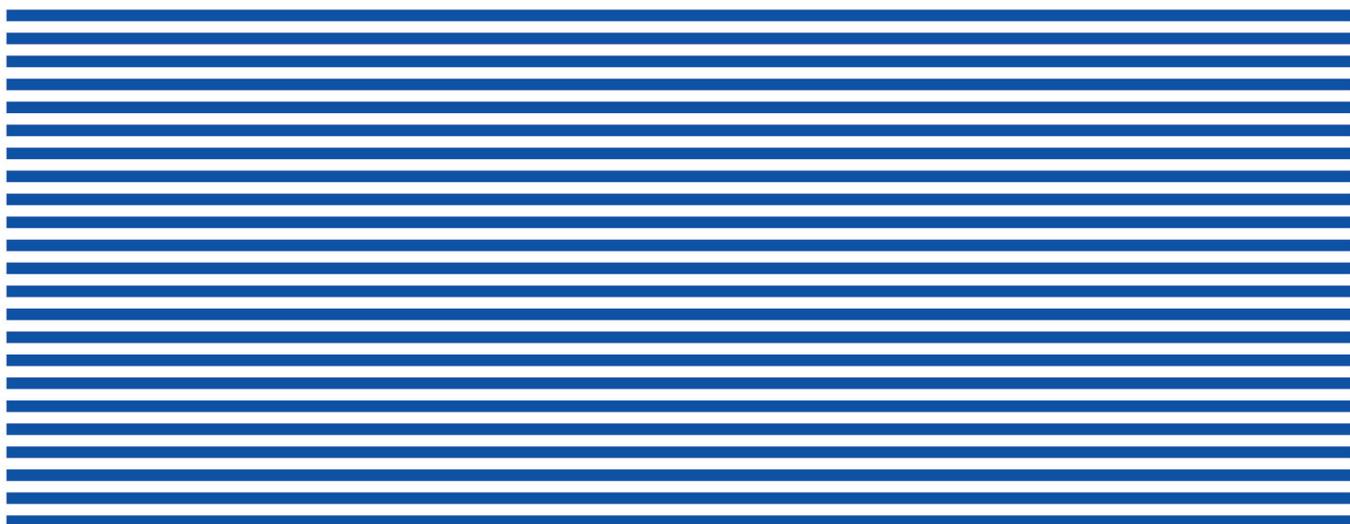




ISSN 2309-6020

ВОПРОСЫ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ



2023

№ 4 (41)



В журнале публикуются статьи по следующим научным специальностям перечня ВАК:

- 2.4.1. Теоретическая и прикладная электротехника
 - 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы
 - 2.4.4. Электротехнология и электрофизика
 - 2.2.4. Приборы и методы измерения (по видам измерения)
 - 2.2.11. Информационно-измерительные и управляющие системы
-
- 2.4.1. Theoretical and Applied Electrical Engineering
 - 2.4.2. Electrical Complexes and Systems
 - 2.4.4. Electrotechnology and Electrophysics
 - 2.2.4. Measuring Instruments and Methods
 - 2.2.11. Information-Measuring and Control Systems

Издается с ноября 2013 года

Выходит один раз в квартал

№ 4 (41)
Декабрь 2023

ВОПРОСЫ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

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

Журнал включён в перечень ведущих рецензируемых научных журналов,
рекомендованных для публикаций Высшей аттестационной комиссией
Минобрнауки России

Главный редактор	АРТЮХОВ ИВАН ИВАНОВИЧ д.т.н., профессор, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов
Зам. главного редактора	БЕКРЕНЕВ НИКОЛАЙ ВАЛЕРЬЕВИЧ д.т.н., профессор, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов
Ответственный секретарь	МОЛОТ СВЕТЛАНА ВИКТОРОВНА старший преподаватель, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов

Редакционная коллегия

А.А. БАЗАРОВ	д.т.н., профессор, СамГТУ, Самара
В.В. ВАХНИНА	д.т.н., профессор, Тольяттинский государственный университет, Тольятти
В.Г. ГОЛЬДШТЕЙН	д.т.н., профессор, СамГТУ, Самара
Ю.В. ГУЛЯЕВ	д.ф.-м.н., профессор, академик РАН, ИРЭ имени В.А. Котельникова РАН, Москва
В.Б. ДЕМИДОВИЧ	д.т.н., профессор, СПбГЭТУ «ЛЭТИ», Санкт-Петербург
Ю.Б. КАЗАКОВ	д.т.н., профессор, ИГЭУ, Иваново
А.Н. МАКАРОВ	д.т.н., профессор, ТвГТУ, Тверь
Г.А. МОРОЗОВ	д.т.н., профессор, КНИТУ-КАИ имени А.Н. Туполева, Казань
Ю.П. ПЕРЕЛЫГИН	д.т.н., профессор, ПГУ, Пенза
А.Ф. РЕЗЧИКОВ	д.т.н., профессор, член-корреспондент РАН, ИПТМУ РАН, Саратов
И.В. РОДИОНОВ	д.т.н., доцент, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов
Ф.Н. САРАПУЛОВ	д.т.н., профессор, УрФУ, Екатеринбург
Ю.Б. ТОМАШЕВСКИЙ	д.т.н., профессор, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов
А.А. ФОМИН	д.т.н., СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов
В.Н. ХМЕЛЕВ	д.т.н., профессор, БТИ, Бийск
В.А. ЦАРЕВ	д.т.н., профессор, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов

Since November 2013
Published Quarterly

№ 4 (41)
December 2023

JOURNAL OF ELECTROTECHNICS

Scientific and Technical Publication

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

The journal is included in the List peer-reviewed scientific publications, recommended for publication by the Higher Attestation Commission of the Ministry of education and science Russia

Editor-in-Chief

ARTYUKHOV IVAN IVANOVICH

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

Assistant to the Editor-in-Chief

BEKRENEV NIKOLAY VALERIEVICH

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

Chief Executive Officer

MOLOT SVETLANA VIKTOROVNA

Senior Lecturer, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov

Editorial Board Members

A.A. BAZAROV

Dr. Sc., Professor, Samara State Technical University, Samara

V.V. VAKHNINA

Dr. Sc., Professor, Togliatti State University, Togliatti

V.G. GOLDSTEIN

Dr. Sc., Professor, Samara State Technical University, Samara

Yu.V. GULYAEV

Dr. Sc., Professor, Academician of RAS, Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of RAS, Moscow

V.B. DEMIDOVICH

Dr. Sc., Professor, Saint Petersburg State Electrotechnical University «LETI», St. Petersburg

Yu.B. KAZAKOV

Dr. Sc., Professor, Ivanovo State Power University, Ivanovo

A.N. MAKAROV

Dr. Sc., Professor, Tver State Technical University, Tver

G.A. MOROZOV

Dr. Sc., Professor, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI, Kazan

Yu.P. PERELIGIN

Dr. Sc., Professor, Penza State University, Penza

A.F. REZCHIKOV

Dr. Sc., Professor, Corresponding Member of RAS, Institute of Precision Mechanics and Control of RAS, Saratov

I.V. RODIONOV

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

F.N. SARAPULOV

Dr. Sc., Professor, Ural Federal University, Ekaterinburg

Yu.B. TOMASHEVSKY

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

A.A. FOMIN

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

V.N. KHMELEV

Dr. Sc., Professor, Biysk Technological Institute, Biysk

V.A. TSAREV

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

СОДЕРЖАНИЕ

ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЯ И ЭЛЕКТРОФИЗИКА

Захаров В.В., Артюхов И.И. Совершенствование методик конечноэлементного 3D моделирова- ния электротермических СВЧ-установок лучевого типа неограниченного объема 5	5
Кириченко Д.И., Шалаев П.Д., Шабунин Н.О., Царев В.А. Ионно-плазменное нанесение микро- и нанотекстурированных покрытий из титана на поверхности коллектор- ных электродов лампы бегущей волны 17	17
Паршиков О.А., Аврамов М.В., Крылов В.В., Игнатъев М.А., Злобина И.В., Бекренев Н.В. Перспективы применения электрофи- зических технологий в аддитивном производстве изделий из полимеров и композитов 25	25
Родионов И.В., Устинов П.Н., Перинская И.В., Куц Л.Е. Лазерная наплавка порошка титанового сплава ВТ6 на нержавеющую сталь 08X18H10T при импульсном воздей- ствии излучения 40	40
Палканов П.А., Кошуру В.А., Фомин А.А. Численное моделирование и экспериментальное исследование процесса индукционного азотирования стальных инструментов 51	51

Сперанский С.К., Родионов И.В. Лазерные технологии в науке и производстве (обзор). 2. Физические особенности генерации излучения и типы лазеров 64	64
Кожевников В.Ю., Федотов В.Д. Экспериментальное исследование получения нано- и микрочастиц оксида железа с помощью СВЧ-энергоподвода 81	81

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

Сошинов А.Г., Атрашенко О.С., Копейкина Т.В., Ахмедова О.О. Увеличение точности контроля состояния трансформаторного оборудования с применением методов искусственного интеллекта 89	89
---	----

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

Костюков В.Д., Стариков А.В. Определение ограничений на быстродействие и жесткость радиальных электромагнитных подшипников нагнетателя газоперекачивающего агрегата 96	96
Усков М.Е. Алгоритм рационального управления составом агрегатов гидроэлектростанции при вторичном регулировании частоты и мощности 103	103
К сведению авторов 111	111

CONTENTS

ELECTROTECHNOLOGY AND ELECTROPHYSICS

Zakharov V.V., Artyukhov I.I.
Improvement of finite element 3D
modeling methods for microwave ray
type electrothermal installations with
unlimited volume 5

**Kirichenko D.I., Shalaev P.D.,
Shabunin N.O., Tsarev V.A.**
Ion-plasma deposition of textured
titanium coatings on the surface of
collecting electrodes of a
travelling wave tube 17

**Parshikov O.A., Avramov M.V.,
Krylov V.V., Ignatiev M.A.,
Zlobina I.V., Bekrenev N.V.**
Prospects for application of
electrophysical technologies in additive
manufacturing of polymer and
composite products 25

**Rodionov I.V., Ustinov P.N.,
Perinskaya I.V., Kuts L.E.**
Laser deposition of titanium VT6 alloy
powder over 08Kh18Ni10T stainless
steel under pulsed radiation..... 40

**Palkanov P.A., Koshuro V.A.,
Fomin A.A.** Numerical simulation and
experimental investigation
of induction nitriding of steel tools 51

Speransky S.K., Rodionov I.V.
Laser technology in science and industry.
Part 2: physical features of radiation
generation and laser types 64

Kozhevnikov V.Yu., Fedotov V.D.
Experimental study of the production
of nano- and microparticles of iron
oxides using microwave power supply 81

INFORMATION MEASURING AND CONTROL SYSTEMS

**Soshinov A.G., Atrashenko O.S.,
Kopeykina T.V., Akhmedova O.O.**
Improving the accuracy of monitoring
transformer plants using artificial
intelligence technologies..... 89

ELECTRICAL COMPLEXES AND SYSTEMS

Kostyukov V.D., Starikov A.V.
Defining the limits on speed and stiffness
of radial electromagnetic bearings in the
supercharger of a gas pumping unit..... 96

Uskov M.E. An algorithm for a rational
control system of hydroelectric power
plants under secondary frequency and
capacity regulation 103

Information for Authors 111

ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЯ И ЭЛЕКТРОФИЗИКА

УДК 621.365.5

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИК КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОГО 3D МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКИХ СВЧ-УСТАНОВОК ЛУЧЕВОГО ТИПА НЕОГРАНИЧЕННОГО ОБЪЕМА

В.В. Захаров, И.И. Артюхов

IMPROVEMENT OF FINITE ELEMENT 3D MODELING METHODS FOR MICROWAVE RAY TYPE ELECTROTHERMAL INSTALLATIONS WITH UNLIMITED VOLUME

V.V. Zakharov, I.I. Artyukhov

Важнейшими аспектами при проектировании электротермических СВЧ-установок лучевого типа неограниченного объема являются исследование согласования излучающей системы с объектом термообработки, определение показателей энергетической эффективности процесса СВЧ-нагрева, а также разработка мероприятий по ограничению опасного воздействия утечек СВЧ-излучения на обслуживающий персонал и окружающую среду. В связи с этим при разработке и оптимизации конструкций СВЧ-установок с применением конечно-элементного 3D моделирования необходимо использовать методики моделирования, учитывающие данные аспекты. В данной работе предложена методика конечно-элементного 3D моделирования процесса СВЧ-нагрева диэлектрика, реализованная в программном обеспечении COMSOL Multiphysics, основанная на применении идеально согласованных слоев, позволяющая учесть распространение СВЧ-излучения не только в объекте термообработки, но и в окружающем пространстве за пределы СВЧ-излучающей системы. На примере процесса СВЧ-термообработки грунта проведено сравнение предлагаемой методики с базовой методикой, реализованной в программном COMSOL Multiphysics.

The key aspects in designing electrothermal ray type microwave installations of unlimited volume include the issues of matching the radiating system with the heat treatment object, defining the energy efficiency indicators of the microwave heating process, as well as the measures to limit the dangerous impact of microwave radiation leaks on the maintenance staff and environment. In this regard, when developing and optimizing the designs of microwave installations using finite element 3D modeling, it is necessary to use the modeling techniques with account to the given aspects. In this paper we propose a modeling technique implemented in the COMSOL Multiphysics software, based on the use of perfectly matched layers, which allows taking into account the propagation of microwave radiation not only in terms of heat treatment, but also terms of surrounding space beyond the microwave radiating system. Using the example of the process of microwave heat treatment of soil, a comparison of the proposed method with the basic method implemented in the COMSOL Multiphysics software has been carried out.

Ключевые слова: СВЧ-нагрев, электротермическая СВЧ-установка лучевого типа неограниченного объема, рупорная антенна, излучающая система, конечно-элементное моделирование, идеально согласованный слой

Электротермические СВЧ-установки лучевого типа неограниченного объема имеют потенциально широкие области применения, т.к. позволяют выполнять термообработку объектов больших площадей и объемов. Их применение возможно взамен установок, использующих традиционные виды нагрева (паровой и огневой), например, для ремонта асфальтобетонных покрытий объектов транспортной инфраструктуры [1, 2], оттаивания грунта при выполнении земляных работ в зимний период [3, 4], обеззараживания почв [5] и т. д.

В СВЧ-установках лучевого типа неограниченного объема (в отличие от установок с камерами ограниченного объема) рабочая камера как таковая отсутствует, а сама установка состоит из источника питания, СВЧ-генератора, системы управления, шасси (для перемещения по объекту термообработки) и излучающей системы. Наиболее распространенными излучающими системами являются рупорные и волновоодно-щелевые [6].

Наличие «открытой» излучающей системы приводит к неизбежным утечкам СВЧ-энергии в окружающее пространство, что может оказывать негативное влияние на окружающую среду и объекты (люди, животные, электронные устройства и т. д.).

При разработке СВЧ-электротермических установок важнейшую роль играет их численное моделирование, позволяющее оптимизировать конструкцию установки и параметры технологического процесса [7]. В последнее время получило распространение конечноэлементное моделирование, реализуемое с помощью специализированного программного обеспечения, например, COMSOL Multiphysics [8]. Такое моделирование позволяет решать взаимосвязанные задачи электродинамики и тепломассопереноса, описывающие ре-

Keywords: microwave heating, microwave ray type electrothermal installation with unlimited volume, horn antenna, radiating system, finite element modeling, perfectly matched layer

альные процессы СВЧ-термообработки диэлектриков, в трехмерной геометрической постановке.

Приведем краткое описание базовой методики трехмерного конечно-элементного моделирования СВЧ-установок лучевого типа с неограниченным объемом, реализованной в COMSOL Multiphysics, предложенной в работе [9] (далее – базовая методика).

На рис. 1 представлена иллюстрация базовой методики на примере трехмерной геометрической модели установки лучевого типа с излучателем в виде рупорной антенны и нагреваемого диэлектрика, состоящего из двух слоев (количество слоев диэлектрика может быть любым в зависимости от конкретной постановки задачи).

В случае термообработки диэлектриков большой площади (грунт, асфальтобетонное покрытие и т. д.) при моделировании достаточно задаться расчетной областью, ограниченной плоскостями A, B (т. к. геометрическая область симметрична относительно вертикальной оси, проведенной через ее центр), наружными плоскостями D, E, верхней (в т. ч. C) и нижней F плоскостями (см. рис. 1).

В расчетной области решаются уравнения электродинамики и теплопроводности (для случая пренебрежения явлением массопереноса):

$$\nabla \times (\mu_r^{-1} \nabla \times \mathbf{E}) - k_0^2 \left(\epsilon_r' - \frac{j\sigma}{\omega \epsilon_0} \right) \mathbf{E} = 0; \quad (1)$$

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial \tau} - \operatorname{div}(\lambda \cdot \operatorname{grad} T) = q_v, \quad (2)$$

где \mathbf{E} – напряженность электрического поля; μ_r – относительная магнитная проницаемость; $k_0 = \omega \sqrt{\epsilon_0 \mu_0}$ – волновое число; ω – круговая частота; ϵ_0 – электрическая постоянная; μ_0 – магнитная постоянная; ϵ_r' – отно-

сительная диэлектрическая проницаемость (действительная часть); $\sigma = \omega \varepsilon_0 \varepsilon_r''$ – электрическая проводимость; ε_r'' – коэффициент потерь; ρ – плотность; c_p – удельная теплоемкость; T – температура; τ – время; λ – коэффициент теплопроводности; q_v – мощность

внутренних источников теплоты, обусловленная диэлектрическими потерями.

Для границ смежных расчетных областей (например «воздух – диэлектрик») задаются условия сопряжения электромагнитных и температурных полей.

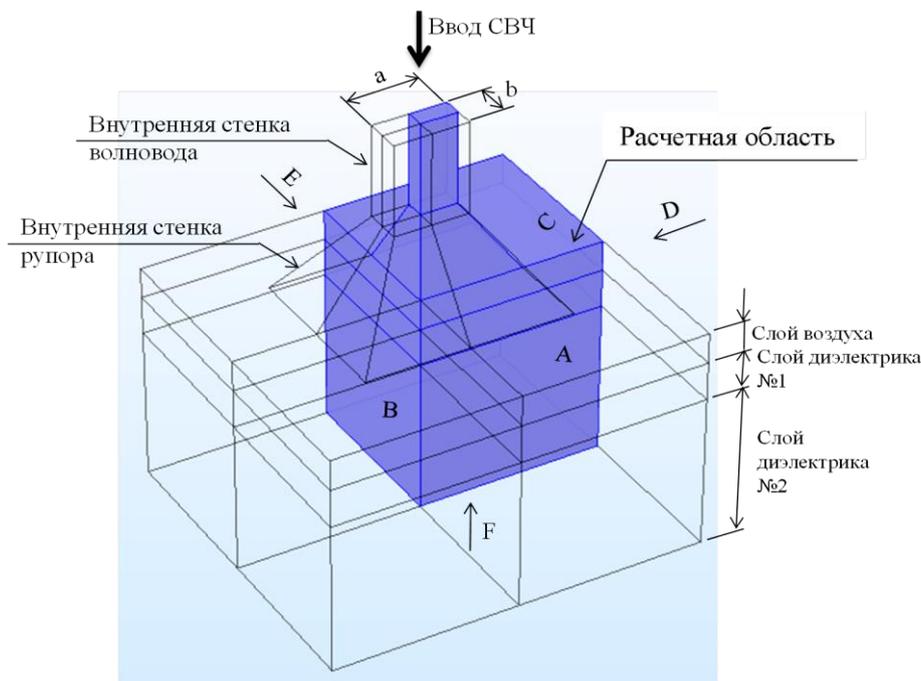


Рис. 1. Трехмерная геометрическая модель установки лучевого типа с излучателем в виде рупорной антенны

Для плоскости А задаются граничные условия:

$$\mathbf{n} \times \mathbf{E} = 0, \quad (3)$$

$$\frac{\partial T}{\partial n} = 0, \quad (4)$$

где \mathbf{n} – единичный вектор нормали к поверхности.

Для плоскости В задается граничное условие (4) и:

$$\mathbf{n} \times \mathbf{H} = 0, \quad (5)$$

где \mathbf{H} – напряженность магнитного поля.

Граничные условия (3) и (5) позволяют учесть симметрию для электромагнитного поля, а граничное условие (4) – симметрию температурного поля.

Если нагреваемый диэлектрик имеет конечную толщину, ограниченную снизу, например, металлической пластиной (ли-

стовой строительный материал, лежащий на металлической подложке), то для нижней плоскости F задаются граничные условия (3) и (4) – при отсутствии теплообмена с данной поверхностью.

Если нагреваемый диэлектрик имеет условно бесконечную толщину / глубину (например, при нагреве грунта), то для нижней плоскости F также задаются граничные условия (3) и (4). При этом толщина/глубина диэлектрика при моделировании подбирается таким образом, чтобы можно было пренебречь отражениями электромагнитной волны от данной границы (практика моделирования показывает, что данный размер целесообразно предварительно принимать не менее 10 глубин проникновения волны в диэлектрик). Аналогичным образом задаются граничные условия на боковых внешних

границах и подбираются размеры расчетных областей.

Для открытых границ воздушного слоя между антенной и диэлектриком (например, граница С на рис. 1) возможно задание граничного условия «идеальный электрический проводник» (3), при этом следует контролировать отсутствие отражений электромагнитной волны от данных границ путем проведения предварительного решения задачи электродинамики при максимальных и минимальных значениях диэлектрических свойств (ϵ'_r , ϵ''_r) объекта термообработки и анализа распределения электромагнитного поля.

Кроме того, возможно применение специального граничного условия «рассеивания» нормально падающей плоской электромагнитной волны в виде [10]:

$$\mathbf{n} \times (\nabla \times (\mathbf{E})) - j k_0 \mathbf{n} \times (\mathbf{E} \times \mathbf{n}) = 0. \quad (6)$$

Как видно из приведенного выше описания базовой методики, несмотря на то, что моделируется установка лучевого типа неограниченного объема, для всех наружных «открытых» границ расчетной модели (за исключением плоскости симметрии В) в задаче электродинамики задаются отражающие электрическое поле \mathbf{E} границы (см. граничное условие (3)). То есть на самом деле базовая модель представляет собой камеру с ограниченным объемом, размеры которой подобраны так, чтобы условно бесконечно удаленные («открытые») границы расчетной области не приводили к заметным отражениям электромагнитной волны.

Задание на «открытых» границах условия (6) не всегда приводит к должному результату, т. к. данное граничное условие адекватно работает только при нормальном падении электромагнитной волны. Любые волны, падающие не перпендикулярно на границу с условием (6), будут частично отражаться.

Таким образом, базовая методика имеет следующие недостатки:

- отсутствует возможность корректного определения энергетических характеристик СВЧ-излучающей системы, в первую оче-

редь коэффициента стоячей волны по напряжению и КПД по использованию СВЧ-энергии;

- отсутствует возможность оценки степени негативного влияния утечек СВЧ-излучения в окружающее пространство;

- в предельных случаях (малое или большое расстояние от апертуры излучающей системы до обрабатываемого диэлектрика) погрешности применения базовой методики могут оказаться неприемлемыми или для их компенсации потребуется существенное увеличение расчетной области, приводящее к увеличению вычислительных ресурсов компьютера (тактовой частоты процессора, оперативной памяти, скорости сохранения данных и т. д.).

В данной работе предложена альтернативная методика конечно-элементного моделирования электротермических СВЧ-установок лучевого типа неограниченного объема, лишенная вышеуказанных недостатков. Рассмотрим основные положения данной методики, проведем сравнение результатов моделирования, полученных с применением базовой и предлагаемой методики, а также рассмотрим результаты моделирования, которые могут быть получены только с применением предлагаемой методики.

Следуя практике моделирования приемных и передающих антенн, предлагаемая методика предусматривает использование для имитации «открытых» границ так называемых идеально согласованных слоев [11].

Идеально согласованный слой – это область определенной толщины, пристыковываемая к наружной границе расчетной области. Идеально согласованный слой представляет собой объект, обладающий анизотропными и комплексными диэлектрической и магнитной проницаемостями. Хотя данные слои теоретически являются неотражающими, они, тем не менее, проявляют некоторые отражающие свойства из-за ошибок при численной дискретизации задачи: сетки разбиения. Чтобы минимизировать это отражение, необходимо применять такое разбиение, которое учитывает анизотропию свойств материала [10].

На рис. 2 приведена иллюстрация предлагаемой методики на примере трехмерной геометрической модели установки лучевого типа с излучателем в виде рупорной антенны и нагреваемого диэлектрика, а также конеч-

но-элементная сетка. Как видно из рис. 2, в качестве расчетной области, аналогично рис. 1, выбрана четверть от полной геометрической модели с использованием в плоскостях симметрии граничных условий (3)-(5).

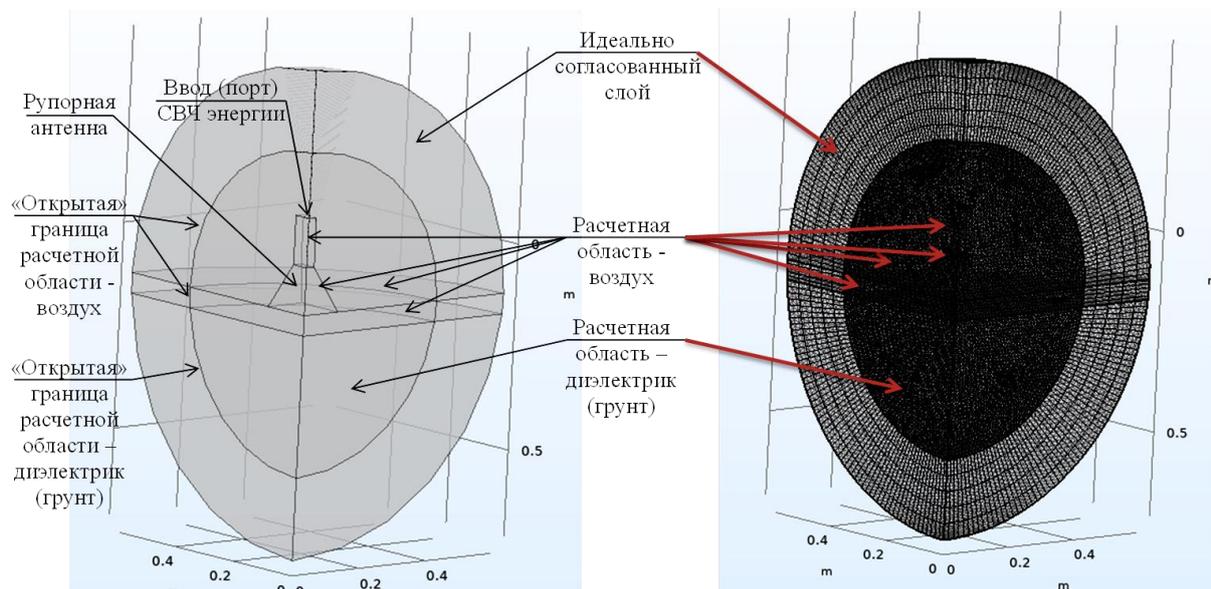


Рис. 2. Трехмерная геометрическая модель установки лучевого типа с излучателем в виде рупорной антенны с идеально согласованным слоем (слева) и конечноэлементная сетка (справа) – предлагаемая методика

Реализация данной методики в COMSOL Multiphysics имеет следующие особенности.

1. Всю расчетную область необходимо ограничить сферой, охватывающей, в том числе, рупорную антенну с СВЧ-портом. При построении сферы в блоке «Layers» (слои) задать наружный радиус идеально согласованного слоя. В блоке «Definitions» выбрать опцию «Perfectly Matched Layer», указать тип идеально согласованного слоя (сферический) и координаты центра.

2. Для задания порта, находящегося внутри расчетной области, необходимо:

- переназначить граничное условие «Perfect Electric Conductor», описываемое уравнением (3), для наружных металлических поверхностей рупорной антенны;

- в меню настройки СВЧ-порта выбрать опцию «Activate slit condition on interior port» (активировать условие разреза для внутреннего порта) и выбрать направление ввода СВЧ-энергии.

3. Для плоскостей симметрии граничные условия задать аналогично рис. 1.

4. На наружной границе идеально согласованного слоя задать граничное условие (6) – Scattering Boundary Condition.

5. Для зон идеально согласованных слоев назначить материалы – для верхней части – воздух, для нижней части – диэлектрик.

При автоматическом построении конечно-элементной сетки расчетная область будет разбита на тетраэдрические элементы, а область идеально согласованного слоя – на четырехугольные призмы. Рекомендуется, чтобы число слоев призматических элементов было не менее пяти, а максимальный размер призматического элемента составлял не более одной пятой длины волны в среде ее распространения.

Следует отметить, что альтернативой применению идеально согласованных слоев могло бы быть простое увеличение сферической области до таких размеров, при которых отражениями электромагнитных волн от ее «открытых» границ можно было бы пренебречь. Но радиус такой сферы будет существенно больше радиуса идеально

согласованного слоя, что при расчете приведет к задействованию существенно больших вычислительных ресурсов компьютера. Таким образом, применение идеально согласованного слоя позволяет адекватно учесть отсутствие отражения электромагнитного поля от «открытых» границ при сравнительно малом задействовании вычислительных ресурсов компьютера.

Сравнение результатов моделирования с применением базовой и предлагаемой методики проведем на примере численного моделирования термообработки почвенного грунта с применением (в первом приближении) СВЧ-установки лучевого типа с неподвижной рупорной антенной.

Геометрическая модель базовой методики приведена на рис. 3. Геометрическая

модель предлагаемой методики приведена на рис. 2. Как видно из рис. 2 и 3, для обоих вариантов основные геометрические размеры (размеры рупорной антенны, расстояние от рупорной антенны до грунта, глубина массива грунта) идентичны. При построении конечно-элементной сетки максимальные размеры элементов ограничены одинаково – на величину 1 см. Исходные данные для моделирования приведены в табл. 1.

На рис. 4 приведены результаты моделирования распределения электрической составляющей электромагнитного поля E по глубине грунта (вдоль вертикальной оси симметрии) для различных расстояний от рупорной антенны до грунта.

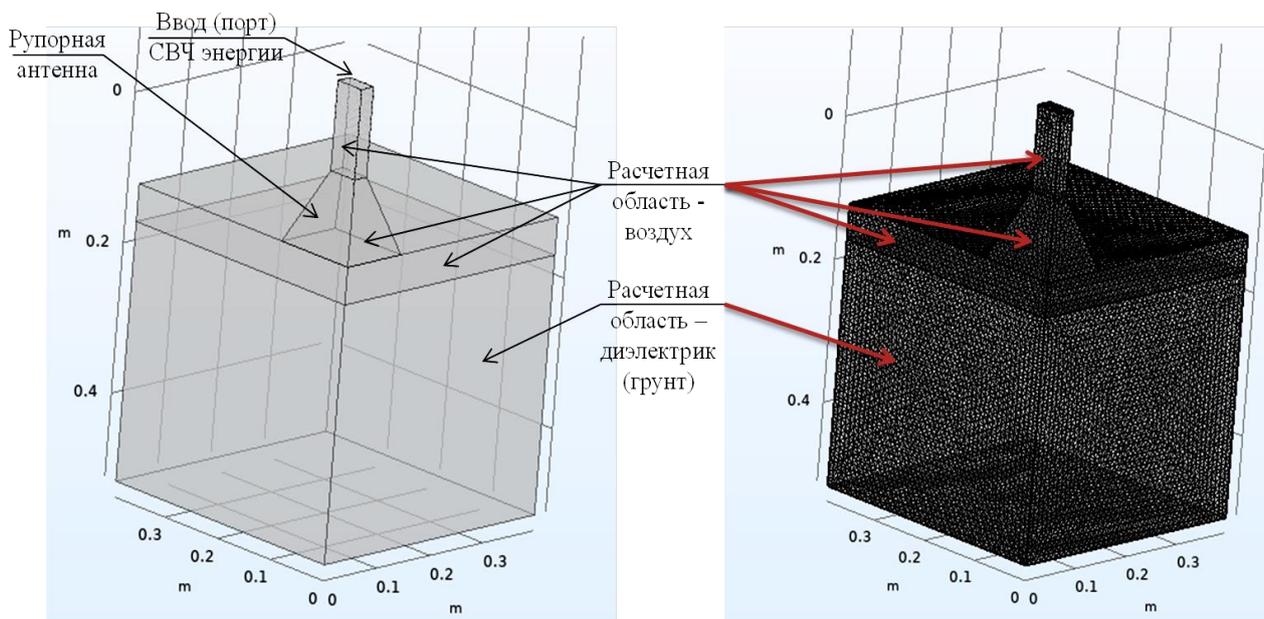


Рис. 3. Трехмерная геометрическая модель СВЧ-установки лучевого типа с излучателем в виде рупорной антенны (слева) и конечно-элементная сетка (справа) – базовая методика

Таблица 1 – Исходные данные для моделирования

Параметр	Значение
Длина рупора	116 мм
Размеры волновода	45×90×120 мм
Размеры раскрыва рупора	200×250 мм
Расстояние от рупорной антенны до грунта	0,02; 0,05; 0,1 м
Комплексная диэлектрическая проницаемость грунта	2,6-0,377j
Удельное сопротивление грунта	50 Ом·м
Плотность грунта	2000 кг/м ³
Удельная теплоемкость грунта	1150 Дж/(кг·К)
Коэффициент теплоотдачи с наружной поверхности грунта	10 Вт/(м ² ·К)

Окончание табл. 1

Параметр	Значение
Коэффициент теплопроводности грунта	1,49 Вт/(мК)
Мощность СВЧ-излучения	700 Вт
Частота электромагнитного поля	2450 МГц
Температура окружающей среды и начальная температура грунта	293,15 К

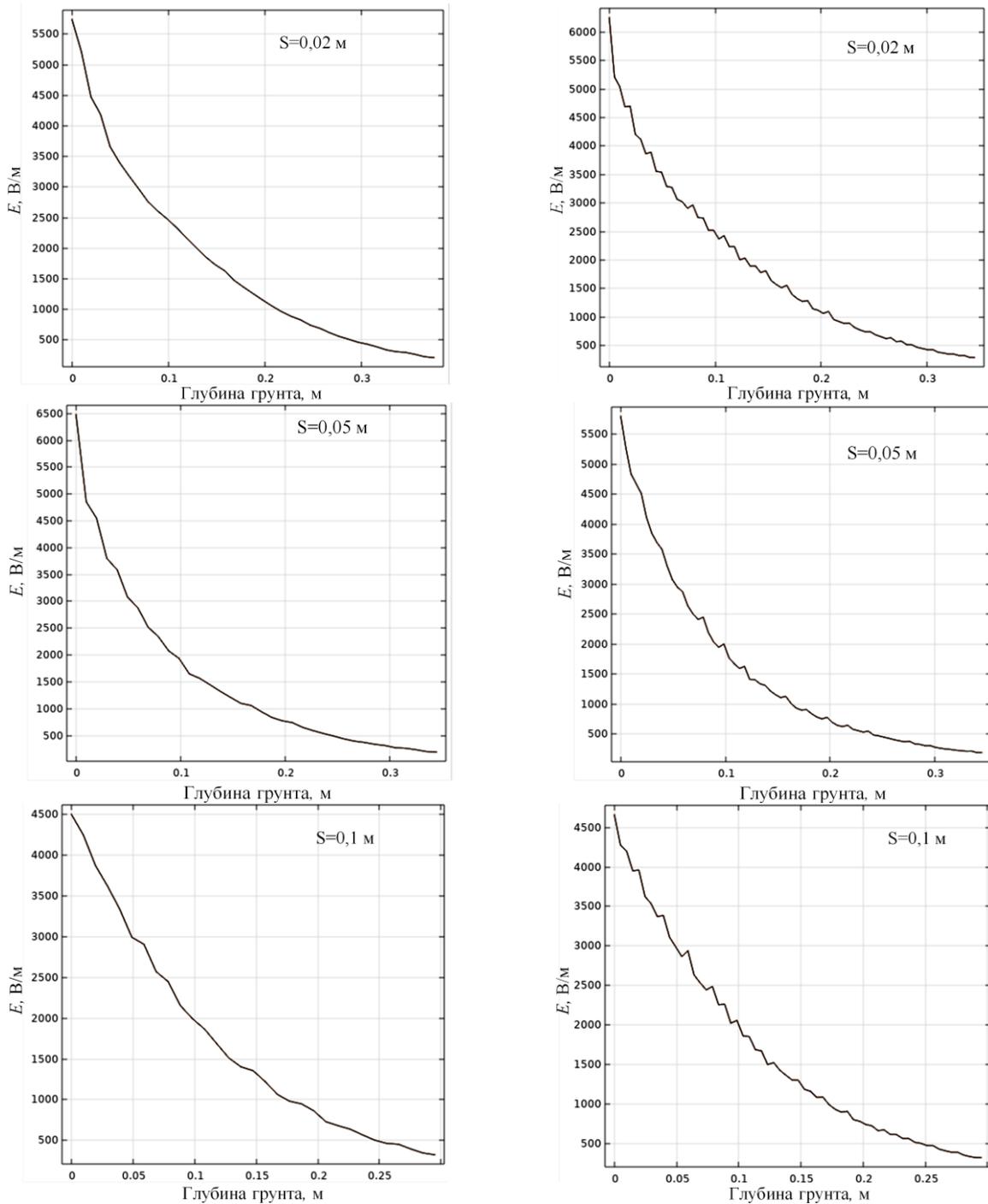


Рис. 4. Результаты моделирования распределения электрической составляющей электромагнитного поля по глубине грунта (вдоль вертикальной оси симметрии) для различных расстояний S от рупорной антенны до грунта с применением предлагаемой (слева) и базовой (справа) методики

Из рис. 4 можно сделать следующие выводы:

- распределение E по результатам моделирования с применением предлагаемой методики имеет более равномерный характер, что, очевидно, связано с применением идеально согласованных слоев на «открытых» границах;

- различия числовых значений E зависят от расстояния от антенны до грунта, причем данные различия наименее заметны при увеличении этого расстояния до 0,1 м. Данные различия в наибольшей степени проявляются вблизи поверхности грунта, а вблизи

нижней границы расчетной области величины E практически совпадают.

Результаты моделирования температурного поля в грунте при расстоянии от рупорной антенны до грунта 0,05 м за время нагрева 1 мин с применением предлагаемой и базовой методики приведены на рис. 5.

Результаты моделирования распределения температуры по глубине грунта (вдоль вертикальной оси симметрии) при расстоянии рупорной антенны до грунта 0,05 м для различных моментов времени с применением предлагаемой и базовой методики приведены на рис. 6.

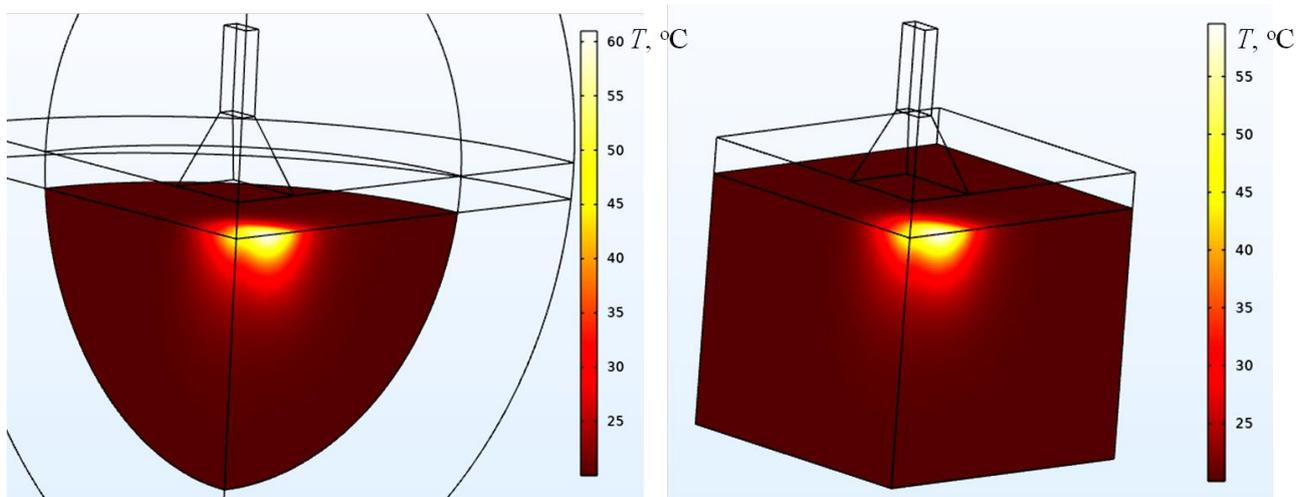


Рис. 5. Результаты моделирования температурного поля в грунте при расстоянии от рупорной антенны до грунта 0,05 м за время нагрева 1 мин с применением предлагаемой (слева) и базовой (справа) методики

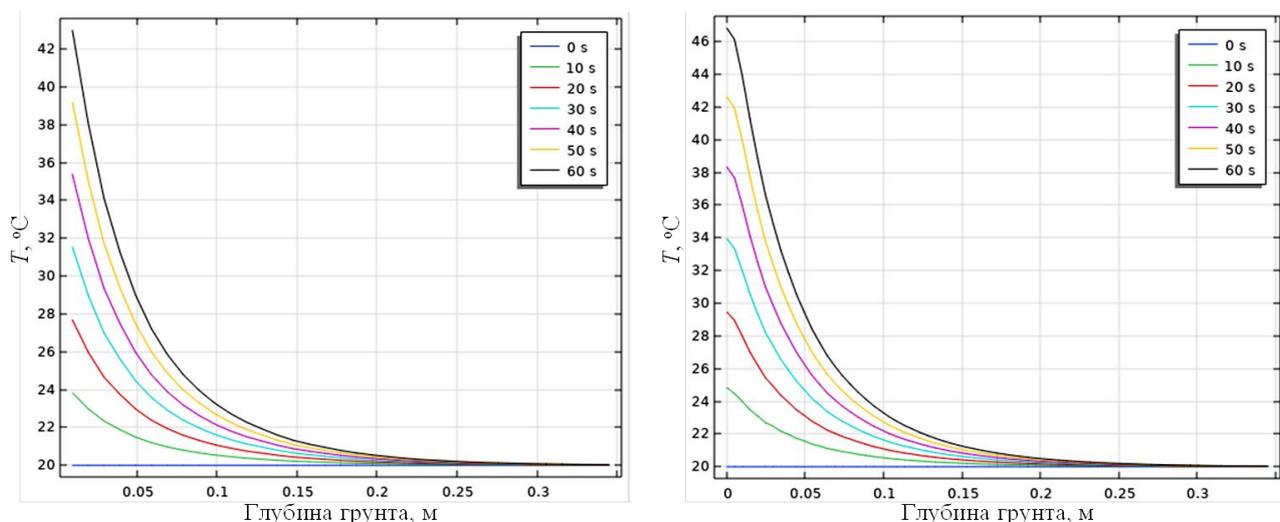


Рис. 6. Результаты моделирования распределения температуры по глубине грунта (вдоль вертикальной оси симметрии) при расстоянии от рупорной антенны до грунта 0,05 м для различных моментов времени с применением предлагаемой (слева) и базовой (справа) методики

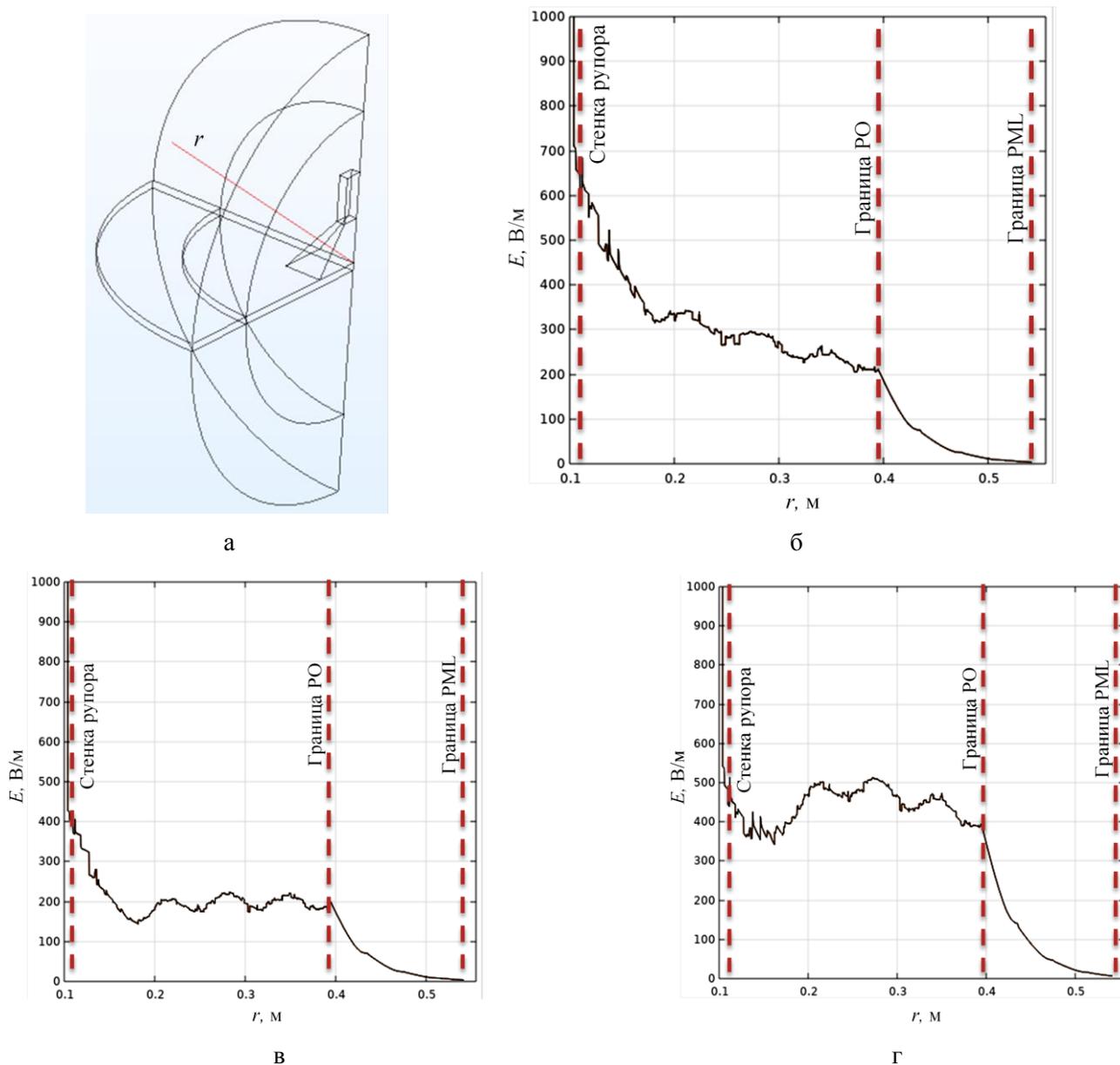


Рис. 7. Распределение электрической составляющей электромагнитного поля E в окружающее пространство вдоль линии r : а – изображение расположения линии r ; б-г – распределения E при расстоянии от рупорной антенны до грунта 0,02; 0,05; 0,1 м соответственно; РО – расчетная область; PML – идеально согласованный слой

Из рис. 7 видно, что величина E зависит от расстояния от рупорной антенны до грунта. Характер распределения E неравномерный, что связано с частичными отражениями электромагнитных волн от грунта и ухода в окружающее пространство. Кроме того, из рис. 7 видно, как работают идеально согласованный слой – он обеспечивает полное поглощение электромагнитной волны без ее отражения и снижения амплитуды E на внутренней границе слоя.

Как известно, в диапазоне частот от 300 до 300000 МГц нормы воздействия электромагнитного излучения установлены в виде плотности потока энергии, измеряемой в $\text{мкВт}/\text{см}^2$. В соответствии с таблицей 5.11 СанПиН 1.2.3685-21 [12] предельно допустимый уровень энергетических экспозиций электромагнитного поля в диапазоне частот от 300 до 300000 МГц составляет $200 (\text{мкВт}/\text{см}^2) \cdot \text{ч}$, т. е., например, при СВЧ-воздействии на человека в течение 10 ч допустимый уровень плотности потока энер-

гии составляет 20 мкВт/см². В соответствии с таблицей 5.12 данного документа предельно допустимый уровень плотности потока энергии составляет 1000 мкВт/см², а для условий локального облучения кистей рук – 5000 мкВт/см². В табл. 2 приведены результаты расчета максимальной плотности потока СВЧ-энергии на «открытой» границе расчетной области.

Таблица 2 – Результаты расчета максимальной плотности потока СВЧ-энергии (ППЭ СВЧ) на «открытой» границе расчетной области

Расстояние от рупора до грунта, м	ППЭ СВЧ, мкВт/см ²
0,02	33 840
0,05	32 170
0,1	68 122

Из табл. 2 видно, что уровни плотности потока энергии вблизи СВЧ-установки превышают допустимые нормативные значения в 6,8-13,6 раза. Таким образом, по результатам моделирования с применением предлагаемой методики можно сделать выводы о необходимости разработки допол-

нительных мероприятий по защите персонала и окружающей среды от утечек СВЧ-излучения.

Основным показателем энергетической эффективности СВЧ-электротермических установок является их КПД по использованию СВЧ-энергии, который зависит от коэффициента стоячей волны по напряжению рабочей камеры [13]:

$$КПД = 1 - |\Gamma|^2; \tag{7}$$

$$|\Gamma| = \frac{K_{cm}U - 1}{K_{cm}U + 1}, \tag{8}$$

где Γ – коэффициент отражения рабочей камеры; K_{cmU} – коэффициент стоячей волны по напряжению рабочей камеры. Несмотря на то, что в СВЧ-установках лучевого типа неограниченного объема рабочая камера как таковая отсутствует, соотношения (7), (8) остаются справедливыми и для них.

На рис. 8 приведены результаты определения коэффициента стоячей волны по напряжению и КПД с применением предлагаемой и базовой методики.

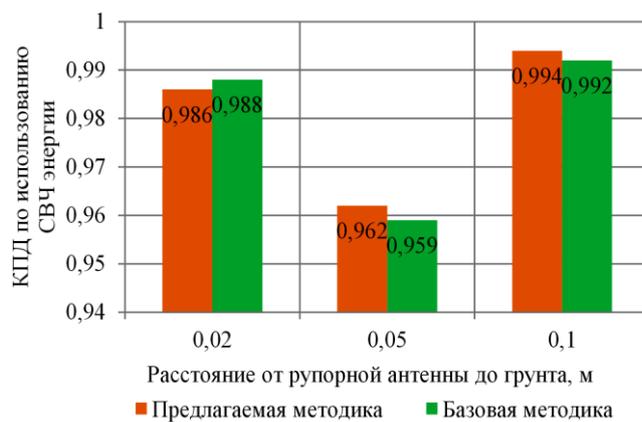
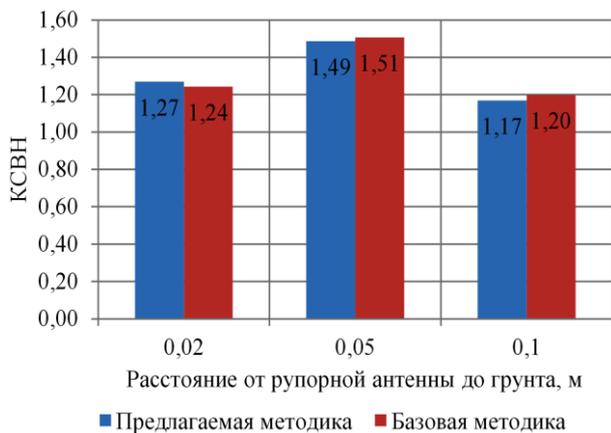


Рис. 8. Результаты определения коэффициента стоячей волны по напряжению, КСВН, (слева) и КПД по использованию СВЧ-энергии (справа) с применением предлагаемой и базовой методики

Из рис. 8 видно, что отклонения результатов определения коэффициента стоячей волны по напряжению с применением предлагаемой методики отличаются от базовой на минус 2,1-2,5 %. Отклонения результатов определения КПД по использованию СВЧ-

энергии составляют от минус 0,3 до 0,2 %, что представляется пренебрежимо малым.

Обобщая результаты проведенных сравнительных исследований базовой и предлагаемой методик конечно-элементного 3D моделирования СВЧ-

электротермических установок лучевого типа неограниченного объема можно сделать следующие выводы.

По сравнению с базовой методикой предлагаемая методика имеет потенциально больший функционал, так как дает возможность проведения исследования параметров утечек СВЧ-излучения в окружающее пространство, например прогнозирование уровня плотности потока энергии СВЧ-излучения с последующей оптимизацией конструкции СВЧ-установки, направленной на минимизацию данных утечек. Представляется, что данная задача является едва ли не основной после разработки конструкции СВЧ-установки, обеспечивающей заданные параметры технологического процесса.

В целом предлагаемая методика позволяет более адекватно смоделировать распределение электромагнитного и температурного поля, а также энергетические характеристики СВЧ-установки. При этом в отдельных случаях, например, как в рассмотренном в рамках данного исследования процессе нагрева грунта, погрешности за счет применения базовой методики могут оказаться пренебрежимо малыми.

Следует отметить, что в данной работе рассмотрен простейший случай СВЧ-нагрева грунта без учета массопереноса, фазовых переходов и перемещения излучающей системы. Учет данных явлений существенно повышает вычислительную сложность решения задачи и, как следствие, задействованные вычислительные ресурсы компьютера. В связи с этим может являться вполне оправданным использование предлагаемой методики только с целью исследования параметров утечек СВЧ-излучения в окружающее пространство, а также энергетических характеристик СВЧ-установки при имитации предельных режимов ее работы (режим максимальной мощности и минимального поглощения СВЧ-энергии диэлектриком, минимальной мощности и максимального поглощения СВЧ-энергии диэлектриком и т. д.), пренебрегая вышеуказанными процессами. Дальнейшее моделирование с учетом всех возможных процессов теплопереноса в этом случае можно проводить с применением базовой методики.

В любом случае окончательное решение о применении той или иной методики является инженерной задачей и зависит от ее конкретной постановки.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Дорняк О.Р., Недоносков А.Б.** Способ термообработки деформационного шва аэродромного покрытия с использованием СВЧ-воздействия // Воздушно-космические силы. Теория и практика. 2021. № 17. С. 66-75.

2. **Новичков С.В., Гусева Н.В.** Бизнес-план производства модернизированной машины для ремонта асфальтобетонных покрытий // Техническое регулирование в транспортном строительстве. 2017. № 1 (21). С. 34-40.

3. **Арутюнян Р.В.** Компьютерное моделирование и оптимизация оттаивания грунтов при помощи энергии СВЧ // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2020. Т. 63. № 6. С. 37-43.

4. **Некрасов С.А., Волков В.С.** Компьютерное моделирование и оптимизация процесса оттаивания грунтов при помощи

энергии СВЧ // Инженерно-физический журнал. 2017. Т. 90. № 1. С. 55-63.

5. Влияние различных доз ЭМП СВЧ на ферментативную активность хорошоокультуренной почвы, торфа и торфокомпоста / Н.В. Рыськова и др. // Автоматика и вычислительная техника в сельскохозяйственном производстве: сб. науч. тр. МИИСП. Москва, 1991. С. 89-94.

6. **Архангельский Ю.С., Тригорный С.В.** СВЧ электротермические установки лучевого типа. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2000. 122 с.

7. **Захаров В.В.** Электротехнологические процессы СВЧ термообработки диэлектриков и методы их моделирования с учетом изменения физических свойств материалов, фазовых переходов и теплопереноса // Вопросы электротехнологии. 2017. № 3 (16). С. 23-32.

8. **Тригорлый С.В., Захаров В.В.** Применение современных программных продуктов для решения задач в СВЧ электротехнологии // Роль опорного вуза в развитии транспортно-энергетического комплекса Саратовской области (ТРАНСЭНЕРГОКОМ-2018): сб. науч. тр. по материалам Всерос. науч.-практ. конф., 2018. Т. 1. С. 79-81.

9. **Захаров В.В.** Математическое моделирование взаимосвязанных процессов электродинамики и тепломассопереноса в СВЧ установках с камерами бегущей волны и лучевого типа при термообработке диэлектриков с учетом изменения их физических свойств: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.10. Саратов, 2019. 150 с.

10. **Jian-Ming Jin.** The Finite Element Method in Electromagnetics, 2nd ed. Wiley-IEEE Press, 2002. 389 p.

11. **Frei W.** Использование идеально согласованных слоев (PML) и граничных условий рассеяния (SBC) в электромагнитных волновых задачах. URL: <https://www.comsol.ru/blogs/using-perfectly-matched-layers-and-scattering-boundary-conditions-for-wave-electromagnetics-problems/?ysclid=lmj099d1p76871676> (дата обращения 24.09.2023).

12. СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания: утв. Постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 28.01.2021 № 2.

13. **Архангельский Ю.С.** СВЧ электрометрия: монография. Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 1998. 408 с.

Захаров Вадим Валерьевич – кандидат технических наук, начальник Научно-исследовательской лаборатории Управления научных исследований и разработок АО «Гипрониигаз», г Саратов

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

Vadim V. Zakharov – PhD (Technical Sciences), Head of Research Laboratory of Scientific Research and Developments Agency at AO Giproniigaz, Saratov

Ivan I. Artyukhov – Dr. Sci. Tech., Professor, Department of Electrical and Power Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 03.11.23, принята к опубликованию 28.11.23

УДК 621.385.632.1

**ИОННО-ПЛАЗМЕННОЕ НАНЕСЕНИЕ
МИКРО- И НАНОТЕКСТУРИРОВАННЫХ ПОКРЫТИЙ ИЗ ТИТАНА
НА ПОВЕРХНОСТИ КОЛЛЕКТОРНЫХ ЭЛЕКТРОДОВ
ЛАМПЫ БЕГУЩЕЙ ВОЛНЫ**

Д.И. Кириченко, П.Д. Шалаев, Н.О. Шабунин, В.А. Царев

**ION-PLASMA DEPOSITION OF TEXTURED TITANIUM COATINGS
ON THE SURFACE OF COLLECTING ELECTRODES
OF A TRAVELLING WAVE TUBE**

D.I. Kirichenko, P.D. Shalaev, N.O. Shabunin, V.A. Tsarev

Приведены результаты разработки технологического процесса ионно-плазменного нанесения титана на электроды коллектора лампы бегущей волны. Представлены фотографии полученных покрытий поверхности деталей коллектора. Поверхности покрытий имеют нано- и микрогабаритные структуры. Покрытие из титана обеспечило снижение влияния вторичной электронной эмиссии на работу коллектора лампы бегущей волны. Приведены результаты экспериментальных исследований лампы бегущей волны с покрытиями титаном электродами коллектора. КПД лампы бегущей волны увеличился на 1,8-2,5 % в рабочей полосе частот по сравнению с аналогами без титанового покрытия.

Ключевые слова: ионно-плазменное напыление титана, лампа бегущей волны, многосекционный коллектор, КПД

Введение

В настоящее время лучшими по комплексу электрических, массогабаритных и эксплуатационных характеристик электровакуумными усилителями СВЧ мощности в сантиметровом и миллиметровом диапазонах длин волн являются лампы бегущей волны (ЛБВ). Для ЛБВ, которые используются в системах с ограниченной мощностью источников электроэнергии, например в бортовых системах спутнико-

The paper presents the results relating the development of the technological process of ion-plasma deposition of titanium on the electrodes of the TWT collector. The photos of the obtained surface coatings of collector parts are provided. The coating surfaces have nano- and micro-dimensional structures. The titanium coating provided a reduction in the effect of secondary electron emission on the operation of the TWT collector. The results of experimental studies of a TWT with titanium-coated collector electrodes are presented. The efficiency of the TWT increased by 1.8-2.5 % in the operating frequency band compared to the analogues without titanium coating.

Keywords: titanium ion-plasma sputtering, TWT, multi-section collector, efficiency

вой связи, среди этих характеристик особенно важное значение имеет их коэффициент полезного действия (КПД).

Увеличение КПД (η) ЛБВ выше значений её электронного КПД, отнесённого к выходной мощности, ($\eta_{э(вых)}$), достигается за счёт многоступенчатой рекуперации энергии электронов электронных потоков в многосекционных коллекторах [1]. Здесь $\eta_{э(вых)} = P_{вых}/P_0$, $\eta = P_{вых}/P_{потр}$, $P_{вых}$ – выходная мощность ЛБВ на рабочей частоте, P_0 –

мощность невозмущённого электронного потока (на входе в замедляющую систему (ЗС) ЛБВ), $P_{номр}$ – мощность, потребляемая ЛБВ из источника электропитания.

Так, за счёт рекуперации энергии электронов η ЛБВ может быть увеличено в 2÷4 раза по сравнению с η ЛБВ без рекуперации.

Эффективность рекуперации энергии электронов в коллекторе, соответственно КПД ЛБВ, существенно зависят от уровня вторичной электронной эмиссии с поверхности коллекторных электродов, на которые оседают электроны электронного потока (первичные электроны). Чем выше уровень вторичной электронной эмиссии, тем ниже эффективность коллекторов и КПД ЛБВ [1, 2]. Поэтому понижение уровня вторичной электронной эмиссии с поверхностей электродов коллекторов ЛБВ является актуальной проблемой.

Известны способы понижения уровня вторичной электронной эмиссии с поверхностей коллекторных электродов ЛБВ. Они основаны на применении токоприёмных деталей коллектора из графита [2, 3], текстурирования поверхности электродов коллектора из углерода или меди [4] или нанесения покрытий на электроды из материалов с низким уровнем вторичной электронной эмиссии [5]. В качестве материала покрытий с низким уровнем вторичной электронной эмиссии обычно применяется углерод [5]. Применение названных способов снижения уровня вторичной электронной эмиссии с использованием углеродных материалов в многосекционных коллекторах ЛБВ с высокими КПД и надёжностью в условиях промышленного производства приборов создаёт проблемы, связанные с сложностью изготовления таких коллекторов и обеспечением надёжности ЛБВ.

По ряду признаков применение в коллекторах таких приборов покрытий из титана является более предпочтительным по сравнению с углеродом. Он имеет более низкий уровень вторичной электронной эмиссии. Процессы получения

титановых покрытий на деталях коллекторов более технологичны из-за разницы в температурах распыления материалов. Покрытия из титана не создают дополнительных проблем с откачкой и обезгаживанием ЛБВ.

Кроме перечисленных положительных свойств титана, следует отметить и тот факт, что в рабочих режимах эксплуатации титановые покрытия являются геттерирующими, активно способствующими поддержанию благоприятных вакуумных условий в приборе. Титан поглощает активные газы и удерживает их в широком температурном диапазоне, начиная с 473 К. Сорбционная емкость титановых покрытий зависит от толщины, шероховатости и пористости покрытия и в значительной степени определяется методом его получения.

Многосекционная конструкция коллектора ЛБВ, формы, размеры и материалы его электродов определяются в результате решения электронно-оптических задач с учётом влияния вторичной электронной эмиссии и значений мощности, выделяемой на них потоком электронов. Распределения первичных электронов по энергиям и углам падения в разных секциях коллекторов характеризуются широкими спектрами (начиная от нулевых значений) и существенно изменяются при изменении режимов работы ЛБВ. На рис. 1 показан результат расчёта распределения электронных траекторий в многосекционном коллекторе ЛБВ X-диапазона с учётом вторичной электронной эмиссии. Расчёт выполнен для режима максимальной выходной мощности ЛБВ (режима насыщения).

С целью повышения КПД мощной ЛБВ X-диапазона непрерывного действия за счёт увеличения эффективности рекуперации энергии электронов выполнены исследования возможности снижения уровня вторичной электронной эмиссии с внутренних поверхностей электродов её коллектора. Для этого разработан процесс нанесения титанового покрытия на внутреннюю поверхность электродов.

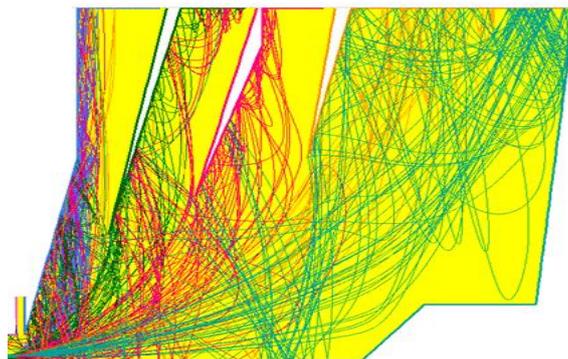


Рис. 1. Распределение траекторий первичных и вторичных электронов в коллекторе ЛБВ X-диапазона с четырёхступенчатой рекуперацией их энергии

Материалы и методы

Коллектор ЛБВ обеспечивает четырёхступенчатую рекуперацию энергии электронов электронного потока и содержит четыре осесимметричные токоприёмные детали разного размера из медно-

молибденового композитного материала (пятый электрод имеет нулевой потенциал относительно катода и не относится к токоприёмным электродам коллектора). Схема конструкции коллектора показана на рис. 2.

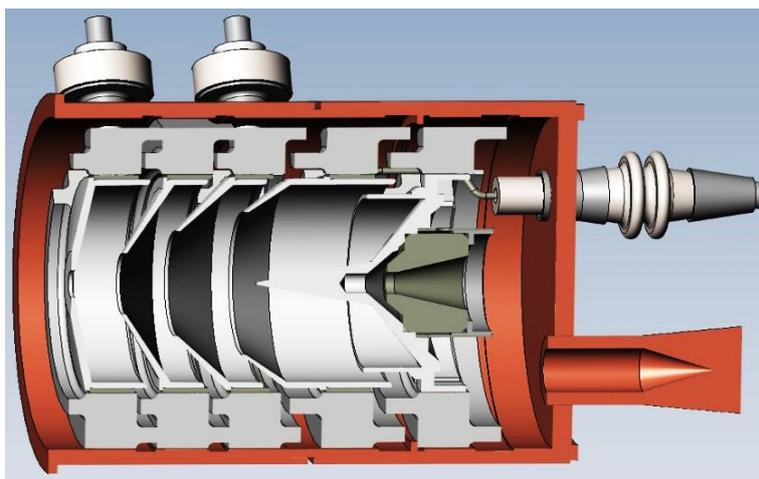


Рис. 2. Макет коллекторного узла

Получение титанового покрытия осуществлялось в вакуумной установке УРМЗ.279.048 с использованием ионно-плазменного напыления титана на детали коллектора с катода установки. Конструкция вакуумной установки включает два плазменных источника дугового типа, один из которых использовался для работы с катодом из титана. Внутри вакуумной камеры находится карусельно-планетарный механизм вращения обрабатываемых образцов для получения однородного покрытия. Осаждение осуществлялось на внутреннюю поверхность электродов коллектора. Для осаждения использовался катод из чистого ти-

тана марки ВТ-0. Процесс напыления выполнялся при давлении в камере установки 10^{-5} мм рт. ст. При этом давлении в электроискровом испарителе установки при воздействии электродуговых разрядов на поверхность катода образуются пары титана из хаотично перемещающихся по поверхности катода микропятен этих разрядов. Направление и стабилизация электродуговых разрядов на поверхности катода в рабочей камере обеспечиваются стабилизирующим и фокусирующим магнитными полями электромагнитов. Принципиальная схема устройства рабочей камеры установки ионно-плазменного напыления показана на рис. 3.

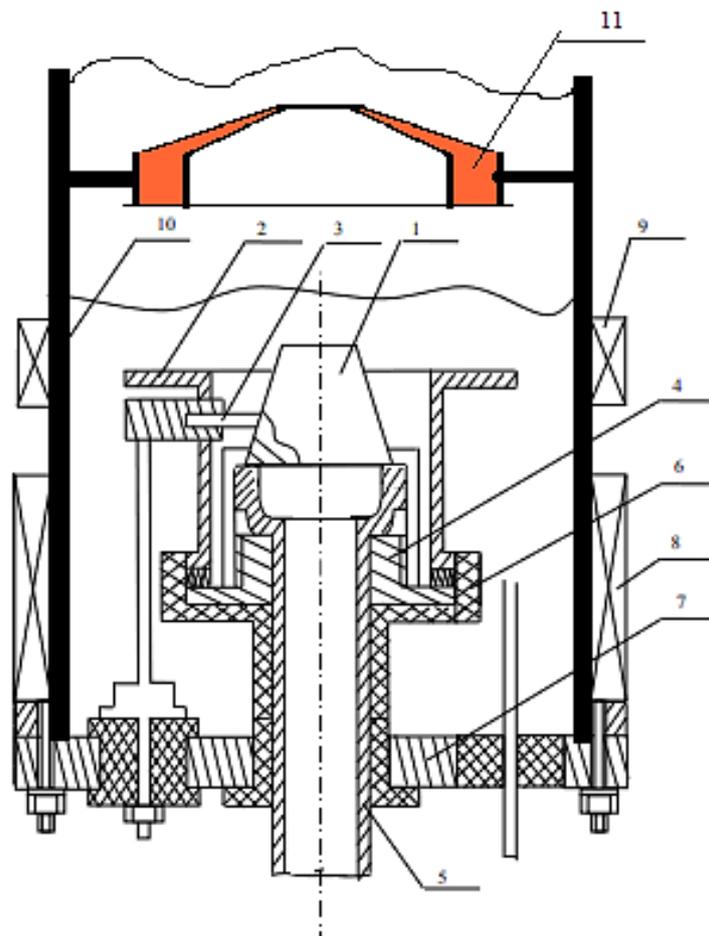


Рис. 3. Принципиальная схема рабочей области установки ионно-плазменного напыления:
 1 – катод; 2 – дополнительный анод; 3 – поджигающий электрод; 4 – катодное основание;
 5 – токоподвод; 6 – изолятор; 7 – фланец; 8 – стабилизирующая катушка;
 9 – фокусирующая катушка; 10 – корпус-анод; 11 – электрод коллектора

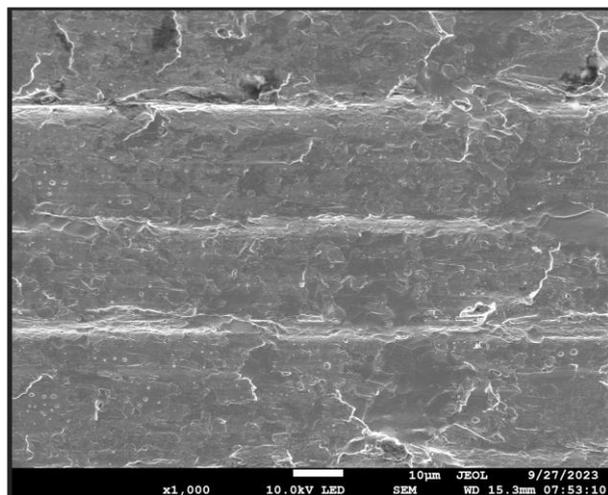
В рабочем объёме камеры между катодом и корпусом камеры, который является анодом, в результате вакуумного дугового разряда в парах распыляемого катода генерируется поток плазмы из ионов титана. Ионно-плазменный поток, кроме ионов титана, содержит также атомы и нано- и микроразмерные частицы титана. Продукты такого смешанного ионно-плазменного потока конденсируются на поверхности детали коллектора и образуют плёнку из титана, имеющую как макрорельефную, так нано- и микрорельефную структуру поверхности. Ток электроискрового испарителя во время процесса поддерживался равным 90 А. Напряжение смещения держателя металлических электродов коллектора ЛБВ в процессе ионно-плазменного осаждения составляло 50 В.

Толщина титанового покрытия после выдержки 18 мин в указанном режиме напыления составила $5 \div 7$ мкм. Контроль толщин осуществляли с использованием оптического микроскопа марки МИИ-4. Исследование однородности осажденного покрытия осуществлялось с использованием сканирующего электронного микроскопа JEOL JSM – 7001F.

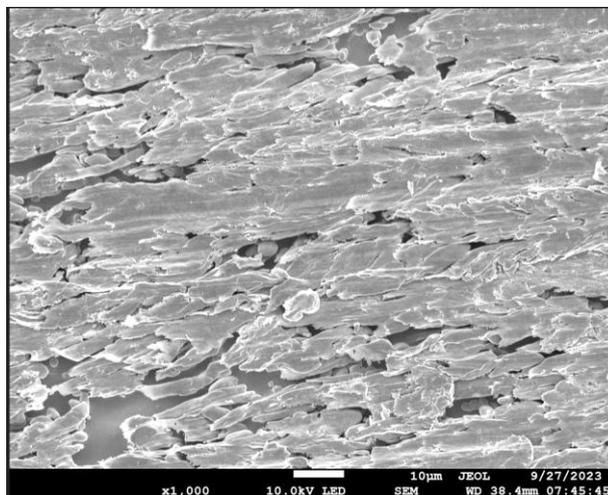
Для получения сравнимых результатов по КПД ЛБВ ионно-плазменное напыление проводилось на деталях коллектора, не отличающихся по конструкции и изготовленных по одной и той же технологии, что и детали образцов ЛБВ этого типа серийного производства. Эти детали были выполнены из медно-молибденового композитного материала. Они имели макрорельеф поверхности, полученный в ре-

зультате токарной обработки. Кроме того, они имели незначительную по относительной площади микроструктуру, полученную после кратковременного химического травления.

Фотографии поверхностей непокрытых титаном деталей до и после химического травления меди, полученные на электронном микроскопе при увеличении в 1000 раз, показаны на рис. 4.



а



б

Рис. 4. Поверхности не покрытых титаном деталей до (а) и после (б) химического травления меди

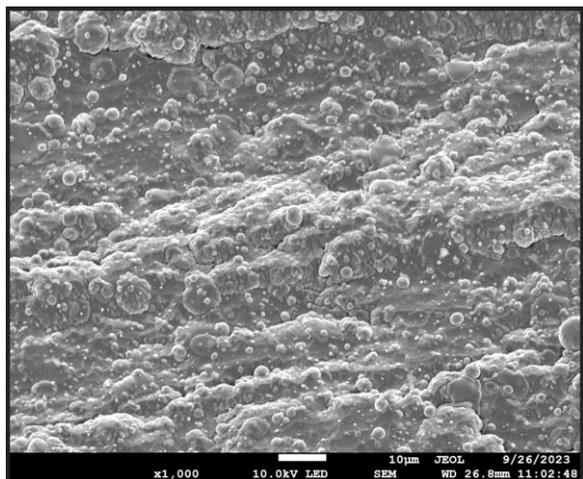
На рис. 4 *а* видно, что после токарной обработки детали её поверхность покрыта медью, которая появилась в результате выдавливания резцом из заготовки и натирания на обрабатываемую поверхность. Коэффициенты вторичной электронной эмиссии меди в разных структурных состояниях больше, чем у титана. Макрорельеф поверхности деталей коллектора, полученный, как следует из рис. 4 *а*, в результате токарной обработки, может приводить к снижению влияния вторичной электронной эмиссии на КПД ЛБВ.

В исследуемой ЛБВ медь удалялась с деталей коллектора химическим травлением на несколько микрон в глубину для создания пористой поверхности. Это делалось с целью снижения влияния вторичной электронной эмиссии на КПД ЛБВ. На рис. 4 *б* показан участок поверхности токоприёмной детали коллектора после удаления меди травлением. Из этого рисунка видно, что после травления меди суммарная площадь поверхности, образованной молибденом, значительно больше, чем суммарная площадь полученных пор. Это может приводить к снижению положительного эффекта от создания пористой структуры.

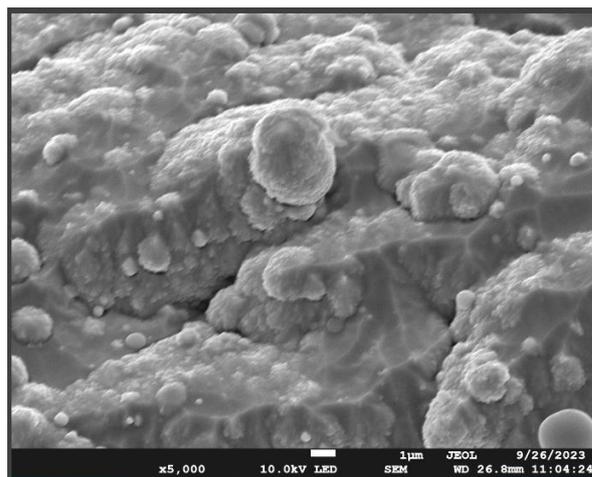
Фотографии поверхностей деталей, покрытых титаном после химического травления меди, полученные на электронном микроскопе при увеличениях 1000 и 5000 раз, показаны на рис. 5.

Подробный анализ поверхностей деталей, показанных на рис. 5 *а*, *б*, позволил установить, что поверхности деталей получили на макрорельефе более сложный нано- и микрорельеф. Из этих рисунков видно, что в основную, наиболее однородную по структуре часть покрытия внедрены ещё микро- и наноразмерные частицы титана, которые появляются в ионно-плазменном потоке в результате взрывного воздействия электродуговых разрядов на поверхность катода из титана. Можно предположить, что это должно дополнительно снизить влияние вторичной электронной эмиссии на работу коллектора и увеличить КПД ЛБВ.

Для проверки выбранного пути повышения КПД ЛБВ и способа его реализации были проведены специальные экспериментальные исследования ламп бегущей волны с покрытыми титаном электродами коллектора.



а



б

Рис. 5. Поверхности деталей, покрытых после химического травления меди титаном: а – увеличение в 1000 раз; б – увеличение в 5000 раз

Результаты экспериментальных исследований ЛБВ

В качестве критерия для оценки результатов исследования принят КПД ЛБВ в режиме насыщения. В этом режиме ЛБВ потребляет максимальную мощность из источника электропитания, поэтому именно в этом режиме должно быть максимально возможное значение КПД.

На рис. 6 приведены зависимости $\eta_{\text{э(вых)}}$ и η от рабочей частоты в полосе рабочих частот мощной ЛБВ X-диапазона непрерыв-

ного действия. На этом рисунке видно, что покрытие титаном внутренней поверхности токоприёмных электродов коллектора ЛБВ ионно-плазменным напылением с выбранным режимом выполнения технологического процесса позволяет увеличить КПД прибора на 1,8-2,5 % в полосе рабочих частот при почти равных значениях $\eta_{\text{э(вых)}}$. Такое увеличение η возможно при увеличении эффективности работы коллектора за счёт уменьшения вторичной электронной эмиссии с поверхностей его электродов.

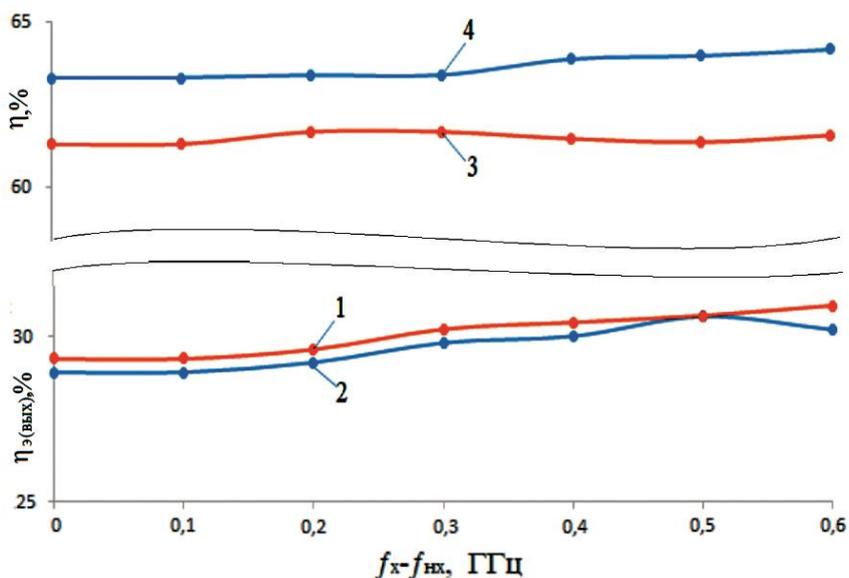


Рис. 6. КПД в полосе рабочих частот ЛБВ: 1, 3 – $\eta_{\text{э(вых)}}$, η в ЛБВ без титанового покрытия в коллекторе; 2, 4 – $\eta_{\text{э(вых)}}$, η в ЛБВ с титановым покрытием в коллекторе; f_x – рабочая частота ЛБВ в X-диапазоне; $f_{нх}$ – нижняя рабочая частота ЛБВ в X-диапазоне

Следует отметить, что в результате снижения уровня вторичной эмиссии в коллекторе произошло также уменьшение обратного потока вторичных электронов из коллектора в замедляющую систему ЛБВ. Это привело к уменьшению тока замедляющей системы. В процессе экспериментальных исследований зафиксировано снижение этого тока на 27-33 % на разных частотах рабочего диапазона ЛБВ по сравнению с аналогами в серийном производстве.

Авторы не считают представленную работу завершённой. Предполагается дальнейшее продолжение исследований с целью поиска наилучших режимов напыления, а также более детального исследования физико-механических свойств получаемых покрытий и оценки их устойчивости к условиям эксплуатации.

Заключение

1. Экспериментально показано, что метод ионно-плазменного напыления с образованием смешанного потока положительных ионов с нано- и микроразмерными частицами титана в его парах, образованных под воздействием электродуговых разрядов на поверхность титанового катода при давлении 10^{-5} мм рт. ст., токе электроискрового испарителя 85÷90 А и напряжении смещения держателя металлических электродов коллектора ЛБВ 40÷50 В, позволяет со-

здавать на поверхности электродов титановые покрытия толщиной 5÷7 мкм с сложным нано- и микрорельефом.

2. Найденный режим нанесения покрытий из титана на внутренние поверхности токоприёмных электродов многосекционных коллекторов позволяет увеличить примерно на 2-3 % КПД ЛБВ за счёт уменьшения на разных частотах рабочего диапазона ЛБВ, примерно на 30 % – ток электронов вторичной электронной эмиссии с поверхностей электродов коллектора и соответственно увеличить эффективность его работы.

3. Титановые плёночные покрытия с сложным нано- и микрорельефом их поверхности, обеспечивающие снижение вторичной электронной эмиссии с поверхностей электродов коллекторов ЛБВ, могут быть получены ионно-плазменным напылением с использованием отечественного технологического оборудования типа УРМЗ.279.048 или аналогичных вакуумных установок.

Авторы выражают благодарность сотрудникам АО «НПП «Алмаз» Быстровой Л.Н. и Малкиной В.В. за непосредственный вклад в разработку технологического процесса изготовления многосекционных коллекторов ЛБВ с использованием процесса ионно-плазменного напыления и изготовление действующего образца ЛБВ для экспериментальных испытаний.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Пензяков В.В., Роговин В.И. Расчёт многоступенчатых коллекторных систем // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. 1977. № 10. С. 84-91.

2. Verification of an improved computational design procedure for TWT-dynamic refocuser-MDC systems with secondary electron emission losses / P. Ramins, H.G. Kosmahl, D.A. Force et al. // IEEE Transactions on Electron Devices. 1986. Vol. ED-33. № 1. P. 85-90.

3. Углеродные материалы в теплонагруженных узлах ламп бегущей волны

и клистронов (обзор) / В.И. Шестеркин, Т.М. Крачковская, П.Д. Шалаев и др. // Радиотехника и электроника. 2022. Т. 67. № 10. С. 946-954.

4. Гилмор-мл. А.С. Лампы с бегущей волной / пер. с англ. А.Г. Кудряшова; под ред. Н.А. Бушуева. Москва: Техносфера, 2013. С. 616.

5. Curren N.A., Ramins P. TWT efficiency enhancement with textured carbon surfaces on copper MDC electrodes // International electron Dev. Meeting. 1985. P. 361-363.

Кириченко Денис Иванович – начальник отдела «АО «НПП Алмаз», Саратов

Шалаев Павел Данилович – кандидат технических наук, главный научный сотрудник «АО «НПП Алмаз», Саратов

Шабунин Никита Олегович – инженер «АО «НПП Алмаз», Саратов

Царев Владислав Алексеевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Электронные приборы и устройства» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А., ведущий научный сотрудник «АО «НПП Алмаз», Саратов

Denis I. Kirichenko – Head of Department at AO NPP Almaz, Saratov

Pavel D. Shalaev – PhD (Technical Sciences), Chief Research Fellow at AO NPP Almaz, Saratov

Nikita O. Shabunin – Engineer, AO NPP Almaz, Saratov

Vladislav A. Tsarev – Dr. Sci. Tech., Professor, Department of Electronics, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Leading Research Fellow at AO NPP Almaz, Saratov

Статья поступила в редакцию 27.10.23, принята к опубликованию 28.11.23

УДК 621-039-419; 620.22-419; 537.868

**ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ
ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ В АДДИТИВНОМ
ПРОИЗВОДСТВЕ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПОЛИМЕРОВ И КОМПОЗИТОВ**

**О.А. Паршиков, М.В. Аврамов, В.В. Крылов,
М.А. Игнатьев, И.В. Злобина, Н.В. Бекренев**

**PROSPECTS FOR APPLICATION
OF ELECTROPHYSICAL TECHNOLOGIES IN ADDITIVE
MANUFACTURING OF POLYMER AND COMPOSITE PRODUCTS**

**O.A. Parshikov, M.V. Avramov, V.V. Krylov,
M.A. Ignatiev, I.V. Zlobina, N.V. Bekrenev**

Показана актуальность повышения физико-механических свойств объектов аддитивного производства из неметаллических, в том числе полимерных, композиционных материалов (ПКМ) путем применения воздействия на них в отвержденном состоянии электрофизических процессов. Рассмотрены вопросы замены резиновых уплотнительных колец газопроводов и газораспределительной аппаратуры на кольца из резиноподобных полимерных материалов, формируемые аддитивными методами, а также использования углетканых препрегов с истекшим сроком хранения для формирования изделий методом послойного ламинирования. Доказана возможность получения путем трехмерной печати изделий из указанных материалов, соответствующих по физико-механическим свойствам изделиям, полученным по традиционным технологиям. Выполнены исследования влияния СВЧ электромагнитного поля на прочность при разрыве и относительное удлинение уплотнительных колец из резиноподобного материала Flex, показавшие существенное повышение прочности при уменьшении более чем в 2 раза остаточной деформации при растяжении. Экспериментально доказана возможность формирования путем ультразвуковой свар-

The paper considers the relevance of improving the physical and mechanical properties of additive manufacturing for objects from non-metallic and polymer composite materials (PCM) when induced to electro-physical processes in the solidified state. The issues relating replacement of rubber sealing rings of gas pipelines and gas distribution equipment for the rings made of rubber-like polymer materials formed by the additive methods, as well as the use of carbon-fiber prepregs with expired storage period to form products by layer-by-layer lamination are considered. A possibility to produce three-dimensional printing items from these materials, which correspond to the physical and mechanical properties of the items produced by traditional technologies has been proved. A research into effects of the microwave electromagnetic field on the tensile strength and elongation of the sealing rings made of rubber-like Flex material has been performed, which showed a significant improvement in the strength with more than a two-fold reduction in residual tensile strain under tension. A possibility of forming a multilayer carbon fiber by ultrasonic welding of prepregs based on an epoxy binder, exceeding the strength of the material produced by pressing, has been experimentally

ки препрегов на эпоксидном связующем многослойного углепластика, превышающего по прочности материал, полученный методом прессования. Результаты исследования могут быть использованы в ремонтных импортозамещающих технологиях в газовой отрасли и для решения проблемы утилизации препрегов из ПКМ на термореактивном связующем путем их использования при изготовлении изделий транспортного и энергетического машиностроения.

Ключевые слова: аддитивные технологии FDM и LOM, резиноподобные филаменты, препреги на термореактивном связующем, модификация в СВЧ электромагнитном поле, ультразвуковая консолидация, уплотнительные элементы газопроводов, ламинированные изделия, армированные тканями на основе углеродных волокон

Введение

В современном транспортном, машино- и агрегатостроении, а также энергетике, например в системах транспортировки энергоносителей, значительный объем конструктивных элементов приходится на изделия из неметаллических материалов: резин, термо- и реактопластов, эластомеров и полимерных композиционных материалов (ПКМ). При этом важное значение приобретает как продление ресурса изделий из указанных материалов, так и решение вопроса снижения нагрузки на природную среду, вызванной растущим объемом отходов полимерного производства изделий, содержащих реактопласты, которые не позволяют произвести их вторичную переработку. Дополнительную проблему представляет необходимость проведения импортозамещающих мероприятий для обеспечения надлежащего качества продукции в условиях ограничения или прекращения зарубежных поставок, прежде всего, резинотехнических изделий и углепластиков.

В нефтегазовой отрасли в настоящее время существуют технические и организационные сложности при необходимости оперативной замены вышедших из строя уплотнительных элементов различных ти-

proved. The results of the research can be used for the purposes of import-substituting technologies in the gas industry and to solve the problems of recycling prepregs from PCM on a thermosetting binder when using them in manufacturing transport and power engineering devices.

Keywords: *additive technologies FDM and LOM, rubber-like filaments, prepregs on a thermosetting binder, modification in a microwave electromagnetic field, ultrasonic consolidation, sealing elements of gas pipelines, laminated products reinforced with carbon fiber-based fabrics*

поразмеров, связанные с санкционной политикой стран Запада в отношении поставок запасных частей к зарубежному оборудованию, составляющему значительную долю в оснащении систем транспортировки природного газа.

Возникает потребность в разработке соответствующих мировому уровню новых решений, в том числе по оперативному созданию новых типоразмеров и форм уплотнительных элементов. Изготовление таких опытно-экспериментальных образцов с использованием традиционных технологий производства резинотехнических изделий практически невозможно из-за высоких финансовых и материальных затрат на проектирование и производство специального технологического оснащения практически разового применения. В связи с бурным развитием в последние десятилетия аддитивных технологий решить данную проблему представляется возможным путем изготовления ремонтных комплектов уплотнительных элементов как к отечественному, так и зарубежному оборудованию газораспределительных станций и магистральных трубопроводов с использованием аддитивных технологий. Однако возможность замены резины 2 и 3 групп, при-

меняемых в данных системах, на термопластичные материалы, используемые в аддитивных технологиях, в настоящее время не рассматривалась и не изучалась.

В несущих конструкциях и обшивке летательных аппаратов, автомобильного транспорта и ветроэнергетических установок широко применяются армированные тканями на основе волокон различной природы полимерные композиционные материалы, что определяется их более высокой по сравнению с металлами и сплавами удельной прочностью. При этом более 2/3 применяемых при формировании ПКМ связующих составляют реактопласты, в частности эпоксидные смолы, что связано с их лучшей текучестью и смачивающими свойствами, обеспечивающими более равномерную и качественную пропитку препрегов, из которых формируются изделия. Процесс выкладки слоев композита и формования изделия достаточно трудоемок и зависит от множества факторов, что не исключает образование дефектов, снижающих свойства изделия. Поскольку свойства ПКМ формируются одновременно с изготовлением изделия с обеспечением определенной ориентации армирующего компонента, аддитивные технологии, основанные на программируемой послойной выкладке материала в соответствии с созданной предварительно твердотельной моделью изделия, можно считать перспективным инструментом автоматизации и повышения эффективности изготовления изделий из ПКМ. Однако отмеченное выше преимущественное применение терморепактивных связующих в производстве ПКМ не позволяет приступить к производственному решению данной задачи, поскольку основные аддитивные технологии, использующие неметаллические материалы (FDM – Fused Deposition Modeling и LOM – Laminated Object Manufacturing), основаны на применении термопластичных полимерных материалов, расплавляемых в процессе формирования слоев. Изделия из термопластов, полученные по указанным технологиям, имеют существенный недостаток, заключающийся в малой межслоевой и сдви-

говой прочности по сравнению с изделиями, полученными, например, литьем на термопластавтоматах. Поэтому является актуальной разработка технологий упрочняющей модификации объектов трехмерной печати из неметаллических и композиционных материалов.

Целью работы явилось исследование возможности применения электрофизических воздействий различной природы для повышения физико-механических свойств изделий, полученных с использованием аддитивных технологий, а также для получения слоистых конструкций путем консолидации препрегов на терморепактивным связующем.

Основная часть

Согласно аналитическому обзору группы «Деловой профиль» – «Рынок технологий 3D-печати в России и в мире (2020)» [1], объем рынка аддитивных технологий в мире вырастет с 12 млрд долл. в 2020 г. до 60 млрд долл. в 2030 г. Несмотря на абсолютно малую долю российского рынка в данной области, для нашей страны характерен бурный рост рынка (в 10 раз за последние 8 лет). В структуре потребителей данных технологий в нашей стране 30 % приходится на авиакосмическую отрасль и 25 % – на машиностроение – на сегодня наиболее наукоемкие производства. Изложенное свидетельствует о хороших перспективах коммерциализации разработок в данной предметной области. В то же время для развития применения аддитивных технологий в серийном производстве существуют определенные трудности. Среди причин, сдерживающих распространение аддитивных технологий в основном производстве, 31 % приходится на ненадежность сформированных изделий и 35 % – на высокую стоимость аддитивных материалов [1]. Особенно важной представляется неустойчивость характеристик от детали к детали и от установки к установке.

В то же время существуют предпосылки для использования дополнительных конструкторско-технологических мероприятий для упрочняющего модифицирования структуры аддитивного материала. Уста-

новлено [2], что предел прочности на изгиб объектов 3D печати по технологии FDM резко возрастает с увеличением коэффициента заполнения с 80 до 100 % – с 45 МПа до 76 МПа, при меньших значениях коэффициента влияние его увеличения на значение напряжений менее выражено. Напряжения при растяжении не зависят от коэффициента заполнения и составляют около 38 МПа, однако, при этом более чем на 30 % при увеличении коэффициента до 100 % увеличивается максимальная деформация. Считается важным учитывать прочность адгезионного взаимодействия между нитями и минимизировать технологические дефекты, препятствующие адгезии. При увеличении плотности заполнения с 20 до 80 % предел прочности на растяжение растет с 32,3 до 42,6 МПа, а при растяжении поперек волокон – с 32,3 до 39,2 МПа [3]. Отмечается [4], что для развития аддитивных технологий печати полимерными материалами с целью расширения возможности применения изделий в конструкциях основного производства необходимо решение нескольких задач:

- исследование влияния состава полимера и технологических режимов печати на усадку, коробление детали и качество (на микро- и макроуровне) ее поверхности;

- комплексные экспериментальные и теоретические исследования зависимостей внутренних напряжений в отвержденном изделии от технологических режимов с целью выбора алгоритма построения каждой конкретной детали;

- обоснование и разработка способов снижения пористости полимерных матриц и увеличение адгезии между нитями в слое и между слоями;

- совершенствование конструкции FDM принтеров с целью армирования полимерной матрицы непрерывными волокнами;

- исследования в области регулирования электро- и теплопроводности, а также старения деталей, полученных по технологии FDM.

Можно отметить, что в настоящее время решение указанных задач по совершенствованию полимерных материалов для 3D-печати осуществляется по нескольким

направлениям. С одной стороны, в России и за рубежом развивается печать композиционными материалами с целью повышения их прочности, жесткости, ударной вязкости и износостойкости путем применения дисперсно-наполненных исходных композиций, в т. ч. металлическими порошками, или армированных непрерывными углеродными и стеклянными волокнами филаментов. В качестве основных материалов используются термопласты: ABS, PLA, PET, нейлон. В последнее время получили развитие филаменты, армированные углеродными нитями или жгутами, пропитанными терморезактивными смолами (технология коэкструзии).

С другой стороны, разработаны и применяются высокоэластичные филаменты различного состава, обладающие комплексом свойств по ряду параметров, приближающих их к техническим резинам, прежде всего по способности к деформации с большими коэффициентами удлинения. В то же время в свободном доступе не выявлена научная информация о работах по печати высокоэластичными материалами, в полной мере соответствующими по физико-механическим и эксплуатационным свойствам и способными заменить в конструкциях уплотнительных элементов резины 2-й группы по ГОСТ 18829-2017. Все образцы, полученные из резиноподобных филаментов типа TiTi Flex Spring, TiTi Flex Hard, Flex, Filaflex, Proflex, имеют высокую эластичность, но значительно уступают резинам по твердости. Важным их недостатком является значительная остаточная деформация при больших растягивающих нагрузках, что определяется особенностями молекулярного строения полимера, отличающимися от эластомеров на основе каучука, к которым относятся резины [5-9].

Известны работы отечественных и зарубежных исследователей по повышению физико-механических свойств полимеров и их композиций в СВЧ электромагнитном поле [10-13]. В основе установленных положительных эффектов лежит СВЧ диэлектрический нагрев материала [14]. Однако полученные результаты относятся к жидкофазным

материалам в процессе смешивания компонентов и отверждения и не могут поэтому быть однозначно перенесены к аддитивным процессам печати полимерами типа FDM. Авторами данной статьи проведены исследования влияния СВЧ электромагнитного поля частотой 2450 МГц на отвержденные системы типа армированных волокнами ПКМ [15]. Показано, что СВЧ воздействие с плотностью потока энергии $(17-18) \cdot 10^4$ мкВт/см² в течение 2 минут обеспечивает повышение прочности углепластиков при межслоевом сдвиге на (14-16) %, трехточечном изгибе на (14-18) %, ударном изгибе на (9-11) %. Данным параметрам соответствует нагрев материалов до температуры (60-80) °С. Предложен механизм влияния СВЧ электромагнитного поля на свойства отвержденных ПКМ, заключающийся во временном переходе связующего при указанной температуре в высокоэластичное пластичное состояние, что повышает вероятность конформационных поворотов звеньев макромолекул полимера, а также его текучесть в межволоконном пространстве, что способствует увеличению поверхностей контакта матрицы и волокна и, соответственно, связанности структуры и более равномерному «включению в работу» по восприятию нагрузки армирующих волокон. Однако, при этом рассматривались только ПКМ на термореактивном связующем. Авторами также получены положительные результаты по повышению прочности и эластичности уплотнительных элементов из резины 2 группы, реализованные в автоматизированной СВЧ технологической установке с программируемыми циклами [16]. Однако влияние СВЧ электромагнитного поля на термопластичные связующие и, в частности, резиноподобные, не изучалось. Зарубежные исследования влияния СВЧ электромагнитного поля на отвержденные системы касались только тепловых эффектов и распределения тепловых полей с учетом схемы армирования и не касались физико-механических свойств ПКМ [17, 18].

Соответственно влияние СВЧ электромагнитного поля на отвержденные резиноподобные материалы типа Flex требует отдельного рассмотрения.

Выше отмечалось, что одним из перспективных путей повышения физико-механических свойств объектов аддитивного производства из неметаллических материалов является печать филаментами, армированными непрерывными волокнами. Такие компании как Markforged, Desktop Metal, Orbital Composites, 9T Labs и Anisoprint разработали оборудование для аддитивного производства композитов, которое может интегрировать непрерывные волокна в детали из термопластика во время печати, как правило, путем подачи непрерывных волокон в каждый отдельный слой с помощью отдельного сопла [19, 20]. Однако представляется, что применительно к изделиям основного производства более целесообразным является использование технологии LOM. Данная технология заключается в послойном построении изделия, путем соединения ламинированных однородных листовых материалов (или пленок) при помощи ультразвука или термическим методом в заданных координатах с последующим обрезанием излишков. При этом реализуются две схемы: «соединение – раскрой» и «раскрой – соединение» [21]. Получаемые при этом изделия характеризуются высокой прочностью при растяжении в плоскости укладки листов и возможностью в случае применения схемы «раскрой – соединение» формировать так называемые «интеллектуальные» материалы с полостями, в которых размещаются, встраиваясь в структуру, всевозможные сенсоры и активные элементы типа сплавов или композитов с памятью формы. Однако известные решения по реализации данного метода касались только консолидации термопластичных материалов. Вопрос возможности соединения ламинатов на основе термореактивных связующих, которые наиболее распространены в производстве препрегов ПКМ, относится к малоизученным, информация о практическом использовании соединения таких препрегов, находящихся в отвержденном состоянии, отсутствует. В то же время, как указывалось выше, решение задачи соединения по технологии LOM препрегов на термореактивном связующем позволит не только расширить применимость метода к композици-

онным материалам, но и даст возможность вторичного использования препрегов с превышенным сроком хранения, что даст возможность уменьшить накопление не утилизируемых отходов полимеров в окружающей среде. Анализ научно-технической информации [22-25] позволяет предположить, что при определенных сочетаниях амплитуды колебаний концентратора, определяющей при заданной постоянной частоте интенсивность энергетического воздействия, сварочного статического давления, скорости перемещения свариваемого материала под концентратором или периода возобновления ультразвукового импульса, материала и формы рабочего торца концентратора, толщины формируемого объекта ультразвуковая консолидация препрегов на термореактивном связующем может стать возможной. Предварительно были проведены исследования влияния режимных параметров ультразвукового воздействия на формирование слоистой структуры из углетканых препрегов на термореактивном связующем через промежуточные слои термопластичных пленок PET. В результате испытаний на трехточечный изгиб установлено,

что предельные напряжения не превысили 18,3 МПа, что практически в 6 раз меньше, чем образцов с аналогичными размерными параметрами, полученными стандартным методом прессования [26], что позволило сделать вывод о бесперспективности использования промежуточных слоев термопластичных пленок из-за малой их адгезии к препрегу, имеющему резко отличающиеся теплофизические и механические свойства. Далее решалась задача непосредственной консолидации исходных препрегов.

Для достижения поставленной в работе цели выполнялись две группы экспериментов, в которых использовались волновые процессы сверхвысокочастотного (микроволнового) и высокочастотного (ультразвукового) диапазонов.

Модифицирование образцов уплотнительных элементов из резиноподобного филамента Flex проводили при помощи при помощи экспериментальной установки, созданной на базе рупорного излучателя с частотой – 2450 МГц «Жук-2-02» (рис. 1 а) производства ООО НПП «АгроЭкоТех» (г. Обнинск Калужской обл.).



а



б

Рис. 1. Оборудование для проведения обработки исследованных материалов: СВЧ технологическая установка (а), ультразвуковая установка с устройством нагружения и пьезокерамическим преобразователем (б)

Регулировка плотности потока энергии обеспечивается изменением расстояния (дистанции) от плоскости раскрыва рупора до изделия. Время обработки задается таймером в диапазоне от 0 до 10 минут. Управление установкой осуществляется с выносного пульта. Для позиционирования изделий применяется трехкоординатный стол, обеспечивающий перемещение изделия по осям X, Y, Z при помощи винтовых приводов с точно-

стью 0,1 мм. Образцы в виде колец устанавливали на ролик, обеспечивающий им вращение от двигателя РД-09. В процессе экспериментов плотность потока энергии (ППЭ) изменяли в диапазоне от $(10-12) \cdot 10^4$ мкВт/см² до $(45-50) \cdot 10^4$ мкВт/см², время обработки – от 1 до 10 минут.

Образцы из материала Flex (рис. 2) были напечатаны на принтере Fortus-360mc.



а



б

Рис. 2. Уплотнительное кольцо, напечатанное из филамента Flex (а).
Упруго-деформативные характеристики кольца (б)

Размеры образцов были взяты в соответствии с номенклатурой уплотнительных колец из резины 2 группы Ду300 МВ 39183-300: внутренний диаметр – 68,5 мм, диаметр сечения – 5,8 мм. Напечатанные кольца для получения максимально однородных по свойствам образцов разрезали на две части – контрольную и подвергаемую СВЧ воздействию. Каждый образец испытывали на растяжение на машине испытательной универсальной ИР 5082-100 с компьютерной обработкой результатов. Температуру поверхности образцов в процессе СВЧ воздействия контролировали при помощи тепловизора Flir E40.

Вторая группа экспериментов касалась ультразвуковой консолидации препрегов на термореактивном связующем с превышенным сроком хранения без применения промежуточных слоев термопластичных пленок. Использовали экспериментальную

установку (рис. 1 б) с действующим макетом многочастотного ультразвукового генератора, обеспечивающего частоту выходного напряжения в диапазоне 20-60 кГц с программированием опорной частоты с ноутбука ступенчато через каждые 10 кГц и тонкую настройку в пределах каждой ступени через 10 Гц. В установке использован пьезокерамический электро-механический преобразователь на кольцах из керамики ЦТС-19 с активной и пассивной накладками, рассчитанными на резонансную частоту 22 кГц. Соответственно такой преобразователь обеспечивал устойчивую работу и на удвоенной частоте – 44 кГц. Амплитуда смещения торца инструментов-концентраторов (рис. 3) регулировалась в диапазоне от 0 до 15 мкм изменением мощности генератора путем регулировки входного напряжения от 0 до 180 В при помощи автотрансформатора.

Применяли ступенчатые концентраторы с диаметром выходного торца 15 и 5 мм. Один из концентраторов выполняли с двухзаходной винтовой канавкой для создания на торце крутильной составляющей колебаний, действующей в плоскости консолидации слоев. Фактические резонанс-

ные частоты преобразователя составили 22,48 и 43,5 кГц. Реализовывали точечную дискретную сварку с перекрытием зон воздействия выходного торца концентратора не более чем на 10 %. Время воздействия в каждой точке устанавливали равным от 5 до 30 с.



а



б

Рис. 3. Инструменты-концентраторы (а), сваренный образец (б)

Нагружение слоев образцов осуществляли постепенно в соответствии с рекомендациями по ультразвуковой сварке полимеров [24, 25] от 0 до 25 Н путем поджатия торца концентратора к образцу, закрепленному на столе установки со встроенной тарированной пружиной. Формировали образцы и 10 полос препрегов размерами 75×8×0,2 мм. Таким образом, суммарная толщина каждого образца составляла 2 мм. Испытания образцов на трехточечный изгиб проводили на компьютерной лабораторной установке с программным обеспечением LabWiev (ИП «Майоров», г. Орел).

В первой группе экспериментов для сравнения испытывали образцы, вырезанные из стандартного кольца из резины 2 группы. Во второй группе экспериментов сравнивали образцы с размерами, аналогичными опытным, из углепластика производства ООО «Еврокомплект» (г. Калуга), полученного прессованием.

В результате исследования формирования образцов из филамента Flex и их СВЧ модифицирования установлено следующее.

Максимальное отклонение диаметра напечатанных колец в партии составило +0,05 мм, отклонения в диаметре сечения –

от +0,03 мм до –0,05 мм, что в целом соответствует характеристикам используемого принтера и, соответственно, не зависит от физико-механических свойств филамента. На поверхности колец (рис. 2 а) не обнаружено следов поддержек и других следов остаточного материала, кольца легко отделяются от подложки, отмечаются небольшие заусенцы. Некоторые погрешности формы вызваны ошибками программы при переводе твердотельной модели из формата Comras в формат STL. Внешне кольца практически не отличаются от изготовленных из резины 2 группы. При незначительной поперечной деформации (рис. 2 б) напечатанные кольца демонстрируют явные признаки упругости, после снятия нагрузки возвращаются к исходной геометрической форме.

В результате испытаний на растяжение выявлено принципиальное различие образцов, вырезанных из резины 2 группы, и напечатанных колец. Относительное удлинение образцов из резины в момент разрыва составило в среднем (270-280) %, образцов из филамента – (430-440) %. При этом после разрыва резиновых образцов их части вернулись в исходное состояние, что подтвержда-

ется сложением длин оставшихся после испытания фрагментов. Контрольные образцы из филамента Flex не удалось довести до разрыва из-за выкальзывания из захватов испытательной машины. После снятия с захватов сохранилась их максимальная деформация, образцы деформировались, а площадь сечения уменьшилась примерно на 30 %, особенно в средней части (рис. 4 а). Опытные кольца после СВЧ модификации при ППЭ =

$(45-50) \cdot 10^4$ мкВт/см² в течение 9-10 минут достигли удлинения в пределах 270 %, что соответствует образцам из резины. После снятия с захватов испытательной машины отмечается практическое отсутствие искажений формы и уменьшение площади сечения, однако остаточная деформация растяжения также сохраняется (становится необратимой), но снижается на 40 % по сравнению с контрольными образцами (рис. 4 б).



а



б

Рис. 4. Контрольный (а) и опытный (б) образцы колец из филамента Flex после извлечения из захватов испытательной машины

Графики «напряжения – деформация» при растяжении резиновых и образцов из филамента Flex (контрольный и опытных) представлены на рис. 5.

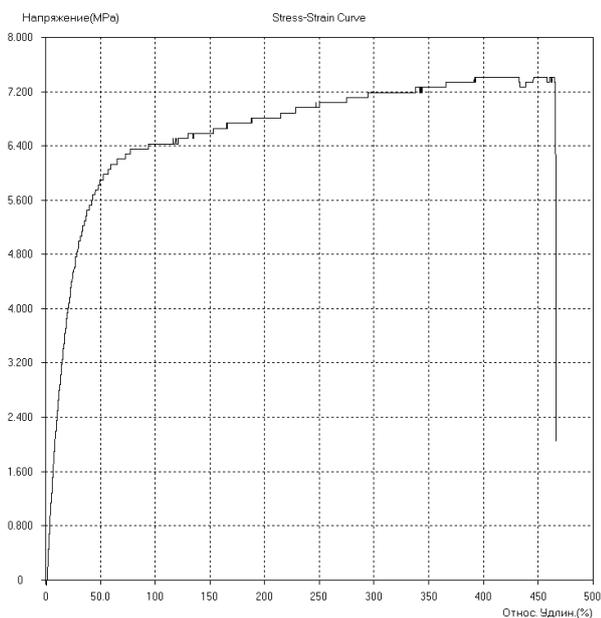
Отмечается, что прочность контрольных и опытных образцов из филамента Flex превышает прочность образцов из резины на 19 %. При этом во всем диапазоне исследованных ППЭ и времени воздействия прочность полимерных образцов оказалась практически неизменной. Основное отличие заключается в изменении упругих характеристик материала. Если для контрольного образца характерен выход на «плато» пластической деформации при относительном удлинении, равном 100 %, то опытные образцы характеризуются выходом на «плато» при значительно меньшем удлинении – порядка 50 %. Для контрольных образцов отмечается большой разброс значений напряжений растяжения, выраженный в коэффициенте вариации, равном 12,5 %. Опытные образцы имеют коэффициент вариации около 5,5 %.

Для резины ожидаемо характерно полное отсутствие «плато» пластической деформации. Отмечается, данный эффект получен при максимальных в исследован-

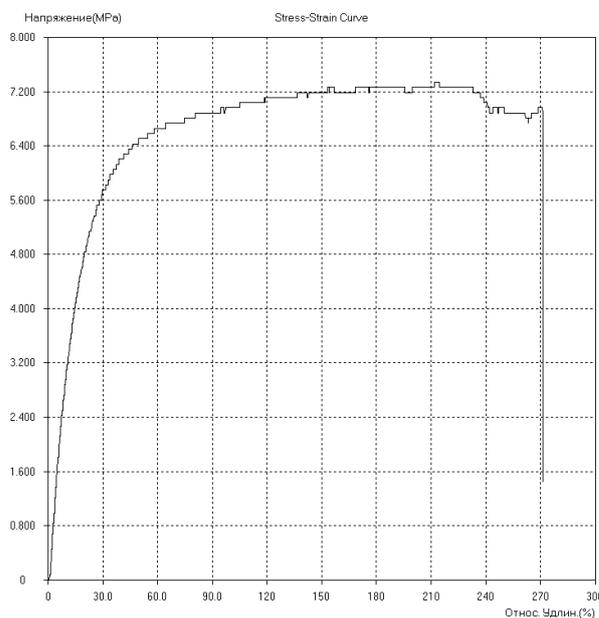
ном диапазоне значениях ППЭ и времени, которым соответствует зафиксированная на термограмме температура диэлектрического нагрева, равная $(45-50)^\circ\text{C}$. При меньших ППЭ и времени температура оказывалась меньше, а изменения образцов после испытаний приближались к контрольному. При ППЭ в диапазоне $(10-20) \cdot 10^4$ мкВт/см² во всем диапазоне времени воздействия температура образцов не превысила начальную, равную 20°C , и параметры образцов не отличались от контрольных, что подтверждает установленную авторами ранее [15] необходимость нагрева ПКМ в СВЧ электромагнитном поле до определенной температуры, соответствующей переходу связующего из отвержденного в пластичное и высокоэластичное состояние. Соответственно для реализации данного подхода к упрочняющей модификации объектов аддитивного производства с учетом зависимости температуры нагрева от уровня поглощенной мощности СВЧ излучения необходимо предварительно установить значения диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь материала филамента, затем по известным зависимо-

стям рассчитать долю поглощенной мощности и, задавшись величиной ППЭ, определить время воздействия, необходимое

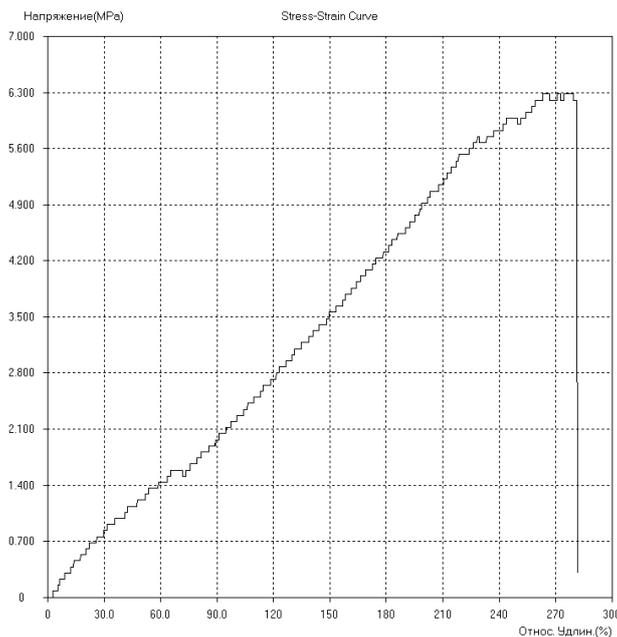
для выделения теплоты в объеме материала, достаточное для нагрева его до температуры пластификации полимера.



а



б



в

Рис. 5. Типичные графики «напряжения – деформация» контрольного (а) и опытного (б) образцов из филамента Flex и из резины 2 группы (в)

Механизм значительного уменьшения остаточной деформации филамента Flex после обработки в СВЧ электромагнитном поле может заключаться в следующем. В процессе печати каждый слой материала

формируется из отдельных дорожек, консолидированных между собой за счет диффузионного взаимодействия граничных слоев, структура которых вследствие этого отличается от основного материала фила-

мента наличием взаимно проникающих концевых звеньев макромолекул. В процессе растяжения эти звенья, обладая меньшей энергией связей, чем основные молекулярные структуры, распрямляются и вытягиваются в направлении действующей нагрузки, частично при этом возникшие связи разрываются, что облегчает скольжение границ макромолекул соседних дорожек филамента и, соответственно, значительное удлинение образца без разрушения и сохранение возникшей деформации. В процессе СВЧ диэлектрического нагрева энергетическая «подпитка» звеньев макромолекул и их колебания, вызванные волновой составляющей переменного электромагнитного поля, способствуют интенсивному смещению крайних звеньев и их переплетению в граничной области филаментов с образованием глобулярных структур.

Также при этом разрываются слабые связи и формируются новые с высоким энергетическим потенциалом. В результате в процессе воздействия растягивающих нагрузок происходит только распрямление крайних звеньев и деформация глобул. Скольжения по границам не происходит или оно слабо выражено из-за повышенной прочности новых связей. В результате необратимая деформация образца уменьшается и повышается доля упругой составляющей, что и проявилось в ходе испытаний.

В результате испытаний образцов ПКМ, сформированных путем ультразвуковой консолидации при помощи стержневого ступенчатого инструмента-концентратора, установлены следующие особенности, характеризующие значимую зависимость физико-механических свойств материала от частоты ультразвуковых колебаний (рис. 6).

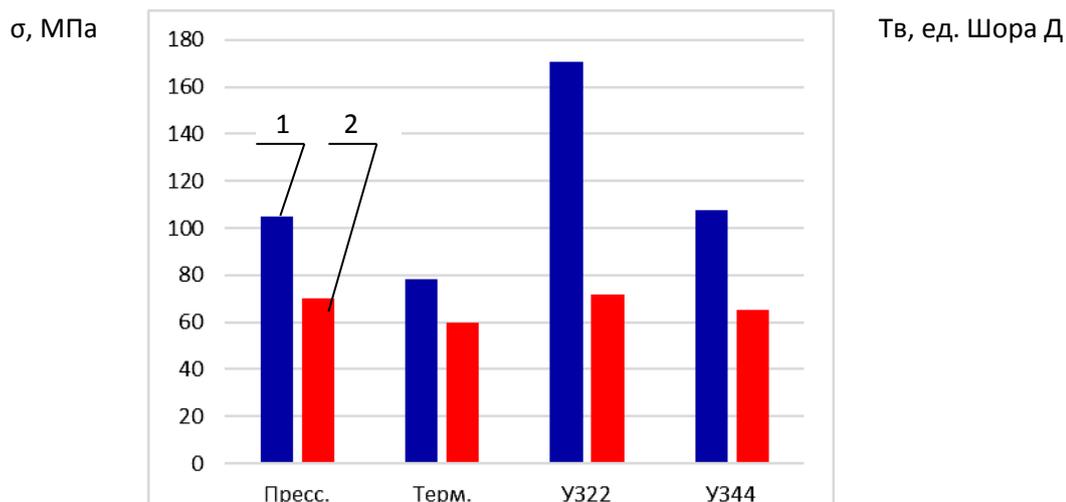


Рис. 6. Влияние метода формирования ПКМ из препрегов на термореактивном связующем на напряжения трехточечного изгиба (1) и твердость поверхности по Шору (2). Пояснения в тексте

На диаграмме (рис. 6) обозначено: Пресс. – образец, полученный прессованием по стандартной технологии из «свежих» препрегов, Терм. – образец, полученный прессованием препрегов с истекшим сроком хранения после нагрева в термокамере до $(55-58)^{\circ}\text{C}$, У322 и У344 – образцы, полученные ультразвуковой сваркой препрегов с истекшим сроком хранения при частоте колебаний концентратора 22,48 и 43,5 кГц соответственно. Отмечается, что образцы, полу-

ченные прессованием из препрегов с истекшим сроком хранения, имеют в среднем прочность при изгибе на 25 % меньше, чем образцы, полученные тем же методом, но из качественных (не «просроченных») препрегов. Образцы, полученные ультразвуковой сваркой из препрегов с истекшим сроком хранения при частоте 43,5 кГц, практически не отличаются по прочности от контрольных, полученных прессованием из качественных препрегов. Образцы, полученные ультразвуковой сваркой из пре-

прегов с истекшим сроком хранения при частоте 22,48 кГц, характеризуются значительным возрастанием прочности по сравнению с контрольными – более чем на 60 %. При этом отмечается относительно малозначимое изменение твердости поверхности образцов, полученных ультразвуковой сваркой при частоте 22,48 и 43,5 кГц, относительно контрольных – на 2 и 7 % соответственно. При этом твердость образцов во втором случае оказалась сниженной. В то же время отмечается повышение равномерности твердости опытных образцов по сравнению с контрольными, полученными по стандартной технологии: коэффициенты вариации составили соответственно всего 1 и 0,7 % по сравнению с 5 %. Образцы, полученные термическим прессованием из препрегов с истекшим сроком эксплуатации, имеют твердость на 14 % меньше, чем контрольные, а их коэффициент вариации превышает 12 %.

При использовании инструментального концентратора, обеспечивающего продольно-крутильные колебания в области консолидации слоев, при частоте 43,5 кГц отмечено аналогичное малозначимое увеличение прочности по сравнению с прессованными образцами. При частоте 22,48 кГц достигнуто значительно меньшее увеличение прочности по сравнению с применением концентратора продольных колебаний – максимально на (20-25) %. Изложенное свидетельствует о том, что появление в области контакта препрегов сдвиговой составляющей ультразвуковых колебаний не обеспечивает высокой эффективности соединения, что с учетом большей трудоемкости и сложности изготовления концентраторов продольно-крутильных колебаний делает их применение при формировании слоистых композитов не целесообразным. По-видимому, сдвиговые колебания в плоскости соединения слоев (препрегов) вызывают повреждение областей контакта «матрица – волокно» в слое, что ослабляет слоистую конструкцию в целом и снижает ее сопротивление изгибу, несмотря на хорошее межслоевое взаимодействие.

При воздействии ультразвуковых колебаний принятой в эксперименте интенсивности из-за знакопеременных смещений волокон наполнителя друг относительно друга возникает внутрисклеивающее трение, вызывающее локальное повышение температуры, составляющее по результатам наших исследований (40-45) °С. Это приводит к временному переходу терморезистивного связующего в пластичное состояние, высокоамплитудные (смещение до 10 мкм) волновые процессы способствуют течению связующего и заполнению им межслоевого пространства, взаимному проникновению связующего из одного слоя в другой, заполнению пустот между волокнами, образовавшихся в процессе термоусадки связующего при отверждении композита. Вследствие этого происходит микросварка слоев препрегов на терморезистивном связующем и, возможно, релаксация остаточных напряжений. В совокупности обеспечивается не только консолидация препрегов в слоистый материал, но и повышение его упруго-прочностных свойств. С другой стороны, принципиальных изменений в фазовом составе материала, степени его кристалличности и коэффициента заполнения не происходит, о чем может свидетельствовать малозначимое изменение твердости.

Изложенное выше характерно для резонансных частот ультразвука порядка 22 кГц. Поскольку ультразвуковая сварка представляет собой высокочастотный колебательный процесс, при образовании соединения действуют два противоположных механизма. С одной стороны – акустические течения и другие описанные выше процессы, способствующие адгезионному взаимодействию между препрегами и их компонентами. С другой стороны – материал испытывает малоамплитудное нагружение с большим числом циклов в единицу времени. В частности, при частоте 22 кГц в течение принятого времени воздействия в каждой точке контакта 30 с материал будет испытывать $6,6 \times 10^5$ нагружений, а при частоте 44 кГц – $13,2 \times 10^5$ циклов, что уже соизмеримо с базовым числом циклов нагружения, принятом для полимерных компо-

зиционных материалов. В результате действия этих противоположных процессов при использовании более высоких частот нагружения появление мостиков сварки и участков адгезионного взаимодействия будет сопровождаться исчерпанием запаса усталостной прочности в некоторых областях препрегов и ПКМ в целом, что будет тормозить процессы консолидации.

Тем не менее заслуживает внимания тот факт, что даже при резонансной частоте колебаний 44 кГц формируется композиционный материал из препрегов с истекшим сроком хранения, соизмеримый по прочности с материалом, полученным по стандартной технологии из препрегов требуемого качества (годных).

Заключение

Показана актуальность повышения физико-механических свойств объектов аддитивного производства из неметаллических, в том числе полимерных, композиционных материалов (ПКМ) путем применения воздействия на них в отвержденном состоянии электрофизических процессов высоких (ультразвуковых) и сверхвысоких (микроволновых) частот.

Выполнены исследования влияния СВЧ электромагнитного поля на прочность при разрыве и относительное удлинение уплотнительных колец из резиноподобного материала Flex, полученных по аддитивной технологии FDM. Определены рациональные режимные параметры СВЧ воздействия: плотность потока энергии $(45-50) \times 10^4$ мкВт/см² при времени воздействия до 10 минут, показавшие существенное повышение прочности по сравнению с аналогичными изделиями из резины и уменьшение более, чем в 2 раза остаточной деформации при растяжении по сравнению

с уплотнениями из аналогичного материала без модификации.

Впервые экспериментально доказана возможность формирования путем ультразвуковой сварки препрегов на эпоксидном связующем с истекшим сроком эксплуатации многослойного углепластика, превышающего по прочности при применении частоты воздействия 22 кГц более чем на 60 % материал, полученный из качественных препрегов стандартным методом прессования. Установлено, что ограничения по частоте ультразвука определяются исчерпанием запаса усталостной прочности связующего, особенно в области контакта при использовании высоких частот.

Показано значимое повышение равномерности твердости ПКМ, сформированных путем ультразвуковой консолидации препрегов, выраженное в снижении в несколько раз коэффициента вариации данного параметра.

Предложены механизмы, обосновывающие полученные эффекты электрофизических воздействий. Для уточнения механизмов и разработки серийноспособных технологий необходимо продолжение исследований на расширенной номенклатуре материалов в направлении повышения упругих и эластичных свойств резиноподобных филаментов, а также повышения количества слоев препрегов на термореактивном связующем, соединяемых при помощи ультразвука.

Результаты исследования могут быть применены в аддитивных ремонтных технологиях в газовой отрасли и для решения проблемы утилизации препрегов из ПКМ на термореактивном связующем путем использования после истечения срока хранения при изготовлении изделий транспортного и энергетического машиностроения по аддитивной технологии LOM.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Рынок технологий 3D-печати в России и в мире. 2020. https://delprof.ru/upload/iblock/ced/DelProf_Analitika_Rynok-3D_pechati.pdf.

2. Балашов А.В., Маркова М.И. Исследование структуры и свойств изделий, полученных 3D-печатью // Инженерный вестник Дона. 2019. № 1.

www: ivdon.ru/ru/ magazine/archive/n 1 y 2019/5618.

3. **Петров В.М., Безпальчук С.Н., Яковлев С.П.** О влиянии структуры на прочность изделий из пластиков, получаемых методом 3D-печати // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. 2017. Т. 9. № 4. С. 765-776. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-4-765-776.

4. Three-dimensional printing of continuous-fiber composites by in-nozzle impregnation in Scientific reports / Ryosuke Matsuzaki, Masahito Ueda, Masaki Namiki at al. March 2016.

5. URL: <https://3d-diy.ru/wiki/3d-printery/flex-tpu-plastik-3d-printer-osobennosti-primeneni-nie-nastrojki-pechati/>

6. URL: <http://filatrade.ru/news/flex-rezinovyy-elastichnyy-i-gibkiy/>

7. URL: <https://www.ink-market.ru/blogs/blog/filaflex-gibkiy-material-dlya-3d-pechati>

8. URL: https://cnc3d-printer.com/index.php?TM_TC=1&TM_TX=BigRep_predlagaet_novyy_gibkiy_filament_PRO_FLEX_dlya_3D-pechati

9. URL: <https://bestfilament.ru/category/plastik-Bestfilament/bfgummy/>, <https://bestfilament.ru/category/plastik-Bestfilament/bflex/>

10. Microwave processing of materials // National Materials Advisory Board. Washington: National Academy Press, 1994. 150 p.

11. **Архангельский Ю.С.** Справочная книга по СВЧ-электротермии: справочник. Саратов: Научная книга, 2011.

12. Научные основы модификации полимерных материалов в СВЧ электромагнитном поле / С.Г. Калганова, Ю.С. Архангельский, В.А. Лаврентьев и др. // Вопросы электротехнологии. 2017. № 1 (14). С. 26-35.

13. Inderdeep Singh Feasibility study on microwave joining of 'green' composites/ Inderdeep Singh, Pramendra Kumar Bajraia, Deepak Malika, Apurbba Kumar Sharmaa, Pradeep Kumara // Akademeia. 2011. № 1 (1): ea0101. P. 1-6.

14. **Пюшнер Г.** Нагрев энергией сверхвысоких частот: пер. с англ. Москва: Энергия, 1968. 312 с.

15. **Злобина И.В., Бекренев Н.В.** О механизме повышения механических характеристик отвержденных полимерных композиционных материалов под действием СВЧ электромагнитного поля // Известия Саратовского университета. Новая серия. Сер. Физика. 2022. Т. 22. № 2. С. 158-169.

16. СВЧ технологическая установка повышения прочности и эластичности уплотнительных элементов магистральных трубопроводов / А.В. Скупинский, И.Д. Садовсков, О.А. Паршиков и др. // Вопросы электротехнологии. 2023. № 3. С. 15-27.

17. **Kim Teawon, Lee Jaegun, Lee Kun-Hong.** Microwave heating of carbon-based solid materials // Carbon Letters. 2014. Vol. 15. № 1. P. 15-24.

18. **Kwak M.** Microwave Curing of Carbon-Epoxy Composites: Process Development and Material Evaluation. Imperial College London Department of Aeronautics, 2016.

19. Аддитивные технологии для композитных материалов / М. Копытина, Т. Карпова, З. Сацкая и др. // Аддитивные технологии. 2019. № 3. С. 48.

20. Потенциальные возможности 3D-печати для получения композиционных материалов на основе синтетических и природных биополимеров (обзор) / Д.Г. Черемисин, В.Р. Мкртчян, А.Н. Иванкин и др. // Лесной вестник. Деревообработка и химическая переработка древесины. 2021. Т. 25. № 5. С. 111-118. МГТУ им Н. Э. Баумана, 2021. DOI: 10.18698/2542-1468-2021-5-111-118.

21. **Гибсон Я., Розен Д., Стакер Б.** Технологии аддитивного производства. Трёхмерная печать, быстрое прототипирование и прямое цифровое производство. Москва: Техносфера, 2016. 656 с.

22. Способ ультразвуковой сварки полимерных пленок / Волков С.С., Мозговой И.В., Шестель Л.А., Соколов В.А. // SU 1154104 А1. Заявка 3673325/23-05 16.12.1983; Опубликовано 07.05.1985 Бюл. № 17.

23. **Feygin M.** Apparatus and method for forming an integral object from laminations // US 4752352 A Appl. No.: 40361; Filed 17.08.1987.

24. **Холопов Ю.В.** Ультразвуковая сварка пластмасс и металлов. Ленинград: Машиностроение, 1988.

25. **Волков С.С.** Сварка и склеивание полимерных материалов. Москва: Химия, 2001. 376 с.

26. **Крылов В.В.** Исследование процесса изготовления слоистых полимерных композиционных материалов путем послойной ультразвуковой консолидации // Всероссийский научный форум студентов и учащихся – 2023: сборник статей Междунар. науч.-практ. конф. Петрозаводск, 27 ноября 2023 г. Петрозаводск: МЦНП «Новая наука», 2023. С. 180-191.

Паршиков Олег Александрович – начальник технического отдела ООО «Газпром трансгаз Саратов»

Аврамов Максим Валерьевич – кандидат технических наук, заместитель начальника технического отдела ООО «Газпром трансгаз Саратов»

Крылов Владислав Витальевич – аспирант Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Игнатьев Максим Алексеевич – аспирант Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Злобина Ирина Владимировна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Техническая механика и мехатроника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А., научный сотрудник лаборатории специального органического синтеза отдела тонких органических технологий НИЦ «Курчатовский институт»

Бекренев Николай Валерьевич – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Техническая механика и мехатроника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Oleg A. Parshikov – Head of Technical Department at ООО Gazprom Transgaz Saratov

Maxim V. Avramov – PhD (Technical Sciences), Deputy Head of Technical Department at ООО Gazprom Transgaz Saratov

Vladislav V. Krylov – Postgraduate student, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Maxim A. Ignatiev – Postgraduate student, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Irina V. Zlobina – PhD (Technical Sciences), Associate Professor, Department of Technical Mechanics and Mechatronics, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Research Fellow at the Laboratory of Special Organic Synthesis of the Department of Fine Organic Technologies, National Research Centre at Kurchatov Institute

Nikolaj.V. Bekrenev – Dr. Sci. Tech., Professor, Department of Technical Mechanics and Mechatronics, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 24.10.23, принята к опубликованию 28.11.23

УДК 621.78

**ЛАЗЕРНАЯ НАПЛАВКА ПОРОШКА ТИТАНОВОГО СПЛАВА VT6
НА НЕРЖАВЕЮЩУЮ СТАЛЬ 08X18H10T
ПРИ ИМПУЛЬСНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ ИЗЛУЧЕНИЯ**

И.В. Родионов, П.Н. Устинов, И.В. Перинская, Л.Е. Куц

**LASER DEPOSITION OF TITANIUM ALLOY POWDER VT6
STAINLESS STEEL 08Kh18Ni10T UNDER PULSED RADIATION**

I.V. Rodionov, P.N. Ustinov, I.V. Perinskaya, L.E. Kuts

Проведены экспериментальные исследования процесса лазерной наплавки присадочного материала в виде мелкодисперсного порошка титанового сплава VT6 на нержавеющую сталь 08X18H10T. Наплавка проводилась в импульсном режиме излучения при изменении широкого ряда параметров воздействия: напряжения на лампе накачки, мощности излучения, частоты и длительности импульсов, диаметра пятна фокусировки, шага следования импульсов, фокусного расстояния и количества проходов. Установлено влияние режимов лазерного импульсного излучения на толщину, фазовый и химический состав, шероховатость поверхности, морфологию и микротвердость наплавленного слоя. Выявлен эффект повышения прочности поверхности при порошковой наплавке сплава VT6 за счет образования высокопрочных оксидных фаз в виде диоксида TiO_2 с кристаллографическими модификациями рутила и анатаза. Определено, что микротвердость поверхности наплавленного титанового сплава отличается от микротвердости, измеренной в объеме слоя, где значение данного показателя достигало 10,3 ГПа при наибольшем значении микротвердости поверхности 6,8 ГПа.

Ключевые слова: импульсная лазерная наплавка, порошок титанового сплава, нержавеющая сталь, микротвердость, шероховатость поверхности, структура наплавленного слоя

Experimental studies of the laser surfacing process of the filler material in the form of fine powder VT6 titanium alloy on 08X18H10T stainless steel were carried out. The surfacing was carried out in the pulsed radiation mode with a change in a wide range of exposure parameters, such as voltage on the pump lamp, radiation power, pulse frequency and duration, focus spot diameter, pulse pitch, focal length, and number of passes. Effect of laser pulse radiation modes on the thickness, phase and chemical composition, surface roughness, morphology and microhardness of the deposited layer is established. The effect of increasing the surface strength during powder deposition of the VT6 alloy was revealed due to formation of highly solid oxide phases in the form of TiO_2 dioxide with crystallographic modifications of rutile and anatase. It is determined that microhardness of the surface of the deposited titanium alloy differs from the microhardness measured in the layer volume, where the rate of this value reached 10.3 GPa at the highest surface microhardness value of 6.8 GPa.

Keywords: pulsed laser deposition, titanium alloy powder, stainless steel, microhardness, surface roughness, structure of deposited layer

Введение

Нержавеющие стали широко применяются в таких областях промышленности, где изделия функционируют во влажной атмосфере или в контакте с внешними агрессивными средами, работают в условиях механических воздействий и подвержены износу. Сталь 08X18H10T является одной из основных марок нержавеющей сталей, т. к. обладает повышенной коррозионной устойчивостью, высокой формуемостью и вязкостью, хорошим сочетанием физико-механических характеристик.

Сферами применения стали 08X18H10T являются электроэнергетика, авиационно-космическое производство, медицина, строительство, автомобильное и транспортное машиностроение, сельскохозяйственное машиностроение и многие другие отрасли промышленного производства.

Из стали марки 08X18H10T часто выполняют изделия, которые наряду с воздействием коррозионных сред выполняют свои функции в условиях воздействия механических нагрузок, приводящих к разрушению и износу поверхностного слоя. Поэтому одним из актуальных направлений повышения качества таких изделий является упрочнение их поверхности различными технологическими способами. Для повышения конструкционной и поверхностной прочности изделий проводят упрочняющую обработку поверхности с изменением ее структурного состояния, фазового и химического состава. В результате такой обработки твердость поверхностных слоев изделий существенно возрастает, что способствует повышению предела выносливости и сопротивления к механическому разрушению – износу. Отличительной особенностью поверхностной упрочняющей обработки является сохранение пластичности объемной структуры в сердцевине материала, что позволяет конструкции воспринимать, например, большие ударно-динамические и знакопеременные нагрузки и выдерживать протекание процессов деформирования без наступления разрушения [1, 2].

Для упрочнения поверхности нержавеющей сталей в большинстве случаев при-

меняют обработку с нагревом поверхностных слоев и последующим их охлаждением. Различия в способах упрочнения проводят по методам нагрева изделий на определенную глубину, т. к. толщина упрочненного слоя определяется глубиной нагрева [3]. При поверхностном упрочнении широкое распространение получили такие способы, как электротермическая закалка с нагревом изделий токами высокой частоты (ТВЧ), лазерная закалка, газопламенная закалка с нагревом кислородным или кислородокеросиновым пламенем.

В других случаях применяют упрочнение с нанесением износостойких покрытий на основе высокотвердых химических соединений (карбидов, нитридов и оксидов металлов) [4-7]. Здесь широкое распространение получили способы плазменного напыления порошков, электрохимического осаждения, электродуговой наплавки, термомеханического и лазерного формирования поверхностных слоев.

В ряду указанных способов лазерная обработка поверхности наплавкой разных присадочных материалов рассматривается в настоящее время как наиболее перспективная технология получения коррозионно-стойких и механически прочных покрытий на нержавеющей и других конструкционных сталях. В особенности данная обработка является преимущественной, когда требуется сформировать функциональный слой на поверхности отдельно взятой части изделия, не подвергая воздействию остальные части конструкции, т. е. провести избирательную обработку поверхности [8, 9].

Лазерная наплавка может осуществляться в импульсном и непрерывном режимах излучения. В данной работе экспериментально определяется возможность импульсной наплавки порошка титанового сплава ВТ6 на поверхность стали 08X18H10T и устанавливается влияние режимов лазерного воздействия на характеристики наплавленного слоя.

Методика и техника эксперимента

Эксперимент заключался в определении режимов лазерной импульсной наплавки ти-

танового (BT6) порошка на поверхность стальных образцов, обеспечивающих повышенные показатели физико-механических характеристик наплавленного слоя.

Образцы для проведения экспериментов вырезались из листовой стали 08X18H10T в виде пластин размерами 15×20×2 мм.

Очистка образцов производилась с использованием ультразвуковой ванны «Кристалл-2.5» при интенсивности ультразвуковых колебаний 1,2 Вт/см², частоте колебаний 22 кГц и продолжительности 30 мин. В качестве моющей жидкости был использован спиртовой раствор. Это позволило очистить поверхность образцов от загрязнений органической и неорганической природы и подготовить к нанесению порошкового материала.

В качестве присадочного материала был выбран порошок титанового сплава BT6 размерностью частиц 50-70 мкм, который равномерно тонким слоем (≈200 мкм) распределялся по поверхности образцов.

Для экспериментов по лазерной наплавке использовалась автоматизированная установка для термофизической когерентной модификации LRS-50A. Технологические режимы подбирались при изменении основных параметров обработки и включали:

- выбор величины напряжения на лампе накачки и мощности излучения при фокусном расстоянии 100 мм;

- влияние количества технологических проходов на качество наплавленного слоя;

- выбор величины напряжения на лампе накачки и мощности излучения при фокусном расстоянии 98 мм;

- влияние изменения шага следования импульсов и количества проходов на структуру наплавленного слоя;

- влияние изменения частоты следования импульсов на структуру обработанной поверхности.

Наплавка во время подбора режимов лазерного импульсного излучения проводилась в виде дорожек размерностью 12×4 мм.

Для изучения морфологии и структурных особенностей поверхности стальных образцов (во вторичных и отраженных

электронах) и ее химического состава (по характеристическому рентгеновскому излучению) использовался сканирующий электронный микроскоп «Aspex EXplorer».

Для определения фазового (кристаллического) состава пробы и количественного определения известных кристаллических фаз в смеси был использован дифрактометр ARL X'TRA.

Профилометрические исследования производились на цифровом профилометре Mitutoyo SJ-410.

Для анализа микротвердости поверхности образцов использовался микротвердомер ПМТ-3м.

Результаты экспериментальных исследований и их анализ

На первом этапе подбора режимов обработки определялось влияние напряжения на лампе накачки и мощности импульсного излучения на качество наплавленного слоя (табл. 1). Было установлено, что образец № 6 имеет наибольшее количество расплавленных частиц порошка и более однородную структуру поверхности, что свидетельствует о высоких тепловых вложениях лазерного излучения в процесс проплавления частиц и структурообразование слоя. Поэтому при данном режиме обработки было увеличено количество проходов и выполнен второй этап выбора условий наплавки (табл. 2).

При увеличении количества проходов (числа сканирований) до двух и трёх раз на поверхности образцов появлялось большое количество дефектных зон в виде пережогов, наплывов, рыхлых и высокопористых структур, значительно увеличились параметры шероховатости. Исходя из этого, можно считать, что полученный при указанных режимах наплавленный слой характеризуется низким качеством и не может применяться как функциональное механически прочное покрытие. Поэтому на третьем этапе исследований анализировалось влияние изменения напряжения на лампе накачки и мощности излучения при фокусном расстоянии 98 мм (табл. 3).

Таблица 1

Задаваемые режимы лазерного излучения на 1-м этапе исследований
(длительность импульсов – 1 мс, частота импульсов – 10 Гц, фокусное расстояние – 100 мм,
диаметр пятна фокусировки – 1 мм)

№	Напряжение на лампе накачки, В	Мощность, Вт	Кол-во проходов	Шаг следования импульсов, мм	Поверхность образцов в виде наплавленных дорожек
1	200	–	1	0,1	
2	225	–	1	0,1	
3	250	0,16	1	0,1	
4	275	0,20	1	0,1	
5	300	0,31	1	0,1	
6	325	0,42	1	0,1	

Таблица 2

Задаваемые режимы лазерного излучения на 2-ом этапе исследований
(длительность импульсов – 1 мс, частота импульсов – 10 Гц, фокусное расстояние – 100 мм,
диаметр пятна фокусировки – 1 мм)

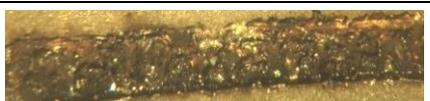
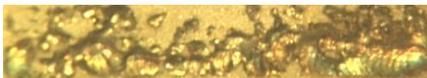
№	Напряжение на лампе накачки, В	Мощность, Вт	Кол-во проходов	Шаг следования импульсов, мм	Поверхность образцов в виде наплавленных дорожек
1	325	0,42	1	0,1	
2	325	0,42	2	0,1	
3	325	0,42	3	0,1	

Таблица 3

Задаваемые режимы лазерного излучения на 3-м этапе исследований
(длительность импульсов – 1 мс, частота импульсов – 10 Гц,
фокусное расстояние – 98 мм, диаметр пятна фокусировки – 1 мм)

№	Напряжение на лампе накачки, В	Мощность, Вт	Кол-во проходов	Шаг следования импульсов, мм	Поверхность образцов в виде наплавленных дорожек
1	250	0,16	1	0,1	

Окончание табл. 3

№	Напряжение на лампе накачки, В	Мощность, Вт	Кол-во проходов	Шаг следования импульсов, мм	Поверхность образцов в виде наплавленных дорожек
2	275	0,20	1	0,1	
3	300	0,31	1	0,1	
4	325	0,42	1	0,1	

Здесь при фокусном расстоянии 98 мм образец № 4 (как и образец № 6 при фокусном расстоянии 100 мм) показал наилучшее качество по степени проплавления частиц присадочного материала и равномерности распределения наплавленного слоя по поверхности. Причем значения напряжения на лампе накачки 325 В и мощности излучения 0,42 Вт также являлись определяющими

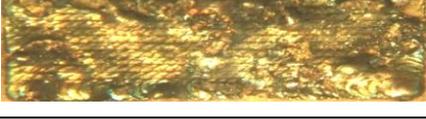
в образовании относительно однородных структур. Поэтому при дальнейшем подборе режимов наплавки значения этих параметров не изменялись. Увеличение количества проходов, проводимое на 4-м этапе эксперимента, показало, что наилучшее качество слоя наплавленного титанового (ВТ6) порошка формировалось на образцах под номерами 4,9 и 12 (табл. 4).

Таблица 4

Задаваемые режимы лазерного излучения на 4-м этапе исследований
(длительность импульсов – 1 мс, частота импульсов – 10 Гц,
фокусное расстояние – 98 мм, диаметр пятна фокусировки – 1 мм)

№	Напряжение на лампе накачки, В	Мощность, Вт	Кол-во проходов	Шаг следования импульсов, мм	Поверхность образцов в виде наплавленных дорожек
1	325	0,42	1	0,1	
2	325	0,42	1	0,2	
3	325	0,42	1	0,3	
4	325	0,42	3	0,1	
5	325	0,42	3	0,2	
6	325	0,42	3	0,3	

Окончание табл. 4

№	Напряжение на лампе накачки, В	Мощность, Вт	Кол-во проходов	Шаг следования импульсов, мм	Поверхность образцов в виде наплавленных дорожек
7	325	0,42	5	0,2	
8	325	0,42	5	0,3	
9	325	0,42	7	0,2	
10	325	0,42	7	0,3	
11	325	0,42	10	0,3	
12	325	0,42	12	0,3	
13	325	0,42	18	0,4	

На последнем 5-м этапе исследований анализировалось влияние частоты следования импульсов на процесс наплавки и качество наплавленного слоя. Результаты эксперимента показали, что частота лазерных импульсов, задаваемая в пределах диапазона 10-20 Гц, не оказывает выраженного и существенного влияния на равномерность слоя и однородность структуры поверхности.

Исходя из результатов исследований по выбору рациональных условий лазерной наплавки порошка титанового сплава ВТ6 были определены основные режимы обработки, обеспечивающие получение наплавленного слоя с высокой степенью проплавления частиц и равномерностью покрывания поверхности расплавом присадочного материала (табл. 5). В дальнейшем образцы, полученные при данных режимах, под-

вергались определению толщины, химического и фазового состава, морфологии и микротвердости поверхности.

С помощью цифрового толщиномера VOGEL была измерена толщина наплавленного слоя, величина которой составляла 80 мкм для образца № 1, 120 мкм для образца № 2 и 250 мкм для образца № 3 (табл. 5).

При химическом анализе установлено, что на всех трех экспериментальных образцах присутствовали такие элементы, как Fe, Ni, Cr и Ti. При этом интенсивность спектральных линий Ti была наибольшей, что свидетельствует о преимущественном содержании титана в наплавленном слое, а Fe, Ni, Cr являются примесными элементами, диффундировавшими из стальной основы.

Таблица 5

Рациональные режимы, выбранные для лазерной импульсной наплавки порошка титанового сплава ВТ6 на нержавеющую сталь 08Х18Н10Т

№	Напряжение на лампе накачки, В	Мощность, Вт	Длительность импульсов, мс	Частота следования импульсов, Гц	Кол-во проходов	Шаг импульсов, мм	Фокусное расстояние, мм
1	325	0,42	1	10	3	0,1	98
2	325	0,42	1	10	7	0,2	98
3	325	0,42	1	10	12	0,3	98

В результате проведения рентгенофазового анализа было установлено, что наплавленный слой состоит из следующих фаз: α -Fe, γ -Fe, Fe, Fe₂O₃, Fe₃C, Cr₂O₃, Fe₃O₄, Fe₂C, TiO₂. То есть в процессе наплавки формируется смешанный состав модифицированного слоя, включающий, в основном, смесь карбидов железа и оксидов железа, хрома, титана. Упрочняющими соединениями здесь являются оксид хрома и оксиды титана в виде кристаллических решеток рутила и анатаза. Причем доля оксидов титана существенно увеличивается с повышением числа проходов. Образование данных фаз является следствием окисления хрома и титана при тепловых вложениях импульсного излучения, когда кислород воздуха вступает в реакционное взаи-

модействие с указанными металлами, находящимися в термически активном состоянии, с возникновением металлооксидных соединений, характеризующихся повышенной коррозионной стойкостью, твердостью и механической прочностью. Происходит преобразование металлического присадочного порошка в металлооксидную керамику, которая составляет модифицированный наплавленный слой с высокими физико-механическими свойствами.

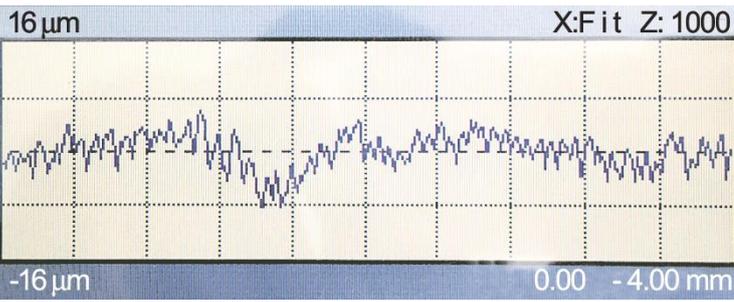
Микрогеометрия профиля наплавляемых структур заметно изменяется в зависимости от режимов излучения, где с повышением шага следования импульсов и увеличения количества проходов наблюдается возрастание параметров шероховатости поверхности (табл. 6).

Таблица 6

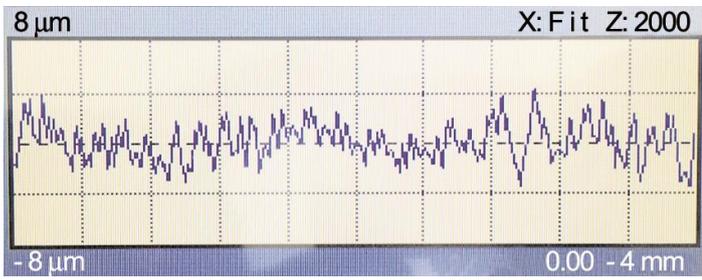
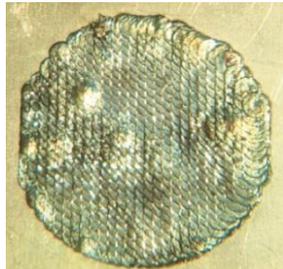
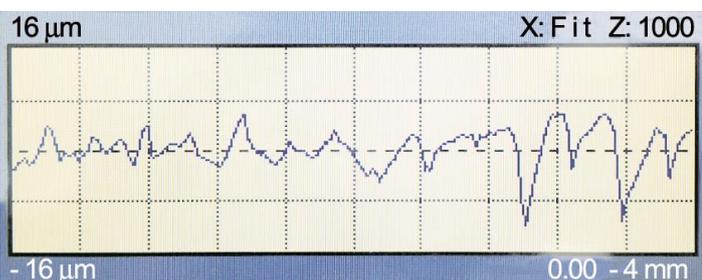
Параметры шероховатости поверхности наплавленного слоя, полученного при установленных рациональных режимах лазерного воздействия (мощность излучения – 0,42 Вт, частота импульсов – 10 Гц, фокусное расстояние – 98 мм)

№	R _a , мкм	R _z , мкм	R _{max} , мкм	S _m , мкм
Контрольный образец	0,2	2,7	4,5	64,6
1. Шаг импульсов – 0,1 мм; кол-во проходов – 3	1,2	6,5	7,2	169,1





Окончание табл. 5

№		R_a , мкм	R_z , мкм	R_{max} , мкм	S_m , мкм
2. Шаг импульсов – 0,2 мм; / кол-во проходов – 7		1,2	6,5	7,7	202,0
					
3. Шаг импульсов – 0,3 мм; кол-во проходов – 12		1,9	10,7	15,8	377,0
					

Данные профилометрических исследований согласуются с результатами оптической микроскопии, из которых следует, что повышение шага импульсов и количества технологических проходов при одинаковых значениях мощности, частоты и длительности импульсного излучения приводит к росту размеров пятен фокусировки и повышению морфологической гетерогенности в целом (рис. 1). При реализации в эксперименте линейной схемы обработки упрочнение наплавкой ведется с перекрытием зон лазерного воздействия и в поперечном сечении упрочненный слой представляет характерную «чешуйчатую» структуру, где в перекрытых участках происходит отпуск материала в результате действия последующего импульса. Количество проходов определяет показатели прочности поверхности после наплавки, т. к. энергии излучения, воздействующего в течение одного прохода, недостаточно для протекания необходимых фазово-химических превращений и структурных преобразований в наплавляемом материале. За один проход нельзя сформировать заданные функциональные характеристики поверхностного слоя из-за недостаточного проплавления частиц присадочного материала и

низкой эффективности перемешивания зон микрорасплавов.

Следует отметить, что при подборе режимов лазерного воздействия необходимо учитывать дисперсность и теплофизические свойства легирующего порошка, т. к. энергия облучения частиц, достаточная для их проплавления, задается разной в зависимости от материала, и определяет, каким набором функциональных качеств будет обладать непосредственно наплавленная структура.

При определении микротвердости наплавленного слоя из порошка титанового сплава ВТ6 было сделано по 7 индентирований и рассчитано среднеарифметическое значение. В ходе измерений было выявлено, что образец № 1 имеет постоянные значения микротвердости на разных участках наплавленного слоя. Образцы № 2, № 3 на периферийной части пятен фокусировки имеют большие значения микротвердости, чем в центральной их части. Микротвердость поверхности образца № 1 составляла среднее значение 4,8 ГПа, образца № 2 – 6,1 ГПа, образца № 3 – 6,8 ГПа при микротвердости контрольного (не обработанного) стального образца 1,8 ГПа.

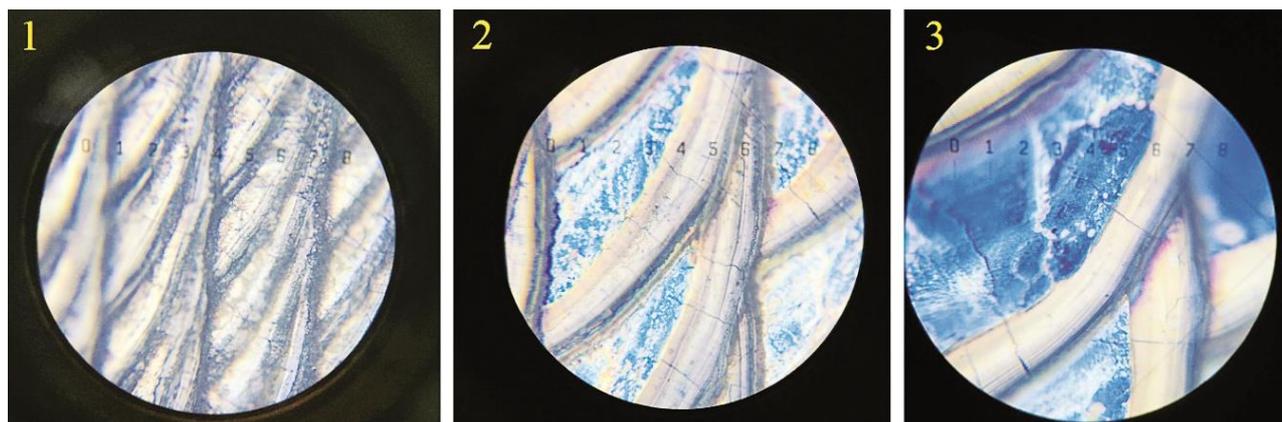


Рис. 1. Оптико-микроскопическое изображение поверхности наплавленных образцов ($\times 500$):
1 – образец № 1; 2 – образец № 2; 3 – образец № 3
(образцы обработаны при режимах, приведенных в табл. 5)

Измерение микротвердости в объеме наплавленного слоя на приготовленных поперечных микрошлифах показало, что ее значения сильно отличаются от микротвердости, измеренной на поверхности (рис. 2). Так, по мере индентирования от внутренней границы наплавленного слоя к внешней микротвердость возрастала с достижением 6,8 ГПа для образца №1, 8,9 ГПа для образца №2 и 10,3 ГПа для образца № 3. Таким образом, микротвердость наплавленного порошка сплава ВТ6 существенно различа-

ется в зависимости от вида структуры (поверхностной, объемной) и при оценке показателей механической прочности следует учитывать такое экспериментально установленное различие. Причиной обнаруженного эффекта является более однородная, сплошная структура слоя в своем объеме с наличием весьма малого количества различных микродефектов и пор, которые отчетливо визуализируются и в большей степени проявляются на поверхности (рис. 1, 2).

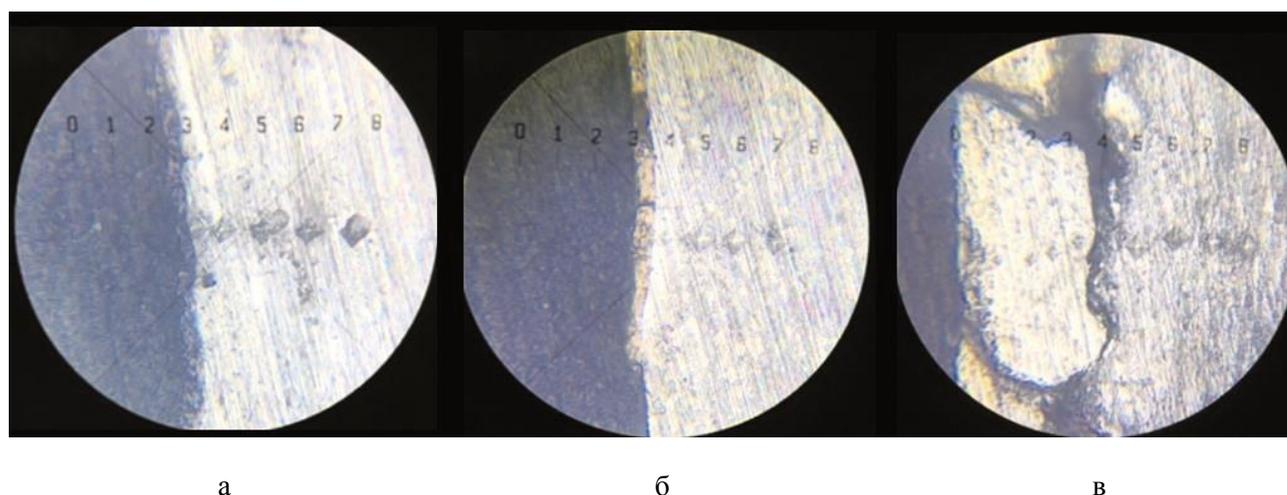


Рис. 2. Поперечные микрошлифы наплавленных образцов с участками индентирования алмазной четырехгранной пирамидкой:
а – образец № 1; б – образец № 2; в – образец № 3

В результате лазерной импульсной наплавки порошка титанового сплава ВТ6 на нержавеющую хромоникелевую сталь

08X18H10T и в ходе исследования основных физико-механических характеристик получаемого функционального слоя уста-

новлено, что при напряжении на лампе накачки 325 В, мощности излучения 0,42 Вт, длительности импульсов 1 мс, частоте 10 Гц, диаметре пятна фокусировки 1 мм, шаге следования импульсов 0,1 мм, фокусном расстоянии 98 мм и количестве проходов 3 и 7 создается упрочненная структура с наиболее благоприятным сочетанием шероховатости поверхности, морфологии, фазового состава и микротвердости. Наплавка порошка при повышенном числе проходов (12) приводит к росту степени шероховатости и структурной гетерогенности, что может проявлять пониженную сопротивляемость поверхности механическому износу и различным видам разрушений.

Исследованный процесс и анализ характеристик наплавленного присадочного материала позволили выявить эффект упрочнения стальной поверхности, являющийся следствием термического преобразования титана в диоксид TiO_2 с кристаллографическими модификациями рутила и анатаза, обладающими повышенной твердостью, коррозионной стойкостью и механической прочностью. Рассматриваемая обработка поверхности путем многопроходной лазерной порошковой наплавки относится к тонкослойным технологиям модифицирования и может применяться для упрочнения и повышения коррозионной защиты деталей из нержавеющей хромоникелевых сплавов широкой номенклатуры.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Солнцев В.А., Веселов Ю.П., Деменцова В.П. Металловедение и технология металлов: учебник. Москва: Металлургия, 2011. 512 с.

2. Крылова С.Е. Влияние технологических параметров газопорошковой лазерной наплавки на структурные характеристики восстановленного поверхностного слоя коррозионно-стойких сталей // Металловедение и термическая обработка металлов. 2017. № 10 (748). С. 35-40.

3. Веденов А.А., Гладуш Г.Г. Физические процессы при лазерной обработке материалов. Москва: Энергоатомиздат, 2015. 208 с.

4. Влияние карбида бора на свойства наплавленного металла на основе дисперсионно-твердеющей хромоникелевой стали / Е.Н. Еремин, А.С. Лосев, А.Е. Маталосова и др. // Омский научный вестник. 2017. № 4 (154). С. 21-24.

5. Родионов И.В. Физико-химические и механические свойства функциональных термооксидных покрытий на медицинских имплантатах из нержавеющей стали // Физика и химия обработки материалов. 2012. № 4. С. 45-52.

6. Родионов И.В. Термооксидные покрытия остеофиксаторов из стали 12Х18Н9Т, полученные воздушно-термическим оксидированием // Инженерная физика. 2008. № 6. С. 56-64.

7. Патент РФ на изобретение № 2332239. Способ получения биосовместимого покрытия на остеофиксаторах из титана / Родионов И.В., Бутовский К.Г., Бейдик О.В., Ткачева А.В. Опубл. 27.08.2008.

8. Проскураков В.И., Родионов И.В. Изменение характеристик поверхности стали 12Х18Н10Т при лазерном модифицировании в слое графитовой пасты, содержащей наночастицы диоксида титана // Письма в ЖТФ. 2021. Т. 47. Вып. 10. С. 50-54.

9. Проскураков В.И., Родионов И.В. Исследование изменения износостойкости поверхности нержавеющей стали, полученной лазерным импульсным легированием в слое обмазки // Известия Волгоградского государственного технического университета. Сер. Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении. 2021. № 6 (253). С. 61-65.

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

Устинов Павел Николаевич – аспирант кафедры «Сварка и металлургия» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

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

Куц Любовь Евгеньевна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Сварка и металлургия» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

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

Pavel N. Ustinov – Postgraduate student, Department of Welding and Metallurgy, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

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

Lyubov E. Kuts – PhD (Technical Sciences), Associate Professor, Department of Welding and Metallurgy, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 24.10.23, принята к опубликованию 28.11.23

УДК 621.785.53

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИНДУКЦИОННОГО АЗОТИРОВАНИЯ СТАЛЬНЫХ ИНСТРУМЕНТОВ

П.А. Палканов, В.А. Кошуро, А.А. Фомин

NUMERICAL SIMULATION AND EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF INDUCTION NITRIDING OF STEEL TOOLS

P.A. Palkanov, V.A. Koshuro, A.A. Fomin

В данной работе приведены результаты численного моделирования индукционного нагрева инструментов из быстрорежущей инструментальной стали марки P6M5 при химико-термической обработке (азотировании). Получены экспериментальные данные по процессу азотирования инструментов различной геометрии (сверло $D = 8$ мм и вытяжной пуансон $D = 14$ мм). Путем моделирования методом конечных элементов были рассчитаны температурные поля в системе «индуктор-камера-инструмент» в зависимости от тока индуктора и длительности процесса. Модели учитывали конструктивные особенности инструментов, расположение в активной области индуктора и необходимый диапазон термообработки внутри герметичной камеры в азотосодержащей среде. При решении краевых задач электродинамики и нестационарной теплопередачи было установлено влияние рабочего тока установки в диапазоне 300-360 А на поверхностную температуру изделий в течение 600 с обработки. Установлено, что при заданных электротехнологических параметрах индукционного нагрева согласно моделированию температура инструментов достигает 900-1100 °С, а при обработке в ходе эксперимента 950-1000 °С. Также в ходе проведения процесса обработки инструментов на их поверхности наблюдалось формирование упрочненных слоев с твердостью 14-16 ГПа.

This paper presents the results of numerical simulation of induction heating of tools made of P6M5 high-speed steel during the chemical and thermal treatment (nitriding). The experimental data on the nitriding process of tools of various geometries (drill $D = 8$ mm and exhaust punch $D = 14$ mm) were obtained. The temperature fields in the inductor-chamber-instrument system were calculated using the finite element modeling depending on the inductor current and duration of the process. The models take into account the design features of the instruments, location in the active region of the inductor and the required range of thermal treatment inside a sealed chamber in the nitrogen-containing medium. When solving the boundary-value problems of electrodynamics and non-stationary heat transfer, effect of the operating current of installation in the range of 300-360 A on the product-surface temperature in the course of 600 s of the processing is established. It has been found that according to the simulation procedure, at the specified electrotechnological parameters of induction heating the temperature of the tools reaches 900-1100 °C, while in the course of processing, it reaches 950-1000 °C. Also, when processing of tools, formation of hardened layers with the hardness of 14-16 GPa is observed on their surface.

Ключевые слова: *быстрорежущая сталь, индукционный нагрев, азотирование, моделирование, динамика нагрева.*

Металлические материалы, используемые в различных отраслях промышленности, часто подвергаются воздействию агрессивных сред, что требует улучшения их свойств, таких как коррозионная стойкость, жаропрочность и износостойкость. Одним из способов улучшения этих характеристик является применение химико-термической обработки (ХТО), в том числе азотирования. Данный процесс ХТО классифицируется относительно применяемой рабочей среды на следующие виды: ионно-плазменное, жидкое и газовое [1, 2].

Для упрочнения различных инструментов часто применяется метод ионно-плазменного азотирования в вакууме при температуре подложки 300-600 °С [3]. Устройство для данного вида обработки представляет собой вакуумную камеру с катодом и анодом, в которую подается смесь рабочих газов (N_2/H_2 , N_2/Ar). В качестве анода используются распыляемая мишень, а роль катода выполняет металлическая подложка, на которую наносится покрытие. На заземленный анод подается отрицательный потенциал (2-3 кВ), достаточный для возникновения тлеющего разряда и интенсивной бомбардировки мишени положительными ионами. Выбиваемые атомы мишени попадают на подложку и осаждаются на ней. В результате ионно-плазменной обработки формируются покрытия толщиной до 20 мкм с поверхностной микротвердостью около 14 ГПа [4].

Процесс жидкого азотирования обычно осуществляется с помощью шахтных печей в специальных солевых ваннах при температуре 450-650 °С в течение 3-10 часов [5]. В качестве рабочей среды используются расплавленные цианистые соли (KCN, KNCO и др.). В результате обработки на поверхности изделий образуется упрочненный слой толщиной от 5 до 20 мкм и твердостью до 6-11 ГПа [6].

Газовое азотирование сталей обычно проводят в вакуумных ретортных печах в диапа-

Keywords: *high-speed steel, induction heating, nitriding, modeling, heating dynamics*

зоне температур 500-580 °С в среде аммиака или аммиака и водорода (1:1) с длительностью процесса 5-30 ч [7]. В результате обработки получается упрочненный диффузионный слой толщиной 150±50 мкм и микротвердостью 9-11 ГПа [8].

Несмотря на приобретаемые изделием повышенные эксплуатационные свойства, данные методы обладают рядом недостатков: сложность подготовки поверхности изделий для обработки; низкой степенью загрузки объема рабочей камеры; относительно высокой стоимостью оборудования; токсичностью и высокой стоимостью реакционных сред (цианистых солей); низкой производительностью процесса [9]. Данные факторы приводят к разработке более эффективных технологий, обеспечивающих повышение скорости процесса азотирования и снижение себестоимости. На сегодняшний день интенсификация процессов ХТО проводится за счет повышения рабочей температуры изделий, активности насыщающей рабочей среды, наложения электрофизических воздействий и т. д. [10, 11].

Примером повышения эффективности является метод лазерного азотирования, включающей плавление металлической поверхности обрабатываемого изделия в среде газообразного азота с последующим формированием нитридного слоя. Локальный нагрев подложки, выше точки плавления металла, происходит за счет воздействия излучения мощностью от 0,5 до 3 кВт и длительностью импульса от 0,5 до 9,0 мс [12]. В результате лазерного азотирования формируется упрочненный слой глубиной от 10 до 150 мкм и твердостью от 9 до 13 ГПа [13]. Основными недостатками данного метода являются высокая вероятность появления микротрещин на поверхности обрабатываемых изделий и ухудшение шероховатости после проведения процесса, следовательно, возникает необходимость дополнительной механической доработки поверхности [14].

Ранее был разработан метод высокотемпературного азотирования с помощью индукционного нагрева изделия в газовой среде. В этом процессе упрочняемый дискообразный образец ($D = 10$ мм, $h = 5$ мм) посредством оснастки размещался в специально разработанной герметичной камере, которая заполнялась газообразным азотом. Было установлено, что в результате обработки быстрорежущей стали марки Р6М5 в течение 10 минут формируется упрочненный диффузионный слой (глубиной до $150 \div 20$ мкм и твердостью 19-21 ГПа), состоящий из соединения азота [15, 16].

Известно, что эффективность процесса индукционного нагрева, а именно его динамика, зависит от геометрических параметров индуктора и изделий, электро- и теплофизических свойств материалов, процессов фазовых превращений и т. д. С помощью аналитических методов моделирования достаточно сложно исследовать распределенные процессы тепловыделения и теплопередачи в сложнопрофильных элементах. Благодаря численному моделированию можно воспроизвести процесс индукционной термообработки в условиях, приближенных к натурному эксперименту. Например, в работе [17] был смоделирован процесс индукционной закалки шарикового винта для оптимизации процесса термообработки. Результаты показали, что однородный упрочненный слой получается за счет оптимизации процесса, основанного на совместном электромагнитно-термическом воздействии. Также благодаря численному моделированию авторами [18] была определена динамика и равномерность нагрева стальных цилиндрических изделий в системе «индуктор – камера – образец», способствующих установлению особенностей формирования нитридных и диффузионных слоев при индукционной ХТО изделий в среде азота.

Технологические параметры высокотемпературной обработки сложнопрофильных изделий, а именно динамика нагрева, могут отличаться от параметров нагрева образцов простой формы (цилиндра или диска). Исходя из этого, существует необ-

ходимость адаптировать ранее разработанные технологические рекомендации по упрочнению стальных дисков для реальных инструментов с учетом объемной и массовой заполняемости индуктора. Таким образом, цель данной работы заключается в определении динамики и равномерности нагрева стальных изделий сложной формы в специально разработанной камере для индукционной химико-термической обработки (ИХТО) с помощью численного моделирования и последующего экспериментального подтверждения.

Методология построения системы «индуктор-камера-инструмент» для численного моделирования процесса ИХТО

Численное моделирование процесса нагрева элементов системы «индуктор – камера – инструмент» проводилось с применением программного пакета «Elcut». Процесс моделирования заключался в решении задач переменного магнитного поля, позволяющей получить картины распределения плотности тока и объемной плотности тепловыделения в приведенной системе, и нестационарной теплопередачи, позволяющей определить картины распределения температурных полей и кинетические зависимости температуры нагрева в характерных точках системы.

Для моделирования были построены упрощенные геометрические модели систем, включающие блоки: воздух (1), азот (2), инструмент (3), кварц (4), вода (5), медь (6) (рис. 1). Стальные изделия располагались в кварцевой камере, а именно в центральной части активной области индуктора. В данном исследовании рассматривались два типа инструмента: вытяжной пуансон ($D = 14$ мм и $h = 80$ мм) (рис. 1 а, б) и цилиндрическое спиральное сверло ($D = 8$ мм и $h = 115$ мм) (рис. 1 в, г).

Модель спирального индуктора в рассматриваемой системе имела три витка; внешний диаметр медной трубки 6,5 мм; толщина стенки 0,5 мм; внутренний диаметр индуктора 32 мм и высота 27 мм. Также в активной области индуктора рас-

полагалась кварцевая камера трубчатого типа, выполняющая роль теплостойкого и электроизоляционного материала. Ее внутренний диаметр превышает диаметр изделий и составляет 26 мм при толщине стенки 2 мм и длине 250 мм.

Далее в геометрической модели строилась сетка конечных элементов (рис. 1 б, г). Для корректности также учитывались процессы, происходящие на границах системы и всей расчетной области.

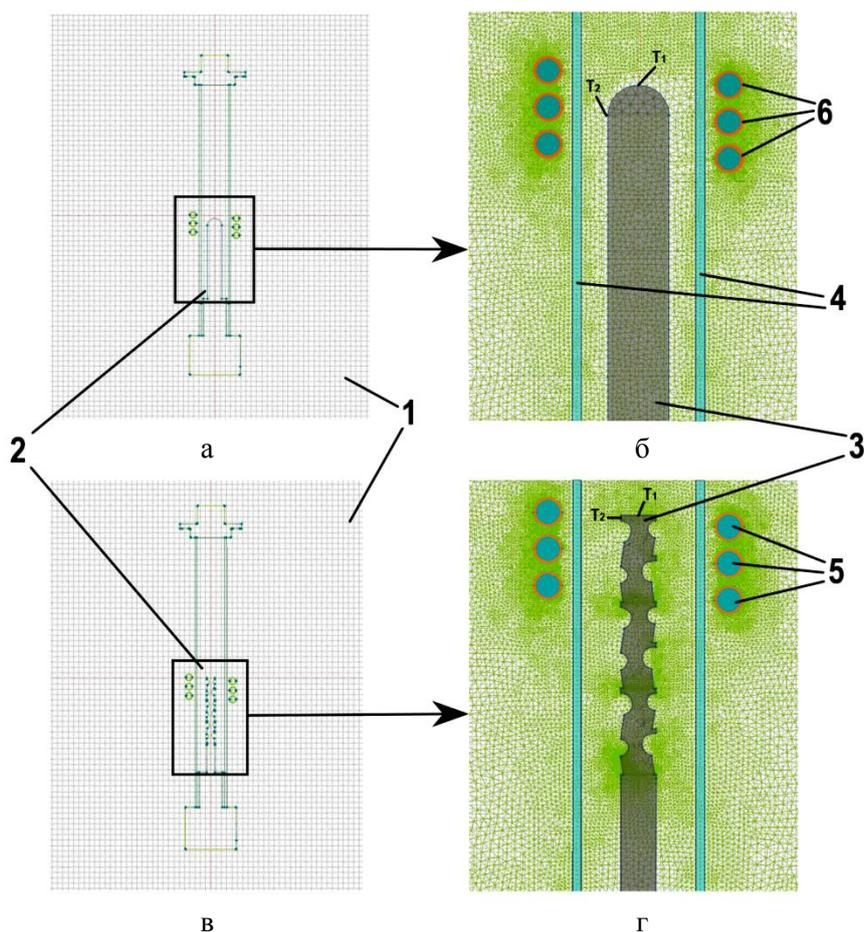


Рис. 1. 2D модель с сеткой конечных элементов (а, в) и увеличенным фрагментом (б, г) (плоскости с адаптивным алгоритмом триангуляции): 1 – окружающая атмосфера (воздух); 2 – рабочая среда (азот); 3 – инструмент (сталь Р6М5); 4 – кварцевая трубка (камера); 5 – внутренняя полость медной трубки индуктора для водяного охлаждения; 6 – индуктор; T_1 и T_2 – точки (области) контроля температуры

Для решения задач переменного магнитного поля и нестационарной теплопередачи задавались режимы обработки, исходя из геометрических размеров обрабатываемых изделий и заполняемости индуктора, а также необходимой рабочей температуры поверхности инструмента свыше $900\text{ }^{\circ}\text{C}$. Так рабочий ток установки (I_0) был выбран в диапазоне 300-360 А, что соответствует 1:16 величины тока индуктора ($I_{\text{инд}}$), а также частота тока 63-67 кГц и длительность моделирования (нагрева) 600 с.

Далее для блоков моделей задавались электрофизические (табл. 1) и теплофизические (табл. 2) параметры. Так как в исследуемой системе рассматривались инструменты из стали марки Р6М5, соответствующие параметры для блока «сталь» были идентичными.

В задаче нестационарной теплопередачи учитывалось, что коэффициент теплопроводности и удельная теплоемкость зависят от температуры. Для стальных инструментов также задавались характеристики граничных

процессов (значения коэффициентов конвективного и лучистого теплообмена):

1. Коэффициент теплоотдачи при конвективном теплообмене α_{CONV}

$$F_N = \alpha_{CONV} \times (T - T_0), \quad (1)$$

где T и T_0 – температура среды в конечный и начальный момент времени, К.

2. Коэффициент теплоотдачи при излучении β

$$F_N = \beta \times k_{SB} \times (T^4 - T_0^4), \quad (2)$$

где k_{SB} – константа Стефана – Больцмана ($5,67032 \cdot 10^{-8}$ Вт/м²·К⁴); T и T_0 – температура среды в конечный и начальный момент времени, К.

Тепловые потери в системе «индуктор – камера – инструмент», задавались посредством коэффициента теплоотдачи α_{CONV} на границах элементов модели (табл. 3).

Таблица 1 – Значения коэффициентов для электрофизических параметров блоков в системе «индуктор – камера – инструмент»

Номер позиции	Материал	Относительная магнитная проницаемость μ , Гн/м	Коэффициент электропроводности σ , См/м
1	Воздух	1	0
2	Азот	1	0
3	Сталь	100	$7,69 \times 10^6$
4	Кварц	1	0
5	Вода	0,99	0
6	Медь	1	56×10^6

Примечание: 4 – кварцевое стекло; 5 – дистиллированная вода (электрические потери в охладителе не учитываются); 6 – электротехническая медь, из которой изготавливается индуктор.

Таблица 2 – Значения коэффициентов для теплофизических параметров блоков в системе «индуктор – камера – инструмент»

Номер позиции	Материал	Коэффициент теплопроводности λ , Вт/К·м	Удельная теплоемкость C , Дж/кг·К	Плотность материала ρ , кг/м ³	Коэффициент излучения β
1	Воздух	0,03	1005	1,16	–
2	Азот	0,026	1039	1,25	–
3	Сталь	57,5	635	7870	0,2
4	Кварц	2	1052	2201	0,95
5	Вода	0,66	4178	996	–
6	Медь	400	390	8990	–

Примечание: для инструментальной стали приняты средние значения коэффициентов теплопроводности и удельной теплоемкости в рассматриваемом температурном интервале [19, 20].

Таблица 3 – Значения теплофизических параметров на границе блоков в системе «индуктор – камера – инструмент»

Наименование границы	Коэффициент теплоотдачи α_{CONV} , Вт/К·м ²
Кварцевая камера – воздух	300
Внутренняя часть кварцевой камеры – азот	100
Внутренняя полость индуктора – вода	12000
Внешняя поверхность индуктора – воздух	500
Нижняя опора камеры – инструмент – азот	850

Методология определения и математической обработки электротехнологических параметров процесса ИХТО, полученных в результате натурального эксперимента

В ходе эксперимента по индукционному азотированию инструментов, с использованием установки «ВЧ-15А», рабочий ток задавался в диапазоне 300-360 А, который был установлен в ходе численного моделирования системы «индуктор – камера – инструмент». Также было решено исследовать изменение электротехнологических параметров процесса ИХТО в зависимости от геометрических параметров инструментов (заполняемости индуктора). Измерение указанных электротехнологических характеристик производилось с помощью токовых клещей модели «UT 205» (UNI-T). Контроль температуры процесса производился калориметрическим методом (визуально через кварцевую камеру) согласно шкале цветов каления твердых нагретых тел.

Применение математической обработки полученных экспериментальных данных позволило построить графические зависимости температуры инструментов от технологических параметров процесса. Данные зависимости позволили прогнозировать динамику и равномерность нагрева изделий, соответственно и ряда получаемых свойств упрочненного слоя при изме-

нении технологических параметров процесса ИХТО, а именно тока индуктора и длительности обработки. В данной работе статистическая обработка и построение эмпирических моделей проводились с применением программы «Datafit 9».

Для построения регрессионных зависимостей, описывающих влияния технологических параметров на динамику нагрева изделий, были выбраны в качестве входных переменных: ток индуктора (x_1) и длительность процесса ИХТО (x_2). Выходным параметром принимали температуру изделий во временном интервале стационарной обработки (y_1).

Твердость упрочненных изделий оценивалась методом микроиндентирования (микротвердомер «Durascan-20») при нагрузке на индентор Виккерса равной 100 гс (0,98 Н) (ISO 6507-1-2007).

Решение задачи электродинамики и теплопроводности для системы «индуктор – камера – инструмент» при обработке токами высокой частоты

Для решения поставленной задачи рассматривались распределения плотности тока j (рис. 2) и тепловыделения Q (рис. 3) в системе «индуктор – камера – инструмент» в диапазоне рабочего тока установки $I_0 = 300-360$ А.

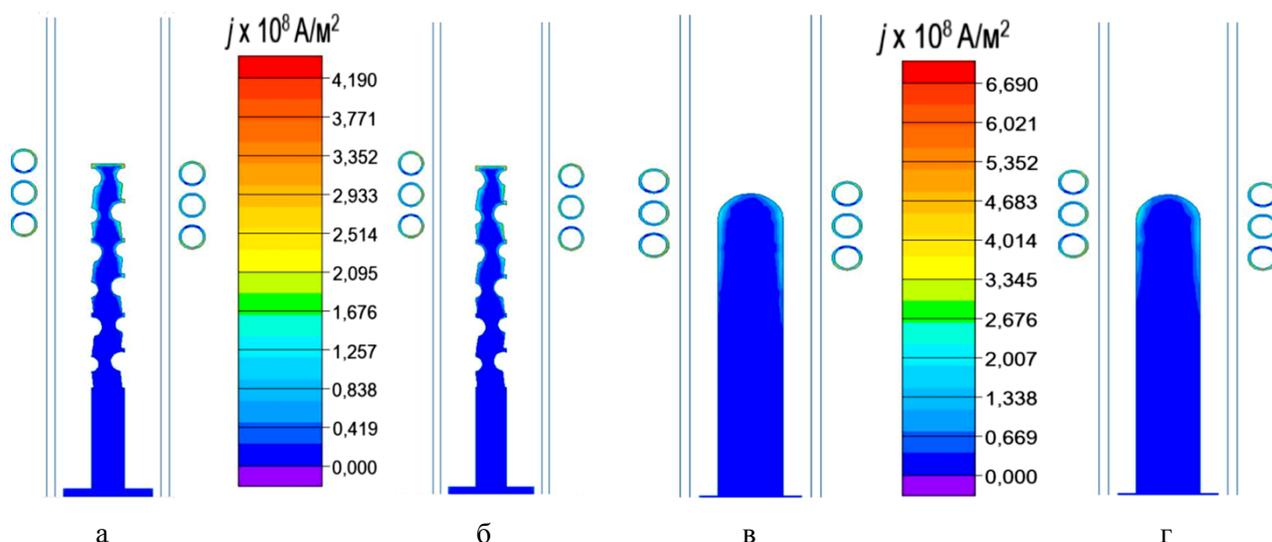


Рис. 2. Распределение плотности тока в системе «индуктор – камера – инструмент» (а, б – сверло; в, г – пуансон) в конечный момент времени при рабочем токе: а, в – 300 А; б, г – 360 А

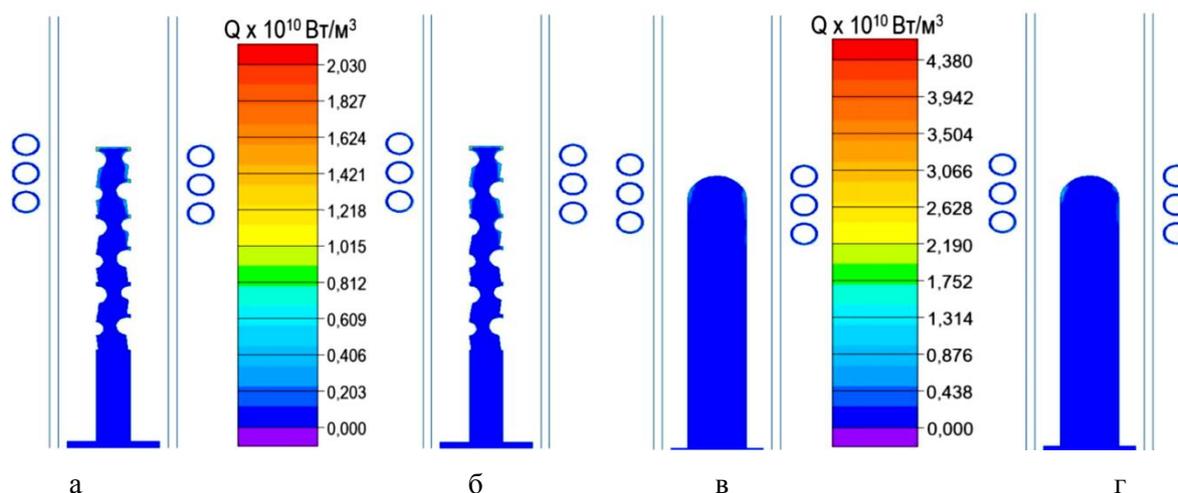


Рис. 3. Распределение плотности тепловыделения в системе «индуктор-камера-инструмент» (а, б – сверло; в, г – пуансон) в конечный момент времени при рабочем токе: а, в – 300 А; б, г – 360 А

Наибольшая плотность тока в камере наблюдается по поверхностному сечению инструментов, в особенности, где изделия находятся в области трехвиткового индуктора. Так значения плотности тока при нагреве сверла (рис. 2 а, б) находятся в диапазоне $(3,155-3,661) \cdot 10^8 \text{ А/м}^2$, а при обработке пуансона – $(2,369-2,965) \cdot 10^8 \text{ А/м}^2$ (рис. 2 в, г). В области контакта инструментов и нижней части камеры наблюдается равномерное распределение плотности тока $(0,407-0,487) \cdot 10^8 \text{ А/м}^2$ (рис. 2 а, б) и $(0,775-0,841) \cdot 10^8 \text{ А/м}^2$ (рис. 2 в, г). Наблюдаемая неравномерность распределения плотности тока связана с расположением изделия относительно витков индуктора. Также во всех случаях нагрева сохранялась закономерность роста плотности тока на поверхности медного водоохлаждаемого индуктора: при обработке сверла $(3,206-3,735) \cdot 10^8 \text{ А/м}^2$ и пуансона $(5,144-5,726) \cdot 10^8 \text{ А/м}^2$.

Распределение плотности тепловыделения в обоих случаях соответствует центральной зоне камеры, в которой содержатся стальные инструменты (рис. 3). С ростом тока индуктора, тепловыделение на изделиях возрастало на всех режимах моделирования: для сверла (рис. 3 а, б) от $1,294 \cdot 10^{10} \text{ Вт/м}^3$ до $1,774 \cdot 10^{10} \text{ Вт/м}^3$ и для пуансона (рис. 3 в, г) от $0,897 \cdot 10^{10} \text{ Вт/м}^3$ до $1,257 \cdot 10^{10} \text{ Вт/м}^3$. По краям инструментов наблюдалось увеличение тепловыделения, что связано с краевым эффектом.

Важным параметром, устанавливаемым при решении задачи теплопроводности, является также продолжительность численного эксперимента. Она соответствовала длительности натурального эксперимента и составляла 600 с. Решение задачи нестационарной теплопередачи позволило не только визуализировать температурные поля (рис. 4), но и построить кривые нагрева стального инструмента в характерных точках (рис. 5). Кинетику нагрева изделий было решено построить до 300 с, поскольку в течение 70-80 с происходит равномерный нагрев, а дальнейшее протекание процесса характеризовалось стационарной температурой. Полученные модели распределения температур характеризуются повышенной температурой в области инструмента.

Температура в центральной части изделий (T_1) при наименьшем рабочем токе установки $I_0 = 300 \text{ А}$ составляла 880-910 °С, которая достигалась за 70-80 с. С увеличением рабочего тока на каждые 20 А температура обработки инструментов увеличивалась на 20-30 °С. В результате при максимальном токе $I_0 = 360 \text{ А}$ температура составляла 950-1000 °С. По краям инструментов при наименьшем токе $I_0 = 300 \text{ А}$ температура достигала 970-1000 °С, при увеличении тока до 360 А температура возросла до 1050-1100 °С. Разница температуры между точками T_1 и T_2 связана с разными геометрическими параметрами изделий.

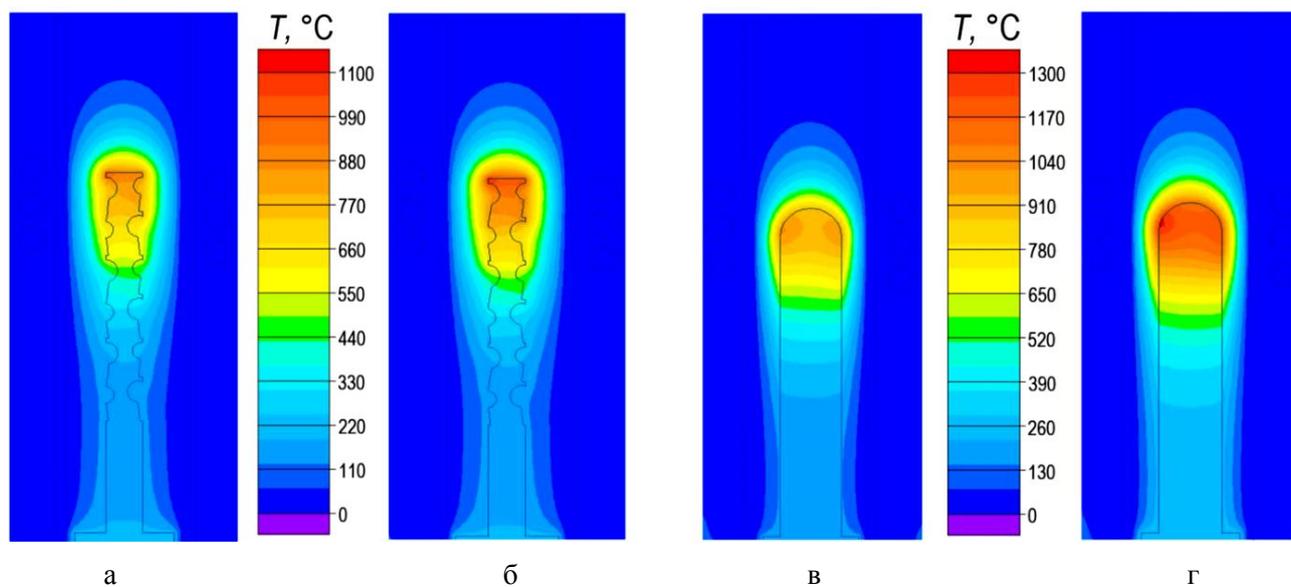


Рис. 4. Модель распределения температуры в системе «индуктор-камера-инструмент» (а, б – сверло; в, г – пуансон) в конечный момент времени при рабочем токе: а, в – 300 А; б, г – 360 А

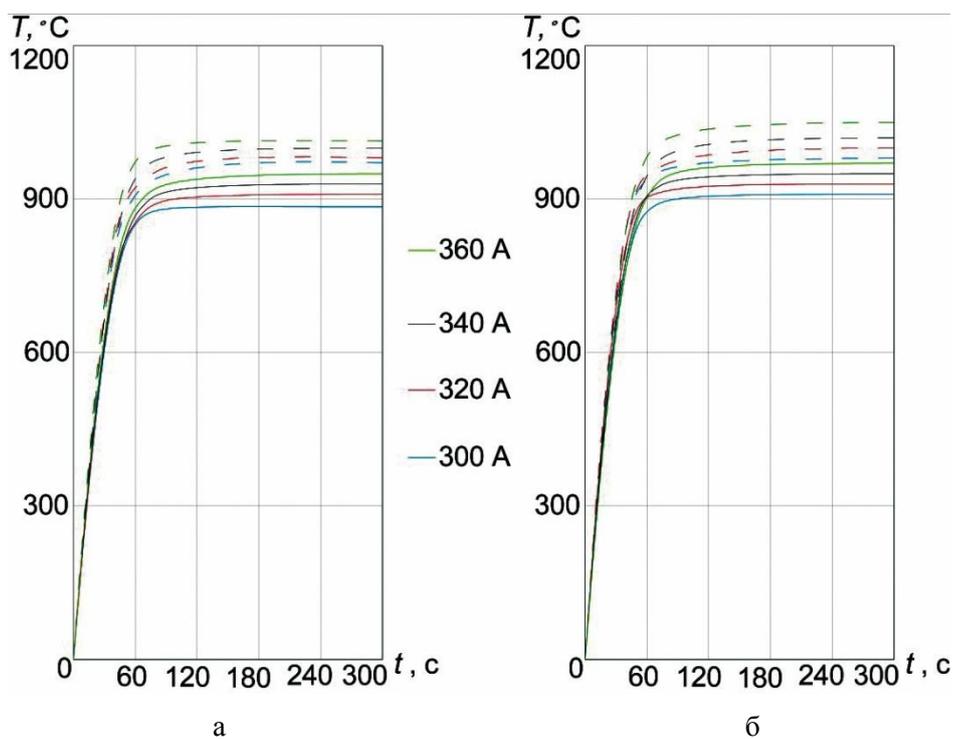


Рис. 5. График кинетики нагрева поверхности стальных инструментов в точке T_1 и T_2 (пунктирная линия): а – сверло; б – пуансон

Таким образом, в результате численного моделирования процесса ИХТО было установлено, что выбранные параметры рабочего тока установки в диапазоне 300-360 А обеспечивают ускоренный нагрев изделий до температуры 900-1100 °С за 70-80 с.

Поскольку в численном моделировании процесса невозможно учитывать сопут-

ствующие процессы диффузии, химического взаимодействия с образованием новых соединений (нитридов, карбонитридов и т. д.), в реальном эксперименте глубина диффузионного слоя может не совпадать с градиентом температуры по сечению инструмента, также возможно отличие и в распределении тепла, поскольку на хими-

ческие реакции, протекающие внутри изделия, затрачивается тепло. Следовательно, полученные технологические параметры процесса ИХТО, полученные с помощью моделирования, необходимо подтвердить в ходе реального эксперимента.

Определение и математическая обработка электротехнологических параметров процесса ИХТО, полученных в результате реального эксперимента нагрева

Электрических параметры, установленные в результате измерений, в частности рабочего тока установки (I_0), тока индуктора ($I_{инд}$), потребляемой электрической мощности ($P_э$), частоты (f) и удельной мощности ($P_{уд.э}$), были представлены в графическом виде (рис. 6).

Прямопропорциональное изменение основного технологического параметра $I_{инд}$ соответствовало заданному диапазону изменения рабочего тока I_0 .

В результате измерений установлено, что скорость и равномерность высокотемпературного нагрева изделий для достижения рабочей температуры свыше 900-1100 °С изменялись в зависимости от следующих параметров:

- рабочий ток установки «ВЧ-15А» (I_0) задавался в диапазоне 300-360 А;
- частоты тока на индукторе f для сверла 64,2-65,5 кГц и для пуансона 65,3-67,0 кГц;
- ток индуктора $I_{инд}$ для нагрева сверла 2,36-2,70 кА и пуансона 3,6-4,0 кА до необходимой температуры;

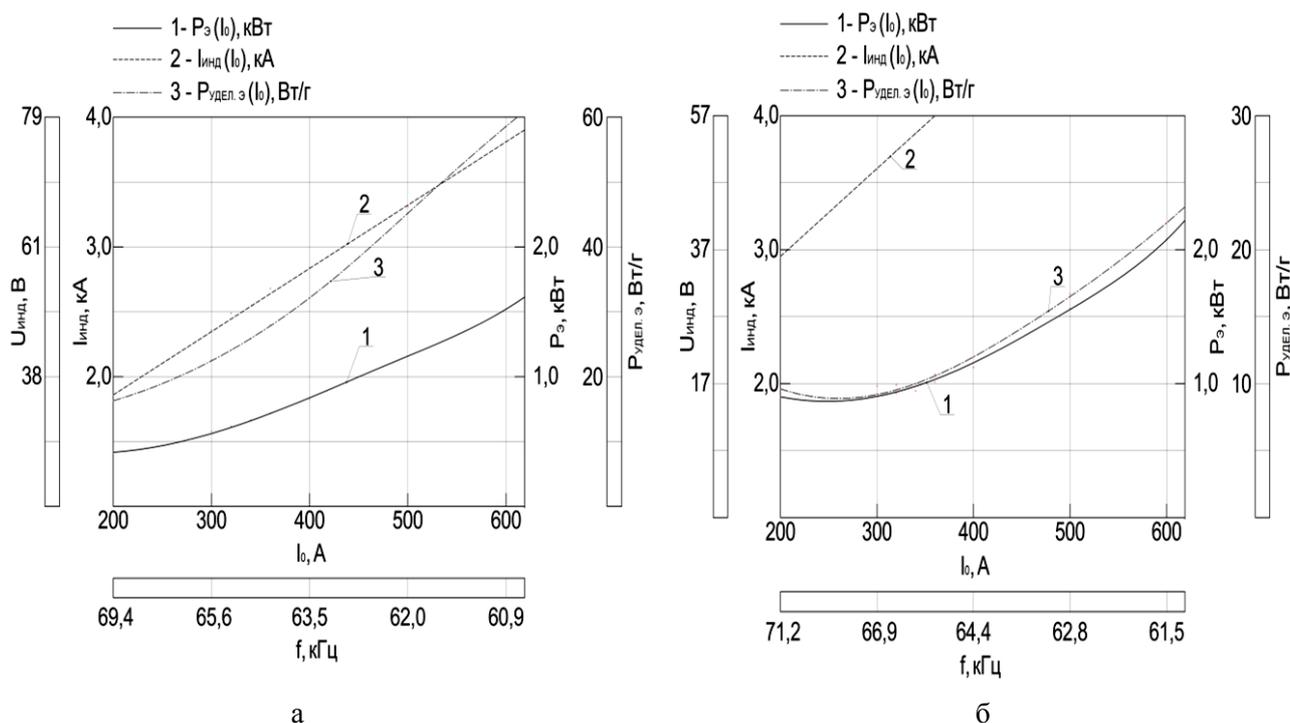


Рис. 6. Электротехнологические характеристики реального эксперимента нагрева инструмента в системе «индуктор – камера – инструмент»: а – для сверла; б – для пуансона

Аппроксимация экспериментальных данных, описывающих влияния технологических параметров на динамику нагрева инструментов $T(I_{инд}, t)$ от параметров тока индуктора $I_{инд}$ и длительности обработки t для изученных обработанных изделий была

представлена в полиномиальной форме для сверла (3) и для пуансона (4). Коэффициенты множественной детерминации (корреляции) R^2 данных моделей составили 0,97, что в полной мере удовлетворяет экспериментальным данным.

$$T_c = -42116,47 + 49843,59 \times I_{ИНД} + \frac{22443,31}{t} - 19228,04 \times I_{ИНД}^2 - \frac{95847,15}{t^2} - 15907,89 \times \frac{I_{ИНД}}{t} + 2473,96 \times I_{ИНД}^3 - \frac{220212,26}{t^3} + 46559,98 \times \frac{I_{ИНД}}{t^2} + 2646,11 \times \frac{I_{ИНД}^2}{t^2}. \quad (3)$$

В графическом виде регрессионная модель $T_{сверло}$ ($I_{ИНД}$, t) характеризовалась нали-

чием участков, соответствующих температуре 960-990 °С (рис. 7).

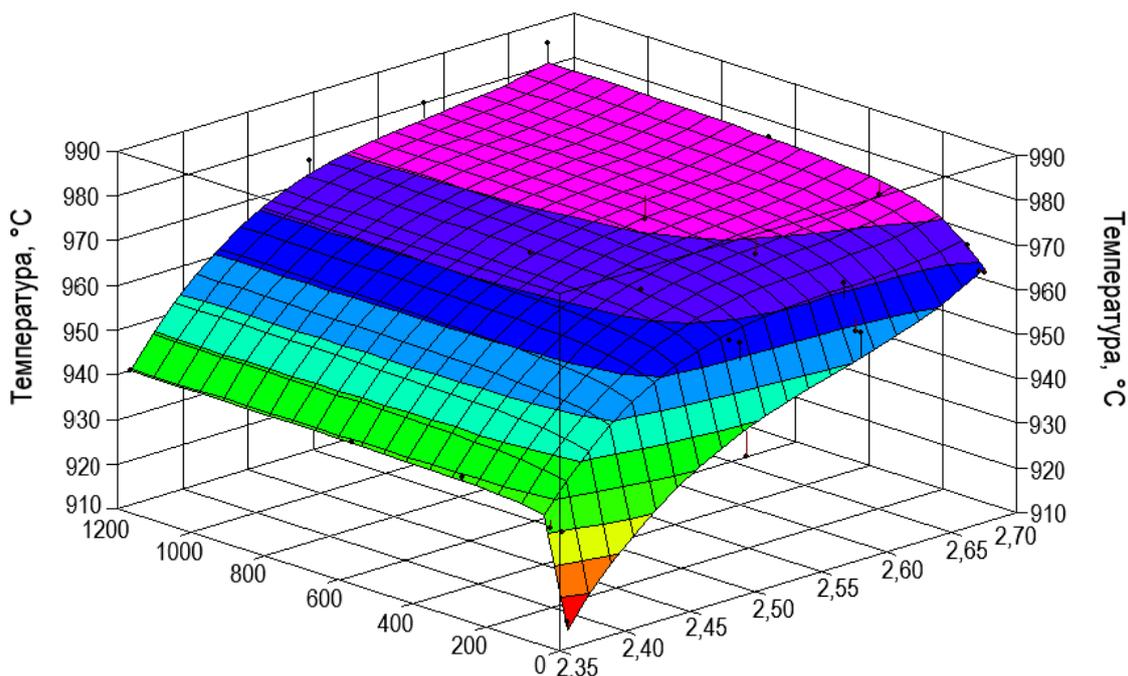


Рис. 7. Графическая зависимость $T_{сверло}$ ($I_{ИНД}$, t) при ИХТО сверла из стали Р6М5

Широкая область максимальной температуры поверхности обрабатываемого сверла достигалась при токе индуктора в диапазоне 2,55-2,70 кА. Температура изделия в данном диапазоне тока достигала 960-990 °С за 60 с, далее наблюдался равномерный прогрев до 1200 с. При минимальном токе индуктора $I_{ИНД} = 2,35$ кА нагрев инструмента до 940 °С происходил так же

в течение 60 с, соответственно разница температур характерных точек для сверла при выбранном диапазоне тока 2,35-2,7 кА составила ± 50 °С. Таким образом, можно утверждать, что за 60 с сечение изделия полностью прогревается и при последующей выдержке технологические параметры процесса уже не оказывают влияние на изменение температуры.

$$T_n = 3066,41 - \frac{14060,02}{I_{ИНД}} + \frac{2357,34}{t} + \frac{23242,58}{I_{ИНД}^2} + \frac{15442,36}{t^2} - \frac{24249,95}{I_{ИНД} \times t}. \quad (4)$$

В графическом виде регрессионная модель $T_{туансон}$ ($I_{ИНД}$, t) характеризовалась

наличием участков, соответствующих температуре 970-1000 °С (рис. 8).

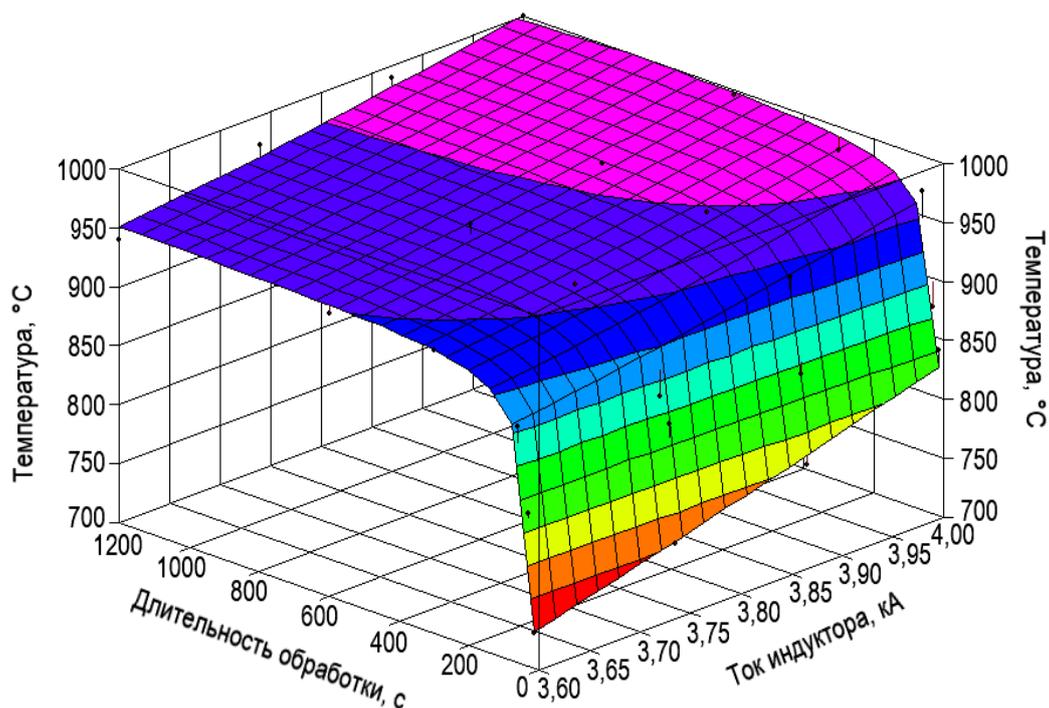


Рис. 8. Графическая зависимость $T_{\text{пуансон}}(I_{\text{инд}}, t)$ при ИХТО сверла из стали Р6М5

В течение 60 с при выбранных режимах $I_{\text{инд}} = 3,85\text{--}4,00$ кА изделие прогревается до $900\text{--}950 \pm 50$ °С с последующим плавным повышением температуры. Максимальный диапазон температуры $950\text{--}1000$ °С достигается при токе индуктора $I_{\text{инд}} = 3,85\text{--}4,00$ кА за 80–100 с. Данное явление, вероятно, связано с геометрическими размерами пуансона. По сравнению с процессом нагрева сверла ($D = 8$ мм) сечение пуансона ($D = 14$ мм) не прогревается полностью за 60 с, равномерный нагрев происходит после 100 с процесса ИХТО.

Температура при высокотемпературной обработке оказывает влияние на фазовые переходы и диффузионные процессы внутри обрабатываемых изделий. Так для быстрорежущих сталей изменение типа кристаллической решетки из α -фазы (объемноцентрированная кубическая решетка) в γ -фазу (гранцентрированная кубическая решетка) происходит при температуре $600\text{--}800$ °С. Также в структуре металла содержатся вторичные карбиды, растворяющиеся в γ -фазе в широком интервале температур. Растворение карбидов определяется не только температурой процесса, но и их типом. При температуре $950\text{--}1000$ °С рас-

творяется карбид $M_{23}C_6$, что насыщает аустенит хромом, углеродом и частично ванадием, а также повышается твердость. Растворение основного карбида M_6C протекает при более высоком нагреве $1050\text{--}1300$ °С. Это позволяет перевести в аустенит до 6–7 вес.% W, дополнительно 0,5–0,8 вес.% Cr и некоторое количество V (около 1 вес.%), присутствующих в карбидной фазе [20].

Отличительной особенностью высокотемпературной обработки быстрорежущей стали является то, что при нагреве в среде азота происходит интенсивное насыщение приповерхностного слоя азотом. В результате чего происходит ускоренное образования нитридов на поверхности стали, замедляющих процесс диффузии, тем самым затрудняя насыщение α -фазы азотом. Известно, что фазовое превращение α - в γ -фазу происходит при пересыщении первой азотом [21]. Соответственно быстрый нагрев изделий приводит к смещению точки фазового перехода в область более высоких температур. Следовательно, при ИХТО применение повышенных температур приводит к увеличению термодинамического потенциала и коэффициента диффузии пе-

ресыщенной α -фазы, необходимых для фазового перехода.

Выделение твердых нитридных фаз на поверхности изделий подтверждается результатами измерения твердости. Так, при высокотемпературном азотировании рабочая поверхность инструментов из быстрорежущей стали Р6М5 характеризовалась высокой поверхностной твердостью около 14-16 ГПа.

Таким образом, с помощью моделирования и реального экспериментального исследования было установлено, что в процессе ИХТО стальной инструмент в системе «индуктор – камера с азотом – образец» прогревается до температуры 900-1000 °С за 60-100 с, тем самым позволяя получать равномерные упрочненные диффузионные слои, сопоставимые с механическими свой-

ствами изделий, обработанных традиционным методом печного азотирования в среде аммиака. Данный подход позволил показать эффективность применения индукционного нагрева в процессе ХТО за счет сокращения длительности азотирования малогабаритных изделий. Результаты моделирования подтверждаются реальными экспериментальными исследованиями, согласно которым при ИХТО при рабочем токе установки $I = 300-360$ А происходит быстрый нагрев стального инструмента с образованием упрочненной рабочей поверхности с твердостью около 14-16 ГПа. Установлено, что выбранные режимы и прогнозирование протекания процесса ИХТО по результатам моделирования имеют сходимость с экспериментальными данными.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Shen H., Wang L.** Influence of temperature and duration on the nitriding behavior of 40Cr low alloy steel in mixture of NH_3 and N_2 // *Surface and Coatings Technology*. 2019. Vol. 378. P. 124953.
2. Nitriding VI-group metals (Cr, Mo and W) in stream of NH_3 gas under concentrated solar irradiation in a solar furnace at PSA (Plataforma Solar de Almeria) / F. Oliveira, L. Rosa, J. Fernandes et al. // *Solar Energy*. 2015. Vol. 114. P. 51-60.
3. **Miyamoto J., Abraha P.** The effect of plasma nitriding treatment time on the tribological properties of the AISI H13 tool steel // *Surface and Coatings Technology*. 2019. Vol. 375. P. 15-21.
4. **Wang L., Li Y., Wu X.** Plasma nitriding of low alloy steels at floating and cathodic potentials // *Applied Surface Science*. 2008. Vol. 254. P. 6595-6600.
5. **Dai M., Li C., Hu J.** The enhancement effect and kinetics of rare earth assisted salt bath nitriding // *Journal of Alloys and Compounds*. 2016. Vol. 688. pp. 350-356.
6. **Ramesh R., Gnanamoorthy R.** Fretting wear behavior of liquid nitrated structural steel, En24 and bearing steel, En31 // *Journal of Materials Processing Technology*. 2006. Vol. 171. P. 61-67.
7. **Maldzinski L., Tacikowski J.** ZeroFlow gas nitriding of steels // *Thermochemical Surface Engineering of Steels: Improving Materials Performance*. Woodhead Publishing, 2015. P. 459-483.
8. **Akhtar S.S., Arif A.F.M., Yilbas B.S.** Gas Nitriding of H13 Tool Steel Used for Extrusion Dies: Numerical and Experimental Investigation // *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering: Comprehensive Materials Finishing*. 2017. Vol. 3. P. 158-177.
9. Equipment and processes of vacuum electron plasma surface engineering / V.N. Devyatkov, Yu.F. Ivanov, O.V. Krysina et al. // *Vacuum*. 2017. Vol. 143. P. 464-472.
10. **Pinder L.W., Dawson K., Tatlock G.J.** High Temperature Corrosion of Low Alloy Steels // *Shreir's Corrosion*. 2010. Vol. 1. P. 558-582.
11. **Зоткин В.Е.** Методология выбора материалов и упрочняющих технологий в машиностроении: учеб. пособие / 3-е изд., перераб. и доп. Москва: Высшая школа, 2004. 264 с.

12. Investigations on enhancing the surface mechanical and tribological properties of A356 Al alloy using pulsed laser-assisted nitriding / A.R. Kulkarni, A.K. Shukla, S.S.M. Prabu et al. // Applied Surface Science. 2021. Vol. 540. P. 148361.

13. Laser gas assisted treatment of AISI H12 tool steel and corrosion properties / B.S. Yilbas, Ihsan-ul-Haq Toor, J. Malik, F. Patel // Optics and Lasers in Engineering. 2014. Vol. 54. P. 8-13.

14. **Carpene E., Schaaf P.** Laser nitriding of iron and aluminum // Applied Surface Science. 2002. Vol. 186. P. 100-104.

15. **Палканов П.А., Кошуро В.А., Фомин А.А.** Влияние тока индуктора при азотировании стали Р6М5 на структуру и микротвердость диффузионного слоя // Вопросы электротехнологии. 2021. № 2. С. 5-12.

16. **Палканов П.А., Кошуро В.А., Фомин А.А.** Влияние технологических параметров индукционного азотирования инструментальной стали Р6М5 на микротвер-

дость и толщину диффузионного слоя // Вестник МЭИ. 2022. № 2. С. 95-104.

17. Numerical simulation and experimental investigation on the induction hardening of a ball screw / H. Li, L. He, K. Gai et al. // Materials & Design. 2015. Vol. 87. P. 863-876.

18. **Палканов П.А., Кошуро В.А., Фомин А.А.** Численное моделирование и экспериментальное исследование процесса индукционной химико-термической обработки быстрорежущей стали Р6М5 // Вестник МЭИ. 2022. № 6. С. 76-85.

19. Simulation and experimental study of induction heat treatment of titanium disks / A. Fomin, V. Koshuro, A. Shchelkunov et al. // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2021. Vol. 165. P. 120668.

20. **Алиферов А.И., Луци С.** Индукционный и электроконтактный нагрев металлов: учебник. Новосибирск: НГТУ, 2011. 409 с.

21. **Лахтин Ю.М., Коган Я.Д.** Азотирование стали: учебник. Москва: Машиностроение, 1976. 256 с.

Палканов Павел Алексеевич – аспирант кафедры «Электроэнергетика и электротехника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

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

Фомин Александр Александрович – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Материаловедение и биомедицинская инженерия» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Pavel A. Palkanov – Postgraduate, Department of Electrical Power and Electrical Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Vladimir A. Koshuro – PhD, Associate Professor, Department of Materials Science and Biomedical Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Aleksander A. Fomin – Dr. Sci. Tech., Head: Associate Professor, Department of Materials Science and Biomedical Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 02.11.23, принята к опубликованию 28.01.23

УДК 621.791.725

**ЛАЗЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В НАУКЕ И ПРОИЗВОДСТВЕ (ОБЗОР)
2. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ГЕНЕРАЦИИ
ИЗЛУЧЕНИЯ И ТИПЫ ЛАЗЕРОВ**

С.К. Сперанский, И.В. Родионов

**LASER TECHNOLOGY IN SCIENCE AND INDUSTRY
PART 2: PHYSICAL FEATURES OF RADIATION GENERATION
AND LASER TYPES**

S.K. Speransky, I.V. Rodionov

В статье раскрыты теоретические основы генерации лазерного излучения. Рассмотрены трехуровневая и четырехуровневая схемы генерации лазерного излучения. Описаны энергетические уровни широко применяемых в промышленности лазеров. В краткой форме изложены принципы работы лазеров и приведены конструкции их основных разновидностей: газовых, твердотельных, полупроводниковых, волоконных. Приведены различные схемы накачки лазеров.

Ключевые слова: электромагнитное излучение, инверсия, энергетические уровни, лазеры, система накачки

В машиностроении особое место занимает лазерная технология как группа процессов, использующих мощное излучение лазера для нагрева, плавления, испарения, сварки и резки материалов. Это направление начало развиваться с 60-х годов XX века, и в настоящее время лазер рассматривают как один из наиболее перспективных лучевых источников энергии.

Обычное световое излучение часто называют полихроматическим светом, так как оно состоит из целого ряда электромагнитных волн различной длины, лежащих в видимой области оптического диапазона спектра электромагнитного излучения (рис. 1) [1-4].

The article reveals theoretical foundations of laser radiation generation. Three-level and four-level laser radiation generation schemes are considered. The energy levels of lasers widely used for industrial purposes are described. Laser working principles are briefly described and designs of their main varieties are provided, including gas, solid-state, semiconductor, and fiber lasers. Various schemes for pumping the described lasers are presented.

Keywords: electromagnetic radiation, inversion, laser, energy levels, laser pumping

Полихроматическое излучение возникает в результате нагрева тел, когда возбуждаются составляющие их атомы и электроны.

Обычный полихроматический свет, излучаемый нагретыми телами, можно представить в виде набора большого числа гармонических электромагнитных волн с различными частотами и хаотично изменяющимися во времени фазами.

При распространении гармонической световой электромагнитной волны в пространстве создаются чередующиеся электрическое поле напряженностью E и магнитное поле напряженностью H , изменяющиеся в пространстве и во времени по гармоническому закону:

$$\begin{aligned} E &= E_0 \sin[2\pi(vt - x/\lambda) + \varphi]; \\ H &= H_0 \cos[2\pi(vt - x/\lambda) + \varphi], \end{aligned} \quad (1)$$

где E_0 и H_0 – амплитуды колебаний напряженностей E и H ; ν – частота колебаний; $\lambda = c/\nu$ – длина волны; c – скорость света в вакууме.

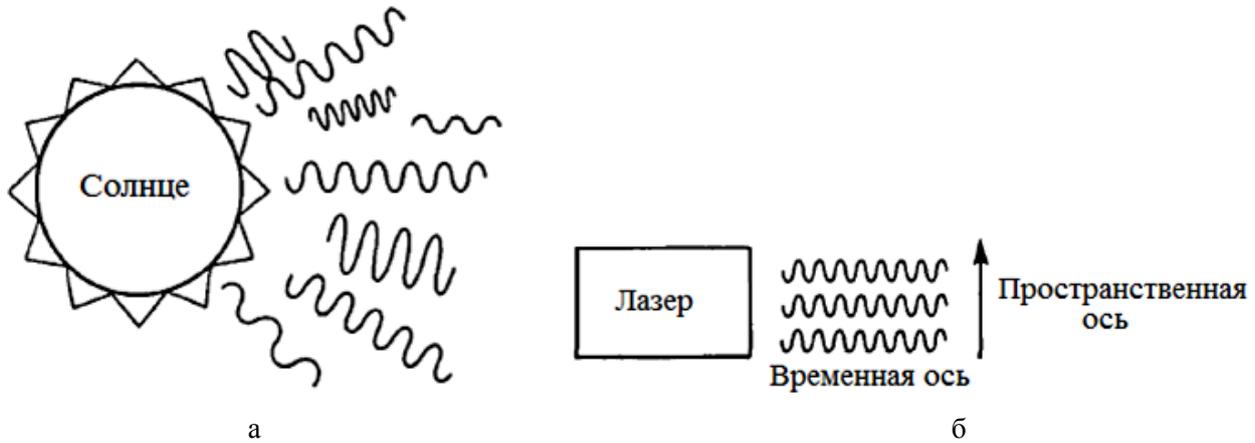


Рис. 1. Виды излучения: а – полихроматическое; б – монохроматическое

Если частота колебаний ν (и длина волны λ) не зависит от времени t , то волна называется монохроматической. Аргумент синуса (косинуса) в выражениях (1), называемый фазой колебаний гармонической волны, определяет состояние колебательного процесса в момент времени t в точке пространства x при распространении электромагнитной волны с начальной фазой φ . Согласованное протекание во времени нескольких колебательных или волновых процессов называется когерентностью. Если разность фаз колебаний двух электромагнитных волн постоянна или изменяется не хаотически, а упорядоченно, по определенному закону, то такие волны когерентны. Генерация когерентных радиоволн была осуществлена еще до появления лазеров, но генерировать когерентный свет стало возможным только после создания лазерных источников оптического излучения.

Атомы, молекулы и кристаллы представляют собой сложные микросистемы, состоящие из ядер и электронов. Энергия относительного движения частиц, составляющих атом или молекулу, в соответствии с современными физическими представлениями может принимать только строго определенные значения $\varepsilon_0, \varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_m, \varepsilon_n$, которые называют уровнями энергии. Си-

стема энергетических уровней составляет энергетический спектр атома: нижний уровень с минимальной энергией ε_0 называется основным, а остальные – возбужденными. Энергетический спектр атома зависит от его структуры, а число электронов, обладающих данной энергией, называется населенностью (населенностью) соответствующего энергетического уровня.

Если атому, находящемуся на основном уровне ε_0 , сообщить энергию, он может перейти на один из возбужденных уровней. Наоборот, возбужденный атом может самопроизвольно (спонтанно) перейти на один из нижерасположенных уровней, испустив при этом определенную порцию энергии в виде кванта света (фотона). Если излучение происходит при переходе атома с уровня энергии ε_n на уровень ε_m , то частота испускаемого (или поглощаемого) фотона описывается выражением

$$\nu_{nm} = \frac{\varepsilon_n - \varepsilon_m}{h}.$$

Именно такие спонтанные процессы излучения и происходят в нагретых телах. Нагрев переводит часть атомов в возбужденное состояние и при переходе в нижние состояния они излучают кванты света. Излучение разных атомов происходит незави-

симо друг от друга и носит вероятностный характер. Фотоны хаотически испускаются атомами в виде так называемых волновых цугов, которые не согласованы друг с другом во времени, имеют различную фазу и случайный характер направления распространения. Поэтому спонтанное излучение является некогерентным и ненаправленным.

Кроме спонтанного излучения возбужденного атома, существует вынужденное излучение, когда атомы начинают излучать энергию под действием внешнего электромагнитного поля. Явление вынужденного излучения дает возможность управлять излучением атомов с помощью электромагнитного поля и таким образом усиливать или генерировать когерентное световое излучение.

Для того чтобы это осуществить практически, необходимо выполнить следующие условия [5-12].

1. Необходимо обеспечить резонанс – совпадение частоты падающего света с одной из частот ν_{mn} энергетического спектра атома. При этом переход атома с уровня ε_n на уровень ε_m будет соответствовать переходу между аналогичными уровнями других таких же атомов, в результате чего будет осуществлена генерация когерентного излучения.

2. Наряду с вынужденным излучением света атомами, находящимися на верхнем уровне ε_n , происходит резонансное поглощение энергии атомами, находящимися на нижнем уровне. При этом атом поглощает световой квант и переходит на уровень ε_m , что препятствует генерации света. Для генерации когерентного света необходимо, чтобы число атомов на верхнем уровне ε_n было больше числа атомов на нижнем уровне ε_m (ε_n , ε_m – уровни, между которыми происходит переход). В естественных условиях на более высоком уровне при любой температуре всегда меньше частиц, чем на более низком. Для возбуждения когерентного излучения надо принять специальные меры, чтобы из двух выбранных уровней верхний был «заселен» больше, чем нижний. Такое состояние вещества в физике называется

активным или состоянием с инверсной (обращенной) населенностью (рис. 2). Для получения инверсии заселенности уровней используется некоторое вспомогательное излучение (накачка).

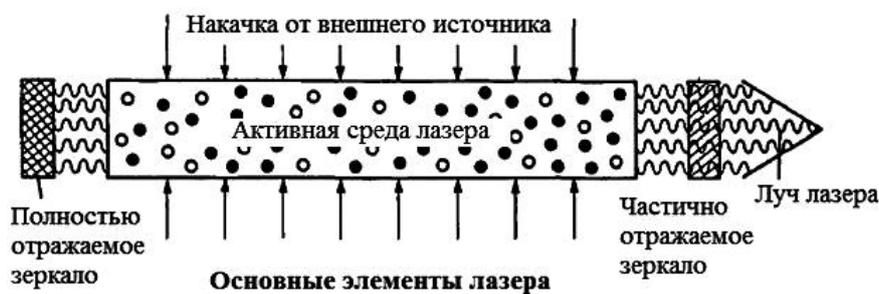
3. В процессе генерации излучения часть излучаемой световой энергии должна все время оставаться внутри рабочего вещества, вызывая вынужденное излучение все новых атомов, т. е. осуществляя обратную связь. Это обычно выполняется при помощи зеркал по схеме, представленной на рис. 3. Левое зеркало отражает всю падающую на него энергию, а правое зеркало является полупрозрачным. Часть энергии оно пропускает из рабочего пространства наружу (полезная энергия), а отраженная энергия служит для вовлечения в генерацию новых порций рабочего вещества.

4. Усиление, обеспечиваемое рабочим веществом, должно превышать некоторое пороговое значение, зависящее от коэффициента отражения полупрозрачного зеркала. Чем меньше этот коэффициент, тем больше должно быть пороговое усиление, обеспечиваемое рабочим веществом, иначе генерируемое рабочим веществом излучение затухнет.

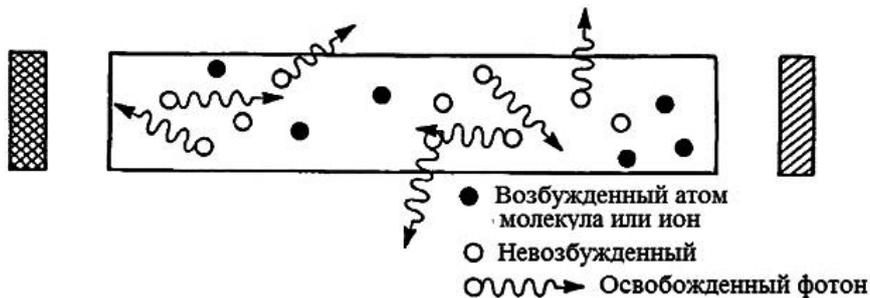
Наибольшее усиление будет испытывать излучение, идущее параллельно оси активного элемента, совпадающей с осью резонатора. Выходя через торцовые поверхности активного элемента, оно попадает на зеркала резонатора и возвращается ими полностью или частично (выходное зеркало) в активный элемент, где продолжается его усиление, т. е. резонатор обеспечивает в лазере положительную обратную связь. Излучение, распространяющееся в резонаторе, испытывает потери на поглощение и рассеяние в активном элементе и на пропускание в выходном зеркале. Величина потерь за период световых колебаний характеризует добротность резонатора. В резонаторе с высокой добротностью потери малы, и уже при низкой инверсии достигается порог генерации, при котором усиление компенсирует потери [13-20].



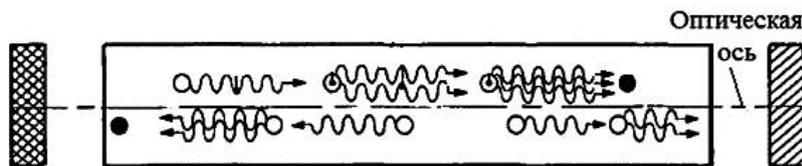
Рис. 2. Механизм создания инверсии



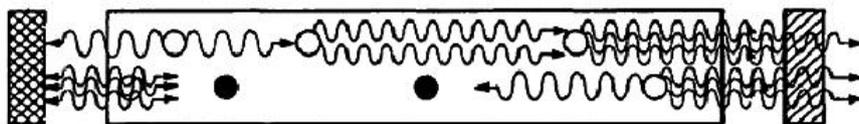
а



б



в



г

Рис. 3. Формирование когерентного излучения в лазерах: а – схема резонатора; б – движение атомов без накачки; в – процесс накачки; г – процесс генерации

В трехуровневом лазере (рис. 4) атомы быстро переводят или «накачивают» с основного уровня E_1 на другой уровень E_3 .

Если среда такова, что атом, возбужденный на уровень E_3 , быстро переходит на уровень E_2 , то в этой среде можно полу-

чить инверсию населенностей уровней E_2 и E_1 .

В четырехуровневом лазере (рис. 5) атомы также переводят с основного уровня на уровень E_3 . Если после этого атом быстро переходит на уровень E_2 (быстрая безызлучательная дезактивация), то можно и в этом случае получить инверсию населенностей уровней E_2 и E_1 .

Когда в таком четырехуровневом лазере начинается генерация, атомы за счет вынужденного излучения переходят с уровня E_2 на другой уровень E_1 . В этой схеме гораздо проще получить инверсию населенности, чем в трехуровневой. Так как уровень E_1 менее заселен, чем основной уровень E_0 , инверсия и излучение наступают раньше.

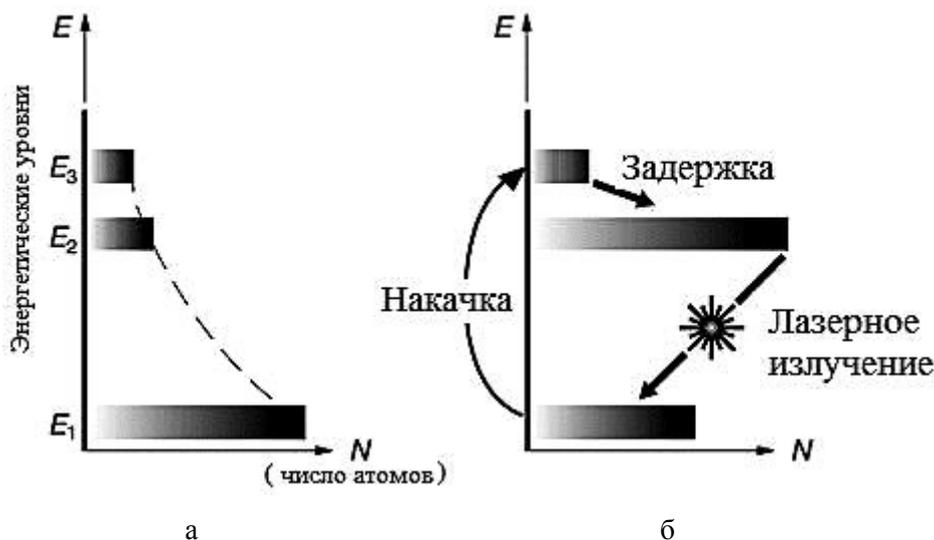


Рис. 4. Трехуровневая схема генерации излучения в лазерах:

а – исходное состояние энергетических уровней; б – состояние уровней в результате накачки [6]

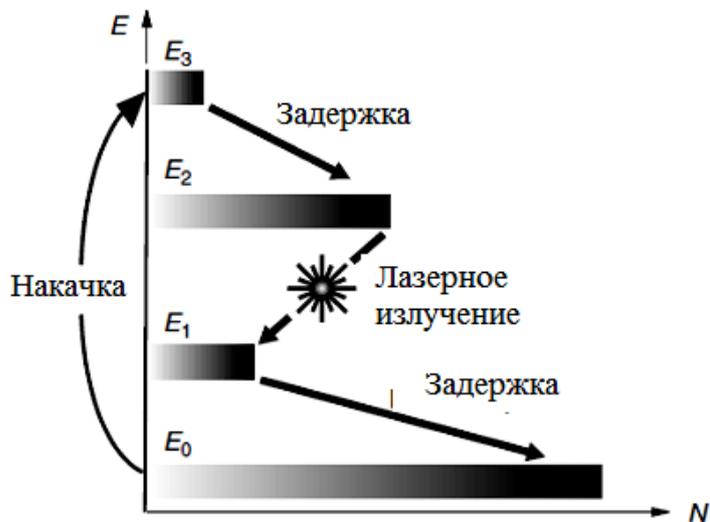


Рис. 5. Четырехуровневая схема генерации лазерного излучения [6]

Активная среда твердотельного рубинового лазера состоит из искусственного кристалла Al_2O_3 (корунда), в котором некоторые из ионов Al^{3+} замещены ионами Cr^{3+} (сапфир). Рубин имеет две главные

полосы накачки (рис. 6) – в зеленой и фиолетовой области, а генерация излучения происходит на красной длине волны в видимой области спектра ($\lambda = 0,6943$ мкм).

Неодимовые лазеры являются самыми популярными из твердотельных лазеров. Активной средой в этих лазерах является кристалл $Y_3Al_5O_{12}$ (обычно называют YAG, или алюмо-иттриевый гранат), в котором

часть ионов Y^{3+} замещена ионами Nd^{3+} . Две основные полосы накачки соответствуют длинам волн 0,730 и 0,800 мкм, а лазерная генерация происходит на длине волны $\lambda = 1,064$ мкм (рис. 7).

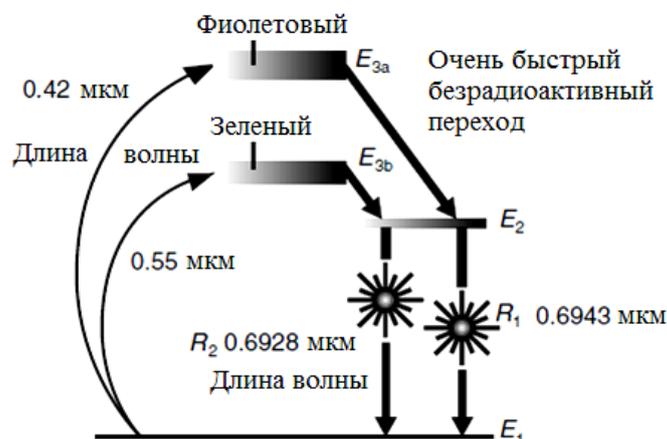


Рис. 6. Энергетические уровни рубинового лазера [6]

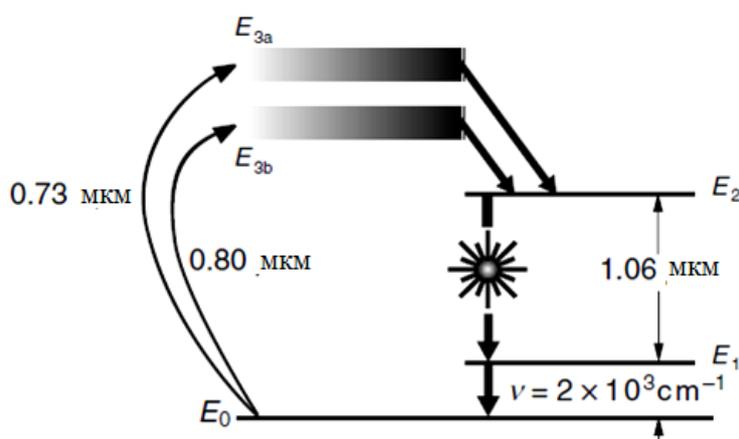


Рис. 7. Энергетические уровни неодимового лазера [6]

Гелий-неоновый лазер (He-Ne лазер) является наиболее значимым среди всех лазеров на инертных газах. Генерация здесь осуществляется на переходах атома неона, а гелий добавляется в газовую смесь для повышения эффективности накачки. Данный лазер излучает на многих длинах волн, из которых наиболее известна линия с $\lambda = 0,6328$ мкм (красная). Среди других линий – две в ИК-диапазоне с $\lambda = 1,15$ мкм и 3,39 мкм (рис. 8).

CO_2 лазер является одним из самых мощных (до 100 кВт) и одним из наиболее эффективных лазеров (КПД 15-20 %). В этом лазере в качестве активной среды используется специальная смесь газов CO_2 ,

N_2 и He. Генерация происходит на переходе между двумя колебательными уровнями молекулы CO_2 , а азот и гелий значительно повышают КПД лазера. Основными процессами, приводящими к возбуждению молекулы CO_2 на верхний лазерный уровень, является прямой электронный удар и резонансная передача энергии от молекулы N_2 . Добавление к смеси газа He способствует увеличению инверсии рабочих уровней. Кроме того, He, обладая высокой теплопроводностью, способствует лучшему охлаждению активной среды, препятствуя снижению инверсии. Генерация происходит на длине волны $\lambda = 10,6$ мкм, но можно получить генерацию и с $\lambda = 9,6$ мкм (рис. 9).

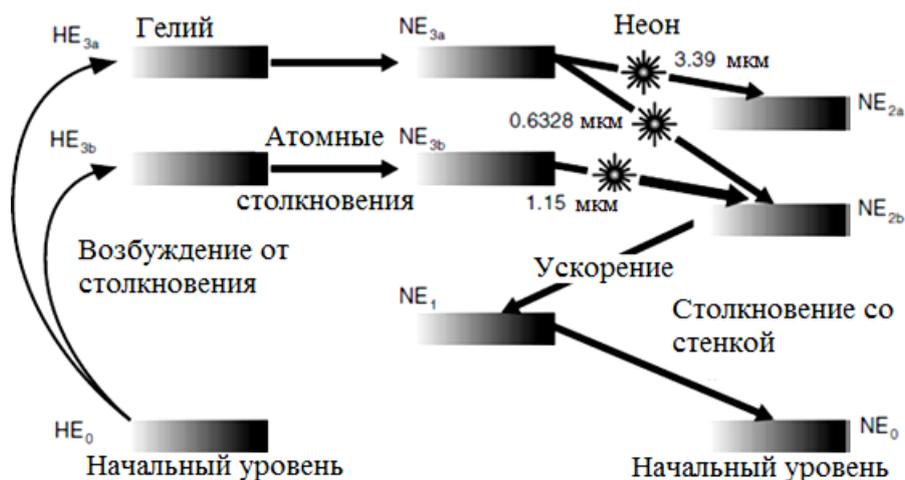


Рис. 8. Энергетические уровни He-Ne лазера [6]

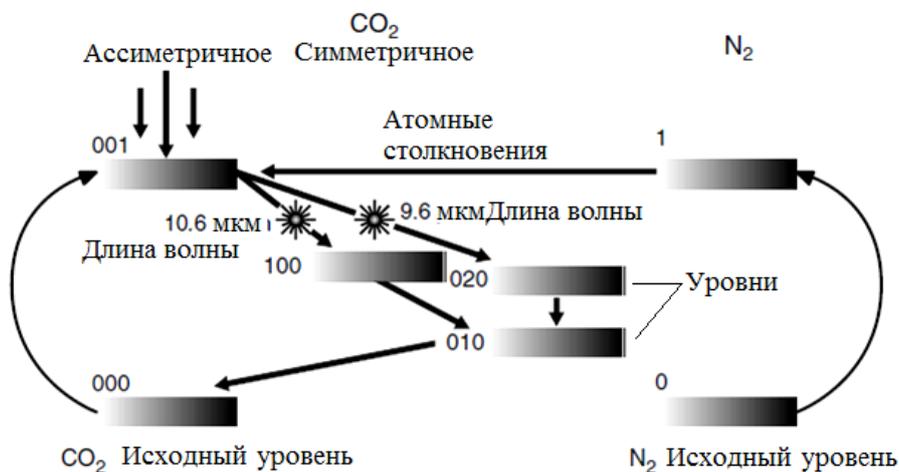


Рис. 9. Энергетические уровни в газовом CO₂-лазере [6]

При оптической накачке свет от мощной некогерентной лампы с помощью соответствующей оптической системы передается активной среде [20-27]. На рис. 10 представлены три наиболее применяемые схемы накачки. Во всех трех случаях активная среда имеет вид цилиндрического стержня, как это обычно встречается на практике.

Его диаметр может быть от нескольких миллиметров до нескольких сантиметров, а длина – от нескольких сантиметров до нескольких десятков сантиметров. Лазер может работать в импульсном или в непрерывном режиме, в зависимости от того, является ли лампа накачки импульсной (лампа-вспышка) или непрерывной.

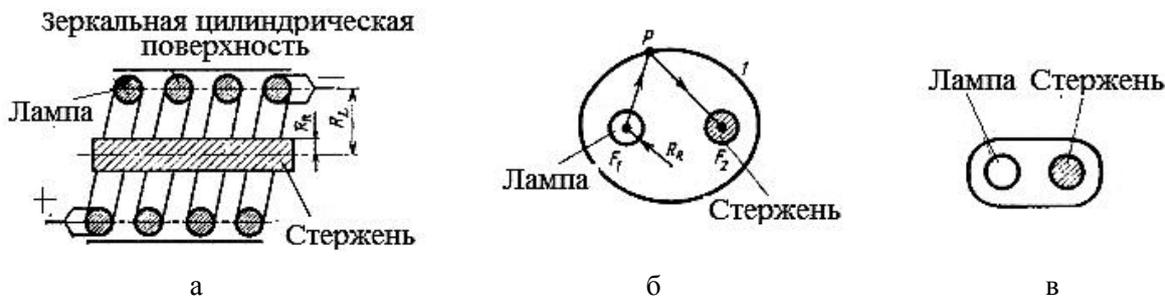


Рис. 10. Наиболее широко используемые системы оптической накачки:

а – лампа в форме спирали; б – лампа в форме цилиндра; в – конфигурация с плотной упаковкой [6]

Изображенная на рис. 10 *а* лампа имеет форму спирали. При этом свет попадает в активную среду либо непосредственно, либо после отражения от зеркальной цилиндрической поверхности. Такая конфигурация использовалась при создании первого рубинового лазера и сегодня иногда применяется для импульсных лазеров. На рис. 10 *б* лампа имеет форму цилиндра (линейная лампа), радиус и длина которого приблизительно те же, что и у активного стержня. Лампа размещается вдоль одной из фокальных осей F_1 зеркально отражающего эллиптического цилиндра, а лазерный стержень располагается вдоль другой фокальной оси F_2 . Хорошо известное свойство эллипса состоит в том, что луч F_1P , выходящий из первого фокуса F_1 , проходит после отражения от эллиптической поверхности через второй фокус F_2 (луч PF_2). Это означает, что большая часть света, излучаемого лампой, благодаря отражению от эллиптического цилиндра попадает в лазерный стержень. На рис. 10 *в* изображен при-

мер так называемой конфигурации с плотной упаковкой. Лазерный стержень и линейная лампа располагаются как можно ближе друг к другу и плотно окружаются цилиндрическим отражателем. Эффективность конфигурации с плотной упаковкой обычно не намного ниже, чем в случае эллиптического цилиндра. Заметим, что часто вместо зеркально отражающих рефлекторов в схемах на рис. 10 *в*, применяют цилиндры, изготовленные из диффузно отражающих материалов (таких как спрессованные порошки MgO или белая керамика).

Заметим также, что применяются и сложные типы осветителей, в конструкции которых использованы более чем один эллиптический цилиндр или несколько ламп в конфигурации с плотной упаковкой (рис. 11).

Существуют два типа излучателей, используемых в системах накачки на основе диодных лазеров: однополосковый диодный лазер (рис. 12) и линейка однополосковых диодных лазеров (рис. 13).

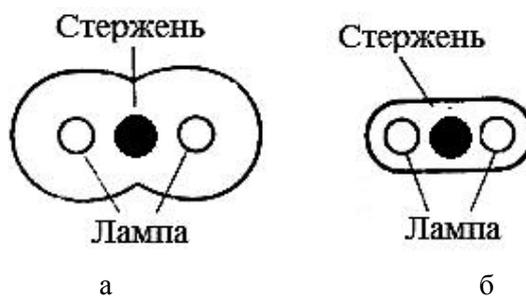


Рис. 11. Схемы накачки с двумя лампами: а – двухэллипсная конфигурация; б – несколько ламп в конфигурации с плотной упаковкой



Рис. 12. Диодный лазер с устройствами для формирования излучения [6]

Для того чтобы получить высокие выходные мощности, используют монолитную линейку однополосковых диодных лазеров, изготовленных на одной полупро-

водниковой подложке. Обычно такая линейка содержит 20 полосок шириной 5 мкм каждая с расстоянием между центрами полосок ~ 10 мкм.

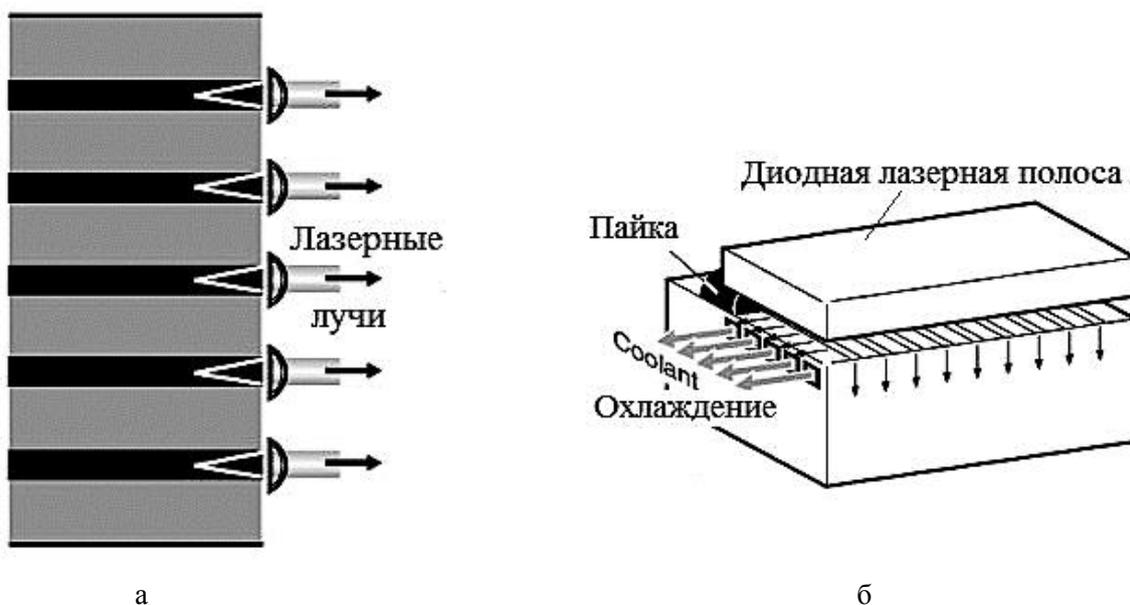


Рис. 13. Конструкция высокомощного диодного лазера:
а – линейка диодных лазеров; б – сборка блоков линеек для излучения

В дисковых лазерах активной средой является диск-кристалл Yb:YAG (иттриево-алюминиевый гранат с легированием иттербием) с очень малой толщиной (100-200 мкм), излучающий на длине волны 1030 нм, а его накачкой является диодный лазер. Активная среда имеет форму тонкого диска, а не стержня, что улучшает рассеивание тепла и улучшает качество

луча. Лазерный диск имеет на задней поверхности покрытие с высоким коэффициентом отражения для длин волн генерации и накачки и просветляющее покрытие для обеих длин волн на передней поверхности. Посредством индиевого или оловянно-золотого припоя диск монтируется на хладопроводе, который охлаждается водой (рис. 14 а).

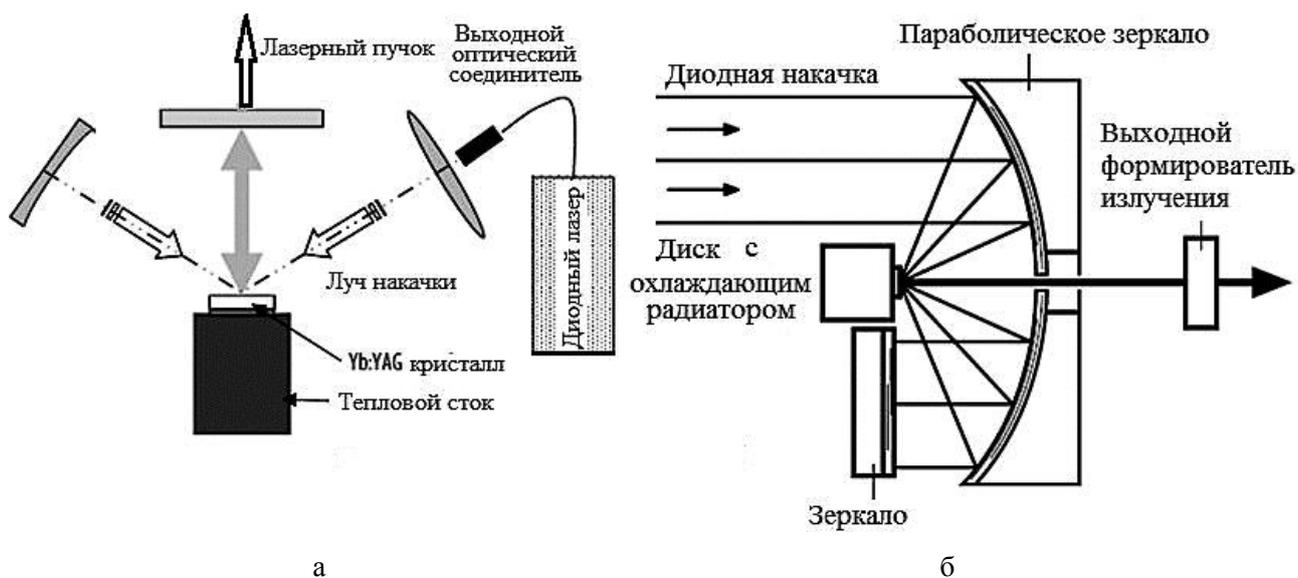


Рис. 14. Конструкция дискового лазера (а) и оптимальная схема накачки (б) [1]

В настоящее время нашла широкое применение следующая оптимальная схема

накачки (рис. 14 б). Излучение диодов накачки сначала формируется с помощью

пучка оптических волокон, а затем проецируется на поверхность диска параболического зеркала.

Непоглощенная часть излучения накачки направляется с диска обратно на противоположную сторону параболического зеркала, коллимируется им и направляется на систему поворотных зеркал. Затем этот пучок снова направляется на параболическое зеркало и фокусируется на диск с другого направления. Этот процесс повторяется до тех пор, пока все части зеркала не будут использованы. Используя такую схему можно получить большое число проходов пучка через диск и достичь поглощения большей доли мощности накачки (до 90 %).

Оптическая накачка газовой системы неэффективна, поскольку газы поглощают энергию в узких спектральных полосах, а лампы излучают свет в широких частотных диапазонах. КПД оптической накачки с помощью ламп в газовых лазерах имеет очень малое значение. Поэтому лазеры данной группы накачиваются пропусканием через активную среду электрического тока или воздействием тлеющего разряда.

Свободные электроны, возникающие в процессе разряда, при столкновениях с микрочастицами (атомами, ионами, молекулами) газа, посредством электронного удара возбуждают их и переводят на более высокие уровни энергии. Если время жизни возбужденных микрочастиц на верхних энергетических уровнях относительно ве-

лико, то в газовой среде создается четко выраженная и устойчивая инверсия населенностей. Метод электронного удара эффективно используется для накачки газовых лазеров, действующих в непрерывном и/или импульсном режимах.

Успешно применяется и способ резонансной передачи возбуждения, при котором возбуждение микрочастиц одного вида происходит при неупругих соударениях с микрочастицами другого вида. При этом создание активной среды в газе происходит в две стадии: сначала электроны возбуждают микрочастицы вспомогательного газа, которые затем в процессе неупругих соударений с микрочастицами рабочего газа передают им избыточную энергию. Начальное накопление энергии вспомогательных микрочастиц происходит должным образом, если время жизни этих микрочастиц на высоких энергетических уровнях относительно велико.

В газовых лазерах необходима прокачка газовой смеси (рис. 15). Основная цель прокачки газовой смеси – удаление продуктов диссоциации (например, СО), которые ухудшают работу лазера. Тепло, выделяемое в разряде, отводится за счет тепловой диффузии к стенкам газоразрядной трубки, охлаждаемой водой. Сама прокачка обеспечивает отвод тепла лишь при очень высоких (сверхзвуковых) скоростях прокачки. Выходная мощность $P_{\max} = 50-60$ Вт/м (с единицы длины разряда) не зависит от диаметра трубки.

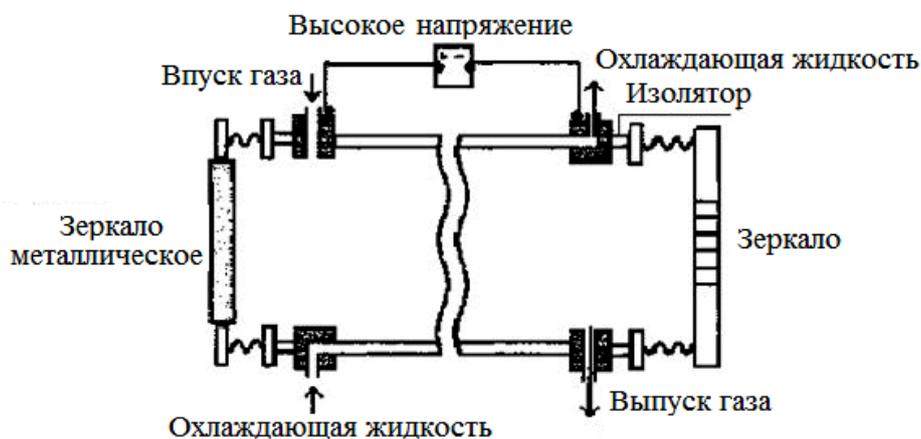


Рис. 15. Схема устройства СО₂ лазера с продольной прокачкой газа

В настоящее время находят применение газовые лазеры с поперечной прокачкой рабочей смеси (рис. 16).

Более широкое применение нашли лазеры на основе инертных газов – гелий-неоновый и аргоновый.

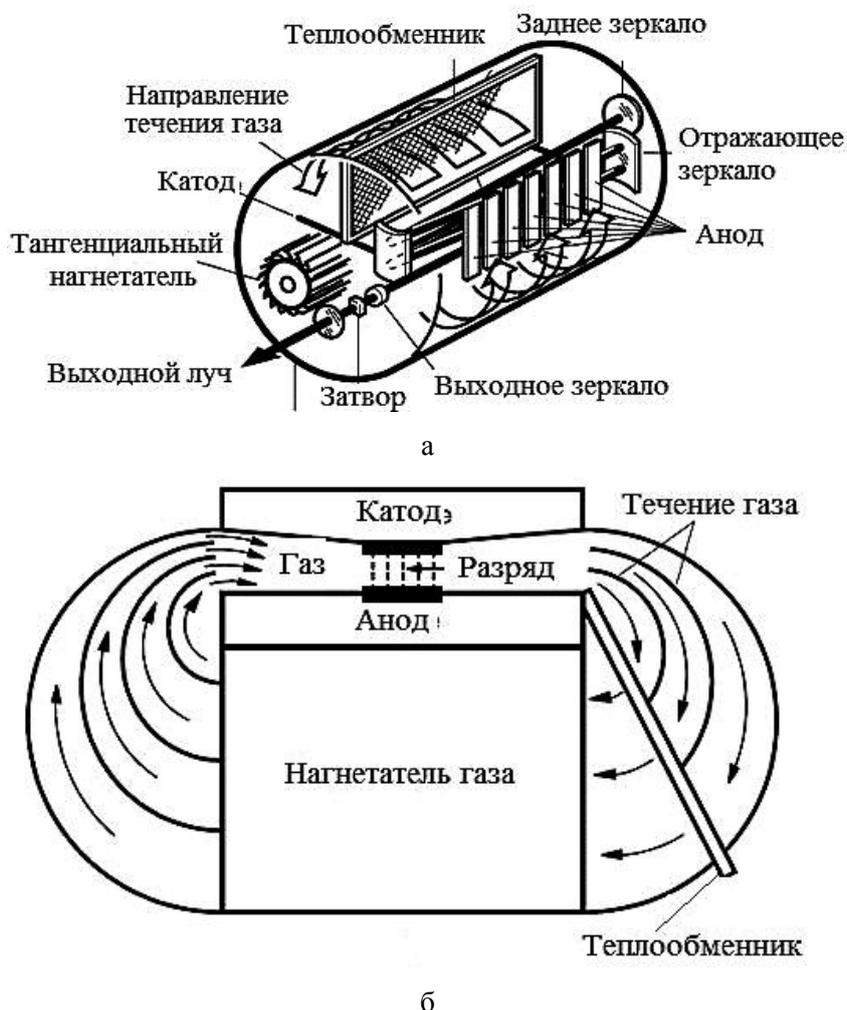


Рис. 16. Трехмерный вид CO_2 -лазера с поперечной прокачкой: а – общая схема; б – направление течения газа [6]

Аргоновый лазер может испускать свет семи различных длин волн, однако более 80 % подобных лазеров работают в диапазонах 488 нм (голубой) и 514,5 нм (зеленый). В ближней ультрафиолетовой области лазер работает на двух длинах волн – 351,1 и 363,8 нм. Обе эти области представляют большой практический интерес, т. к. соответствуют области максимальной чувствительности широко используемых фотоматериалов.

По сравнению с CO_2 -лазером аргоновый лазер (рис. 17) гораздо дешевле и проще в эксплуатации. В настоящее время аргоновые лазеры являются самыми мощными

источниками непрерывного когерентного излучения в ультрафиолетовом и видимом диапазонах спектра.

В начале XXI века были разработаны оптоволоконные лазеры высокой мощности (1...20 кВт) с длиной волны излучения 1,06 мкм (рис. 18). Благодаря малым размерам, высокому КПД (более 15 %), надежности, длительной работе без профилактических ремонтов и другим преимуществам они могут использоваться в тех случаях, когда, кроме высокой мощности и гибкости передачи излучения, требуется мобильность самого лазерного источника.

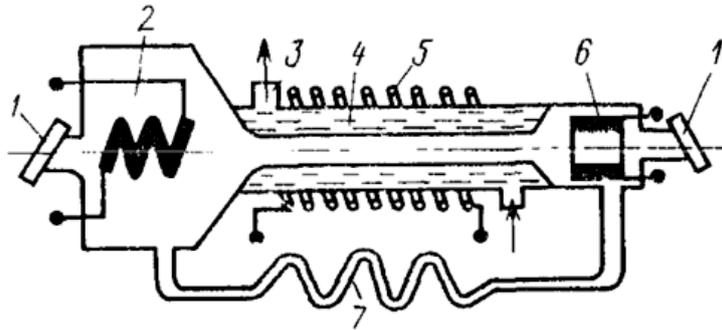


Рис. 17. Схема лазера на аргоне: 1 – окна под углом Брюстера; 2 – катод; 3 – система охлаждения; 4 – керамический капилляр; 5 – обмотка соленоида; 6 – анод; 7 – обводной канал

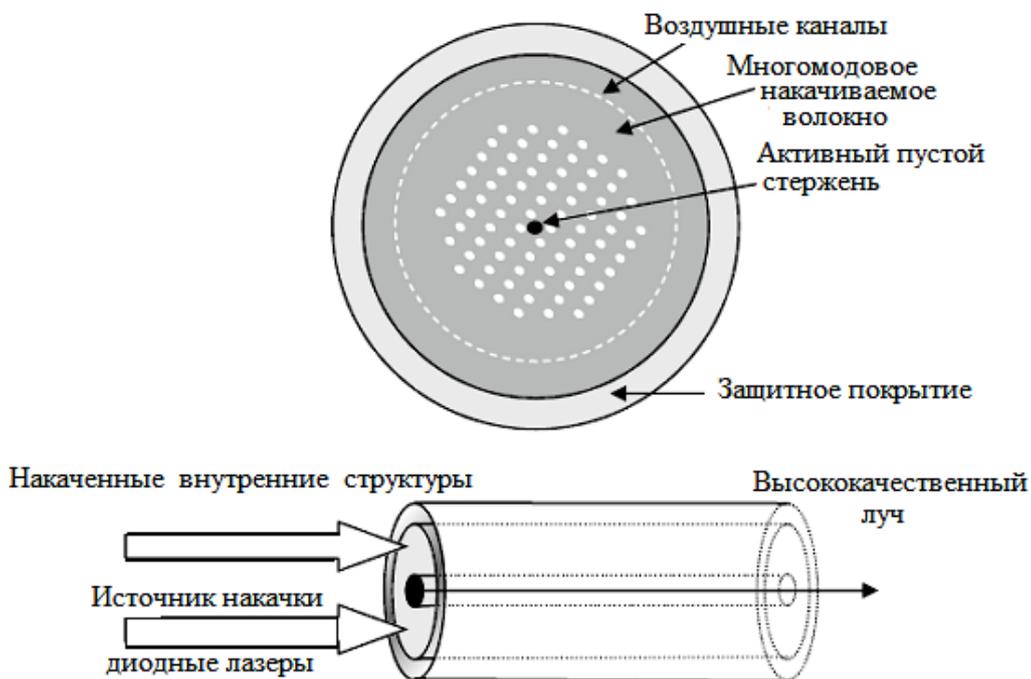


Рис. 18. Структура волоконного лазера (отражателем является пустотелый стержень, в котором концентрируется свет от остальных пустотелых структур) [1]

Основными преимуществами оптоволоконных лазеров по сравнению с диодными являются: излучение с одной длиной волны и отдельное расположение диодов накачки. Последнее важно с позиции надежности, поскольку охлаждение отдельных диодов намного эффективнее, чем торцов диодов, набранных в линейки.

В лазере на свободных электронах электронный пучок, движущийся со скоростью, близкой к скорости света, пропускается через магнитное поле, создаваемое периодической структурой (рис. 19 а).

Процесс вынужденного излучения происходит за счет взаимодействия электромагнитного поля лазерного пучка с электронами, движущимися в периодической магнитной структуре. Будучи инжектированными вдоль периодической структуры, электроны двигаются в плоскости, перпендикулярной магнитному полю, по траекториям, имеющим волнистый вид (рис. 19 б).

Возникающее при этом ускорение электронов приводит к излучению в продольном направлении. Длину волны излучения можно изменять, варьируя период магнита и энергию электронного пучка.

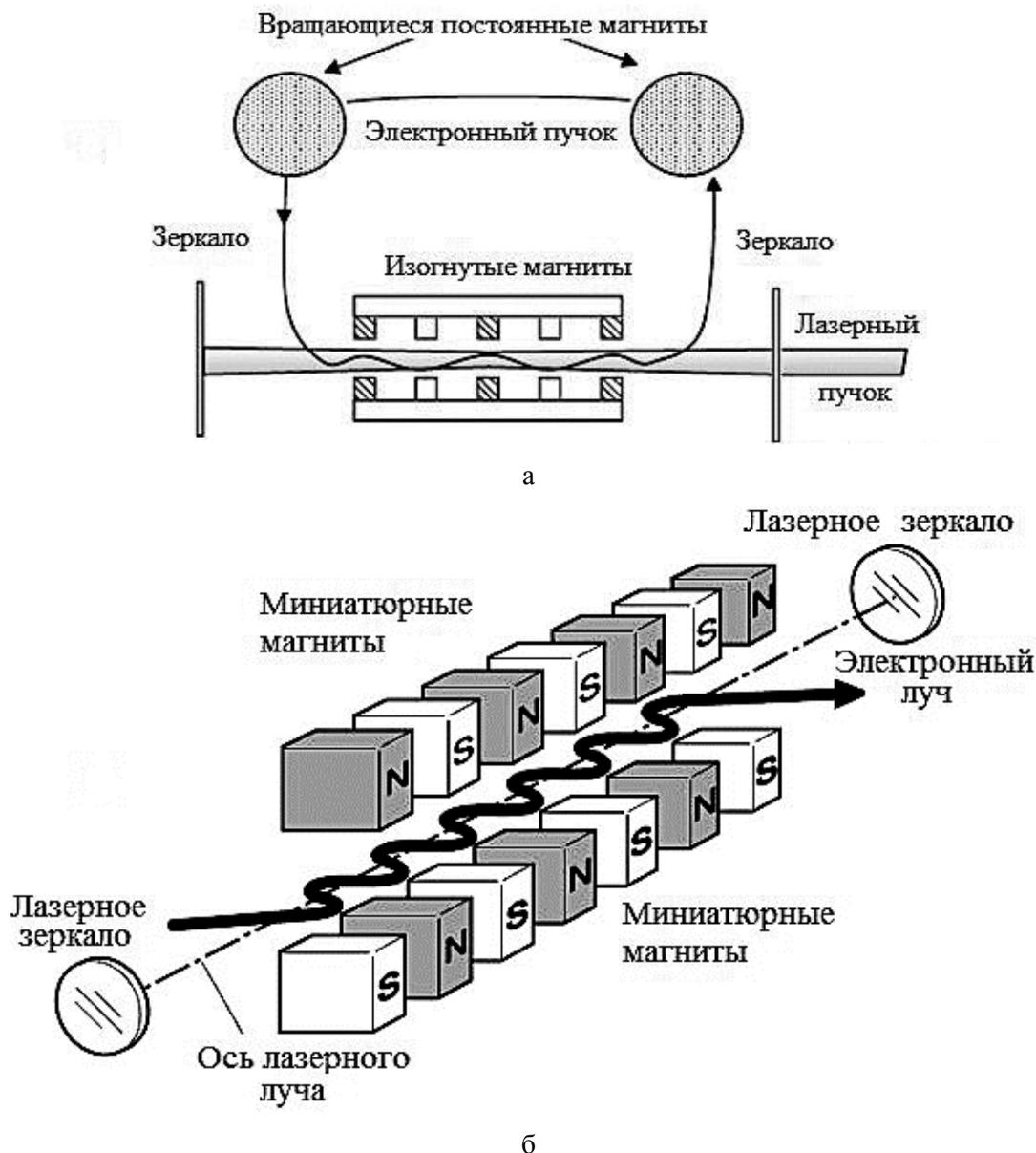


Рис. 19. Схема конструкции лазера на свободных электронах (а) и взаимодействие электромагнитного поля лазерного пучка с электронами (б) [1]

Эксимерные лазеры представляют собой важный класс молекулярных лазеров на переходах между различными электронными состояниями специального класса молекул, называемых эксимерами (соединение двух или более атомов в возбужденном состоянии) (рис. 20). Механизм излучения заключается в том, что атом инертного газа (Kr, Ar, Xe) в возбужденном состоянии соединяется с атомом галогена (F, Cl), что приводит к образованию эксимера галогенидов инертных газов, которые генерируют в УФ-диапазоне: например, ArF ($\lambda = 193$ нм); XeCl ($\lambda = 309$ нм).

В лазерах на красителях активная среда представляет растворы определенных соединений органических красителей в жидком растворе, таком как этиловый спирт, метиловый спирт или вода (рис. 21).

Полупроводниковый лазер генерирует когерентное излучение в результате процессов, происходящих в $p-n$ переходе на полупроводниковом материале. На рис. 22 показана схема полупроводникового лазера на арсениде галлия GaAs. Кристалл имеет размеры около $0,5 \dots 1,0$ мм². Его верхняя часть представляет собой полупроводник p -типа, нижняя – по-

лупроводник *n*-типа, между ними имеется *p-n* переход толщиной около 0,1 мкм. Излучающий слой имеет несколько большую толщину (1...2 мкм) вследствие про-

никновения электронов и дырок в глубь кристалла. Выводы служат для подачи питающего напряжения, один из них может выполнять функцию теплоотвода.

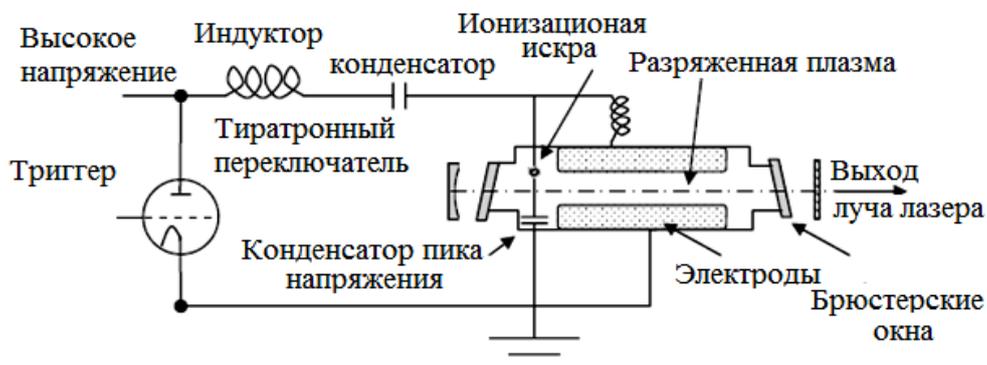


Рис. 20. Базовая конструкция эксимерного лазера [1]

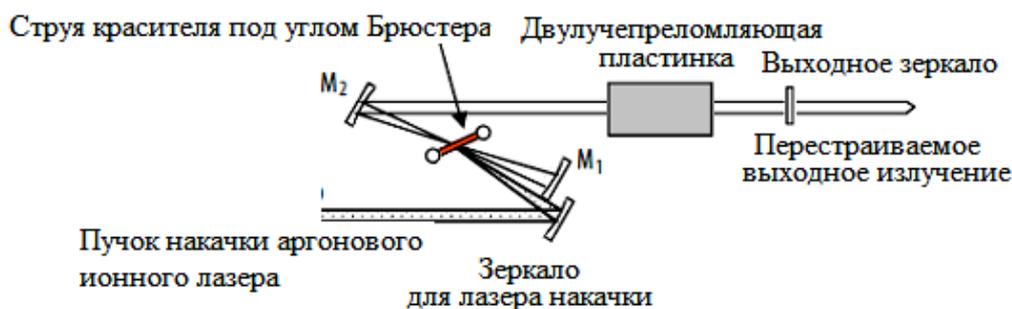


Рис. 21. Устройство непрерывного лазера на красителе [1]

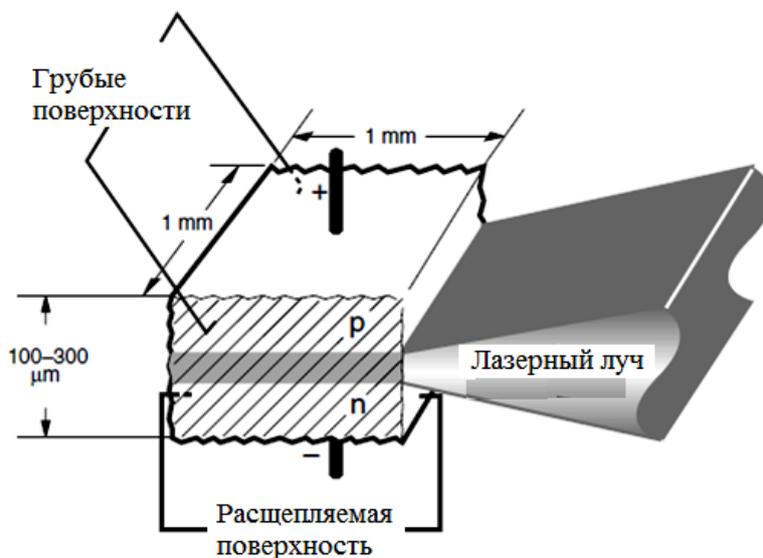


Рис. 22. Схема полупроводникового лазера

При подаче напряжения на выводы *p-n* переход генерирует излучение, длина волны которого для арсенида галлия составляет $\lambda_1 = 0,82$ мкм и $\lambda_2 = 0,9$ мкм (инфракрас-

ная область). Для других материалов длина волны излучения может лежать в широком диапазоне – от ультрафиолетовой до инфракрасной области. Для улучшения усло-

вий работы полупроводникового лазера и обеспечения непрерывного режима генерации кристалл необходимо охлаждать до низких температур. Мощность лазера на арсениде галлия при температуре жидкого азота в импульсно - периодическом режиме составляет 100 Вт, в непрерывном режиме – 10 Вт. Некоторые полупроводниковые лазеры могут работать при нормальных температурах.

Небольшие геометрические размеры и простота конструкции полупроводниковых

лазеров позволяют собирать решетки или линейки из большого числа отдельных лазеров. Такие решетки могут иметь мощность непрерывного излучения 10...100 Вт. Полупроводниковые (диодные) лазеры в основном применяют для оптической накачки твердотельных технологических лазеров.

Для увеличения мощности лазеров применяются усилители и осцилляторы (рис. 23).

Классическая схема подключения твердотельного лазера приведена на рис. 24.

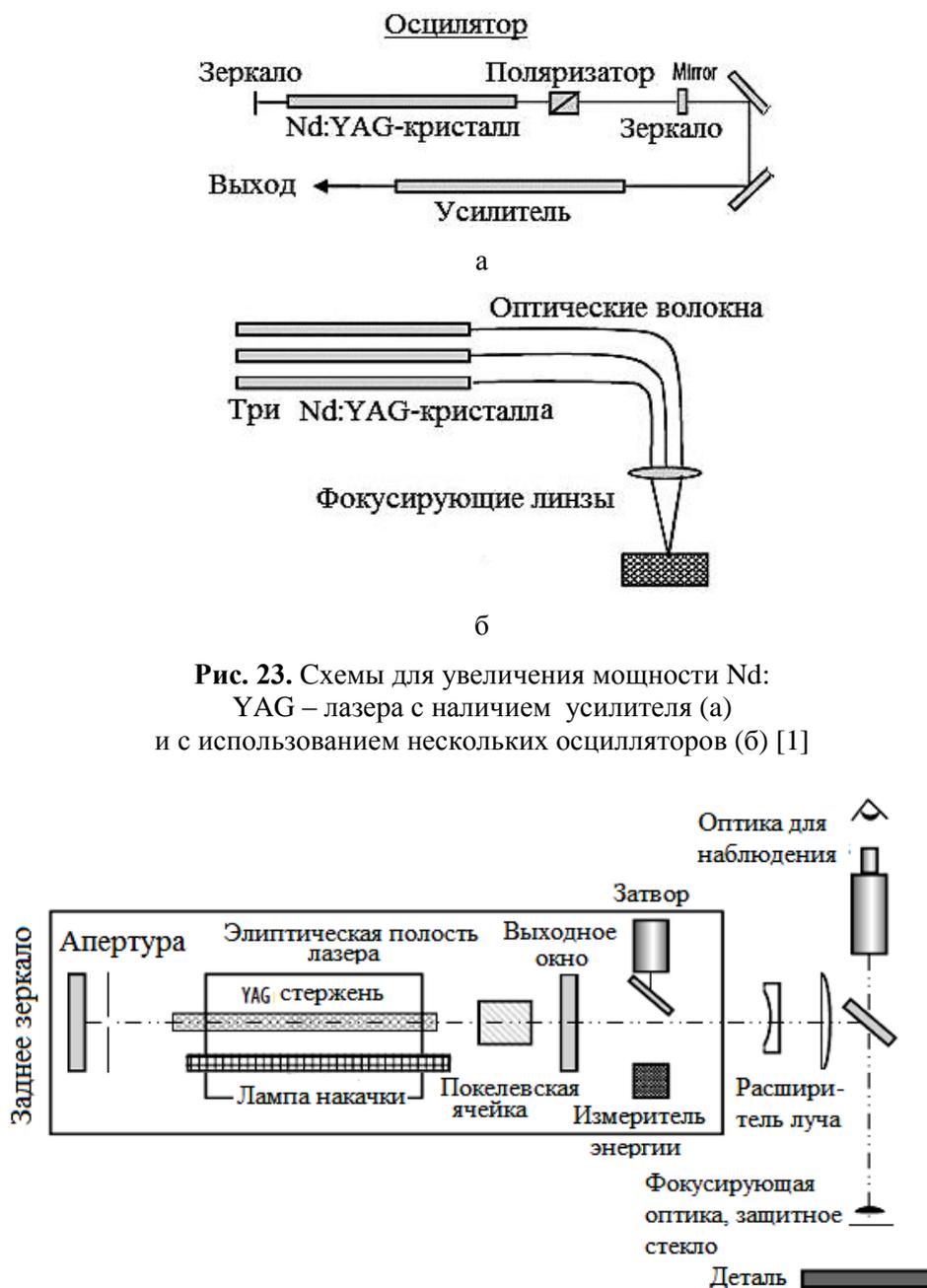


Рис. 23. Схемы для увеличения мощности Nd:YAG – лазера с наличием усилителя (а) и с использованием нескольких осцилляторов (б) [1]

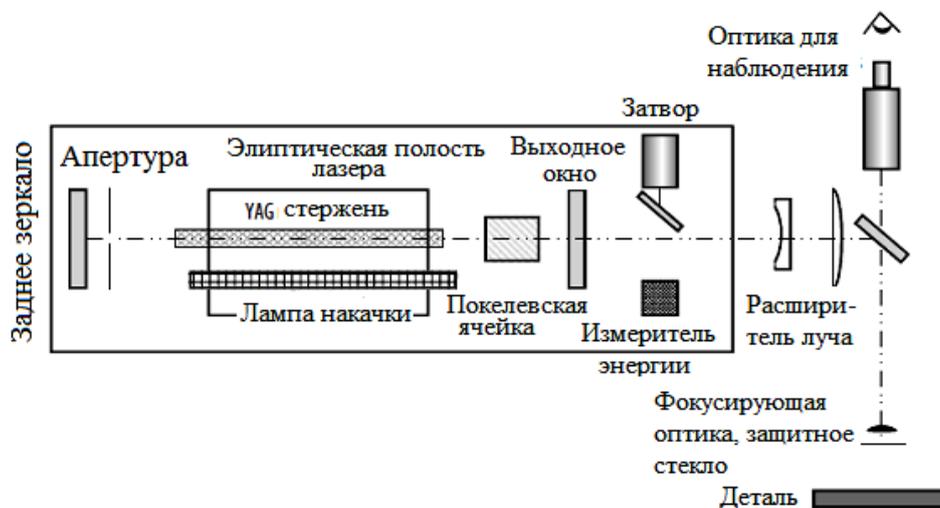


Рис. 24. Схема подключения твердотельного лазера [1]

Твердотельные лазеры используют стержень из твердого кристаллического материала, концы которого отполированы параллельно и покрыты зеркалами для отражения лазерного света. Ионы взвешены в кристаллической матрице и испускают электроны при возбуждении. Боковые стороны стержня остаются свободными, чтобы пропускать свет лампы накачки. В первом твердотельном лазере использовался стержень из розового рубина и искусственный кристалл сапфира. Два распространенных твердотельных лазеров, используемых сегодня – Nd:YAG (неодим : иттрий-алюминиевый гранат) и Nd : стекло. Оба используют криптоновые или ксеноновые лампы-вспышки для оптической накачки. Можно получить яркие вспышки света мощностью до тысячи ватт, а срок службы составляет около 10 000 часов.

Лазерное излучение может быть сфокусировано в точное пятно большой интенсивности. Небольшой импульсный лазер может генерировать достаточно тепла для испарения различных материалов. Таким образом, лазеры используются в различных процессах удаления материалов, включая механическую обработку. Например, рубиновые лазеры

используются для сверления отверстий в алмазах, для волочения проволоки и в сапфирах для часовых подшипников.

Выводы

В обзорной статье изложены основы распространения гармонической световой волны в пространстве, приведена система энергетических уровней атома и механизм возникновения спонтанного и вынужденного излучения, приведены условия для генерации когерентного светового излучения. Приведены трех- и четырехуровневые лазерные системы для формирования инверсии и рассмотрены методы создания инверсии населенностей лазерных уровней различных типов лазеров: твердотельных, газовых, волоконных, полупроводниковых. Рассмотрены возможные системы оптической накачки твердотельных лазеров и описаны конструкции газовых лазеров с продольной и поперечной прокачкой газа. Приведены схемы волоконного лазера, лазера на свободных электронах, эксимерного лазера, полупроводникового лазера. Представлены схемы для увеличения мощности твердотельного лазера и дана схема его подключения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Steen W., Mazumder J.** Laser Material Processing. London: Springer-Verlag Limited, 2010. P. 559.

2. **Katayama S.** Handbook of laser welding technologies. USA: Woodhead Publishing Limited, 2013. P. 633.

3. **Schaaf P.** Laser Processing of Materials: Fundamentals, Applications and Developments. New York: Springer, 2010. P. 229.

4. **Ion C.J.** Laser Processing of Engineering Materials: Principles, Procedure and Industrial Application. UK: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2005. P. 557.

5. **Olsen F.O.** Hybrid laser-arc welding. UK:Woodhead Publishing Limited Cambridge, 2009. P. 324.

6. **Elijah J.** Principles of Laser Materials Processing. Canada: Wiley&Sons, 2009. P. 821.

7. **Mittal K., Bahners T.** Laser Surface Modification and Adhesion. USA: Scrivener Publishing, 2015. P. 418.

8. **Dawes C.** Laser welding: A practical guide. England: Abington Publishing, 2008. P. 258.

9. **Basting D., Marowsky G.** Excimer Laser Technology. Berlin: Springer Heidelberg, 2005. P. 434.

10. **Verdeyen J.** Laser Electronics. USE: Prentice Hall, 1995. P. 780.

11. **Siegman E.** Lasers. USE: The Maple-Vail Book Manufacturing Group, 1986. P. 1283.

12. **Svelto O.** Principles of Lasers. USE: Springer Science+Business Media, 1998. P. 604.

13. **Laufer G.** Introduction to Optics and Lasers in Engineering. UK: Cambridge University Press, 1996. P. 476.

14. **Карон Е.** Semiconductor Lasers (*Fundamentals*). USA: Academic Press, 1999. P. 454.

15. **Titterton D.** Military Laser Technology and Systems. USA: Artech House, 2015. P. 651.

16. **Injeyan H., Goodno D.** High-Power Laser Handbook. USA: The McGraw-Hill Companies, 2011. P. 573.

17. **Ready J., Farson D.** Handbook of Laser Materials Processing. USA: Laser Institute of America, 2001. P. 716.

18. **Мак А.А., Сомс Л.Н., Фромзель В.А.** Лазеры на неодимовом стекле. Москва: Наука, 1990. 288 с.

19. **Звелто О.** Принципы лазеров. Санкт-Петербург: Лань, 2008. 720 с.

20. **Вакс Е.Д., Миленький М.Н., Сапрыкин Л.Г.** Практика прецизионной лазерной обработки. Москва: Техносфера, 2013. 696 с.

21. **Лосев В.Ф., Морозова Е.Ю., Ципилев В.П.** Физические основы лазерной

обработки материалов: учеб. пособие. Томск: Изд-во Том. политехн. ун-та, 2011. 199 с.

22. **Ковалев О.Б., Фомин В.М.** Физические основы лазерной резки толстых листовых материалов. Москва: Физматлит, 2013. 256 с.

23. **Прохоров А.М.** Справочник по лазерам: в 2 т. Москва: Советское радио, 1978. 504 с.

24. **Реди Дж.** Промышленные применения лазеров. Москва: Мир, 1981. 638 с.

25. **Айхлер Ю., Айхлер И.** Лазеры. Исполнение, управление, применение; пер. с нем. Л.Н. Казанцевой. Москва: Техносфера, 2008. 440 с.

26. **Салех Б., Тейх М.** Оптика и фотоника: принципы и применения. Долгопрудный: ИД «Интеллект», 2012. 784 с.

27. **Агравал Г.П.** Применение нелинейной волоконной оптики. Санкт-Петербург: Лань, 2011. 592 с.

Сперанский Сергей Константинович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Техническая механика и мехатроника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

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

Sergey K. Speransky – Ph.D., Associate Professor, Department of Technical Mechanics and Mechatronics, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

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

Статья поступила в редакцию 17.10.23, принята к опубликованию 28.11.23

УДК 620.3.54(075.8)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛУЧЕНИЯ НАНО- И МИКРОЧАСТИЦ ОКСИДА ЖЕЛЕЗА С ПОМОЩЬЮ СВЧ-ЭНЕРГОПОДВОДА

В.Ю. Кожевников, В.Д. Федотов

EXPERIMENTAL STUDY OF THE PRODUCTION OF NANO- AND MICROPARTICLES OF IRON OXIDES USING MICROWAVE POWER SUPPLY

V.Yu. Kozhevnikov, V.D. Fedotov

Рассмотрена технология получения нано и микрочастиц оксида железа при СВЧ-воздействии на коллоидные растворы. Приведены результаты экспериментальных исследований, показавшие, что использование СВЧ-энергоподвода позволяет получать стабильные растворы железа с достаточно узким распределением наночастиц по размеру.

Ключевые слова: СВЧ-воздействие, нано- и микрочастицы, оксид железа, экспериментальное исследование, коллоидные растворы, технология, СВЧ-установка

Материалы, созданные на основе наноразмерных частиц (НРЧ) переходных металлов, считаются значимыми для развития современного материаловедения [1]. Нанопорошки железа имеют значительные перспективы практического использования. Благодаря большой индукции магнитного насыщения, они являются материалами для создания магнитных жидкостей и компактных композиционных материалов, которые используются в системах записи и хранения информации, для создания постоянных магнитов, в качестве магнитных сенсоров, а также в медицине и биологии [2].

Расширение применения НРЧ переходных металлов нуждается в изучении процессов, проходящих при разных способах их получения, а также исследования боль-

The technology for the synthesis of iron oxide nano- and microparticles under microwave-assisted impact on colloidal solutions is considered. The results of the experimental studies showed that the use of a microwave power supply can be applied in synthesizing stable iron solutions with a narrow size distribution of nanoparticles.

Keywords: microwave exposure, nano- and microparticles, iron oxide, experimental study, colloidal solutions, technology, microwave installation

шого спектра физико-химических свойств, в том числе, параметров агрегации частиц, форморазмерных характеристик фазового и химического составов.

Существует большое количество методов синтеза наночастиц железа, которые условно можно разделить на два больших класса – физические и химические. При этом большинство этих методов не выходят за рамки лабораторных исследований и объем получаемых наночастиц очень мал, что сказывается на их внедрении в промышленность.

В связи с этим актуальной задачей является разработка способов получения наночастиц железа с заданными свойствами и в масштабах, которые могли бы применяться в промышленности.

Одним из наиболее перспективных способов получения коллоидных растворов

наночастиц железа является метод химического восстановления при воздействии СВЧ электромагнитного поля.

Применение СВЧ нагрева связано с тем, что он выгодно отличается от других традиционных методов и имеет ряд преимуществ:

- интенсификация процесса термообработки за счет объемного нагрева изделия из-за проникновения электромагнитной волны в его глубину;

- высокое качество нагрева как за счет большой равномерности тепловыделения, так и вследствие быстроты процесса, отсутствия загрязнения изделия в процессе тепловой обработки;

- высокая точность управления технологическим процессом благодаря возможности точного дозирования СВЧ энергии;

- уменьшение вредного воздействия на окружающую среду и улучшением условий труда обслуживающего персонала.

Все эти преимущества приводят к тому, что СВЧ излучение обеспечивает быстрое и равномерное нагревание всего объема реакционного раствора, что приводит к однородности в условиях нуклеации и роста зародышей и, в конечном итоге, приводит к получению нано-частиц наименьшего размера и одинаковой формы.

Множество работ было посвящено синтезу НРЧ при СВЧ излучении [3-9]. Свойства нано размерных индивидуальных металлов, влияние на них условий получения выявлено недостаточно.

Целью работы является исследование технологии и оборудования для получения коллоидных растворов наночастиц железа в СВЧ электромагнитном поле – выявление фазового составов конечных и промежуточных продуктов, изучение ряда физико-химических свойств нано металлов, включая форму, размеры, структурные и фазовые характеристики, и влияния на них режимов и условий получения.

Получение сферических частиц зольгель методами в настоящее время является наиболее перспективным [10]. Методы «мягкой химии» не позволяют использовать высококонцентрированные растворы,

что значительно снижает эффективность этих методов. Поиск новых методов, которые позволят получать оксидные наночастицы, дал решение в виде воздействия на солевые растворы СВЧ-энергии в процессе гидролиза. Скорость гидротермального синтеза может быть увеличена при СВЧ-воздействии на несколько порядков, получаемые частицы обладают узким распределением по размерам.

Экспериментальные исследования влияния параметров СВЧ-воздействия, типа растворителя на образование, морфологию и характер распределения частиц оксида железа проводились со следующими реагентами:

1. $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (хлорид железа) представляет собой вещество в виде кусков или кристаллов желто-коричневого цвета. Реактив растворим в воде и гигроскопичен.

2. FeCl_2 – хлорное железо, трихлорид железа, FeCl_2 – химический реактив, в состав которого входят соляная кислота и трехвалентное железо. При взаимодействии с воздухом напоминает мокрый песок – приобретает желтоватый оттенок.

3. Гидроксид аммония – это соединение чистой воды и аммиака. Раствор прозрачный, обладающий едким и достаточно резким запахом. Основные сферы применения гидроксида аммония: пищевая, бытовая и медицинская. Гидроксид аммония (в обычных условиях) невзрывоопасен, не горюч, но при дегазации выделяются аммиачные пары, способные воспламениться при $650\text{ }^\circ\text{C}$. Водный раствор горит при $750\text{ }^\circ\text{C}$.

4. Водный дистиллят – это H_2O в жидкой форме, образовавшаяся посредством испарения. В процессе дистилляции она лишается абсолютно всех минеральных веществ, примесей, посторонних привкусов. Соли, микроэлементы и металлы выпариваются.

Для проведения экспериментальных исследований применялось следующее оборудование.

Растворы нагревали в СВЧ-печи SAMSUNG M1712R (максимальная мощность – 850 Вт, частота – 2450 МГц).

Измерение параметров микро- и наночастиц железа проводились с помощью

анализатора размера частиц Analysette 22 Micro Tec PLUS (рис. 1). Анализатором проверялись наиболее важные параметры, характеризующие наночастицы.



Рис. 1. Анализатор частиц Analysette 22 Micro Tec PLUS

Analysette 22 MicroTec Plus разработан как практичная модульная система с блоками (модулями) для сухого диспергирования и диспергирования в жидкой среде или комбинации с блоком диспергирования в жидкой среде малой емкости. В приборе используются два полупроводниковых лазера, длины волн у которых составляют 512 и 940 нм. Диапазон измерения для диспергирования в жидкости составляет 0,08...2000 мкм.

Для определения pH жидкостей применялся электронный pH-метр с диапазоном измерения 0,0-14,0 pH. Шаг измерения – 0,1 pH, точность $\pm 0,05$ pH. Рабочая температура – от 0 до 80 °С.

Для поддержания температуры на заданном уровне в процессе проведения эксперимента применялась паровая баня (рис. 2).

Искусственное удаление влаги из материалов производилась с помощью вакуумного шкафа (рис. 3), внутренняя камера которого и наружные поверхности выполнены из нержавеющей полированной стали. Рабочая температура вакуумного шкафа от +20 до +200°С. Максимальный вакуум составляет 1×10^{-2} мбар (1 мбар = 0,76 мм рт. ст.).



Рис. 2. Паровая баня



Рис. 3. Вакуумный шкаф

В эксперименте для получения микро- и наночастиц использовали железо треххлористое марки ЧДА, железо (II) хлорид марки ЧДА, воду дистиллированную, водный раствор аммиака. Раствор готовили путем смешивания растворов солей, добавления дистиллированной воды, размешивали до полного растворения солей, далее раствор подвергали нагреву в СВЧ поле до температуры 80 °С. Контроль температуры проводили с помощью измерительного прибора, помещенного в реакционную смесь.

Соответственно получали раствор Fe_3O_4 , в который затем вводили известный объем водного раствора аммиака до значительного pH реакционной смеси 7,5-7,7, который выступал в качестве восстановителя и ста-

билизатора коллоидного раствора железа. После образования черного осадка полученный коллоидный раствор выдерживали при той же температуре в течение 30 минут на паровой бане. Затем остужали до комнатной температуры, после чего собирали магнитом, промывали несколько раз дистиллированной водой.

Концентрация компонентов:

Железо треххлористое – 11,6 г;

Железо (II) хлорид – 4,3 г;

Дистиллированная вода – 300 мл;

Аммиак водный (25 %) – 9,71 мл.

Для точного приготовления раствора использовалась химическая посуда (мерная посуда, стакан) и лабораторные весы ВК-600 (ЗАО «Масса-К»). Для точного измерения pH использовался электронный pH-метр.

Синтез микро- и наночастиц проводился при СВЧ воздействии мощностью до 850 Вт. Продолжительность СВЧ-воздействия и охлаждение раствора после нагрева варьировались в процессе эксперимента. В результате эксперимента получены 3 образца. Объем одного образца в колбе 15 мл.

В результате эксперимента получены микро- и наночастицы оксида железа. Распределение микро- и наночастиц гидроксидов железа по размерам определяли методом лазерной дифракции света на приборе Analysette 22 Micro Tec Plus с пределами измерений 0,08...2000 мкм. Программное обеспечение позволяет определять средний

размер наночастиц, исходя из распределения интенсивности светорассеяния по размерам частиц, объемного содержания и числа частиц.

Приведенные ниже значения размера наночастиц являются результатами усреднения по шести последовательным циклам измерений. Полученное в каждом цикле значение является, в свою очередь, результатом автоматической обработки 10-15 опытов. В процессе измерений кювету с исследуемым раствором термостатировали при температуре 25 °С. Образцы исследовались через 4 часа после нагрева раствора в СВЧ-поле.

Проведенные эксперименты подтвердили формирование зерен микро- и наночастиц в растворе с равномерным увеличением температуры через однородное увеличение СВЧ воздействия.

Эффект от нагрева был ключевым фактором при синтезе наночастиц в среднем с одинаковым размером. Из чего следует, что некоторые специальные тепловые эффекты СВЧ энергии должны быть использованы для синтеза наночастиц металлов.

Дисперсный (гранулометрический) состав (распределение частиц по размерам) является одной из важнейших характеристик тонкоизмельченных материалов, определяющей их физико-химические свойства [11].

В таблице отражены результаты измерений среднего размера частиц.

Результаты эксперимента

Номер образца	P , Вт (%)	t , с	Охлаждение раствора	Удержание на паровой бане, мин	T , °С	Средний диаметр, нм
1	800 (95)	120	да	30	80	144±3,4
2	800 (95)	120	да	30	80	182±8,7
3	800 (95)	120	–	30	80	2000±0,1

Образцы № 1, № 2 нагревали в СВЧ установке при мощности $P = 800$ Вт (95 %) и времени нагрева 120 с, температура раствора составила 80 °С. Раствор после нагрева охлаждали. При помощи магнита, прислоненного к колбе, в образце наблюдали магнитные частицы. При визуальном осмотре образца частицы не видны. Внешне раствор представляет собой непрозрачную жидкость

темного цвета. На рис. 4 представлены начальные распределения частиц по размерам для образца № 1.

Видно, что размер частиц лежит в малом интервале, что является удовлетворительным результатом и наличием наночастиц железа. На рис. 5 представлены начальные распределения частиц по размерам для образца № 2.

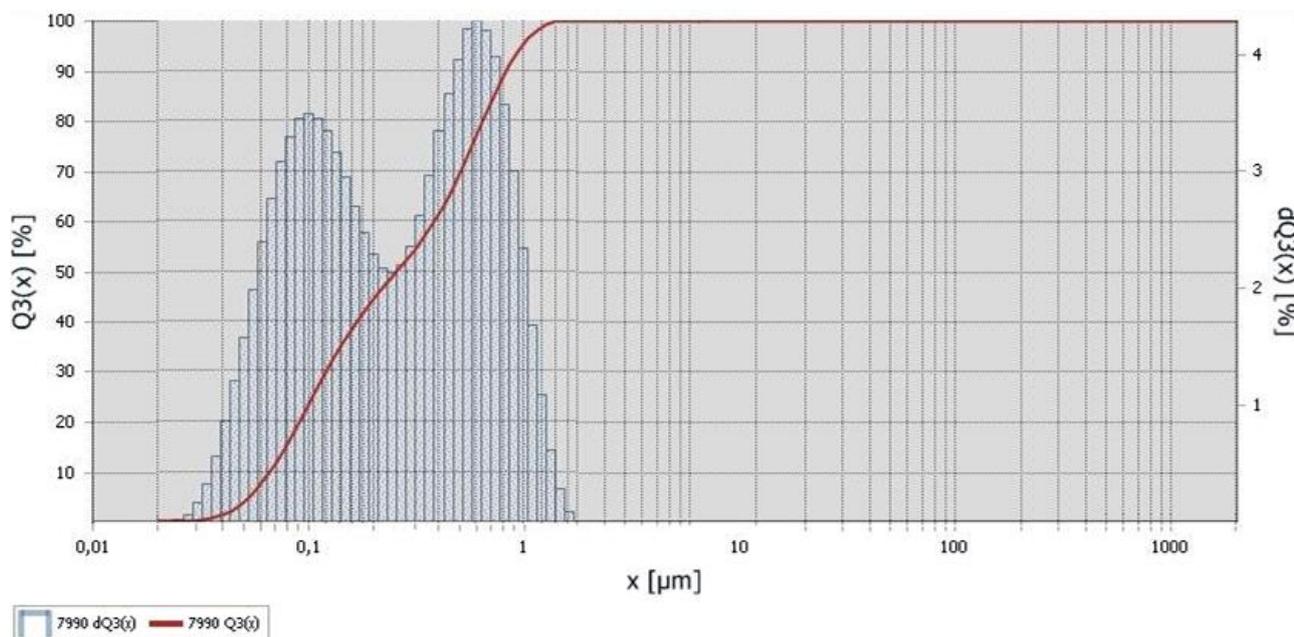


Рис. 4. Распределение частиц по размерам: зависимость количества частиц (объемный %) от размера частиц. Образец № 1

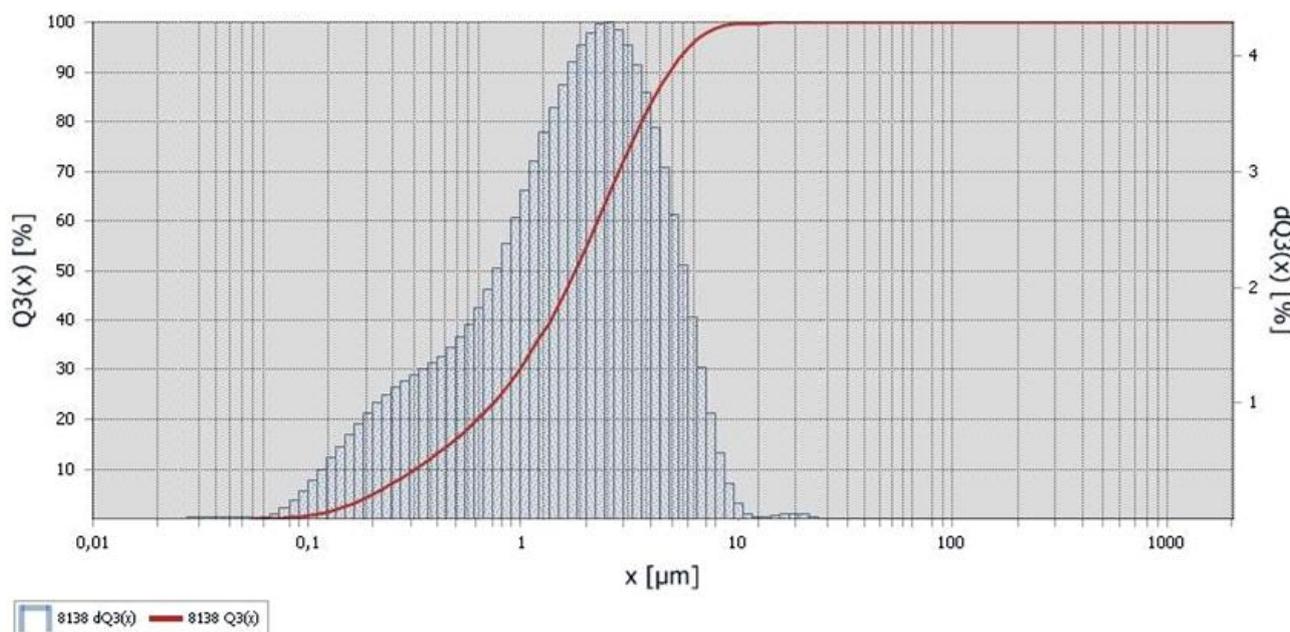


Рис. 5. Распределение частиц по размерам. Образец № 2

Видно, что размер частиц лежит в малом интервале 0,1-1 мкм, этот результат также является удовлетворительным. Образец № 3 нагревали в СВЧ установке при мощности $P = 800$ Вт (95 %) и времени нагрева 120 с, температура раствора составила 80 °С. Раствор после нагрева не охлаждали. При помощи магнита, приклоненного к колбе, в образце наблюдали

движение крупных частиц. К тому же наблюдается осаждение частиц под действием силы тяжести, что также говорит об их микрометровом размере, в отличие от образцов № 1, № 2. Внешне раствор представляет собой прозрачную жидкость светло-коричневого цвета. На рис. 6 представлены начальные распределения частиц по размерам для образца № 3.

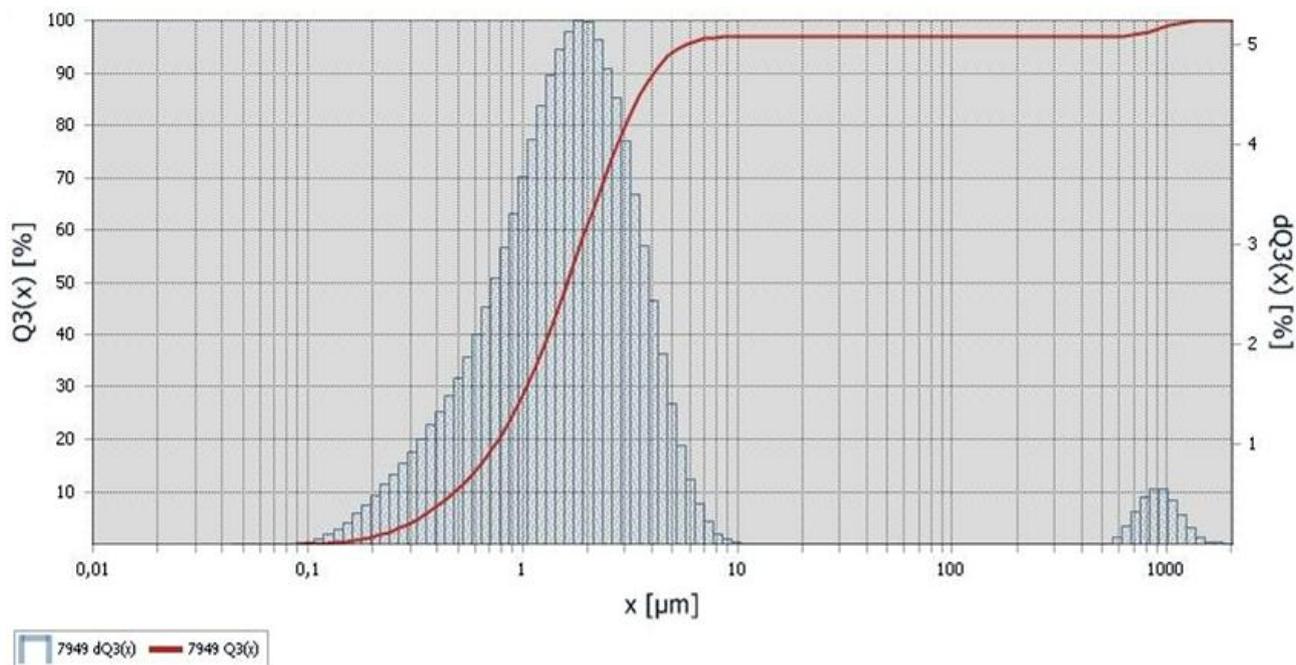


Рис. 6. Распределение частиц по размерам. Образец № 3

Видно, что размер частиц лежит в большом интервале 0,1-1000 мкм, что является показателем микрочастиц.

Как следует из рис. 4, можно отметить получение нано- и микрочастиц в результате более интенсивной скорости введения реагента водного раствора аммиака до значения pH реакционной смеси 7,5-7,7. Полученные частицы имеют размеры $144 \pm 3,4$ нм, сформированные в двух группах размерного ряда частиц, что представляет интерес для целевого формирования двуразмерных частиц в коллоидной среде.

Таким образом, была проведена серия опытов с одинаковыми условиями синтеза нано- и микрочастиц и разной скоростью ввода известного объема NH_4OH до значе- ний pH реакционной смеси 7,5-7,7.

Синтез наноразмерного образца оксида железа Fe_3O_4 -СВЧ-ГК0 проводили из водного раствора (300 мл) $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ (4,3 г) и $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (11,6 г) при мольном отношении солей 1:2, соответственно, путем быстрого добавления известного объема NH_4OH до значений pH реакционной смеси 7,5-7,7 при повышенной температуре (80 °C) в бытовой микроволновой

печи (LG MS-2346W). Измерение температуры проводили с помощью измерительного прибора, помещенного в реакционную смесь. Регулировка температуры в процессе микроволнового синтеза осуществлялась путем включения и выключения микроволнового излучения. После образования черного осадка полученный коллоидный раствор выдерживали при той же температуре в течение 0,5 часа, затем остужали до комнатной температуры, после чего собирали магнитом, промывали несколько раз дистиллированной водой и сушили под вакуумом при температуре 40 °C в течение 4 часов.

Каждый полученный образец был исследован с помощью прибора Analysette 22 Micro Tec Plus.

Выводы

На основании полученных результатов можно утверждать, что СВЧ нагрев обеспечивает быстрое и равномерное нагревание всего объема реакционного раствора, что приводит к однородности в условиях нуклеации и роста зародышей и в конечном итоге – к получению наночастиц наименьшего размера.

Необходимым условием синтеза является охлаждение раствора после нагрева для затормаживания роста наночастиц железа, который возможен в результате остаточного тепла от СВЧ энергии.

Проведение экспериментальных исследований микро- и наноразмерных частиц возможно с использованием аппаратуры, описанной в разделе лабораторная установка: СВЧ установке, анализатор ANALYSETTE 22 Micro Tec PLUS, лабораторных весов ВК-600 фирмы ЗАО «Масса-К», рН-метра, измерителя температуры, паровой бани, вакуумной суши.

Проведенная серия экспериментов показала, что использование метода СВЧ

нагрева позволяет получать стабильные растворы железа с достаточно узким распределением нано-частиц по размеру.

Представляется интересным дальнейшее исследование вопроса условий формирования наночастиц железа в связи с возможностью взаимодействия с карбоновыми двумерными сетками и со слоистыми углеродными материалами.

Таким образом, данный метод получения наночастиц железа в коллоидных растворах может быть рекомендован к реализации в промышленных масштабах. Для реализации данного метода предлагается разработать СВЧ-установку для нагрева раствора.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Методы получения наноразмерных материалов: курс лекций / Урал. фед. ун-т. 2009. 79 с.

2. **Тамразова О.Б.** Препараты железа в лечении пиодермий // Клиническая дерматология и венерология. 2014. № 12 (3). С. 49-57.

3. Microwave-Assisted Chemistry: Synthetic Applications for Rapid Assembly of Nanomaterials and Organics / M.B. Gawande, S.N. Shelke, R. Zboril, R.S. Varma // Accounts of Chemical Research. 2014. Vol. 47. № 4. P. 1338-1348.

4. Rapid Synthesis of Monodispersed α -Fe₂O₃ Nanoparticles from Fe(NO₃)₃ Solution by Microwave Irradiation / H. Katsuki, A. Shiraishi, S. Komarneni et al. // Journal of the Ceramic Society of Japan. 2004. Vol. 112. № 1307. P. 384-387.

5. Microwave synthesis, characterization, and electrochemical properties of α -Fe₂O₃ nanoparticles / N. Kijima, M. Yoshinaga, J. Awaka, J. Akimoto // Solid State Ionics. 2011. Vol. 192. № 1. P. 293-297.

6. **Katsuki H., Komarneni S.** Microwave-Hydrothermal Synthesis of Monodispersed Nanophase α -Fe₂O₃ // Journal of the

American Ceramic Society. 2004. Vol. 84. № 10. P. 2313-2317.

7. Microwave Assisted Iron Oxide Nanoparticles - Structural and Magnetic Properties / S. Riaz, R. Ashraf, A. Akbar, S. Naseem // IEEE Transactions on Magnetics. 2014. Vol. 50. № 8. P. 1-4.

8. **Hong R.Y., Pan T.T., Li H.Z.** Microwave synthesis of magnetic Fe₃O₄ nanoparticles used as a precursor of nanocomposites and ferrofluids // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2006. Vol. 303. № 1. P. 60-68.

9. Effect of variation of molar ratio (pH) on the crystallization of iron oxide phases in microwave hydrothermal synthesis / S. Dhage, Y. Kholam, H. Potdar et al. // Materials Letters. 2002. Vol. 57. № 2. P. 457-462.

10. **Байбуртский Ф.С.** Магнитные жидкости: способы получения и области применения. URL: <http://maineticliquid.narod.ru/autoritv/008.htm>.

11. **Недорезов В.Г., Каминская Т.П.** Рентгеновская седиментография в исследовании составов высокодисперсных порошков // Петербургский журнал электроники. 2016. № 1. С. 12-14.

Кожевников Вячеслав Юрьевич – доцент кафедры «Электроэнергетика и электротехника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Федотов Владислав Дмитриевич – магистрант кафедры «Электроэнергетика и электротехника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Vyacheslav V. Kozhevnikov – Associate Professor, Department of Power and Electrical Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Vladislav D. Fedotov – Master's student, Department of Power and Electrical Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 03.10.23, принята к опубликованию 28.11.23

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

УДК 621.395.66

УВЕЛИЧЕНИЕ ТОЧНОСТИ КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ ТРАНСФОРМАТОРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДОВ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

А.Г. Сошинов, О.С. Атрашенко, Т.В. Копейкина, О.О. Ахмедова

IMPROVING THE ACCURACY OF MONITORING TRANSFORMER PLANTS USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE TECHNOLOGIES

A.G. Soshinov, O.S. Atrashenko, T.V. Kopeykina, O.O. Akhmedova

Силовой трансформатор и его состояние являются одной из составных частей обеспечения надежности электросетевого комплекса. По мере перехода энергокомпаний на техническое обслуживание и ремонт оборудования по фактическому состоянию, различные методики диагностики, в особенности под рабочим напряжением, получили широкое применение. Востребованность контроля также обусловлена большим процентом эксплуатируемого электрооборудования сверх нормативного срока. Для оценки силового трансформатора применяют методику интегрального показателя технического состояния, который включает в себе совокупность диагностических параметров на разных узлах трансформатора. Сведения о состоянии электрооборудования традиционно получают в ходе испытания узлов в ходе ремонтных работ, что требует отключения линии. В настоящее время развитие получили автоматизированный мониторинг и техническое диагностирование электрооборудование, что подтверждается рядом регламентирующих и нормативных документов электросетевых компаний. Предлагаемые производителями системы мониторинга отличаются значительным набором измеряемых параметров, многие из которых

The power transformer condition is one of the key elements ensuring reliability of the power grid. As power companies switch on to the current repair and maintenance system, various diagnostic techniques, particularly under operating voltage, have been widely used. The demand for monitoring is also stipulated by a large percentage of electrical equipment operating beyond the set time limit. To evaluate a power transformer, a methodology of an integral performance index of the technical condition is used, which includes a set of diagnostic parameters applied for various units of the transformer. Information on the state of electrical equipment is commonly obtained in the course of testing the units while doing the repair work, which requires disconnection of the line. Currently, automated monitoring and technical diagnostics of electrical equipment is widely adopted, which is confirmed by a number of regulatory and normative documents used by electric grid companies. The monitoring systems proposed by the manufacturers are distinguished by a significant number of measurement parameters, most of which are additional and not included in the NTD list.

являются дополнительными, не входящими в перечень НТД. В России такие системы применены в качестве пилотных проектов в ходе реконструкции и строительстве объектов в ПАО «Россети Московский регион». Для усовершенствования методов прогнозирования и оптимизации работы электроэнергетической системы, логично использование методов искусственного интеллекта, которые имеют решающее значение для расширения когнитивных способностей человека в этих задачах. В мире метод опорных векторов (SVM), машины экстремального обучения (ELM), нечеткая логика и некоторые другие были объединены с методами интерпретации АРГ для анализа зарождающихся неисправностей в трансформаторах. Модели свёрточной нейронной сети активно используются для классификации неисправностей электрооборудования в ходе тепловизионной съемки трансформаторных подстанций. Использование сети YOLOv4 позволяет выполнить идентификацию 4 типов силового оборудования на подстанции с предварительной обработкой изображения (выявление фона, помех, вызванных экстремальными погодными условиями, шумом и другими факторами). Недостаточный обмен данными между эксплуатирующими компаниями России ведет к медленному внедрению методов искусственного интеллекта.

Ключевые слова: автоматизированная система мониторинга и диагностики, силовые трансформаторы, надёжность, электротехническое оборудование, машинный интеллект, большие данные

Силовые трансформаторы и автотрансформаторы являются одним из значимых и массовых элементов, надежная работа которых обеспечивает эксплуатационную надежность и бесперебойность энергосистемы. Разработка методологии, позволяющей проводить классификацию и прогнозирование вида технического состояния силовых трансформаторов, принимать решения о необходимости своевременного вывода трансформаторов в ремонт и целесообразности вывода оборудования из эксплуатации, является не только актуальной задачей для

In Russia, such systems have been used as pilot projects during the reconstruction and construction of facilities in PJSC Rosseti Moscow Region. To improve the forecasting and optimization methods required in the operation of the electric power system, it would be logical to use artificial intelligence methods, which are critical for expanding a person's cognitive abilities when solving these tasks. The global methods including the Support Vector Method (SVM), Extreme Learning Machines (ELM), fuzzy logic, and others have been combined with ARG interpretation methods used to analyze the incipient faults in transformers. Convolutional neural network models are frequently used for defect classification on electrical equipment of transformer substations using thermal imaging technology. Application of YOLOv4 network allows for identification of 4 types of power equipment of a substation using image pre-processing (detection of background, interference caused by extreme weather conditions, noise and other factors). Insufficient data exchange between the operating companies in Russia actually slows down introduction of artificial intelligence technologies.

Keywords: automated monitoring and diagnostics system, power transformers, reliability, electrical equipment, machine intelligence, big data

электросетевых и генерирующих компаний, но и приобретает центральное значение при реализации стратегии перехода от планово-предупредительных ремонтов к планированию ремонтов по техническому состоянию в соответствии с реализацией концепции риск-ориентированного управления активами [1].

Построение концепции управления активами при эксплуатации силовых трансформаторов и автотрансформаторов напряжением 110 кВ и выше должно также подразумевать прогнозную оценку возможного срока службы существующего оборудования до

перехода его в предельное состояние. При этом следует отметить, что значительное количество силовых трансформаторов и автотрансформаторов, эксплуатируемых как в России, так и в других странах, имеют наработанный срок службы более 25 лет, и тенденция старения парка эксплуатируемого оборудования продолжается.

Из отчета об исследовании CIGRE [2] следует, что более 80 % отказов трансформаторов 110 кВ и выше происходят из-за выхода из строя таких узлов как обмотки, вводы и переключатели ответвлений устройств регулирования напряжения под нагрузкой (РПН).

Большой процент отказов силового трансформатора приходится на период 20-30 лет его функционирования. В условиях эксплуатации и аварийных режимов перегрузок система части трансформатора подвергается тепловым и электрическим воздействиям, следствием которых является изнашивание изоляции уже через 8 лет эксплуатации [3].

В сетях 6-10 кВ количество эксплуатируемых подстанций 6(10)/0,4 кВ значительно превышает 35-110/6-10 кВ, в которых установлено устаревшее аналоговое оборудование, не подлежащее модернизации. Анализ технического состояния электрических сетей в сельской местности показывает, что из эксплуатируемых ТП 6-35/0,38 кВ в хорошем, удовлетворительном состоянии находятся 87,1 %, неудовлетворительном – 10 %, непригодном – 2,9 %. Доля потерь электроэнергии в ТП 10/0,4 кВ составляет 25 % от общего количества элементов электрической сети [4].

Для питания удаленных потребителей характерно однофазное подключение к сети и концентрация в узле нагрузки нелинейных электроприемников. Большая часть силовых трансформаторов напряжением 10/0,4 кВ имеют схему соединения обмоток «звезда/звезда с нулем». Такие трансформаторы для токов обладают большим сопротивлением нулевой последовательности, значение которых увеличивается из-за токов несимметрии и высших гармоник, особенно кратных трем [5].

Наибольшую опасность представляют внезапные отказы оборудования, которые чаще всего приводят к необратимым изменениям. Поэтому своевременное выявление и устранение дефектов на ранней стадии их развития способно увеличить физический ресурс силового трансформатора [6].

Для комплексного определения показателей технико-экономического состояния объектов электроэнергетики используется величина физического износа, зависящая от индекса технического состояния:

$$ИЗНОС = 1 - ИТС, \quad (1)$$

ИТС – количественная оценка технического состояния оборудования, описывающая состояние оборудования в условиях полного жизненного цикла оборудования, включающего несколько межремонтных периодов. Согласно [7], для каждого вида электрооборудования классом напряжения 35 кВ и выше применяются единые логические и математические алгоритмы расчета *ИТС*, учитывающие совокупность диагностических параметров. По их совокупности проводится оценка динамики изменения значений параметров технического состояния оборудования, прогноз изменения и времени достижения критического его состояния.

Еще одним показателем для контроля состояния трансформаторов является так называемый К-фактор (K-Factor). Представляет собой коэффициент влияния искажений тока (напряжения), вносимых нелинейными нагрузками в электрической сети, которые влияют на увеличение потерь в силовом трансформаторе за счет нелинейности нагрузки.

Если К-фактор равен единице, это означает, что нагрузка линейная и в цепи протекает синусоидальный ток. Значения К-фактора выше единицы указывают на дополнительные тепловые потери при нелинейных нагрузках, которые трансформатор способен безопасно рассеять [8].

Использование вышеуказанных параметров в диагностике позволяет не допустить наличия на объектах электросетевого хозяйства оборудования в критическом состоянии и снизить долю имеющего высокие

и средние уровни технического риска с учетом последствий его отказа.

Для получения показателей в соответствии с РД «Объем и нормы испытаний электрооборудования» применяют методы, которые разделяются на неразрушающие и испытательные. Первые работают онлайн без необходимости отключения исследуемого трансформатора (анализ растворенных газов (АРГ), измерение параметров вибрации, обнаружение локальных перегревов тепловизионным методом, измерение частичных разрядов). Вторые основаны на испытании отдельных узлов трансформатора, который необходимо предварительно вывести в ремонт (определение частичных разрядов, спектроскопию в частотной области, испытания изоляции).

Из неразрушающих методов АРГ является одним из наиболее широко используемых диагностических инструментов для оценки состояния трансформатора, поскольку опыт доказал его эффективность. Однако пробы могут быть неправильно собраны, идентифицированы, обработаны. Для более целостного и комплексного подхода к мониторингу силовых трансформаторов необходимо дополнительно использовать результаты комплексного обследования [2].

Автоматизированные системы непрерывного контроля состояния электрооборудования в последние годы получили широкое распространение, обусловленное цифровизацией энергетической отрасли. Данные системы обладают функциональностью комплекса датчиков, реагирующих на максимально возможное число видов развивающихся дефектов и проблем при работе силовых трансформаторов, и наличием расчетно-аналитической модели для логической связи технического состояния с измеряемыми параметрами отдельных устройств и узлов.

В ходе реализации программы при реконструкции и строительстве объектов в ПАО «Россети Московский регион» произведена установка оборудования, оснащенного встроенными датчиками для мониторинга состояния силового трансформатора 110/10 кВ. Для трансформаторов с низким индексом технического состояния

до замены или капитального ремонта установлены мобильные АСМД, состоящие из набора быстромонтируемых датчиков и блоков контроля [10, 11].

Для контроля над состоянием электрооборудования подстанций 10/0,4 кВ целесообразно сначала оснастить объекты аналогово-цифровыми преобразователями (АЦП) для преобразования путем оцифровки аналоговых сигналов с дискретизацией по времени и обработки полученной информации по соответствующему алгоритму. Далее будет возможна передача полученной информации об объекте по телекоммуникационным каналам в центр управления сетями (ЦУС) сетевой организации и в диспетчерскую службу распределительной сети. Такая структура устройства мониторинга обеспечит непрерывный контроль состояния оборудования ТП 6(10) кВ и переводит ее в класс цифровых подстанций [12].

При увеличении автоматизации в области технического диагностирования силового электрооборудования, отмечается проблема недостаточной интерпретации полученных данных, зависящих от множества факторов. При анализе диагностической ценности того или иного признака, используемого для оценки состояния трансформаторного оборудования, определяющее значение имеют аспекты зависимости физико-химического состояния и развития дефектов, монотонности изменения параметра и дефекта [1].

Для усовершенствования методов прогнозирования и оптимизации работы электроэнергетической системы приходится обрабатывать большие объемы разнородных данных, и логично использование методов искусственного интеллекта, которые имеют решающее значение для расширения когнитивных способностей человека в этих задачах [13].

Например, чтобы преодолеть ограничения метода растворенных концентраций газов в трансформаторном масле традиционного треугольника Дюваля, использованы различные методы вычислений и машинного обучения, такие как метод опорных векторов (SVM), нейронные сети (NN), машины экс-

тремального обучения (ELM), нечеткая логика и некоторые другие были объединены с методами интерпретации АРГ для анализа зарождающихся неисправностей в трансформаторах. Эти новые методы повысили точность диагностики неисправностей и решили проблему интерференции между классами неисправностей. Метод k -ближайших соседей (KNN), дополняющий треугольник Дюваля, позволяет в 93 % случаев правильно провести расшифровку данных по сравнению с методом соотношений Роджерса. Недостатком данного метода является относительная применимость при выявлении локальных перегревов тепловым методом диэлектрических потерь [14].

Тепловой метод контроля трансформаторной подстанции предполагает определение мест локального повышения температуры отдельных узлов оборудования вследствие проблем окисления металла, проблем электрохимической коррозии, ослабления болтовых соединений, превышения номинальных токов. По термограмме, получаемой в ходе диагностики тепловизором, можно определить исправность электрооборудования. Но для правильной интерпретации результатов контроля необходим определенный объем базы данных, полученных от аналогичного оборудования. Вывод о состоянии оборудования выполняется в ходе сравнения: с предыдущими термограммами, с нормативными значениями температур отдельных узлов оборудования, разницы температур между фазами и т. д. [15].

Исследование увеличения потерь в силовом трансформаторе за счет нелинейности нагрузки в соответствии со стандартами Underwriters Laboratories также применимо для контроля силовых трансформаторов. Полностью нагруженный сухой трансформатор при K -факторе, равном 4, выделяет на 10 % больше тепла, чем при линейной нагрузке ($K = 1$), а при $K = 13$ он выделяет уже на 25 % больше тепла, которое должно куда-то отводиться, если трансформатор полностью нагружен, или на такую же величину должна быть уменьшена нагрузка трансформатора [16].

Модели сверточной нейронной сети активно используются для классификации неисправностей электрооборудования, например для вводов трансформатора [17]. Более точные характеристики электрооборудования, учитывая сложный фон подстанций, могут быть получены с помощью многомасштабного свёрточного ядра и алгоритма обнаружения объектов сегментацией [18].

Использование сети YOLOv4 позволяет выполнить идентификацию 4 типов силового оборудования на подстанции: изоляторы, кабели, грозозащитные разрядники и трансформаторы, которые являются наиболее ответственными узлами. Такая система может выполнить обработку информации для характеристик инфракрасного изображения по нескольким тепловым параметрам с предварительной обработкой изображения (выявление фона, помех, вызванных экстремальными погодными условиями, шумом и другими факторами) [19].

Выводы

Одним из основных барьеров развития автоматизированной системы диагностики электрооборудования с помощью нейронной сети является недостаточность использования технологии больших данных на всех этапах электроэнергетического цикла: от генерации до конечного потребителя.

Таким образом, решение сложной задачи диагностирования состояния силовых трансформаторов нуждается в контроле многих эксплуатационных параметров с учетом особенностей работы объекта, а также режимов работы и описания процесса его эксплуатации. Необходимый объем обрабатываемых данных невозможен без автоматизации этого процесса.

Наиболее перспективным средством обнаружения, регистрации и прогнозирования технического состояния являются автоматизированные системы мониторинга и диагностики силовых трансформаторов [10], которые охватывают узлы системы благодаря большому количеству датчиков и позволяют на ранней стадии выявить начало негативных процессов. Данные системы необходимо активно

внедрять в работу электроэнергетической системы. Наличие большого количества данных, накапливаемых в ходе работы измерительных комплексов, обмена данными внутри отрасли и технологий Big

Data, позволит успешно внедрить программу искусственного интеллекта для оценки и прогнозирования состояния электрооборудования, в особенности силовых (авто)трансформаторов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Львов М.Ю., Львов Ю.Н.** Методологические принципы управления активами при эксплуатации силовых трансформаторов и автотрансформаторов напряжением 110 кВ и выше электрических сетей // Электрические станции. 2020. № 4 (1065). С. 33-41.
2. Почему оказывается недостаточным использование диагностического метода анализа газов, растворенных в трансформаторном масле? // Электроэнергия. Передача и распределение. 2021. № 2 (65). С. 132-137.
3. Power transformer insulation system: A review on the reactions, fault detection, challenges and future prospects / Vimal Angela Thiviyathan, Pin Jern Ker, Yang Sing Leong et al. // Journal. 2022. Vol. 61. Iss. 10. P. 7697-7713.
4. **Сошинов А.Г., Атрашенко О.С.** Новая концепция построения распределительных сетей для электроснабжения удаленных потребителей // Электроэнергия. Передача и распределение. 2021. № 2 (65). С. 54-58.
5. **Юндин М.А., Жариков Д.Т., Пономаренко Т.З.** О влиянии несимметрии и несинусоидальности токов на потери электроэнергии в силовом трансформаторе // Агротехника и энергообеспечение. 2021. № 4 (33). С. 114-118.
6. **Монастырский А.Е.** Современные системы мониторинга технического состояния силовых маслонаполненных трансформаторов // Материаловедение. Энергетика. 2021. Т. 27. № 3. С. 97-108. DOI 10.18721/JEST.27309.
7. Приказ Минэнерго России от 26 июля 2017 г. № 676 «Об утверждении методики оценки технического состояния основного технологического оборудования и линий электропередачи электрических станций и электрических сетей».
8. **Гуревич В.** Источники бесперебойного электропитания: устройство, принципы действия и применение // Силовая электроника. 2012. Т. 6. № 39. С. 63-70.
9. TDM – комплексная система мониторинга и диагностики состояния силовых трансформаторов // Диагностические решения в энергетике [сайт]. 2022. URL: <https://dimrus.com/tdm.html> (дата обращения: 17.09.2022).
10. **Талакин С., Растегняев Д.** Использование систем онлайн-диагностики для оценки текущего состояния (авто) трансформаторов, в том числе с низким ИТС // Электроэнергия. Передача и распределение. 2021. № S3 (22). С. 2-8.
11. **Русов В.А.** Организация мониторинга силовых трансформаторов с низким индексом технического состояния // Энергоэксперт. 2018. № 2 (66). С. 32-34.
12. **Цыгулев Н., Гопаца И., Михайлов В.** Модульное устройство для дистанционного мониторинга электрооборудования ТП 6-10 кВ // Новости ЭлектроТехники. 2021. № 1 (127). С. 38-41.
13. Artificial Intelligence for Electricity Supply Chain automation / Lucas Richter, Malte Lehna, Sophie Marchand et al. // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2022. Vol. 163.
14. **Islam M.M., Lee G., Hettiwatte S.N.** A nearest neighbour clustering approach for incipient fault diagnosis of power transformers // Electr. Eng. 99. 2017. 1109-1119.
15. **Wenyun Shi, Xiaoming Ren.** Electrical Fault Detection Equipment Based on Infrared Image Fusion // Procedia Computer Science. 2022. Vol. 208. P. 509-515.
16. **Deshpande K., Holmukhe R., Angal Y.** K-Factor Transformers and Non-linear Loads // National Conference. Bharati Vidyapeeth Deemed University, College of Engineering. 2011.

17. **Adou M.W., Xu H., Chen G.** Insulator faults detection based on deep learning // IEEE 13th international conference on anti-counterfeiting, security, and identification. 2019. Vol. 13. P. 173-177.

18. An intelligent infrared image fault diagnosis for electrical equipment / Y. Lin, W. Zhang, H. Zhang et al. // Asia conference

on power and electrical engineering. 2020. Vol. 5. P. 1829-1833.

19. **Tao Liu, Guolong Li, Yuan Gao.** Fault diagnosis method of substation equipment based on You Only Look Once algorithm and infrared imaging // Energy Reports. 2022. Vol. 8. Supplement 7. P. 171-180.

Сошинов Анатолий Григорьевич – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Электроснабжение промышленных предприятий» Камышинского технологического института (филиала) Волгоградского государственного технического университета

Атрашенко Ольга Сергеевна – старший преподаватель кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Камышинского технологического института (филиала) Волгоградского государственного технического университета

Копейкина Татьяна Васильевна – старший преподаватель кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Камышинского технологического института (филиала) Волгоградского государственного технического университета

Ахмедова Ольга Олеговна – старший преподаватель кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Камышинского технологического института (филиала) Волгоградского государственного технического университета

Anatoly G. Soshinov – PhD (Technical Sciences), Associate Professor, Head: Department Electricity Supply of Industrial Enterprises, Kamyshin Technological Institute (branch) of Volgograd State Technical University

Olga S. Atrashenko – Senior Lecturer, Department Electricity Supply of Industrial Enterprises, Kamyshin Technological Institute (branch) of the Volgograd State Technical University

Tatyana V. Kopeykina – Senior Lecturer, Department of Electricity Supply of Industrial Enterprises, Kamyshin Technological Institute (branch) of Volgograd State Technical University

Olga O. Akhmedova – Senior Lecturer, Department of Electricity Supply of Industrial Enterprises, Kamyshin Technological Institute (branch) of Volgograd State Technical University

Статья поступила в редакцию 03.10.23, принята к опубликованию 27.10.23

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

УДК 621.3.078

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОГРАНИЧЕНИЙ НА БЫСТРОДЕЙСТВИЕ И ЖЕСТКОСТЬ РАДИАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОДШИПНИКОВ НАГНЕТАТЕЛЯ ГАЗОПЕРЕКАЧИВАЮЩЕГО АГРЕГАТА

В.Д. Костюков, А.В. Стариков

DEFINING THE LIMITS ON SPEED AND STIFFNESS OF RADIAL ELECTROMAGNETIC BEARINGS IN THE SUPERCHARGER OF A GAS PUMPING UNIT

V.D. Kostyukov, A.V. Starikov

В статье поставлена задача определения ограничений на быстродействие и жесткость радиальных электромагнитных подшипников нагнетателя газоперекачивающего агрегата. Проведено аналитическое исследование влияния начального значения скорости перемещения ротора на устойчивость системы управления электромагнитного подшипника. Найдены граничные с позиции устойчивости значения начальной скорости перемещения в функции напряжения питания для конкретного типа нагнетателя газоперекачивающего агрегата и параметров настроек регуляторов. Проведено компьютерное моделирование радиального электромагнитного подшипника нагнетателя и показано, что максимальное значение скорости перемещения ротора в несколько раз меньше граничного значения. Определены динамическая жесткость магнитной опоры и первая резонансная частота ротора нагнетателя. Показано, что для рассматриваемого газоперекачивающего агрегата имеется резерв для повышения быстродействия и динамической жесткости электромагнитного подшипника.

The article aims to determine the limits on speed and rigidity of radial electromagnetic bearings in the supercharger of a gas pumping unit. Analytical studies of the influence of initial value of the rotor dynamics on stability and control quality of an electromagnetic bearing system are carried out. The boundary values relating stability of initial dynamics as a function of voltage supply for a specific type of a supercharger of a gas pumping unit and the regulator setting parameters have been determined. Computer simulation of the supercharger of the radial electromagnetic bearing is carried out. It is shown that the maximum value of the rotor dynamics is several times lower than the limit value. The dynamic stiffness of the magnetic support and the primary resonance frequency of the supercharger rotor are determined. It is shown that the considered gas pumping unit is provided with a reserve for increasing the speed and dynamic stiffness of the electromagnetic bearing.

Ключевые слова: *электромагнитный подшипник, устойчивость, быстродействие, жесткость*

Keywords: *electromagnetic bearing, stability, response speed, rigidity*

Введение

Целый ряд газоперекачивающих агрегатов магистральных газопроводов имеют нагнетатели, которые оснащены электромагнитным подвесом ротора. Применение электромагнитных подшипников позволяет исключить маслосистему, необходимую для работы традиционных гидростатических подшипников скольжения, которые также применяются в энергетических машинах компрессорных станций. При этом достигается большой экономический эффект за счет снижения потребления компрессорной станцией масла и электроэнергии, которая необходима для функционирования двигателей маслосистемы.

Электромагнитные подшипники нагнетателя также потребляют электрическую энергию, но на порядок меньше, чем маслосистема гидростатических подшипников. Важным свойством электромагнитных подшипников является то, что их техническое обслуживание производится в три раза реже, чем подшипников скольжения, а ремонт – в два раза [1].

Однако качество работы электромагнитного подвеса ротора значительно зависит от быстродействия системы управления, которая определяет статическую и динамическую жесткость магнитных опор [2].

Целью проводимого исследования является определение ограничений на быстродействие и жесткость радиальных электромагнитных подшипников нагнетателя газоперекачивающего агрегата ГПА Ц-16, вызванных принципом их работы.

Решение задачи

Для достижения поставленной цели необходимо проанализировать уравнения движения ротора в магнитном поле радиального электромагнитного подшипника, например, по оси y [3].

$$\left. \begin{aligned} m \frac{d^2 y}{dt^2} &= k_{FI} \left[\frac{I_2^2}{(\delta - y)^2} - \frac{I_4^2}{(\delta + y)^2} \right] - \\ &- G_y + F_{gy}; \\ U_2 &= R_2 I_2 + \frac{2k_{FI}}{\delta - y} \frac{dI_2}{dt} + \frac{2k_{FI} I_2}{(\delta - y)^2} \frac{dy}{dt}; \\ U_4 &= R_4 I_4 + \frac{2k_{FI}}{\delta + y} \frac{dI_4}{dt} - \frac{2k_{FI} I_4}{(\delta + y)^2} \frac{dy}{dt}, \end{aligned} \right\} (1)$$

где m – масса ротора, приходящаяся на одну ось радиального электромагнитного подшипника; y – перемещение ротора относительно центра магнитной системы; k_{FI} – конструктивный коэффициент электромагнитного подшипника; I_2 и I_4 – токи в противоположных электромагнитах; U_2 и U_4 – напряжения, подаваемые на обмотки соответствующих магнитов; δ – зазор между статором и ротором при расположении ротора в центре магнитной системы; R_2 и R_4 – сопротивления обмоток электромагнитов; G_y и F_{gy} – сила веса и возмущающая сила, действующие по оси y ; t – время.

Все уравнения в (1) нелинейны, потому что в них наблюдается перемножение переменных. В связи с этим для синтеза регуляторов системы управления электромагнитным подшипником необходимо произвести линеаризацию этих уравнений и найти передаточные функции по управляющим и возмущающему воздействиям. В качестве управляющих воздействий принимаются напряжения на обмотках электромагнитов U_2 и U_4 , а основным возмущением является внешняя сила F_{gy} .

В процессе линеаризации системы уравнений (1) были найдены передаточные функции электромагнитного подшипника по управляющим воздействиям [4]

$$W_{U_2}(p) = \frac{y(p)}{U_2(p)} = \frac{k_{U_2}(b_{01}p+1)}{a_0p^4 + a_1p^3 + a_2p^2 + a_3p - 1}, \quad (2)$$

$$W_{U_4}(p) = \frac{y(p)}{U_4(p)} = \frac{k_{U_4}(b_{02}p+1)}{a_0p^4 + a_1p^3 + a_2p^2 + a_3p - 1}, \quad (3)$$

где

$$\begin{aligned} k_{U_2} &= \frac{d_3}{k_{Fy} - d_5 + d_6}; \quad b_{01} = T_4; \\ k_{U_4} &= \frac{d_4}{k_{Fy} - d_5 + d_6}; \quad b_{02} = T_2; \\ a_0 &= \frac{mT_2T_4}{k_{Fy} - d_5 + d_6}; \quad a_1 = \frac{m(T_2 + T_4)}{k_{Fy} - d_5 + d_6}; \\ a_2 &= \frac{m + d_1T_4 + d_2T_2 - k_{Fy}T_2T_4}{k_{Fy} - d_5 + d_6}; \\ a_3 &= \frac{d_1 + d_2 + (d_5 - k_{Fy})T_4 - (d_6 + k_{Fy})T_2}{k_{Fy} - d_5 + d_6}; \\ k_{Fy} &= k_{FI} \left[\frac{2I_{20}^2}{(\delta - y_0)^3} + \frac{2I_{40}^2}{(\delta + y_0)^3} \right]; \\ d_1 &= \frac{4k_{FI}^2 I_{20}^2}{(\delta - y_0)^4 R_2 + 2k_{FI} V_0 (\delta - y_0)^2}; \\ d_2 &= \frac{4k_{FI}^2 I_{40}^2}{(\delta + y_0)^4 R_4 - 2k_{FI} V_0 (\delta + y_0)^2}; \\ d_3 &= \frac{2k_{FI} I_{20}}{(\delta - y_0)^2 R_2 + 2k_{FI} V_0}; \\ d_4 &= \frac{2k_{FI} I_{40}}{(\delta + y_0)^2 R_4 - 2k_{FI} V_0}; \\ d_5 &= \frac{4k_{FI}^2 I_{20} [2I_{20} V_0 + (\delta - y_0) I'_{20}]}{(\delta - y_0)^3 [R_2 (\delta - y_0)^2 + 2k_{FI} V_0]}; \\ d_6 &= \frac{4k_{FI}^2 I_{40} [2I_{40} V_0 - (\delta + y_0) I'_{40}]}{(\delta + y_0)^3 [R_4 (\delta + y_0)^2 - 2k_{FI} V_0]}; \end{aligned}$$

$I_{20}, I_{40}, y_0, I'_{20}, I'_{40}$ и V_0 – начальные значения токов, перемещения и их производных; p – комплексная переменная.

Передаточная функция по отношению к изменению возмущающего воздействия $F_{ey}(p)$ определяется выражением [4]

$$W_{F_{ey}}(p) = \frac{y(p)}{F_{ey}(p)} = \frac{1}{k_{Fy} - d_5 + d_6} \times \frac{(T_2p+1)(T_4p+1)}{(a_0p^4 + a_1p^3 + a_2p^2 + a_3p - 1)}. \quad (4)$$

Передаточные функции (2)-(4) показывают, что динамические свойства электромагнитного подшипника как объекта управления зависят от начальных условий. Очевидно, что это должно отразиться на работоспособности системы управления магнитной опоры. Следует отметить, что исследования влияния начальных значений токов I_{20} и I_{40} и перемещения y_0 на устойчивость трехконтурной системы управления электромагнитным подшипником проводились [2, 5], но вопросам работоспособности магнитной опоры с учетом начальных значений производных токов I'_{20}, I'_{40} и скорости перемещения ротора V_0 внимания не уделялось.

Трехконтурная система управления, которая находит применение в электромагнитных подшипниках, имеет следующее характеристическое уравнение [5]:

$$a_{01}p^5 + a_{11}p^4 + a_{21}p^3 + a_{31}p^2 + a_{41}p + 1 = 0, \quad (5)$$

где

$$\begin{aligned} a_{01} &= \frac{a_0 T_{II}}{k_2}; \quad a_{11} = \frac{(a_1 + k_1 b_0 T_{II}) T_{II}}{k_2}; \\ a_{21} &= \frac{[a_2 + k_1 (b_0 + T_{II}) + k_2 b_0 T_{II}] T_{II}}{k_2}; \\ a_{31} &= \frac{[a_3 + k_1 + k_2 (b_0 + T_{II})] T_{II}}{k_2} + b_0 T_{II}; \\ a_{41} &= \frac{(k_2 - 1) T_{II}}{k_2} + b_0 + T_{II}; \end{aligned}$$

$$k_1 = k_{\text{ПД}} k_{\text{ОУ}} k_{\text{ОСС}} k_{\text{ДП}}; \quad k_2 = k_{\text{П}} k_{\text{ПД}} k_{\text{ОУ}} k_{\text{ДП}};$$

$$k_{\text{ОУ}} = \frac{k_{\text{ШИМ}} U (d_3 + d_4)}{k_{\text{Fy}} - d_5 + d_6};$$

где $k_{\text{ШИМ}}$ – коэффициент передачи широтно-импульсного модулятора; U – опорное напряжение силового преобразователя; $T_{\text{И}}$, $T_{\text{ПД}}$, $k_{\text{ПД}}$, $k_{\text{П}}$ и $k_{\text{ОСС}}$ – параметры регуляторов, которые выбираются по известной методике [2]; $k_{\text{ДП}}$ – коэффициент передачи датчика положения ротора.

Анализ формул (2)-(5) показывает, что на все коэффициенты характеристического уравнения влияют начальные условия I'_{20} , I'_{40} и V_0 , причем при $I'_{20} = I'_{40} = 0$ и $V_0 = 0$ мы получим результат, показывающий, что при корректном выборе параметров регуляторов система управления электромагнитным подшипником будет устойчива при любых перемещениях ротора в пределах страховочных подшипников и при любых начальных значениях токов I_{20} и I_{40} [5]. Поэтому определимся прежде всего с возможным диапазоном изменения начальных условий I'_{20} и I'_{40} . Закон изменения, например, тока I_2 во времени при неподвижном роторе определяется уравнением

$$U_2(t) = I_2(t) R_2 + L_2 \frac{dI_2(t)}{dt}, \quad (6)$$

где $L_2 = \frac{2k_{\text{FI}}}{\delta - y}$ – индуктивность обмотки одного из магнитов.

Очевидно, что максимальная производная тока будет наблюдаться при переключении транзисторов силового преобразователя. Из решения уравнения (6) следует, что изображение тока $I_2(p)$ при подаче на обмотку опорного напряжения U будет иметь вид [6]

$$I_2(p) = \frac{L_2 I_{20} p + U}{R_2 (T_{22} p + 1) p}, \quad (7)$$

где $T_{22} = \frac{L_2}{R_2}$.

По таблицам обратных преобразований Лапласа [7] найдем оригинал от изображения (7)

$$I_2(t) = \frac{U}{R_2} \left[1 + \left(\frac{L_2 I_{20}}{U} - 1 \right) e^{-\frac{t}{T_{22}}} \right]. \quad (8)$$

Из выражения (8) следует зависимость изменения производной тока при переключении силовых транзисторов:

$$\frac{dI_2(t)}{dt} = \frac{U}{T_{22} R_2} \left(1 - \frac{L_2 I_{20}}{U} \right) e^{-\frac{t}{T_{22}}}. \quad (9)$$

Анализ формулы (9) показывает, что максимум производной тока будет наблюдаться при $t = 0$ и $I_{20} = 0$

$$I'_{20.\text{max}} = \frac{U}{T_{22} R_2}. \quad (10)$$

Радиальный электромагнитный подшипник нагнетателя газоперекачивающего агрегата ГПА Ц-16 имеет следующие параметры [8] при центральном положении ротора, то есть при $y = 0$: $m = 385$ кг, $k_{\text{FI}} = 3,8798 \cdot 10^{-5}$ Нм²/А², $\delta = 0,00075$ м, $R_2 = R_4 = 1,7$ Ом, $L_2 = L_4 = 0,103$ Гн, $T_{22} = 0,0609$ с. Следовательно, в соответствии с формулой (10) при опорном напряжении силового преобразователя $U = 220$ В максимальное значение производной тока будет равно $I'_{20.\text{max}} = 2125$ А/с, при $U = 110$ В – $I'_{20.\text{max}} = 1062$ А/с, при $U = 48$ В – $I'_{20.\text{max}} = 464$ А/с, причем при дифференциальном законе регулирования токами I_2 и I_4 максимальные значения $I'_{40.\text{max}}$ будут иметь те же самые численные значения, но с отрицательным знаком.

Решая характеристическое уравнение (5) при параметрах настройки регуляторов $k_{\text{нд}} = k_n = 8$, $T_{\text{нд}} = 0,183$ с, $T_u = k_{\text{occ}} = 0,0128$ с [8], разных уровнях опорного напряжения U и производных тока $I'_{20.\text{max}}$ и $I'_{40.\text{max}}$, найдем зависимость граничного значения начальной скорости $V_{0.\text{сп}}$, от величины опорного напряжения силового преобразователя U (таблица).

Значения $V_{0,sp}$ от величины опорного напряжения силового преобразователя U

$U, В$	48	110	220
$V_{0,sp}, м/с$	0,116	0,162	0,207

Здесь $V_{0,sp}$ понимается как значение скорости перемещения ротора, при котором система управления находится на границе устойчивости. Анализ данных таблицы позволяет сказать, что минимальное гра-

ничное значение начальной скорости перемещения ротора равно $V_{0,sp} = 0,116$ м/с при опорном напряжении силового преобразователя $U = 48$ В.

Произведем моделирование системы управления радиальным электромагнитным подшипником нагнетателя газоперекачивающего агрегата ГПА Ц-16 при $U = 48$ В и выбранных параметрах пропорционально-дифференциального k_{nd} , T_{nd} пропорционального k_n и интегрального T_u (рис. 1).

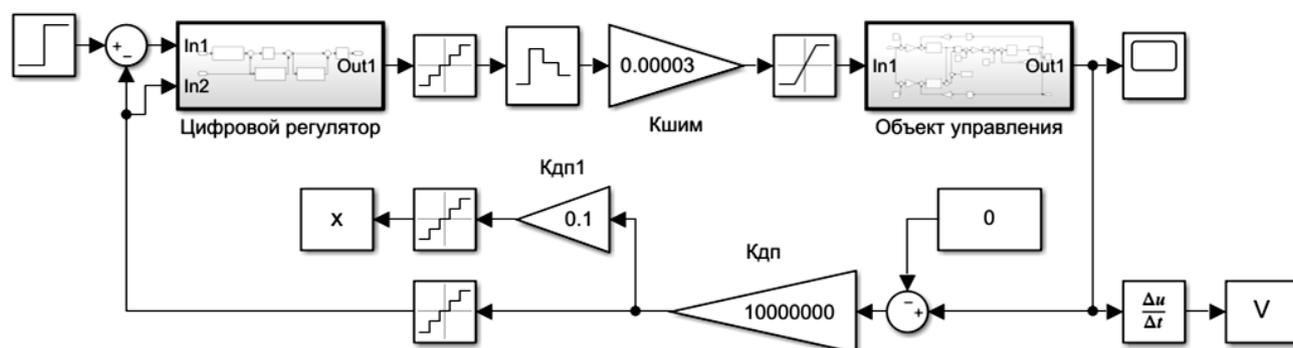


Рис. 1. Расчетная модель системы управления электромагнитным подшипником

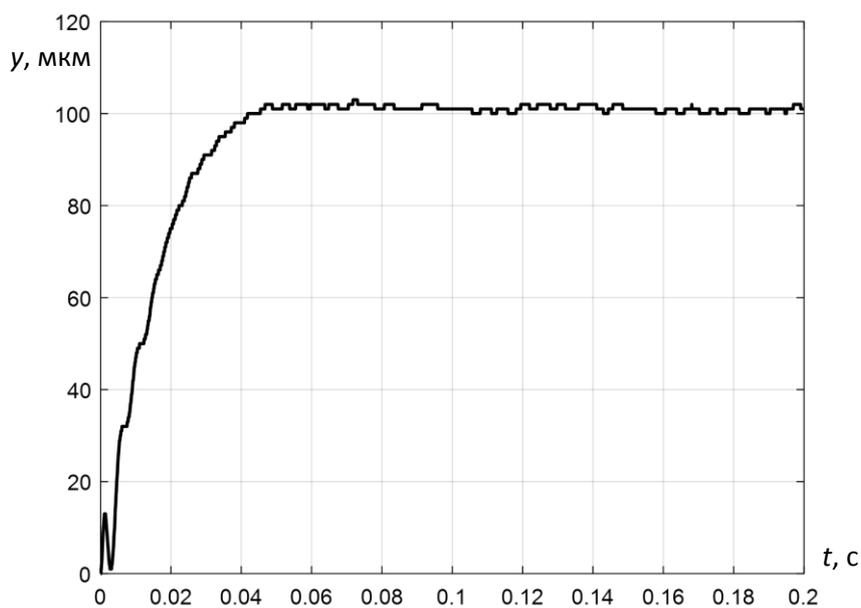


Рис. 2. График переходного процесса при перемещении ротора на 100 мкм

Графики перемещения ротора (рис. 2) и скорости (рис. 3) при ступенчатом изменении задающего воздействия на 100 мкм показывают, что максимальное значение скорости не превышает $V = 0,018$ м/с. Следовательно, при выбранных параметрах регуляторов система управления радиальным

электромагнитным подшипником будет устойчиво работать во всем диапазоне начальных условий. График переходного процесса при набросе возмущающей силы в $\Delta F_{gy} = 1000$ Н (рис. 4) показывает, что динамический провал ротора составляет $\Delta y_{max} = 19$ мкм. Это позволяет сделать вы-

вод, что динамическая жесткость опоры равна $C_y^{дин} = \frac{\Delta F_{ey}}{\Delta y_{max}} = 52 \cdot 10^6$ Н/м.

Поскольку масса ротора, приходящаяся на один радиальный подшипник нагнетателя газоперекачивающего агрегата ГПА Ц-16, составляет $m_1 = 545$ кг, первая резонансная частота ротора будет равна

$$\omega_{1p} = \sqrt{\frac{2C_y^{дин}}{m_1}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 52 \cdot 10^6}{545}} = 439 \text{ рад/с.}$$

Эта частота находится внутри диапазона

скоростей вращения ротора, и при разгонах и торможениях нагнетателя на его работу могут оказывать влияние резонансные явления.

Однако проведенное исследование показывает, что возможен поиск путей для дальнейшего увеличения быстродействия системы управления радиальным электромагнитным подшипником и, следовательно, повышения динамической жесткости опоры. При этом с позиции ограничений по скорости перемещения ротора имеется резерв приблизительно в 5 раз.

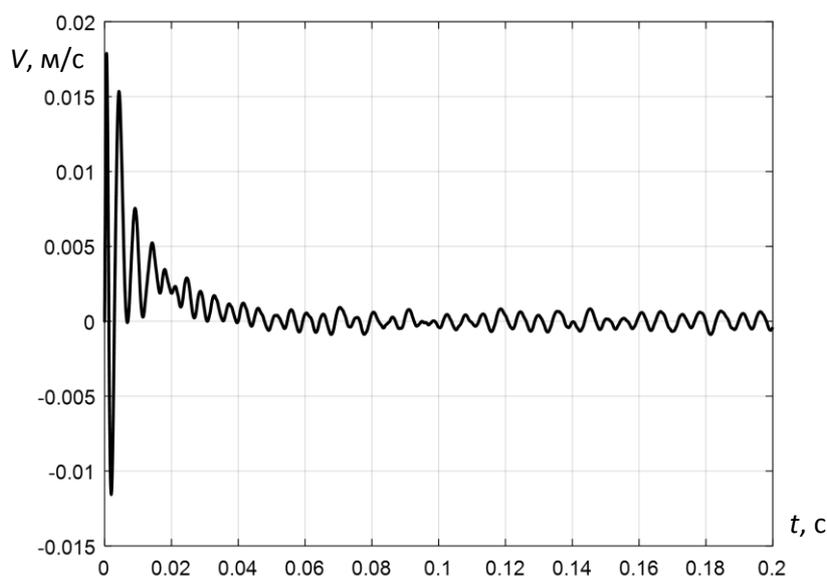


Рис. 3. График скорости перемещения ротора

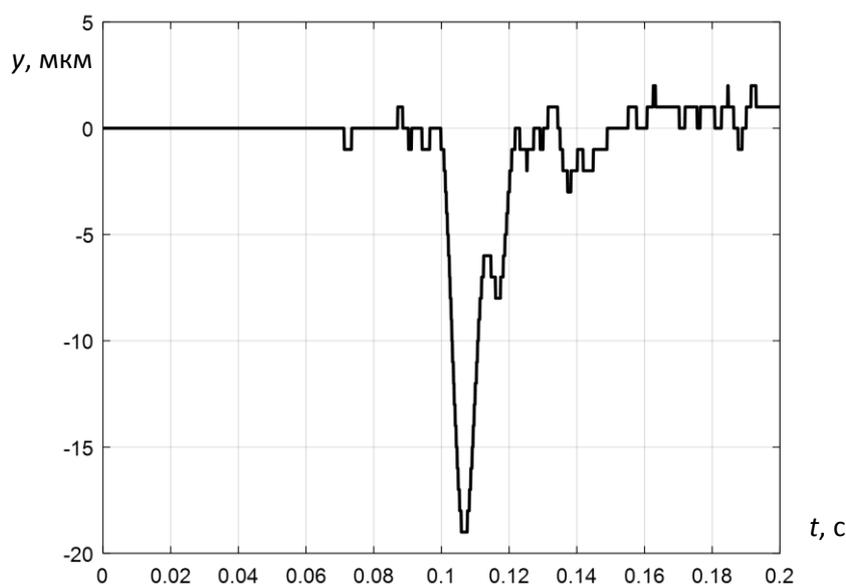


Рис. 4. График переходного процесса при набросе возмущающей силы в $F_{ey} = 1000$ Н

Выводы

1. На устойчивость системы управления электромагнитным подшипником оказывает влияние скорость перемещения ротора в поле электромагнитов.

2. Граничные с позиции устойчивости значения скорости перемещения ротора определяют максимально допустимое

быстродействие и динамическую жесткость электромагнитного подшипника.

3. Исследование системы управления радиальным электромагнитным подшипником нагнетателя газоперекачивающего агрегата ГПА Ц-16 показывает наличие резерва в повышении быстродействия и динамической жесткости опор.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Сарычев А.П. Разработка электромагнитных подшипников для серии компрессоров газоперекачивающих агрегатов // Труды НИИ ВНИИЭМ. Москва, 2009. Т. 110. С. 3-10.

2. Стариков А.В. Методология синтеза многосвязной системы электромагнитных подшипников с повышенными жесткостными характеристиками энергетических объектов: дис. ... д-ра техн. наук. Самара: СамГТУ, 2013. 354 с.

3. Журавлёв Ю.Н. Активные магнитные подшипники: теория, расчёт, применение. Санкт-Петербург: Политехника, 2003. 206 с.

4. Линеаризованная математическая модель электромагнитного подшипника при независимом управлении напряжениями противоположных магнитов / А.В. Стариков, В.Д. Костюков, В.Н. Козловский, О.В. Пантюхин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2023. Вып. 9. С. 388-392.

5. Стариков А.В., Рокало Д.Ю., Костюков В.Д. Анализ устойчивости системы

управления электромагнитным подшипником с учётом вариации его параметров // Вопросы электротехнологии. 2023. № 2 (39). С. 66-73.

6. Стариков А.В., Беляева О.С., Козловский В.Н. Анализ влияния ЭДС самоиндукции на работу полупроводниковых силовых преобразователей // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2023. Вып. 8. С. 559-567.

7. Макаров И.М., Менский Б.М. Линейные автоматические системы (элементы теории, методы расчета и справочный материал). Москва: Машиностроение, 1982. 504 с.

8. Стариков А.В., Костюков В.Д., Мочалов М.Д. Анализ работы радиальных электромагнитных подшипников нагнетателя газоперекачивающего агрегата при смещении центра магнитной системы // Ашировские чтения: сб. трудов Всерос. науч.-практ. конф. Т. 2. Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2023. С. 213-221.

Стариков Александр Владимирович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электропривод и промышленная автоматика» Самарского государственного технического университета

Костюков Владислав Дмитриевич – аспирант кафедры «Электропривод и промышленная автоматика» Самарского государственного технического университета

Alexander V. Starikov – Dr. Sc. Tech., Professor, Head: Department of Electric Drive and Industrial Automation, Samara State Technical University

Vladislav D. Kostyukov – Postgraduate student, Department of Electric Drive and Industrial Automation, Samara State Technical University

Статья поступила в редакцию 05.10.23, принята к опубликованию 27.10.23

УДК 311.2:681.52

АЛГОРИТМ РАЦИОНАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ СОСТАВОМ АГРЕГАТОВ ГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИИ ПРИ ВТОРИЧНОМ РЕГУЛИРОВАНИИ ЧАСТОТЫ И МОЩНОСТИ

М.Е. Усков

AN ALGORITHM FOR A RATIONAL CONTROL SYSTEM OF HYDROELECTRIC POWER PLANTS UNDER SECONDARY FREQUENCY AND CAPACITY REGULATION

M.E. Uskov

В статье рассматривается система рационального управления составом и степенью загрузки гидроагрегатами гидроэлектростанции. Представлена структурно-алгоритмическая схема рационального управления составом агрегатов гидроэлектростанции, подключенной к центральной координирующей системе автоматического вторичного регулирования частоты и мощности.

Ключевые слова: рациональное управление составом агрегатов, автоматическое вторичное регулирование частоты и мощности

Повышение эффективности использования водных ресурсов на гидроэлектростанции (далее ГЭС) – одна из важных задач при эксплуатации. Решением данного вопроса является создание системы рационального управления составом агрегатов (далее – РУСА) необходимо для определения оптимального числа и состава агрегатов для реализации заданной нагрузки ГЭС при минимальных затратах воды при оперативном выборе состава гидроагрегатов (далее ГА) и степени их загрузки.

Целью создания РУСА является экономичное ведение режима ГЭС за счёт учёта индивидуальных расходных характеристик ГА при оперативном выборе состава ГА и распределении задания мощности между ГА.

Система РУСА предназначена для экономической оптимизации выбора состава ГА ГЭС и распределения заданий плановой мощности между ГА с учётом выполнения требу-

The paper considers a system of rational control of the composition and loading degree of hydroelectric units at hydropower stations. The article presents the structure and algorithm for rational control of hydropower plant units connected to the central coordinating system for automated secondary frequency and capacity regulation.

Keywords: rational control of unit composition, automated secondary frequency and capacity regulation

емого суммарного задания плановой мощности ГЭС, обеспечения необходимых резервов (первичного/вторичного регулирования) и существующих технологических ограничений, а также равномерного износа основного оборудования.

В результате создания системы РУСА должны быть решены следующие задачи:

1) нахождение наиболее экономичного состава включенных ГА (т. е. состава, обеспечивающего максимальный КПД) с учётом ограничений и равномерной выработки ресурса ГА;

2) автоматизация деятельности оперативного персонала ГЭС по выбору состава ГА;

3) применение оптимального закона распределения плановой мощности между ГА для получения максимального КПД ГЭС.

Место системы РУСА в иерархии контуров управления мощностью ГА можно представить на схеме, которая показана на рис. 1.

Место системы РУСА в иерархии систем технологического управления ГЭС

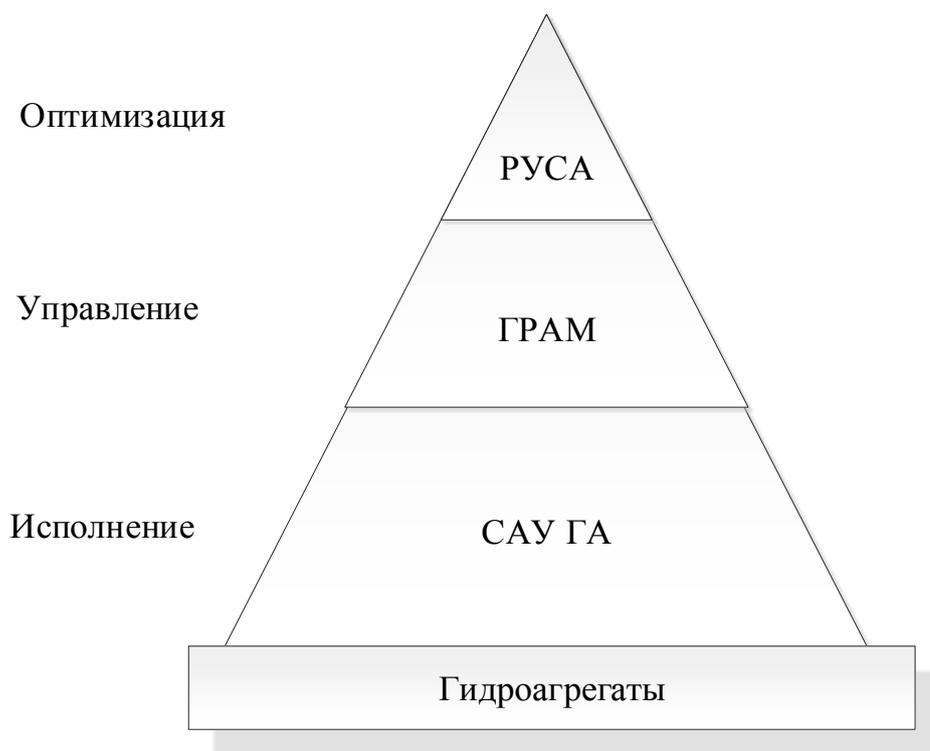


Рис. 1. РУСА в иерархии контуров управления мощностью ГА

В управляющем режиме РУСА все ГА, находящиеся под управлением группового регулирования активной мощности (далее ГРАМ) и не исключенные из РУСА оперативным персоналом, в том числе находящиеся в резерве (остановленные и готовые к пуску), должны являться объектами управления (т. е. иметь возможность управлять этими ГА). ГА, находящиеся в режиме индивидуального управления, ремонте или исключенные из РУСА оперативным персоналом, должны учитываться РУСА как неуправляемые.

Структурная схема управления мощностью ГА с иерархией контуров управления показана на рис. 2. Для каждого уровня воздействия существуют входные внешние значения, которые несут необходимые данные для расчета с ограничения (постоянными или переменные).

Согласно техническим требованиям к генерирующему оборудованию системного оператора (далее СО) при подключении к центральной координирующей си-

стеме автоматического регулирования частоты и мощности (далее ЦКС АРЧМ): «В случае отдачи команд или оперативный персонал соответствующей ГЭС (ГАЭС) должен самостоятельно, без предварительного согласования с диспетчером соответствующего диспетчерского центра включать в работу и отключать гидроагрегаты ГЭС (ГАЭС) для обеспечения заданного значения резерва активной мощности на загрузку/разгрузку (количества агрегатов, включенных в сеть). Резерв активной мощности на загрузку/разгрузку, необходимый для работы ЦС (ЦКС) АРЧМ, может быть задан диспетчерскими командами или диспетчерскими распоряжениями (диспетчерскими инструкциями), а также может быть задан как необходимое количество гидроагрегатов, включенных в сеть и под управление системы ЦС (ЦКС) ГРАМ». [1] Поэтому можно сделать вывод об необходимости работы РУСА с условиями вторичного регулирования.

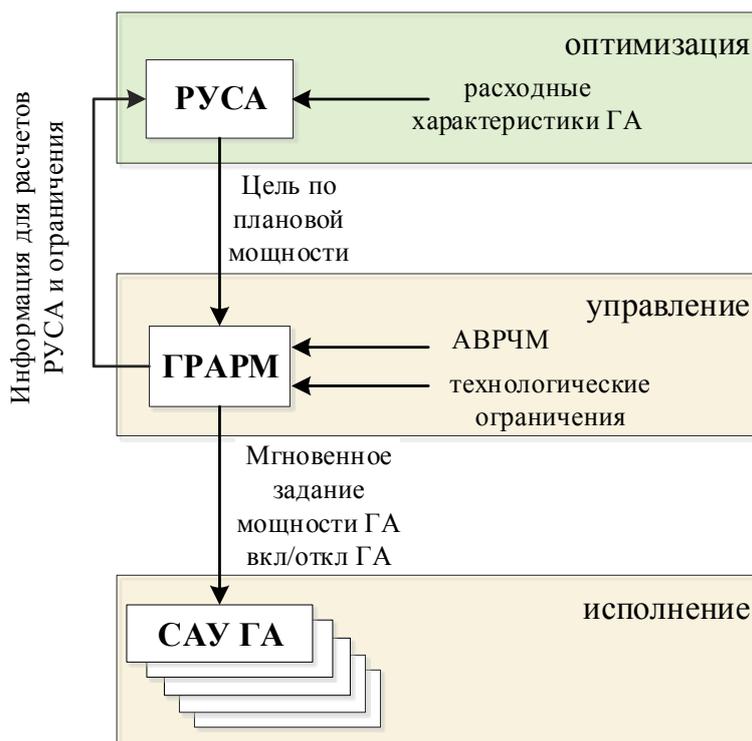


Рис. 2. Структурная схема управления мощностью ГА

Рассмотрим математическую постановку задачи оптимизации режимов с автоматическим вторичным регулированием частоты и мощности (далее АВРЧМ).

Необходимо найти такие значения мощности ГА N_i , при которых функция минимальна:

$$f(N) = \sum_{i=1}^{i=n} Q_i(N_i) \rightarrow \min. \quad (1)$$

Постоянными заданными значениями являются расходные характеристики ГА $Q_i = Q_i(N_i, H_i)$, переменными – график нагрузки $N_{\Gamma}(t)$ и напоры на агрегатах (считаем равным напору ГЭС $H_i = Y_{\text{ГЭС}}$).

Оптимизация проводится для интервала времени t , на котором известен заданный график нагрузки $N_{\Gamma}(t)$, пусковые расходы не учитываются.

При условии соблюдения баланса мощности: $N_{\Gamma}(t) = \sum_i N_i$, выполнения ограничений по мощности: $N_{\min} \leq N_i \leq N_{\max}$, ограничений на состав ГА (некоторые из ГА изменять свое состояние не могут как в текущий час, так и в будущие часы).

Для расчёта загружаются расходные характеристики ГА и вырезаются только те их части, которые относятся к текущему

напору. Затем ищутся все возможные варианты составов ГА, удовлетворяющие следующим ограничениям:

1. Структура ГЭС (ограничения по электрической схеме: пары ГА работают на один общий выключатель, а некоторые – на индивидуальный).

2. При данном составе реализуется плановый график с учётом резервов нормированного первичного регулирования частоты (далее НПРЧ), АВРЧМ и регулировочных диапазонов ГА, найденных как максимум из P_{\min} и минимум из P_{\max} – заданных в ГРАМ и найденных по расходным характеристикам при данном напоре

Для проверки каждого возможного состава ГА с точки зрения ограничений по резервам мощности должна выполняться следующая проверка.

Сначала для каждого рассматриваемого состава ГА рассчитывается распределение плановой мощности на каждый ГА

$$P_i = (P_{\max_i} - P_{\min_i}) \cdot k_p + P_{\min_i}, \quad (2)$$

$$k_p = \frac{P_{\text{план}} - \sum P_{\min_i}}{\sum P_{\max_i} - \sum P_{\min_i}}. \quad (3)$$

Затем проверяются условия соответствия оставшегося резерва на загрузку и разгрузку требуемому резерву АВРЧМ:

$$\sum P_{\max_i}^{\delta \text{ АВРЧМ}} - \sum P_i^{\delta \text{ АВРЧМ}} > R_{\uparrow}^{\text{АВРЧМ}};$$

$$\sum P_i^{\delta \text{ АВРЧМ}} - \sum P_{\min_i}^{\delta \text{ АВРЧМ}} > R_{\downarrow}^{\text{АВРЧМ}},$$

где $P_{\text{план}}$ – цель по плановой мощности в расчётный час (одно значение планового диспетчерского графика (далее ПДГ), соответствующее расчётному часу или величина ДК, либо команде СО);

$R_{\downarrow}^{\text{АВРЧМ}}$ – резерв АВРЧМ на разгрузку;

$R_{\uparrow}^{\text{АВРЧМ}}$ – резерв АВРЧМ на загрузку.

$$P_{\min_i} = \max(P_{\min}^{\text{ГРАМ}}, P_{\min}^H) + R_{\text{НПРЧ}}^i$$

для каждого i -го ГА;

$$P_{\max_i} = \min(P_{\max}^{\text{ГРАМ}}, P_{\max}^H) - R_{\text{НПРЧ}}^i$$

для каждого i -го ГА,

где $R_{\text{НПРЧ}}^i = 7\% \cdot P_i^{\text{НОМ}}$, если i -й ГА участвует в НПРЧ; $P_{\min}^{\text{ГРАМ}}$ – технологические ограничения ГА по минимуму активной мощности, заданные в ГРАМ; $P_{\max}^{\text{ГРАМ}}$ – технологические ограничения ГА по максимуму активной мощности, заданные в ГРАМ.

Возможный состав не должен достигаться исполнением разнонаправленных команд на пуск/останов ГА, за исключением тех случаев, когда разнонаправленные команды позволяют достичь меньшей дискретности регулирования (например, пуск пары ГА и отключение одного ГА, или, наоборот, пуск одного ГА и останов пары или пуск одного ГА большой мощности и останов ГА малой мощности и т. д.)

Для решения задачи применения в системе РУСА учёта диапазона резерва составим алгоритм в виде структурно-алгоритмической схемы, изображенной на рис. 3.

Структурная схема для удобства представления разделена на модули, которые представляют собой определенные алгоритмы, и данные, поступающие от АСУ ТП. Такие блоки отвечают за получение информации, необходимой для корректного расчета состава ГА.

Первый блок структурно-алгоритмической схемы является входными данными, описывающими быстроизменяющиеся параметры.

1. Значение задания мощности ГЭС. Так как ГЭС находится в управлении диспетчерами СО, то, помимо ПДГ, задание которого корректируется каждый час на все предстоящие часы до конца суток или конца следующих, возникает режимная необходимость в изменении этого задания. При этом СО отдает стандартизированную команду в виде «Задания плановой мощности ГЭС $P_{\text{ГЭС}}$ ».

2. Второй величиной входных данных является величина АВРЧМ. Её изменение в течение суток имеет низкую вероятность, так как ее значение закладывается СО на основании устойчивости энергосистемы в ее различных узлах. Но существует вероятность изменения ее величины командой, если это связано с увеличением, либо без уведомления оперативного персонала в случае снижения.

Также в структурно-алгоритмической схеме работы РУСА присутствуют блоки данных о техническом и эксплуатационном состоянии. Они необходимы в работе алгоритмов формирования количества и очередности включения, отключения ГА.

Блок, описывающий эксплуатационное состояние, несет в себе информацию о том, какие ГА находятся сейчас в работе, резерве, ремонте, а также подключение их к системе ГРАМ. Полученные данные определяют величину воздействия вследствие сложившегося режима работы до текущего расчета.

Блок, описывающий техническое состояние, основываясь на показателях ГА, определяет очередность пусков и остановов при реализации воздействий. Параметрами будут являться следующие:

1. Время наработки часов. Сколько ГА был в сети с начала года либо с момента

пуска, либо последнего капитального ремонта. Это прямая зависимость технического состояния от времени его работы.

2. Количество пусков, остановов ГА. Временные отрезки выбираем как и в предыдущем пункте. Важность данного критерия вытекает из особенностей эксплуатации. Она заключается в том, что при пуске или останове турбина проходит запрещенную зону работы, в которой происходит самый сильный износ узлов – подпятника, рабочего колеса и камеры рабочего колеса. Также происходит износ коммутационных аппаратов – выключателей.

3. Индекс технического состояния гидроагрегата (далее ИТС ГА). На данный момент этот параметр определяется на основании обследований и испытаний, которые проводятся не реже 1 раза в год [4]. Такое нечастое обновление показателя влечёт за собой снижение его достоверности.

Исходя из вышеперечисленного, на данный момент времени самым оптимальным параметром, отражающим показатель технического состояния, будет являться время наработки часов с фиксированного момента времени.



Рис. 3. Структурно-алгоритмическая схема работы РУСА с участием ГЭС в АВРЧМ

Перейдем к описанию работы модуля 1. Вводными значениями будет являться величина задания мощности с условиями как при работе в ГРАМ. Формула вычисления оптимального количества ГА:

$$K_{onm} = \frac{P_{зад}}{N_{onm}}, \quad (4)$$

где $P_{зад}$ является заданием плановой мощности, принимаемой к оптимизации, полу-

ченной командой или доведенным диспетчерским графиком от СО. Вычисляется она по формуле

$$P_{зад} = P_{план} - P_{инд}, \quad (5)$$

где $P_{инд}$ – мощность ГА, работающих в сети и не участвующих в ГРАМ; $N_{онм}$ – мощность отдельно взятого ГА, при котором его удельный расход минимален. Определяется он из формулы удельного расхода ГА:

$$N_{онм} = \min \left(y_p \left(\frac{Q}{N} \right) \right). \quad (6)$$

Для корректной работы алгоритма полученное число $K_{онм}$ округляем до ближайшего целого в сторону увеличения, дальнейшее ее обозначение будет $K_{онм}^+$. Для нахождения истинно верного значения количества и степени загрузки ГА проведем сравнение при числе ГА $K_{онм}^+$ и на один меньше, далее $K_{онм}^-$.

При работе ГЭС подключенной к ЦКС АРМЧ в части вторичного регулирования необходимо предоставлять резерв на загрузку и разгрузку равной заданию $R^{ABPЧМ}$. Для этого осуществляется проверка в модуле 2, вследствие энергетических ограничений ГА:

1. Максимальная мощность ГА – $P_{мин.ГА}$.
2. Минимальная мощность ГА – $P_{макс.ГА}$.

Проверка по предоставлению резерва на разгрузку для двух вариантов состава ГА:

$$K_{онм}^+ \cdot P_{мин.ГА} \leq P_{зад} - R_{\downarrow}^{ABPЧМ};$$

$$K_{онм}^- \cdot P_{мин.ГА} \leq P_{зад} - R_{\downarrow}^{ABPЧМ}.$$

Также осуществляется проверка предоставления резерва на загрузку для двух вариантов:

$$K_{онм}^+ \cdot P_{макс.ГА} \geq P_{зад} + R_{\uparrow}^{ABPЧМ};$$

$$K_{онм}^- \cdot P_{макс.ГА} \geq P_{зад} + R_{\uparrow}^{ABPЧМ}.$$

Когда при проверке не выполняется хотя бы одно из условий, значение $K_{онм}$ увеличивается, если нет резерва на загрузку, ли-

бо уменьшается при отсутствии резерва на разгрузку.

Для выполнения логичности расчёта при достижении значения $K_{онм}$, равного 0, или максимального количества ГА, участвующих в регулировании и подключенных к ГРАМ, выдается сообщение об невозможности выполнения расчета, и система РУСА переходит в ручной режим управления.

В модуле 3 происходит выбор наилучшего варианта по количеству ГА, находящихся в работе, для эффективного использования водных ресурсов. Он основан на сравнении средних значений удельного расхода для $K_{онм}^+$ и $K_{онм}^-$, рассчитанных по следующей формуле:

$$Q_{уд.ср.} = \frac{\sum_n^m \left(y_p \left(\frac{Q}{N} \right) \right)}{m - n}, \quad (7)$$

где n – мощность ГА при работе с максимальным отрицательным значением АВРЧМ, а m – мощность ГА при работе с максимальным положительным значением АВРЧМ.

$$n = \frac{P_{зад} - R_{\downarrow}^{ABPЧМ}}{K_{онм}}; \quad (8)$$

$$m = \frac{P_{зад} + R_{\uparrow}^{ABPЧМ}}{K_{онм}}. \quad (9)$$

На рис. 4 приведен пример кривой удельного расхода для ГА ТКВ00 (турбина типа Каплана) производства Фойт Гидро при его расчетном напоре $H_{ТКВ} = 9,7$ м. Точки n и m поставлены в случайном порядке для представления диапазона изменения мощности ГА при $P_{зад}$ и $R^{ABPЧМ}$.

Получив значения удельных расходов для $K_{онм}^+$ и $K_{онм}^-$, сравниваем и выбираем наименьший, так как эффективность заключается в минимизации $Q_{уд.ср.}$. Выбранное количество ГА теперь сравниваем с ближайшим значением в ту сторону, с которой он располагался: для $K_{онм}^+$ увеличиваем значение на 1, для $K_{онм}^-$ уменьшаем значение на 1. В алгоритме происходит переприсвоение значения $K_{онм}$.

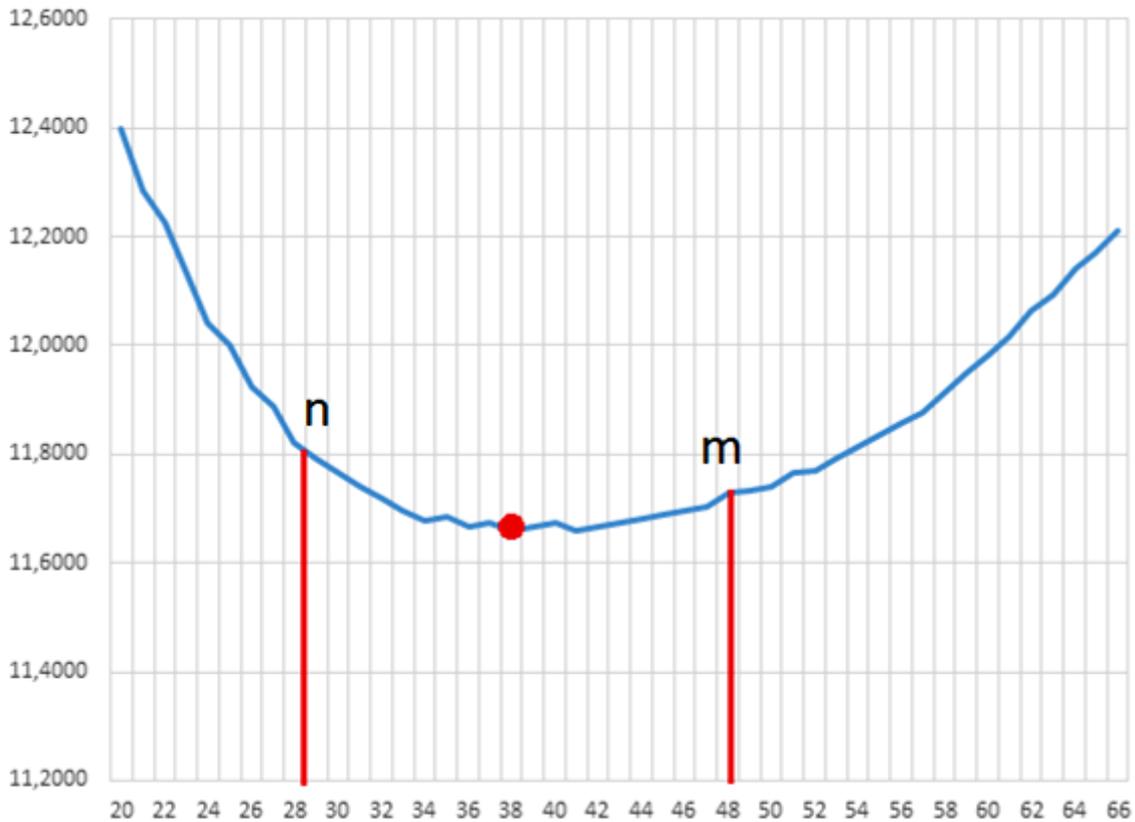


Рис. 4. Пример диапазона изменения мощности ГА ТКВ00

В модуле 3 запускается новый цикл проверки выполнения условий предоставления резерва АВРЧМ, как и в модуле 2. Далее снова проводится расчет значений $Q_{уд.ср.}$ и выбирается наименьшее.

Концом расчета модуля 3 будет являться $K_{опт}$, при котором $Q_{уд.ср.}$ минимально (прибавление или убавление количества ГА для расчёта не уменьшает удельный средний расход) или последнее удовлетворяющее условиям предоставления резерва.

Модуль 4, используя данные об эксплуатационном состоянии, определяет количество ГА, которые необходимо пустить или остановить для выполнения условий РУСА. Расчет происходит в виде нахождения раз-

ницы между заданием системы РУСА, полученной в модуле 3, и текущим составом работающих ГА. После этого, исходя из значений о техническом состоянии, определяются конкретные ГА, на которых будет изменено эксплуатационное состояние.

Таким образом, выполнив все условия, получаем выходные параметры работы РУСА ГЭС с подключённой к ЦКС АВРЧМ. Можно сделать вывод, что без учета вторичного регулирования система РУСА будет давать неэффективный прогноз состава ГА и в редких случаях даже не предоставлять резерв. Поэтому при наличии ГЭС с подключённой к ЦКС АВРЧМ его обязательно нужно учитывать.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Технические требования к генерирующему оборудованию участников оптового рынка АО «СО ЕЭС», 2022 [Online]. Официальный сайт АО «СО ЕЭС». URL: https://www.soups.ru/fileadmin/files/company/markets/2022/tq_010522.pdf.

2. Захарченко В.Е. Особенности реализации системы рационального управления составом агрегатов гидроэлектростанций и перспективы ее развития // Вестник МЭИ. 2019. № 1. С. 98-107.

3. **Захарченко В.Е.** Основной критерий автоматизированного рационального управления составом агрегатов ГЭС // Автоматизация в промышленности. 2017. № 9. С. 10-15.

4. Приказ Минэнерго России от 26.07.2017 № 676 «Об утверждении мето-

дики оценки технического состояния основного технологического оборудования и линий электропередачи электрических станций и электрических сетей». 2017 [Online]. Официальный интернет-портал правовой информации. URL: <https://base.garant.ru/71779722>.

Усков Максим Евгеньевич – магистрант кафедры «Электроэнергетика и электротехника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Maksim E. Uskov – Master's student, Department of Power and Electrical Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 02.11.23, принята к опубликованию 28.11.23

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 телефону:

8 (8452) 99-87-64 – приемная главного редактора.

Просьба направлять публикации по адресу:

Россия, 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77, ком. 1/134, главному редактору журнала «Вопросы электротехнологии» Артюхову И.И. и по электронной почте eltech@sstu.ru

Требования к оформлению публикаций

- Рукопись статьи оформляется в программе Microsoft Word для Windows
 - Формат страницы – А4, ориентация книжная
 - Размеры полей страниц: верхнее и нижнее – по 25 мм, левое и правое – по 20 мм
 - Абзацный отступ – 0,63 см
 - Шрифт текста рукописи – Times New Roman, размер 12 pt
 - Междустрочный интервал – 1,0
 - Общий объём рукописи (включая иллюстрации и таблицы) – не более 10 страниц.
- Указанное ограничение объёма рукописи не распространяется на сведения об авторах.

Иллюстрации (рисунки, графики, фотографии) располагаются в тексте статьи и должны иметь номер и подпись. Чертежи, схемы и другие графические материалы выполняются с хорошей проработкой деталей в программах Corel Draw (с расширением *.cdr) или других редакторах (с расширением *.jpeg или *.tiff). Все графические материалы должны быть доступны для редактирования, поэтому необходимо представлять их в исходном формате. Цветные иллюстрации должны быть адаптированы для черно-белой печатной версии журнала. Таблицы располагаются непосредственно в тексте статьи. Каждая таблица должна иметь номер и заголовок.

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 Р 7.0.5-2008 и включающего: фамилию и инициалы автора, название статьи, название журнала, том, год, номер или выпуск, страницы, а для книг – фамилии и инициалы авторов, точное название книги, место издания (город), издательство, год издания, количество страниц.

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

Специалисты в технических и естественно-научных отраслях к публикации **ОБЯЗАТЕЛЬНО** прилагают экспертное заключение.

Публикации принимаются в течение всего года.

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

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

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

Редактор Л.А. Скворцова
Компьютерная верстка Ю.Л. Жупиловой
Перевод на английский язык А.Х. Аскаровой

Адрес редакции:
410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77
Телефон: (8452) 99-87-64
e-mail: eltech@sstu.ru

Подписано в печать 22.12.2023 Дата выхода в свет 28.12.2023

Формат 60×84 1/8 Бум. офсет.

Усл. печ. л. 14,0 Уч. изд. л. 6,4

Тираж 500 экз. Заказ 73 Цена свободная

Отпечатано в Издательстве СГТУ имени Гагарина Ю.А.

Адрес: 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77.

E-mail: izdat@sstu.ru

Полная электронная версия журнала размещена в системе РИНЦ
в открытом доступе на платформе eLIBRARY.RU

Подписной индекс 70841 (каталог «Газеты. Журналы» на 2-е полугодие 2023 г.)

Свидетельство о регистрации СМИ *ПИ № ФС77-54621*
выдано Роскомнадзором от 01.07.2013

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

Address of the editorial office:
77 Politekhnikeskaya Str., 410054, Saratov, Russia
Tel.: (8452) 99-87-64
e-mail: eltech@sstu.ru

Print date: 22.12.2023 Date of publication: 28.12.2023

Paper size: 60×84 1/8. Offset-Print

Conventional printed sheet 14,0 Publication base sheet 6,4

Circulation: 500 printed copies. Order 73 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 No. FS77-54621*

Issued by Roscomnadzor 01.07.2013

