С. 41-47.

3. Ландау Л.Д. Гидродинамика / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц // Теоретическая физика: т. VI. М.: Наука. Гл. ред. физмат. лит., 1986. 736 с.

Чеснокова Елена Вадимовна – ассистент кафедры «Теплогазоснабжение, вентиляция, водообеспечение и прикладная гидродинамика» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Калякин Александр Михайлович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Теплогазоснабжение, вентиляция, водообеспечение и прикладная гидродинамика» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Elena V. Chesnokova – Assistant Lecturer, Department of Heat, Ventilation, Water Supply and Applied Fluid Dynamics, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Alexander M. Kalyakin – Ph.D., Associate Professor, Department of Heat, Ventilation, Water Supply and Applied Fluid Dynamics, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 08.09.14, принята к опубликованию 18.09.2014

К СВЕДЕНИЮ ЧИТАТЕЛЕЙ!

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

ИЗМЕРЕНИЯ

УДК 621.365.5

СВЧ АНАЛИЗАТОРЫ ФРАКЦИОННОГО СОСТАВА СЫРОЙ НЕФТИ: АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ, ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРАВЛЕНИЙ, МЕТОДОВ И СРЕДСТВ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ

Р.Р. Самигуллин, О.Г. Морозов, Г.А. Морозов, Д.А. Веденькин,
А.Р. Насыбуллин

MICROWAVE ANALYSERS INTO FRACTIONAL COMPOSITION OF CRUDE OIL: ANALYSIS OF OILS, ORIENTATION, METHODS AND TECHNIQUES FOR IMPROVEMENT

R.R. Samigullin, O.G. Morozov, G.A. Morozov, D.A. Vedenkin,
A.R. Nasybullin

Представлен анализ методов и средств, примененных в анализаторах обводненности сырой нефти. Показаны их возможности, преимущества и недостатки в решении задач в процессе СВЧ обработки и фракционной регистрации результатов.

Ключевые слова: сырая нефть, СВЧ анализатор, обводненность нефти, резонансный датчик, комплексная диэлектрическая проницаемость, добротность

Добыча сырой нефти (СН) и ее углеводородных производных зачастую сопровождается подъемом на поверхность многих полезных и вредных веществ, в том числе содержит в себе попутный газ, механические примеси и пластовую воду, в которой растворены различные соли, чаще всего хлориды натрия, кальция и магния, реже – карбонаты и сульфаты. Добыча в начальный период эксплуатации месторождения обычно характеризуется как безводная или малообводненная, но по мере добычи обводненность СН увеличивается и достигает 90-98%. Очевидно, что такую СН, содержащую к тому же разнообразные

The paper presents an analysis of the methods and tools applied to analyzers of water cut crude oil. Analysis shows the feasibility, advantages and disadvantages of the methods when applied in microwave processing and fractional data analysis recording.

Keywords: crude oil, microwave analyzer, water cut, resonance sensor, complex dielectric constant, quality factor

компоненты, нельзя транспортировать и перерабатывать без тщательной промышленной подготовки. В этой связи для добывающих, перерабатывающих и транспортирующих товарную нефть компаний возникает актуальная задача непрерывного автоматизированного измерения объема нефти и сопутствующих ей воды, газа и других компонент.

Ряд фирм предлагают различные как отечественные (влагомеры ВСН и ВИЛ (Бугульма), ВСН11 и ВТН (Саратов)), так и зарубежные (влагомеры фирм «Agar», «Phase Dynamics», «Fluent» и др.) измерительные устройства и комплексы. Но все

они имеют значительные габариты, вес и стоимость, что не позволяет широко применять эти комплексы. В данной работе представлен опыт разработки основных элементов измерительного устройства – микроволнового анализатора обводненности сырой нефти. Измерительный микроволновый анализатор предназначен для автоматизированного измерения фаз нефти и воды, содержащихся в добываемой и транспортируемой сырой нефти в лабораторных условиях.

Анализатор содержит канал воздействия и канал мониторинга [1]. В первом организуется целенаправленное физическое воздействие на репрезентативную пробу СН электромагнитным полем (ЭМП) СВЧ диапазона, а во втором осуществляется последующее прямое или косвенное измерение (контроль) характеристик и свойств пробы СН, получаемых в процессе обработки, сравнение их с заданными, и выработка управляющего воздействия для фиксации или модификации параметров воздействия. Для обработки СН наиболее эффективным физическим воздействием по сравнению с другими является воздействие излучением СВЧ диапазона [2, 3]. При этом, оперируя режимами СВЧ воздействия на пробу СН, можно реализовать различные виды обработки, например: сепарация (деэмульсификация) [1, 4, 5] (при данном виде обработки длительность СВЧ воздействия непродолжительная и достигает 15-30 минут при малой или средней мощности СВЧ воздействия) и дистилляция (обезвоживание) [6] (данный вид СВЧ обработки характеризуется продолжительностью воздействия до 30-60 минут и высокой мощностью).

Проведенные нами исследования воздействия ЭМП СВЧ диапазона на различные материалы показали, что в силу ряда принципиальных эффектов, приобретаемых обрабатываемой средой в ходе обработки, применение только лишь одного метода измерения характеристик не обеспечивает 100% уверенности в правильности получаемых результатов. К тому же многие из них либо сложны в реализации и внедрении

в структуру анализаторов, либо физически не реализуемы, либо финансово нецелесообразны. В [7] перечислены наиболее предпочтительные методы для построения канала измерения и регистрации в СВЧ анализаторах, основанные на применении оптоэлектронных информационных технологий (ОИТ). К ОИТ относят такие технологии как компьютерные и микропроцессорные системы обработки информации, полученной с помощью оптических, лазерных, оптоволоконных методов и средств измерений и зарегистрированной с помощью технологий оптоэлектронных преобразований. В частности, для контроля процессов обработки СН и углеводородосодержащих сред находят применение системы технического зрения (СТЗ), лазерной турбидометрии и нефелометрии, основанных на методах анализа 2D, 3D и многоракурсных изображений [8], радиочастотные методы контроля свойств обрабатываемых материалов. На современном этапе все больше находят применение волоконно-оптические технологии.

Сепарация. Метод СВЧ сепарации проб СН [1, 4] обладает высокой оперативностью (до 5-15 минут на сепарацию представительной пробы в 0,5-1 л) и обеспечивает сепарацию проб различной обводненности (от 1 до 99%).

При использовании в каналах фиксации и регистрации высокоточных СТЗ для определения высоты столба разделенных в ходе сепарации компонент СН по изображению мерной емкости относительная погрешность измерений может достигать долей процента.

Рассмотрим методы и средства обеспечения точности показателей измерений канала регистрации. Для этого рассмотрим более подробно структуру функционирования микроволнового анализатора, используемые методы и средства измерений, регистрации показателей и их анализа, а также критерии, приводящие к снижению точности или к их недостоверности.

В первых прототипах анализатора обводненности СН канал регистрации был реализован на базе метода видеорегистра-

ции с последующим построчным анализом в микропроцессорном блоке и выдачей контрольной информации на индикатор, либо передачей на центральный пункт в диспетчерскую. В ходе предварительных испытаний анализатора были выявлены недостатки, приводящие к недостоверности получаемых показателей, которые были проанализированы и классифицированы. Впоследствии для их устранения предложены следующие подходы.

Учитывая случайный характер физико-химического состава СН, полученный после сепарации результат не кажется однозначным и требует дополнительной проработки: неодинаковое заполнение объема контрольного резервуара пробой сырой нефти, наличие в ней окклюдированного газа и вызванная этим нелинейность границ раздел между компонентами после сепарации. Кроме того, необходимо рассмотреть вопрос построения оптического канала, обеспечивающего минимальный уровень засветок и помех при считывании информации о количественном соотношении компонент. Указанные факторы при микроволновой сепарации оказывают значительное влияние на ее качество и могут привести к неполному разделению СН на компоненты, что приведет к соответствующей погрешности измерений.

Предложенные в [9-11] решения для устранения и учета окклюдированного газа заключаются в предварительном взвешивании пробы СН и ее разгазирования, а также использования метода видеоизмерений для фиксации уровня заполнения пробой контрольного резервуара.

Среди возможных решений, обеспечивающих выравнивание силы поверхностного натяжения нефти по сечению контрольного резервуара, предложено использовать специальной формы контрольные резервуары [11-13].

В [12] представлен анализ основных погрешностей СТЗ для случаев «идеальной» и «неидеальной» сепарации пробы СН, отличающихся четкой границей раздела «нефть – вода» и наличием межфазного слоя, свидетельствующего о незавершенности

технологического процесса. Там же показано, что в зависимости от случайного характера проявления факторов, влияющих на характер границ раздела сред, возможны различные ситуации, но в общем случае обводненность межфазного слоя зарегистрирована как функция изменения интенсивности света по высоте межфазного слоя и определяется по закону Бугера-Ламберта-Бера. Исходя из анализа высоты и функции обводненности межфазного слоя СН, можно сделать вывод о степени завершенности процесса ее сепарации на компоненты. По зависимости скорости уменьшения высоты межфазного слоя от высоты дисперсной фазы воды (ДФВ), являющейся «идеальной» нагрузкой для СВЧ излучения, определена высота ДФВ, необходимая для согласования СВЧ генератора и пробы СН. При превышении ДФВ может быть слита в другую мерную емкость (например, как в [14]) вне воздействующего СВЧ поля. В этом случае скорость сепарации межфазного слоя увеличивается на 30-40%, а время, необходимое для полной сепарации, уменьшается на 10-15%.

При необходимости может быть проведен совместный анализ пробы в основном и резервном резервуарах на концентрацию нефти в отделенной воде. В этом случае могут быть использованы ОИТ, основанные на методах лазерной нефелометрии и регистрирующих многоакурсных СТЗ или многоугловых детекторов [15].

Дистилляция. Структуру дистиллятора СН в микроволновом анализаторе [6, 16] можно условно разбить на канал воздействия, реализованного на источнике СВЧ излучения, модернизированный прибор Дино-Старка для азеотропной дистилляции [16], канал мониторинга, использующий метод видеоизмерений [1]. По сравнению с традиционной структурой приведенная структура построения дистиллятора имеет следующие достоинства: эффективная дистилляция по показателю «энергия – время» (в традиционной время анализа может составлять ~ 3 часа и выше, в микроволновом – не более 1,5 часа), высокоточный канал количественного анали-

за (зависит от разрешающих способностей применяемых видеосредств), экологическая чистота. В ходе испытаний данного вида дистиллятора были выявлены следующие недостатки.

1. Так как интенсивность нагревания (расслоение и дистилляция) пробы СН высокая, наблюдались выбросы водонефтяных фракций в холодильник и неизбежное их попадание в контрольный резервуар. Была проанализирована зависимость мощности выбросов от процентных содержаний ДФВ и ДФН в пробе и выявлено, что чем больше ДФН, тем сильнее выбросы.

Для предотвращения выбросов были предложены следующие подходы: применение более широких сосудов в качестве основного резервуара для нивелирования толщин слоев воды – нефти, дополнительных пористых материалов, для уменьшения и распределения мощности выброса на более мелкие, а также облегчения испарения ДФВ; согласование интенсивности испарения ДФВ и охлаждающей площади холодильника.

2. Для СТЗ граница между ДФВ и растворителем получается слабоконтрастной, нечеткой и требует применения более дорогих устройств визуальной регистрации.

Для устранения этой проблемы предложены: специальные методы обработки полутоновых и слабоконтрастных изображений [12, 18]; может быть использован известный алгоритм определения наличия пузырькового кипения при решении уравнения корреляции сигнала двух соседних строк развертки для оценки коэффициентов попарной корреляции; при анализе цветного изображения с камеры СТЗ решается задача изменения цвета, и в микропроцессорном блоке решается колориметрическое уравнение.

Перечисленные негативные факторы и предложенные пути их устранения существенно усложняют структуру как сепарационных, так и дистилляционных анализаторов. Дополнительные устройства, введенные в каналы обработки пробы СН и мониторинга, усложняют работу оператора при подготовке и проведению анализа,

увеличивают стоимость конечного прибора и необходимое время анализа.

Обработка пробы СН (сепарация, дистилляция) неизбежно приводит к изменению ее свойств, и, как следствие, происходит изменение комплексной проводимости на СВЧ, а также изменяются параметры резонаторов. Таким образом, контроль за изменением комплексной проводимости обрабатываемой пробы и параметров резонаторов может быть использован для мониторинга как самого процесса, так и качества обработки, позволяя ввести дополнительные параметры измерения и управления. Наиболее перспективным методом дополнительного контроля параметров является применение радиочастотных методов контроля изменения диэлектрических свойств обрабатываемых материалов.

В [19] впервые представлен метод для анализа модуля и фазы комплексной проводимости. Метод основан на принципах рефлектометрии и сравнении амплитудных и фазовых характеристик нагруженного и ненагруженного объемного резонансного датчика, что позволяет в конечном итоге получить более детальную информацию о параметрах и свойствах обрабатываемой среды.

Другой разновидностью резонансного датчика является решетка Брэгга, сформированная в коаксиальном кабеле [20]. Так, в [21] предлагается использовать в качестве измерительного преобразователя решетку Брэгга на коаксиальном кабеле, позволяющую обеспечивать контроль диэлектрической проницаемости термопластичных и термореактивных полимеров. По изменению диэлектрической проницаемости судят о стадии процессов полимеризации и деполимеризации, их завершенности и качестве СВЧ обработки. Для использования в сепарационных и дистилляционных СВЧ анализаторах недостаток применения описанного датчика видится в многочисленности технологических отверстий, в которых могут оставаться части среды от предыдущих проб. Такой недостаток можно частично устранить дополнительным внешним слоем фторопластовой

пленки, но при этом снижается разрешающая способность датчика.

Как один из вариантов повышения достоверности возможно введение в структуру анализатора обводненности СН дополнительного критерия проверки, основанного на применении резонансного метода измерения параметров физических полей [22].

Например, в ходе процесса дистилляции дисперсная фаза, соответствующая воде, конденсируется в мерной пробирке. Параллельно с данным процессом происходит сопряженное с ними изменение комплексной диэлектрической проницаемости (КДП) пробы СН, находящегося в рабочей СВЧ камере. При этом, если проводить непрерывный мониторинг и сравнение таких параметров как КДП, тангенс угла потерь, K_{cmU} , добротность, одновременно в двух резонансных структурах (первая – рабочая СВЧ камера с репрезентативной пробой СН, вторая – мерная емкость с конденсированной водой) с эталонными, заложенными в память вычислительного блока, можно существенно повысить точность определения завершенности процесса СВЧ обработки пробы СН и повысить эффективность обработки. Такой прием также может быть использован и

для сепарационных анализаторах, в которых применяется слив водяной компоненты в дополнительную емкость.

Другое направление улучшения касается подсистемы обработки пробы СН. Большинство исследователей рассматривают применение энергии ЭМП СВЧ в обработке с позиции передачи энергии электромагнитного поля СВЧ диапазона практически по всему объему обрабатываемого материала без потерь. Но при этом за полем внимания исследователей остаются такие аспекты как, например, возможность применения различных видов модуляции воздействующего сигнала (АМ, ЧМ и т.д.) и модулирующих сигналов. Данное функциональное расширение позволит более эффективно использовать энергию СВЧ поля, появляется возможность возникновения эффекта «информационного» электродинамического воздействия [23], а в некоторых задачах позволит многократно уменьшить время процессов обработки.

В настоящее время ведутся исследования применимости и целесообразности двух последних описанных направлений, и первые результаты дали положительный результат.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Морозов Г.А.** СВЧ-модули контроля обводненности углеводородосодержащих эмульсий / Г.А. Морозов и др. // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КрыМиКо'2003): Матер. 13-й Междунар. Крымской микроволновой конф. Севастополь: Вебер, 2003. С. 712-713.

2. **Thuery J.** MICROWAVES: Industrial, Scientific and Medical Applications / J. Thuery // Artech House Boston London, 1992. 673 p.

3. Низкоинтенсивные СВЧ-технологии (проблемы и реализации) / под ред. Г.А. Морозова и Ю.Е. Седельникова. М.: Радиотехника. 2003. 112 с.

4. **Морозов Г.А.** Оценка метрологических характеристик автоматизированных микроволновых модулей для анализа состава сырой нефти / Г.А. Морозов и др. // Фи-

зика волновых процессов и радиотехнические системы. 2004. Т. 7. № 1. С. 76-78.

5. **Morozov G.A.** Microwave installation for percent determination of extracted crude oil composition / G.A. Morozov // 44th Annual Microwave Power Symposium. Denver, Colorado, 2010. P. 137-140.

6. **Морозов О.Г.** Микроволновый анализатор определения фракционного состава сырой нефти / О.Г. Морозов, Р.Р. Самигуллин, Д.Р. Хазиев // Физика и технические приложения волновых процессов: тез. докл. V Междунар. НТК. Самара: СКИ. 2006. С. 241-243.

7. **Морозов О.Г.** Контроль качества обработки углеводородов и их производных в СВЧ технологических установках на основе оптоэлектронных информационных технологий / О.Г. Морозов, Р.Р. Самигул-

лин // Инфокоммуникационные технологии. 2012. Т. 10. № 3. С. 54-60.

8. **Морозов О.Г.** Метод повышения точности и достоверности определения состава сырой нефти в микроволновых сепарационных датчиках / О.Г. Морозов, А.Р. Насыбуллин, Р.Р. Самигуллин // Физика и технические приложения волновых процессов: тез. докл. VIII Междунар. НТК. СПб.: Политехника, 2009.

9. Пат. 2212664 Российская Федерация МПК7 G01N33/26, 21/59. Способ анализа состава сырой нефти и устройство для его осуществления / Галимов М.Р., Морозов О.Г., Морозов Г.А. и др.; опубл. 20.09.2003.

10. Пат. 2296990 Российская Федерация МПК G01N33/28. Устройство для анализа состава сырой нефти / Морозов О.Г., Морозов Г.А., Самигуллин Р.Р. и др.; опубл. 10.04.2007.

11. Пат. 2284029 Российская Федерация МПК G01N25/00. Устройство для анализа состава сырой нефти / Морозов О.Г., Морозов Г.А., Самигуллин Р.Р. и др.; опубл. 20.09.2006.

12. **Аверин Е.А.** Лабораторные оптоэлектронные средства анализа жидких дисперсных систем / Е.А. Аверин, Г.А. Морозов, О.Г. Морозов, А.Р. Насыбуллин, Р.Р. Самигуллин // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2010. Т. 12 (33). № 4 (3). С. 660-663.

13. **Анфиногентов В.И.** Математическое моделирование процессов воздействия микроволнового ЭМП на диэлектрические структуры в цилиндрических и коаксиальных сепарационных объемах / В.И. Анфиногентов, Г.А. Морозов, О.Г. Морозов, Р.Р. Самигуллин // Физика и технические приложения волновых процессов: тез. докл. V Междунар. НТК. Самара: СКИ, 2006. С. 243-246.

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

15. **Морозов О.Г.** Детектор концентрации нефти в воде / О.Г. Морозов, А.В. Мягченков, В.А. Турпитко // Физика и технические приложения волновых процессов: тез. докл. V Междунар. НТК: Приложение к журналу «Физика и технические приложения волновых процессов» / под ред. В.А. Неганова, Г.П. Ярового. Самара: Изд-во СамГТУ, 2006. С. 267-268.

16. **Морозов О.Г.** Микроволновые сепарационные и дистилляционные датчики обводненности сырой нефти / О.Г. Морозов, Р.Р. Самигуллин, Д.Р. Хазиев // Современные проблемы радиоэлектроники: сб. науч. ст. Красноярск: Сибирский федеральный ун-т; Политехн. ин-т, 2007. 690 с.

17. **ГОСТ 2477-65.** Нефть и нефтепродукты. Методы определения содержания воды.

18. **Аверин Е.А.** Алгоритм поиска разрывов яркости в видеометрических системах определения уровня жидких сред / Е.А. Аверин, Р.Р. Самигуллин // Прикладная электродинамика, фотоника и живые системы: материалы Междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых, аспирантов и студентов-2013. Казань: Новое знание, 2013. С. 32-33.

19. US Patent appl. publ. № US 2011/0043223. Non invasive method for monitoring the curing process of a thermoset plastic material through the use of microwaves / A.J.C. Marin et al. Published 24.02.2011. 21 p.

20. **Tao Wei** Coaxial cable Bragg grating / Tao Wei, Songping Wu, Jie Huang et al. // Appl. Phys. Lett. 2011. Vol. 99. 113517.

21. **Морозов Г.А.** Резонансные методы мониторинга технологических процессов отверждения полимеров в функционально адаптивных СВЧ-реакторах / Г.А. Морозов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2012. Т. 14. № 1 (2). С. 568-572.

22. Пат. 92180 Российская Федерация МПК7 G01/K 11/32. Устройство для измерения параметров физических полей / О.Г. Морозов, Г.А. Морозов, В.В. Куревин и др.; опубл. 10.03.2010. Бюл. № 7. 2 с.

23. Нетепловое действие СВЧ электромагнитного поля на диэлектрические объекты / С. Г. Калганова // Электротехноло-

гические СВЧ установки: межвуз. науч. сб. / СГТУ. Саратов, 2000. С. 53-57.

Самигуллин Рустем Разяпович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Радиофотоника и микроволновые технологии» Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева (КАИ)

Rustem R. Samigullin – Ph.D., Associate Professor, Department of Radiophotonics and Microwave Technologies, A.N. Tupolev National Research Technical University of Kazan

Морозов Олег Геннадьевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Радиофотоника и микроволновые технологии» Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева (КАИ), директор НИИ Прикладной электродинамики, фотоники и живых систем

Oleg G. Morozov – Dr.Sc., Professor, Head: Department of Radiophotonics and Microwave Technologies, A.N. Tupolev National Research Technical University of Kazan, Director: Scientific and Research Institute for Applied Electrodynamics, Photonics and Living Systems

Морозов Геннадий Александрович – доктор технических наук, профессор кафедры «Радиоэлектронные и телекоммуникационные системы» Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева (КАИ)

Gennadiy A. Morozov – Dr.Sc., Professor, Department of Electronic and Telecommunication Systems, A.N. Tupolev National Research Technical University of Kazan

Веденькин Денис Андреевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Радиофотоника и микроволновые технологии» Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева (КАИ)

Denis A. Vedenkin – Ph.D., Associate Professor, Department of Radiophotonics and Microwave Technologies, A.N. Tupolev National Research Technical University of Kazan

Насыбуллин Айдар Ревкатович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Радиофотоника и микроволновые технологии» Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева (КАИ)

Aidar R. Nasybullin – Ph.D., Associate Professor, Department of Radiophotonics and Microwave Technologies, A.N. Tupolev National Research Technical University of Kazan

Статья поступила в редакцию 06.09.14, принята к опубликованию 18.09.14

СОЦИАЛЬНЫЙ АСПЕКТ

УДК 621.365.5

ИНТЕРЕСУЮТСЯ ЛИ СТУДЕНТЫ-ЭЛЕКТРИКИ НАУЧНОЙ РАБОТОЙ?

Е.М. Гришина, Ю.С. Архангельский

DO ELECTRICAL ENGINEERING STUDENTS TAKE AN INTEREST IN RESEARCH WORK?

E.M. Grishina, Yu.S. Arkhangelskiy

Приведены результаты опроса студентов-электриков о их желании вести научную работу.

Ключевые слова: студенты, электрики, научная работа

The paper provides the survey findings relating electrical engineering students as to their motivation to do research work.

Keywords: students, electrical engineers, research work

Научная работа – важный компонент обучения студентов-электриков. Так, в учебном плане по направлению «Электроэнергетика и электротехника» энергетического факультета Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А. в индивидуальных планах преподавателей электрических кафедр отдельной строкой указана так называемая научно-практическая работа студентов (НПР). Студенты под руководством и под контролем преподавателей учатся анализировать ситуацию, формулировать проблему, ставить и решать научно-технические и опытно-конструкторские задачи, анализировать результаты работы и делать выводы. Они имеют возможность участвовать в научной работе кафедры по грантам, программам, по темам с внутри-вузовским финансированием. Студенты участвуют в регулярно проводимых конкурсах «УМНИК». Преподаватели ведут индивидуальную работу со студентами, стараясь отобрать кандидатов в аспирантуру. Результаты своей научной работы

студенты могут опубликовывать в научно-технических журналах, в том числе «Вопросы электротехнологии», в сборниках научных трудов кафедр.

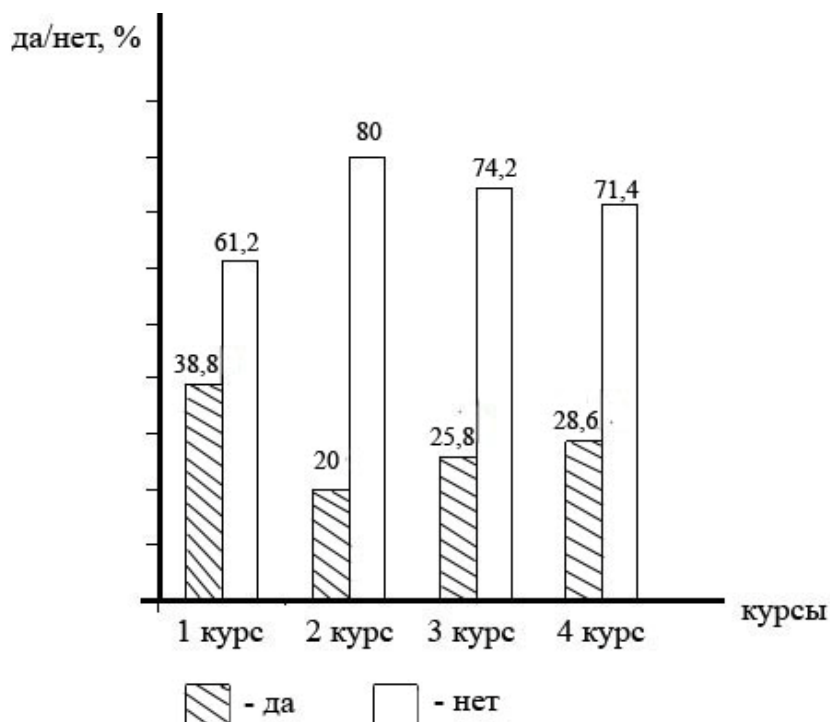
Однако в последние годы преподаватели отмечают, что интерес у студентов к научной работе уменьшается, все труднее подобрать достойного кандидата в аспирантуру. На рисунке приведены результаты проведенного нами в 2013/2014 учебном году опроса студентов-электриков СГТУ, хотят ли они связать свое будущее с наукой (да, нет).

Результаты опроса и личный опыт работы со студентами разных курсов позволяют нам отметить, что на первом курсе из года в год достаточно много (без малого 40%) желающих посвятить себя науке, но года учебы студентам достаточно, чтобы они убедились на личном опыте, какое это непростое дело – познавать уже накопленные научные знания и практический опыт. Число желающих посвятить себя науке падает в два раза (20%), и на третьем и четвертом курсах число желающих рабо-

тять в науке медленно нарастает, не достигая 30% (28,6% на четвертом курсе).

В разговорах студенты открыто говорят о том, почему они хотят работать на производстве. Таких причин две. Во-первых, студенты к старшим курсам осведомлены о уровне оплаты труда на предприятиях и в вузах. Они считают, что в науке можно

заработать столько же, сколько на производстве, только достигнув больших успехов. Для этого надо защитить кандидатскую и докторскую диссертации, а на это уйдут годы. Во-вторых, студенты знают о прогнозах, предсказывающих сокращение числа технических университетов.



Результаты опроса студентов-электриков СГТУ в 2013/2014 учебном году по вопросу, хотят ли они связать свое будущее с наукой

На наш взгляд, вузам требуется серьезная, профессионально разработанная программа внеаудиторной работы со студен-

тами-электриками и, в первую очередь, с теми, у кого выявлены способности к научной работе.

Гришина Екатерина Михайловна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматизированные электротехнологические установки и системы» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Ekaterina M. Grishina – Ph.D., Associate Professor, Department of Automated Electrotechnical Plants and Systems, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

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

Yuri S. Arkhangelskiy – Dr.Sc., Professor, Honoured Master of Sciences of the Russian Federation, Department of Automated Electrotechnical Plants and Systems, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 12.09.14, принята к опубликованию 18.09.2014

Международная научно-техническая конференция «Актуальные проблемы электронного приборостроения» (АПЭП-2014)

25-26 сентября 2014 года в Саратовском государственном техническом университете имени Гагарина Ю.А. состоялась 11-я Международная научно-техническая конференция «Актуальные проблемы электронного приборостроения» (АПЭП-2014). Организаторы конференции: Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., Российское научно-техническое общество радиотехники, электроники и связи имени А.С. Попова, НПЦ «ЭлМа-Т» СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратовское отделение IEEE, MTT/ED/AP/CPMT.

В рамках конференции работали секции:

- микроволновая электроника, вакуумная микроэлектроника и наноэлектроника;*
- электродинамика и микроволновая техника;*
- технологии производства электронных приборов, силовая электроника, прикладные аспекты электронного приборостроения.*

В докладах приведены результаты научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ в области СВЧ электроники, электродинамики и техники СВЧ, полупроводниковой электроники, наноэлектроники, электроэнергетики, систем измерительной техники и СВЧ электротехнологии.

Материалы конференции опубликованы в сборнике «Актуальные проблемы электронного приборостроения» (АПЭП-2014), изданном в двух томах. В первом томе собраны доклады, представленные на первой и второй секциях, во втором томе – на третьей секции.

Некоторые из этих докладов, по мнению редакции научно-технического журнала «Вопросы электротехнологии», представляющие интерес для читателей журнала, с согласия авторов публикуются в нашем журнале.

ФАЗОСТАБИЛЬНАЯ ЛБВ**Б.К. Сивяков, А.Г. Кудряшов****PHASE-STABLE TWT****B.K. Sivyakov, A.G. Kudryashov**

Предложен способ устранения недостатка усилительных ЛБВ – высокая фазовая чувствительность к изменению напряжения на замедляющей системе путем введения в замедляющую систему секции, работающей в крестатронном режиме.

Ключевые слова: фазостабильная ЛБВ, нестабильность сигнала, секции, несинхронное взаимодействие

Недостатком усилительных ЛБВ является высокая чувствительность фазы их выходного сигнала к изменению питающих напряжений и, прежде всего, напряжения пучка [1]. Это либо ограничивает область применения прибора, либо обуславливает жесткие требования к стабильности и пульсациям напряжения источников питания в различных радиоэлектронных системах и, прежде всего, в радиолокации, что увеличивает массу и габариты источников питания и усложняет их конструкцию.

Для устранения этого недостатка в [2] было предложено использовать в конструкции ЛБВ секции так называемого несинхронного взаимодействия, которые обладают аномальными (противоположными по знаку) по сравнению с усилительным режимом зависимостями фазы сигнала от напряжения пучка.

Очевидно, что цепочка из двух ЛБВ («прозрачная» ЛБВ в несинхронном режиме – усилительная ЛБВ) может обладать незначительной амплитудной и фазовой чувствительностью, и столь же очевидно, что такое устройство громоздко, дорого и не имеет практической перспективы. Поэтому целесообразно рассматривать только

The new method is proposed to eliminate the defects with amplification TWT, including high phase sensitivity to voltage variations in slow-wave structures by introducing into the system units operating in the crestatron mode.

Keywords: phase-stable TWT, instability of the signal, section, non-synchronous interaction

конструкции моно-ЛБВ, в которых одна из секций реализует режим несинхронного взаимодействия и за счет аномальности амплитудных и фазовых характеристик компенсирует нестабильность сигнала в усилительных секциях. Проще всего такую секцию располагать во входной части ЛБВ и тогда, учитывая, что ВЧ-информацию содержит как поле, так и сгруппированный ток, можно предложить три варианта конструкции ЛБВ и усилителей на их основе (рис. 1). Первый вариант базируется на том, что информация содержится в сгруппированном токе пучка, второй – в ВЧ-поле и третий – как в поле, так и в токе.

Эффективность каждой схемы может быть определена только после изучения амплитудных и фазовых характеристик ЛБВ в несинхронных режимах работы. В работе исследовался третий вариант как содержащий наименьшее число дополнительных элементов и поэтому наиболее просто реализуемый.

Исследования показали [2-4], что, если входная секция ЛБВ содержит участок несинхронного взаимодействия, то в некотором интервале изменения напряжения пучка наблюдается постоянство фазы выходного сигнала. Подробно авторами [2, 3]

исследовался только вариант конструкции, в котором несинхронный участок был настроен на режим частичного подавления, поскольку он обладает большими значениями крутизны и общего фазового сдвига аномальной характеристики. Результаты расчетов показали, что в этом случае на-

блюдается критичность к выбору параметров, прежде всего компенсирующей секции, уменьшается полоса усиливаемых частот, существенно возрастает геометрическая длина прибора по сравнению с обычной ЛБВ с тем же коэффициентом усиления.

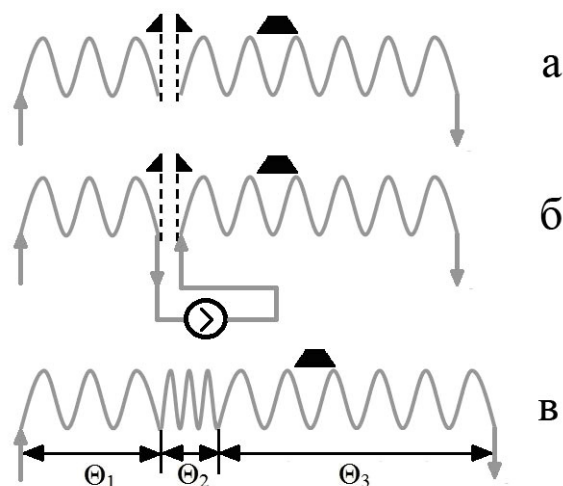


Рис. 1. Схематическое изображение возможных вариантов пространства взаимодействия ЛБВ с секцией несинхронного режима

В связи с вышеизложенным для целей практической реализации фазостабильной ЛБВ целесообразно оценить возможности прибора с секцией крестатронного режима.

Для реальных целей представляют интерес только приборы с высоким (~ 30 дБ и более) коэффициентом усиления и, следовательно, имеющие, как минимум, одну поглощающую вставку. При расчете такой ЛБВ целесообразным представляется следующий подход. Вначале рассчитывается обычная ЛБВ, при этом для выбранной конструкции фиксируются параметры (амплитуда и фаза тока и поля) на входе в секцию поглощающей вставки, и эти данные становятся исходными для расчета компенсирующей секции, которая в фазостабильной ЛБВ является входной секцией (или ее частью).

Исходя из [2, 3], компенсирующая секция состоит из несинхронного и усиленного участков. Для определения параметров несинхронного участка обычно требуется несколько итераций расчета всего прибора. По результатам предыдущих исследований [2-4] в качестве первоначальных значений целесообразно выбрать замедление на этом участке таким, чтобы номинальному напряжению пучка соответствовала максимальная крутизна аномальной фазовой характеристики этого участка, и безразмерная длина составляла 1,8 для режима подавления и 3,0 для крестатронного режима. Длина усиленного участка выбирается такой, чтобы амплитуда первой гармоники тока на его выходе соответствовала значению для обычной ЛБВ на входе в поглощающую вставку (как правило, больше 2,5).

Замедление ВЧ волны на усиленном участке должно обеспечивать максимально возможную крутизну изменения фазы поля и в то же время соответствовать режиму максимальной гармоники тока.

Исходя из вышеизложенного подхода, были проведены расчеты конкретной ЛБВ. Из сопоставления характеристик по длине прибора видно, как происходит их трансформация по мере прохождения через различные участки пространства взаимодействия. Обращают на себя внимание сле-

дующие закономерности в поведении амплитуд и фаз тока и поля.

Усилительный участок компенсирующей секции способствует увеличению крутизны аномальной фазовой характеристики ВЧ сигнала, при этом подавление сигнала не превышает 2,5 дБ в отличие от режима подавления [2]. При этом возрастает общий фазовый сдвиг характеристики и уменьшается интервал напряжения пучка, в котором она существует. Как и следовало ожидать, этот эффект наблюдается на безразмерной длине, примерно равной 1,5. Оставшаяся часть входной секции играет роль обычного усилительного участка, на котором происходит взаимная компенсация аномальной и нормальной характеристик. Аналогичные процессы происходят и на участке локального поглотителя. При этом в связи с его большей фазовой чувствительностью [3] также происходит примерно в 2 раза большая компенсация аномальной фазовой характеристики.

В режиме насыщения для выбранной конструкции получена зона слабой фазовой чувствительности и вследствие небольшого уменьшения коэффициента усиления в компенсирующей секции – стабилизация в той же зоне коэффициента усиления.

Как и в конструкции прибора с секцией подавления, в рассмотренной ЛБВ с крестатронной секцией возросла геометрическая длина, поэтому полноценную сравнительную оценку обеих конструкции фазостабильных ЛБВ можно провести только после их тщательной оптимизации и детального исследования основных технических характеристик. Тем не менее приведенные результаты позволяют сделать вывод о том, что применение секции крестатронного режима для целей стабилизации фазы является одним из перспективных направлений совершенствования технических характеристик ЛБВ.

За помощь в проведении расчетов авторы выражают благодарность Ильиной Е.М.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гилмор-мл. А.С. Лампы с бегущей волной / А.С. Гилмор-мл. М.: Техносфера, 2013. 616 с.

2. Кац А.М. Фазовые характеристики ЛБВ в несинхронных режимах / А.М. Кац, В.П. Кудряшов, П.И. Суслин // Электронная техника. Сер.1. Электроника СВЧ. 1971. № 5. С. 83-91.

3. Лампа бегущей волны. Патент РФ № 2046442 / Кудряшов В.П., Сивяков Б.К., Яковлева И.Б. Заявлено 21.05.1992 г. Зарегистрировано 20.10.1995 г. Бюл. № 29.

4. Кац А.М. Сигнал в лампах с бегущей волной. Часть I. ЛБВ О-типа / А.М. Кац, В.П. Кудряшов, Д.И. Трубецков. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1984. 144 с.

Сивяков Борис Константинович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электротехника и электроника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Кудряшов Александр Геннадьевич – аспирант кафедры «Электротехника и электроника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Boris K. Sivyakov – Dr.Sc., Professor, Department of Electrical Engineering and Electronics, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Alexander G. Kudryashov – Postgraduate, Department of Electrical Engineering and Electronics, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья публикуется с согласия авторов по материалам международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения». Т. 1. С. 21-24.

ГИБРИДНЫЕ КАМЕРЫ ЛУЧЕВОГО ТИПА СВЧ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Е.М. Гришина, Ю.С. Архангельский

HYBRID CAMERAS FOR BEAM-TYPE MICROWAVES IN ELECTROTECHNOLOGICAL UNITS

E.M. Grishina, Yu.S. Arkhangelskiy

Приведен метод повышения энергетической эффективности камер лучевого типа, предложены варианты компоновки гибридных камер лучевого типа СВЧ электротехнологических установок.

Ключевые слова: камеры лучевого типа, энергетическая эффективность, СВЧ электротехнологические установки

Отличительной особенностью камер лучевого типа является рупорная излучающая система, с помощью которой энергия от СВЧ генератора поступает в рабочую камеру (рис. 1) [1].

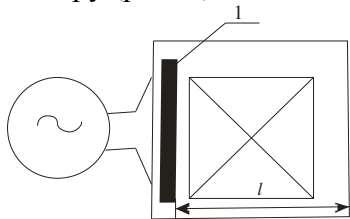


Рис. 1. Камера лучевого типа СВЧ электротехнологической установки: 1 – четверть-волновый согласующий трансформатор; l – длина слоистой линии передачи

Эти камеры описаны еще в [2], но только в последние годы были разработаны методы их расчета, конструирования, определены области их применения [3]. Так, для повышения КПД по использованию СВЧ энергии предложено между излучающим рупором и слоем обрабатываемого диэлектрика помещать четвертьволновый согласующий трансформатор (см. рис. 1), представляющий собой плоский слой диэлектрика без потерь с толщиной $\lambda/4$ длины волны генератора в диэлектрике согласующего транс-

The paper deals with a method which helps upgrade the efficiency of beam-type cameras, and offers a number of assembly versions for hybrid cameras of beam-type microwaves in electrotechnological units.

Keyworlds: beam-type cameras, energy efficiency, microwave electrotechnological installation

форматора, расположенный на расстоянии от поверхности обрабатываемого диэлектрика, при котором входное сопротивление слоистой линии передачи длиной l было бы чисто активным (рис. 2) [2].

Одной из перспективных областей применения камер лучевого типа является их использование в установках нетепловой СВЧ модификации полимеров [4].

СВЧ модификация полимеров требует заданной напряженности электрического поля (достаточно высокую СВЧ мощность), но $\text{tg } \delta$ полимеров обычно мал, и новые полезные технологические свойства появляются у полимера без сколько-нибудь заметного его нагрева. Другими словами, КПД по использованию СВЧ энергии описываемых установкой чрезвычайно мал, хотя прибыль от реализации полимерной продукции может быть весьма достаточной.

Для повышения КПД таких камер по использованию СВЧ энергии рекомендуется за обрабатываемым диэлектриком разместить приемный рупор; СВЧ энергия, поступающая в этот рупор по волноводной линии передачи, должна быть направлена в дополнительную рабочую

камеру любого типа [1], в которой используется для термообработки другого диэлектрика с необходимым значением $\tan \delta$. Такие камеры лучевого типа получили название гибридных [3, 5].

Методы расчета таких гибридных камер лучевого типа даны в [3].

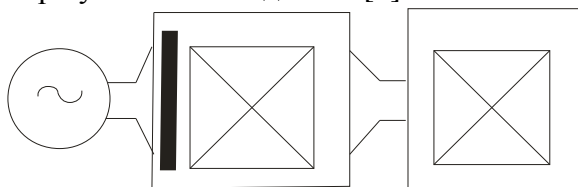


Рис. 2. Гибридная камера лучевого типа СВЧ электротехнологической установки

Наконец, представляет также интерес компоновка камеры, когда СВЧ энергия от генератора поступает на нагреваемый диэлектрик и только потом на слой полимерного материала. Это дает возможность выбрать достаточно мощный СВЧ генератор, позволяющий нагреть до заданной темпера-

Дальнейшим развитием идеи гибридных камер является камера, в которой модифицируемый слой полимера и второй диэлектрик подвергается нагреву расположены в одной рабочей камере (рис. 3) [6].

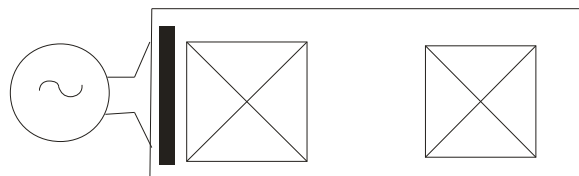


Рис. 3. Гибридная камера лучевого типа СВЧ электротехнологической установки для одновременной обработки двух диэлектрических материалов

туры слой нагреваемого диэлектрика. Разумеется, толщина этого слоя с учетом ϵ' , $\tan \delta$ и λ должна быть выбрана такой, чтобы на выходе термообрабатываемого слоя диэлектрика СВЧ мощность была достаточной для нетепловой модификации полимера.

ЛИТЕРАТУРА

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

2. Пюшнер.Г. Нагрев энергией сверх-высоких частот / Г. Пюшнер. М.: Энергия, 1968. 465 с.

3. Архангельский Ю.С. Камеры лучевого типа СВЧ электротехнологических установок / Ю.С. Архангельский, К.Н. Огурцов, Е.М. Гришина. Саратов: Изд. дом «Полиграфия Поволжья», 2010. 229 с.

4. Архангельский Ю.С. СВЧ модификация полимеров / Ю.С. Архангель-

ский, Е.М. Гришина, В.А. Лаврентьев, С.К. Слепцова. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2012. 280.

5. Патент на полезную модель (РФ) 86373. Комбинированная установка для СВЧ обработки различных материалов / Ю.С. Архангельский, С.Г. Калганова, Е.М. Гришина, В.А. Лаврентьев. Приоритет от 11.01.2009 г.

6. Патент на полезную модель (РФ) 110891. Установка для СВЧ обработки материалов с различными диэлектрическими свойствами / Ю.С. Архангельский, Е.М. Гришина. Приоритет от 16.06.2011 г.

Гришина Екатерина Михайловна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматизированные электротехнологические установки и системы» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Архангельский Юрий Сергеевич –

Ekaterina M. Grishina – Ph.D., Associate Professor, Department of Automated Electrotechnical Plants and Systems, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Yuri S. Arkhangelskiy – Dr.Sc., Professor,

заслуженный деятель науки РФ, доктор технических наук, профессор кафедры «Автоматизированные электротехнологические установки и системы» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Honoured Master of Sciences of the Russian Federation, Department of Automated Electrotechnical Plants and Systems, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья публикуется с согласия авторов по материалам международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения». Т. 1. С. 210-212.

УДК 621.314.58

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ ГРУППЫ ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ С ИСТОЧНИКАМИ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ

И.И. Артюхов, И.И. Бочкарева, С.В. Молот

ASSURING ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY IN FREQUENCY- REGULATED ELECTRIC DRIVES WITH POWER SUPPLY SOURCES

I.I. Artyukhov, I.I. Bochkareva, S.V. Molot

Опыт создания и внедрения газоохладителя с частотно-регулируемым электроприводом вентиляторов показывает необходимость мер к обеспечению электромагнитной совместимости частотно-регулируемых электроприводов с источниками питания. При определенном количестве одновременно работающих охладителей газа с частотно-регулируемым электроприводом вентиляторов происходит значительное искажение формы кривой напряжения в сети. Проблема становится все более серьезной в случае автономных источников питания. Представлены пути решения задач обеспечения электромагнитной совместимости частотно-регулируемых электроприводов с источниками питания. Описанные результаты достигнуты математическим моделированием в MATLAB + Simulink.

Ключевые слова: газоохладитель, частотно-регулируемый электропривод, вентилятор, электромагнитная совмести-

Development and application of gas coolers provided with a frequency-regulated electrical drive for fans shows the necessity to guarantee electromagnetic compatibility between frequency-regulated electrical drives and power supply sources. A significant distortion of the voltage curve in the network occurs when a number of gas coolers with frequency-regulated fan drives operate simultaneously. The problem becomes even more serious in the case of autonomous power supply sources. The authors propose a solution to the problem related with developing electromagnetic compatibility of frequency controlled electrical drives with power supply sources, and describe the results achieved due to mathematical modeling of MATLAB+Simulink.

Keywords: gas cooler, frequency-regulated electrical drive, fan, electromagnetic compatibility, mathematical modeling, MATLAB+Simulink

мость, математическое моделирование, MATLAB + Simulink

В настоящее время происходит интенсивный процесс внедрения преобразователей частоты (ПЧ) в различные технологические схемы. При этом нелинейный и импульсный характер процессов преобразования электроэнергии посредством ключевых элементов приводит к возникновению проблемы негативного влияния устройств силовой электроники на качество электрической энергии в питающей сети. Эта проблема усиливается в тех случаях, когда к одному источнику электропитания подключается группа ПЧ, суммарная мощность которых соизмерима с мощностью указанного источника. Примером является ситуация, обусловленная оснащением установок охлаждения газа (УОГ) частотно-регулируемым электроприводом вентиляторов [1]. Опыт проведения этих работ показал необходимость решения задач по обеспечению электромагнитной совместимости (ЭМС) частотно-регулируемых электроприводов с источниками электро-

питания. При определенном количестве одновременно работающих УОГ с частотно-регулируемым электроприводом вентиляторов происходит существенное искажение формы кривой напряжения в сети.

В состав УОГ входят от 24 до 32 электродвигателей мощностью 37 кВт каждый, поэтому суммарная мощность, потребляемая установкой от источников электропитания, может превышать 1 МВт. В соответствии с требованиями нормативных документов по категории электропитания УОГ схема управления электродвигателями должна быть реализована в виде двух симметричных секций, каждая из которых подключается ко вторичной обмотке соответствующего понизительного трансформатора 6(10)/0,4 кВ комплектно-трансформаторной подстанции (КТП). При этом обе секции должны иметь возможность получать электроэнергию от одного из трансформаторов КТП. Схема одной секции шин представлена на рис. 1.

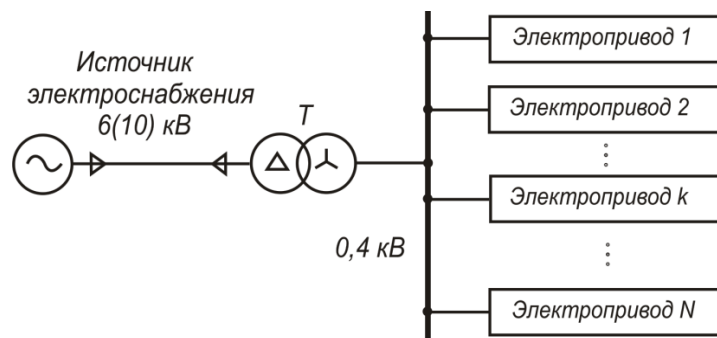


Рис. 1. Схема одной секции КТП для электроснабжения УОГ с частотно-регулируемым электроприводом вентиляторов

Для обеспечения заданного значения показателей качества электроэнергии (ПКЭ) на шинах потребителей, определенных стандартом [2], необходимо, прежде всего, ограничивать уровень высших гармоник (ВГ), эмитируемых в сеть ПЧ.

Современные ПЧ для частотно-регулируемого электропривода строят, в основном по схеме: неуправляемый выпрямитель – сглаживающий фильтр – ав-

тономный инвертор напряжения на IGBT модулях. Поэтому гармонический состав тока, потребляемого ПЧ из питающей сети при заданных ее параметрах, зависит от схемы и параметров сглаживающего фильтра на выходе выпрямителя, а также фазности последнего и алгоритмов управления его силовыми ключами. Так как выпрямители чаще всего выполняют по трехфазной мостовой схеме, входной ток

ПЧ представляет собой сумму нечетных гармоник, за исключением кратных трем. При этом наиболее интенсивными являются гармоники с номерами 5 и 7. Необходимо отметить, что современная идеология построения ПЧ ориентирована на применение емкостных фильтров, из-за чего коэффициенты гармоник тока, потребляемого такими преобразователями, существенно больше, чем в случае применения индуктивных или индуктивно-емкостных фильтров. Однако установка сглаживающих дросселей, работающих с подмагничиванием, существенно ухудшает массогабаритные показатели ПЧ и вносит большую инерционность в процесс управления электродвигателями. Даже при очень большой величине индуктивности сглаживающих дросселей коэффициент искажения потребляемого тока превышает 30 %.

Одно из направлений решения проблемы ЭМС предполагает применение таких технических решений, которые обеспечивают снижение уровня высших гармоник, генерируемых электроприводами на стороне 0,4 кВ. При этом возможны следующие варианты:

- подключение электроприводов к шинам 0,4 кВ через фильтры, в простейшем случае через сетевые дроссели;
- выполнение выпрямителей ПЧ на полностью управляемых ключах;
- оснащение выпрямителей ПЧ устройствами коррекции коэффициента мощности;

– установка на шинах 0,4 кВ КТП частотно-регулируемых УОГ активных фильтров гармоник.

Второе направление предусматривает применение технических решений, которые снижают уровень высших гармоник, генерируемых частотно-регулируемыми УОГ в сеть 6 (10) кВ, либо компенсацию этих гармоник на шинах 6 (10) кВ за счет установки фильтрокомпенсирующих устройств (ФКУ).

С практической точки зрения может оказаться целесообразным следующее решение задачи обеспечения требуемого качества электроэнергии в питающей сети [3]. Предлагается каждый трансформатор КТП выполнить с двумя вторичными обмотками, одна из которых соединяется по схеме «звезда», другая – по схеме «треугольник». В результате происходит разделение каждой секции шин 0,4 кВ на две подсекции, к каждой из которых подключается половина частотно-регулируемых электроприводов секции (рис. 2). В частности, при общем количестве электроприводов УОГ, равном 24, к одной обмотке трансформатора будет подключено 6 электроприводов.

Так как напряжения вторичных обмоток трансформатора смещены по фазе относительно друг друга на угол, равный $\pi/6$, то при равенстве токов вторичных обмоток будет происходить компенсация 5-й и 7-й гармоник магнитного потока. В результате в токе первичной обмотки трансформатора указанные гармоники также будут скомпенсированы.

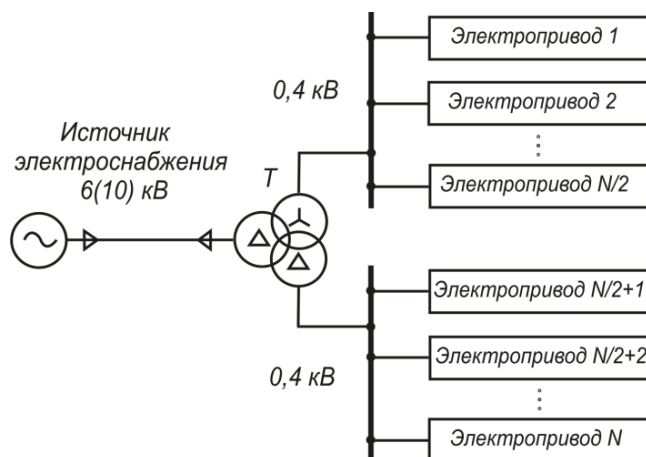


Рис. 2. Схема разделенной секции КТП для электроснабжения УОГ с частотно-регулируемым электроприводом вентиляторов

Для исследования ЭМС частотно-регулируемого электропривода УОГ с источниками электроснабжения может быть применена расчетная схема, которая показана на рис. 3. На этой схеме: L_{Ck}, R_{Ck} – соответственно индуктивность и активное сопротивление сетевого дросселя, который может быть установлен на входе ПЧ для

обеспечения норм ЭМС; $C_{Фk}, L_{dk}, R_{dk}$ – соответственно емкость, индуктивность и активное сопротивление сглаживающего дросселя на выходе выпрямителя; $R_{Иk}$ – эквивалентное входное сопротивление инвертора k -го ПЧ.

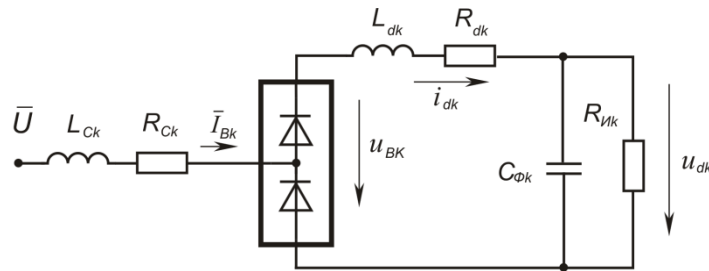


Рис. 3. Расчетная схема частотно-регулируемого электропривода УОГ

Инвертор, входящий в состав ПЧ для управления электродвигателем, в схеме на рис. 3 представлен входным сопротивлением $R_{Иk}$. Правомерность такого подхода обусловлена тем, что в рассматриваемом случае целью моделирования электротехнического комплекса является анализ влияния канонических гармоник в спектре тока, потребляемого ПЧ, на качество электроэнергии на шинах питания. Спектр гармоник, вызванных коммутациями IGBT-модулей, смещен в высокочастотную область. Для его анализа необходима иная модель, учитывающая, в частности,

паразитные индуктивности и емкости элементов.

Величина эквивалентного сопротивления $R_{Иk}$ может быть определена на основе баланса активных мощностей. В резисторе $R_{Иk}$ схемы замещения рис. 3 рассеивается активная мощность

$$P_{dk} = \frac{U_{dk}^2}{R_{Иk}}, \quad (1)$$

где U_{dk} – напряжение питания инвертора k -го ПЧ.

От выпрямителя k -го ПЧ отбирается активная мощность

$$P_{dk} = \frac{H_{ном.k} \cdot Q_{ном.k}}{\eta_{пч.k} \cdot \eta_{эл.дв.k} \cdot \eta_{вент.k}} \left(\frac{\omega_k}{\omega_{ном.}} \right)^3 = P_{dk.ном.} \left(\frac{f_{пч.k}}{f_{пч.ном.}} \right)^3, \quad (2)$$

где $H_{ном.k}, Q_{ном.k}$ – соответственно номинальные величины напора и расхода k -го вентилятора; $\eta_{пч.k}, \eta_{эл.дв.k}, \eta_{вент.k}$ – соответственно КПД преобразователя, электродвигателя и вентилятора; $f_{пч.ном.}, f_{пч.k}$ – номинальное и текущее значения частоты напряжения на выходе ПЧ, которым соответствуют значения частоты вращения вентилятора $\omega_{ном.}, \omega_k$.

В формуле (2) также введено обозначение

$$P_{dk.ном.} = \frac{H_{ном.k} \cdot Q_{ном.k}}{\eta_{пч.k} \cdot \eta_{эл.дв.k} \cdot \eta_{вент.k}} - \text{мощность,}$$

потребляемая от выпрямителя k -го ПЧ в

номинальном режиме работы электропривода.

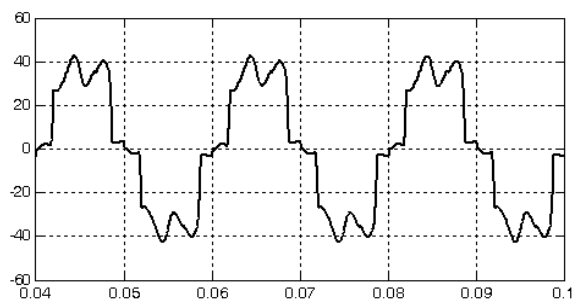
Объединяя выражения (1) и (2), получим формулу для расчета эквивалентного сопротивления инвертора k -го ПЧ

$$R_{Иk} = \frac{U_{dk}^2}{P_{dk.ном.}} \cdot \left(\frac{f_{пч.ном.}}{f_{пч.k}} \right)^3. \quad (3)$$

Отметим, что входящая в формулу (3) величина напряжения U_{dk} зависит от напряжения на шине питания ЭТК, а также от тока I_{dk} выпрямителя, который, в свою очередь, является функцией сопротивления $R_{Иk}$.

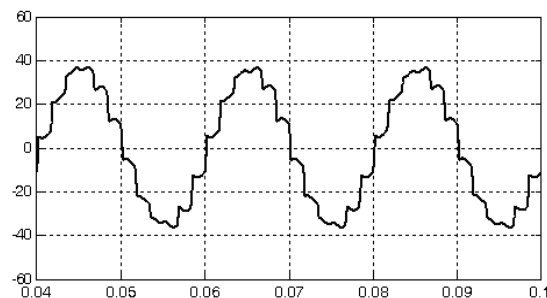
Модели рассматриваемых электротехнических комплексов реализованы в среде MATLAB с пакетом расширения Simulink. Для решения дифференциальных уравнений моделей выбран многшаговый метод переменного порядка ode15s (stiff/NDF). Относительная погрешность интегрирования задана величиной 10^{-3} .

Некоторые результаты моделирования представлены на рис. 4. Кривая тока ис-



а

точника электроснабжения (рис. 4 а) получена для случая, когда 12 единиц ПЧ подключены к одной секции шин по схеме рис. 1. Коэффициент искажения этой кривой превышает 26 %. Если применить схему рис. 2 и к каждой подсекции шин подключить по 6 единиц ПЧ, то кривая тока существенно улучшается (рис. 4 б). Коэффициент искажения синусоидальности кривой тока составляет 11 %.



б

Рис. 4. Виртуальные осциллограммы тока источника электроснабжения: по оси абсцисс – время в секундах; по оси ординат – ток в амперах

Результаты расчета ПКЭ показали, что при построении КТП по схеме рис. 1 коэффициент искажения синусоидальности напряжения превышает нормально допустимое значение 5% для сетей напряжением 10 кВ, если частотно-регулируемым электроприводом оснащены шесть УОГ (при питании от трансформатора энергоснабжающей организации мощностью 10000 кВА) и две УОГ (при питании от электростанции типа ПАЭС-2500).

Переход к схеме рис. 2 позволяет радикальным образом изменить в лучшую сторону ситуацию с качеством электроэнергии на шинах 10 кВ. Если питание КТП осуществляется от трансформаторов энергоснабжающей организации, то частотно-регулируемым электроприводом может быть оснащено более десяти УОГ без нарушения заданных требований к качеству электроэнергии. При питании от электростанции ПАЭС-2500 коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения на шинах 10 кВ превышает нормально допустимое значение 5% при подключении четырех и более КТП.

Естественно, что в условиях эксплуатации УОГ сложно обеспечить равенство токов вторичных обмоток трансформатора в схеме рис. 2. Во-первых, из-за технологического разброса параметров при изготовлении электродвигателей будет различие между токами, которые потребляют ПЧ. Во-вторых, возможна ситуация, когда один из электродвигателей УОГ или ПЧ выводится в ремонт, то количество потребителей на подсекциях становится различным. В результате не будут выполняться условия компенсации 5-й и 7-й гармоник в магнитном потоке трансформатора, что приведет к ухудшению качества напряжения в питающей сети.

На рис. 5 показаны результаты моделирования КТП УОГ по схеме рис. 2 в предположении, что к одной подсекции шин подключены 6 частотно-регулируемых электроприводов, количество электроприводов на другой подсекции отличается на некоторое наперед заданное количество.

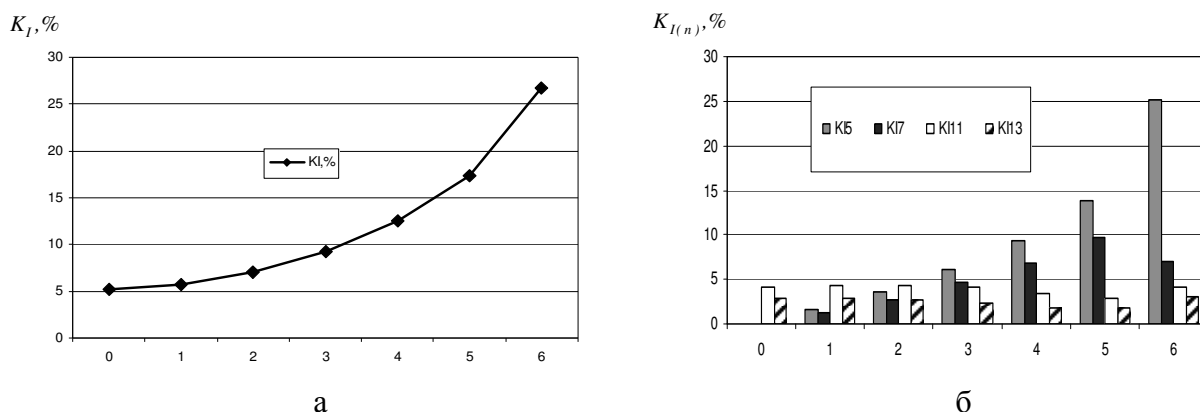


Рис. 5. Зависимость коэффициента искажения синусоидальности кривой входного тока КТП УОГ (а) и коэффициентов гармоник тока (б) с номерами 5, 7, 11 и 13 от количества отключенных от подстанции электроприводов

Компенсация 5-й и 7-й гармоник во входном токе КТП по схеме рис. 2 при несимметричной нагрузке секций может быть

осуществлена за счет применения объединенного звена постоянного тока на основе двенадцатипульсного выпрямителя.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Аршакян И.И.** Опыт создания и эксплуатации системы стабилизации температуры газа с частотно-регулируемым электроприводом вентиляторов аппаратов воздушного охлаждения газа / И.И. Аршакян, А.А. Тримбач, И.И. Артюхов // Проблемы электроэнергетики: сб. науч. тр. Саратов: СГТУ, 2008. С. 55-64.

2. **ГОСТ Р 54149-2010.** Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. М.: Стандартинформ, 2012. 20 с.

3. **Артюхов И.И.** Качество электроэнергии в системе электроснабжения газотурбинной компрессорной станции в условиях оснащения установок охлаждения газа частотно-регулируемым электроприводом вентиляторов / И.И. Артюхов, И.И. Бочкарева, А.А. Тримбач // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2011. № 4 (60). Вып. 2. С. 165-170.

3. **Артюхов И.И.** Качество электроэнергии в системе электроснабжения газотурбинной компрессорной станции в условиях оснащения установок охлаждения газа частотно-регулируемым электроприводом вентиляторов / И.И. Артюхов, И.И. Бочкарева, А.А. Тримбач // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2011. № 4 (60). Вып. 2. С. 165-170.

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

Бочкарева Ирина Ивановна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Молот Светлана Викторовна – аспирант, ассистент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

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

Irina I. Bochkareva – Ph.D., Associate Professor, Department of Power Supply for Industrial Enterprises, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov.

Svetlana V. Molot – Postgraduate, Assistant Lecturer, Department of Power Supply for Industrial Enterprises, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья публикуется с согласия авторов по материалам международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения». Т. 2. С. 11-17.

ПРИМЕНЕНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ГЕНЕРАТОРОВ В СВЧ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ

А.В. Фёдоров, Ю.С. Архангельский

USING SEMICONDUCTOR GENERATORS IN MICROWAVE ELECTROTECHNOLOGICAL PLANTS

A.V. Fedorov, Yu.S. Arkhangelskiy

Рассмотрены возможности, открывающиеся для СВЧ электротермических установок с применением полупроводниковых генераторов

Ключевые слова: СВЧ электротехнологическая установка, полупроводниковый генератор

The authors consider the perspectives for microwave electrothermal installations due to application of semiconductor generators.

Keywords: microwave electrotechnological unit, semiconductor generator

Научные исследования воздействия СВЧ энергии на различные материалы открыли широкие перспективы для применения электротехнологических установок сверхвысокочастотного нагрева в различных областях производства, медицине, пищевой промышленности и др. [3].

Обычно такие установки имеют СВЧ генератор высокой мощности, соединенный волноводной линией передачи с рабочей камерой, в которой происходит взаимодействие электромагнитного поля с нагреваемым диэлектрическим объектом. Рабочие камеры работают в режиме стоячей волны (резонаторного типа), бегущей волны (волноводного типа), с излучающими лучевыми или щелевыми системами.

В качестве СВЧ генераторов обычно применяются мощные генераторные электровакуумные приборы СВЧ. Так, СВЧ установки с мощностью выше 50 кВт строят на базе клистронов. На частотах 915 и 2450 МГц в технологических процессах, где требуется средняя мощность от 400-700 Вт и выше, получили наибольшее распространение магнетроны [2].

В ранних работах по тематике СВЧ нагрева предлагалось использовать и СВЧ-полупроводниковые генераторы, но мощ-

ность таких приборов в то время была недостаточной, и эти генераторы практически не применялись.

Однако с появлением новых технологий производства мощных СВЧ транзисторов имеет смысл исследовать возможность применения СВЧ генераторов на таких приборах.

Наиболее перспективно выглядят разработки полевых транзисторов на основе LDMOS (Laterally Diffused Metal Oxide Semiconductors) – смещенно-диффузная МОП технология на основе кремния.

LDMOS обладает наилучшими характеристиками по сравнению с биполярной технологией, такими как линейность, усиление, тепловые режимы, устойчивость к рассогласованию, высокий КПД, запас по рассеиваемой мощности, надежность. Это достаточно молодая технология, которая основное развитие получила в конце 80-х – начале 90-х годов XX века и стала одной из ключевых технологий на рынке полупроводниковых высокочастотных устройств.

На LDMOS технологии в настоящее время выпускается большинство мощных сверхвысокочастотных транзисторов. Например, мощные приборы компании NXP (рис. 1), предназначенные для промышлен-

ного, научного и медицинского применения ISM (*Industrial Scientific Medicine*), работающие в диапазоне частот 2400-2500 МГц, имеют паспортное значение выходной мощности до 100 Вт и более [5].

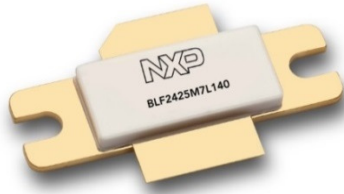


Рис. 1. СВЧ транзистор BLF2425M7L(S)140, компании NXP с $P_{\text{вых}} = 140$ Вт

Для получения более высокой мощности возможно применение параллельного включения нескольких транзисторов. При этом выходная мощность в рабочей камере складывается. Рассмотрим основные преимущества полупроводникового генератора в сравнении с магнетроном:

- электронное управление СВЧ мощностью. Магнетроны генерируют СВЧ излучение определенной мощности. Можно добиться лишь изменения средней мощности, используя импульсный режим, управляя длительностью импульсов. В полупроводниковый генератор можно встроить плавное управление уровнем выходной мощности, в том числе программируемое, что может быть удобно для таких технологических процессов как, например, сушка легковоспламеняющихся или взрывоопасных веществ;

- возможность перестройки по частоте. Магнетроны работают на строго фиксированной частоте. Как известно [3], глубина проникновения СВЧ энергии зависит

как от геометрических размеров и диэлектрической проницаемости обрабатываемого материала, так и от частоты.

$$d = \frac{\lambda}{\pi \cdot \sqrt{2\epsilon'(\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \delta} - 1)}}, \quad (1)$$

где ϵ' – относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрика; $\operatorname{tg} \delta$ – тангенс угла диэлектрических потерь; λ – длина волны СВЧ генератора; d – глубина проникновения СВЧ энергии в материал, и если $\operatorname{tg} \delta = 1$,

$$d = \frac{\lambda}{\pi \cdot \sqrt{2\epsilon'} \cdot \operatorname{tg} \delta}. \quad (2)$$

Имеет смысл исследовать целесообразность перестройки частоты СВЧ поля в процессе нагрева для улучшения равномерности. Таким свойством обладают только перестраиваемые генераторы, например, на основе полупроводников;

- более низкое напряжение питания. В отличие от электровакуумных приборов, где требуются напряжения порядка нескольких киловольт, напряжение питания транзисторов большой мощности обычно составляет не больше 50 В.

К недостаткам такого генератора можно отнести относительно высокие цены на мощные СВЧ транзисторы, а также всё ещё недостаточно высокую СВЧ мощность.

Упрощенная схема генератора представлена на рис. 2. Для получения требуемого уровня мощности необходимо параллельное включение 4 и более транзисторов, так как имеются потери мощности в направленных ответвителях, устанавливаемых между каскадами, для минимизации отражения энергии на входе окончательного каскада.

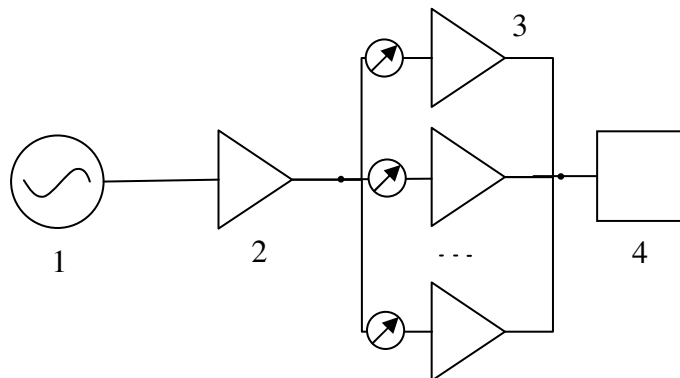


Рис. 2. Упрощенная схема СВЧ генератора для нагревательной установки

Здесь генератор 1 задаёт основную частоту работы установки, который может регулироваться, затем сигнал усиливается предварительным каскадом 2, для достижения мощности необходимой для возбуждения оконечных усилителей 3. Далее усиленные СВЧ колебания суммируются и поступают в рабочую камеру с обрабатываемым материалом 4.

Так как все выпускаемые мощные СВЧ транзисторы в качестве выводов энергии используют полосковые линии передач, то для передачи энергии в волновод потребуется полосково-волноводный или полосково-коаксиально-волноводный переход, позволяющий согласовать линии передачи в нужном диапазоне частот.

Наиболее простая конструкция полосково-волноводного перехода [1] создаётся

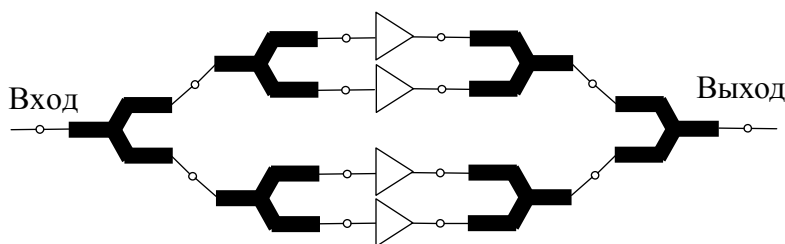


Рис. 3. Схемы СВЧ УМ, использующих корпоративные сумматоры на основе мостов Вилкинсона

Отметим, что в каждом сумматоре имеются потери мощности. С ростом числа суммируемых транзисторов потери в сумматоре увеличиваются, и эффективность такой цепи падает. Формула для расчета КПД сумматора [6] в зависимости от числа транзисторов выглядит следующим образом:

$$\eta = 10^{-\frac{L_{\text{об}} \cdot N}{10}}. \quad (3)$$

Здесь η – КПД; N – количество суммируемых транзисторов; $L_{\text{об}}$ – общие потери сумматора. При использовании схем сложения мощности в СВЧ УМ образуется множество обратных связей между всеми

в результате введения в прямоугольный волновод отрезка полосковой линии на подложке. Для достижения согласования необходимо выбрать длину отрезка линии, вводимой в волновод, а также расстояния от этой линии до короткозамыкателя прямоугольного волновода. Варьируя эти величины, чаще всего экспериментально следует добиться минимизации коэффициента стоячей волны $K_{\text{сш}}$ на требуемой СВЧ частоте генерации.

Для суммирования и деления выходной мощности нескольких транзисторов возможно применение сумматоров, например на основе мостов Вилкинсона планарного типа. Методики расчеты таких сумматоров, а также особенности их использования изложены в [4].

суммируемыми транзисторами, в частности из-за неидеальной развязки сумматоров и т.д. Это может приводить к неустойчивости УМ.

Анализ устойчивости таких разветвленных активных структур – это серьезная теоретическая проблема, обычно решаемая с помощью автоматизированных средств проектирования [6], однако в случае простых двухканальных сумматоров (как показано на рис. 3), структура усилителя симметрична, и это позволяет снизить сложность и время решения задачи [7].

ЛИТЕРАТУРА

1. Бунин А. Проектирование генератора миллиметрового диапазона длин волн / А. Бунин, С.В. Вишняков, В.М. Геворкян // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. 2008. № 6. С. 106-110.

2. Морозов О. Промышленное применение СВЧ-нагрева / О. Морозов и др. // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. 2010. № 3. С. 2-6.

3. **Архангельский Ю.С.** СВЧ электро-термия: монография / Ю.С. Архангельский. Саратов: СГТУ, 1998. 408 с.

4. **Коколов А.А.** Схемы сложения мощности для монолитных интегральных СВЧ-усилителей / А.А. Коколов, Л.И. Бабак // Доклады ТУСУРа. 2011. № 2 (24). Ч. 2. С. 24-27.

5. **NXP Products.** 2400-2500 MHz IMS LDMOS RF Power Transistors. [http://www.nxp.com/products/mosfets/rf_power_t

ransistors_ldmos / broadcast_ism / 2400_2500_mhz_ism_band/#products].

6. **Colantonio P.** High Efficiency RF and Microwave Solid State Power Amplifier / P. Colantonio, F. Giannini, E. Limiti. John Wiley & Sons Ltd, 2009. 511 p.

7. Stability Analysis Of Multi-Transistor Microwave Power Amplifiers / A. Costantini, G. Vannini, F. Filicori, A. Santarelli // Gallium Arsenide applications symposium (GAAS 2000). Paris, 2000.

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

Федоров Антон Витальевич – аспирант кафедры «Автоматизированные электротехнологические установки и системы» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Yuri S. Arkhangelskiy – Dr.Sc., Professor, Honoured Master of Sciences of the Russian Federation, Department of Automated Electrotechnical Plants and Systems, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Anton V. Fedorov – Postgraduate, Department of Automated Electrotechnical Plants and Systems, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья публикуется с согласия авторов по материалам международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения». Т. 2. С. 165-169.

УВАЖАЕМЫЕ ЧИТАТЕЛИ!

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

ПРИМЕНЕНИЕ ШИРОКОПОЛОСНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ В СВЧ ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ

Е.М. Гришина, Ю.С. Архангельский

USING BROADBAND GENERATORS IN MICROWAVE ELECTROTHERMAL INSTALLATIONS

E.M. Grishina, Yu.S. Arkhangelskiy

Рассмотрено применение широкополосных генераторов для равномерного нагрева диэлектрика.

Ключевые слова: СВЧ электротермические установки, широкополосный генератор, диэлектрик, равномерность нагрева

В СВЧ электротермических установках традиционно используются одночастотные генераторы, работающие на разрешенных частотах СВЧ диапазона [1, 2]. Недостатком таких установок является зависимость от температуры обрабатываемого объекта таких важных параметров как равномерность термообработки и величина отраженной от рабочей камеры СВЧ мощности, то есть КПД по использованию СВЧ энергии.

Объясняется это тем, что геометрические размеры рабочей камеры установки рассчитываются для конкретных значений относительной диэлектрической проницаемости ϵ' и $\operatorname{tg} \delta$ обрабатываемого диэлектрика.

В значительной степени устраняют этот недостаток расчетом геометрии рабочей камеры для средних значений ϵ' и $\operatorname{tg} \delta$ в рабочем диапазоне температур [3].

Если инженерный расчет рабочей камеры проводить по схеме, предложенной в [2, 3], то наибольшие равномерности нагрева и КПД можно получить, когда

$$\frac{b_2 \sqrt{\epsilon' \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \delta}}}{\lambda} \approx 0,4; 1 \text{ для прямоугольного}$$

The paper considers application of broadband generators related to uniformity of dielectric heating.

Keywords: microwave electrothermal unit, broadband generator, dielectric, uniform heating

$$\text{волновода и } \frac{r_3 \sqrt{\epsilon' \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \delta}}}{\lambda} \approx 0,3; 0,9 \text{ для}$$

круглого волновода, частично заполненного обрабатываемым диэлектриком (рис. 1) [4]. Здесь b_2 – толщина слоя обрабатываемого диэлектрика на широкой стенке прямоугольного волновода и радиус цилиндрического стержня обрабатываемого диэлектрика вдоль оси круглого волновода.

Дальнейшее улучшение равномерности нагрева и повышение КПД можно обеспечить изменением длины волны СВЧ генератора в зависимости от изменений при нагреве диэлектрических параметров ϵ' и $\operatorname{tg} \delta$ обрабатываемого диэлектрика [4].

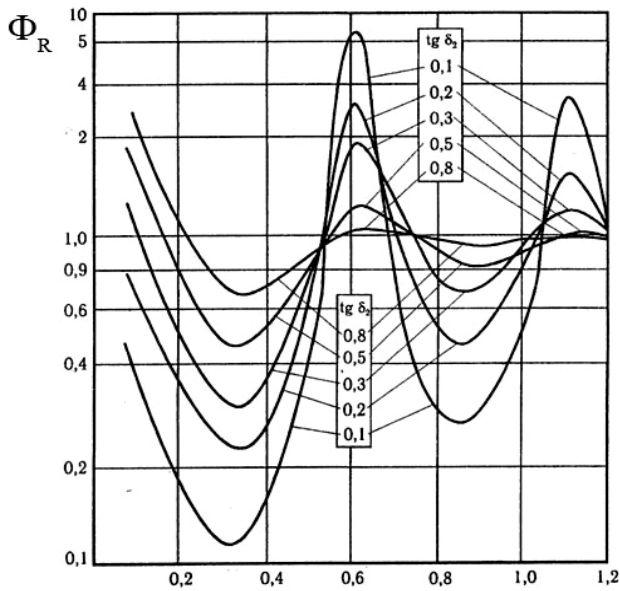
Действительно, если длину волны СВЧ генератора изменить в процессе нагрева диэлектрика так, чтобы величина

$$\frac{r_3 \sqrt{\epsilon' \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \delta}}}{\lambda} \text{ оставалась постоянной и}$$

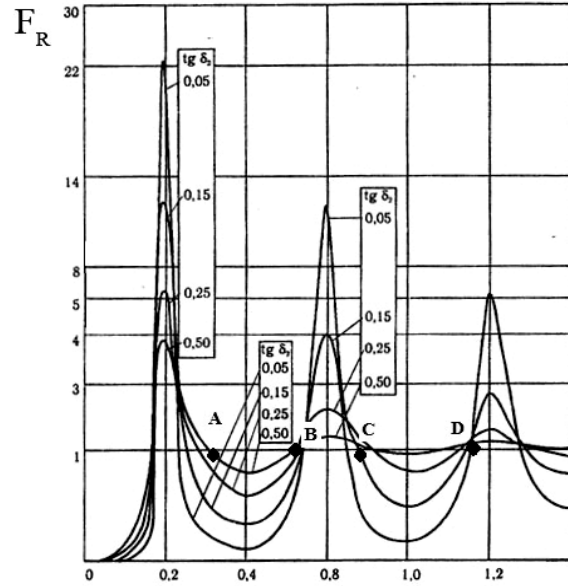
равной одному из указанных выше значений, то согласно рис. 1 погонные параметры эквивалентной схемы рабочей камеры (рис. 2) $R_n(F_x)$ зависят только от $\operatorname{tg} \delta$, а $X_n(F_x)$ близка к нулю. В этом слу-

чае идеально равномерного нагрева и максимального КПД все-таки получить не удастся, но эти параметры существен-

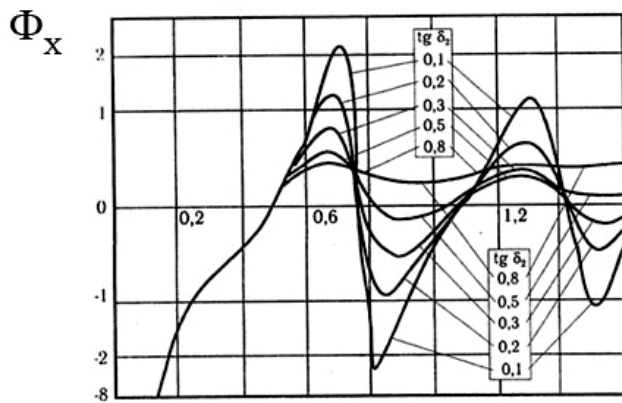
но лучше, чем у установки, работающей на фиксированной частоте.



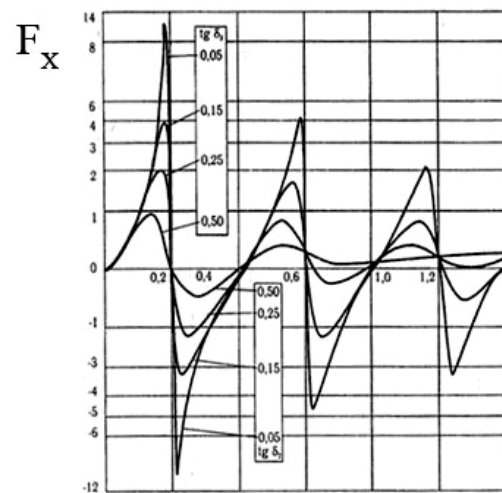
$$\frac{r_3 \sqrt{\epsilon' \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \delta}}}{\lambda}$$



$$\frac{b_2 \sqrt{\epsilon' \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \delta}}}{\lambda}$$



$$\frac{r_3 \sqrt{\epsilon' \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \delta}}}{\lambda}$$



$$\frac{b_2 \sqrt{\epsilon' \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \delta}}}{\lambda}$$

Рис. 1. Зависимость функций F_R и F_X от $\frac{b_2 \sqrt{\epsilon' \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \delta}}}{\lambda}$ для прямоугольного и $\frac{r_3 \sqrt{\epsilon' \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \delta}}}{\lambda}$ круглого волноводов, частично заполненных круглым диэлектриком

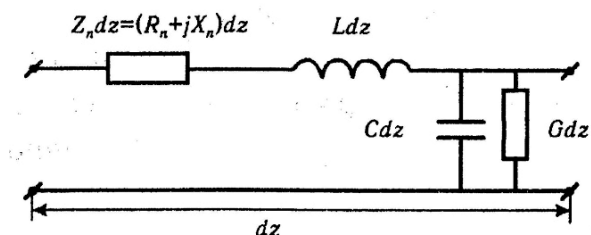


Рис. 2. Эквивалентная схема образца волновода со слоем диэлектрика

В то же время, как видно по рис. 1, у зависимостей $F_R \left(\frac{b_2}{\lambda} \cdot \sqrt{\epsilon' \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \delta}} \right)$ и $F_X \left(\frac{b_2}{\lambda} \cdot \sqrt{\epsilon' \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \delta}} \right)$ существуют точки B, C, D, E где влияние $\operatorname{tg} \delta$ на величины F_R и F_X минимально.

Расчеты показывают, что неравномерность нагрева можно уменьшить до $\pm 2\%$ на уровне 100°C , а КПД по использованию СВЧ энергии увеличить до $0,99\%$.

В качестве СВЧ генератора в таком случае следует использовать СВЧ приборы, обладающие электрически управляемой частотой генерации (ЛОВ, ЛБВ-генератор и др.) (рис. 3).

Показанная на рис. 3 структурная схема СВЧ ЭТУ с широкополосным СВЧ генератором отличается от аналогичной схемы установки с магнетроном наличием на

входе в рабочую камеру направленного ответвителя НО с детекторной головкой.

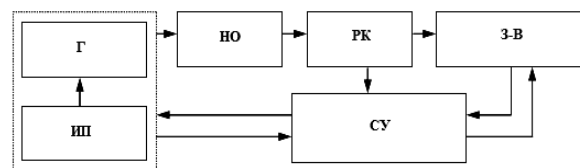


Рис. 3. Структурная схема СВЧ электротехнологической установки: Г – широкополосный СВЧ генератор; ИП – источник питания СВЧ генератора; НО – направленный ответвитель с детекторной головкой; РК – рабочая камера; З-В – система загрузки-выгрузки; СУ – система управления

С помощью направленного ответвителя фиксируется величина отраженной от рабочей камеры СВЧ мощность, которая, как показано в работе [2], зависит от КПД так и равномерности термообработки. Сигнал детекторной головки поступает в систему управления СУ, с помощью которой перестраивается частота СВЧ генератора. При этом начальная длина волны СВЧ генератора соответствующая начальной температуре обработки диэлектрика, должна быть выбрана такой, чтобы в процессе термообработки, изменяясь, она оставалась в пределах полосы пропускания волноводной линии передачи, соединяющей СВЧ генератор с рабочей камерой.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пюшнер. Г. Нагрев энергией сверхвысоких частот / Г. Пюшнер. М.: Энергия, 1968. 465 с.
2. Архангельский Ю.С. СВЧ электротермия / Ю.С. Архангельский. Саратов: СГТУ, 1998. 408 с.
3. Архангельский Ю.С. Справочная книга по СВЧ электротермии / Ю.С. Ар-

хангельский. Саратов: Научная книга, 2011. 506 с.

4. Архангельский Ю.С. Многочастотные установки СВЧ диэлектрического нагрева / Ю.С. Архангельский, Е.М. Гришина // Вопросы электротехнологии. 2014. № 1(2). С. 27-35.

Гришина Екатерина Михайловна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматизированные электротехнологические установки и системы» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Ekaterina M. Grishina – Ph.D., Associate Professor, Department of Automated Electrotechnical Plants and Systems, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

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

Yuri S. Arkhangelskiy – Dr.Sc., Professor, Honoured Master of Sciences of the Russian Federation, Department of Automated Electro-technical Plants and Systems, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья публикуется с согласия авторов по материалам международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения». Т. 2. С. 223-226.

УДК 621.365.5.029.5, 664.046.1

ПРИМЕНЕНИЕ СВЧ ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ОРГАНИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ С НЕОДНОРОДНЫМИ СТРУКТУРОЙ И СОСТАВОМ

И.В. Злобина, В.А. Коломейцев

USING MICROWAVE RADIATION FOR THERMAL TREATMENT OF DIELECTRIC ORGANIC MATERIALS WITH HETEROGENEOUS COMPOSITION AND STRUCTURE

I.V. Zlobina, V.A. Kolomeytsev

Излагаются вопросы применения СВЧ излучения для термической обработки органических материалов с неоднородными структурой и составом.

Ключевые слова: СВЧ излучение, термическая обработка, диэлектрические материалы, структура, состав

Высокотехнологичные методы обработки материалов, распространенные в микроэлектронике, приборостроении и точном машиностроении, находят все большее применение в производстве товаров народного потребления и продуктов питания, что диктуется стремлением повысить их конкурентоспособность и улучшить здоровье населения. В настоящее время структура питания населения России характеризуется избытком животных жиров, сахара и дефицитом полноценного белка, полиненасыщенных жирных кислот,

The paper deals with the issues relating application of microwave radiation to thermal treatment of organic materials with heterogeneous structure and composition.

Keywords: microwave radiation, thermal treatment, dielectric material, structure, composition

макро- и микронутриентов. Сложившаяся ситуация связана с изменением образа жизни современного человека, что диктует необходимость снижения потребности в энергии, но прежнюю потребность в незаменимых пищевых веществах. Учитывая тенденцию к использованию растительных белков, а также стремление производителей снизить себестоимость продукции, первостепенное значение принимают зернобобовые культуры, в том числе возделываемые в регионах. В Саратовской области такой культурой является нут, отли-

чающийся высокой устойчивостью к засухе, вредителям, технологичностью в уборке, высоким содержанием белка, пищевых волокон, β -каротина, макроэлементов (калия, магния, кальция, железа) и селена. Поэтому весьма перспективным является введение муки нута в фаршевую структуру мясных изделий [1, 2]. Однако неоднородность структуры таких мясных рубленых изделий в сочетании с их многокомпонентным составом создает существенные трудности по равномерному прогреву в процессе термической обработки и может привести к снижению потребительских свойств. В связи с этим приобретает актуальность использование новых способов термической обработки, обеспечивающих сокращение времени, необходимого для достижения кулинарной готовности, и хорошие потребительские свойства продукции. Одним из эффективных электротехнологических методов обработки различных материалов, в том числе продуктов питания, является использование электромагнитного излучения сверхвысокой частоты (СВЧ) [3, 4]. Однако, несмотря на активное и широкое использование указанной технологии, существуют недостаточно изученные научно-практические аспекты применения СВЧ процессов при обработке пищевых продуктов, к которым, в частности, относится обоснование технологических режимов термической обработки сложных систем типа фаршевых композиций с добавлением растительной муки, например нута, что не позволяет эффективно применять СВЧ технологии для термической обработки указанных перспективных для пищевой отрасли изделий.

Целью наших исследований явилось обоснование режимов СВЧ термической обработки мясных рубленых кулинарных изделий, обогащенных мукой нута, обеспечивающих улучшение их потребительских свойств и снижение энергетических затрат.

Выполнено исследование состава и свойств нутовой муки и обоснование ее применения в технологии мясных полуфабрикатов. Проведены исследования по-

луфабрикатов, изготовленных на основе мясных фаршевых систем с добавкой нутовой муки, позволившие получить исходные данные для разработки технологии их тепловой обработки с использованием СВЧ нагрева. Проведенная органолептическая оценка полуфабрикатов по известной методике, а также методом двойного парного сопоставления показала, что высшие баллы получили образцы с заменой 20% хлеба и 5% мяса на соответствующее количество нутовой муки со временем выстойки фарша в пределах 40 мин. Экспериментально были определены их механические и теплофизические характеристики: плотность, теплоемкость, теплопроводность и температуропроводность. Образцы с указанными характеристиками были использованы в дальнейших теоретических и экспериментальных исследованиях процесса СВЧ обработки.

В связи с введением дополнительного компонента в фаршевую систему было составлено критериальное уравнение, направленное на определение коэффициентов, комплексно отражающих значения рецептурных и режимных параметров объектов исследований (1)

$$K_{\text{рац}} = A K_{ct}^{\alpha} K_{\lambda t}^{\beta}. \quad (1)$$

В этом выражении $K_{\text{рац}} = \mathcal{E} \tau^{0,8} \left(\frac{\rho}{N} \right)^{0,4}$;

$$K_{ct} = ct \left(\frac{\rho}{N} \right)^{0,4} \tau^{0,8}; K_{\lambda t} = \frac{\lambda t}{\rho^{0,2} N^{0,8}} \tau^{0,6},$$

где $\mathcal{E}$ – удельные затраты энергии (Дж/кг) на процесс приготовления исследуемого объекта; c – удельная теплоемкость, Дж/(кгК); λ – коэффициент теплопроводности (Вт/(мК)); ρ – плотность изделия (кг/м³); N – мощность подводимой энергии, Вт; t – температура кулинарной готовности объекта, К; τ – время кулинарной готовности объекта, с; A – коэффициент скорости процесса; α и β – характеристические коэффициенты критериального уравнения, определяемые экспериментально.

Были изучены возможности СВЧ-термической обработки фаршевых композиций, содержащих муку нута и отличаю-

щихся определенной неоднородностью свойств. На основе экспериментальных исследований электрофизических свойств композиций с различным процентным содержанием муки нута и данных, приводимых в работах [3, 4], получены эмпирические зависимости относительной диэлектрической проницаемости ϵ' и угла диэлектрических потерь $\tan \delta$ от частоты излучения:

$$\epsilon'' = 313,8f^{-0,08}, \quad \epsilon' = 1369f^{-0,117},$$

$$\tan \delta = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} = 0,229f^{0,037}, \quad (2)$$

где f – частота СВЧ – излучения, МГц.

Введение зависимостей (2) в известное в технике СВЧ выражение, описывающее проницаемость среды для СВЧ излучения, позволило получить частотную зависимость (рис. 1):

$$\Delta = \frac{23,56}{f^{0,997}}. \quad (3)$$

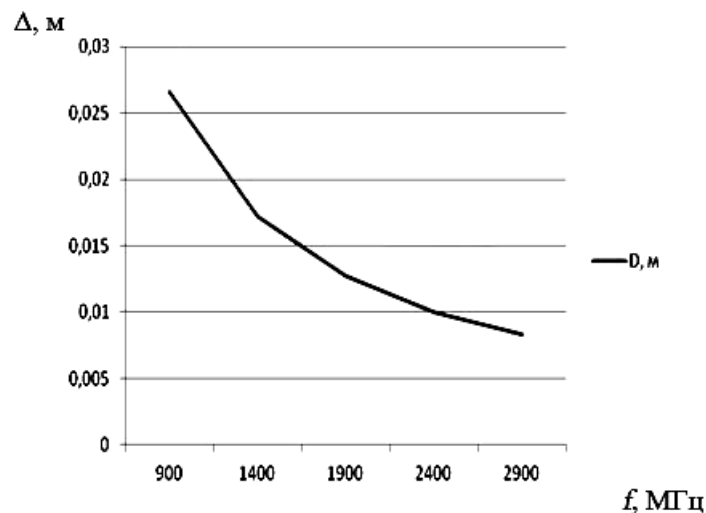


Рис. 1. Глубина проникновения СВЧ-излучения в объем фаршевой композиции с мукой нута в зависимости от частоты

В результате получен комплекс зависимостей, которые можно рассматривать как модель СВЧ термической обработки мясных фаршевых композиций с добавлением муки нута:

$$\Theta = 53,6 \frac{t^{0,676} c^{0,676} \lambda^{0,363}}{f^{0,22} E^{0,46} \tau^{0,048} \rho^{0,86} v^{0,23}}, \quad (5)$$

$$E = 1,29 \cdot 10^3 \frac{t^{1,47} c^{1,47} \lambda^{0,79}}{f^{0,478} \Theta^{2,178} \tau^{0,1} \rho^{1,87} v^{0,5}}, \quad (6)$$

Анализ полученной зависимости с учетом средней толщины изделий порядка 20 мм и разрешенных частот СВЧ излучения 915 МГц $\pm 2,5\%$ и 2450 МГц $\pm 2,5\%$ позволяет в качестве рекомендуемой частоты при СВЧ термической обработке фаршевых композиций с добавлением муки нута предложить $f = 915$ МГц $\pm 2,5\%$.

Для выявления зависимостей других режимных факторов процесса критериальное уравнение (1) было преобразовано с использованием (2) и известного выражения для тепловой энергии, выделяемой в единице объема вещества в результате диэлектрического СВЧ нагрева и характеризующейся удельной мощностью ($P_{y\partial}$, Вт/см³) [4]:

$$P_{y\partial} = 0,278 \cdot 10^{-12} \epsilon' \tan(\delta) f E^2, \quad (4)$$

где E – напряженность электрического поля в рассматриваемом объеме вещества.

$$P_{y\partial} = 0,132 \frac{t^{2,94} c^{2,94} \lambda^{1,58}}{\Theta^{4,386} \tau^{0,21} \rho^{3,737} v}. \quad (7)$$

Как видно из выражений (5)–(7), наиболее существенное влияние на режимы процесса СВЧ термической обработки оказывают требуемая температура изделия, затраты энергии и объем обрабатываемого материала. Время воздействия играет весьма несущественную роль. Из характеристик фаршевой системы наи-

большее значение имеют плотность и теплоемкость. При рассмотрении указанных выражений установлено сложное взаимовлияние факторов на выходные параметры. На основе выполненных расчетов при различном сочетании исходных данных получены графические зависимости, позволяющие выделить рекомендуемый диапазон режимов СВЧ термической обработки. Поскольку одной из управляемых величин в технике СВЧ является удельная мощность, основным расчетным выражением было принято (7). Результаты расчета удельной мощности в зависимости от объема облучаемых изделий и температуры при минимальных энергозатратах ($\varepsilon = 0,08$ Дж/кг при $E = 50000$ В/м) и времени обработки 240 секунд представлены на рис. 2. Из графика следует, что при сохранении энергозатрат на ука-

занном уровне минимальная удельная мощность обеспечивается при обработке изделия максимально возможного объема (или совокупности мелких изделий данного объема) с температурой цикла 353 К. Проведенные нами экспериментальные исследования показали, что применение вместо традиционной обжарки СВЧ термической обработки на предварительно определенных по (7) режимах изделий на основе фаршевых композиций с замещением 5% мяса или 20% хлеба мукой нута обеспечивает более интенсивный их разогрев и более равномерное его воздействие. Образец, подвергнутый традиционной обжарке, имеет темную корку и относительно более светлую внутреннюю структуру, в то время как после СВЧ обработки внутренний объем образца мало отличается от внешней поверхности.

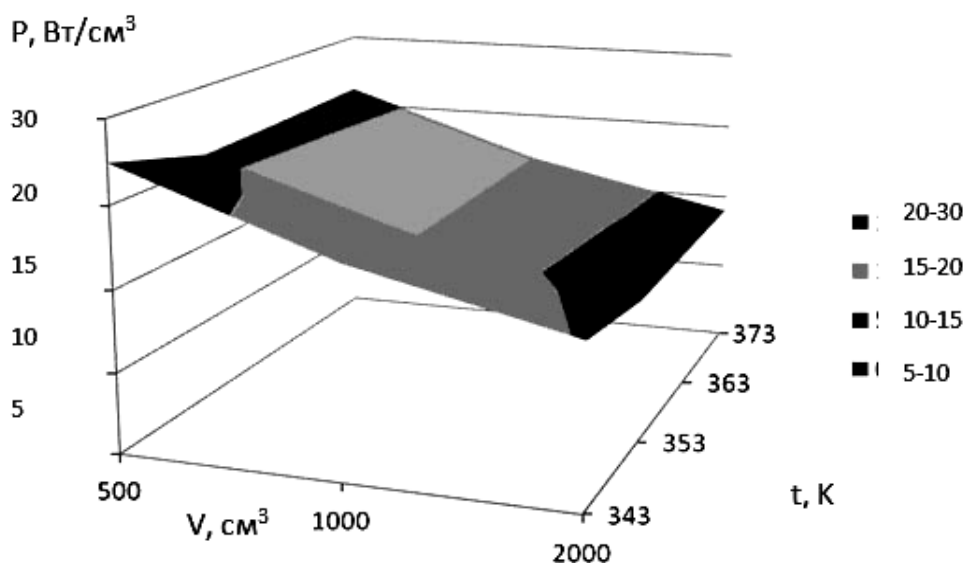


Рис. 2. Удельная СВЧ-мощность при обработке мясных изделий с добавлением муки нута

При СВЧ обработке контрольных образцов средний размер пор снижается более чем в 2 раза по сравнению с традиционной обжаркой. При этом во всех случаях использование СВЧ обработки способствует уменьшению разноразмерности пор. Это позволяет говорить о равномерном теплопереносе в объеме образца и, как следствие, равномерной его кулинарной обработке, что обеспечит улучшение потребительских свойств. Пористость во всех случаях воздействия СВЧ излучения воз-

растает примерно на 10%. Неоднородность теплофизических свойств исходных полуфабрикатов, вызванная введением растительных добавок в виде муки нута, не оказывает существенного влияния на равномерность СВЧ термической обработки изделий и их структурные параметры.

Согласно рекомендациям [3] по оптимизации конструкций СВЧ установок для использования в промышленных условиях (предприятия общественного питания) для приготовления мясных рубленых из-

делий с добавлением муки нута целесообразно использовать установки методического действия с транспортировкой изделий через несколько рабочих камер с магнетронами средней мощности. В конструкции промышленной СВЧ технологической установки в данном случае с учетом определенной выше рекомендуемой частоты и обеспечения удельной мощности при приемлемых энергетических затратах могут использоваться магнетроны типа М93 или М116 мощностью 25 и 50 кВт соответственно.

Экспериментально определены исходные данные и получены частотные эмпирические зависимости для тангенса угла потерь и диэлектрической проницаемости среды, позволившие определить структуру изделий и требования к параметрам, присутствующим в модели.

Уточнено выражение для глубины проникновения энергии СВЧ в структуру, позволившее выбрать из диапазона разрешенных к применению частот рациональное значение – 915 МГц $\pm 2,5\%$.

Разработана математическая модель СВЧ термической обработки фаршевых изделий с добавлением муки нута, позволившая определить степень значимости факторов на эффективность процесса тепловой обработки с энергетической и качественной точек зрения.

Разработан опытный технологический процесс СВЧ термической обработки фаршевых композиций с добавлением муки нута, обеспечивающий улучшение потребительских свойств изделия, обеспечивающий высокоэффективную обработку в течение 4 мин при температуре 80°C и удельной мощности СВЧ 14,3-14,89 Вт/см³ на частоте 915 МГц $\pm 2,5\%$.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Злобина И.В.** Исследование мясных кулинарных изделий с добавлением муки нута / И.В. Злобина, Н.М. Птичкина // Технология и товароведение инновационных пищевых продуктов. 2012. № 3(14). С. 30-36.

2. **Злобина И.В.** Обогащение мясных кулинарных изделий растительным белком / И.В. Злобина, Н.М. Птичкина // Научный электронный архив. URL: <http://forum2009.rae.ru/26/337> (дата обращения: 30.04.2013).

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

4. **Рогов И.А.** Сверхвысокочастотный нагрев пищевых продуктов / И.А. Рогов, С.В. Некрутман. М.: Агропромиздат, 1986. 361 с.

Злобина Ирина Владимировна – ассистент кафедры «Техническая механика и детали машин» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Irina V. Zlobina – Assistant Lecturer, Department of Technical Mechanics and Machine Parts, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Коломейцев Вячеслав Александрович – доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки Российской Федерации, профессор кафедры «Радиоэлектроника и телекоммуникации» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Vyatsheslav A. Kolomeytsev – Dr. Sc., Professor, Honored Master of Sciences of the Russian Federation, Department of Radio Electronics and Telecommunications, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья публикуется с согласия авторов по материалам международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения». Т. 2. С. 235-240.

ВОЗДЕЙСТВИЕ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ НА ПОВЕРХНОСТИ СЛОЖНОГО ПРОФИЛЯ (ФИЗИЧЕСКИЕ И МАТЕМАТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ)

Б.М. Бржозовский, Е.П. Зинина, В.В. Мартынов

IMPACT OF LOW TEMPERATURE PLASMA ON COMPLEX PROFILE SURFACES (PHYSICAL AND MATHEMATICAL ASPECTS)

B.M. Brzhozovskiy, E.P. Zinina, V.V. Martynov

Рассматриваются основные аспекты воздействия низкотемпературной плазмы комбинированного разряда на сложную поверхность для повышения ее прочности и долговечности.

Ключевые слова: *низкотемпературная плазма, комбинированный разряд, поверхность, прочность, долговечность*

Как правило, рабочие поверхности элементов и деталей различных приборов и устройств не являются идеально гладкими, а имеют сложный макро- и микропрофиль, содержащий микронеровности, острые кромки, микровыступы. В этих условиях при воздействии на поверхности низкотемпературной плазмой комбинированного разряда с целью повышения их прочности и износостойкости микродефекты и профиль поверхности выступают как неоднородности, вызывающие концентрацию на них скомпенсированного потока плазмы. В соответствии с классификацией неоднородностей, приведенных в [1], дефекты и профиль можно рассматривать как элементарные неоднородности типа ребро, а микронеровности являются выступами на поверхности, причем любое искривление поверхности или ее локальное отклонение от плоскостности вызовут локальное искажение электростатических полей, что приведет к концентрации электронов и ионов скомпенсированного потока на выступах микронеровностей и ост-

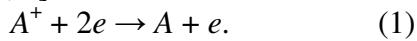
The paper considers the basic aspects relating low-temperature plasmas of combined discharge and their impact on composite surfaces in order to upgrade their strength and durability.

Keywords: *low-temperature plasma, combined discharge, surface, strength, durability*

рых кромках. Кроме того, локальная неоднородность поля, вызванная микронеровностями, приведет к нарушению квазинейтральности скомпенсированного потока и вызовет его локальное расслоение, степень которого зависит от размеров и формы микронеровности. Таким образом, на поверхность воздействует поток заряженных частиц, структура которого изменяется на всем протяжении дрейфа от внешней к внутренней границе плазменного облака и определяется энергией электронов и составом технологической смеси газов.

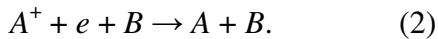
Нейтрализация носителей заряда происходит в результате рекомбинации заряженных частиц путем соединения разномыменно заряженных носителей в нейтральные молекулы на поверхности. В отличие от ионизации рекомбинация происходит с выделением энергии. По этой причине процессы рекомбинации происходят с наибольшей вероятностью при сколь угодно малой кинетической энергии взаимодействующих частиц. Единичный акт ре-

комбинации, как отмечается в [2], происходит при захвате электрона ионом на уровень U_a . При этом квантовая энергия системы ион-электрон уменьшается на величину $e_0(U_i + U_a)$. Эта энергия не может перейти в кинетическую энергию возникшего нейтрального атома или молекулы. Процесс рекомбинации может протекать как в объеме плазмы (объемная рекомбинация), так и на поверхности (поверхностная рекомбинация). Объемная рекомбинация протекает при больших плотностях в безызлучательной форме только при столкновении трех частиц – иона и двух электронов [2, 3]:



Второй электрон забирает избыток энергии, представляющий собой кинетическую энергию первого электрона и энергию, равную энергии связи электрона в нейтральном атоме, то есть энергии ионизации.

Энергия, освобождаемая при поверхностной рекомбинации, также передается третьей частице при тройном соударении между ионом A^+ , электроном и поверхностным атомом B



При этом на характер взаимодействия участвующих в рекомбинации частиц оказывает существенное влияние химический состав поверхностных атомов.

Поскольку поверхности материалов, из которых изготавливаются детали машин и приборов, по химическому составу представляют собой карбиды металлов, сплавы сложного состава или нанесенные покрытия, поверхностные атомы этих материалов можно представить в виде диполей, расположенных во впуклостях и выпуклостях, возникших из-за искажения электронных оболочек поверхностных атомов соседними атомами и атомами, расположенными в объеме материала (рис. 1). Поэтому налетающие ионы и электроны с малой кинетической энергией, эмитируемые нижней границей плазмы, приближаясь к обрабатываемой поверхности, будут избирательно двигаться к разноименным с ними диполям поверхностных атомов. При

этом силы притяжения совершают над элементарным носителем заряда работу, в результате чего налетающие ионы и электроны, попав на поверхность, адсорбируются. В случае, когда на поверхность прибывают ион и электрон, за их адсорбцией следует трехчастичная поверхностная рекомбинация (рис. 2).

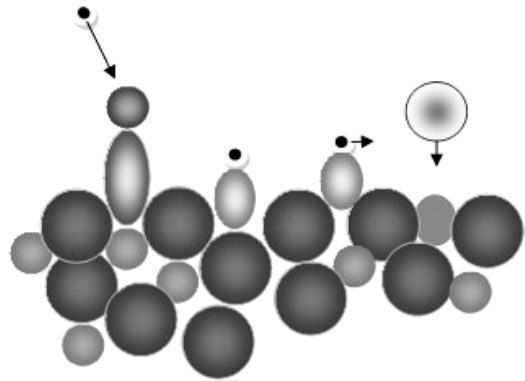


Рис. 1. Формирование адсорбированного слоя ионов и электронов, участвующих в поверхностной рекомбинации

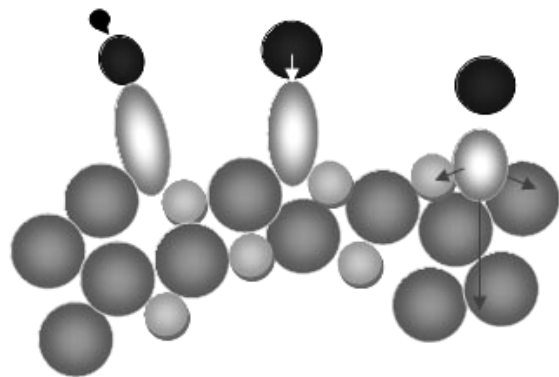


Рис. 2. Схема передачи импульса поверхностному атому, участвующему в трехчастичной рекомбинации

Поверхностная рекомбинация происходит не мгновенно, а за некоторый конечный временной отрезок, включающий следующие стадии:

- эмиссию частиц скомпенсированного потока с внутренней границы плазмы;
- дрейф заряженных частиц к обрабатываемой поверхности;
- адсорбцию частиц на диполях поверхностных атомов;

– ожидание подлета третьей частицы противоположного знака;

– захват налетающей частицы в поле действия кулоновских сил притяжения адсорбированного иона или электрона;

– единичный акт поверхностной трехчастичной рекомбинации иона и электрона с передачей поверхностному атому избытка энергии, равной потенциалу ионизации нейтрализованного иона. Следствием рекомбинации является компенсация (нейтрализация) заряженных частиц, что проявляется в снижении числа носителей тока.

На завершающей стадии рекомбинации возможны:

– десорбция вновь образованного нейтрального атома;

– поверхностная диффузия с последующей полимеризацией и образованием пленки из адсорбированных атомов;

– внедрение поверхностных атомов в глубь материала, что аналогично ионной имплантации.

$$I = \frac{dn_e}{dt} = e\mu(E_f + E')n_en_{p_1^+}n_{p_2^+} \frac{1}{S} - n_en_{p_1^+} \frac{N_B}{S}\gamma_{p_1^+} - n_en_{p_2^+} \frac{N_{B'}}{S}\gamma_{p_2^+}, \quad (4)$$

где n_e – концентрация электронов; $n_{p_1^+}$ и $n_{p_2^+}$ – концентрации ионов сорта p_1 и p_2 , адсорбированных на поверхностных диполях атомов N_B и $N_{B'}$, расположенных на единичной цилиндрической поверхности S ; $\gamma_{p_1^+}$ и $\gamma_{p_2^+}$ – коэффициенты рекомбинации частиц сорта p_1 и p_2 .

Вероятность единичного акта рекомбинации определяет коэффициент γ , величина которого для поверхностной рекомбинации выше, чем для объемной рекомбинации [2], что вызвано ограниченной подвижностью адсорбированных электронов и ионов и их

$$\frac{Q}{dt} = n_en_{p_1^+} \frac{N_B}{S}\gamma_{p_1^+} \langle U_i + U_a \rangle + n_en_{p_2^+} \frac{N_{B'}}{S}\gamma_{p_2^+} \langle U_j + U_a \rangle, \quad (5)$$

где $\langle U_i + U_a \rangle$ и $\langle U_j + U_a \rangle$ – усредненная энергия, переданная поверхностным атомам на площади S в процессе рекомбинации однозарядных ионов сорта p_1 и p_2 , соответственно. Величина $\langle U_i + U_a \rangle$ и $\langle U_j + U_a \rangle$ больше или равна потенциалу ионизации атомов сорта p_1 и p_2 . В этом случае рекомбинация происходит без излучения.

Из приведенного перечня стадий процесса следует, что в результате дрейфа заряженных частиц на единичный участок обрабатываемой поверхности попадет эмитированный поток $J_{эмис}$, состоящий из электронов I_e и однозарядных ионов $I_{p_1^+}$, $I_{p_2^+}$ частиц сорта p_1 и p_2 :

$$J_{эмис} = \frac{I_e + I_{p_1^+} + I_{p_2^+}}{S_{гр}}. \quad (3)$$

Тогда для процесса (2), рассматривая его как химическую реакцию, можно записать скорость образования электронов dn_e за время dt , формирующих ток смещения $I_{смещ}$, который регистрируется в измерительной цепи в процессе плазменной обработки как убыль в результате трехчастичной поверхностной рекомбинации электронной составляющей тока эмиссии $I_{эмис}$, эмитируемой с нижней границы плазмы площадью $S_{гр}$:

длительным пребыванием на сравнительно близких расстояниях друг от друга, отчего процесс рекомбинации более вероятен.

Учитывая, что при рекомбинации ион сорта p_1 , захватывающий электрон на нулевой уровень U_a , изначально может находиться в энергетическом состоянии U_i , а ион сорта p_2 – в энергетическом состоянии U_j , количество теплоты Q , переданное атомам поверхности за время воздействия плазмы dt , запишется как

Как отмечается в [2], при сильной рекомбинации стенки нагреваются вплоть до видимого свечения и плавления.

Из (5) с учетом перечисленных ранее стадий процесса рекомбинации следует, что количество теплоты, переданное поверхностным атомам, лимитировано:

– составом, концентрацией и зарядностью ионов, адсорбированных на еди-

ничной поверхности, которые зависят от интенсивности ионизационных процессов в плазменном облаке;

– временем ожидания третьей частицы, пропорциональным скорости дрейфа и рабочему давлению;

– степенью заселенности поверхности адсорбированными ионами, определяемой процессами аккомодации.

Энергия, выделяемая при трехчастичной поверхностной рекомбинации (теплота рекомбинации), без потерь передается поверхностному атому, участвующему в процессе, в виде колебательного кванта или импульса. Исходя из классических законов сохранения импульса и энергии, энергию, переданную j -му поверхностному атому в результате рекомбинации, можно записать в виде

$$W_j = \frac{m_j}{m_i} W_i = \frac{m_j}{m_i} e\phi_i, \quad (6)$$

где W_j – энергия, переданная j -му поверхностному атому; W_i и m_i – скрытая (потенциальная) энергия ионизации i -го иона и его масса; m_j – масса j -го поверхностного атома, участвующего в процессе; ϕ_i – потенциал ионизации i -го иона; e – элементарный заряд электрона.

По выражению (6) можно вычислить дозу энергии, выделяемой при рекомбинации. Предполагая, что m_i – атом азота (14 а.е.), m_j – атом железа (55,85 а.е.), на котором рекомбинирует ион азота и в результате чего последнему сообщится энергия, равная потенциалу ионизации азота (14,55 эВ), энергия W_j , переданная j -му поверхностному атому железа, составит 58 эВ.

Учитывая, что рабочее давление в камере обработки составляет 300 Па (~2 мм рт. ст.), монослой адсорбированных ионов толщиной 2,6 Å на площади 1 см² занимает объем равный $V = 2,6 \cdot 10^{-10} \cdot 10^{-2} \cdot 10^{-2} \text{ м}^3 = 2,6 \cdot 10^{-14} \text{ м}^3$, в котором находится $N = 1,8 \cdot 10^9$ частиц. При этом максимальное число адсорбированных атомов на этой площади, располагающихся с плотностью 25 частиц на 1 нм², составит $2,5 \cdot 10^{17}$ атомов.

Примем:

– количество центров рекомбинации $n_{рек} = 1,8 \cdot 10^9$ атомов железа, соответствующих количеству атомов поверхностного монослоя железа, на которых одновременно адсорбировались $N = 1,8 \cdot 10^9$ ионов азота;

– разрядный промежуток l между нижней границей плазмы и обрабатываемой поверхностью равным длине свободного пробега Λ при давлении 300 Па, которая составляет $47 \cdot 10^{-6} \text{ м}$ [3];

– скорость $\bar{u}_{ej}$ прохождения промежутка l при потенциале смещения $U = +190 \text{ В}$ равной $4,8 \cdot 10^6 \text{ м/с}$;

– время прохождения промежутка l равным $t = l/\bar{u}_{ej} = 47 \cdot 10^{-6}/4,8 \cdot 10^6 = 9,8 \cdot 10^{-12} \text{ с}$;

– длительность одного акта рекомбинации τ равной $2 \cdot 10^{-3} \text{ с}$;

– частоту доставки частиц монослоя $N = 1,8 \cdot 10^9$ равной $T = 1/t = 1,02 \cdot 10^{11} \text{ циклов/с}$;

– коэффициент поверхностной рекомбинации γ , определяющий вероятность протекания единичного акта рекомбинации, равным 0,1;

– коэффициент аккомодации $k = 1$ [2];

– время воздействия $dt = 1 \text{ с}$,

Дозу энергии рекомбинации $W_{рек}$, т.е. энергии, переданной поверхностному монослою в секунду на площади 1 см², можно определить как

$$W_{рек} = N T \gamma k W_j / dt = 1,8 \cdot 10^9 \cdot 1,02 \cdot 10^{11} \cdot 0,1 \times \\ \times 1 \cdot 58 \cdot 1,602 \cdot 10^{-19} = 17 \text{ Дж/с}.$$

При этом на обрабатываемой поверхности площадью S за время обработки T выделится количество теплоты Q , равное

$$Q = W_{рек} \cdot T \cdot S. \quad (7)$$

Это означает, что зависимость Q от плотности энергии рекомбинации можно рассматривать как временную, т.е. $Q(t)$.

Необходимо отметить, что для плавления монослоя железа, содержащего $n_{рек} = 1,8 \cdot 10^9$ частиц массой $1,67 \cdot 10^{-16} \text{ кг}$, необходимо подвести $2,7 \cdot 10^{-11} \text{ Дж}$, что на несколько порядков меньше энергии, выделившейся на поверхности при рекомбинации. Кроме того, энергия рекомбинации W_j (58 эВ), выделившаяся в единичном акте и перешедшая к поверхностному атому

в виде кинетической энергии, сообщит атому железа начальную скорость, равную $1,4 \cdot 10^4$ м/с.

Замещения на центрах рекомбинации происходят через $\tau = 2 \cdot 10^{-3}$ с, т.е. за 1 с произойдет 500 циклов замещений, за которые обновятся $9 \cdot 10^{11}$ частиц.

Таким образом, на обрабатываемой поверхности будут происходить одновременно процессы доставки ионов и электронов ($N \cdot T$) и замещение рекомбинированных нейтральных атомов ($n_{рек} \tau$).

Из этого следует, что участие атомов как центров рекомбинации:

- в процессах перемещения по поверхности приведет к накоплению адсорбированных атомов и последующей их полимеризации, то есть формированию пленки;

- в процессах перемещения атомов вглубь материала вызовет, во-первых, увеличение плотности, во-вторых, изменение химического состава приповерхностного слоя, в-третьих, приведет к изменению структуры в результате фазовых превращений.

Прокомментируем последнее положение.

В результате трехчастичной рекомбинации на поверхностных атомах $A_{нов}$ и $B_{адс}$ произойдет их перемещение в приповерхностный объем материала за счет выделившейся энергии W_j , перешедшей в начальную кинетическую энергию атомов. Вле-

тающие атомы $A_{нов}$ и $B_{адс}$, двигаясь от поверхности материала, взаимодействуют с орбитальными и свободными электронами вещества, ионными остовами кристаллической решетки. В результате упругого и неупругого взаимодействия с веществом происходит обмен энергией между электронными и ионными подсистемами влетающих атомов и окружающей среды, вызывающий торможение. Переданная энергия выделяется как точечный тепловой пик в некотором локальном объеме в зоне трека перемещения. При этом энергия от перемещающихся атомов, полностью без потерь передается расположенным вдоль трека атомам в виде колебательных квантов, что ведет к интенсивному разогреву. Возникшее градиентное температурное поле придает переносу атомов диффузионный характер и способно интенсифицировать массоперенос в случае, если движущиеся частицы передают атомам решетки энергию, превышающую порог смещения. Это инициирует интенсивное перемешивание и формирование каскадов смещений и замещений, т.е. возникает динамическое перемешивание. В отличие от обычной термической диффузии каскадное перемешивание может приводить к выравниванию концентрации дефектов и других неоднородностей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Райцын Д.Г. Электрическая прочность СВЧ устройств / Д.Г. Райцын. М.: Сов. радио, 1977. 168 с.

2. Грановский В.Л. Электрический ток в газе: Общие вопросы электродинамики газов / В.Л. Грановский. М.–Л.: Гостехиздат, 1952. 432 с.

3. Энциклопедия низкотемпературной плазмы. Вводный том 1. Кн. 1 / под ред. В.Г. Фортова. М.: Наука. 2000. 586 с.

4. Королев Б.И. Основы вакуумной техники / Б.И. Королев. М.: Энергия. 1964. 272 с.

Бржозовский Борис Максович – доктор технических наук, профессор кафедры «Проектирование технических и технологических комплексов» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Boris M. Brzhozovskiy – Dr.Sc., Professor, Department of Designing Technical and Technological Complexes, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Зинина Елена Петровна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Конструирование и компьютерное моделирование технологического оборудования в машино- и приборостроении» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Elena P. Zinina – Ph.D., Associate Professor, Department of Designing Technical and Technological Complexes, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Мартынов Владимир Васильевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Проектирование технических и технологических комплексов» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Vladimir V. Martynov – Dr.Sc., Professor, Department of Designing Technical and Technological Complexes, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

*Статья подготовлена при поддержке гранта РФФИ № НК 14-0,8-0036/14
Статья публикуется с согласия авторов по материалам международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения». Т. 2. С. 244-250.*

УДК 537.331.33

ПОВЕРХНОСТНОЕ СТРУКТУРИРОВАНИЕ КРИСТАЛЛОВ КРЕМНИЯ (100) ПОСЛЕ СВЧ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОГО ТРАВЛЕНИЯ В ХЛАДОНЕ-14

Р.К. Яфаров, В.Я. Шаныгин

SURFACE STRUCTURING OF SILICON CRYSTALS (100) AFTER MICROWAVE PLASMA-CHEMICAL ETCHING IN FREON-14

R.K. Yafarov, V.Ya. Shanygin

Приведены результаты изучения кинетики трансформации поверхностной структуры пластин кремния кристаллографической ориентации (100) различных типов проводимости после низкоэнергетического СВЧ плазмохимического травления в среде хладона.

Ключевые слова: *поверхностное структурирование, кремний, СВЧ плазмохимическое травление, хладон*

The paper presents the research data relating the transformation kinetics of the surface structure for silicon plates with crystallographic orientation (100), characterized for various types of conductivity after low energy microwave plasma-chemical etching in the freon environment.

Keywords: *surface structure of silicon, microwave plasma-chemical etching, freon*

Увеличение степени интеграции кремниевых микросхем ограничено минимальной длиной канала МДП транзистора и минимально возможной толщиной подзатвор-

ного диэлектрика, что требует повышения электрической прочности диоксида кремния. В условиях серийного производства часто появляется необходимость хранения хими-

чески обработанных пластин перед их окислением или получением различных гетероструктур. Важную роль при этом играют подготовка поверхности кремния и условия хранения пластин. Установлено, например, что с увеличением длительности хранения пластин перед окислением плотности проколов термической пленки SiO_2 на кремнии увеличиваются. Принято считать, что для толщин слоев диоксида кремния менее 10 нм основными факторами, влияющими на напряженность электрического поля пробоя диэлектрика, которая при этом составляет менее $1 \cdot 10^6$ В/см, являются закоротки, возникающие в результате адсорбции на атомно-чистой поверхности кремния тяжелых металлов (Cu, Fe, Cr, Ni и др.), а также степень очистки реагентов, используемых для подготовки поверхности и ее окисления [1]. При этом, однако, не учитывается, что, кроме внешних факторов, определенную роль в воспроизводимости свойств поверхности пластин кремния при межоперационном хранении могут играть физические процессы и явления, связанные с собственной перестройкой поверхности кристаллов, которая обусловлена влиянием ее избыточной свободной энергии.

Целью работы являлось изучение кинетики трансформации поверхностной структуры пластин кремния кристаллографической ориентации (100) различных типов проводимости после низкоэнергетичного СВЧ плазмохимического травления в среде хладона.

Удаление естественных оксидных покрытий с поверхностей кристаллов кремния (100) различных типов проводимости осуществлялось плазмохимическим травлением в установке с СВЧ ионно-плазменным источником на частоте 2,45 ГГц [3]. Мощность СВЧ излучения и индукция магнитного поля составляли, соответственно, 250 Вт и 875 Гс. Давление хладона – 14 в процессах плазменной обработки было равно 0,1 Па и обеспечивало выполнение условий электронного циклотронного резонанса, при котором степень ионизации плазмы составляла около 5%. Обработка осуществлялась при смещении на подложкодержателе 100 В

в течение 10 мин. После удаления оксидного покрытия пластины извлекались из вакуумной камеры установки для измерения с использованием сканирующего атомно-силового микроскопа (АСМ) Solver-P-47 морфологических характеристик полученных поверхностей. В качестве зонда использовались стандартные кремниевые кантилеверы CSG10 пирамидальной формы с радиусом закругления 10 нм и жесткостью 0,1 Н/м. Поле сканирования составляло 6×6 мкм. Обработка результатов измерений производилась с использованием программного обеспечения микроскопа Solver-P-47.

На рис. 1, 2 приведены измеренные с использованием АСМ зависимости плотностей и высот выступов на поверхностях кристаллов кремния (100) различных типов проводимости от длительностей экспозиции на атмосфере после удаления естественного оксида кремния травлением в СВЧ плазме хладона. Видно, что характер кинетических кривых зависит от типа полупроводника. Плотности выступов для пластин кремния обоих типов проводимости с увеличением длительности экспозиции на атмосфере имеют устойчивую тенденцию к уменьшению. В изменениях плотностей наблюдается не монотонный, а некоторый волновой характер с периодичностью, которая зависит от длительности выдержки и типа проводимости кристаллов кремния. Плотности выступов и частота колебаний плотностей, а также средняя скорость ее уменьшения на кремнии n типа выше, чем на кремнии p типа. Это свидетельствует о большей морфологической неустойчивости полученной поверхностной микроструктуры на кремнии n типа. Переходный процесс для пластин этого типа, связанный с волнообразными изменениями плотностей выступов, заканчивается примерно через 40 минут после извлечения из вакуумной камеры переходом к некоторым постоянным значениям, не зависящим от дальнейших длительностей экспозиции. При этом высоты выступов для переходного процесса остаются примерно на одном уровне. После его окончания они увеличиваются и также остаются на фиксированном уровне. Для

пластин р типа переход в состояние с минимальной поверхностной энергией является более длительным. Для пластин кремния этого типа наблюдается ярко выраженное противофазное к плотности изменение высот выступов.

Полученные результаты могут быть интерпретированы следующим образом. При ионно-плазменной обработке кремния в СВЧ плазме CF_4 с давлениями около 0,1 Па реализуется режим слабой адсорбции, который характеризуется низкой степенью заполнения поверхности адсорбированными частицами. В этом случае наиболее вероятным является процесс травления, при котором ускоренный электрическим смещением молекулярный ион, например CF_3^+ , при ударе о поверхность диссоциирует на атомы углерода и фтора (ионно-индуцированная (ударная) диссоциация молекулярного иона):

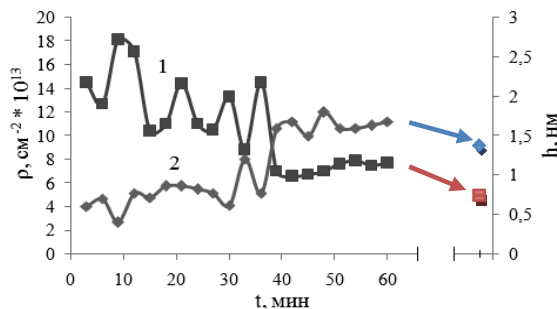
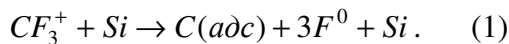


Рис. 1. Зависимости плотности (1) и высоты (2) выступов на поверхностях кристаллов кремния (100) n типа проводимости от длительностей экспозиции на атмосфере после травления в СВЧ плазме CF_4

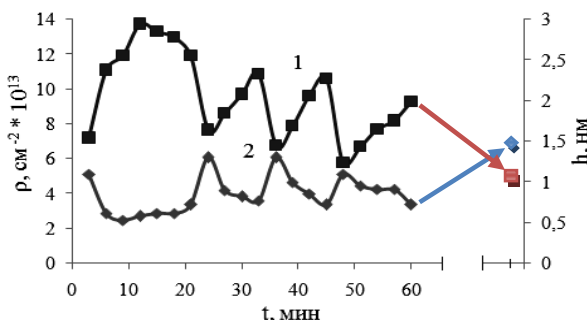
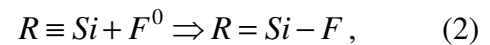


Рис. 2. Зависимости плотности (1) и высоты (2) выступов на поверхностях кристаллов кремния (100) p типа проводимости от длительностей экспозиции на атмосфере после травления в СВЧ плазме CF_4

тельностью экспозиции на атмосфере после травления в СВЧ плазме CF_4

Атомы углерода на начальных стадиях процесса травления способствуют восстановлению и удалению в виде СО естественного оксида на кремнии. После его удаления адатомы углерода хемосорбируются с образованием $Si-C$ комплексов, которые имеют сильную энергию химической связи (4,55 эВ) и препятствуют процессу травления кремния, замедляя его скорость [3, 4]. Удаление атомов кремния происходит в результате протеканий реакций с образованием соединений $Si-F$:



где R – кристаллическая решетка кремния.

Удаление хемосорбированных комплексов $Si-F$ с поверхности кремния в связи с большой энергией химической связи (5,6 эВ) является сложной задачей. Наиболее вероятными механизмами их удаления являются [3]: 1) образование промежуточных продуктов химических реакций – адкомплексов SiF_2 , которые протекают в условиях избытка атомарного фтора и уже сравнительно легко могут быть десорбированы с поверхности кремния ионным ударом; 2 – образование легколетучего соединения SiF_4 в результате взаимодействия двух адкомплексов SiF_2 между собой.

Таким образом, после окончания процесса плазмохимического травления кремния в среде хладона – 14 на его очищенной поверхности остаются хемосорбированные комплексы SiC и SiF , которые пассивируют оборванные (ненасыщенные) химические связи поверхностных атомов кремния и затрудняют их непосредственное взаимодействие с атомами кислорода воздуха при межоперационном хранении пластин вне вакуумной камеры (рис. 3).

Благодаря высокой остаточной поверхностной энергии при экспозиции кремневой пластины в воздушной атмосфере поверхностные атомы углерода и кремния легко окисляются, так как процесс происходит с понижением энергии (энергии химической связи C-O (11,1эВ) и Si-O (8,3 эВ) более чем в два раза превышает энергию химической

связи между атомами кремния и кремния с углеродом). Основные процессы, происходящие при этом, заключаются в постепенном изменении состава поверхностных фаз на кремнии: удалении атомов углерода и фтора с образованием их более летучих комплексов и перераспределении валентных электронов между кремнием и кислородом. При окислении граница раздела Si – SiO₂ движется в глубь кремниевой пластины. Лимитирующим фактором является недостаток свободного объема для образования оксида, который обусловлен большой разницей между молекулярными объемами Si и SiO₂. В результате этого граница Si – SiO₂ представляет собой напряженную гетероструктуру с неоднородными по толщине и структуре слоем оксида кремния [1]. Толщина напряженного слоя составляет величину до 2 нм. Максимальный уровень напряжений устанавливается на границе раздела и оценивается величиной порядка 10⁹ Па. Релаксации упругих напряжений вблизи свободной поверхности кремния способствует самоорганизации гетероструктурного слоя в морфологическую структуру «холмов и канавок» с периодом тем меньшим и высотой тем большей, чем выше удельная поверхностная энергия слоя [2]. Эти процессы на поверхности кремния способствуют формированию системы «кристаллический кремний – естественный оксид кремния» с минимально возможной при данных условиях избыточной свободной энергией.

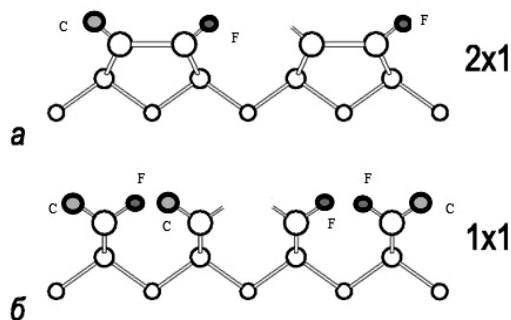


Рис. 3. Схема расположения хемосорбированных атомов углерода и фтора на поверхностях Si(100) после плазменной обработки в хладоне: а – после димерной реконструкции Si(100)2×1; б – идеальной нереконструированной Si(100)1×1

Формирование ненасыщенных электронных связей при травлении и в процессе поверхностных фазовых превращений на кремнии приводит к появлению локализованных на поверхности полупроводника состояний, которые в зависимости от степени сродства к электрону и дырке, положения уровня Ферми на поверхности могут проявлять себя как донорные или акцепторные ловушки захвата или рекомбинационные центры [2]. Присутствие электронных поверхностных состояний в полупроводнике *p*-типа возмущает электронную структуру в объеме и делает ее энергетически невыгодной. Поэтому поверхностные атомы кремния, имеющие ненасыщенную химическую связь, действуют как дырочные ловушки, заряжаясь положительно при отдаче электрона в валентную зону полупроводника (такие поверхностные состояния, как известно, называются донорными). Это приводит к образованию на поверхности трехвалентных атомов кремния с положительным зарядом, которые активно взаимодействуют с остаточными атомами углерода. Поэтому реакционная способность поверхностных атомов кремния *p* типа по отношению к кислороду воздушной атмосферы непосредственно после извлечения пластины из вакуумной камеры установки ниже, чем у пластин кремния *n* типа. Это выражается в меньшей плотности выступов на кремнии *p* типа в начале экспозиции. Поверхность пластин кремния *n* типа из-за высокой плотности свободных электронов является электрокомпенсированной и обладает меньшей поверхностной энергией и насыщенностью углеродом. Поэтому при извлечении из вакуумной камеры она более активно взаимодействует с кислородом атмосферы. Это сопровождается более интенсивными поверхностными фазовыми перестройками и более быстрым переходом в стационарное состояние с минимальной в данных условиях поверхностной энергией. Поверхностные фазовые перестройки выражаются в периодическом изменении морфологии поверхностного слоя по мере накопления в нем упругих напряжений за счет увеличения объема фазы диоксида кремния. После достижения напряжений некоторых критических значений прочности за счет накопленной избыточной поверхностной энергии осуществляется новая структурная перестройка. Для кремния *p* типа это выражается в периодическом уменьшении плотности выступов и синхронном увеличении их высот (рис. 2).

ЛИТЕРАТУРА

1. Технология СБИС: в 2-х кн. / пер. с англ.; под ред. С. Зи. М.: Мир, 1985. 404 с.
2. **Оура К.** Введение в физику поверхности / К. Оура и др. М.: Наука, 2006. 490 с.
3. **Яфаров Р.К.** Физика СВЧ вакуумно-плазменных нанотехнологий / Р.К. Яфаров. М.: Физматлит, 2009. 216 с.

4. **Шаныгин В.Я.** Получение атомарно-чистых поверхностей кремния в низкоэнергетичной СВЧ-плазме низкого давления / В.Я. Шаныгин, Р.К. Яфаров // Журнал технической физики. 2009. Т. 79. Вып. 12. С. 73-78.

Яфаров Равиль Кяшшафович – доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией «Субмикронная электронно-ионная технология» Саратовского филиала Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН

Шаныгин Виталий Яковлевич – старший инженер лаборатории «Субмикронная электронно-ионная технология» Саратовского филиала Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН

Ravil K. Yafarov – Dr.Sc., Head: Laboratory of Submicron Technologies, Kotel'nikov Institute of Radio Engineering and Electronics of the Russian Academy of Sciences (Saratov branch)

Vitaliy Y. Shanygin – Senior Engineer, Laboratory of Submicron Technologies, Kotel'nikov Institute of Radio Engineering and Electronics of the Russian Academy of Sciences (Saratov branch)

Статья публикуется с согласия авторов по материалам международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения». Т. 2. С. 381-387.

УДК 621.318.3

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИМПУЛЬСНЫХ ЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

В.И. Мошкин, Г.Г. Угаров, Д.Н. Шестаков, С.Ю. Помялов

MATHEMATICAL SIMULATION OF ELECTROMAGNETIC PULSE LINEAR MOTORS

V.I. Moshkin, G.G. Ugarov, D.N. Shestakov, S.Y. Pomyalov

Рассмотрены основные аспекты использования программного комплекса ELCUT для моделирования и расчета тяговых характеристик электромагнитных двигателей. В качестве примера приведен расчет статической тяговой характеристики электромагнитного двигателя, используемого для реализации ряда импульс-

The main aspects connected with utilization of IP software package ELCUT for modeling and calculation of the towing characteristics for electromagnetic motors. As an example, we provide the calculation of the static traction characteristics for the electromagnetic motor, utilized for impulse technologies in electronic instrument engineer-

ных технологий электронного приборостроения.

Ключевые слова: математическое моделирование, импульсный линейный электромагнитный двигатель, магнитная система

Цель данного исследования анализ магнитных полей и тяговых характеристик электромагнитных двигателей броневого конструкции с помощью компьютерного моделирования. Данный тип двигателей применяется в качестве исполнительных приводов механического оборудования для реализации ряда импульсных технологий.

При решении задач рационального конструирования магнитных систем двигателей и выбора главных размеров наиболее перспективно математическое моделирование. В работе приведены результаты использования компьютерного программного комплекса ELCUT для расчета тяговых характеристик импульсных линейных электромагнитных двигателей (ЛЭМД) [1].

Точность полученных с помощью программного комплекса тяговых характеристик оценивается путем сравнения с результатами физического моделирования.

Возможности ELCUT проиллюстрируем на примере решения конкретной задачи. Требуется рассчитать статическую тяговую характеристику импульсного ЛЭМД, используемого в приводе прессы [2]. Параметры двигателя (мм): $r_1 = 33,5$;

ing.

Keywords: mathematical modeling, pulsed linear electromagnetic motor, magnetic system

$r_2 = 48$; $r_3 = 59$; $r_4 = 12$; $r_5 = 15$; $h_1 = h_2 = 12$; $L_1 = 100$. Количество витков обмотки возбуждения $w = 780$. Ток обмотки при снятии тяговых характеристик поддерживается неизменным. Магнитная система ЛЭМД выполнена из конструкционной стали.

На рис. 1 показана геометрия рабочей области. Здесь дополнительно указаны основные размеры двигателя. Так как все элементы конструкции двигателя – цилиндрические тела с одним центром относительно оси двигателя, которая одновременно является осью симметрии, при построении картины поля в ELCUT использовалась осесимметричная задача расчета магнитного поля. Полагаем, что система при изучении поля линий магнитного потока обладает геометрической и магнитной симметрией относительно оси z . Положительным качеством такого анализа является уменьшение размеров модели и тем самым сокращение расчетной области. Окончательные результаты построения картины поля в виде линий (трубок) магнитного потока для воздушного зазора $x = 16$ мм приведены на рис. 2.

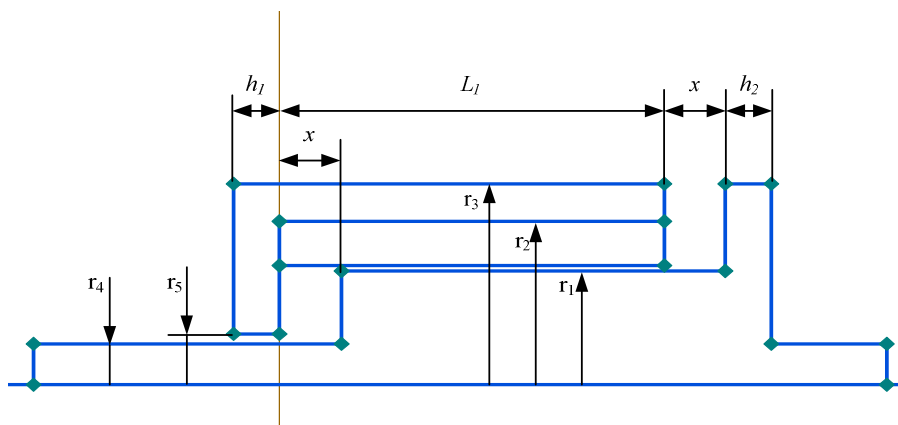


Рис. 1. Геометрия модели двигателя при зазоре $x = 16$ мм

Расчет статической тяговой характеристики выполнен в режиме вычисления объемного интеграла пондеромоторной

силы, действующей на якорь электромагнитного двигателя.

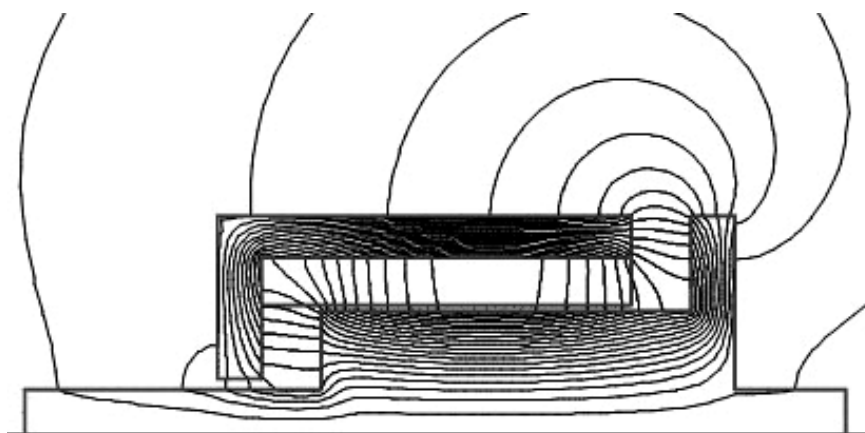


Рис. 2. Картина поля модели при зазоре $x = 16$ мм и токе 15 А

Выбор конструктивного типа и формы электромагнитного привода, пределов рационального применения того или иного типа, количественное сопоставление по экономичности, а также решение проблемы оптимизации и выбора геометрических размеров сводится в большинстве случаев к необходимости получения статической тяговой характеристики.

При выполнении математического моделирования были выполнены расчеты для магнитопровода, выполненного из разных конструкционных сталей, имеющих разные характеристики намагничивания. Кривые намагничивания сталей марок Ст3, 10 и 20 взяты из приложения 1 [3].

Результаты расчетов приведены в таблице и показаны на рис. 3. Расчетные значения тяговых усилий для некоторых положений якоря двигателя и сравнение со значениями усилий, полученных экспериментально с помощью физического моде-

лирования, показывают высокую вероятность выполнения магнитопровода электромагнитного двигателя из стали марки 20. Отклонение расчетных усилий от экспериментальных, особенно в области больших рабочих зазоров, объясняется, по-видимому, неточностью определения статической характеристики физической модели. Отклонение расчетных усилий от экспериментальных в области малых рабочих зазоров объясняется, по-видимому, неточностью измерения малых зазоров при больших усилиях развиваемых физической моделью.

Сравнение различных магнитных систем импульсных ЛЭМД удобно производить по величине условной полезной работы $A_{\text{уп}} = F(x) \cdot x$, под которой понимают произведение величины перемещения x якоря двигателя на минимальное значение тягового усилия $F(x)$, имеющего место по длине этого перемещения [4, 5].

Экспериментальные и расчетные тяговые характеристики ЛЭМД
(при различном типе материала магнитопровода)

Рабочий зазор, мм	Усилие в рабочем зазоре, Н ($I = 15$ А)			
	Эксперимент	Тип материала магнитопровода		
		Сталь Ст3	Сталь 10	Сталь 20
1	6740	7251.00	6170.00	6752.60
2	5120	5396.90	5000.30	5177.50
4	3500	3570.10	3541.10	3528.70
8	2040	2082.60	2096.60	2062.70
12	1400	1444.80	1390.20	1409.60
16	1040	1111.50	1010.50	1067.00
20	785	890.69	781.73	841.81
24	632	754.70	644.21	702.21

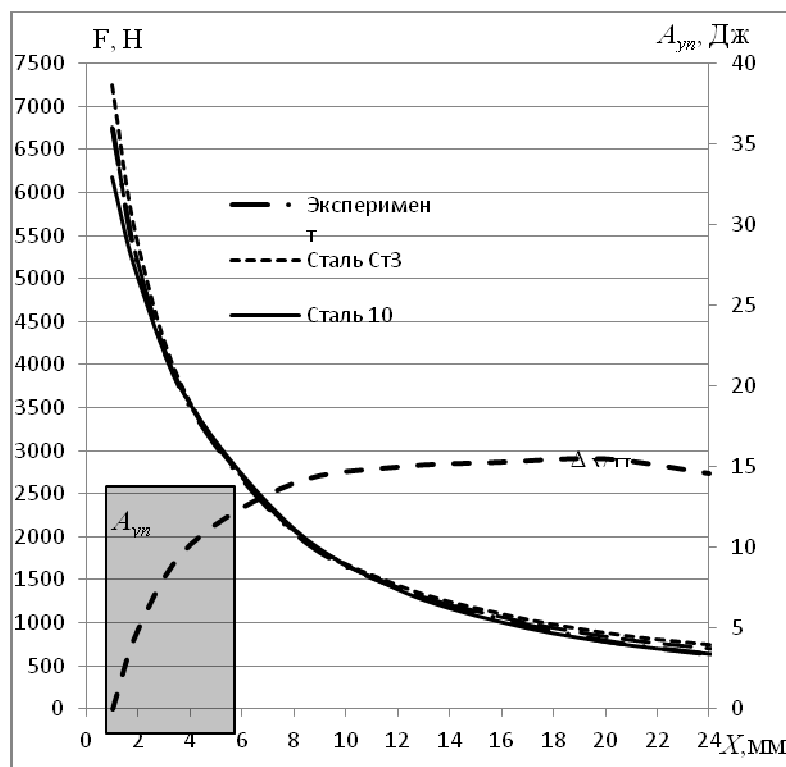


Рис. 3. Тяговые характеристики $F(x)$ импульсного ЛЭМД типа ПЭМ-1,0 при различном материале магнитопровода, токе 15 А, $w = 780$ и условная полезная работа $A_{yp}(x)$ для стали Ст20

На рис. 3 эта работа для перемещения 5 мм пропорциональна серому прямоугольнику. Из графика следует, что для магнитопровода, выполненного из стали Ст20, и при токе 15 А максимальная условная полезная работа достигается при перемещении якоря 14...20 мм.

Использование специализированной программы ELCUT для расчета статических тяговых характеристик электромагнитных двигателей с различной конфигурацией и формой магнитной цепи позволяет полностью или частично исключить физическое моделирование.

Достигнутая точность моделирования дает возможность широкого практического использования данного способа расчета. Отклонения статических характеристик объясняются, по-видимому, просчетами физического моделирования и неизбежными ошибками при выборе приближенного характера кривой намагничивания стали магнитопровода. Для выполнения точного моделирования необходимо наиболее точно применять кривые намагничивания стали.

ЛИТЕРАТУРА

1. ELCUT. Моделирование электромагнитных, тепловых и упругих полей методом конечных элементов. Руководство пользователя. Версия 6.0. ООО «Тор» г. Санкт-Петербург. (<http://elcut.ru>).
2. **Ряшенцев Н.П.** Электромагнитные прессы / Н.П. Ряшенцев, Г.Г. Угаров, А.В. Львицын. Новосибирск: Наука. СО АН СССР, 1989. 216 с.
3. **Константинов О.Я.** Магнитная технологическая оснастка / О.Я. Константинов. Л.: Машиностроение, 1974. 384 с.
4. **Гордон А.В.** Электромагниты постоянного тока / А.В. Гордон, А.Г. Сливинская. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1960. 447 с.
5. **Нейман В.Ю.** Моделирование в FEMM магнитного поля для расчета тяговых характеристик электромагнитных дви-

гателей постоянного тока / В.Ю. Нейман, А.А. Петрова // Сборник научных трудов

НГТУ. Новосибирск: НГТУ, 2008. № 2 (52). С. 101-108.

Мошкин Владимир Иванович – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Энергетика и технология металлов» Курганского государственного университета

Vladimir I. Moshkin – PhD, Associate Professor, Head: Department of Energy and Metal Technology, Kurgan State University

Угаров Геннадий Григорьевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Gennady G. Ugarov – Dr.Sc., Professor, Department of Power Supply for Industrial Enterprises, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Шестаков Дмитрий Николаевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Энергетика и технология металлов» Курганского государственного университета

Dmitry N. Shectakov – PhD, Associate Professor, Department of Energy and Metal Technology, Kurgan State University

Помялов Станислав Юрьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Энергетика и технология металлов» Курганского государственного университета

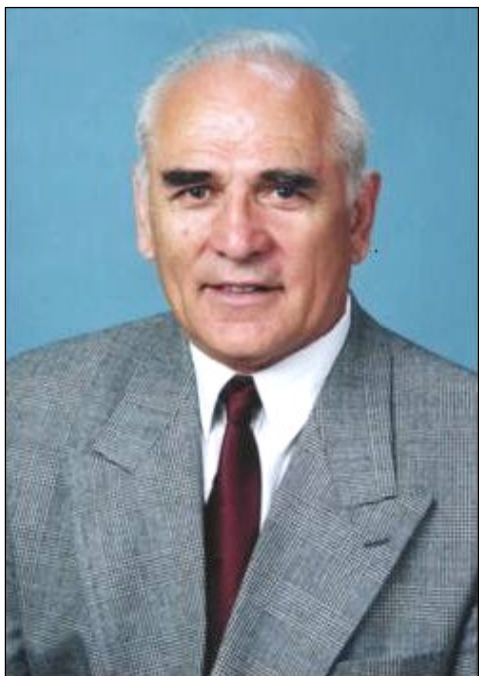
Stanislav Yu. Pomyalov – PhD, Associate Professor, Department of Energy and Metal Technology, Kurgan State University

Статья публикуется с согласия авторов по материалам международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения». Т. 2. С. 348-352.



ЛЕТОПИСЬ

ГЕННАДИЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ МОРОЗОВ



Заслуженный работник высшей школы Российской Федерации, Заслуженный профессор Казанского национального исследовательского технического университета (КНИТУ-КАИ), Заслуженный деятель науки и техники Республики Татарстан, награжден нагрудным знаком Минвуза СССР «За отличные успехи в работе», действительный член Международной Академии информатики и связи и Академии проблем качества РФ.

Г.А. Морозов – известный ученый в области СВЧ нагрева, низкоинтенсивных технологий СВЧ и КВЧ.

В начале 1990-х годов организовал и развил новое научно-исследовательское направление в Республике Татарстан, утвержденное НТС Минвуза РФ, – «Микроволновые процессы, технологии и комплексы»

Мы познакомились с Геннадием в ноябре 1958 года во время работы в Студенческом конструкторском бюро радиотехнического факультета Казанского авиационного института СКБ-5 КАИ.

Я – второкурсник, а Гена – студент первого курса нашего прославленного вуза. Перед нами была поставлена задача обеспечить электроэнергией проведение общестуденческого праздничного вечера студентов и сотрудников КАИ, посвященного дню Октябрьской революции. Активность и профессионализм моего друга позволили ему уже в январе 1959 года возглавить электроотделение СКБ-5, которым он руководил до 1967 года.

В то время мы, студенты, обеспечивали проведение торжественных вечеров и праздников не только в конференц-залах КАИ, но и в городских учреждениях культуры Казани.

В частности, именно наше отделение СКБ-5 сконструировало и организовало монтаж электроосветительной аппаратуры

распределительных электроэнергетических сетей при постановке цветомузыкальной оперы А.Н. Скрябина «Прометей».

С 1962 г., будучи студентом, по приглашению заведующего кафедрой профессора Поповкина В.И., Геннадий Александрович начинает работать лаборантом на кафедре авиационной радиотехники. С 1966 г. он – ассистент, с 1971 г. – старший преподаватель, с 1976 г. – доцент, а с 1996 г. и по настоящее время – профессор кафедры. Его лекции отличают высокий профессиональный уровень и педагогическое мастерство. Он автор ряда учебных пособий с грифом профильных УМО.

С 1988 года по настоящее время Г.А. Морозов возглавляет созданный им Научно-исследовательский центр прикладной электродинамики.

Результатами его организационной и научной деятельности явилось: создание ОНИИ МРП (ныне НИЦ ПРЭ) – первого в КАИ хозрасчетного структурного подразделения, формирование нового в КАИ научного направления и школы «Микроволновые технологии, системы и комплексы».

Под его научным руководством защищены 2 докторские и 8 кандидатских диссертаций; опубликованы 7 монографий и более 100 научных работ, получено 48 авторских свидетельств и патентов; выполнено свыше 50 НИИ и ОКР.

Исследования и разработка аппаратуры по теме «Автоматизация управления тепловыми приборами» позволили разработать и внедрить в серийное производство устройство электронного контроля температурных режимов холодильников с цифровой индикацией.

Фундаментальные исследования, проводимые в центре по грантам Академии наук РТ в области управления микро- и нано-биологическими системами, воздействия низкоинтенсивных микроволновых полей на различные среды позволили сформировать проект «Разработка методов и средств создания новых лекарственных форм для лечения сельскохозяйственных животных», который положительно оценен в Роснано.

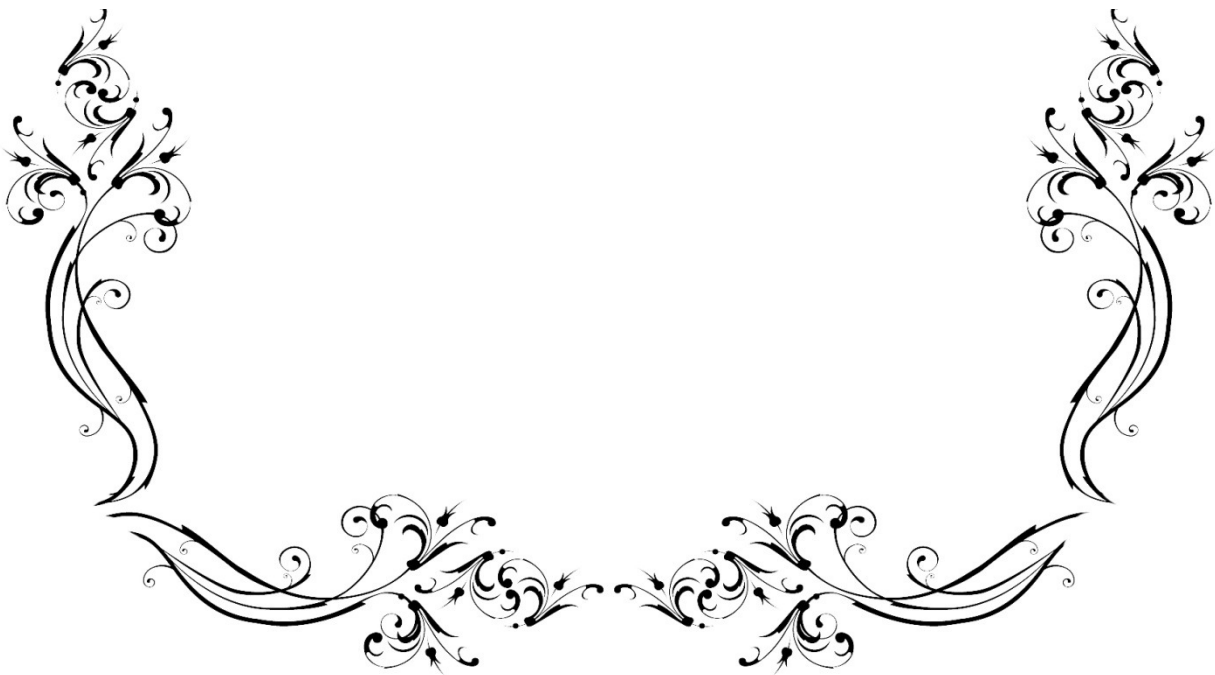
Геннадий Александрович является признанным в России и мире специали-

стом в области микроволновых технологий и их приложений в промышленности, медицине, сельском хозяйстве. С его участием и руководством проведен ряд международных научно-технических конференций. Более десяти лет он является членом редколлегии центрального журнала «Физика волновых процессов и радиотехнические системы», членом диссертационного совета по защите докторских диссертаций, членом Ученого совета Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева.

Геннадий Александрович активно занимается общественной деятельностью. 10 лет он был депутатом Бауманского райсовета депутатов трудящихся, с 1969 по 1985 гг. – кандидатом в члены и членом Татарского обкома профсоюзов работников образования и высшей школы.

Огромная энергия Геннадия Александровича Морозова направлена на благо страны и родного университета, а его педагогическая, научная и общественная деятельность является примером для многих.

Заслуженный деятель науки РФ, Заслуженный деятель науки и техники РТ,
заведующий кафедрой «Радиоэлектронные и квантовые устройства»
КНИТУ-КАИ, д.т.н., профессор Г.И. Ильин



100 ЛЕТ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ А.И. АНДРЮЩЕНКО



Анатолий Иванович Андрющенко – личность, Человек с большой буквы, человек государственного уровня мышления. Всю свою жизнь, всю энергию и силы он отдал защите Отечества, становлению и развитию Саратовской научной школы теплоэнергетики. Имя А.И. Андрющенко вписано в историю СГТУ имени Гагарина Ю.А.

Е.А. Ларин, профессор кафедры «Теплоэнергетика» СГТУ имени Гагарина Ю.А.

При Анатолии Ивановиче и в первую очередь благодаря ему Саратовский политехнический институт стал известным, авторитетным вузом страны. Он заложил структуру и пропорции СПИ, которые позволили нашему вузу со временем заслужить статус технического университета.

Ю.С. Архангельский, заслуженный деятель науки РФ, д.т.н., профессор кафедры «Автоматизированные электротехнологические установки и системы» СГТУ имени Гагарина Ю.А.

Анатолий Иванович вошел в историю нашего университета как талантливый руководитель, сделавший много для его развития. Он был человеком широко одаренным, отличался ясным умом, четкой, лаконичной формулировкой мыслей, у него была прекрасная, образная речь с мягким южнороссийским произношением. Я помню его, начиная с 1964 г., когда стал студентом первого курса. Мне он разрешил поступать в аспирантуру после двух лет службы в армии, хотя у меня на этот момент не было на руках характеристики, потом поддержал мое намерение поступить в докторантуру. Командиром студенческих строительных и сельскохозяйственных отрядов мне неоднократно приходилось встречаться с ним на местах дислокации отрядов, куда он приезжал с инспекционной целью. Мы трепетно готовились к этим встречам, потому что, обладая цепким взглядом, он всегда подмечал какие-то недостатки и

оперативно принимал решения, иногда достаточно крутые. Работая на энергетическом факультете, мне приходилось часто встречаться с ним. В общении он всегда отличался доброжелательностью и радушием. С его именем связана целая эпоха становления и развития нашего университета и Энергетического факультета.

Б.К. Сивяков, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электротехника и электроника» СГТУ имени Гагарина Ю.А.

А.И. Андрющенко – крупный организатор науки. Он много сил и энергии отдал на воспитание нового поколения научных работников, своих учеников. Анатолий Иванович создал в нашем вузе научную школу теплоэнергетиков,

которая пользуется заслуженным признанием в мире.

Р.З. Аминов, заслуженный деятель науки, д.т.н., профессор кафедры «Тепловые и атомные электрические станции» СГТУ имени Гагарина Ю.А.

Профессор Анатолий Иванович Андрющенко оставил энергетикам богатейшее научное наследие – методы термодинамического анализа циклов основных теплоэнергетических установок. Развитый им эксергетический баланс реальных тепловых процессов вместе с экономическими исследованиями позволили выявить их эффективные технологические схемы.

Г.Г. Угаров, доктор технических наук, профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» СГТУ имени Гагарина Ю.А.



ИСТОРИЯ СВЧ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ

Ю.С. Архангельский

Идея написать эти «Записки» принадлежит заслуженному деятелю культуры РФ, к.и.н. О.Н. Дмитриевой.

Дело в том, что найти молодого историка, который взялся бы профессионально изучить и описать полувековую историю СВЧ электротехнологии, не удалось, и Ольга Николаевна предложила мне написать мемуары. Автор этих строк, знающий, о чем речь, людей, которых можно назвать пионерами СВЧ электротехнологии в нашей стране, и тех, кто работает в этой области сегодня, по поводу идеи написать мемуары пожал плечами. И тогда О.Н. Дмитриева дала мне книгу Н.А. Троицкого «Книга о любви (записки историка)».

Николай Алексеевич широко известен среди преподавателей саратовских вузов. Его «Записки историка» подтолкнули меня написать «Записки физика». В них речь идет о любви и преданности делу, которым занят, о преданности вузу, который дал тебе все, что смог, о верности Отечеству.

Здесь приведен сокращенный вариант «Записок».

1.

Термин «СВЧ электротехнологии» означает как технологические процессы, связанные с применением энергии СВЧ электромагнитных колебаний, так и реализующие их установки. До последнего времени говорили о СВЧ электротермии (СВЧ диэлектрическом нагреве). С началом работ в области так называемой нетепловой СВЧ модификации полимерных материалов правильнее говорить о СВЧ электротехнологии, имея в виду оба этих применения.

Одним из основных технологических процессов обработки диэлектрических материалов и изделий является термообработка. При конвективном, радиационном и кондуктивном способах термообработки

нагрев происходит по поверхности, возможны локальные перегревы, подгорание, возникновение недопустимых механических напряжений.

Увеличить глубину тепловыделения в диэлектрике можно, поместив его в электромагнитное поле. В этом случае можно добиться интенсивного нарастания температуры при большей равномерности нагрева благодаря преобразованию энергии электромагнитного поля в теплоту в объеме диэлектрика, уменьшить площадь, занимаемую установкой, улучшить экономические показатели процесса.

Первые опыты по сушке древесины в электромагнитном поле высокой частоты провели в 1930-1934 г.г. Н.С. Селюгин и одновременно А.И. Иоффе.

При диэлектрическом нагреве удельная мощность, выделяющаяся в объекте обработки, равна

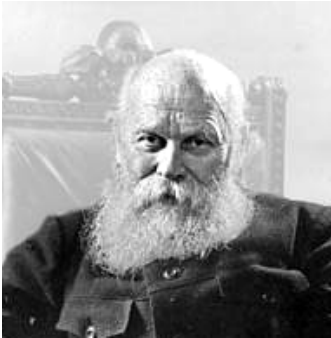
$$q_v = \pi f \epsilon_0 \epsilon' \operatorname{tg} \delta |E|^2, \quad (1)$$

где ϵ' , $\operatorname{tg} \delta$ – относительная диэлектрическая проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь диэлектрика; f – частота электромагнитных колебаний; E – напряженность электрического поля электромагнитной волны; $\epsilon_0 = 10^{-9}/36 \pi$ Ф/м.

С появлением быстролетящих целей для их обнаружения потребовалась радиолокационная техника, а для ее создания – освоение радиоэлектроникой диапазона сверхвысоких частот. Так появилась практическая возможность применения энергии СВЧ электромагнитного поля для термообработки диэлектриков.

Соотношение (1) свидетельствует о перспективности СВЧ диэлектрического нагрева. В этом случае по сравнению с ВЧ нагревом выше f , а следовательно, и q_v . Во-вторых, как правило, у диэлектриков с ростом f величина $\epsilon'' = \operatorname{tg} \delta$ возрастает с максимумом в диапазоне СВЧ.

Работы в области СВЧ диэлектрического нагрева в нашей стране и за рубежом начались в пятидесятых годах XX столетия. Одни из первых экспериментов по промышленному применению энергии СВЧ электромагнитного поля в нашей стране



В.П. Вологдин – один из пионеров высокочастотной техники, член-корреспондент АН СССР, один из основателей Нижегородской радиолaborатории. Создал ВЧ машинные генераторы, с помощью которых впервые осуществлена радиосвязь Москва – Нью-Йорк, высоковольтные ртутные выпрямители. Под его руководством разработаны методы ВЧ пайки, закалки. Лауреат Государственной премии СССР в 1942 и 1952 гг. Его имя носит созданный им Научно-исследовательский институт токов высокой частоты.

В шестидесятые годы XX века от промышленности требовалось выпускать, как тогда говорили, продукцию народнохозяйственного назначения. Это побудило предприятия электронной промышленности начать НИР и ОКР в области СВЧ генераторов технологического назначения, источников их питания и установок СВЧ диэлектрического нагрева (СВЧ электротермических установок). Нашлись вузы, которые

обеспечили научное сопровождение этих работ. В Москве таким вузом стал Московский технологический институт мясной и молочной промышленности (МТИММ), ныне Московская государственная академия прикладной биотехнологии, а в Саратове – Саратовский политехнический институт (СПИ), ныне Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.

В 1931 году основан Московский мясопромышленный комбинат (впоследствии Московский химико-технологический мясопромышленный комбинат). В 1935 г. объединен с Полтавским химико-технологическим институтом мясной промышленности. В 1953 г. переименован в Московский технологический институт мясной и молочной промышленности. Ныне – Московская государственная академия прикладной биотехнологии.



Основан как Саратовский автомобильно-дорожный институт в 1930 г. В 1962 г. реорганизован в Политехнический институт. В 1992 г. получил статус государственного технического университета. Ныне – Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.



31 мая 2013 г. на конференции коллектива СГТУ избрали состав Ученого совета. Профессор Ю.С. Архангельский вернулся на кафедру расстроенный: из делегатов конференции он знал лишь нескольких. А ведь он работает в этом вузе уже сорок пятый год. Какие-то сорокалетние люди уверенно расселись там, где обычно сидели его коллеги.

Он почувствовал изменения года четыре назад. В то утро у ворот технического университета, выходя из маршрутного такси, он подал руку женщине средних лет.

Ю.С. Архангельский окончил физический факультет Саратовского государственного университета имени Н.Г. Чернышевского по специальности «Радиоэлектроника», получил квалификацию «физик-исследователь». Окончил аспирантуру СГУ. Защитил кандидатскую диссертацию по специальности «Электронная техника и приборы», докторскую диссертацию по специальности «Электротермические процессы и установки». Научные труды по теории установок СВЧ диэлектрического нагрева, математическому моделированию технологических процессов в СВЧ электротермических установках, электродинамике и технике СВЧ, тепломассопереносу в СВЧ электромагнитном поле, метрологии, измерениям на СВЧ и в СВЧ электротехнологических установках, экономическому и социальному аспектам электротехники, по радиодеталестроению и теории тепловых шумов электровакуумных СВЧ приборов. Заслуженный деятель науки РФ, Почетный работник высшего профессионального образования РФ, доктор технических наук, профессор.

Когда началась война, ему было пять лет. Сейчас мамыши водят малышей в школу за руку, а ему доверяли самое ценное в те годы – хлебные карточки. Зажав их в кулачке, зимой до рассвета он бежал на угол к хлебному магазину в очередь. Никто ни разу не пытался отнять у малыша этот кусок хлеба. А попробовали бы! Они, мальчишки военной поры, умели постоять за себя.

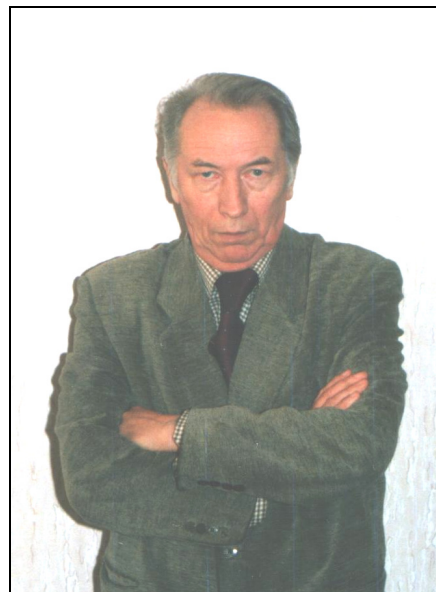
Иногда он приходит сюда. На месте их деревянного домика – зеленый газон во дворе многоэтажного дома. Решетчатые ворота с электронным замком, а раньше жильцы проходили через вечно открытую деревянную калитку...

– Спасибо, – сказала она и кивнула через дорогу на корпус гуманитарных факультетов. – Мне туда.

– А мне туда, – он кивнул на главный корпус.

– Вы кто? – спросила женщина.

От ворот к дверям вестибюля он шел с горькой усмешкой: «Еще недавно меня здесь знала каждая собака». Похожая на лабрадора университетская дворняга, виляя хвостом, сделала к нему несколько шагов и подставила лоб под его ладонь.



Когда его принимали в пионеры, в школе не было света, и галстук ему повязали при свечах... Тетради ему делала мама из случайной бумаги, но он знал, был уверен, что наше дело правое, победа будет за нами.

Большинство их соседей были рабочими, и это сказалось: став взрослым, он всегда среди рабочих был своим, а те только удивлялись, почему он не курит.

И вот школа закончена.

– Хочу быть авиаконструктором, – объявил он родителям, – Вы согласны?

– Решай сам, – ответил отец, – Тебе придется уехать в Москву. Мама без тебя изведется.

И он никуда не уехал.

– Где собираешься учиться? – спросил сосед Шура Шухров.

Он воевал, был авиамехаником на полевых аэродромах, после войны окончил Саратовский политех и теперь учился в аспирантуре.

– Не знаю. Хочу быть инженером.

– Тогда в политехнический. Там большой выбор.

– В том-то и дело.

Они сидели во дворе на заготовленных на дрова бревнах. Летом Шура стригся наголо и был точь-в-точь Маяковский.

– Иди в университет.

И он подал документы на физический факультет СГУ. Когда пришла пора выбирать кафедру, он выбрал кафедру радиофизики, а тему дипломной работы – распространение электромагнитной волны над водой. Он думал, что речь будет идти о дальней радиолокации, когда придется учитывать затухание электромагнитной волны в океанской воде. Но все оказалось прозаичней. Надо было учесть затухание в проточной воде, охлаждающей пленочный резистор, при измерении СВЧ мощности, генерируемой широкополосным мощным СВЧ генератором.

Поздно вечером по дороге домой из университетской библиотеки он встретился в троллейбусе с Шурой Шухровым.

Численные расчеты с логарифмической линейкой не сделаешь.

– А упростить? Есть подобные задачи? Как поступают там?

А ведь действительно! Скин-эффект. Условия Леонтовича. И перейти от уравнений Максвелла к уравнениям телеграфистов... Расчеты, эксперименты, благо дипломная работа писалась в НИИ, еще эксперименты...

Ему предложили остаться в НИИ, и он стал инженером метрологического отдела.

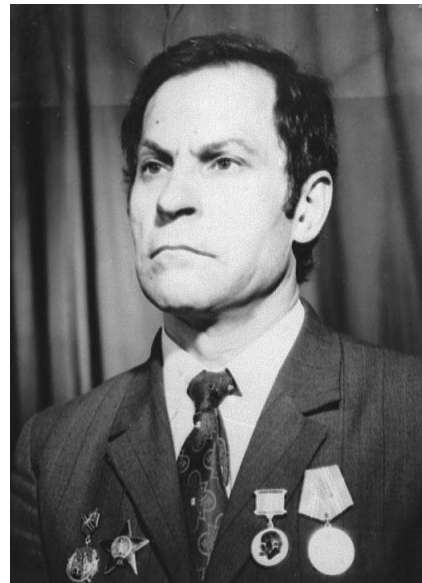
Три года все было хорошо, работа нравилась, он был востребован, а потом все чаще приходило желание серьезно заняться научной работой, и он сказал начальнику, что хочет поступить в аспирантуру.

– Я сегодня подписал приказ о переводе вас на должность старшего инженера! А вы уходите.

– Я в заочную.

– Это другое дело.

Он попросился в аспирантуру на свою родную кафедру радиофизики к доценту А.И. Штырову, который читал им электродинамику СВЧ.



А.И. Штыров – кандидат технических наук, доцент кафедры радиофизики Саратовского государственного университета имени Н.Г. Чернышевского. Научные труды по электродинамике и технике СВЧ, шумам в электровакуумных приборах СВЧ. Участник Великой Отечественной Войны.

Он сдал вступительные экзамены, и тут Алексей Иванович предложил ему учиться очно... В аспирантуре дела у него не заладились.

– У тебя что, и макет ваттметра уже есть? Действующий? – спросил А.И. Штыров.

– Да.

– Видишь ли, я сейчас занимаюсь шумами в СВЧ усилителях. Давай сменим тебе тему. Какими шумами хочешь заняться?

– Тогда уж тепловыми.

Аспирантура пролетела впустую, и по распределению он вернулся туда, откуда пришел – в свой метрологический отдел, правда, ведущим инженером.

– Вернулся! Неудачник! – шептались за его спиной.

Пришлось терпеть. По вечерам писал диссертацию по прежней теме... После защиты А.И. Штыров посоветовал:

– Знаешь что, иди-ка ты доцентом на кафедру электроники Саратовского политеха к Советову. Николай Михайлович тебя возьмет, он был у тебя оппонентом, и доцентов у него не хватает.

На кафедре электроники его многое поразило: отсутствие современной лабораторной базы и особенно – авторитаризм заведующего кафедрой. Но платили здесь больше, чем в НИИ, отпуск всегда летом, нет проходной...

– По какой теме я могу вести научную работу? – спросил он Н.М. Советова.

– А по какой хотите! Надоело мне каждому научную тему придумывать!



Н.М. Советов – основоположник кафедры электроники Саратовского политехнического института (СГТУ имени Гагарина Ю.А.). Доктор технических наук, профессор. Издал ряд художественных книг, в том числе о М.В. Ломоносове.

3.

Термин «диэлектрический нагрев» определяет физическую сущность этого процесса. Нагрев диэлектрика в электромаг-

нитном поле происходит за счет процессов поляризации и протекания токов проводимости.

Если электрические заряды атомов в электромагнитном поле могут перемещаться на макроскопические расстояния, то такие заряды создают ток проводимости. Если электрические заряды могут смещаться в электромагнитном поле лишь на микроскопические расстояния, то их движение приводит к поляризации диэлектрика.

Совокупность этих процессов приводит к поглощению диэлектриком энергии электромагнитного поля. С макроскопической точки зрения выделения теплоты за счет тока проводимости и поляризации неотличимы друг от друга. Этот факт можно выразить, записав относительную диэлектрическую проницаемость ϵ в виде

$$\epsilon = \epsilon' - j\epsilon'' = \epsilon'(1 - j \operatorname{tg} \delta),$$

где $\epsilon' = \frac{\epsilon'_a}{\epsilon}$; $\epsilon'' = \frac{\epsilon''_a}{\epsilon_0} + \frac{\sigma}{\omega \epsilon_0}$; ϵ'_a , ϵ''_a – действительная и мнимая части абсолютной диэлектрической проницаемости, σ – удельная проводимость, ω – круговая частота, $\operatorname{tg} \delta = \frac{\epsilon''}{\epsilon'}$.

Величину $\frac{\sigma}{\omega \epsilon_0 \epsilon'}$ считают первой оценкой свойств среды при данной температуре:

$$\frac{\sigma}{\omega \epsilon_0 \epsilon'} \begin{cases} \ll 1 - \text{диэлектрик} \\ \gg 1 - \text{проводник} \end{cases}$$

Таким образом, деление сред на диэлектрики и проводники относительно, так как принадлежность среды к одному из этих классов зависит от частоты и от электрофизических параметров среды. При этом надо учитывать зависимость электрофизических параметров от частоты. В результате почва, например, – проводник на низких частотах, в СВЧ диапазоне – диэлектрик.

4.

Получив разрешение заведующего кафедрой Н.М. Советова выбрать тему научной работы, он решил создать теорию цилиндрических пленочных резисторов с естественным и принудитель-

ным водяным охлаждением. Тема была диссертательной, и он вспомнил о Коломейцеве. Со Славой Коломейцевым он познакомился в совхозе «Индустриальный», куда его, аспиранта, послали руководителем группы второкурсников кафедры радиофизики копать картошку.

На дворе был холодный октябрь, шли дожди, студенты начали болеть. Он отпускал больных в Саратов, оставшимся приходилось работать за двоих... Однажды, они только что уснули, распахнулась дверь клуба, где они ночевали, и командирский голос приказал:

– Архангельский! На выход!

– С вещами! – в тон прибавил со своего тюфяка Коломейцев.

В темноте, на ветру, на него надвинулся незнакомый мужчина:

– Вы почему отпускаете студентов в город?

– У них температура.

За дверью хихикали студенты... Проверяющий шагнул в зал и отдернул занавеску на сцене.

– А тут что у вас?

– Караул! – завопила со своего тюфяка крайняя студентка.

Проверяющий выскочил наружу и, скользя по грязи, затрусил к машине.

Недавно он встретил Коломейцева в троллейбусе. Оказывается, они жили по соседству. Пригласил в аспирантуру. Коломейцев стал аспирантом, защитил диссертацию в Харьковском институте радиоэлектроники, и этот успех Архангельскому дорого стоил: от положительного отношения Н.М. Советова не осталось и следа.

– Чему ты удивляешься? – удивился М.Э. Авербух, коллега по кафедре. – Ты объявил, что начинаешь работать над докторской диссертацией. А Советов – кандидат наук. Он боится, что ты защитишь докторскую, и тебя назначат вместо него заведующим кафедрой.

Попытался поговорить с Н.М. Советовым.

– Ведите себя прилично! Вы какую тему выбрали для докторской диссертации? СВЧ нагрев? Что такое СВЧ нагрев?

– Новое научно-техническое направление.

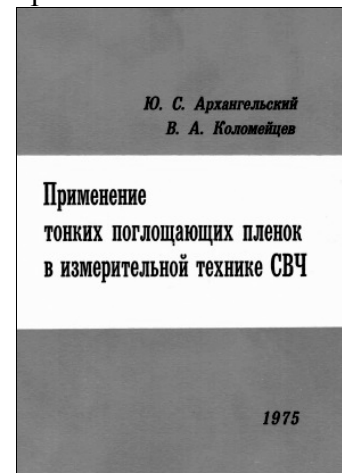
– Не знаю такого.

Когда В.А. Коломейцев защитил кандидатскую диссертацию, Н.М. Советов принял его на кафедру доцентом.



В.А. Коломойцев окончил физический факультет Саратовского государственного университета имени Н.Г. Чернышевского по кафедре радиофизики, аспирантуру Саратовского политехнического института. Доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ. Научные труды по теории установок СВЧ диэлектрического нагрева, по технологическим процессам в СВЧ электромагнитном поле, радиодеталестроению.

В 1976 г. Ю.С. Архангельский и В.А. Коломейцев издали монографию «Применение тонких поглощающих пленок в измерительной технике СВЧ».



В книге изложены вопросы расчета и конструкций поглощающих устройств с тонкими пленками. Рассмотрены широкополосные устройства с поверхностными поглотителями, используемые в технике СВЧ, исследованы пути расширения их рабочего диапазона и повышения величины мощности, рассеиваемой в пленке. Приведены конструкции коаксиальных калориметрических нагрузок с косвенным подогревом проточной воды, а также эквивалентов антенн.

На рис. 1 показаны разработанные на базе исследованных охлаждаемых резисторов конструкции калориметрических нагрузок, предназначенных для измерения СВЧ мощности, а на рис. 2 – калориметрические эквиваленты антенн.

5.

В шестидесятые годы исследования и разработки СВЧ электротермических установок нарастали лавинообразно. Многие считали, что СВЧ нагрев вытеснит традиционные способы термообработки диэлектриков. Лидерами исследований в области СВЧ нагрева в те годы были И.А. Рогов и И.И. Девяткин.

И.И. Девяткин – главный инженер ведущего НИИ электронной промышленности, доктор технических наук, научные труды в области источников СВЧ энергии, теории и конструирования СВЧ электротермических установок.

Развитие методов проектирования СВЧ электротермических установок проходило в несколько этапов.

На первом этапе использовались соотношения для удельной мощности, выделяющейся в единице объема обрабатываемого диэлектрика (1), глубины проникновения электромагнитной энергии в этот объект

$$\delta_E = \frac{\lambda}{\pi \sqrt{2 \epsilon' (\sqrt{1 + \tan^2 \delta} - 1)}} \quad (2)$$

и количества теплоты, необходимой для нагрева диэлектрика

$$Q = c m (T - T_0), \quad (3)$$

где λ – длина волны СВЧ генератора; c, m – удельная теплоемкость и масса обрабатываемого диэлектрика; T_0, T – начальная и конечная температуры диэлектрика.



И.А. Рогов – крупный ученый и педагог в области технологии мяса, комплексной переработки белкового сырья, интенсификации физико-химических и биотехнологических процессов пищевых производств, основатель нового научно-технического направления в области теории и практики использования электрофизических методов в технологии пищевых производств. Ректор, затем президент Московского государственного университета прикладной биотехнологии. Доктор технических наук, профессор, действительный член ряда российских и международных академий.

Соотношение (1) использовалось при выборе частоты генератора, однако ответ можно дать лишь с учетом разнообразных факторов, характеризующих технологический процесс и СВЧ электротермическую установку.

Соотношение (2) использовалось для определения габаритов обрабатываемого диэлектрика при выбранной частоте, но одни использовали выражение (2), а другое соотношение $\delta_p = 2\delta_E$.

Соотношение (3) использовалось для определения мощности СВЧ генератора, хотя в соотношении (3) не учитываются потери теплоты в рабочей камере.

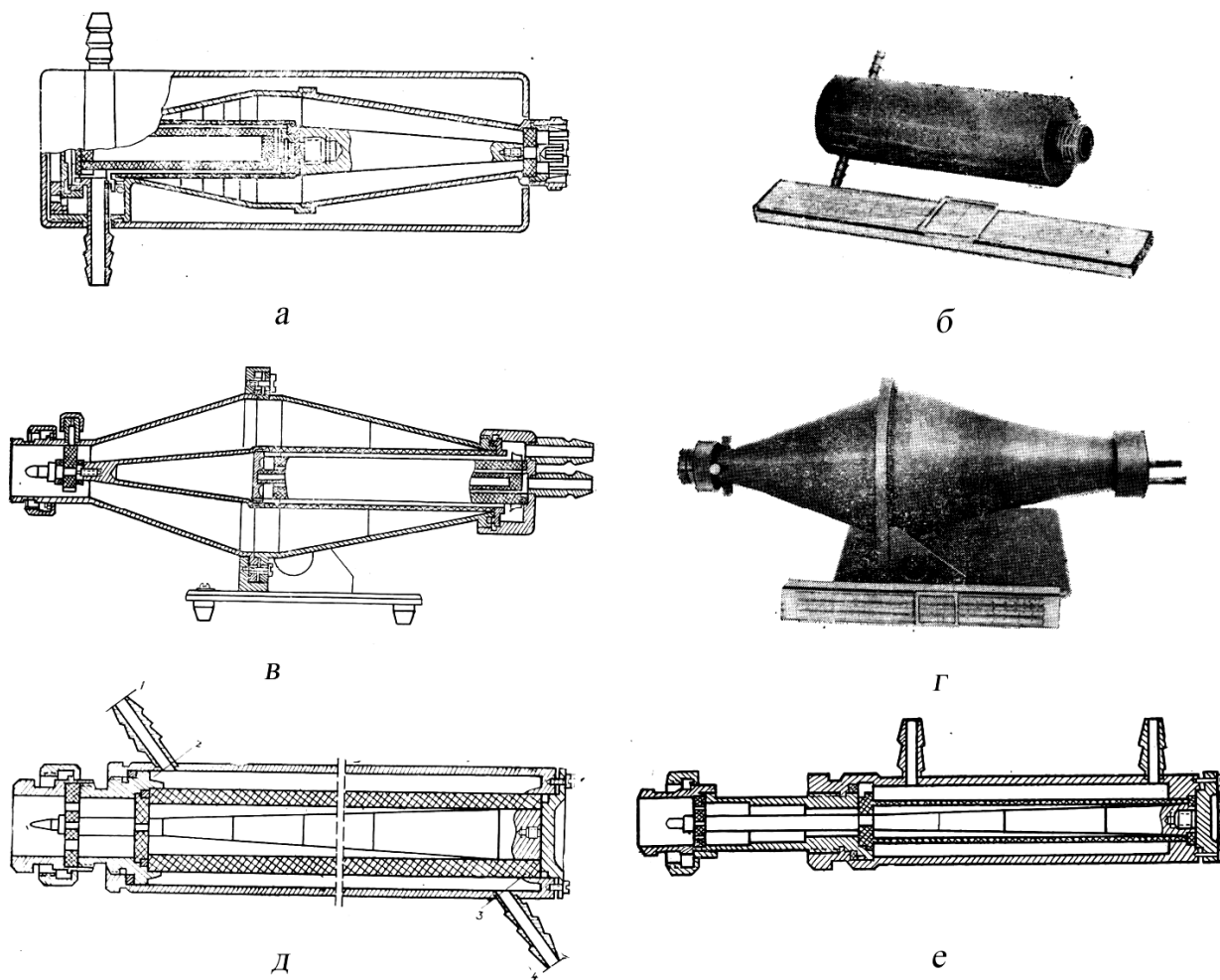


Рис.1. Согласованные калориметрические нагрузки: а, б – на УНУ-5; $R_n = 50 \text{ Ом}$; в, г – на УНУ-50, $R_n = 75 \text{ Ом}$; д – на МОУ-100, $R_n = 75 \text{ Ом}$; е – с охлаждением водноэтиленгликолевой смесью

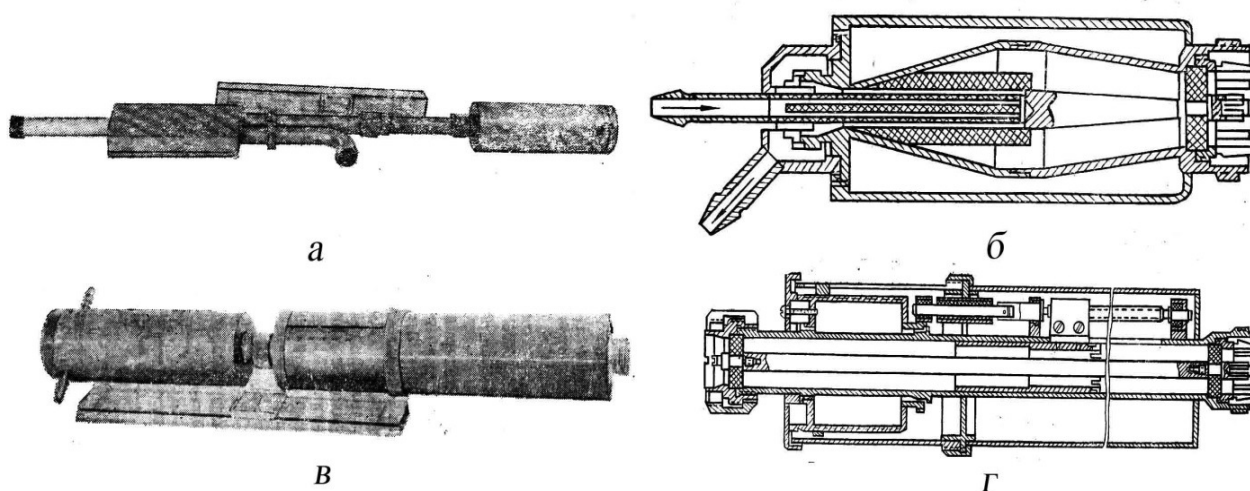


Рис.2. Калориметрические эквиваленты антенн: а – с фиксированным $K_{сн}$ и переменной фазой в канале 7/16 мм; б – калориметрическая нагрузка с фиксированным $K_{сн}$; в – эквивалент антенны, состоящий из согласованной калориметрической нагрузки, рассогласователя и фазовращателя; г – рассогласователь с фазовращателем

6.

Однажды Ю.С.Архангельского позвали для консультации на завод, где первое время после окончания СГУ работал В.А. Коломейцев.

На полу комнаты, куда его привели, его встретила огромная лужа молока.

– Это все он, – сказали ему и кивнули на стоящий за лужей странный аппарат.

Перед ним был первый в нашей стране опытный экземпляр СВЧ пастеризатора молока.

Технологи пищевой промышленности первыми ухватились за идею с помощью СВЧ нагрева интенсифицировать технологические процессы в пищевой отрасли. И.А. Рогов, С.В. Некрутман, В.Н. Хлебников пропагандировали среди электронщиков такое нетрадиционное применение СВЧ энергии. И те поняли, что никто, кроме них, не сделает СВЧ установки, в которых будут стоять их генераторы. И.И. Девяткин, А.С. Зуманович, Г.В. Лысов, А.П. Пиденко взялись за разработку установок СВЧ нагрева.

В Саратове А.П. Пиденко в своей заводской лаборатории совместно с сотрудниками биологического факультета СГУ начал разработку первого в нашей стране СВЧ пастеризатора молока. Они написали монографию, в которой изложили результаты своих исследований влияния СВЧ электромагнитных колебаний на бактериальную клетку, но пастеризатор все пускал и пускал вот такие лужи.

Ю.С. Архангельский предложил использовать в СВЧ пастеризаторе коаксиальную нагрузку, предложенную им еще в кандидатской диссертации (рис. 3). В конце концов было получено авторское свидетельство на изобретение рабочей камеры на круглом неоднородном волноводе с цилиндрическим каналом на его оси для протекания молока (авторы Ю.С. Архангельский, Н.Г. Арделян, А.П. Пиденко, В.П. Кузевой).

Николая Григорьевича Арделяна он знал еще по работе в НИИ и пригласил его перейти в СПИ, начать работу над канди-

датской диссертацией и никогда не пожалел об этом. Как же тщательно работал Н.Г. Арделян! Именно Ю.С. Архангельский и Н.Г. Арделян разработали первые камеры с бегущей волной, ввели в обиход термин КБВ, получили авторские свидетельства на изобретение этих устройств.

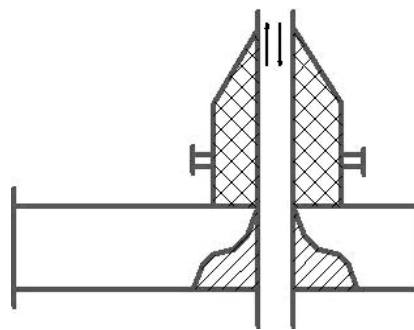


Рис. 3. Рабочая камера СВЧ электротермической рабочей камеры для пастеризации молока в потоке

Однажды в СПИ решили похвалиться работами в области СВЧ нагрева и пригласили в его лабораторию телевидение. На другое утро Н.М. Советов вызвал к себе Ю.С. Архангельского.

– Кому интересны ваши железки? Надо было поджарить кусок мяса, а Татьяна должна была его съесть! Пришлите ее ко мне!

Татьяна Лимаренко перешла в СПИ из НИИ вместе с Н.Г. Арделяном.

– Я это мясо после СВЧ нагрева своей собачке не дам, а вы хотите, чтобы я его съела, – ответила она заведующему кафедрой.

Ее можно было понять. Бытовых СВЧ печей тогда еще не было, а пищевая полноценность продуктов, обработанных в СВЧ электромагнитном поле, только что проверялась в Харькове.

– Надо было хотя бы ко рту поднести!

– Вы хотите, чтобы я обманывала зрителей? – гордо дернула плечиком молодая женщина.

Заявки на исследования в области СВЧ нагрева шли в Саратов со всех сторон. Обращались к А.П. Пиденко. Тот отвечал:

– Я – завод. Сделаю все, что рассчитает политех. Обращайтесь к Архангельскому.

Обращались, по объему договоров их лаборатория в те годы была в СПИ самой доходной. Их было уже десять человек. Ни у кого не было и мысли, что придется искать себе другую работу.

Игорь Константинович Сатаров попросился к ним сам. Он окончил аспирантуру у Н.М. Советова, но кандидатскую не написал.

– Будь моим научным руководителем, – обратился он к Ю.С. Архангельскому. – Дай мне тему.

– А Советов?

– А! – махнул рукой Сатаров. – Он не возражает.

Так к группе Н.Г. Арделяна в их лаборатории добавилась группа И.К. Сатарова. Больше всего Сатаров И. К. любил конструировать, благо было что: речь шла о СВЧ сушке тонких материалов, например киноплёнки.

7.

Второй этап развития расчетных методов проектирования СВЧ электротермических установок начался, когда стало ясно, что ожидаемого массового вытеснения СВЧ нагревом традиционных способов термообработки не происходит. Это в значительной мере объяснялось применением несовершенных методов расчета. В это время произошел отток желающих работать в области СВЧ нагрева.

На втором этапе проведены объемные как электрические, так и тепловые расчеты, но серьезным их недостатком было отсутствие взаимосвязи между электродинамической и тепловой задачами.

В эти годы в области СВЧ нагрева активно работали в первую очередь И.А. Рогов, И.И. Девяткин, А.С. Зусмановский, С.В. Некрутман, Г.В. Лысов, В.Н. Хлебников – Москва и Подмосковье, Ю.В. Лейбин – Ленинград, Ю.С. Архангельский, А.П. Пиденко, В.А. Коломейцев, В.В. Игнатов, В.Н. Панасенко, Н.Г. Арделян, И.К. Сатаров, Л.Н. Кишиневский – Саратов, А.Н. Терещенко, В.Л. Мироненко – Харьков, Р.Л. Филиппов – Челябинск.

Среди публикаций тех лет в первую очередь надо назвать монографии «Физические методы обработки пищевых продуктов» И.А. Рогова и А.В. Горбатова (1974), «Сверхвысокочастотный и инфракрасный нагрев пищевых продуктов» И.А. Рогова, С.В. Некрутмана (1976), «Техника сверхвысокочастотного нагрева пищевых продуктов» И.А. Рогова, С.В. Некрутмана, Г.В. Лысова (1981), «Влияние электромагнитных полей сверхвысокочастотного диапазона на бактериальную клетку» В.В. Игнатова, В.Н. Панасенко, А.П. Пиденко, Ю.П. Родина, Б.А. Шендерова (1978).

В монографии о влиянии СВЧ электромагнитного поля на бактериальную клетку впервые обращено внимание на достижение летального эффекта при температурах, меньших, чем при традиционном тепловом подавлении жизнедеятельности микроорганизмов.

8.

Не реже раза в месяц он ездил в Москву на семинар к И.А. Рогову. Там он познакомился с И.И. Девяткиным, А.С. Зусмановским, С.В. Некрутманом, Ю.В. Лейбиным, В.Н. Хлебниковым, Р.Л. Филипповым.

До или после семинаров ему удалось побывать во всех вузах и НИИ Москвы и Подмосковья, где проводили работы в области СВЧ нагрева.

С.В. Некрутман встречал его там, словно они только прервали свой разговор... У В.Н. Хлебникова на кафельной стене красовалась надпись огромными буквами: «Не лей воду на мотор».

– А что? Кто-то льет? – спросил он.

– Тут у нас после работы все моют из брандспойта. Бабушка должна знать, куда лить нельзя.

Однажды к доске вышел офицер в хороших чинах, в мундире летчика.

– Роберт Леонидович Филиппов, – объявил он и щелкнул каблуками. – До последнего времени – преподаватель военной кафедры Челябинского института механизации сельского хозяйства. Сейчас занимаюсь СВЧ нагревом по приказу ректора.

– Отлично! – похвалил И.А. Рогов.

Однажды он, А.П. Пиденко и А.С. Зусмановский опоздали на ночную электричку в Подмоскowie.

– Момент, – сказал Зусмановский и повел саратовцев куда-то в сторону...

Трясаясь в кабине машиниста одинокого электровоза, они не могли поверить, что так можно уехать в Подмоскowie.

– Вы откуда? – спросил машинист.

– С Волги.

– То-то я гляжу, – и вдруг запел:

Из-за острова на стрежень,

На простор речной волны...

– Вон там остановитесь, пожалуйста, – попросил Зусмановский. – Тут нам ближе...

Три месяца он прожил на улице Саратовской в общежитии института И.А. Рогова, когда приехал в Москву на стажировку.

Он говорил, что не время ехать на стажировку, много работы по хозяйственным договорам, но Н.М. Советов был непреклонен:

– Вы что? Незаменимый? Стажировка обязательна!

Он спланировал стажировку так, что было время на зал диссертаций Ленинской библиотеки. Это был особый мир. Средних лет люди сидят, читают чужие диссертации, что-то старательно выписывают... Вот по проходу с диссертацией в руках идет молодой мужчина, ищет свободное место, чтобы рядом была соседка. Нашел, сел, повозился и подвинул соседке записку. Женщина ее прочитала и небрежно бросила ее мужчине. Мужчина еще повозился, что-то приписал и опять подсунул записку женщине. Та опять ее прочитала и на этот раз оставила ее у себя. Мужчина тут же встал и понес диссертацию к библиотекарю. За ним встала и пошла сдавать диссертацию и женщина...

В Третьяковской галерее женщина пенсионного возраста дрожит всем телом, лицо искажено гримасой.

– Вам плохо?

– Какой ужас! Вы посмотрите, что он делает! – в отчаянии кивает она на картину, где царь Грозный убивает сына...

Из Колонного зала Дома Союзов с концерта Кобзона зрители начинают потихоньку расходиться к полуночи.

– Поет? – спрашивает пожилая гардеробщица.

– Поет.

– И будет петь, пока не разойдетесь. Хоть до утра...

Н.Г. Арделян сказал, что хочет защищать кандидатскую диссертацию в Киевском политехническом институте.

– Не советую, – предостерег он. – Это Украина.

– Я украинец.

– Защищайся в Москве. Нас там знают.

– Знают, не знают... Какая разница?

Во время доклада диссертанта никто не слушал, члены диссертационного совета разговаривали между собой, потом задали несколько пустых вопросов и большинством голосов диссертацию провалили.

В гостинице ночью Архангельский проснулся от того, что кто-то рядом выл. Огляделся. На соседней кровати на коленях, лицом в подушку, стоял Арделян и плакал...

Через год Арделян защитил кандидатскую диссертацию в Москве.

– Меня берут на энергофак, – сказал он Архангельскому. – Здесь мне у Советова ничего не светит. Извини.

Сатаров защитил кандидатскую диссертацию в СПИ, и Советов назначил его начальником кафедральной научной лаборатории.

– Архангельский! – раздалось из репродуктора. – Зайдите ко мне!

– Ого! – улыбнулись все в лаборатории и посмотрели на него.

– Прошу прощения! – поднялся он из-за стола. – Шеф вызывает.

Все расхохотались, а он пошел к своему новому научному начальнику.

Продолжение следует

НИКОЛАЙ АЛЕКСЕЕВИЧ ТРОИЦКИЙ



Выдающийся историк с мировым именем, Почетный доктор Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А., профессор кафедры «История Отечества и культуры» СГТУ имени Гагарина Ю.А., академик Международной академии высшей школы и Академии военных наук РФ, доктор исторических наук, профессор, профессор кафедры «История России» СГУ имени Н.Г. Чернышевского, автор 40 монографий, учебников, учебных пособий и около 500 научных статей по истории России XIX века.

«ВЭ». Летом историческая наука потеряла крупного учёного – Н.А. Троицкого. Слава богу, есть кому продолжить Служение Науке. В издании «Газета недели в Саратове» опубликована Ваша статья «Учитель, перед именем твоим...» Ольга Николаевна, а как Николай Алексеевич работал с учениками? Как учил молодых коллег вести научные исследования?

О.Н.Д. К студентам и ученикам Николай Алексеевич относился очень демократично. Не любил ставить двоек, поэтому старался вытянуть на «тройку» нерадивых студентов, задавая лёгкие вопросы. Но и «пятёрку» у него получить было нелегко. В этом случае, действительно, нужно было знать материал только на «отлично». На учеников он никогда не давил, не обижал мелочной опекой. Поощрялись самостоятельность и свободомыслие, но подкреплённое первоисточниками. Допускались дискуссии даже с его мнением, с его взглядами. И при наличии убедительных фактов он мог признать правоту ученика. А на такое способны далеко не все, а лишь по-настоящему великие люди.



Ольга Николаевна Дмитриева – кандидат исторических наук, заслуженный работник культуры РФ, начальник отдела культурно-эстетической работы управления воспитательной работы СГТУ имени Гагарина Ю.А., 30 лет прослужила в Саратовском областном музее краеведения, 16 из них – заведующей сектором современной истории края. В 1998 г. впервые в области была удостоена звания «Лучший музейный сотрудник».

В то же время на учениках Н.А. Троицкого лежала огромная ответственность! Для нас он был небожителем, гуру, УЧИТЕЛЕМ. Представить на его суд слабую работу считалось позором и приходилось держать планку, тянуться и тянуться вверх за своим наставником. В свою очередь, Николай Алексеевич очень бережно относился к нашим научным сочинениям. Поправляя или редактируя их, стремился сохранить авторскую индивидуальность, неповторимый стиль каждого из учеников.

Многие из нас до сих пор хранят в семейных архивах как самую священную реликвию тексты своих дипломных, кандидатских и докторских работ с его замечаниями на полях, сделанных каллиграфическим почерком. И учеников своих он призывал писать разборчиво, подчёркивая, что тем самым они выражают своё отношение к адресату рукописи, степень своего уважения к нему.

Н.А. Троицкий не только учил, но и воспитывал без проповедей и нравочений, своим личным примером. И многие из его бывших студентов считают, что более важным, более значимым для них были не знания, которые он им дал, а то, что ему удалось заложить в них желание жить по совести, по справедливости.

«ВЭ». Николай Алексеевич сам предлагал темы диссертаций или к нему надо было прийти со своей темой?

О.Н.Д. Николай Алексеевич был не плохим психологом и удивительно точно подбирал каждому своему семинаристу, а впоследствии аспиранту или соискателю тему, способную его увлечь и заинтересовать: одним давал темы по Отечественной войне 1812 г., другим – по российской культуре XIX века, третьим – по истории политических процессов, четвёртым – о горячо любимых им народниках и родо-вольцах. При распределении тем учитывал он и гендерный фактор. Темой биографического исследования у юноши обычно становился женский образ, у девушки – мужской.

Например, темой моей дипломной работы стал политический процесс 20 на-

родовольцев 1882 года, главным подсудимым на котором был один из лидеров общества «Земля и воля», создатель и фактически первый руководитель первой в России политической партии «Народная воля» Александр Дмитриевич Михайлов. В перспективе ему должна была быть посвящена и моя кандидатская диссертация. Но я вышла замуж. У меня родился сын, потом – дочь. Я решила посвятить себя семье. Но дочь всё-таки назвала Александрой в честь Александра Михайлова. Прошли годы. Дети выросли, и я решила вернуться к научной работе. Но диссертацию об А.Д. Михайлове уже защитил москвич Юрий Пелевин. Зная историю происхождения имени моей дочери, Николай Алексеевич предлагает мне исследовать жизнь, деятельность и личность другого известного родо-вольца, нашего земляка, члена Исполнительного комитета «Народной воли» первого состава (так называемого Великого ИК), создателя и первого руководителя её знаменитой динамитной лаборатории, уроженца с. Таволожка Петровского уезда Саратовской губернии Степана Григорьевича Ширяева. Предлагая мне эту тему, Николай Алексеевич учёл, во-первых, мои краеведческие наклонности, а во-вторых, то, что моего старшего сына зовут Степаном. Не довести начатую работу до конца я уже не могла.

«ВЭ». Иногда о науке говорят во множественном числе. Исторические науки, технические науки, физико-математические... Говорят ещё «точные науки». К ним, наверное, отнести историю нельзя?

О.Н.Д. Исторические науки относятся к гуманитарным наукам, изучающим человека в сфере его духовной, умственной, нравственной, культурной и общественной деятельности. На мой взгляд, можно отнести историю к точным наукам в той её части, которая касается дат и фактов, хотя трактовка исторических событий уже бывает различной.

«ВЭ». А какова, говоря техническим языком, допустимая погрешность в научных выводах историков?

О.Н.Д. Уровень допустимой погрешности исторических исследований не определён.

«ВЭ». Иной раз создаётся впечатление, что одно и то же историческое событие у разных авторитетных историков оценивается диаметрально противоположно. Как можно говорить в таком случае о научности этих выводов? Как к разночтениям относился Николай Алексеевич?

О.Н.Д. Интересный вопрос. Прежде всего, следует определиться, кого можно считать авторитетным историком. Наличие регалий или приближённость к власти не всегда являются признаками авторитетности. Очень часто они могут свидетельствовать о конъюнктурности. В среде историков настоящими авторитетами признаны те, кто имеет самостоятельную позицию, не идёт на поводу у политиков, главной целью которых во все времена было стремление превратить историческую науку в свою служанку. Николай Алексеевич на протяжении всей своей жизни боролся за историческую истину, принимая участие в острейших дискуссиях.

«ВЭ». Существуют ли в исторической науке какие-то незыблемые стержни, критерии, принципы, которые непоколебимы, что хоть как-то роднит исторические науки с точными? Были ли такие принципы у Николая Алексеевича?

О.Н.Д. Безусловно, такие стержни есть, и они обязательны для научного исторического исследования. Это принципы: 1) истины – высшей целью и ценностью исторического познания признается истина; 2) конкретности – любой предмет исторического исследования должен изучаться в его конкретности, с учётом неповторимости его содержания, определённости места и времени развития; 3) историзма – всякий предмет исторического исследования должен рассматриваться в развитии; 4) объективности – историк-исследователь в процессе исследования должен стремиться к объективности, преодолению субъективных ошибок и влияния интересов, не связанных с достижением научной истины; 5) всесторонности – историческое познание должно

стремиться всесторонне познать предмет своего исследования; 6) системности – всякий предмет исторического исследования должен рассматриваться во взаимосвязи всех его элементов и в его внешних связях; 7) опоры на исторические источники – информацию об историческом процессе историк-исследователь должен извлекать из источников исторической информации; 8) историографической традиции – изучение всякого предмета исторического исследования должно осуществляться с учётом результатов его предшествующего научного изучения. Николай Алексеевич никогда не отступал от этих принципов, и это обстоятельство вместе с его блестящим талантом и колоссальной трудоспособностью сделали его одним из авторитетнейших историков России.

«В.Э». Ольга Николаевна, Вы работали в Саратовском краеведческом музее... Допустим, археологи при раскопках нашли разбитый кувшин и отдали находку в музей. Что сделают в музее? Выставят находку в том виде, как она была найдена? Как-то склеят осколки, восстановив хотя бы очертания кувшина? Или реставрируют кувшин, изготовив утерянные части?

О.Н.Д. В музеях применяются все три варианта экспонирования исторических раритетов.

«В.Э». А как следует относиться к сносу более поздних построек и строительству сооружений, подобных стоявшим ранее на этом месте? Разве более поздние постройки не представляют историческую ценность? А если кто-то предложит восстановить на этом месте первобытный ландшафт?

О.Н.Д. Думаю, что к каждому конкретному случаю сноса и строительства зданий нужно подходить индивидуально, вдумчиво, действовать по принципу «семь раз отмерь, один раз отрежь». Критерием здесь должны служить историческая и культурная значимость старого и нового объектов. Кроме того, следует чётко представлять цели и последствия данной акции.

«ВЭ». В своей «Книге о любви (Записки историка)» Николай Алексеевич весьма смело высказывает свои оценки о том, о

чём другие говорить не станут. Что Вы думаете на этот счёт?

О.Н.Д. Николай Алексеевич был бесстрашным человеком. Он занимал бескомпромиссную позицию по вопросам взяточничества, продажи и покупки высокопоставленными чиновниками кандидатских и докторских диссертаций. Он выступал против идеализации образа П.А. Столыпина, защищал достижения Советской власти. Никто и ничто не могли остановить его от высказывания своих взглядов, резко отличавшихся от взглядов власти имущих

С Н.А. Троицким мы не были знакомы, но о нем мне рассказывала дочь, когда училась на историческом факультете СГУ. Помню оживление в вузовских кругах Саратова, когда Николай Алексеевич открыто не согласился с губернатором Д.Ф. Аяцковым...Прошли годы...Пару лет назад я спросил ректора СГТУ имени Гагарина Ю.А. доктора исторических наук, профессора И.Р. Плеве, может ли заинтересовать молодого историка, начинающего научную карьеру, история СВЧ электротехнологии. Игорь Рудольфович ответил, что может, но следует найти такого молодого историка...Поиски мои ничего не дали, и тогда заслуженный деятель культуры РФ, кандидат исторических наук О.Н. Дмитриева порекомендовала мне написать мемуары. Как пишут научно-технические монографии, я более или менее знал, а мемуары? Тогда Ольга Николаевна дала мне «Книгу о любви (Записки историка)» Н.А. Троицкого. Недоверчиво я взял эту книгу в руки. Мне предлагают написать мемуары о любви?!...

Я прочитал мемуары Николая Алексеевича, как говорят, в один присест. Перечитал отдельные страницы... Вот о Д.Ф. Аяцкове...Вот о нашей нынешней жизни...Вот документы в приложении...

Прошло не так уж много времени, и передо мной лежит стопка листов толщиной

и их приспешников. Кстати, он не любил не только постсоветских чиновников, но и советских, и царских, вернее, органически не принимал свойственные многим из них общие черты: непорядочность, высокомерие, чванливость, угодничество, мздоимство. Он жил так, как ещё в 1930-е гг. сформулировал великий российский и советский генетик Николай Иванович Вавилов: «На костёр пойдём, гореть будем, но от убеждений своих не откажемся!».

«ВЭ». Спасибо за беседу, Ольга Николаевна!

в ладонь, а на первой странице значится «Книга о любви (Записки физика)»...Этапы развития СВЧ электротехнологии, решенные и еще не решенные проблемы и задачи, формулы, графики, конструкции. И все это чередуется с рассказом, кто что сделал в области СВЧ электротехнологии, кто помогал, а кто мешал, были и такие. И люди, люди, события, фотографии...Москва и Подмосковье, Саратов и Харьков...Вклад в отечественную СВЧ электротехнологию заводов и отраслевых НИИ Москвы, Санкт-Петербурга, Саратова...

Многое еще стоило бы уточнить, прояснить...

Но оставив до поры, до времени мемуары, я попытался уяснить, чем же все-таки научное раскрытие темы «История СВЧ электротехнологии» отличается от обычных мемуаров. Помог доктор философских наук, профессор Д.В. Михель.

Оказывается, история науки начиналась с таких вот мемуаров, но эти мемуары отличаются от современного раскрытия темы, как наблюдения древнего человека за ночным небосводом от современной астрономии...

Я положил перед собой новую стопку бумаги, чтобы попытаться чуть-чуть пройти по тропе, указанной Д.В. Михелем.

Заслуженный деятель науки РФ, д.т.н., профессор кафедры «Автоматизированные электротехнологические установки и системы» Саратовского государственного технического университета 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(8452)99-87-21 — Алексеев Вадим Сергеевич (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 aeu@sstu.ru.

Требования к оформлению публикаций

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

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

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

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

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

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

Также предоставляется информация об авторах (**ФИО полностью, почетные звания, ученая степень, ученое звание, должность, место работы, телефон, e-mail**), название статьи, аннотация и ключевые слова. Данная информация дублируется на **английском языке**. Образец оформления статьи представлен на сайте СГТУ имени Гагарина Ю.А.: <http://www.sstu.ru/nauka/nauchnye-izdaniya/voprosy-elektrotekhnologii/>

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.

Редактор Л.А. Скворцова
Компьютерная верстка Ю.Л. Жупиловой
Перевод на английский язык А.Х. Аскаровой

Почтовый адрес: 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77

Телефон: (845-2) 99-87-63

E-mail: aeu@sstu.ru

Подписано в печать 25.09.2014

Формат 60×84 1/8 Бум. офсет.

Усл. печ. л. 14,5 Уч. изд. л. 6,2

Тираж 500 экз. Заказ 190 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 2015 г.)

Свидетельство о регистрации СМИ *ПИ № ФС77-54621 от 01.07.2013*

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

Address: 77 Politekhnikeskaya Str., 410054, Saratov, Russia

Tel.: (845-2) 99-87-63

E-mail: aeu@sstu.ru

Print date: 25.09.2014

Paper size: 60×84 1/8 Offset-Print

Conventional printed sheet 14,5 Publication base sheet 6,2

Circulation: 500 printed copies Order 190 Subscription and individual copies: open rates

Published by SSTU Publishing, 410054 Saratov, 77 Politekhnikeskaya Str.

Online at www.eLIBRARY.RU

The certificate of media source registration: *PI № FS77-54621 dated 1 July 2013*



Казанский авиационный институт был образован решением Главного управления авиационной промышленности Наркома тяжелой промышленности 5 марта 1932 г. Вначале институт состоял из аэродинамического и самолетостроительного отделений, преобразованных в 1934 г. в самолетостроительный факультет.

В 1939 г. в КАИ был открыт моторостроительный факультет. В

годы Великой Отечественной войны на площадях института работал ряд подразделений и лабораторий Института физики АН СССР, ЦАГИ, ЛИИ, НИИ ГВФ, а также Харьковский авиационный институт. В 1945 г. в институте была организована первая в вузах страны кафедра реактивных двигателей. В 1951 г. в институте был открыт факультет авиационного приборостроения, а в 1952 г. был создан факультет авиационной радиотехники.

В 1967 г. за большие заслуги в подготовке инженерных кадров и в развитии научных исследований институт награжден орденом Трудового Красного Знамени. В 1973 г. КАИ было присвоено имя выдающегося советского авиаконструктора А.Н. Туполева. В марте 1982 г. в честь 50-летнего юбилея КАИ был награжден орденом Дружбы народов.

В 1992 г. КАИ преобразован в Казанский государственный технический университет (КГТУ), в котором значительно расширен спектр направлений и специальностей высшего образования. В 1995 г. в университете создан гуманитарный факультет, в 2000 г. – факультет физико-математической подготовки, в 2003 г. – факультет экономической теории и права и факультет психологии и делового администрирования. В 1999 г. создан институт авиации, наземного транспорта и энергетики (ИАНТЭ). В 2003 году на базе радиотехнического факультета был образован институт радиоэлектроники и телекоммуникаций (ИРЭТ).

Сейчас КГТУ им. А. Н. Туполева – крупный многоотраслевой учебно-научный комплекс. В составе университета работают 11 филиалов в городах Татарстана и Поволжья, обучаются около 15000 студентов.

Научный потенциал университета составляют 58 кафедр, 57 отраслевых и проблемных лабораторий, 10 научно-технических центров, 4 университетских НИИ, экспериментально-опытное производство. Здесь трудятся более 3000 преподавателей, научных работников и инженеров, в том числе свыше 120 докторов наук и профессоров, среди них 17 академиков и членов-корреспондентов РАН, Академии наук Татарстана и Международной академии наук высшей школы.

Международные связи КГТУ зародились в 1937 г. С 1947 по 1955 г. в КАИ обучались иностранные студенты и аспиранты. С 1996 г. в КГТУ подготовка иностранных студентов и аспирантов возобновилась. В 2014 г. открыт Германо-Российский институт новых технологий.

В 2009 году университет победил в конкурсном отборе по проекту «Национальный исследовательский университет».