

Издается с ноября 2013 года
Выходит один раз в квартал

№ 4 (29)

Декабрь 2020

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

Зам. главного редактора

Ответственный секретарь

КАЛГАНОВА СВЕТЛАНА ГЕННАДЬЕВНА

БЕКРЕНЕВ НИКОЛАЙ ВАЛЕРЬЕВИЧ

ЮДИНА ВИОЛЕТТА ОЛЕГОВНА

Редакционная коллегия

С.Г. КАЛГАНОВА

Н.В. БЕКРЕНЕВ

Ю.В. ГУЛЯЕВ

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

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

д.ф.-м.н., профессор, академик РАН, ИРЭ имени В.А. Котельникова РАН,
Москва

Ю.С. АРХАНГЕЛЬСКИЙ

В.Б. ДЕМИДОВИЧ

Л.С. ЗИМИН

А.А. ЗАХАРОВ

Ю.Б. КАЗАКОВ

А.Н. МАКАРОВ

Г.А. МОРОЗОВ

Ю.П. ПЕРЕЛЫГИН

А.Ф. РЕЗЧИКОВ

И.В. РОДИОНОВ

Ф.Н. САРАПУЛОВ

Ю.Б. ТОМАШЕВСКИЙ

А.А. ФОМИН

В.Н. ХМЕЛЕВ

В.А. ЦАРЕВ

В.О. ЮДИНА

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

д.т.н., профессор, СПбГЭТУ «ЛЭТИ», Санкт-Петербург

д.т.н., профессор, СамГТУ, Самара

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

д.т.н., профессор, ИГЭУ, Иваново

д.т.н., профессор, ТвГТУ, Тверь

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

д.т.н., профессор, ПГУ, Пенза

д.т.н., профессор, член-корреспондент РАН, ИПТМУ РАН, Саратов

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

д.т.н., профессор, УрФУ, Екатеринбург

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

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

д.т.н., профессор, БТИ, Бийск

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

ассистент, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов

Since November 2013
Published Quarterly

№ 4 (29)
December 2020

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:
Assistant to the Editor-in-Chief:
Chief Executive Officer

KALGANOVA SVETLANA GENNADIEVNA
BEKRENEV NIKOLAY VALERIEVICH
YUDINA VIOLETTA OLEGOVNA

Editorial Board Members

S.G. KALGANOVA	Dr.Sc., Associate Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov
N.V. BEKRENEV	Dr.Sc., Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov
Yu.V. GULYAEV	Dr.Sc., Professor, Academician of RAS, Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of RAS, Moscow
Yu.S. ARKHANGELSKY	Dr.Sc., Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov
V.B. DEMIDOVICH	Dr.Sc., Professor, Saint Petersburg State Electrotechnical University «LETI», St. Petersburg
L.S. ZIMIN	Dr.Sc., Professor, Samara State Technical University, Samara
A.A. ZAKHAROV	Dr.Sc., Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov
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
V.O. YUDINA	Assistant, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov

СОДЕРЖАНИЕ

ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЯ

- Коломейцев В.А., Баринов Д.А., Ковряков П.В., Кузьмин Ю.А.** Аналитическое определение собственных электродинамических параметров медленных волн в прямоугольном волноводе с диэлектрической пластиной в Е-плоскости у боковой стенки волновода 5
- Тригорлый С.В., Калганова С.Г., Кадыкова Ю.А., Кожевников В.Ю., Сивак А.С., Юдина В.О.** Моделирование СВЧ-нагрева диэлектриков с поглощающими СВЧ-энергию наполнителями в камерах с бегущей волной..... 15
- Федосеев М.Е., Фомин А.А.** Исследование микроструктуры и твердости высокопрочной слоистой системы «сталь Х12МФ – Zr(O,C)-покрытие», формируемой на штамповом инструменте..... 24
- Сафиуллин Р.А.** Интенсификация добычи и переработки высоковязких нефтей и природных битумов СВЧ электротермическим методом 33
- Тухватуллин М.И.** СВЧ электротехнология: вопросы и перспективы 42

ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ

- Таваров С.Ш., Сидоров А.И.** Метод прогнозирования электропотребления бытовыми электроприёмниками в условиях Республики Таджикистан 47
- Артюхов И.И., Земцов А.И., Пыльская Е.К., Процветов Д.Е.** Применение имитационного моделирования для исследования системы электропи-

- тания СВЧ электротехнологической установки 56

ЛУЧШИЕ ДОКЛАДЫ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ «ЭЛЭТ-2020: ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА»

- Сарапулов Д.А., Коваленко В.В.** Автономное электроснабжение детского спортивного лагеря 64
- Левушкин А.В., Менщиков И.А.** Совершенствование релейной защиты силовых трансформаторов в электроэнергетике 71
- Бардакова К.А., Айсина Т.Х., Сошинов А.Г.** Использование накопителей энергии в комбинированных энергетических установках на возобновляемых источниках энергии 80
- Трухин П.О., Калганова С.Г.** Математическое моделирование СВЧ нетепловой модификации композиционного материала в камере с бегущей волной 83
- Кадыкова Ю.А., Мостовой А.С., Чапов И.Д.** Исследование эффективности модификации охранаполненных эпоксидных полимеров в СВЧ электромагнитном поле 86

ЛЕТОПИСЬ

- Памяти профессора
Владимира Семёновича Чередниченко. 91
- К сведению авторов 93

CONTENTS

ELECTROTHERMY

- Kolomeytsev V.A., Barinov D.A., Kovyakov P.V., Kuzmin Yu.A.** Analytical methods for electrodynamic eigenvalue determination of slow waves in a rectangular waveguide with a dielectric plate in the E-plane of the lateral waveguide wall 5
- Trigorly S.V., Kalganova S.G., Kadykova Yu.A., Kozhevnikov V.Yu., Sivak A.S., Yudina V.O.** Simulation of microwave dielectric heating with microwave-energy absorbing fillers in travelling wave chambers 15
- Fedoseev M.E., Fomin A.A.** Investigation of the microstructure and hardness of the high – strength layered system «Steel X12MoV – Zr(O,C)-Coating» formed on a die tool..... 24
- Safiullin R.A.** Intensification of production and refining high-viscous oils and natural bitumens by the microwave electrothermal technology 33
- Tukhvatullin M.I.** Issues and prospects of microwave electrical technology 42

ELECTRIC POWER SUPPLY

- Tavarov S.Sh., Sidorov A.I.** A method for predicting electricity consumption by household appliances in the Republic of Tajikistan..... 47
- Artyukhov I.I., Zemtsov A.I., Pylskaya E.K., Protvetov D.E.** A simulation technique in the study of the power

- supply system of electrotechnological microwave units 56

BEST REPORTS OF THE ALL-RUSSIAN SCIENTIFIC CONFERENCE «ELET-2020: ELECTRIC POWER AND ELECTRICAL ENGINEERING»

- Sarapulov D.A., Kovalenko V.V.** Self-contained energy supply system in the children's health camp..... 64
- Levushkin A.V., Menshchikov I.A.** Improving relay protection of power transformers applied in the power generating industry 71
- Bardakova K.A., Aisina T.Kh., Soshinov A.G.** Using energy storage systems in combined power plants with renewable energy sources 80
- Trukhin P.O., Kalganova S.G.** Mathematical modeling of microwave non-thermal modification of a composite material in a traveling wave chamber..... 83
- Kadykova Yu.A., Mostovoy A.S., Chapov I.D.** Investigation into effective modification of ocher / epoxy polymers in the microwave electromagnetic field 86

CHRONICLE

- In memory of the Professor Vladimir Semyonovich Cherednichenko... 91
- Information for Authors 93

АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОБСТВЕННЫХ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ МЕДЛЕННЫХ ВОЛН В ПРЯМОУГОЛЬНОМ ВОЛНОВОДЕ С ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПЛАСТИНОЙ В Е-ПЛОСКОСТИ У БОКОВОЙ СТЕНКИ ВОЛНОВОДА

В.А. Коломейцев, Д.А. Баринов, П.В. Ковряков, Ю.А. Кузьмин

ANALYTICAL METHODS FOR ELECTRODYNAMIC EIGENVALUE DETERMINATION OF SLOW WAVES IN A RECTANGULAR WAVEGUIDE WITH A DIELECTRIC PLATE IN THE E-PLANE OF THE LATERAL WAVEGUIDE WALL

V.A. Kolomeytsev, D.A. Barinov, P.V. Kovryakov, Yu.A. Kuzmin

На основе аналитического решения внутренней краевой задачи электродинамики, полученного при использовании продольной X -поляризации электромагнитного поля, определены собственные электродинамические параметры прямоугольного волновода с диэлектрической пластиной в E -плоскости. Рассмотрены режимы распространения быстрых и медленных волн. Показано, что в диапазоне распространения медленных волн ($c/v_{cp} < 1$) наблюдается трансформация электромагнитного поля, при которой электрическое поле в менее плотной среде (воздушная среда) стягивается к поверхности более плотной среды (диэлектрическая пластина), что приводит к увеличению энергии волны, распространяющейся в пластине, и интенсификации её нагрева. При этом при уменьшении рабочей длины волны данный эффект усиливается. Приведены результаты расчета длины волны λ_{nep} , на которой происходит переход быстрой волны в медленную, а также длины волны – λ_{mp} , на которой начинается трансформация электромагнитного поля. Показано, что для невырожденных типов волн – $\lambda_{mp} = \lambda_{nep}$,

Electrodynamic eigenvalues of a rectangular waveguide with a dielectric plate in the E -plane are determined based on analytical solution to the interior boundary-value problem of electrodynamics obtained using the longitudinal X -polarization of the electromagnetic field. The propagation modes of the fast and slow waves are considered. Transformation of the electromagnetic field is observed in the range of slow wave propagation ($c/v_{cp} < 1$), where under condition of a lower density medium (air medium) the electric field is drawn up to the surface of a denser medium (dielectric plate), which increases the wave energy propagating in the plate and intensifies its heating. Moreover, the given effect enhances with decreasing the working wavelength. The results of calculating the wavelength λ_{nep} where transition of a fast wave into a slow one is observed, as well as the wavelength λ_{mp} , where transformation of the electromagnetic field starts, are presented. It is shown that for nondegenerative modes $\lambda_{mp} = \lambda_{nep}$, and for degenerative modes $\lambda_{mp} \neq \lambda_{nep}$. The obtained results can be used to intensify the heating of

а для вырожденных типов волн – $\lambda_{тр} \neq \lambda_{пер}$. Полученные результаты могут быть использованы для интенсификации процесса нагрева листовых диэлектрических материалов в СВЧ-устройствах конвейерного типа.

Ключевые слова: внутренняя краевая задача электродинамики, волновое уравнение Гельмгольца, электромагнитное поле, принцип поляризационной двойственности, принцип суперпозиции и ортогональности, E- и H-типы волн, прямоугольный волновод, граничные и начальные условия, быстрые и медленные волны, критические длины волн, продольная поляризация электромагнитного поля, векторы напряженности электрического и магнитного поля

В работе исследуются электродинамические свойства прямоугольного волновода с диэлектрической пластиной, расположенной в E-плоскости у одной из боковых стенок волновода (рис. 1).

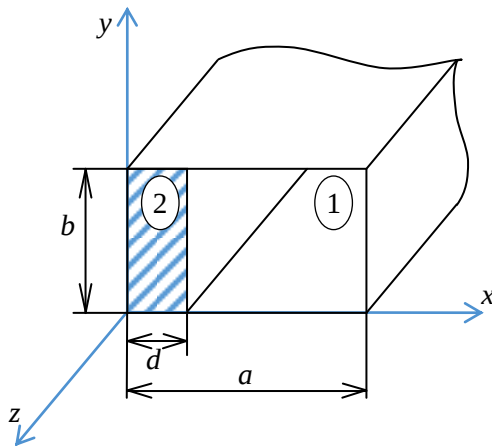


Рис. 1. Двухслойное пластинчатое заполнение прямоугольного волновода в E-плоскости:
1 – воздушная среда;
2 – диэлектрическая пластина

Как показано в работах [1, 2], для решения внутренней краевой задачи электродинамики в данном случае необходимо использовать продольную X-поляризацию электромагнитного поля (E_x, H_x), что приводит к необходимости решения двух скалярных волновых уравнений:

sheet dielectric materials in microwave conveyor-type devices.

Keywords: interior boundary value problem of electrodynamics, Helmholtz wave equation, electromagnetic field, principle of polarization duality, principle of superposition and orthogonality, E and H-types of waves, rectangular waveguide, boundary and initial conditions, fast and slow waves, critical wavelengths, longitudinal polarization electromagnetic field, vectors of electric and magnetic field strength

$$\nabla^2 E_{xq}(x, y, z, \tau) - \varepsilon_q \mu_q \cdot \frac{\partial^2 E_{xq}(x, y, z, \tau)}{\partial \tau^2} = 0$$

$$\text{E-типы волн } (E_{xq} \neq 0, H_{xq} = 0); \quad (1)$$

$$\nabla^2 H_{xq}(x, y, z, \tau) - \varepsilon_q \mu_q \cdot \frac{\partial^2 H_{xq}(x, y, z, \tau)}{\partial \tau^2} = 0$$

$$\text{H-типы волн } (E_{xq} = 0, H_{xq} \neq 0),$$

где E_{xq}, H_{xq} – X-составляющие векторов напряженности электрического и магнитного поля, $q = 1$ – воздушная среда, $q = 2$ – диэлектрическая пластина.

Остальные компоненты электромагнитного поля определяются непосредственно из уравнений Максвелла на основе принципа поляризационной двойственности [3] через компоненты E_{xq}, H_{xq} следующим образом:

$$\begin{aligned} E_y &= \frac{1}{k_{\perp}^2} \left(\frac{\partial^2 E_x}{\partial x \partial y} - j \omega \mu \frac{\partial H_x}{\partial z} \right); & H_y &= \frac{1}{k_{\perp}^2} \left(\frac{\partial^2 H_x}{\partial x \partial y} - j \omega \varepsilon \frac{\partial E_x}{\partial z} \right); \\ E_z &= \frac{1}{k_{\perp}^2} \left(\frac{\partial^2 E_x}{\partial x \partial z} - j \omega \mu \frac{\partial H_x}{\partial y} \right); & H_z &= \frac{1}{k_{\perp}^2} \left(\frac{\partial^2 H_x}{\partial x \partial z} - j \omega \varepsilon \frac{\partial E_x}{\partial y} \right), \end{aligned} \quad (2)$$

где $k_{\perp}^2 = \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2 + \beta^2$; β – постоянная распространения волны; b – размер узкой стенки прямоугольного волновода (ПрВ). Соотно-

шения (2) позволяют представить решение волновых уравнений (1) в виде суперпозиции продольных Е- и Н-типов волн без возникновения гибридных типов волн:

$$\begin{aligned} E_{xq}(x, y, z, \tau) &= \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} E_{xqmn}(x, y) \cdot e^{j(\omega\tau - \beta_{mn}z)} \quad \text{Е-типы волн;} \\ H_{xq}(x, y, z, \tau) &= \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} H_{xqmn}(x, y) \cdot e^{j(\omega\tau - \beta_{mn}z)} \quad \text{Н-типы волн,} \end{aligned} \quad (3)$$

где

$$\begin{aligned} E_{xqmn}(x, y) &= (a_{1qmn} \cdot \cos k_{xqm}x + b_{1qmn} \cdot \sin k_{xqm}x) \cdot \sin\left(\frac{n\pi}{b}y\right); \\ H_{xqmn}(x, y) &= (a_{2qmn} \cdot \cos k_{xqm}x + b_{2qmn} \cdot \sin k_{xqm}x) \cdot \cos\left(\frac{n\pi}{b}y\right). \end{aligned} \quad (4)$$

Отметим, что соотношения (3), (4) справедливы для прямой волны в волноводе. Однако при однородности волновых уравнений (1) электродинамические свойства прямой и обратной волны идентичны между собой.

Рассмотрим продольные Е-типы волн. Подставляя первое соотношение (4) в уравнение (2) и учитывая, что $H_{xq} = 0$, получим для воздушной среды ($q = 1$):

$$\begin{aligned} E_{x1mn}(x, y) &= a_{m11} \cdot \frac{\cos(k_{xm1}(a-x))}{\cos(k_{xm1}a)} \cdot \sin\left(\frac{n\pi}{b}y\right); \\ E_{y1mn}(x, y) &= a_{m11} \cdot \frac{k_{xm1}}{k_{\perp mn}^2} \cdot \left(\frac{n\pi}{b}\right) \cdot \frac{\sin(k_{xm1}(a-x))}{\cos(k_{xm1}a)} \cdot \cos\left(\frac{n\pi}{b}y\right); \\ E_{z1mn}(x, y) &= -j a_{m11} \cdot \frac{\beta_{mn}}{k_{\perp mn}^2} \cdot k_{xm1} \cdot \frac{\sin(k_{xm1}(a-x))}{\cos(k_{xm1}a)} \cdot \sin\left(\frac{n\pi}{b}y\right); \\ H_{y1mn}(x, y) &= a_{m11} \cdot \frac{\omega \epsilon_1}{k_{\perp mn}^2} \cdot \beta_{mn} \cdot \frac{\cos(k_{xm1}(a-x))}{\cos(k_{xm1}a)} \cdot \sin\left(\frac{n\pi}{b}y\right); \\ H_{z1mn}(x, y) &= -j \omega \epsilon_1 \cdot \frac{1}{k_{\perp mn}^2} \cdot \left(\frac{n\pi}{b}\right) \cdot \frac{\cos(k_{xm1}(a-x))}{\cos(k_{xm1}a)} \cdot \cos\left(\frac{n\pi}{b}y\right). \end{aligned} \quad (5)$$

Соответственно для диэлектрической пластины ($q = 2$) получим

$$\begin{aligned} E_{x2mn}(x, y) &= a_{m12} \cdot \cos(k_{xm2}x) \cdot \sin\left(\frac{n\pi}{b}y\right); \\ E_{y2mn}(x, y) &= j a_{m12} \cdot \frac{\beta_{mn}}{k_{\perp mn}^2} \cdot \left(\frac{n\pi}{b}\right) \cdot \sin(k_{xm2}x) \cdot \cos\left(\frac{n\pi}{b}y\right); \end{aligned}$$

$$E_{z2mn}(x, y) = j a_{m12} \cdot \frac{\beta_{mn}}{k_{\perp mn}^2} \cdot k_{xm2} \cdot \sin(k_{xm2}x) \cdot \sin\left(\frac{n\pi}{b}y\right); \quad (6)$$

$$H_{y2mn}(x, y) = a_{m12} \cdot \frac{\omega \varepsilon_2}{k_{\perp mn}^2} \cdot \beta_{mn} \cdot \cos(k_{xm2}x) \cdot \sin\left(\frac{n\pi}{b}y\right);$$

$$H_{z2mn}(x, y) = -j a_{m12} \cdot \frac{\omega \varepsilon_2}{k_{\perp mn}^2} \cdot \left(\frac{n\pi}{b}\right) \cdot \cos(k_{xm2}x) \cdot \cos\left(\frac{n\pi}{b}y\right).$$

Удовлетворяя соотношения (5), (6) стандартным граничным условиям на поверхности раздела диэлектрических сред при $x = d$, получим дисперсионное уравнение для определения собственных электродинамических параметров Е-типов волн при Х-поляризации электромагнитного поля:

$$\operatorname{tg}(k_{xm1}(a-d)) = -\frac{1}{\varepsilon'_2} \cdot \frac{k_{xm2}}{k_{xm1}} \cdot \operatorname{tg}(k_{xm2}d) \quad (7)$$

для Е-типов волн,

где $\varepsilon'_2 = \varepsilon_2/\varepsilon_0$ – относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрической пластины. Прделав аналогичную процедуру для продольных Н-типов волн, получим следующее дисперсионное уравнение:

$$\operatorname{tg}(k_{xm1}(a-d)) = -\frac{k_{xm1}}{k_{xm2}} \cdot \operatorname{tg}(k_{xm2}d) \quad (8)$$

для Н-типов волн.

Необходимо заметить, что дисперсионные уравнения (7), (8) справедливы для быстрых волн, для которых коэффициент замедления волны – $k_3 = \frac{c}{v_\phi} = \frac{\beta c}{\omega} < 1$, при этом волновое число k_{xm1} является действительной величиной. Кроме того, каждое из указанных уравнений зависит от двух неизвестных k_{xm1} , k_{xm2} , что затрудняет их однозначное решение. В работе [4] предложено в качестве дополнительного уравнения использовать обобщенное дисперсионное уравнение, которое получается при аналитическом решении ВКЗЭ для полого или полностью заполненного диэлектриком ПрВ. Учитывая, что ВКЗЭ решается для двухслойного диэлектрического заполнения волновода, данное дисперсионное

уравнения распадается на два – для диэлектрической пластины и воздушной среды:

$$\omega^2 \varepsilon_1 \mu_2 = k_{xm1}^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2 + \beta_{mn}^2; \quad \text{для } q = 1; \quad (9)$$

$$\omega^2 \varepsilon_2 \mu_2 = k_{xm2}^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2 + \beta_{mn}^2; \quad \text{для } q = 2.$$

Учитывая, что $\varepsilon_1 = \varepsilon_0$ (ε_0 – абсолютная диэлектрическая проницаемость воздуха) и $\mu_1 = \mu_2 = \mu_0$, запишем уравнения (9) в удобном для последующего анализа виде:

$$\left(\frac{\omega}{c}\right)^2 = k_{xm1}^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2 + \beta_{mn}^2; \quad (10)$$

$$\left(\frac{\omega}{c}\right)^2 \varepsilon'_2 = k_{xm1}^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2 + \beta_{mn}^2;$$

где $c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}}$ – скорость света в воздушной среде; ε'_2 – относительная диэлектрическая проницаемость пластины.

Дисперсионные уравнения (7), (8) в соответствии с соотношениями (9), (10) позволяют провести аналитический расчет основных собственных электродинамических параметров ПрВ с диэлектрической пластиной в Е-плоскости.

Как показано в работах [5, 6], в полом ПрВ могут распространяться лишь быстрые волны ($k_3 = \frac{c}{v_\phi} < 1$). В частично и полностью заполненном диэлектрическим материалом ($\varepsilon' > 1$) могут распространяться как быстрые, так и медленные волны ($k_3 = \frac{c}{v_\phi} > 1$). Принципиальным отличием

ПрВ с частичным диэлектрическим наполнением от полностью заполненного диэлектриком волновода является трансформация электромагнитного поля в области распространения медленных волн, при которой электрическое поле в менее плотной среде (воздушная среда) стягивается к поверхности более плотной среды (диэлектрическая пластина), что приводит к увеличению амплитуды волны распространяющейся в пластине, к увеличению мощности рассеиваемой в ней. Данное положение приводит к интенсификации процесса нагрева диэлектрической пластины, что представляет несомненный интерес для разработчиков СВЧ-устройств для конвейерной термообработки листовых, тонкоплёночных, сыпучих материалов и жидкостей. Таким образом, для практического использования эффекта втягивания ЭМ поля из воздушной среды в диэлектрическую пластину необходимо определить величины длин волн $\lambda_{лер}$ и $\lambda_{мп}$, и влияние на их значения положения пластины в ПрВ, её толщины и относительной диэлектрической проницаемости.

Начало трансформации ЭМ поля определяется условием $k_{xm1} = 0$, а переход быстрой волны в медленную условием – $k_z = \frac{c}{v_\phi} = 1$, что эквивалентно условию – $\beta \frac{c}{\omega} = 1$, при этом данные условия позволяют определить $\lambda_{лер}$ и $\lambda_{мп}$. Рассмотрим методику определения длины волны – $\lambda_{мп}$. Вычитая из второго соотношения системы (10) первое соотношение, получим

$$\lambda_{мп} = \frac{2\pi}{k_{xm2}} \cdot \sqrt{\varepsilon'_2 - 1}. \quad (11)$$

$$(\beta_{mn})_{мп} = \pi \cdot \sqrt{\frac{4}{(\lambda_{мп})_{mn}^2} \cdot \varepsilon'_2 - \left(\left(\frac{m}{d} \right)^2 + \left(\frac{n}{b} \right)^2 \right)}. \quad (14)$$

Соотношение (14) можно представить в удобном безразмерном виде:

$$\left(\frac{\beta_{mn} c}{\omega} \right)_{мп} = \sqrt{\varepsilon'_2 - \left(\frac{\lambda_{мп}}{2} \right)^2 \cdot \left(\left(\frac{m}{d} \right)^2 + \left(\frac{n}{b} \right)^2 \right)}. \quad (15)$$

Волновое число k_{xm2} в соотношении (11) определяется непосредственно из дисперсионных уравнений (7), (8) при подстановке в них значения $k_{xm1} = 0$. Подставляя данное условие в уравнение (7), для продольных Е-типов волн получим

$$\operatorname{tg} k_{xm2} \cdot d = 0 \quad \text{и} \quad k_{xm2} = \frac{m\pi}{d}. \quad (12)$$

Подставляя полученное значение k_{xm2} в соотношение (11), получим окончательное выражение для $\lambda_{мп}$:

$$\lambda_{мп} = \frac{2d}{m} \cdot \sqrt{\varepsilon'_2 - 1} \quad \text{для Е-типов волн.} \quad (13)$$

Из соотношения (13) следует, что для полого ПрВ ($\varepsilon'_2 = 1$, $d = 0$) – $\lambda_{мп} = 0$ что соответствует положению электродинамики – в полом ПрВ могут распространяться только быстрые волны. В полностью заполненном диэлектриком волноводе, как было показано выше, могут распространяться как быстрые, так и медленные волны, однако трансформация ЭМ поля не наблюдается, поскольку волновые числа, определяющие структуру поля в поперечном сечении волновода – $k_x = \frac{m\pi}{a}$, $k_y = \frac{n\pi}{b}$, которые для заданного типа волны неизменны во всем допустимом диапазоне длин волн. Представляет интерес значение постоянной распространения, соответствующее данному значению $\lambda_{мп}$, определяемому соотношением (13). Подставляя $k_{xm2} = \frac{m\pi}{b}$ во второе уравнение (10), получим

Как показано в работе [7], дисперсионные зависимости $\frac{\beta c}{\omega \left(\frac{\lambda}{a} \right)}$ основного

и первого высшего типов волн являются основными характеристиками ПрВ с частичным диэлектрическим заполнением, которые позволяют провести расчет всех основных электродинамических параметров, определяющих конструкцию рабочей камеры (РК) СВЧ-устройств волноводного типа.

Рассмотрим методику определения λ_{mp} и β_{mp} для продольных Н-типов волн ПрВ с диэлектрической пластиной в Е-плоскости, для чего преобразуем дисперсионное уравнение (8) к виду

$$v_0 \cdot \frac{\operatorname{tg} \xi}{\xi} = -\frac{\operatorname{tg} \eta}{\eta}, \quad (16)$$

где $\xi = k_{xm1}(a-d)$; $\eta = k_{xm2} \cdot d$; $v_0 = \frac{(a-d)}{d}$.

Подставляя в соотношение (16) значение $k_{xm1} = 0$ ($\xi = 0$), получим

$$\operatorname{tg} \eta = -v_0 \cdot \eta. \quad (17)$$

Дисперсионное уравнение (17) достаточно простое в решении графоаналитическим методом, поскольку слева – табулированная функция $\operatorname{tg}(\eta)$, а справа – уравнение прямой линии, проходящей через начало координат. Точки пересечения данных функций и определяют корни дисперсионного уравнения – $k_{xm2} \cdot d = \eta_m$. Согласно соотношению (11), длина волны λ_{mp} для Н-типов волн определяется следующим образом:

$$\lambda_{mp} = \frac{2\pi \cdot d}{\eta_m} \cdot \sqrt{\varepsilon'_2 - 1}. \quad (18)$$

При этом значения постоянной распространения – β_{mp} и коэффициента замедления $\left(\frac{\beta c}{\omega} \right)_{mp}$ для полученного значения λ_{mp} однозначно определяются соотношениями (14), (15).

Рассмотрим некоторые особенности перехода быстрой волны в медленную и характер распространения медленной волны

в ПрВ с диэлектрической пластиной в Е-плоскости (двухслойное заполнение). Условием перехода быстрой волны в медленную является $k_z = \frac{c}{v_\phi} = \frac{\beta c}{\omega} = 1$, что эквивалентно условию

$$\beta_{mn}^2 = \frac{\omega^2}{c^2} \bigg|_{\lambda=\lambda_{nep}}. \quad (19)$$

Подставляя условие (19) в первое соотношение системы (10), получим

$$k_{xm1} = j|k_{xm1}| = j \left(\frac{n\pi}{b} \right). \quad (20)$$

Согласно соотношению (20), волновое число, определяющее распределение ЭМ поля в воздушной среде в поперечном сечении волновода в координатном направлении оси X, становится мнимой величиной, что приводит к перераспределению ЭМ поля и изменению дисперсионных уравнений (7), (8):

$$\varepsilon'_2 \cdot v_0 \cdot \xi \cdot \operatorname{th} \xi = \eta \cdot \operatorname{tg} \eta$$

при $k_{xm1} \leq 0$; (21)

$$v_0 \cdot \frac{\operatorname{th} \xi}{\xi} = -\frac{\operatorname{tg} \eta}{\eta}.$$

Левая часть уравнений (21) представлена через гиперболические тригонометрические функции, которые не являются периодическими функциями, что значительно упрощает процесс их решения. В частности, для решения уравнений (21) можно применить подход, который был использован при решении дисперсионного уравнения (17) с использованием графического метода [8], что позволяет определить один из основных электродинамических параметров – λ_{mp} и соответственно с помощью соотношений (14), (15) величины $(\beta_{mn})_{mp}$ и $\left(\frac{\beta_{mn} c}{\omega} \right)_{mp}$, которые необходимы для расчета РК СВЧ-устройств конвейерного типа, обеспечивающих интенсификацию процесса термообработки листовых материалов с помощью энергии медленных волн.

Рассмотрим более подробно особенности распространения медленных волн Е-типа. Согласно соотношению (7), величина λ_{mp} зависит от типа волны, толщины и относительной диэлектрической проницаемости пластины и не зависит от размера поперечного сечения волновода. Это принципиально важно, поскольку позволяет подбором сечения обеспечить распространение медленной волны и повысить темп нагрева диэлектрического материала за счет повышения уровня поглощенной мощности $P_{пог}$ в образце. Возможность решения данной задачи покажем на примере ПрВ сечения 45×90 мм при распространении в нем E_{11} -типа волны, обладающего максимальной критической длиной волны $\lambda_{кр} = 8,06$ см. В данном конкретном случае – $n \neq 0$, поскольку при этом, согласно соотношениям (5), (6), $E_{xmn} = 0$. На рис. 2 приведены кривые $\lambda_{mp}(\epsilon'_2)$ при различной толщине пластины – d . Из приведенных данных следует, что величина λ_{mp} резко возрастает при увеличении толщины пластины, нежели при пропорциональном увеличении относительной диэлектрической

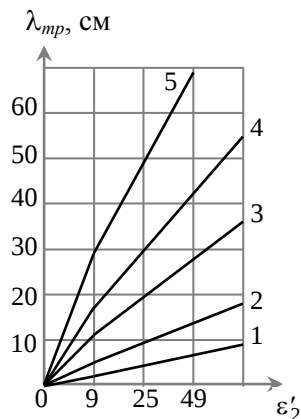


Рис. 2. Кривые зависимости $\lambda_{mp}(\epsilon'_2)$ при различных толщинах пластины – кривая 1 – $d = 0,5$ см; кривая 2 – $d = 1$ см; кривая 3 – $d = 2$ см; кривая 4 – $d = 3$ см; кривая 5 – $d = 5$ см, для ПрВ сечением – $4,5 \times 9,0$ см при распространении волны E_{11}

На рис. 3 приведены кривые зависимости $\beta c / \omega (d/a)$ при различных значениях ϵ'_2

проницаемости ϵ'_2 . При разработке СВЧ-устройств на основе ПрВ, предназначенных для термообработки листовых материалов, желательно, чтобы во всем диапазоне длин волн основной волны, на которой проводится нагрев, распространялась медленная волна, то есть $\lambda_{mp} = \lambda_{кр}$ ($\lambda_{кр}$ – критическая длина типа волны, на которой проводится термообработка). Данное условие эквивалентно требованию – $\left(\frac{\beta_{mn} c}{\omega} \right)_{mp} = 0$, которое

является необходимым условием определения спектра критических длин волн ПрВ. Используя соотношение (15) и условие $\left(\frac{\beta_{mn} c}{\omega} \right)_{mp} = 0$, определяем связь между

толщиной диэлектрической пластины и ϵ'_2 , при которых во всем диапазоне распространения волны, на которой осуществляется термообработка, обеспечивается условие распространения медленной волны:

$$d = \frac{m}{n} \frac{b}{\sqrt{\epsilon'_2 - 1}}, \quad (22)$$

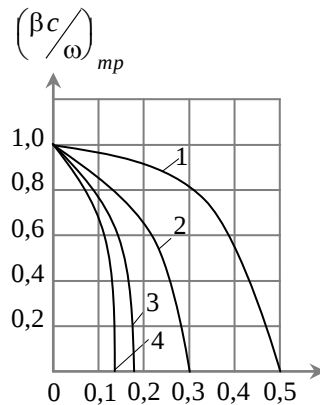


Рис. 3. Зависимость коэффициента замедления волны от толщины пластины для различных ϵ'_2 : кривая 1 – $\epsilon'_2 = 2$; кривая 2 – $\epsilon'_2 = 4$; кривая 3 – $\epsilon'_2 = 9$; кривая 4 – $\epsilon'_2 = 16$

для продольной волны E_{11} , рассчитанные с помощью соотношений (15) и (22). Особенностью данных кривых является то, что

все эти кривые сходятся в одной точке – $\beta c/\omega = 1$ независимо от величины ε'_2 . Это есть свойство Е-волн при расположении диэлектрической пластины в Е-плоскости ПрВ. Кроме того, для каждого значения ε'_2 существует толщина пластины, при которой достигается распространение медленной волны во всем диапазоне длин волн типа волны, на которой осуществляется термообработка. Необходимо отметить, что если толщина пластины d для заданного значения ε'_2 не удовлетворяет требованию технического задания, то устранить данный недостаток можно путем изменения геометрии поперечного сечения волновода либо рабочей длины волны λ_0 , на которой проводится термообработка. На рис. 5 приведена кривая зависимость коэффициента замедления волны E_{11} от приведенной длины волны, на которой начинается трансформация ЭМ поля в воздушной среде $\left(\frac{\beta_{11}c}{\omega}\right)_{mp} \left(\frac{\lambda_{mp}}{a}\right)$ (сплошная кривая). Особенностью данной кривой является ее неизменность при вариации ε'_2 , что

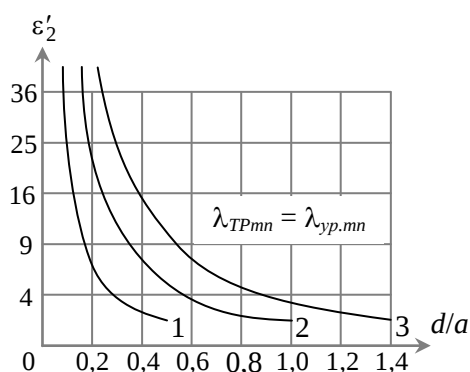


Рис. 4. Значения ε'_2 и d/a в точках дисперсионной зависимости $\beta c/\omega(\lambda/a)$, в которых $\lambda_{mp} = \lambda_{кр}$ для заданного типа волны E_{mn} . Кривая 1 – E_{11} ; кривая 2 – E_{21} , кривая 3 – E_{31}

согласуется с данными, приведенными на рис. 3. Пунктирные линии на рис. 5 представляют зависимости $\frac{\lambda_{mp}}{a} \left(\frac{d}{a}\right)$ при параметре ε'_2 , которые определяются с помощью соотношения (10). Приведенные на рис. 5 данные позволяют определить длину волны λ_{mp} , на которой начинается трансформация ЭМ поля в воздушной среде и соответствующее ей значение $\left(\frac{\beta c}{\omega}\right)_{mp}$, то есть длину волны в ПрВ.

В табл. 1 приведены значения d/a , при которых коэффициент замедления $\left(\frac{\beta c}{\omega}\right)_{mp} = 0$, то есть $\lambda_{mp} = \lambda_{кр}$ для различных типов продольных Е-волн и относительной диэлектрической проницаемости – ε'_2 , которые позволяют определить критические длины волн – $\lambda_{кр mn}$, при соответствующих им коэффициентах заполнения ПрВ – d/a . Заметим, что в табл. 1 приведены данные вырожденных типов длин волн, что свойственно Е-типам волн при Х-поляризации ЭМ поля и расположении диэлектрической пластины в Е-плоскости.

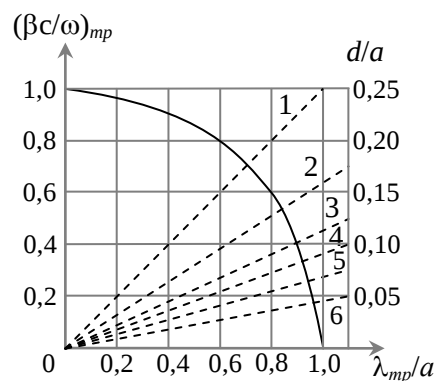


Рис. 5. Дисперсионная зависимость $\left(\frac{\beta_{11}c}{\omega}\right)_{mp}$ от λ_{mp}/a для различных ε'_2 (сплошная кривая) и $\lambda_{mp}/a \left(\frac{d}{a}\right)$ (пунктирные линии) для различных ε'_2 : 1 – $\varepsilon'_2 = 4$; 2 – $\varepsilon'_2 = 9$; 3 – $\varepsilon'_2 = 16$; 4 – $\varepsilon'_2 = 25$; 5 – $\varepsilon'_2 = 36$; 6 – $\varepsilon'_2 = 81$.
Е₁₁-тип волны

Значения d/a , при которых $\left(\frac{\beta_{mn}c}{\omega}\right)_{mp} = 0$ для различных типов волн

ε'_2	2	4	9	16	25	36	49	64	81
E_{11}	0,5	0,29	0,18	0,13	0,102	0,084	0,072	0,063	0,056
E_{21}	1,0	0,58	0,36	0,26	0,204	0,168	0,144	0,126	0,112
E_{31}	1,5	0,87	0,54	0,39	0,306	0,252	0,216	0,189	0,168
E_{41}	2,0	1,16	0,72	0,52	0,408	0,336	0,288	0,252	0,224
E_{12}	0,25	0,144	0,088	0,065	0,051	0,042	0,036	0,031	0,028
E_{13}	0,167	0,096	0,059	0,043	0,034	0,028	0,024	0,021	0,019
E_{14}	0,0125	0,072	0,044	0,032	0,026	0,021	0,018	0,015	0,014
E_{23}	0,33	0,193	0,12	0,09	0,068	0,056	0,048	0,042	0,037
E_{33}	0,5	0,29	0,18	0,13	0,102	0,084	0,072	0,063	0,056

Заключение. Приведенные в работе исследования позволили установить, что термообработка листовых диэлектрических материалов ЭМ поле медленной волны позволяет повысить темп нагрева и КПД при заданном уровне подводимой СВЧ мощности, посредством перераспределения ЭМ в поперечном сечении РК, когда большая часть энергии волны сосредоточена в обрабатываемом материале, что приводит к увеличению поглощаемой мощности $P_{\text{пог}}$. Полученные данные электродинамических параметров $\lambda_{\text{тр}}$, $\lambda_{\text{пер}}$, $\left(\frac{\beta_{mn}c}{\omega}\right)_{\text{тр}}$, обеспечи-

вающих режим распространения медленной волны во всем рабочем диапазоне длины волны, на которой производится термообработка, позволяют совершенствовать конструкцию РК и электротехнологический процесс термообработки в СВЧ-устройствах конвейерного типа на базе ПрВ с диэлектрической пластиной в Е-плоскости. Все собственные электродинамические параметры и структура ЭМ поля получены на основе аналитического решения ВКЗЭ, что значительно упрощает задачу оптимизации конструкции РК и режима термообработки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Собственные электродинамические параметры прямоугольного волновода с диэлектрической пластиной, расположенной в центре широкой стенки волновода / Д.А. Баринов, Д.В. Гапонов, В.А. Коломейцев, С.А. Тасканов // Вопросы электротехнологии. 2017. № 1 (14). С. 107-113.
2. Собственные электродинамические параметры прямоугольного волновода с двухслойным диэлектрическим заполнением / Д.А. Баринов и др. // Вопросы электротехнологии. 2016. № 2 (11). С. 46-57.
3. Определение собственных электродинамических параметров прямоугольного резонатора с двухслойным диэлектрическим наполнением / Д.А. Баринов, В.А. Колмейцев, В.Н. Посадский, Д.Э. Семенов // Радиотехника. 2014. № 10. С. 41-45.
4. Определение спектра собственных резонансных частот и структуры электромагнитного поля прямоугольного резонатора с частичным диэлектрическим заполнением / В.А. Колмейцев, П.В. Ковряков, В.А. Лойко, И.И. Салимов // Успехи современной радиоэлектроники. 2015. № 6. С. 68-78.
5. Никольский Н.Н. Электродинамика и распространение радиоволн / Н.Н. Никольский, Т.Н. Никольская. М.: Наука, 1989. 544 с.
6. Егоров Ю.В. Частично заполненные прямоугольные волноводы / Ю.В. Егоров. М.: Энергия, 1967. 216 с.

7. **Коломейцев В.А.** Численный расчет собственных параметров и структуры поля регулярных волноводов произвольного поперечного сечения, частично заполненных поглощающим материалом / В.А. Коломейцев, В.В. Яковлев // Электронная техника. Сер. Электроника СВЧ. 1985. Вып. 10. С. 71-77.

8. Трансформация электромагнитного поля основной волны прямоугольного

волновода с диэлектрической пластиной, расположенной в Н-плоскости в области распространения медленных волн / Д.А. Баринов, В.А. Коломейцев, Ю.А. Кузьмин, В.Н. Посадский // Актуальные проблемы электронного приборостроения: материалы Междунар. науч.-техн. конф. Саратов: СГТУ, 2018. С. 458-465.

Баринов Дмитрий Анатольевич – заместитель генерального директора по научно-исследовательским и опытно-конструкторским работам АО «НПЦ «Алмаз-Фазотрон», г. Саратов

Ковряков Павел Валерьевич – соискатель кафедры «Радиотехника и телекоммуникации» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Коломейцев Вячеслав Александрович – доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки России

Кузьмин Юрий Александрович – начальник отдела АО «НПЦ «Алмаз-Фазотрон», г. Саратов

Dmitriy A. Barinov – Deputy Director General for Research and Development at JSC Scientific-Production Center Almaz-Fazotron, Saratov

Pavel V. Kovryakov – Doctoral student, Department of Radio Electronics and Telecommunications, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Vyacheslav A. Kolomeeytsev – Dr.Sc., Professor, Honored Scientist of the Russian Federation

Yuri A. Kuzmin – Department Manager at JSC Scientific and Production Center Almaz-Fazotron, Saratov

Статья поступила в редакцию 21.11.20, принята к опубликованию 14.12.20

УВАЖАЕМЫЕ АВТОРЫ!

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

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

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

УДК 621.365.5

МОДЕЛИРОВАНИЕ СВЧ-НАГРЕВА ДИЭЛЕКТРИКОВ С ПОГЛОЩАЮЩИМИ СВЧ-ЭНЕРГИЮ НАПОЛНИТЕЛЯМИ В КАМЕРАХ С БЕГУЩЕЙ ВОЛНОЙ

С.В. Тригорлый, С.Г. Калганова, Ю.А. Кадыкова,
В.Ю. Кожевников, А.С. Сивак, В.О. Юдина

SIMULATION OF MICROWAVE DIELECTRIC HEATING WITH MICROWAVE-ENERGY ABSORBING FILLERS IN TRAVELLING WAVE CHAMBERS

S.V. Trigorly, S.G. Kalganova, Yu.A. Kadykova,
V.Yu. Kozhevnikov, A.S. Sivak, V.O. Yudina

Проведено математическое моделирование нагрева диэлектрических материалов с поглощающими СВЧ-энергию наполнителями в камерах с бегущей волной на базе прямоугольного волновода и на квазикоаксиальном волноводе. В качестве наполнителей рассматривались карбид кремния, графит и углеродное волокно. Определены конструктивные параметры и мощность СВЧ-установок с камерами бегущей волны для наиболее равномерного нагрева диэлектрических материалов цилиндрической формы с поглощающими СВЧ-энергию наполнителями.

Ключевые слова: математическое моделирование, диэлектрики, поглощающие наполнители, СВЧ-нагрев, СВЧ-камеры с бегущей волной

Применение СВЧ-энергии позволяет интенсифицировать технологические процессы термообработки различных диэлектрических материалов [1]. Однако не все диэлектрические материалы имеют высокий коэффициент поглощения. Так, например, большая часть керамик при температуре, близкой к комнатной являются слабо поглощающими СВЧ-энергию материалами. Для обеспечения интенсивного нагрева керамики применяется так

A mathematical modeling of heating dielectric materials with microwave energy-absorbing fillers in travelling wave chambers based on a rectangular waveguide and a quasi-axial waveguide has been performed. Silicon carbide, graphite, and carbon fiber were viewed as fillers. The design parameters and capacity of microwave installations with traveling wave chambers applied for a most uniform heating of dielectric materials of cylindrical shape with the fillers absorbing microwave energy have been determined.

Keywords: mathematical modeling, dielectrics, absorbing fillers, microwave heating, a microwave chamber with a traveling wave

называемый «гибридный» СВЧ-нагрев [2, 3]. При этом спекаемое изделие помещается в оболочку из хорошо поглощающего СВЧ-энергию материала, называемую аппликатором или вторичным поглотителем. Актуальной проблемой является также синтез диэлектриков, в состав которых входит поглощающий СВЧ-энергию наполнитель, обеспечивающий необходимую скорость и равномерность нагрева исследуемых образцов.

Целью данной работы является математическое моделирование нагрева диэлектрических материалов с поглощающими СВЧ-энергию наполнителями в камерах с бегущей волной для определения оптимальной конструкции камеры и режима термообработки.

СВЧ-камеры с бегущей волной (КБВ) представляют собой отрезки той или иной линии передачи, частично заполненные обрабатываемой средой [1]. Такие камеры позволяют достичь максимальной равномерности термообработки, не прибегая к дополнительным способам выравнивания плотности энергии по объёму обрабатываемого диэлектрика. Для КБВ свойственны

относительно небольшие размеры и высокий КПД по использованию СВЧ-энергии.

В данной работе рассматривается использование СВЧ-камер на базе прямоугольного волновода (рис. 1) и на квазикоаксиальном волноводе (рис. 2), которые используются для нагрева цилиндрических диэлектриков размерами от $\varnothing 40 \times 40$ мм до $\varnothing 60 \times 60$ мм. При частоте 2450 МГц поперечное сечение волновода составляет 45×90 мм, поэтому максимальный поперечный диаметр исследуемого изделия для СВЧ-камеры на прямоугольном волноводе не превышал $\varnothing 40$ мм. В СВЧ-камере на квазикоаксиальном волноводе исследовался нагрев диэлектриков большего размера $\varnothing 60 \times 60$ мм.

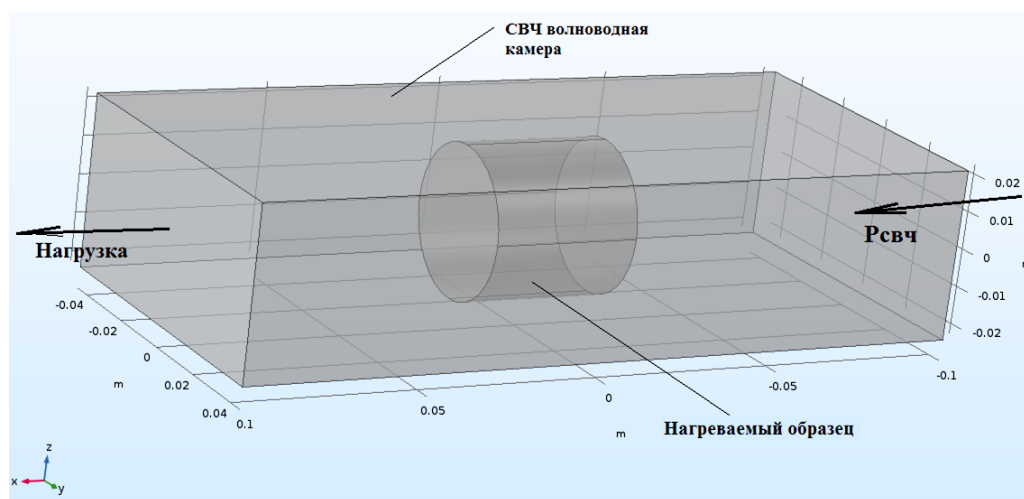


Рис. 1. Геометрическая модель СВЧ волноводной камеры с нагреваемым образцом

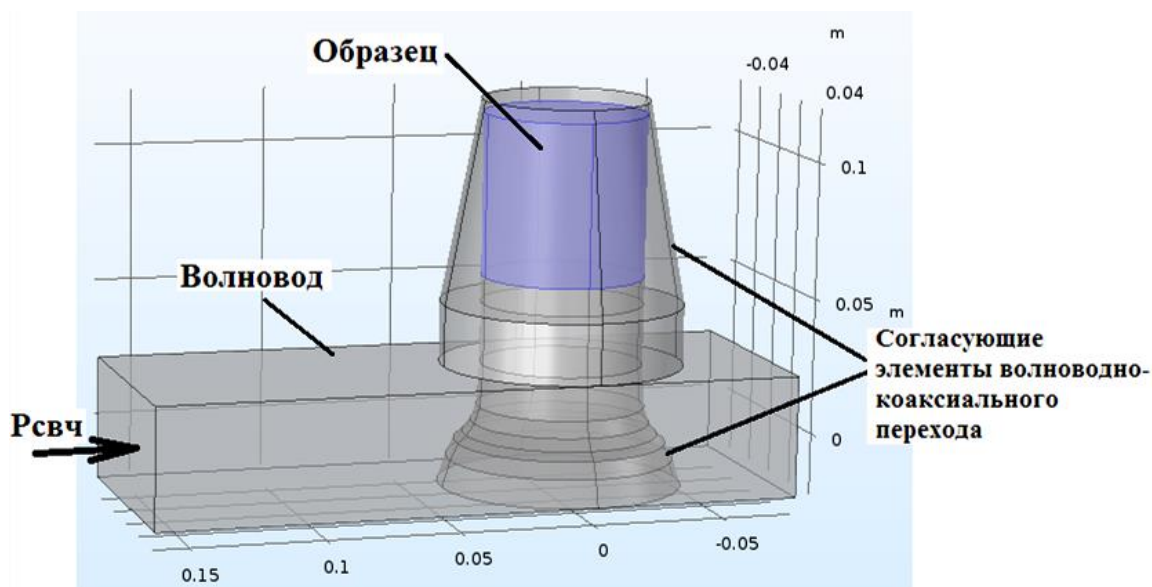


Рис. 2. Геометрическая модель СВЧ-камеры на квазикоаксиальном волноводе

Математическое описание процессов СВЧ-нагрева диэлектриков в рассматриваемых СВЧ КБВ состоит из системы взаимосвязанных уравнений электродинамики и тепломассопереноса [1]. Для решения данных уравнений с соответствующими граничными и начальными условиями использован метод конечных элементов, который реализован в данной работе с помощью программного обеспечения COMSOL Multiphysics [4].

В качестве диэлектрика с низким коэффициентом поглощения рассматривалась эпоксидная смола ЭД20, ее физические свойства представлены в табл. 1 [5-8].

Для интенсификации процесса СВЧ-нагрева использовались следующие поглощающие наполнители: карбид кремния, графит и углеродное волокно, их физические свойства приведены в табл. 2 [9-12].

Таблица 1 – Физические свойства эпоксидной смолы ЭД20 без наполнителя

Диэлектрические параметры			Удельное объемное электрическое сопротивление, Ом·м	Удельная проводимость, Сим/м	λ , Вт/(м·К)	c , Дж/(кг·К)	ρ , кг/м ³
tg δ	ε'	ε''	ρ_z	σ	0,17...2,92	460...2930	1200
0,002	2,37	0,00474	$(1-320) \cdot 10^{12}$	$3,125 \cdot 10^{-15}$			

Таблица 2 – Физические свойства поглощающих наполнителей

Наименование материала	Диэлектрические параметры			Удельная проводимость, σ , Сим/м	Коэффициент теплопроводности λ , Вт/(м·К)	Удельная теплоемкость c , Дж/(кг·К)	Плотность ρ , кг/м ³
	tg δ	ε'	ε''				
Карбид кремния	0,5-1,1	7,5-12	3,75-13,2	6.67	31	670	3200
Графит	-	-	-	1667	150	710	1950
Углеродное волокно	-	-	-	100	0,3	200	120

В процессе моделирования рассматривались два варианта нагрева образцов ЭД20:

1) Нагрев образцов без поглощающих наполнителей в режиме, обеспечивающем максимально возможную равномерность распределения температурного поля по объему образцов, при этом:

- требуемая температура нагрева должна составлять от 200 до 400° С;
- скорость нагрева – не менее 5°С/мин.

2) Нагрев образцов с поглощающими СВЧ-энергию наполнителями при выполнении следующих требований:

- содержание наполнителя составляет до 5% по массе;

– температура нагрева наполнителя должны быть в пределах от 200 до 400° С;

– скорость нагрева наполнителя – не менее 5° С/с.

Рассмотрено равномерное распределение поглощающих наполнителей в нагреваемых образцах эпоксидной смолы ЭД20 и расположение поглощающих наполнителей в продольном сечении образцов (рис. 3). Геометрические размеры образцов и наполнителей имеют следующие обозначения: D – диаметр, L – высота образца; h – толщина поглотителя. Толщина поглотителей h определялась исходя из условия, что масса поглотителя составляет от 0,3 до 5 % от массы образца.

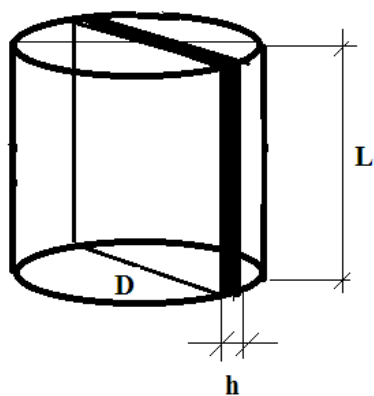


Рис. 3. Расположение поглотителей в цилиндрических образцах

На первом этапе проведено моделирование СВЧ нагрева эпоксидной смолы ЭД20 без поглощающих наполнителей и с наполнителями в СВЧ-камере на основе прямоугольного волновода при СВЧ мощности 1000 Вт и частоте генератора 2450 МГц. Результаты численного моделирования нагрева эпоксидной смолы ЭД20 без поглощающих наполнителей представлены в виде распределения напряженности электрического поля и температуры в заданных сечениях камеры и образца (рис. 4, 5).

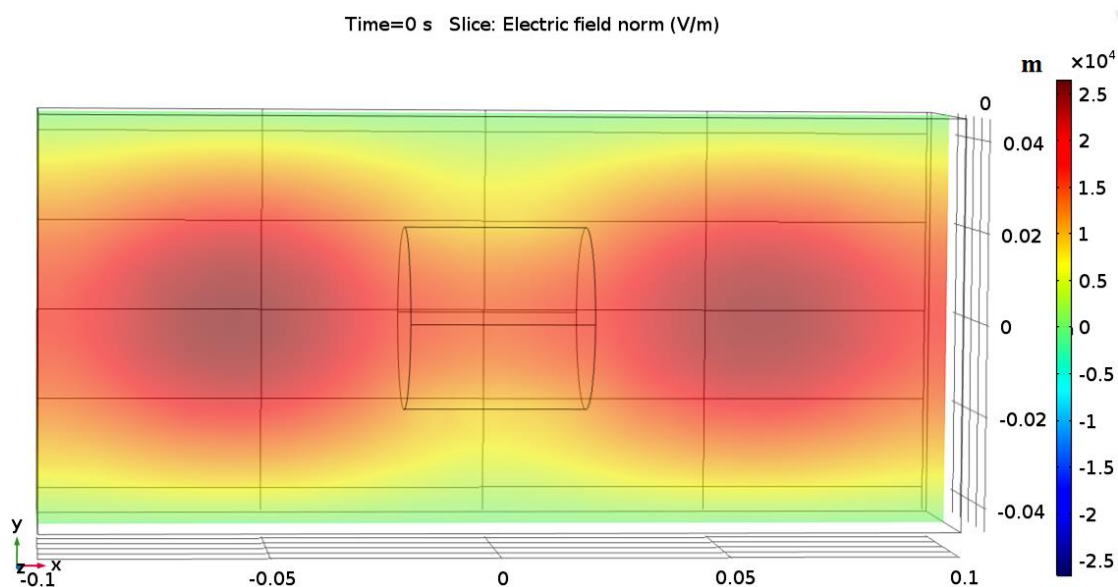


Рис. 4. Распределение напряженности электрического поля в сечении xy в середине волноводной камеры

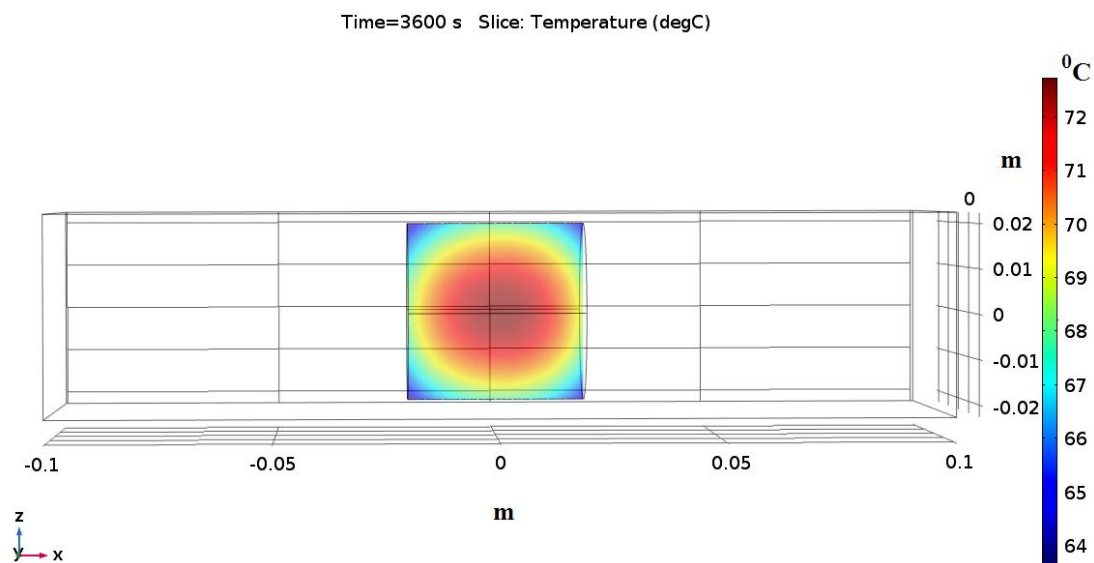


Рис. 5. Температурное поле в момент времени 3600 с в среднем сечении xz образца ЭД20

За время 3600 с температура нагрева в среднем сечении xz образца составила 64–72° С. Темп нагрева не соответствует заданным требованиям вследствие низкого поглощения СВЧ энергии эпоксидной смолой ЭД20.

При исследовании СВЧ нагрева образцов диэлектриков с распределенными в них поглощающими СВЧ энергию наполнителями среда рассматривается как сложный диэлектрик, представляющий собой смесь химически не взаимодействующих друг с другом компонентов с различными диэлектрическими проницаемостями. В этом случае в первом приближении общую диэлектрическую проницаемость компонентов можно определить по уравнению Лихтенеккера [13]

$$\varepsilon^x = \theta_1 \varepsilon_1^x + \theta_2 \varepsilon_2^x, \quad (1)$$

где ε , ε_1 , ε_2 – соответственно диэлектрические проницаемости смеси и отдельных компонентов; θ_1 и θ_2 – объемные концентрации компонентов, $\theta_1 + \theta_2 = 1$; x – вели-

чина, характеризующая распределение компонентов и принимающая значения от +1 до –1. При моделировании нагрева образцов материалов рассматриваем хаотичное распределение поглотителей по объему. В этом случае после преобразований уравнение Лихтенеккера примет вид

$$\ln \varepsilon = \theta_1 \ln \varepsilon_1 + \theta_2 \ln \varepsilon_2. \quad (2)$$

Из уравнения (2) определяется эффективная диэлектрическая проницаемость сложных диэлектриков.

Проведено моделирование СВЧ нагрева образца эпоксидной смолы ЭД20 при равномерном по объему распределении поглощающего наполнителя – карбида кремния, составляющего 5 % от массы образца. Эффективная комплексная диэлектрическая проницаемость, определенная из уравнения (2), равна $\varepsilon_{эфф} = 2,464 - j 0,045$. Результаты моделирования СВЧ нагрева образца размерами $\varnothing 40 \times 40$ мм с карбидом кремния в СВЧ-камере на прямоугольном волноводе представлены на рис. 6.

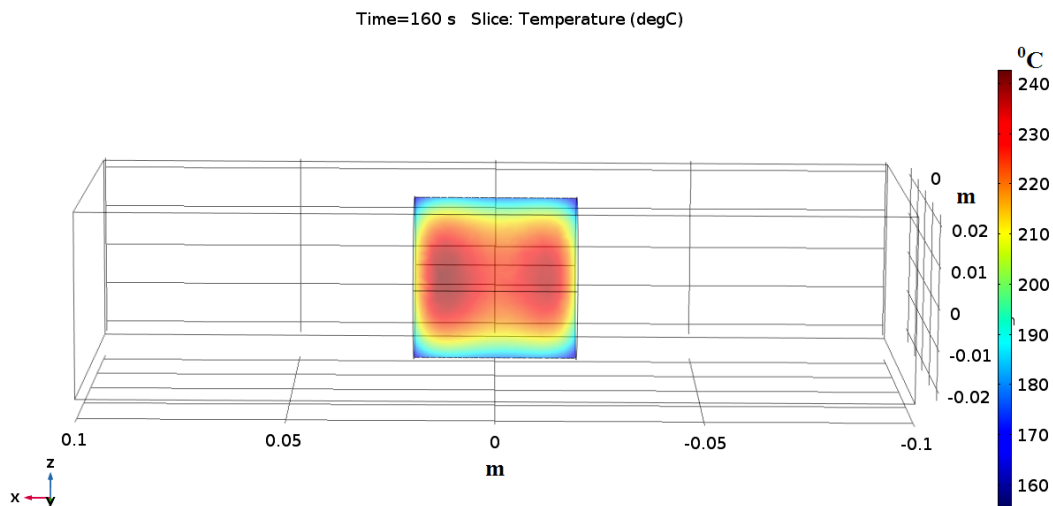


Рис. 6. Температурное поле в момент времени 160 с в среднем сечении xz образца ЭД20 с наполнителем из карбида кремния, равномерно распределенным по объему

Установлено, что за 160 с СВЧ нагрева температура в среднем сечении xz образца составила от 160 до 240° С. Максимальная температура достигает заданной величины, однако темп нагрева равен 1,38° С/с, что меньше требуемой величины 5° С/с.

Проведено численное исследование СВЧ нагрева тонких поглощающих наполнителей, расположенных в продольном сечении образцов из эпоксидной смолы ЭД20. На рис. 7 показано распределение температурного поля при нагреве образца ЭД20, в продольном среднем сечении кото-

рого имеется тонкий слой карбида кремния. Толщина карбида кремния выбрана из расчета 5 % его содержания от массы образца. Образец в волноводной СВЧ-камере расположен так, чтобы слой карбида кремния был параллелен узкой стенки волновода и находился в зоне максимума напряженности электрического поля. Для получения наиболее равномерного поля температуры образец смещен относительно центра волноводной камеры на 0,5 см в сторону ввода СВЧ-энергии. В результате моделирования установлено, что за время СВЧ нагрева 76 с температура образца в зоне расположения карбида кремния достигает 310-370°C (рис. 7), что соответствует установленным

требованиям по максимальной температуре и темпу нагрева.

Проведено численное исследование влияния на нагрев образцов проводящих и поглощающих СВЧ-энергию наполнителей (графита и углеродного волокна), расположенных в продольном сечении образцов параллельно широкой стенке волновода в зоне максимума магнитного поля. Результаты моделирования для случая СВЧ нагрева образца с графитовым наполнителем, составляющим 3 % от массы образца, показаны на рис. 8. Установлено, что за 76 с нагрева в среднем сечении температура слоя графита достигает 56-64°C, что не соответствует требуемым значениям температуры.

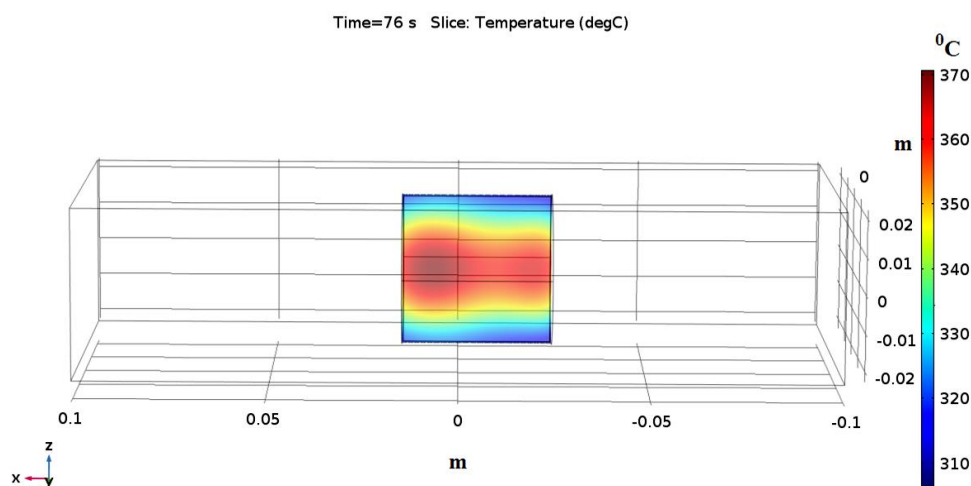


Рис. 7. Температурное поле в момент времени 76 с в среднем сечении xz слоя карбида кремния, расположенного в образце ЭД20

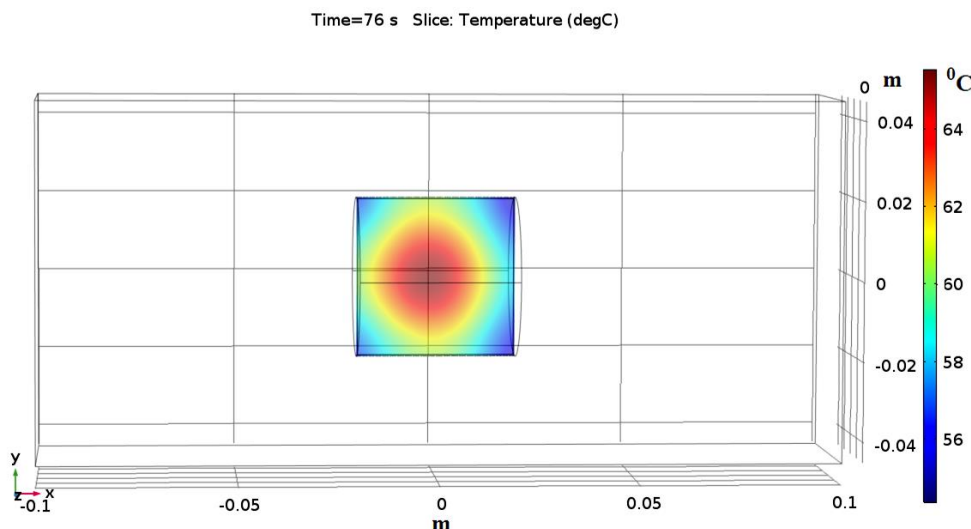


Рис. 8. Температурное поле в момент времени 76 с в среднем сечении xy слоя графита, расположенного в образце ЭД20

При СВЧ нагреве образца с наполнителем из углеродного волокна, составляющим 0,3 % от массы образца, результаты моделирования нагрева за 76 с показаны на рис. 9. Температура на поверхности наполнителя достигает 210 °С, что соответствует заданному темпу нагрева и установленному температурному диапазону.

Таким образом, для интенсификации нагрева эпоксидной смолы ЭД20 в качестве поглощающих наполнителей можно использовать карбид кремния и углеродное волокно.

На втором этапе исследований проведено моделирование нагрева образцов эпоксидной смолы ЭД20 размерами $\varnothing 60 \times 60$ мм в СВЧ-камере на квазикоаксиальном волноводе на

частоте 2450 МГц при мощности 600 Вт. В качестве поглощающих СВЧ-энергию наполнителей использовались карбид кремния и графит, расположенные в продольном сечении образцов параллельно поперечному сечению волновода. Размеры поглощающих наполнителей рассчитаны, исходя из условия, чтобы масса поглотителя составляла 5 % от массы образца.

Размеры СВЧ-камеры – длина волноводной части и согласующих элементов волноводно-коаксиального перехода (см. рис. 2) – определялись в процессе моделирования с целью получения наиболее равномерного распределения температуры в образцах и поглощающих наполнителях. Результаты моделирования показаны на рис. 10, 11.

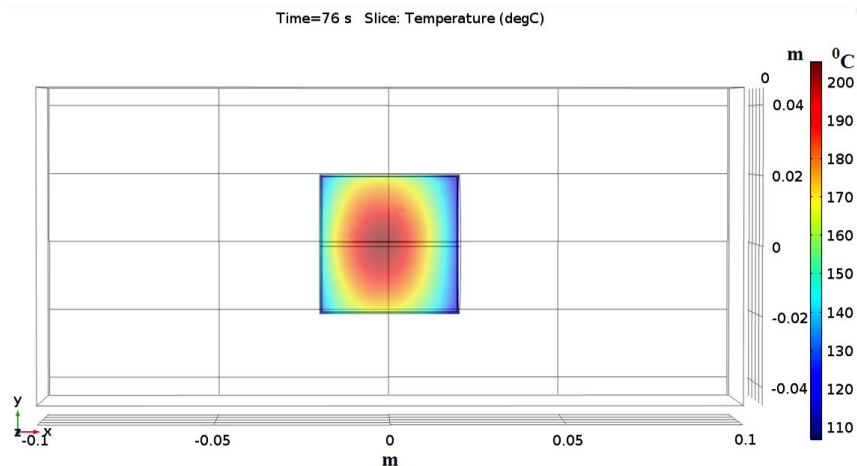


Рис. 9. Температурное поле в момент времени 76 с в сечении xy на поверхности слоя углеродного волокна, расположенного в образце ЭД20

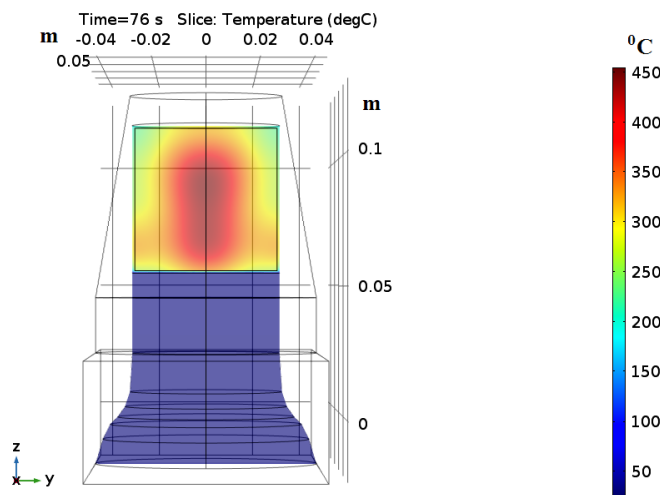


Рис. 10. Температурное поле в момент времени 76 с в среднем сечении yz слоя карбида кремния, расположенного в образце ЭД20

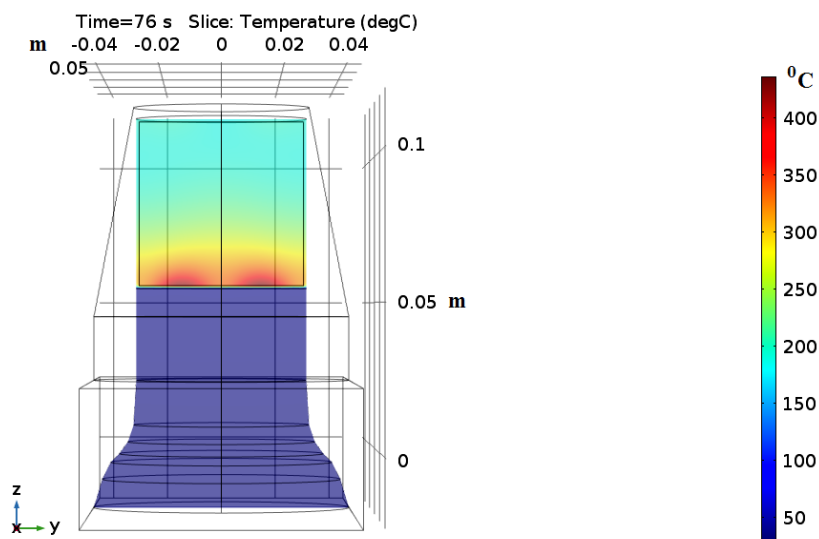


Рис. 11. Температурное поле в момент времени 76 с в среднем сечении zy слоя графита, расположенного в образце ЭД20

Установлено, что в СВЧ-камере на квазикоаксиальном волноводе карбид кремния в образце ЭД20 за 76 с нагревается до температуры 250-450 °С, а графит – до температуры 180-420 °С, что соответствует установленным требованиям. Однако распределения полей температуры в поглощающих наполнителях существенно отличаются. В карбиде кремния примерно 50 % площади продольного сечения имеет температуру от 350 до 450° С, тогда как у графита примерно 20 % от всей площади поверхности имеют температуру от 300

до 420°С. Поэтому применение карбида кремния в качестве поглощающего материала в данном случае предпочтительнее по сравнению с графитом.

Таким образом, на основе проведенного математического моделирования определены конструктивные параметры и мощность СВЧ-установок с камерами бегущей волны на базе прямоугольного волновода и на квазикоаксиальном волноводе для наиболее равномерного нагрева диэлектрических материалов цилиндрической формы с поглощающими СВЧ-энергию наполнителями.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Архангельский Ю.С.** СВЧ электротермия / Ю.С. Архангельский. Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 1998. 408 с.
2. **Приседский В.В.** Наноструктурные керамические функциональные материалы / В.В. Приседский // Наукові праці Дон-НТУ. 2014. Вып. 1 (22). С. 20-34.
3. **Menezes R.R.** Microwave Fast Sintering of Ceramic Materials / R.R. Menezes, P.M. Souto, G.A. Kiminami // Sintering of Ceramics. New Emerging Techniques. 2012. P. 1-26.
4. Моделирование СВЧ электротехнологических процессов и установок с помощью программного пакета COMSOL Multiphysics / С.В. Тригорлый, В.С. Алексеев, С.Г. Калганова, В.В. Захаров. Саратов: Амирит, 2019. 105 с.
5. Энциклопедия полимеров / ред. коллегия: В.А. Кабанов (глав. ред.) и др. Т. 3. П–Я. М.: Сов. энцикл., 1977. 1152 с.
6. **Крыжановский В.К.** Технические свойства полимерных материалов / В.К. Крыжановский, В.В. Бурлов, А.Д. Паниматченко. 2007. 424 с.
7. **Невилл К.** Справочное руководство по эпоксидным смолам / К. Невилл, Х. Ли. М.: Энергия, 1973. 350 с.
8. **Чернин И.З.** Эпоксидные полимеры и композиции / И.З. Чернин, Ф.М. Сметхов, Ю.В. Жердев. М.: Химия, 1982. 232 с.

9. Свойства карбида кремния [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://thermalinfo.ru/svoystva-materialov/keramika-i-steklo/svoystva-karbida-kremniya-sic> (дата обращения 01.10.2010).

10. Григорьев А.Д. Измерение электрических параметров карбид-кремниевых поглотителей в микроволновом диапазоне / А.Д. Григорьев // Электроника и микроэлектроника СВЧ. 2016. Т. 1. С. 315-318.

11. Свойства графита [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://lkmprom.ru/>

[clauses/materialy/grafit-ego-svoystva-i-sfera-primeneniya/](http://thermalinfo.ru/svoystva-materialov/keramika-i-steklo/svoystva-karbida-kremniya-sic) (дата обращения 02.10.2010).

12. Свойства углеродных волокон [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://lektsii.org/4-12962.html> / (дата обращения 02.10.2010).

13. Богородицкий Н.П. Электротехнические материалы: учеб. для электротехн. и энерг. спец. вузов / Н.П. Богородицкий, В.В.Пасынков, Б.М. Тареев; 7-е изд., перераб. и доп. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отделение, 1985. 304 с.

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

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

Кадыкова Юлия Александровна – доктор технических наук, профессор кафедры «Электроэнергетика и электротехника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

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

Сивак Антон Сергеевич – ассистент кафедры «Электроэнергетика и электротехника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Юдина Виолетта Олеговна – ассистент кафедры «Электроэнергетика и электротехника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Sergey V. Trigorly – Ph.D., Associate Professor, Department of Power Engineering and Electrical Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

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

Yuliy A. Kadykova – Dr.Sc., Professor, Department of Power Engineering and Electrical Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

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

Anton S. Sivak – Assistant Lecturer, Department of Power Engineering and Electrical Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Violetta O. Yudina – Assistant Lecturer, Department of Power Engineering and Electrical Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 20.10.20, принята к опубликованию 14.12.20

УДК 621.785.52

**ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ
И ТВЕРДОСТИ ВЫСОКОПРОЧНОЙ СЛОИСТОЙ СИСТЕМЫ
«СТАЛЬ X12МФ – Zr(O,C)-ПОКРЫТИЕ», ФОРМИРУЕМОЙ
НА ШТАМПОВОМ ИНСТРУМЕНТЕ**

М.Е. Федосеев, А.А. Фомин

**INVESTIGATION OF THE MICROSTRUCTURE AND HARDNESS
OF THE HIGH – STRENGTH LAYERED SYSTEM
«STEEL X12MoV – Zr(O,C)-COATING» FORMED ON A DIE TOOL**

M.E. Fedoseev, A.A. Fomin

Срок эксплуатации и надежность штампового инструмента зависят от комплекса физико-механических свойств, получаемых при оптимально выбранных технологических режимах упрочняющей обработки. В данной работе предлагается новый метод электроискрового легирования цирконием рабочих поверхностей предварительно закаленного штампового инструмента с последующей индукционной химико-термической обработкой в углеродсодержащей пасте для получения требуемой твердости и вырубной способности. Экспериментально изучены микроструктура, морфология поверхности и механические характеристики слоистой системы «сталь X12МФ-основа – Zr-покрытие», полученной электроискровым легированием при межэлектродном напряжении 2,9-7,6 В и рабочем токе 3,0-4,4 А с продолжительностью модификации не более 3,5-4 мин/см². Последующая химико-термическая обработка токами высокой частоты данной слоистой системы при рабочем токе от 200 до 500 А (1/16 действующего значения тока индуктора) и выдержке от 100 до 300 с способствует формированию износостойкого металллокерамического Zr(O,C)-покрытия с твердостью 1224–1412 HV при толщине слоя 15-60 мкм.

Ключевые слова: электроискровое легирование, цирконий, инструментальная сталь, слоистая система, цементация, токи высокой частоты, углеродсодержащая паста

The service life and reliability of a die tool depend on a set of physical and mechanical properties obtained under optimum operating schedules of their strengthening treatment. This paper presents a new method for zirconium electrospark alloying of the working surfaces of pre-hardened die casting tools followed by an induction chemical-thermal treatment in the carbon-containing paste required to obtain the necessary hardness and punching properties. Experiments have been performed on the microstructure, morphological and mechanical characteristics of the layered “steel X12MoV – Zr-coating” system obtained by electrospark doping under the interelectrode voltage of 2.9-7.6 V and operating current of 3.0-4.4 A, and the processing time no more than 3.5-04 min/cm². Subsequent chemical-thermal treatment of the given layered system with high-frequency currents at the operating current from 200 to 500 A (1/16 of the inductor current value) and the exposure time from 100 to 300 s facilitates formation of a high-strength cermet Zr(O,C)-coating with the hardness of 1224-1412 HV and layer thickness of 15-60 μm.

Keywords: electric spark doping, zirconium, tool steel, layered system, carburization, high frequency currents, carbon-containing paste

Формообразование является основной операцией при металлообработке на производственной линии крупносерийного и массового производства. Увеличение срока службы штампового инструмента является главной задачей при разработке энергоэффективного и ресурсосберегающего технологического процесса. Основной причиной снижения эксплуатационных и технико-экономических характеристик процесса штамповки является недостаточный уровень качества обработки рабочих поверхностей инструмента, в частности пуансонов, которые работают при воздействии высоких контактных напряжений. В результате происходят ускоренная деформация рабочих и вспомогательных поверхностей штампового инструмента или его разрушение в случае невысоких прочностных характеристик и ряда геометрических особенностей инструмента [1, 2].

К штамповому инструменту, в частности пуансонам для вырубки, предъявляется комплекс физико-механических характеристик и эксплуатационных требований, таких как прочность и стойкость к ударным нагрузкам, твердость и износостойкость, а также качество рабочих поверхностей, которые определяют длительность и эффективность эксплуатации. Считается, что оптимально выбранные технологические режимы упрочняющей обработки, включающей закалку и нанесение износостойкого покрытия, необходимы для достижения высокой производительности, надежности и качественной работы металлообрабатывающего инструмента [3].

Известно множество традиционных и передовых методов упрочнения поверхности и формирования износостойких покрытий на штамповом инструменте, в частности объемная и поверхностная закалка, лазерная и плазменная обработка, нанесение тонкопленочных покрытий вакуумно-конденсационными методами осаждения из паровой фазы и газообразной реакционной среды (PVD и CVD технологии). Широко применяется химико-термическая обработка (ХТО), например цементация, в результате которой поверхность изделия приобре-

тает толстый слой карбидов металлических элементов основы изделия [4]. В результате необходимых фазово-структурных превращений повышаются физико-механические характеристики изделия, в частности твердость и износостойкость. Применение последующей закалки обеспечивает высокую твердость поверхности и сохранность вязкой сердцевины.

Существуют различные виды диффузионного насыщения поверхности стали и других металлических материалов углеродом. В основе этих методов лежат твердофазные реакции, при этом карбюризатором служит как твердая среда, так и газообразная или пастообразная. Данные виды ХТО проводятся в специальных герметичных камерах при оптимальной температуре, например для углеродистой стали это значение изменяется от 850 до 950°C и зависит от исходного содержания углерода.

Для повышения технико-экономических характеристик ХТО используется газоразрядная и плазмохимическая обработка в реакционных средах, а также лазерное модифицирование [5, 6]. В ранее выполненном исследовании было установлено, что электроискровое нанесение циркония на сталь Х12МФ (исходное состояние после механической обработки, без термического упрочнения) и последующая цементация токами высокой частоты (ТВЧ) с применением кремний-графитовой пасты позволяет повысить микротвердость поверхности до 724-946 HV при толщине слоя около 15-40 мкм [7].

Таким образом, для повышения физико-механических и эксплуатационных характеристик предлагается проводить электроискровое легирование (ЭИЛ) рабочих поверхностей термически упрочненных изделий тугоплавким карбидообразующим металлом (цирконием); последующая индукционная ХТО в углеродсодержащей пасте слоистой системы «сталь Х12МФ – Zr-покрытие» позволит создать в ее приповерхностном слое карбидную фазу с повышенными эксплуатационными характеристиками.

Слоистая система «сталь Х12МФ – Zr-покрытие» формировалась на цилиндриче-

ских образцах диаметром 12 мм и высотой 4 мм, предварительно подвергнутых термической упрочняющей обработке, а именно закалке ТВЧ, изготовленных из высоколегированной инструментальной стали X12MФ (ГОСТ 5950-73, химический элементный состав в масс. %: С – 1,45-1,65; Si – 0,1-0,4; Mn – 0,15-0,45; Cr – 11,0-12,5; V – 0,15-0,30; Mo – 0,4-0,6; Fe – остальное).

Закалка ТВЧ с дальнейшим охлаждением в минеральном масле проводилась при рабочем токе 500 А (1/16 действующего значения тока индуктора) и выдержке около 30-35 с, что соответствовало плавному возрастанию температуры в диапазоне 1030-1070°C. Твердость экспериментальных образцов после закалки была равномерной по сечению образцов и составляла 60-62 HRC. Дальнейшая подготовка поверхности образцов предусматривала

тонкое шлифование ($Ra\ 0,2-0,4$) с применением мелкозернистой абразивной бумаги (согласно ГОСТ 3647-80 от 5-Н,М63 до М5\Н-00; ISO 6344 от Р240 до Р2500), а также очистку в этаноле с применением ультразвуковой ванны.

Модификация поверхности, а именно нанесение цирконийсодержащего слоя (Zr-покрытие), подготовленных образцов проводилась с помощью ЭИЛ циркониевым электродом (циркониевый сплав марки Э110, ОСТ 95.10159-85) с применением устройства «Прогресс 023». Для получения максимального по глубине, насыщенного и равномерного Zr-покрытия ЭИЛ выполнялось в несколько этапов со снижением мощности разрядов, а именно снижением рабочего тока и межэлектродного напряжения от максимального значения $4,4\pm0,2$ А и 7,6 В к минимальному $3,0\pm0,1$ А и 2,9 В (рис. 1).

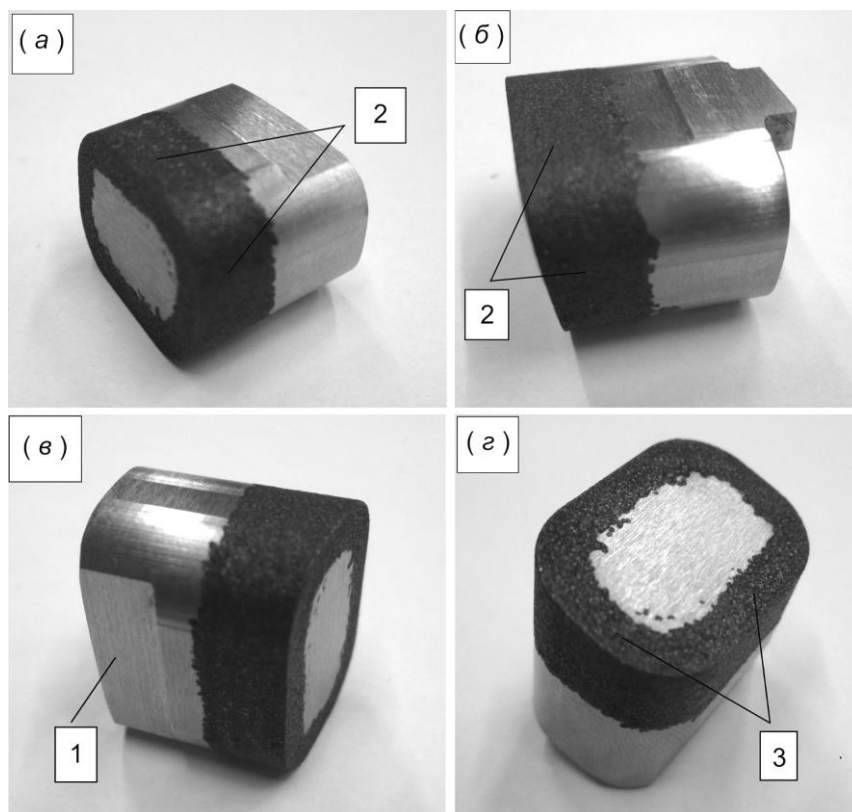


Рис. 1. Вырубной пуансон с участками сформированного циркониевого покрытия (темного цвета) на боковой (а-в) и торцевой (г) поверхностях: 1 – посадочное место; 2 – боковая (вспомогательная) поверхность; 3 – рабочая (торцевая) поверхность

Толщина получаемого циркониевого покрытия составила около 28 ± 5 мкм с максимальным значением твердости по-

верхности при малой нагрузке по Супер-Роквеллу 94-97 HRN₁₅ (эквивалентно 1160-1860 HV). Выбор представленных

режимов ЭИЛ обусловлен ранее проведенными исследованиями, согласно которым устанавливалось влияние энергетических параметров процесса на массоперенос и качество полученного цирконийсодержащего слоя [7].

Образцы с модифицируемым слоем циркония далее подвергались цементации с применением кремний-графитовой пасты (рис. 2 а, б). В ее составе присутствовало натриевое жидкое стекло – 20-25 масс.%, (ГОСТ 13078-81), кальцинированная сода – 4-5 масс.% (ГОСТ 5100-85) и порошок пиролитического графита (ТУ 1915-099-04806898-2003). Согласно элементному

анализу в составе основного компонента – порошка пирографита, помимо углерода, присутствовал кислород в общем количестве не более $3,93 \pm 1,14$ ат.% [7]. Нагрев ТВЧ характеризовался потребляемой электрической мощностью 150-480 Вт, удельной мощностью 40-140 Вт/г и частотой тока на индукторе в диапазоне 88-90 кГц. В результате данной обработки устанавливалось влияние ХТО в температурном диапазоне от 750 до 1250°C на показатели микроструктуры получаемой слоистой системы «закаленная инструментальная сталь Х12МФ – Zr-покрытие».

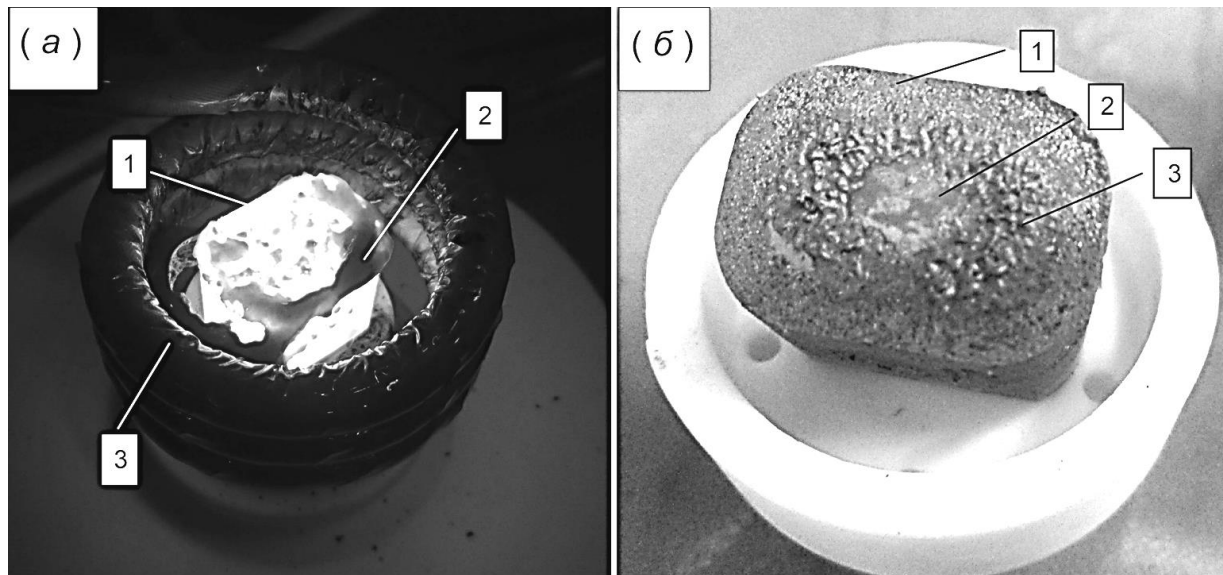


Рис. 2. Химико-термическая обработка с применением нагрева ТВЧ:

а – вид образца при проведении ХТО (1 – пуансон, 2 – углеродсодержащая паста, 3 – индуктор);
б – вид образца после обработки (1 – функциональное покрытие, 2 – металлическая основа, 3 – окалина с остатками карбюризатора)

При исследовании микроструктуры, морфологии и химического состава покрытий после ЭИЛ и ХТО применялась растровая электронная (РЭМ) микроскопия (микроскоп «MIRA II LMU», Tescan) в комбинации с энергодисперсионным рентгенофлуоресцентным (ЭДРФА) анализом (детектор «INCA PentaFETx3», Oxford). Микротвердость HV оценивалась с применением метода микроиндентирования по методу Виккерса (микротвердомер «ПМТ-3М») при нагрузке на индентор 100 гс (0,98 Н).

Химический состав слоистой системы «сталь Х12МФ – Zr-покрытие» образцов, подвергнутых предварительному электроискровому легированию карбидообразующим тугоплавким металлом (цирконием), характеризовался максимальным и равномерным насыщением поверхности стальной основы цирконием. Максимум содержания циркония на поверхности образцов составил $45,55 \pm 24,69$ масс.%, что указывало на протекание необходимых процессов массопереноса циркония в приповерхностный слой (табл. 1; рис. 3).

Таблица 1 – Химический состав поверхности образцов с цирконийсодержащим покрытием, масс. %

Спектр	C [N]	C [O]	C [Cr]	C [Fe]	C [Zr]
1	1,20	21,49	4,88	24,44	47,99
2	–	17,43	7,04	31,06	44,47
3	–	17,56	0,91	2,80	78,74
4	–	3,30	9,74	77,83	9,13
5	3,83	14,98	5,82	27,95	47,42
среднее	2,52	14,95	5,68	32,82	45,55
стандартное отклонение	1,32	6,92	3,23	27,50	24,69

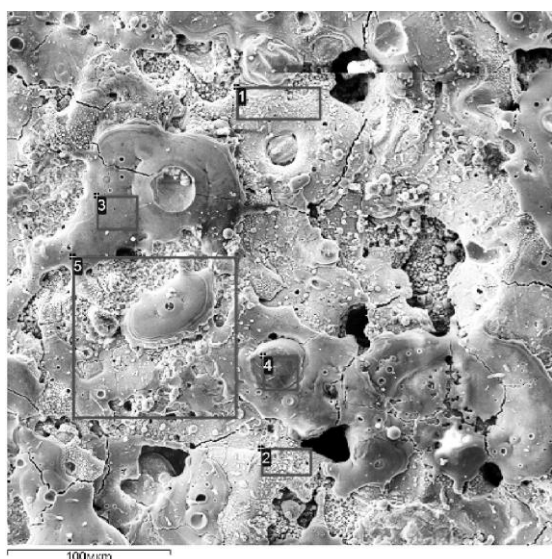


Рис. 3. Растровая электронная микроскопия цирконийсодержащего покрытия (прямоугольными участками показаны области анализа химического элементного состава)

Химический состав образцов с цирконийсодержащими покрытиями, подвергнутых индукционной ХТО в углеродсодержащей пасте, характеризовался ускоренным протеканием процесса диффузионного насыщения углеродом приповерхностного слоя с повышением температуры обработки. Максимум содержания углерода составил около 39 масс.%, что указывало на протекание необходимых изменений химического состава и проникновение углерода в открытопористую (морфологически неоднородную, шероховатую) структуру слоистой системы «сталь Х12МФ – Zr-покрытие», при этом формировались включения твердой фазы графита. Высокотемпературное воздействие процессов ЭИЛ и цементации способствовало также насыщению поверхности кислородом в количестве около

15 масс.%, что привело к получению функционального Zr(O,C)-покрытия на поверхности стальных образцов.

Цементация образцов при наибольшей температуре $1200 \pm 100^\circ\text{C}$ привела к неравномерности распределения углерода по глубине диффузионного слоя и способствовала разупрочнению Zr(O,C)-покрытия и металлической основы. Применение повышенных температур (свыше 1100°C) при ХТО снизило твердость до $473 \pm 32\text{ HV}$ и увеличило размер зерен (рис. 4б). Согласно данным оптической микроскопии, в структуре не наблюдалось функционального цирконийсодержащего покрытия (рис. 4 а).

При использовании пониженной температуры $800 \pm 25^\circ\text{C}$ распределение углерода также имело выраженную неравномерность по глубине диффузионного слоя (рис. 5 а). При температуре ниже 900°C происходило незначительное снижение твердости ($768 \pm 65\text{ HV}$) поверхностного слоя, при этом сохранялась высокая концентрация циркония в функциональном покрытии относительно исходной величины. При глубине микроиндентирования свыше 15 мкм наблюдалось резкое снижение твердости до $487 \pm 21\text{ HV}$ (рис. 5 б).

Низко- и высокотемпературная обработка способствовала снижению циркония в слоистой системе «сталь Х12МФ – (ZrC)-покрытие», частичному или полному разрушению карбидной структуры и разупрочнению металлической основы образцов (табл. 2). Таким образом, ХТО данной инструментальной стали Х12МФ с Zr-покрытием целесообразно проводить в диапазоне температур $T = 900\text{--}1050^\circ\text{C}$ при выдержке $t = 100\text{--}300\text{ с}$.

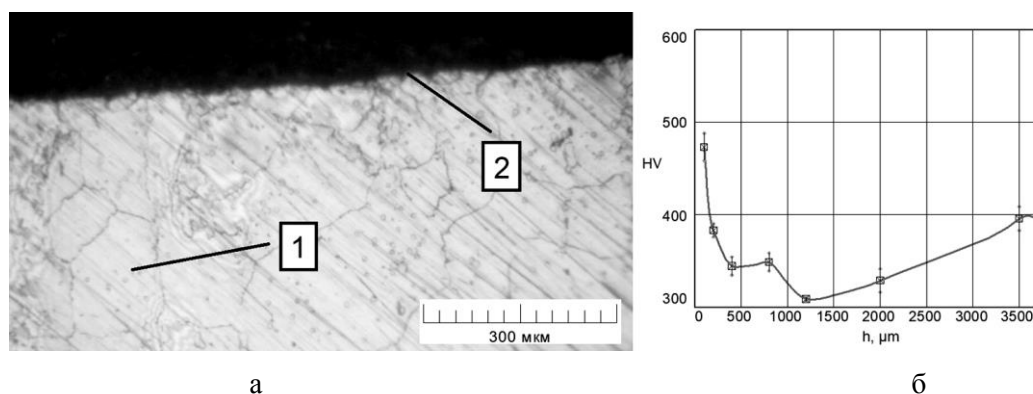


Рис. 4. Микроструктура приповерхностного слоя (а) и зависимость твердости HV от глубины h цементированного слоя (б) образца после ХТО с применением нагрева ТВЧ при температуре $T = 1200 \pm 100^\circ\text{C}$ и $t = 100$ с (1 – увеличенное зерно, 2 – рабочая поверхность без функционального покрытия)

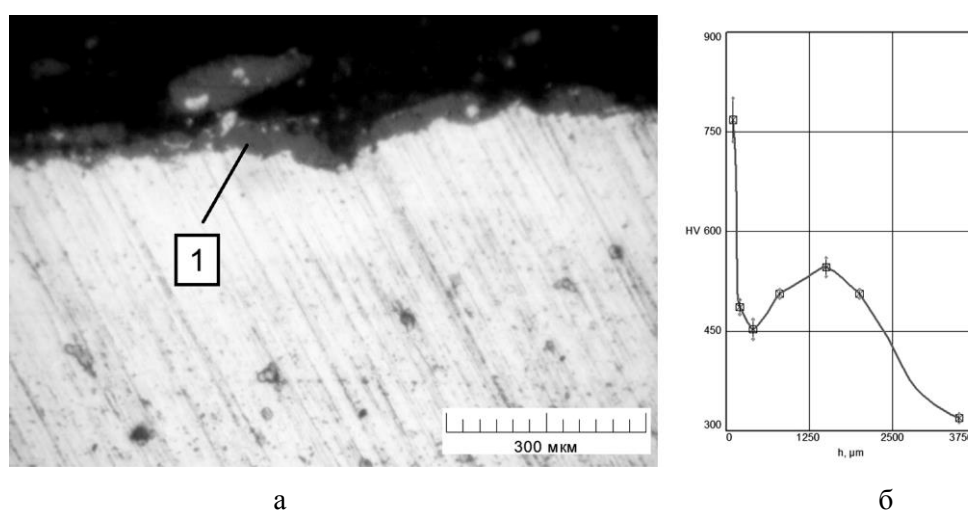


Рис. 5. Микроструктура Zr(C,O)-покрытия (а) и зависимость твердости HV от глубины h цементированного слоя (б) образца после ХТО с применением нагрева ТВЧ при температуре $T = 800 \pm 25^\circ\text{C}$ и $t = 300$ с (1 – функциональное покрытие)

Таблица 2 – Параметры ХТО с нагревом ТВЧ образцов в углеродсодержащей пасте

Номер образца	Рабочий ток I	Продолжительность выдержки t	Температура поверхности образца T	Содержание углерода и циркония		Охлаждение (среда)
				$[C]$, масс. %	$[Zr]$, масс. %	
–	A	с	$^\circ\text{C}$			–
1	500	100	1200 ± 100	$5,9 \pm 0,45$	$3,86 \pm 1,34$	воздух
2	500	300	1250 ± 100	$4,34 \pm 0,13$	–	воздух
3	400	100	1050 ± 50	$7,95 \pm 1,56$	$19,95 \pm 0,13$	воздух
4	300	100	950 ± 30	$26,96 \pm 3,19$	$16,24 \pm 1,67$	воздух
5	200	100	750 ± 25	$17,44 \pm 6,58$	$35,82 \pm 18,15$	воздух
6	200	300	800 ± 25	$17,19 \pm 7,00$	–	воздух
7	300	300	950 ± 30	$27,36 \pm 5,28$	$74,8 \pm 2,67$	воздух
8	400	300	1050 ± 50	$34,88 \pm 0,16$	–	воздух
3*/9	400	100	1050 ± 50	$39,05 \pm 2,01$	–	вода
4*/10	300	100	950 ± 30	$25,23 \pm 4,59$	–	вода

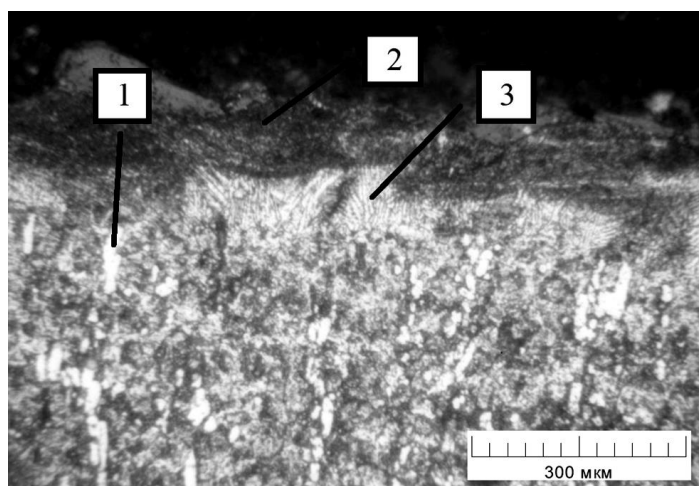
Максимум микротвердости около 1287 ± 109 HV наблюдался у образцов, полученных с использованием воздушной охлаждающей среды. При большей глубине индентирования около 1500 мкм наблюдалось плавное снижение твердости до 419 ± 44 HV, что соответствовало области структурно-фазовых изменений в стальной основе. Применение температурного воздействия при ХТО, равного $T = 1050 \pm 50^\circ \text{C}$, способствовало увеличению разброса значений микротвердости (рис. 6б).

Исследование микроструктуры Zr(C,O)-покрытия показало отсутствие образования внутренних дефектов (трещин, пористости и т. д.). Увеличилось количество карбидов, в том числе ZrC, в диффузионном слое стальной основы. ХТО при $T = 1050 \pm 50^\circ \text{C}$ способствовало образованию карбидной сетки (рис. 6а, п. 3). Максимум твердости составил 947 ± 58 HV при глубине индентирования h от 20 до 40 мкм с дальнейшим плавным снижением до 667 ± 51 HV.

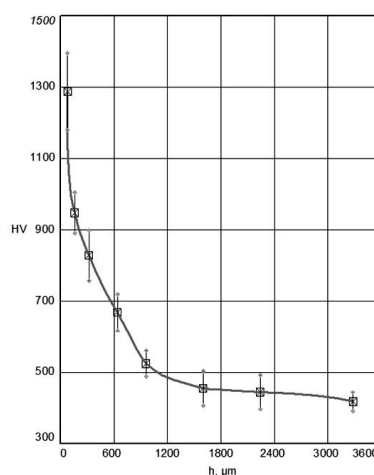
При исследовании микроструктуры образцов, полученных ХТО при температуре $T = 950 \pm 30^\circ \text{C}$ с выдержкой $t = 100$ с и охлажденных в воде, не отмечалось наличия трещин, пористости и других внутренних дефектов. Максимум твердости Zr(C,O)-покрытия составил 1171 ± 46 HV

(рис. 7б). Повышенная твердость наблюдалась при индентировании до 60 мкм по глубине покрытия, однако от 80 мкм наблюдалось резкое снижение до 613 ± 30 HV. При использовании температуры цементации $T = 950 \pm 30^\circ \text{C}$ распределение углерода было равномерным по глубине диффузионного слоя. Применение данного температурного режима обработки цементации ТВЧ способствовало уменьшению разброса значений микротвердости по глубине диффузионного слоя, при этом также наблюдался максимум по глубине цементированного слоя до 60 мкм (рис. 7а).

Метод ЭИЛ цирконием (сплав Э110) образцов из инструментальной стали Х12МФ, предварительно подвергнутых закалке ТВЧ при рабочем токе 500 А, температуре обработки $1050 \pm 20^\circ \text{C}$ и длительности выдержки около 30 с, способствовал формированию системы «сталь Х12МФ – Zr-покрытие». Данная система обладала высокой твердостью поверхности 96 ± 1 HRN₁₅ при толщине слоя 28 ± 5 мкм, для формирования которого использовались переменная величина рабочего тока 3,0-4,4 А, межэлектродного напряжения 2,9-7,6 В и продолжительность процесса не более 4 мин.



а



б

Рис. 6. Микроструктура Zr(C,O)-покрытия (а) и зависимость твердости HV от глубины h цементированного слоя (б) образца после ХТО с применением обработки ТВЧ при температуре $T = 1050 \pm 50^\circ \text{C}$ и $t = 100$ с (1 – карбиды стальной основы, 2 – Zr(C,O)-покрытие, 3 – карбидная сетка приповерхностного слоя)

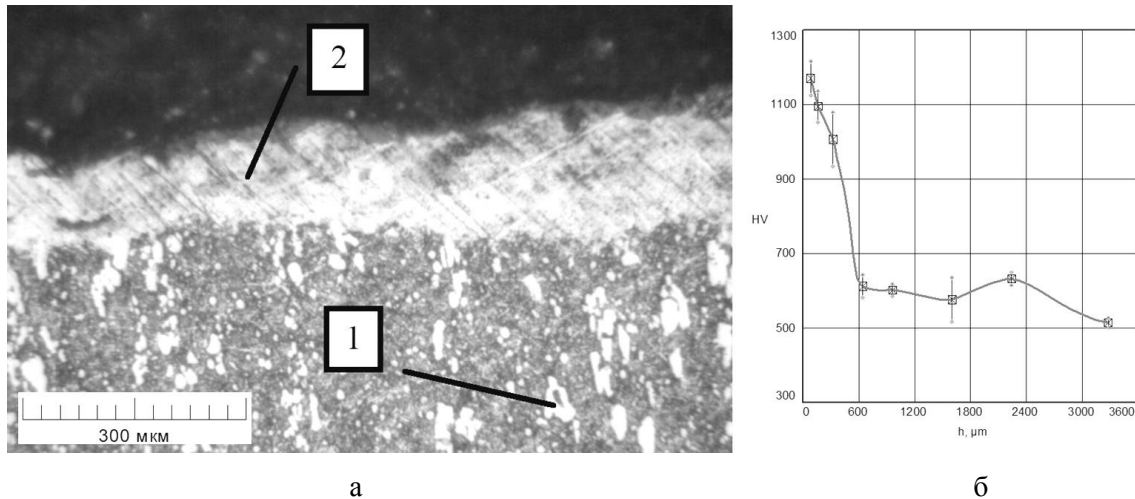


Рис. 7. Микроструктура Zr(C,O)-покрытия (а) и зависимость твердости HV от глубины h цементированного слоя (б) образца после ХТО с применением нагрева ТВЧ при температуре $T = 950 \pm 30^\circ\text{C}$ и $t = 100$ с (1 – карбиды металла, 2 – Zr(C,O)-покрытие)

Последующая цементация слоистой системы «сталь Х12МФ – Zr-покрытие» при нагреве ТВЧ в углеродсодержащей пасте с применением разных охлаждающих сред (вода, воздух) позволила сохранить металлокерамический слой. Микротвердость полученных структур составила 1287 ± 109 HV при глубине инdentирования до 40 мкм, 1171 ± 46 HV при глубине до 60 мкм и 613 ± 30 HV при глубине 80 мкм соответственно. Плавное снижение микротвердости до 419 ± 44 HV обеспечивалось при глубине инdentирования около 1500 мкм. Данное сочетание микротвердости и глуби-

ны Zr(O,C)-покрытия, а также высокого содержания циркония и углерода достигалось цементацией с нагревом ТВЧ в температурном диапазоне $950\text{--}1050^\circ\text{C}$ и при малой выдержке $t = 100$ с.

Предварительные результаты вырубной способности показали, что после формирования 1800 прямоугольных отверстий в стальном листе толщиной 8 мм на вспомогательных (боковых) поверхностях пуансона с Zr(C,O)-покрытием отсутствовали следы износа и поверхностной деформации (рис. 8а, б).

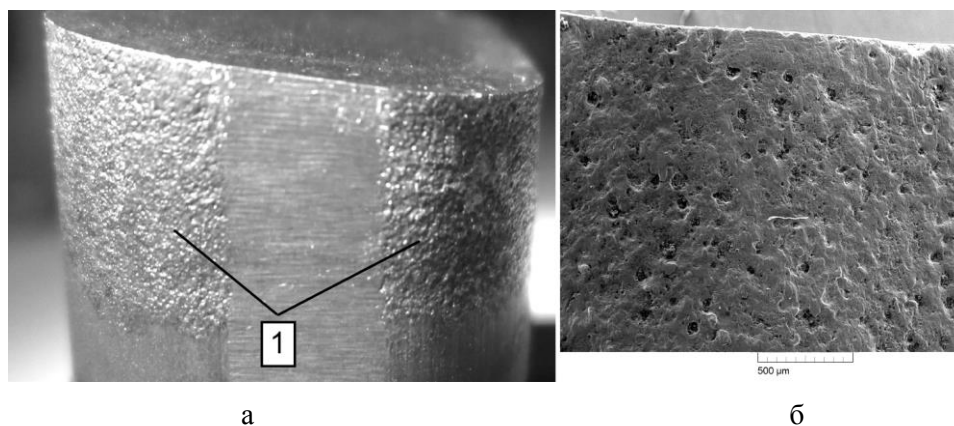


Рис. 8. Боковая поверхность (а) и увеличенный фрагмент (б) вырубного пуансона с износостойким Zr(C,O)-покрытием 1 после предварительных испытаний

Таким образом, сформированная слоистая система «сталь Х12МФ – Zr(C,O)-

покрытие» характеризовалась требуемым сочетанием высокой микротвердости и

большой глубины упрочненного слоя, которая может эффективно применяться в условиях трения и скалывания, в частности при формоизменяющих и разделительных операциях листовой штамповки. Цирконийсодержащий слой формировался ЭИЛ при межэлектродном напряжении 2,9-7,6 В и рабочем токе 3,0-4,4 А с продолжительностью модификации не более 3,5-4 мин/см². Последующая ХТО нагревом ТВЧ слоистой системы «сталь Х12МФ-

основа – Zr-покрытие» при рабочем токе от 200 до 500 А (1/16 действующего значения тока индуктора) и выдержке от 100 до 300 с способствовала формированию износостойкого металлокерамического Zr(O,C)-покрытия с твердостью 1224–1412 HV при толщине слоя 15-60 мкм.

Статья подготовлена при выполнении научных исследований в рамках гранта Президента Российской Федерации № МД-157.2019.8.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Carpene E.** Formation of Fe₃C surface layers by laser plasma cementation / E. Carpenе, P. Schaaf // *Applied Physics Letters*. 2002. Vol. 80 (5). P. 891-893.

2. **Блажаев В.В.** Исследование механических свойств покрытия, наносимого методом электроискрового легирования / В.В. Блажаев, П.Г. Иваночкин, А.С. Личковаха // *Вестник Донского государственного технического университета*. 2014. № 3. С. 111-117.

3. Methodology for fabrication of highly pitting corrosion-resistant type 304 stainless steel by plasma carburizing and post-pickling treatment / Y. Sugawara, W. Inoue, I. Muto, N. Hara // *Journal of the Electrochemical Society*. 2018. Vol. 165 (9). P. 441-449.

4. **Thomas G.D.** Heat treatment and properties of iron and steel / G.D. Thomas, J.R. Samuel // *National Bureau of Standards*. Washington, 1960. 46 p.

5. Low temperature plasma carburizing of martensitic stainless steel / C.J. Scheuer, R.P. Cardoso, R. Pereira, M. Maфра, S.F. Brunatto // *Materials Science and Engineering A*. 2012. Vol. 539. P. 369-372.

6. **Мулин Ю.И.** Особенности формирования структуры и свойства покрытий, нанесенных методом электроискрового легирования стали / Ю.И. Мулин // *Физика и химия обработки материалов*. 2006. № 4. С. 60-66.

7. **Федосеев М.Е.** Исследование микроструктуры и твердости инструментальной стали Х12МФ, подвергнутой электроискровому легированию цирконием и цементацией в кремний-графитовой пасте / М.Е. Федосеев, А.А. Фомин // *Вопросы электротехнологии*. 2020. № 1 (26). С. 94-102.

Федосеев Максим Евгеньевич – аспирант кафедры «Материаловедение и биомедицинская инженерия» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

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

Maksim E. Fedoseev – Postgraduate, Department of Materials Science and Biomedical Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

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

Статья поступила в редакцию 12. 10.20, принята к опубликованию 14.12.20

УДК 662.276; 621.365

**ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ДОБЫЧИ И ПЕРЕРАБОТКИ
ВЫСОКОВЯЗКИХ НЕФТЕЙ И ПРИРОДНЫХ БИТУМОВ
СВЧ ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКИМ МЕТОДОМ**

Р.А. Сафиуллин

**INTENSIFICATION OF PRODUCTION AND REFINING
HIGH-VISCOUS OILS AND NATURAL BITUMENS
BY THE MICROWAVE ELECTROTHERMAL TECHNOLOGY**

R.A. Safiullin

Исследован процесс добычи залежи высоковязкой нефти и битума с помощью СВЧ-нагревателей при нагнетании в нее воды или сухого пара. Разработанная конструкция с её теоретическими выкладками и положениями может быть использована в теплоэнергетике и нефтегазовом деле. От известных методов и конструкций предлагаемая модель отличается равномерностью нагрева залежи по всему ее объему, низкую материал- и капиталоемкость. Проведено численное моделирование разогрева пласта СВЧ излучением для оценки эффективности электротермического воздействия как метода интенсификации нефтедобычи при вертикальном и горизонтальном способах бурения скважин. Точность расчётов по предлагаемой модели зависят от точности исходных данных по электропроводности и магнитной проницаемости залежи. Для нагрева большого объёма пласта может быть использована поинтервальная дифференциация расположения СВЧ установок как при вертикальной, так и наклонной способах бурения скважин. Сам процесс длительности разогрева пласта должна быть интервальной по времени, с последующей его релаксацией для предотвращения процесса спекания смеси и её коксования.

Ключевые слова: высоковязкая нефть, СВЧ-нагреватель, энергоэффективность, токи высокой частоты

The extraction technology of high-viscosity oil and bitumen deposits using microwave heaters under water or dry steam injection has been investigated. The available design, including theoretical calculations and provisions can be applied in heat power engineering and oil and gas industry. The proposed model differs from the standard methods and designs in uniformity of deposit heating throughout its volume, as well as low material and capital intensity. Numerical modeling of reservoir heating by microwave radiation was performed to assess effectiveness of the electrothermal action as a method for intensifying oil production at vertical and horizontal well drilling processes. The accuracy of calculations based on the proposed model depends on the accuracy of initial data on electrical conductivity and magnetic permeability of the deposit. Selective differentiation in locating microwave units can be used for heating large volumes of reservoirs, both at vertical and inclined methods of drilling wells. The heating duration process should be estimated in time intervals, followed by its relaxing in order to prevent sintering and coking the mixture processes.

Keywords: high-viscosity oil, microwave heater, energy effectiveness, high frequency currents

Введение

Более 50 лет технология СВЧ-нагрева активно применяется в промышленности, сельском хозяйстве, медицине и биологии, особенно в технологических процессах нагрева и сушки в рабочих камерах СВЧ технологических установок. Перспективные преимущества данной технологии связаны с улучшением качества изделия при обработке различных материалов, сокращением временного интервала управления технологическим процессом, экономией энергии и затрат на энергию благодаря более высокому КПД, снижению уровня загрязнения окружающей среды, незначительными расходами по содержанию оборудования и более высокой гибкостью таких установок по сравнению с традиционными технологиями нагрева.

Активное внедрение данных технологий в отраслях промышленности и сельского хозяйства в конце XX века впервые началось после создания СВЧ установок Саратовской школой электротехнологов под руководством профессора Архангельского Ю.С. Они заложили фундамент теоретической и экспериментальной базы научных исследований в данном направлении и впервые показали инновационные возможности данной технологии при обработке различных материалов, которые сейчас успешно применяются во всем мире [1].

В данной работе исследуется процесс СВЧ-нагрева диэлектрического материала в виде залежи тяжелых высоковязких нефтей и природных битумов (ВНПБ). Показана эффективность и потенциал экономии в установках СВЧ нагрева и осуществляется математическое моделирование по методу конечных элементов температурного поля, распространяющегося в окружающее пространство от СВЧ камеры.

Ежегодное сокращение разработки и добычи минерально-сырьевой базы естественного углеводородного сырья привело к тому, что активно разрабатываемые технологии нефтегазовых компаний месторождений нефти и газа переместились на территории Западной Сибири, Заполярья и Арктического шельфа. В связи с этим стала актуальной за-

дача дальнейшего развития методов добычи и переработки трудноизвлекаемых запасов, таких как тяжелые высоковязкие нефти, природные битумы и нефти нефтеносных песков на основе геолого-геофизических разведанных данных на широких территориях Российской Федерации. Как известно, при добыче ВНПБ, мировые разведанные залежи которых оцениваются в 700 млрд т, используются различные термические комплексы, технологии и устройства, обзор которых представлен в работе [2]. Только в Российской Федерации они оцениваются в 9 млрд т и составляют более 50% доли всех разведанных запасов нефти, которые намного превышают запасы обычной (легкой) нефти.

Залежи тяжелой нефти и природных битумов разрабатывают различными способами исходя из рассмотрения геолого-геофизического строения пластов, физико-химических свойств пластового флюида, имеющихся запасов и состояния углеводородного сырья, климатических и географических условий, а также возможностей технологических и экономических характеристик [2, 3]:

1. Термический (шахтовый метод, CNOPS, ГС, VAPEX, водонагнетание).
2. Холодный (закачка горячей воды, вытеснение нефти паром, CSS, внутрискластовое горение, SAGD, SAP, THAI, N-Solv, забойные электронагреватели).
3. Физико-химический (полимерное заводнение, вытеснение нефти ПАВ, комбинированные методы).
4. Газовый (закачка диоксида углерода).
5. Гидродинамические методы (волновое воздействие).

В наши дни активно используются методы паротепловой обработки призабойных зон скважины (ПТОС) и закачки в пласт теплоносителей. Они осуществляются периодической закачкой пара в добывающие скважины для разогрева призабойной зоны пласта и снижения в ней вязкости нефти. ПТОС приводит к воздействию высокотемпературного пара на залежи ВНПБ и показывает высокую эффективность данной технологии в существующих физико-геологических условиях, т. к. пар имеет бо-

лее высокую по теплоёмкость по сравнению с газом и водой [2]. Распространёнными «холодными» каталитическими способами являются методы «Shops» и «Varex» на основе реагентов-растворителей. Технологии позволяют добывать высоковязкую нефть путем закачки специального растворителя в продуктивный пласт и извлечения продукции с существенно пониженной вязкостью. При газовом способе для снижения вязкости (апгрейдинга нефти) и ее состава, улучшения выхода светлых, уменьшения содержания асфальтосмолистых компонентов, используют растворители на основе диоксида углерода или этана и пропана, нагретых до 50° С [3]. Гидродинамический метод основан на волновом воздействии (долговременном звуковом воздействии, электромагнитном облучении) залежи ВНПБ [4]. Электротермический способ осуществляют путем подведения электрического тока непосредственно к призабойной зоне добывающей скважины. При этом электротермический кабель или электроизолированная труба используются в качестве проводника, подводящего ток к нефтеносному пласту и происходит разогрев коллектора высоковязкой нефти [5, 6]. Авторы работ [6-8] предложили комбинированный метод увеличения нефтеотдачи пласта, сочетающий в себе несколько видов воздействия и базирующийся на тепловых методах, использующих пар, горячую воду или электрофизическое тепло. Анализируя данные литературные источники, можно сделать вывод о том, что для повышения нефтеотдачи таких залежей отечественные и зарубежные специалисты в нефтегазовой промышленности безальтернативно признали преимущества тепловых технологий, как рентабельных, по сравнению со стандартными.

Термические методы добычи ВНПБ имеют ряд недостатков, таких как:

- высокая материало- и капиталоемкость теплоэнергетического оборудования;
- значительные потери тепловой энергии в распределенном продуктивном трубопроводе и скважине;
- сжигание части добываемой нефти и газа для парогенерации;

– использование индуктивных электротермических установок, которые значительно теряют тепловую энергию и могут привести к коротким замыканиям в электроэнергетической системе;

– в районах нефтедобычи значительно ухудшается экологическая обстановка.

Несмотря на это, вопросы истощающихся энергоресурсов являются актуальными наряду с проблемами разработки, добычи и переработки обеднённых пластов высоковязкой нефти и битума.

Постановка задачи

Целью работы является численное моделирование разогрева пласта ВНПБ СВЧ излучением для оценки эффективности электротермического воздействия как метода интенсификации нефтедобычи при вертикальном и горизонтальном способах бурения скважин.

В нефтегазовой промышленности транспортировка и обработка добываемой тяжелой нефти осложнены из-за ее высокой вязкости и ухудшенного состава. При обслуживании нефтегазопроводной системы одной из важных задач остаётся безопасная эксплуатация и бесперебойная перекачка естественного сырья по продуктовым трубопроводам, обеспечивающим их требуемые реологические свойства [8-10].

В данных работах было указано, что наиболее совершенными и перспективными методами, применяемыми для этого, являются электрофизические методы теплового воздействия на газо- и нефтепроводные системы. Наряду с другими системами в работах был предложен электротермический метод разрешения данной проблемы, была разработана и описана математическая модель переносного спирального индуктора, которая была успешно апробирована в полевых условиях эксплуатации.

Данные проблемы также обсуждались в работах [11-14]. В них предложен безопасный СВЧ нагрев забоя нефтяной скважины для интенсификации добычи углеводородного сырья из пласта с помощью устройства спирального СВЧ нагревателя (СН). В ходе работы была спроектирована спиральная

антенна, работающая на частоте 0,8 ГГц. Сектор углов одновременного обзора антенны составляет не менее $\pm 65^\circ$, коэффициент стоячей волны не превышает 3,5 во всем диапазоне частот. Разнообразие физических свойств материалов, составляющих компоненты смеси ВНПБ, требуют развития нелинейных задач теплообмена, которые связаны с фазовыми превращениями в объеме пласта и транспортировке [7-11].

В данной работе решается задача исследования воздействия СВЧ нагрева на ВНПБ и возможности интенсификации её добычи путем равномерного нагрева по объему залежи. ВВНБ состоят из множества химических компонентов углеводородных химических элементов, пустой породы, смолопарафина, воды и нефти. Предположим, что в ней присутствуют только пустая порода (глина), вода, нефть, и процесс равномерного ее нагрева идёт с образованием пара, нагрева глины и уменьшением вязкости ВВНБ.

Основные уравнения

Смесь компонентов ВНПБ обладает электромагнитными характеристиками, описываемыми коэффициентами комплексной диэлектрической и магнитной проницаемостями, имеющими вид

$$\varepsilon_{CM} = \varepsilon_0(\varepsilon_R - j\varepsilon_{Im}) = \varepsilon_0\varepsilon_a, \quad (1)$$

$$\mu_{CM} = \mu_0(\mu_R - j\mu_{Im}) = \mu_0\mu_a. \quad (2)$$

Электротермический процесс преобразования энергии электромагнитной волны в тепловую описывается реактивной составляющей диэлектрической константы $\varepsilon_{Im} = \operatorname{tg}\delta^E \cdot \varepsilon_R$ и коэффициентом диэлектрических потерь диэлектрика $\operatorname{tg}\delta^E = \varepsilon_{Im} / \varepsilon_R$,

где $\varepsilon_{Im} = \sum_{i=1}^3 c_i \varepsilon_{ia} \operatorname{tg}\delta^E_i f_i |E_i|^2 / f_{CM} E^2_{CM}$ – комплексная диэлектрическая константа смеси [1]; остальные коэффициенты представлены в работах [9, 14].

Для исследования данного процесса используем дифференциальные уравнения

электродинамики Максвелла для описания электромагнитных волн и теплопроводности Фурье

$$\begin{cases} \operatorname{rot} \vec{H} = \partial \vec{D} / \partial t + \sigma \vec{E} + \vec{j}_{\text{пров}}, \\ \operatorname{rot} \vec{E} = -\partial \vec{B} / \partial t, \\ c \rho \partial T / \partial t = \lambda \Delta T + q(\vec{r}, t), \end{cases} \quad (3)$$

где c , ρ , λ – коэффициенты теплоёмкости, плотности и теплопроводности; σ , t , $j_{\text{пров}}$ – поверхностная плотность заряда, время и токи проводимости;

$q(\vec{r}; t) = \pi \sum_{i=1}^3 c_i \varepsilon_{ia} \operatorname{tg}\delta^E_i f_i |E_i|^2 / f_{CM} E^2_{CM} = -\operatorname{div} \vec{P}(\vec{r}; t)$ – удельная поглощённая мощность смеси при СВЧ нагреве; $\vec{P}(\vec{r}; t)$ – вектор Пойнтинга – Умова; $\vec{D} = \varepsilon \varepsilon_0 \vec{E}$ – компоненты вектора электрической индукции; $\vec{B} = \mu \mu_0 \vec{H}$ – компоненты вектора магнитной индукции [1].

Выражение (3) характеризует взаимосвязь вихревых полей $\vec{E}$ и $\vec{B}$ электромагнитного поля и порождаемые ими плотности энергий магнитного и электрического полей, описанные Максвеллом

$$W_E = \int_V \frac{(\vec{E}, \vec{D})}{2} dV, \quad W_M = \int_V \frac{(\vec{H}, \vec{B})}{2} dV, \quad (4)$$

где V – где объём пространства, в котором распространяется электромагнитная волна, а подынтегральные выражения характеризуют плотности энергии электрического и магнитного полей пропорциональных E^2 и B^2 .

Система дифференциальных уравнений (3), описывающая распространение электромагнитных волн, с учётом выражений (1), (2) и (4) упрощается и приводится к дифференциальным уравнениям Гельмгольца (5), которые являются основой СВЧ-излучателей [1]

$$\nabla^2 E(\vec{r}) = \omega^2 \cdot \mu_{CM} \cdot \varepsilon_{CM} \cdot \vec{E}(\vec{r}),$$

$$\nabla^2 H(\vec{r}) = \omega^2 \cdot \mu_{CM} \cdot \varepsilon_{CM} \cdot \vec{H}(\vec{r}). \quad (5)$$

Отсюда следует, что излучаемая СВЧ-нагревателем энергия электромагнитных волн определяется системой (3), из которой выводится формула средней по времени

мощности излучения или переноса энергии электромагнитной волной по теореме Умова – Пойнтинга в частотном диапазоне

$$P_{изл} = \frac{1}{2} \int_S [\vec{E}, \vec{H}] dS = \frac{1}{2} \int_S \Pi(r, t) dS. \quad (6)$$

Выражение (6) гласит, что по теореме Умова – Пойнтинга проникающая в огибающую поверхность S средняя энергия $P_{изл}$, следуя от модуля и фазы, зависит от амплитуды, распределения и соответствующей фазы электрического и магнитного полей. Преобразование поверхностного интеграла в (6) согласно теореме Гаусса в интеграл по объему, приводит к определению потери активной энергии вследствие конечной проводимости среды, потерь на переполяризацию и перемангничивание окружающей среды, т. е. потери мощности электромагнитного излучения

$$P_{II} = \frac{\sigma}{2} \int_V |\vec{E}|^2 dV + \frac{\omega}{2} \int_V (\epsilon_{im} |\vec{E}|^2 + \mu_{im} |\vec{H}|^2) dV$$

$$\text{или} \quad P_{II} = 2\omega\epsilon_0 \iiint_V \epsilon_{im} E^2 dV. \quad (7)$$

Полученное выражение определяет закон Джоуля – Ленца, из которого можно получить 3D источник нагрева плотности распределения электромагнитного поля в различных материалах, описываемых физическими свойствами (1) и (2) [14].

Результаты построенной модели

Рассмотрим метод конечных элементов для экспериментального моделирования электротермического процесса с помощью цилиндрической СВЧ-камеры. Удельная мощность электромагнитного излучения затрачивается на диэлектрический нагрев пласта ВВНБ, которая определяется формулой теплового потока

$$q(r; t) = \pi \sum_{i=1}^3 c_i \epsilon_{ia} \operatorname{tg} \delta_i^E f_i |E_i|^2 / f_{CM} E^2_{CM} = -\operatorname{div} \vec{H}(r; t).$$

На рис. 1 представлен исследуемый модельный пласт ВНПБ, который имеет прямоугольную форму залежи, имеющую ши-

рину w , длину l , высоту h и находящуюся под воздействием СВЧ-нагревателя.

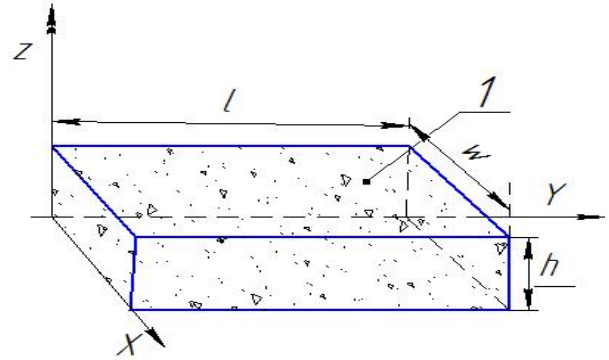


Рис. 1. Представительный элемент пласта:
1 – многокомпонентная смесь ВНПБ

За счет воздействия электромагнитного поля на пласт ВНПБ возникает электромагнитная индукция, описываемая электродвижущей силой (ЭДС), наводимой в контуре и определяемой формулой

$$E_i = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{dB_n S}{dt} = -S \frac{dB}{dt} = -wl \frac{dB}{dt}. \quad (8)$$

Процесс поляризации молекул смеси пласта создает активное сопротивление участка, в котором происходит поглощение энергии электромагнитного поля:

$$R = \rho_{CM}^E \frac{l}{S} = \rho_{CM}^E \frac{l}{wl} = \rho_{CM}^E / w, \quad (9)$$

где ρ_{CM}^E – удельное электрическое сопротивление пласта смеси; $V = w h l$ – объем обрабатываемого участка (рис. 1).

На начальном этапе процесс приводит к появлению поверхностного тока (вихревой короткозамкнутой), проникающего в объем пласта и приводящего к его нагреву:

$$I_T = E_i / R = E_i \frac{w}{\rho_{CM}^E} = -wl \frac{dB}{dt} \cdot \frac{w}{\rho_{CM}^E} = -\frac{w^2}{\rho_{CM}^E} l \cdot \frac{dB}{dt}. \quad (10)$$

В дальнейшем образуется вихревой ток, проникающий на всю глубину материала диэлектрика, и тепловая энергия, выделяемая нагревательным элементом, определя-

ется из уравнения Джоуля – Ленца (7) [11, 12]:

$$Q = I_T^2 R \cdot t = \left(-\frac{w^2 l}{\rho_{CM}^E} \cdot \frac{dB}{dt} \right)^2 \cdot \frac{\rho_{CM}^E}{w} \cdot t = \frac{w^3 l^2}{\rho_{CM}^E} \cdot \left(\frac{dB}{dt} \right)^2 \cdot t. \quad (11)$$

Эта энергия превращается во внутреннюю энергию пласта – он нагревается и количество теплоты будет определяться выражением

$$Q_c = c_{CM} m_{CM} \Delta T = c_{CM} \rho_{CM} V_{CM} \Delta T, \quad (12)$$

где c – удельная теплоёмкость смеси; m – масса обрабатываемой поверхности; ΔT – изменение температуры обработки.

Отсюда, приравнявая формулу количества теплоты к величине переменного магнитного поля, получим формулу

$$c_{CM} \rho_{CM} w l h \Delta T = \frac{w^3 l^2}{\rho_{CM}^E} \cdot \left(\frac{dB}{dt} \right)^2 \cdot \Delta t,$$

$$\Delta T = \frac{w^3 l^2}{\rho_{CM}^E} \cdot \left(\frac{dB}{dt} \right)^2 \cdot \Delta t / c_{CM} \rho_{CM} w l h, \quad (13)$$

где ρ_{CM} – плотность смеси пласта; t – время обработки.

Выражение (13) позволяет определить мгновенное значение температуры, следующее из дифференциального уравнения Лапласа:

$$\Delta T = \frac{w^2 l}{c_{CM} \rho_{CM}^E \rho_{CM} h} \cdot \left(\frac{dB}{dt} \right)^2 \cdot \Delta t. \quad (14)$$

Согласно Максвеллу, переменное магнитное поле порождается изменяющимся со временем электрическим:

$$\begin{aligned} \frac{dB}{dt} &= \omega B \delta_m \cos \left(\omega t - \frac{\pi x}{\tau_1} v \right) + \\ &+ \frac{1}{2} \omega B v_m \cos \omega t + \\ &+ \frac{1}{2} \omega B v_m \cos \left(\omega t - \frac{2\pi x}{\tau_1} v \right). \end{aligned} \quad (15)$$

Поэтому для нахождения действующего значения квадрата индукции используем формулу

$$\begin{aligned} \left(\frac{dB}{dt} \right)^2 &\approx \omega^2 B^2 \delta_m^2 \cos^2 \left(\omega t - \frac{2\pi x}{\tau_1} v \right); \\ \frac{\sqrt{2}}{2} \left(\frac{dB}{dt} \right) &= \frac{\sqrt{2}}{2} 4\pi^2 f^2 B^2 \delta_m^2 = \\ &= 2\sqrt{2} \pi^2 f^2 B^2 \delta_m^2. \end{aligned} \quad (16)$$

В итоге можно получить выражение для действующего значения поверхностной температуры пласта ВНПБ [11, 12]

$$\Delta T_\theta = \frac{2\sqrt{2} \pi^2}{c_{CM} \rho_{CM}^E \rho_{CM}} \cdot \frac{w^2 l}{h} \cdot B^2 \delta_m^2 \cdot \Delta t. \quad (17)$$

А КПД установки СВЧ-нагревателя будет определяться выражением

$$\mu = Q / UI \cdot 100\%. \quad (18)$$

С помощью метода конечных элементов ПО Solidworks на рис. 2 представлено электромагнитное распределение источника нагрева, т.е. плотности напряженности поля в 3D модели, а также плотность распределения температурного поля вблизи СВЧ излучателя, согласно формулам (5). Для этого случая электромагнитное поле создано в цилиндрической СВЧ-камере, которая имеет продольное расположение волновода в направлении излучения.

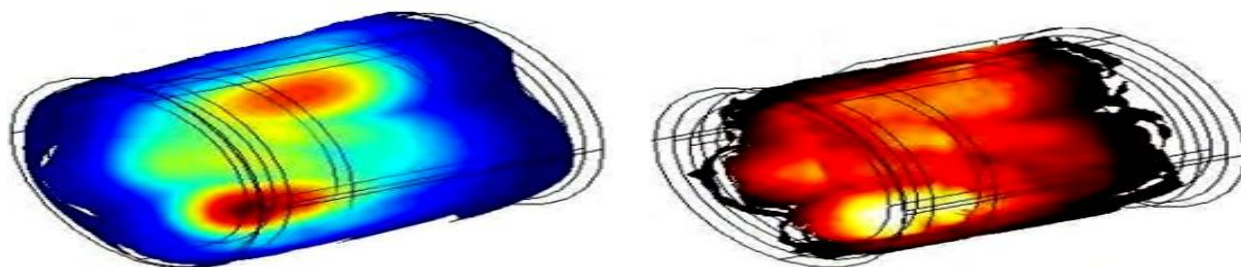


Рис. 2. Плотность распределения температурного поля вблизи СВЧ-излучателя

Согласно представленному рис. 2 первоначальный нагрев происходит внутри керамической камеры, а затем распространяется во внешнюю среду. Корпус СВЧ излучателя сделан из жаропрочной керамической зеркальной поверхности и с фокусирующей пластинкой служит для того, чтобы направлять СВЧ излучение в нужном направлении. Для нагрева большого объема пласта ВНПБ, согласно работам [9, 14], может быть использована поинтервальная дифференциация расположения СВЧ установок как при вертикальном, так и при наклонном способах бурения скважин. Сам процесс длительности разогрева пласта должен быть интервальным по времени с последующей его релаксацией для предотвращения процесса спекания смеси и её коксования.

Выявим распределение теплового потока из системы (3), которое имеет вид

$q(z;t) = 2 \cdot \alpha \cdot F \cdot \Pi_0 \cdot \exp(-2\alpha \cdot z)$ – есть функция плотности мощности источника тепловых потерь; α – коэффициент затухания; F – коэффициент прохождения; Π_0 – вектор Пойнтинга – Умова в вакууме. Начальные и граничные условия для дифференциального уравнения Фурье из системы (3) имеют вид $T(z > 0, 0) = T_0$, где T_0 – температура пласта в начальный момент времени [13].

Решение дифференциального уравнения теплопроводности из системы уравнений (3) с учетом граничных и начальных условий известно и имеет вид

$$T(z;t) = T_0 + \frac{F_e \Pi_0}{2\alpha\lambda} \exp(-2\alpha z) \cdot \left[\exp(4\alpha^2 a^2 t) - 1 \right], \quad (19)$$

где a – коэффициент температуропроводности; F_e – коэффициент энергетического прохождения.

Для многокомпонентной ВВНБ с учетом выражения для функции плотности мощности источника тепловых потерь

$$q(r;t) = \pi \sum_{i=1}^3 c_i \varepsilon_{ia} \operatorname{tg} \delta_i^E f_i |E_i|^2 / f_{CM} E^2 CM,$$

получим решение (19) в виде

$$T(r;t) = T_0 + \frac{\Pi_0}{3} \sum_{i=1}^3 \frac{c_i F_{ei}}{2\alpha_i \lambda_i} \cdot \exp(-2\alpha r) \cdot \left[\exp(4\alpha_i^2 a^2 t) - 1 \right]. \quad (20)$$

На рис. 3 представлены кривые распределения температуры по формуле (19) при полном расплавлении (при переходе из твердой в жидкую фазу) ВВНБ для данных значений частот и мощности СВЧ-нагрева в 1,5 и 3 кВт.

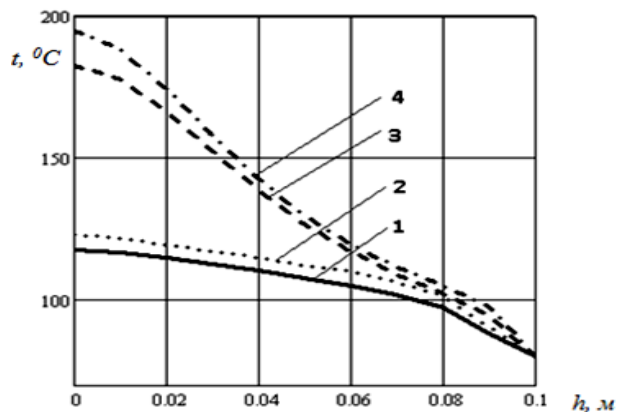


Рис. 3. Кривые распределения температуры в ВВНБ для данных: 1, 2 – 400 МГц; 3, 4 – 900 МГц

Как видно из графиков, с увеличением толщины пласта температура СВЧ-нагрева уменьшается. Энергия сверхвысокочастотной электромагнитной волны с частотой 900 МГц частично затрачивается на нагрев пласта в жидкой фазе, образующейся при ее плавлении. Причина диссипации электромагнитной энергии в пласте связана с тем, что глубина ее проникновения на этой частоте существенно меньше, чем на частоте 400 МГц. Таким образом, затраты энергии на нагрев и плавление на частоте 400 МГц будут меньше, чем на частоте 900 МГц [14].

Из формулы (19) находим период времени до начала плавления на верхней границе пласта высоковязкой нефти $z = 0$ в зависимости от влажности и пористости

$$t_{ПЛ}(n,k) = \frac{c \rho(n,k)}{4\lambda \alpha^2(n,k)} \ln \left[1 - \frac{2\alpha(n,k) \alpha T_0}{F \Pi_0} \right]. \quad (21)$$

Результаты исследований позволяют сделать следующие выводы. С увеличением влажности нефтяного пласта период времени до начала плавления уменьшается, а с уменьшением пористости он увеличивается. Данные результаты позволяют заключить, что при определении требований к электрофизическим свойствам диэлектрического материала при СВЧ плавлении следует особое внимание уделить влажности и пористости материала. Для максимально быстрого достижения жидкой фазы при проектировании СВЧ устройств нужно предусмотреть подсистему предварительного увлажнения с помощью нагнетаемой жидкости или пара объекта СВЧ нагрева.

На рис. 4 представлена кривая распределения температуры пласта с расстоянием согласно формуле (20).

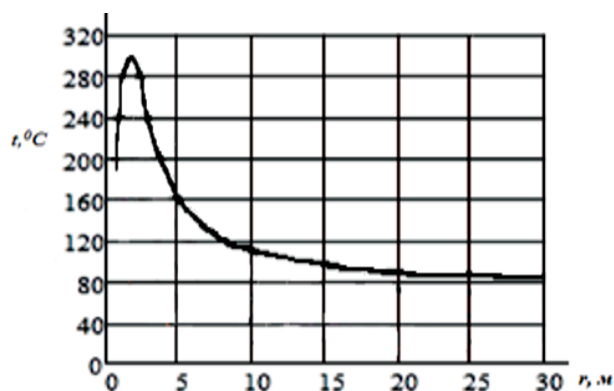


Рис. 4. Распределение температуры пласта с расстоянием

Как видно из графика, происходит постепенный разогрев пласта ВНПБ до определённой температуры, она выходит на плато насыщения — критическую температуру в 290°C, а затем происходит его плавление. При этом значительная доля энергии СВЧ нагрева затрачивается на нагрев слоя много-

компонентной смеси в жидкой фазе, образующейся при плавлении исходного затвердевшего пласта. Это связано с тем, что глубина проникновения СВЧ-нагрева отличается для различных частот излучения и происходит значительные потери энергии при её поглощении пластом. Поэтому для оптимальной работы данной установки необходимо изначально протестировать её в полевых условиях [14]. Как известно, с повышением температуры вязкость нефти уменьшается и происходит выпаривание легких фракций нефти и пластовой воды. Углеводородные и углекислые газы, которые образуются в ходе выпаривания, вытесняют нефть из пласта. Процесс теплопереноса и извлечения ВНПБ можно ускорить за счет накачивания воды вместе с окислителем или сухого пара для возможности интенсификации её добычи путем равномерного нагрева по объему залежи.

Выводы

Таким образом, созданная математическая модель СВЧ нагрева залежи ВНПБ и ее тепловой расчёт позволяют исследовать технологический процесс нагрева, расширяют возможности интенсификации ее добычи и транспортировки. Это обусловлено тем, что 95 % тепловой энергии выделяется внутри пласта и идёт непосредственно на его нагрев. Прогрев материала залежи зависит от первоначальной степени ее увлажненности и пористости, а также от электропроводности и магнитной проницаемости компонентов смеси ВВНБ. Разработанная математическая модель и устройство ССН сохраняют в себе потенциал крайне энергоэффективного метода нагрева различных материалов.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Архангельский Ю.С.** Установки диэлектрического нагрева. Установки СВЧ / Ю.С. Архангельский. Саратов: СГТУ, 2008. 343 с.
2. **Андреев В.Е.** Освоение трудноизвлекаемых запасов нефтяных месторождений

с применением энерго- и ресурсосберегающих технологий / В.Е. Андреев, Ю.А. Котенов, Р.Р. Хузин. Уфа: Гилем, 2011. 352 с.

3. **Ишкинбаев Д.А.** Проблемы разработки мелких месторождений высоковязкой

нефти Татарстана / Д.А. Ишкинеев // Энергоэффективность. Проблемы и решения: материалы XIV Всерос. науч.-практ. конф. Уфа, 2014. С. 51-53.

4. Влияние термических и каталитических методов добычи на состав и свойства извлекаемой нефти / А.И. Хамидуллина, Д.А. Ибрагимова, С.М. Петров, З.Р. Закирова // Вестник технологического университета. 2015. Т. 18. № 9. С. 124-128.

5. **Гуляев П.Н.** Технология добычи высоковязкой нефти с использованием длительного акустического воздействия / П.Н. Гуляев, Е.В. Соснина // Экспозиция Нефть Газ. 2013. № 2 (27). С. 74-68.

6. Сравнительная оценка энергетической эффективности «горячих» и «холодных» методов добычи высоковязкой нефти / Е.А. Марфин, Я.И. Кравцов, А.А. Абдрашитов, А.Р. Галимзянова // Нефтепромысловое дело. 2017. № 3. С. 22-26.

7. Экологические и экономические перспективы применения электротермических комплексов для добычи высоковязкой нефти / Э.А. Загрянный, В.И. Маларев, О.Б. Лакота, В.О. Зырин // Нефтяное хозяйство. 2012. № 11. С. 118-121.

8. Эффективная электротермическая система парового воздействия на пласт с вязкой, высоковязкой и битуминозной нефтью / С.Г. Конесев, П.А. Хлюпин, Э.Ю. Кондратьев, Е.Я. Безряднова // Нефтегазовое дело. 2017. Т. 15. № 1. С. 80-84.

9. **Сафиуллин Р.А.** Разработка СВЧ нагревателя нефтяной скважины и ее тепловой расчет / Р.А. Сафиуллин // Энергетика: управление, качество и эффективность использования энергоресурсов: сборник тр. IX Междунар. науч.-техн. конф. Благовещенск: Амурский гос. ун-т, 2019. С. 386-394.

пользования энергоресурсов: сборник тр. IX Междунар. науч.-техн. конф. Благовещенск: Амурский гос. ун-т, 2019. С. 386-394.

10. Методика инженерного расчета электромеханических параметров газопроводного спирального индукционного нагревателя / Р.А. Сафиуллин, И.Ф. Янгиров, Р.Р. Харисова, А.У. Гарайшина // Энергетика: управление, качество и эффективность использования энергоресурсов: сборник тр. IX Междунар. науч.-техн. конф. Благовещенск: Амур. гос. ун-т, 2019. С. 548- 554.

11. Математическая модель линейного асинхронного индукционного нагревателя нефтепроводов / И.Ф. Янгиров, Ф.Р. Исмагилов, Д.В. Максудов, Р.А. Сафиуллин // Технология машиностроения. 2019. № 3. С. 61-66.

12. Engineering calculation of inductor parameters for gas pipelines / R.A. Safiullin, I.F. Yangirov, A.R. Khalikov, G.F. Safina // Proc. International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (2019 ICOECS). Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russia, October 22-25, 2019. P. 620-624.

13. Газопроводный спиральный индукционный нагреватель / Ф.Р. Исмагилов, И.Ф. Янгиров, Д.В. Максудов, Р.А. Сафиуллин // Технология машиностроения. 2019. № 12. С. 30-37.

14. **Янгиров И.Ф.** Тепловой расчёт спирального СВЧ-нагревателя забоя нефтяной скважины / И.Ф. Янгиров, Р.А. Сафиуллин // Нефтегазовое дело. 2019. Т. 17. № 5. С. 99-105.

Сафиуллин Рузил Ахнафович – кандидат физико-математических наук, доцент Нефтекамского филиала Башкирского государственного университета

Ruzil A. Safiullin – PhD, Associate Professor, Bashkir State University (Neftekamsk branch)

Статья поступила в редакцию 01.10.20, принята к опубликованию 14.12.20

УДК 621. 365. 5

СВЧ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЯ: ВОПРОСЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ

М.И. Тухватуллин

ISSUES AND PROSPECTS OF MICROWAVE ELECTRICAL TECHNOLOGY

M.I. Tukhvatullin

Определены основные вехи истории СВЧ электротехнологии. Обоснованы перспективы этого научно-технологического направления. Сформулированы вопросы, стоящие перед современной СВЧ электротехнологией, решение которых будет способствовать ее развитию. Приведена структурная схема гибридной СВЧ электротехнологической установки.

Ключевые слова: электротехнологическая установка, рабочая камера, гибридная СВЧ электротехнологическая установка, СВЧ генератор, нетепловая СВЧ модификация

Энергия СВЧ электромагнитных колебаний (СВЧ энергия) применяется в электротермических технологических процессах уже более 60 лет. Как только электроника освоила СВЧ диапазон для решения радиолокации, начались исследования влияния СВЧ воздействия на живую природу и разработки в области применения СВЧ энергии для обработки пищевых продуктов на предприятиях общественного питания и в быту [1-3].

Интерес к новому научно-техническому направлению был так велик, что электронная промышленность быстро разработала мощные СВЧ генераторы (магнетроны) технологического назначения [4, 5].

К исследованиям в этой области присоединились вузы Москвы, Ленинграда и Саратова. Большой вклад в исследования и разработки СВЧ электротермии внес Саратов. Здесь разработали первые образцы магнетронов технологического назначения [4].

The article considers the milestones in the history of microwave electrical technology. The prospects for the given scientific and technological directions have been substantiated. The issues facing modern microwave electrical technology and solutions to its further development have been formulated. A structural flow chart to a hybrid microwave electrical facility is presented.

Keywords: electrical facility, working chamber, hybrid microwave electrical unit, microwave generator, non-thermal microwave modification

Были разработаны первая в нашей стране бытовая СВЧ печь «Славянка» и первый отечественный пастеризатор молока в потоке, созданы научные основы проектирования СВЧ электротехнологических установок (ЭТУ). Предложен новый тип рабочей камеры – камера с бегущей волной (КБВ), отличающаяся лучшим согласованием с СВЧ генератором и равномерностью нагрева обрабатываемого диэлектрика. Разработаны методы расчета камер лучевого и меандрового типов, процедура технико-экономической оптимизации СВЧ электротермических установок [6-11].

Биологи СГУ имени Н.Г. Чернышевского, сотрудники НИИ и предприятий электронной промышленности, сотрудники Саратовского политехнического института при исследовании процесса СВЧ пастеризации молока обнаружили специфическое воздействие СВЧ энергии на микроорганизмы, содержащиеся в молоке [12].

В дальнейшем это явление будем называть нетепловой СВЧ модификацией.

В СГТУ имени Гагарина Ю.А. в 90-е годы было обнаружено нетепловое СВЧ воздействие на полисульфон, а позднее – на эпоксидные компаунды и полимерные нити и волокна [13].

С этого времени речь уже шла о СВЧ электротехнологии в электротермических установках, реализующих тепловую или нетепловую СВЧ модификацию.

Структурные схемы СВЧ ЭТУ тепловой и нетепловой СВЧ модификации показаны на рис. 1 и 2.

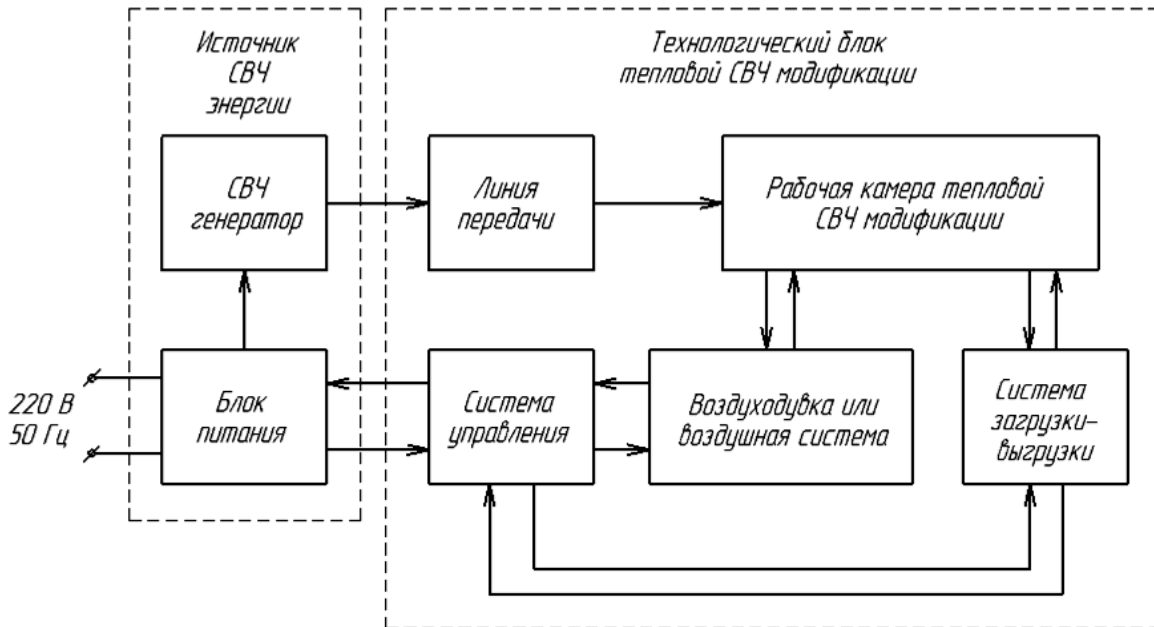


Рис. 1. Структурная схема СВЧ ЭТУ тепловой СВЧ модификации

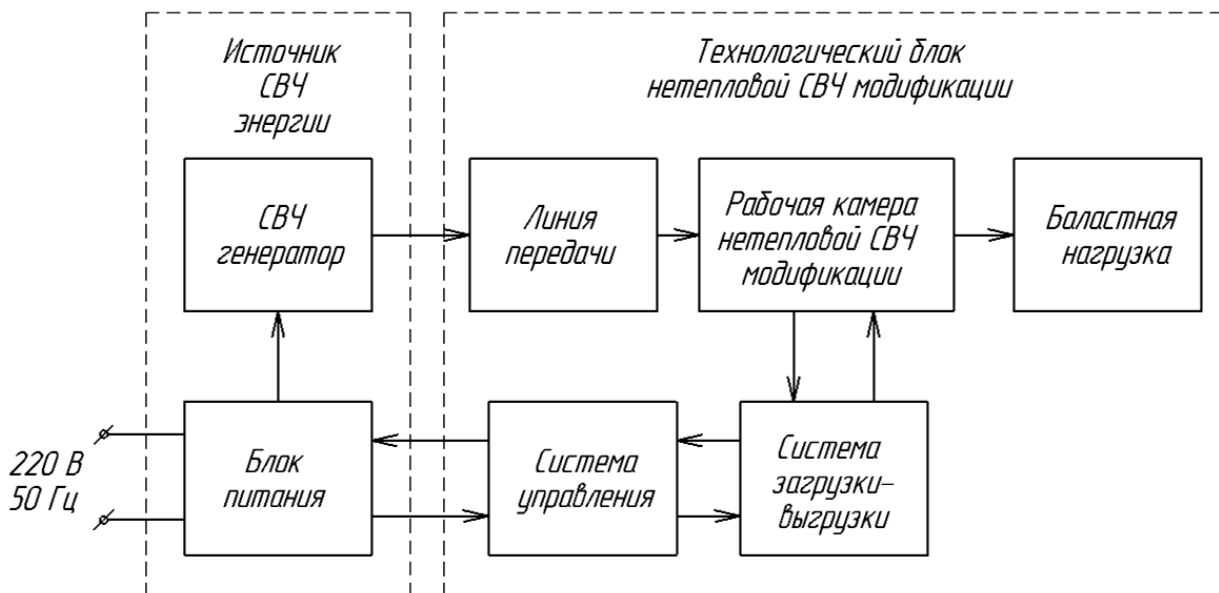


Рис. 2. Структурная схема СВЧ ЭТУ нетепловой СВЧ модификации

Создание СВЧ нетепловой модификации существенно расширило применение СВЧ энергии в технологических процессах, возможности СВЧ электротехноло-

гии. Но нетепловая СВЧ модификация проходит при незначительном нагреве или вовсе без заметного нагрева обрабатываемого полимера. А напряженность E ,

мощность, подаваемая в рабочую камеру, должна быть достаточно высокой. Пройдя камеру СВЧ мощность должна быть рассеяна в балластной нагрузке в проточной воде. КПД по использованию СВЧ энергии при нетепловой СВЧ модификации крайне мал или вовсе равен 0. Но такие СВЧ ЭТУ могут иметь достой-

ную экономическую эффективность, и потому они представляют практический интерес.

Перед СВЧ электротехнологией стоит важная задача – повысить КПД СВЧ ЭТУ нетепловой СВЧ модификации. Эту задачу решает СВЧ ЭТУ с камерой гибридного типа (СВЧ ЭТУ с КГТ) (рис. 3).

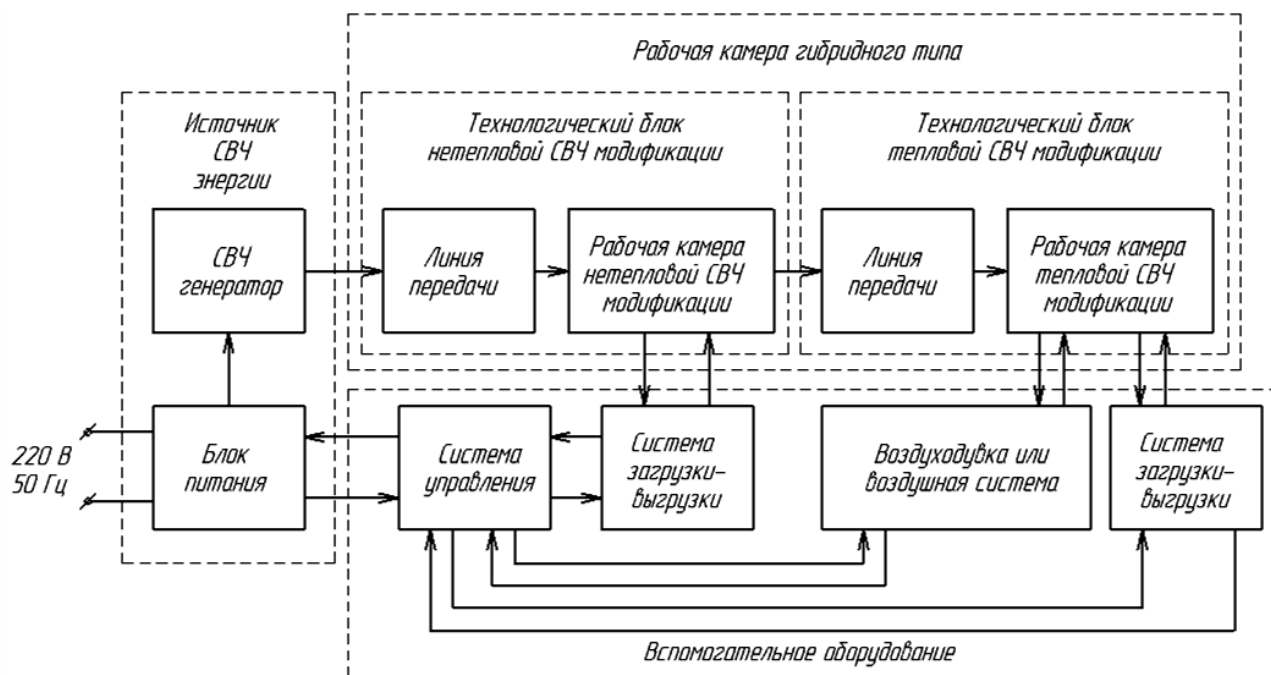


Рис. 3. Структурная схема гибридной СВЧ электротехнологической установки

В этих установках СВЧ энергия после рабочей камеры нетепловой СВЧ модификации не рассеивается в балластной нагрузке, а поступает в рабочую камеру тепловой СВЧ модификации, где проводится модификация другого диэлектрика. СВЧ ЭТУ с КГТ решает проблему с КПД установки нетепловой СВЧ модификации, но возникают вопросы к проектированию этой установки.

Так насколько экономически целесообразно усложнение конструкции СВЧ ЭТУ объединением двух технологий в одной установке? Какова должна быть необходимая и достаточная взаимосвязь параметров и режимов работы двух технологических блоков КГТ, производящих разную продукцию? Как проводить технико-экономическую оптимизацию КГТ? Возможен ли периодический режим работы СВЧ ЭТУ с КГТ? Нужно ли мате-

матическое моделирование кратковременных процессов нетепловой СВЧ модификации? Какова допустимая ошибка в задании величин ϵ' , $\tan \delta$, σ , ρ обрабатываемого в СВЧ ЭТУ с КГТ полимера и диэлектрика?

Решение этих и других вопросов к СВЧ ЭТУ с КГТ укрепит позицию СВЧ электротехнологии, расширит объём и номенклатуру исследуемых в СВЧ электротехнологических установках объектов.

Серьезную угрозу для будущего СВЧ электротехнологии представляет повышение цен на СВЧ генераторы технологического назначения (рис. 4). Если цена на ходовые магнетроны на частоте 2450 МГц начина с 2001 года изменилась незначительно, то цена на промышленные магнетроны на частоте 915 МГц претерпела значительные изменения.

Так, например, стоимость магнетрона мощностью 40 кВт на частоте 915 МГц в 2001 году составляла 55000 рублей, а в 2020 году стоимость магнетрона мощностью 30 кВт на частоте 915 МГц составит уже 145000 рублей.

К примеру, стоимость магнетрона мощностью 75 кВт на частоте 915 МГц в настоящее время составляет более 500000 рублей.

Таким образом, стоимость промышленных магнетронов на частоте 915 МГц по сравнению с ценами 2001 года увеличилась более чем в 6,5 раза.

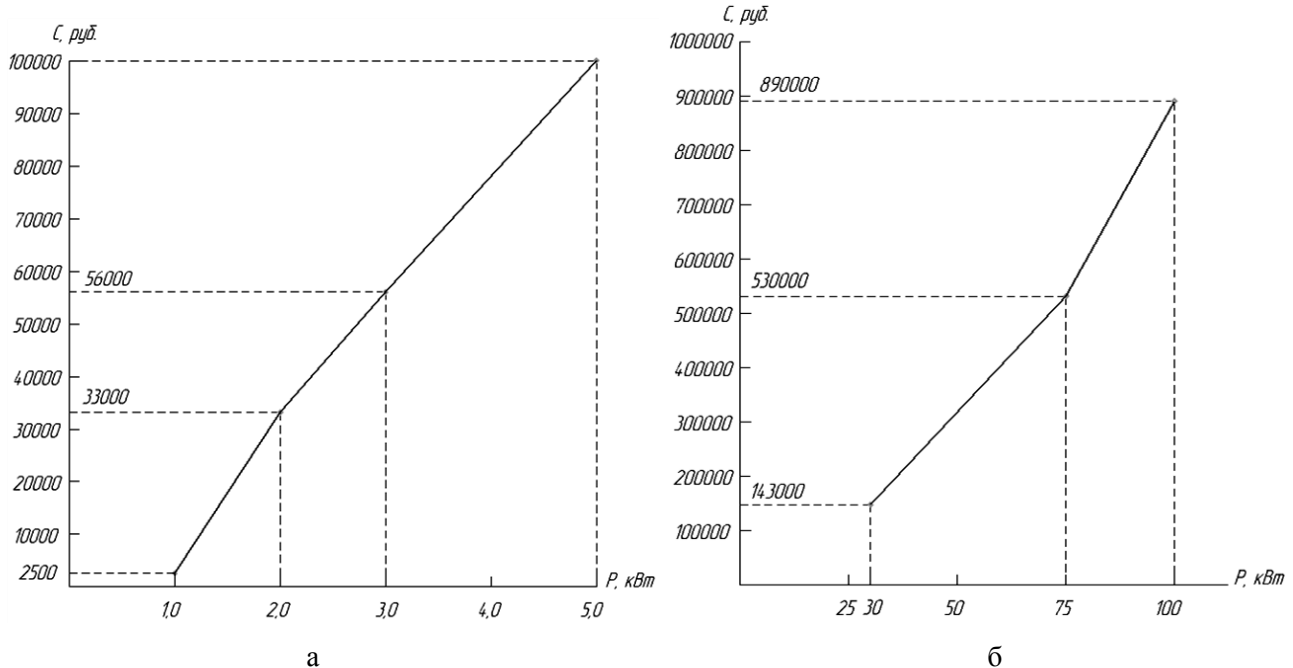


Рис. 4. Стоимость магнетронов: а – на частоте 2450 МГц; б – на частоте 915 МГц

Итак, сказанное позволяет сделать следующие выводы:

- СВЧ электротехнология сохраняет свои преимущества перед альтернативными способами нагрева диэлектриков и по-прежнему является перспективной;
- обнаруженная нетепловая СВЧ модификация существенно увеличивает ассорти-

мент обрабатываемых в СВЧ электромагнитном поле объектов;

- СВЧ ЭТУ с КГТ решает проблему с КПД СВЧ ЭТУ нетепловой СВЧ модификации;

Дальнейшая работа автора направлена на создание научных основ проектирования СВЧ ЭТУ с КГТ.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Частная Т.И.** Действие электромагнитных волн сверхвысокой частоты на микроорганизмы / Т.И. Частная // Труды. Харьков. мед. института. 1957. С. 15-23.

2. **Пресман А.С.** Электромагнитные поля и живая природа / А.С. Пресман. М.: Наука, 1968. 288 с.

3. **Рогов И.А.** Сверхвысокочастотный и инфракрасный нагрев пищевых продуктов /

И.А. Рогов, С.В. Некрутман. М.: ПищеПром, 1976. 216 с.

4. Разработка серии магнетронов непрерывного генерирования для промышленного применения / Л.Н. Кишеневский и др. // тезисы докладов конф. в электрон. технике. М.: ЦНТИ ТИЭН, 1960. С. 12-17.

5. СВЧ генераторы промышленного применения / И.И. Девяткин и др. // Доклады I симпозиума по применению СВЧ

энергии в отраслях пищевой промышленности. 1972. С. 33-37.

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

7. **Архангельский Ю.С.** СВЧ электротермия / Ю.С. Архангельский. Саратов: Саратов. гос. тех. ун-т, 1998. 406 с.

8. **Архангельский Ю.С.** Камеры с бегущей и со стоячей волной / Ю.С. Архангельский, Е.В. Колесников. Саратов: Буква, 2015. 252 с.

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

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

11. **Архангельский Ю.С.** Технико-экономические и социальные аспекты в электротехнологии / Ю.С. Архангельский, Е.В. Колесников. Саратов: Амирит, 2017. 197 с.

12. Влияние электромагнитных полей сверхвысокочастотного диапазона на бактериальную клетку / В.В. Игнатов и др. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1978. 77 с.

13. СВЧ модификация полимеров / Ю.С. Архангельский, Е.М. Гришина, В.А. Лаврентьев, С.К. Слепцова. Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2012. 228 с.

Тухватуллин Мидхат Ильфатович – старший преподаватель кафедры «Электроснабжение и автоматизация технологических процессов» Башкирского государственного аграрного университета

Midhat I. Tukhvatullin – Senior Lecturer, Department of Power Supply and Automation of Technological Processes, Bashkir State Agrarian University

Статья поступила в редакцию 19.10.20, принята к опубликованию 14.12.20

ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ

УДК 621.316.1

МЕТОД ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ БЫТОВЫМИ ЭЛЕКТРОПРИЁМНИКАМИ В УСЛОВИЯХ РЕСПУБЛИКИ ТАДЖИКИСТАН

С.Ш. Таваров, А.И. Сидоров

A METHOD FOR PREDICTING ELECTRICITY CONSUMPTION BY HOUSEHOLD APPLIANCES IN THE REPUBLIC OF TAJIKISTAN

S.Sh. Tavarov, A.I. Sidorov

В работе предлагается метод прогнозирования электропотребления с учётом установленных коэффициентов, соответствующих условиям места расположения городских электропотребителей Республики Таджикистан. На основе предложенного метода рекомендованы сезонные графики электропотребления для крупных городов, имеющие отличительную особенность по климато-метеорологическим условиям их расположения. Рекомендуемые сезонные графики электропотребления позволят решить вопрос по уменьшению потерь электроэнергии и выравниванию нагрузки по фазам городских электрических сетей.

Ключевые слова: бытовые электроприёмники, электропотребление, метод прогнозирования

The paper presents a method for predicting power consumption with account for the established coefficients corresponding to locality conditions of urban power consumers in the Republic of Tajikistan. The proposed method can be applied for designing seasonal schedules of electricity consumption in large cities, which have distinctive features in terms of the local climatic and meteorological conditions. The recommended seasonal electricity consumption schedules allow for solving the issues with reducing energy losses and equalizing urban electrical load profiles.

Keywords: household electrical appliances, power consumption, prediction method

Введение

За последние десять лет картина электропотребления бытовых потребителей в городах Республики Таджикистан существенно изменилась. При этом в городах электропотребление бытовыми потребителями изменяется не только в сторону возрастания, но и в сторону уменьшения. Неоптимальное электропотребление рассматриваемыми потребителями становится основной причиной снижения эффективности городских электрических сетей.

Выявление факторов, влияющих на неравномерное электропотребление бытовыми потребителями, остается на данный момент главной проблемой, решение которой позволит решить ряд задач, таких как:

1. Уменьшение потерь электроэнергии.
2. Выравнивание нагрузки по фазам [1-4].

Разработанные нормы удельных нагрузок для бытовых потребителей типового исполнения не в полной мере соответствуют текущему моменту [5, 6]. Это происходит, в первую очередь, потому, что нормативные

документы не учитывают электрические нагрузки, создаваемые кондиционерами и электрическими водонагревателями.

Однако, поскольку основным источником электроэнергии в Республике Таджикистан являются гидроэлектростанции, и выработка электроэнергии на них зависит от притока воды, а приток воды идет с гор, когда ледники тают, в зимние дни из-за морозов наблюдается резкое уменьшение притока воды, что приводит к дефициту электроэнергии.

При этом необходимо учитывать специфику расположения городов Республики Таджикистан. В зависимости от климатических и метеорологических условий местности и географического положения городов они расположены на разной высоте над уровнем моря, с разными температурами окружающей среды.

В качестве примера можно привести температуры воздуха с точки зрения территориального расположения: в Душанбе зимой она не опускается ниже -5°C , а в Горно-Бадахшанской автономной области с центром Хорог зимой может достигать -30°C , поэтому потребление электроэнергии бытовыми потребителями в Хороге будет выше, чем в Душанбе. Влияние температуры на электропотребление достаточно изучено как зарубежными [7-10], так и российскими исследователями [11-17].

Это известное положение не учитывает влияние географического положения бытовых потребителей относительно уровня моря и благосостояние населения. По нашему мнению, это может быть дополнительным фактором, приводящим к неравномерному энергопотреблению, определение которого позволит решить поставленные выше задачи.

Города Республики Таджикистан (РТ) в силу своего географического расположения имеют свои особенности, а именно:

1. Большие перепады относительно уровня моря.
2. Разные климатические и метеорологические условия местности.

Приведенное выше подчеркивает необходимость наличия достоверных данных, поскольку отсутствие прогноза приведет к

снижению надежности электроснабжения и всего, что связано с надежностью.

Метод исследования

В процессе поиска решения поставленной научной проблемы нами был осуществлен сбор данных электропотребления в девяти городах Таджикистана:

- Душанбе (Д);
- Хорог (Х);
- Бохтар (Б);
- Куляб (К);
- Гарм (Г);
- Истаравшан (И);
- Исфара (Ис);
- Хаджент (Хад.);
- Панджакент (П).

Всего по 980 потребителей (человек).

Визуальный анализ полученных данных позволил выдвинуть предположение о зависимости электропотребления от ряда параметров. Целью дальнейшего исследования стало обоснование данного предположения и выявление данных параметров. Методом достижения цели стало математическое моделирование:

$$W = f(t; h; c; s), \quad (1)$$

где W – величина электропотребления, кВт·ч; t – температурный коэффициент, показывающий экстремальную разницу температур в течение исследуемого периода, $^{\circ}\text{C}$; h – географический коэффициент, связанный с высотой местности локального проживания потребителей энергии над уровнем моря, справочная величина, м; c – коэффициент конструктивно-технологической готовности зданий и сооружений, мест проживания потребителей, учитывающий этажность строения, процент износа и физические характеристики сетей и проводки в здании, пропускную способность сетей, тип приборов учета электроэнергии, технологии сбора данных о потреблении электроэнергии, принятые в данной группе потребителей, условные уровневые единицы (1 – нулевая готовность, 2 – низкая готовность, 3 – средняя готовность, 4 – готовность выше

среднего, 5 – высокая готовность); s – коэффициент благосостояния потребителей, компактно проживающих, учитывающий плотность населения, цену на кВт·ч электроэнергии и среднегодовой доход на душу населения, единиц /чел.

Моделирование осуществлялось в два этапа. На первом этапе осуществлялись:

1) статистическая обработка эмпирических данных, собранных в 9 городах Таджикистана за 36 месяцев (три года);

2) проверка групп потребителей на однородность по показателю потребления электроэнергии;

3) анализ статистической значимости каждого из параметров в однородных группах;

4) поиск формы математической записи зависимости энергопотребления от выявленных параметров.

Представленные электропотребители были отобраны после качественного анализа конструктивно-технологических особенностей зданий и сооружений: основная застройка городов и выбор способов электроснабжения и учета электропотребления сложились в этих группах до начала исследуемого периода, являются тождественными и претерпели минимальное преобразование за исследуемый период. Таким образом, однородность групп по параметру s была выявлена посредством наблюдений, опроса экспертов, работы с технической документацией. Она оказалась на уровне средней.

Статистическая обработка эмпирических данных осуществлялась методом нахождения среднесезонного (зима, весна, лето, осень) и среднегодового значений электропотребления и температур с целью их выравнивания и нахождения тренда:

$$t_0 = (T_{\max} - T_{\min})_i / 36, \quad (2)$$

где $T_{\max}$ и $T_{\min}$ – соответственно экстремальные максимальное и минимальное значения температуры за исследуемый месяц года, i – месяц года за трехлетний период исследования, t_0 – среднегодовой температурный коэффициент:

$$t_{\text{зима}} = (T_{\max} - T_{\min})_i / 9, \quad (3)$$

где $T_{\max}$ и $T_{\min}$ – соответственно экстремальные максимальное и минимальное значения температуры за исследуемый месяц зимнего периода, i – месяц зимнего периода за трехлетний период исследования, $t_{\text{зима}}$ – среднесезонный зимний температурный коэффициент:

$$t_{\text{весна}} = (T_{\max} - T_{\min})_i / 9, \quad (4)$$

где $T_{\max}$ и $T_{\min}$ – соответственно экстремальные максимальное и минимальное значения температуры за исследуемый месяц весеннего периода, i – месяц весеннего периода за трехлетний период исследования, $t_{\text{весна}}$ – среднесезонный весенний температурный коэффициент:

$$t_{\text{лето}} = (T_{\max} - T_{\min})_i / 9, \quad (5)$$

где $T_{\max}$ и $T_{\min}$ – соответственно экстремальные максимальное и минимальное значения температуры за исследуемый месяц летнего периода, i – месяц летнего периода за трехлетний период исследования, $t_{\text{лето}}$ – среднесезонный летний температурный коэффициент:

$$t_{\text{осень}} = (T_{\max} - T_{\min})_i / 9, \quad (6)$$

где $T_{\max}$ и $T_{\min}$ – соответственно экстремальные максимальное и минимальное значения температуры за исследуемый месяц осеннего периода, i – месяц осеннего периода за трехлетний период исследования, $t_{\text{осень}}$ – среднесезонный осенний температурный коэффициент.

В результате обработки статистические данные приняли вид (табл. 1).

Способом попарного сравнения значения параметра в группах со средневыборочным значением параметра все девять групп были проверены на однородность по параметру среднегодового энергопотребления. Для проверки был использован статистический критерий согласия χ^2 Пирсона.

Таблица 1 – Статистические данные температур и электропотребление для рассматриваемых городов

Потребители в городах	Средний температурный коэффициент за год (t_0), °C	Электропотребление, кВт·ч	Средний температурный коэффициент зимой ($t_{зима}$), °C	Электропотребление, кВт·ч	Средний температурный коэффициент весной ($t_{весна}$), °C	Электропотребление, кВт·ч	Средний температурный коэффициент летом ($t_{лето}$), °C	Электропотребление, кВт·ч	Средний температурный коэффициент осенью ($t_{осень}$), °C	Электропотребление, кВт·ч
Д.	14,40	1184,87	3,37	1888,26	14,73	890,98	25,37	783,92	14,00	1176,32
Г.	10,00	1737,31	–1,9	2762,56	10,23	1746,47	22,4	832,72	12,53	1607,50
Х.	7,55	1899,34	–5,47	2290,66	8,57	760,23	21,57	328,75	10,80	619,79
Ис.	12,55	1519,92	0,10	2686,68	13,90	1253,92	25,30	523,95	12,50	1615,14
П.	12,35	1617,93	1,00	2714,74	12,40	1445,39	23,73	689,04	12,37	1622,57
И.	11,65	1700,13	0,07	2885,45	11,30	1603,47	23,73	689,04	12,37	1622,57
Хад.	13,90	1367,90	0,9	2732,95	15,90	976,37	27,33	309,52	13,80	1452,75
К.	16,25	1082,79	4,17	2150,41	16,20	928,14	28,63	174,96	16,77	1077,66
Б.	15,20	1157,73	3,77	2221,45	16,90	837,04	27,37	305,42	15,2	1267,03

Статистическая нулевая гипотеза H_0 состояла в том, что две сравниваемые группы потребителей однородны по параметру среднегодового энергопотребления за три исследуемых года.

Значение χ^2 для групп колебалось от 6 до 46,23

K (степень свободы) = 1

P (уровень значимости) = 0,05

Табличное значение $\chi^2_{кр} = 3,84$

$$\chi^2_{кр} > \chi^2_{\max} = 3,84 < 6.$$

Поскольку критическое значение меньше расчетного, нулевая гипотеза на данном уровне значимости может быть принята, считаем группы однородными по параметру среднегодового потребления.

В результате проверки на уровне значимости 0,05 гипотеза подтвердилась для всех экспериментальных групп, но большой разброс значений χ^2 потребовал дополнительного исследования на однородность

в некоторых группах. В результате повышения мощности критерия, то есть на уровне значимости 0,01, выявился блок групп, неоднородных с остальными группами по предлагаемому параметру.

Так, значение χ^2 в группах колебалось и было равно соответственно 6 и 6,2

При K (степень свободы) = 1,

P (уровень значимости) = 0,01,

Табличное значение $\chi^2_{кр} = 6,64$

$$\chi^2_{кр} > \chi^2_{\max} = 6,64 > 6,2.$$

Поэтому гипотеза об их однородности должна быть отклонена (табл. 2).

Таблица 2 – Блоки однородных и неоднородных групп по параметру высота над уровнем моря

Блок однородных групп потребителей	Блок неоднородных групп потребителей
П., Ис., К., Б.	Хад., Х., Д., Г., И.

Следовательно, в группах Хад., Х., Д., Г., И. присутствует фактор, статистически значимо влияющий на потребление электроэнергии при прочих равных условиях.

Детальный качественный анализ различий указанных групп подтвердил предположение и статистические выводы: электропотребление есть функция от расположения потребителя над уровнем моря, то есть высота над уровнем моря – статистически существенный фактор влияния на электропотребление.

Дальнейший анализ эмпирических данных выявил, что однородные по среднегодовому потреблению электроэнергии экспериментальные группы имеют существенную статистическую различимость при сравнении сезонного энергопотребления.

Нулевая гипотеза H_0 состояла в следующем: экспериментальные группы, сравниваемые попарно, статистически неразличимы по параметру энергопотребления. Статистический метод оценки согласия – критерий Пирсона χ^2 .

В результате статистических расчетов выявились группы, однородные и неоднородные по параметру сезонного электропотребления.

Внутри каждого сезона значение χ^2

в диапазоне [2,48; 3,5] в группах, Хад., Д., К., Б. в диапазоне [6, 6; 9,2] в группах Х., Г., П., Ис.

Поскольку $K = 1$, при $p = 0,05$, $3,84 > 3,5$, то есть $\chi^2_{кр} > \chi^2_{max}$, значит есть основания для данных групп Хад., Д., К., Б. принять гипотезу об их однородности, но поскольку $\chi^2_{кр} < \chi^2_{max} = 3,84 < 6,6$, то для групп Х., Г., П., Ис. гипотезу имеет смысл отклонить. Результаты приведены в табл. 3.

Таблица 3 – Блоки однородных и неоднородных групп по параметру благосостояние

Блок однородных групп потребителей с одинаковым климатом, высотой н.у.м. и благосостоянием	Блок неоднородных групп потребителей с одинаковым климатом, высотой н.у.м., но различных по благосостоянию
Хад., Д., К., Б.	Х., Г., П., Ис.

Выявленные зависимости влияния факторов на сезонное электропотребление (см. табл. 1-3) представим в виде сравнительных зависимостей для нескольких городов с разными факторными параметрами (рис. 1, 2). При сравнении будем брать данные зимних и летних периодов.

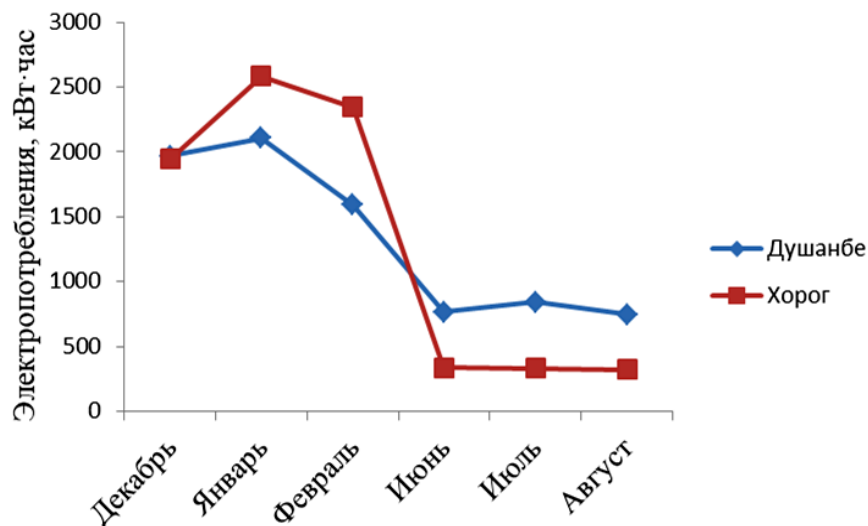


Рис. 1. Сравнение распределения значений электропотребления с разными температурами и высотами над уровнем моря

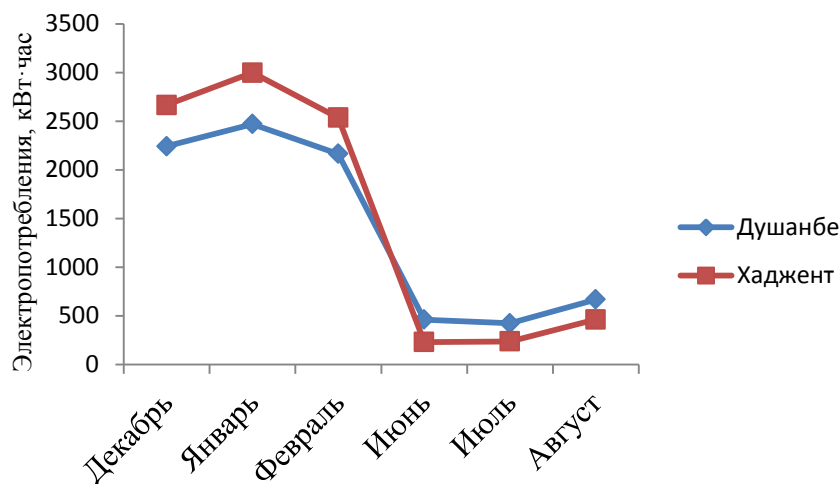


Рис. 2. Сравнение распределения значений электропотребления с одинаковыми температурами и благосостоянием, но при разных высотах над уровнем моря

Группы были подвергнуты качественному анализу их характеристик, в ходе которого было выявлено, что они различимы по критерию благосостояния потребителей. Так, при низких температурах электропотребление увеличивается статистически различимо в тех городах, где проживают потребители с большим доходом на душу населения, поскольку они включают дополнительные приборы электропотребления.

Таким образом, в результате первого этапа математического моделирования были выявлены статистически существенные факторы влияния на энергопотребление:

t – температурный коэффициент,

h – высота местности локального проживания потребителей энергии над уровнем моря,

c – коэффициент конструктивно-технологических особенностей зданий и сооружений,

s – коэффициент благосостояния потребителей.

Как параметры данные факторы были статистически проверены на значимость, математически обоснована целесообразность их включения и учета при построении математической прогнозной модели электропотребления.

На основе выявленных факторов влияния на электропотребление в условия Республики Таджикистан предлагается модель прогнозирования электропотребления.

$$W_{\text{прог.}} = W_{\text{временные нормы}} \cdot (1 - \alpha_i). \quad (7)$$

Коэффициент α_i , учитывающий факторы, влияющие на электропотребление, представим в следующем виде:

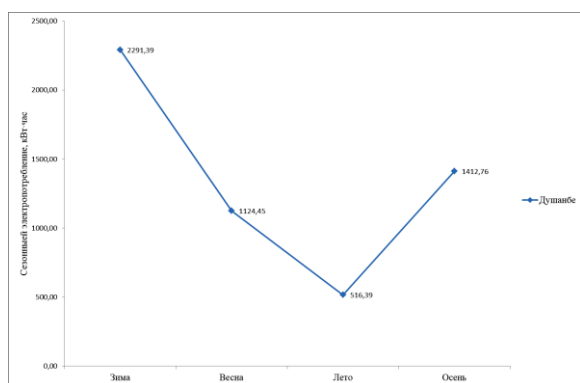
$$\alpha_i = (((t_i \cdot h + c) \cdot s) / (s + k)), \quad (8)$$

где $(t_i \cdot h + c)$ – коэффициент, учитывающий температурные, географические (высота над уровнем моря) и конструктивно-технологические коэффициенты, аналог постоянного коэффициента в функции Торнквиста; s – благосостояние потребителя, аналог дохода в функции Торнквиста; k – коэффициент, учитывающий динамику и сезонные колебания благосостояния потребителя; i – месяц исследования.

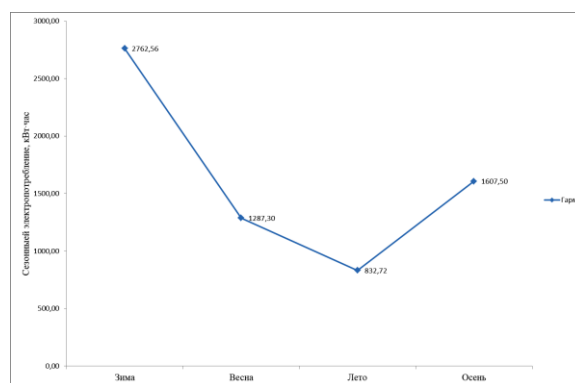
Результаты исследования и обсуждение

На основе предложенной модели прогнозирования электропотребления с учетом факторного коэффициента предложены сезонные графики электропотребления для восьми рассматриваемых городов Республики Таджикистан (рис. 3).

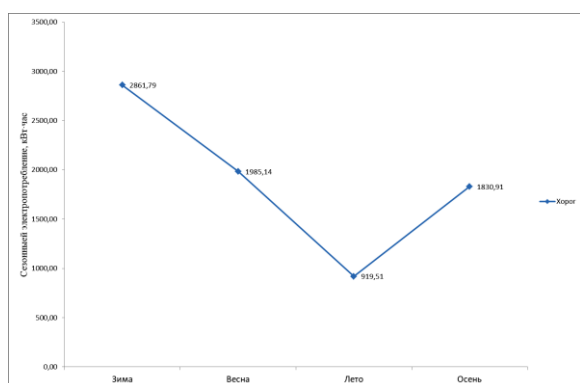
Как видно из полученных сезонных графиков электропотребления, в зависимости от установленных факторов для рассматриваемых городов электропотребление разное. Следовательно, данные графики позволяют энергоснабжающей организации контролировать режимные параметры электрической сети.



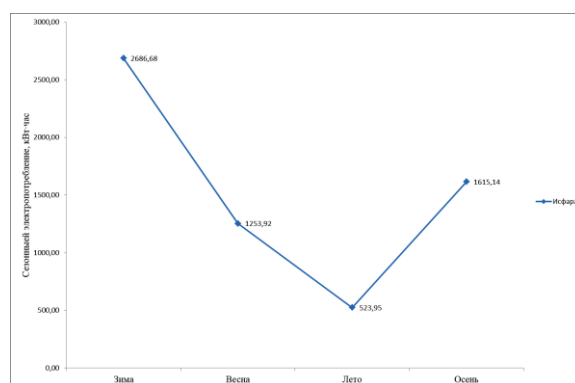
1



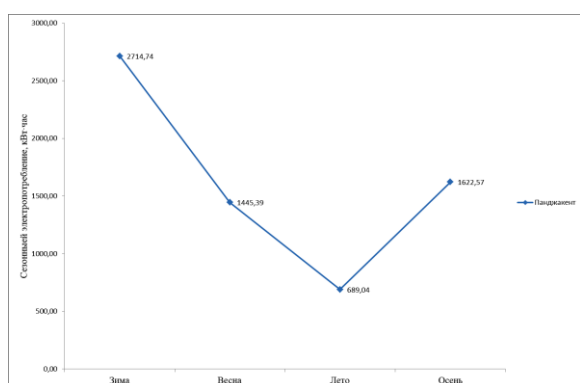
2



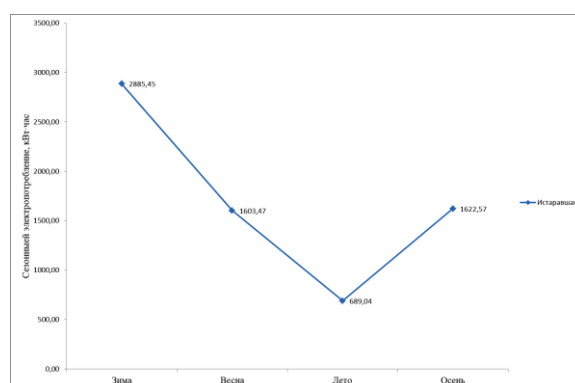
3



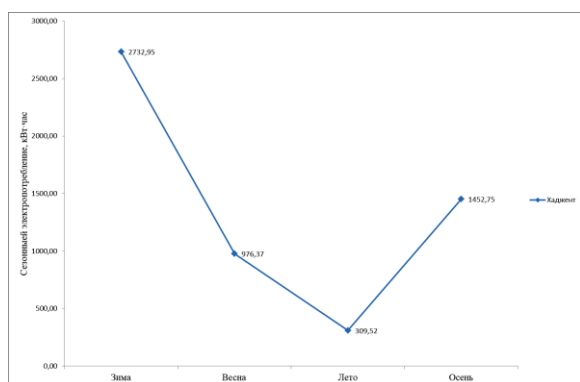
4



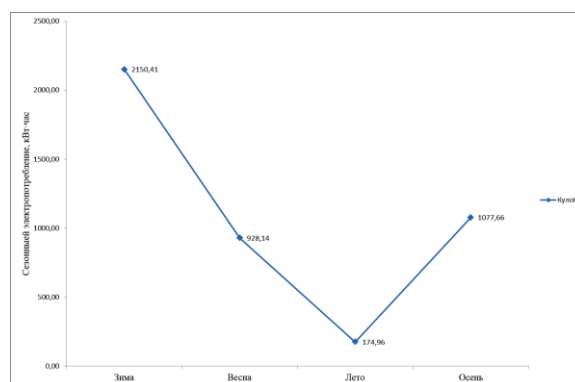
5



6



7



8

Рис. 3. Сезонное прогнозирование электропотребления для восьми потребителей городов Республики Таджикистан

Использование данных графиков позволит энергоснабжающей организации Республики Таджикистан ОАХК «Барки Тоҷик» уменьшить потери электроэнергии, выровнять нагрузки по фазам.

Заключение

На основе осуществленного сбора данных по электропотреблению в девяти городах Таджикистана и с учётом установленных коэффициентов, соответ-

ствующих условиям местности, расположению городских электропотребителей Республики Таджикистан, предложен метод прогнозирования электропотребления. С применением метода прогнозирования рекомендован сезонный график электропотребления, применение которого позволит большей частью решить вопросы, связанные с уменьшением потерь электроэнергии и выравниванием нагрузки однофазных бытовых потребителей.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Сидоров А.И.** Нормирование электропотребления Республики Таджикистан с учетом климатических особенностей региона / А.И. Сидоров, С.Ш. Таваров // Энергия единой сети. Науч.-техн журн. 2019. № 3 (5). С. 70-75.

2. **Таваров С.Ш.** Удельное электропотребление бытового сектора с учётом температуры окружающего воздуха и территориального расположения Республики Таджикистан / С.Ш. Таваров // Промышленная энергетика. 2019. Т. 7. № 7. С. 19-22.

3. **Сидоров А.И.** Показатели надежности элементов распределительной сети 6-10 кВ / А.И. Сидоров, С.Ш. Таваров, Г.Х. Маджидов // Вопросы электротехнологии. 2019. № 3 (24). С. 55-61.

4. **Таваров С.Ш.** Метод прогнозирования электропотребления бытовыми потребителями в условиях Республики Таджикистан / С.Ш. Таваров // Вестник ЮУрГУ. Сер. Энергетика. 2020. Т. 20. № 2. С. 28-35. DOI: 10.14529/power200203.

5. СП 256. 1325800.2016. Электроустановки жилых и общественных зданий правила проектирования и монтажа [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293751/4293751598.htm> (дата обращения: 11.07.2017).

6. РМ-2696-01. Временная инструкция по расчету электрических нагрузок жилых зданий. М.: Изд-во ГУП «НИИЦ». 2001. 22 с.

7. **Blazakis K.V.** Effective Electricity Theft Detection in Power Distribution Grids

Using an Adaptive Neuro Fuzzy Inference System / K.V. Blazakis, T.N. Kapetanakis, G.S. Stavrakakis // Energies. 2020. Vol. 13. P. 3110. <https://doi.org/10.3390/en13123110>.

8. Impacts of Demand-Side Management on Electrical Power Systems: A Review / H.J. Jabir, J. Teh, D. Ishak, H. Abunima // Energies. 2018. Vol. 11. P. 1050. <https://doi.org/10.3390/en11051050>.

9. **Fatih Issi.** The Determination of Load Profiles and Power Consumptions of Home Appliances / Issi Fatih, Kaplan // Energies. 2018. Vol. 11 (3). P. 607; <https://doi.org/10.3390/en11030607>.

10. **Florian Z.** Load Nowcasting: Predicting Actuals with Limited Data / Z. Florian // Energies. 2020. Vol. 13 (6). P. 1443. <https://doi.org/10.3390/en13061443>

11. **Макоклюев Б.И.** Тенденции электропотребления энергосистем России / Б.И. Макоклюев. Энергия единой сети. науч.-техн. журн. 2019. № 5 (48). С. 56-64.

12. Краткосрочное прогнозирование электропотребления энергосистем / Б.И. Макоклюев, А.С. Полижаров, А.А. Басов и др. // Электрические станции. 2018. № 4. С. 24-35.

13. Оперативная коррекция графиков потребления электрической мощности в цикле планирования балансирующего рынка / Б.И. Макоклюев, А.С. Полижаров, А.В. Антонов и др. // Электрические станции. 2019. № 5. С. 36-44.

14. **Репкина Н.Г.** Исследование факторов, влияющих на точность прогнозирования

ния суточного электропотребления / Н.Г. Репкина // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2015. № 2. С. 41-43.

15. **Зубакин В.А.** Методы и модели анализа волатильности потребления электроэнергии с учетом цикличности и стохастичности / В.А. Зубакин, Н.М. Ковшов // Анализ, прогноз, управление. 2015. № 7 (15). С. 6-12.

16. **Валеев Г.С.** Моделирование суточных графиков нагрузок участков распре-

лительных сетей напряжением 6-10 кВ городов и населенных пунктов в условиях ограниченного объема исходной информации / Г.С. Валеев, М.А. Дзюба, Р.Г. Валеев // Вестник ЮУрГУ. Сер. Энергетика. 2016. Т. 16. № 2. С. 23-29.

17. **Соловьева И.А.** Прогнозирование электропотребления с учетом факторов технологической и рыночной среды / И.А. Соловьева, А.П. Дзюба // Научный диалог. Экономика. Право. Политология. 2013. № 7 (19). С. 97-113.

Сидоров Александр Иванович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Безопасность жизнедеятельности» Южно-Уральского национального исследовательского государственного университета

Таваров Саиджон Ширалиевич – докторант, кандидат технических наук, доцент кафедры «Безопасность жизнедеятельности» Южно-Уральского государственного университета (национального исследовательского университета)

Alexander I. Sidorov – Dr.Sc., Professor, Head: Department of Life Safety, South Ural National Research State University, Chelyabinsk

Saidjon Sh. Tavarov – Postdoctoral Student, PhD, Associate Professor, Department of Life Safety, South Ural State University (national research university)

Статья поступила в редакцию 20.10.20, принята к опубликованию 14.12.20

УВАЖАЕМЫЕ АВТОРЫ!

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

УДК 621.314:621.365.5

ПРИМЕНЕНИЕ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ СВЧ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ

И.И. Артюхов, А.И. Земцов, Е.К. Пыльская, Д.Е. Процветов

A SIMULATION TECHNIQUE IN THE STUDY OF THE POWER SUPPLY SYSTEM OF ELECTROTECHNOLOGICAL MICROWAVE UNITS

I.I. Artyukhov, A.I. Zemtsov, E.K. Pylskaya, D.E. Protsvetov

Для исследования статических и динамических режимов в системе электропитания СВЧ электротехнологической установки разработана имитационная модель в среде Matlab с пакетом расширения Simulink. Моделирование проведено для случая, когда источником СВЧ-колебаний является пакетированный магнетрон 2М164. В результате моделирования получены виртуальные осциллограммы напряжений и токов. Построены зависимости, характеризующие влияние сетевого напряжения на режим работы СВЧ электротехнологической установки. Предложены рекомендации по выбору элементов системы электропитания.

Ключевые слова: СВЧ-установка, магнетрон, система электропитания, имитационное моделирование

СВЧ диэлектрический нагрев позволяет эффективно реализовывать широкий спектр технологий. Основные преимущества использования СВЧ нагрева в термических процессах обусловлены особенностями ее поглощения. Энергия СВЧ колебаний преобразуется в тепло внутри вещества, что приводит к значительной экономии энергии и сокращению времени процессов [1]. Прогресс в разработке СВЧ генераторов и хорошие поглощающие свойства многих материалов привели к созданию промышленных установок для различных технологических процессов [2-4].

A simulation model in Matlab with the Simulink extension package has been developed to study the static and dynamic modes of the power supply system of a microwave electrotechnological unit. The simulation was performed for the cases when the source of microwave oscillations is the packaged 2M164 magnetron. Virtual oscillograms for voltages and currents have been obtained as a result of the given simulation technique. Dependences characterizing the impact of the mains voltage on operating conditions of the microwave electrotechnological unit have been determined. Recommendations relating the choice of components to the power supply system are given.

Keywords: microwave unit, magnetron, power supply system, simulation.

Основой СВЧ электротехнологической установки является генератор СВЧ-колебаний. Для установок небольшой мощности (единицы кВт) в основном применяют генераторы на магнетронах пакетированного типа (со встроенными магнитами). Электронная промышленность различных стран выпускает широкую гамму таких приборов. Более мощные СВЧ установки (десятки и даже сотни киловатт) конструируют на магнетронах с электромагнитами. В последнее время получают также применение магнетроны с комбинированной магнитной системой, в которых постоянные магниты дополняются электромагнитами.

При разработке источников питания для СВЧ-печей бытового назначения, в которых применяются магнетроны мощностью 600-700 Вт, широкое применение находит схема, которая показана на рис. 1. Особенностью этой схемы является наличие одного силового трансформатора Т с двумя вторичными обмотками для создания цепей накала катода и анодного питания. Первич-

ная обмотка трансформатора подключается к сети через фильтр электромагнитной совместимости (ЭМС) и коммутационное устройство (КУ), которое управляется блоком управления (БУ). Обмотка высокого напряжения и несимметричный удвоитель напряжения на конденсаторе С и диоде VD образуют источник анодного питания магнетрона VL.

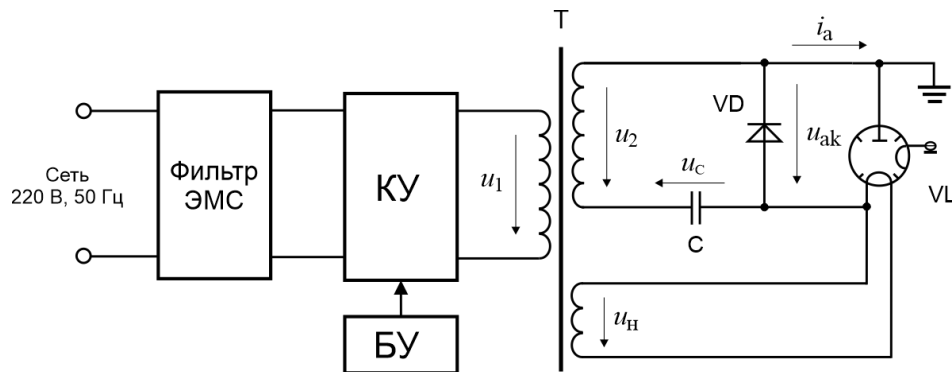


Рис. 1. Схема электропитания магнетрона малой мощности

В СВЧ электротехнологических установках промышленного назначения используют магнетроны мощностью более 1 кВт. Схемы электропитания этих магнетронов имеют свои особенности. В частности, для их функционирования требуются отдельные цепи питания анода и накала катода.

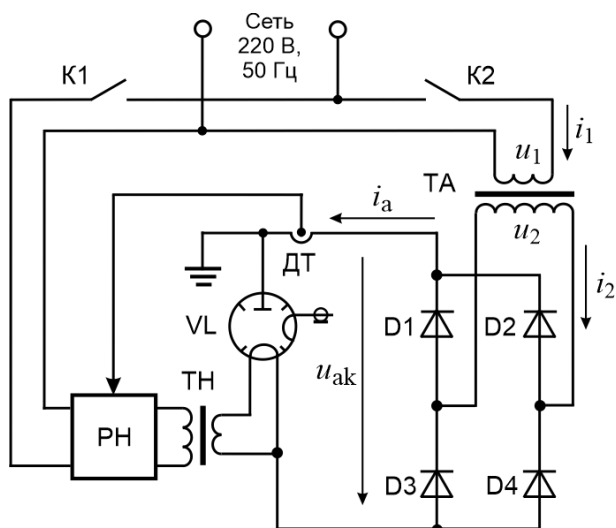


Рис. 2. Схема электропитания магнетрона промышленного назначения

На рис. 2 показана схема электропитания магнетрона TOSHIBA 2M164, который

предназначен для использования в СВЧ установках промышленного назначения. Магнетрон генерирует СВЧ колебания в диапазоне частот от 2440 до 2460 МГц. Средняя выходная мощность составляет 1300...1600 Вт [5].

Необходимое для накала катода напряжение снимается со вторичной обмотки трансформатора ТН, первичная обмотка которого через регулятор напряжения РН и коммутатор K1 подключена к сети. Регулятор напряжения необходим для изменения напряжения накала в процессе разогрева катода и выхода магнетрона на рабочий режим.

В соответствии с техническими требованиями на эксплуатацию магнетрона 2M164 необходим предварительный прогрев катода в течение некоторого времени (не менее 3 секунд). Поэтому при включении системы электропитания магнетрона VL сначала срабатывает коммутатор K1, в результате чего на цепь накала катода подается напряжение, действующее значение которого составляет 3,6...4,4 В. Затем с помощью коммутатора K2 на анодную цепь подается напряжение, которое создается мостовым выпрямителем D1-D4, присоединенным ко вторичной обмотке высо-

ковольтного трансформатора ТА. Первичная обмотка этого трансформатора подключается к сети через коммутатор К2.

Для проектирования СВЧ-установки необходима информация о характеристиках системы электропитания магнетрона. Такую информацию можно получить путем имитационного моделирования в среде

MATLAB+Simulink [6]. Схема модели для исследования электромагнитных процессов в системе электропитания СВЧ-установки на базе магнетрона 2М164 показана на рис. 3. При ее составлении не учтены элементы цепи накала, так как они потребляют очень малую часть энергии по сравнению со всей системой электропитания.

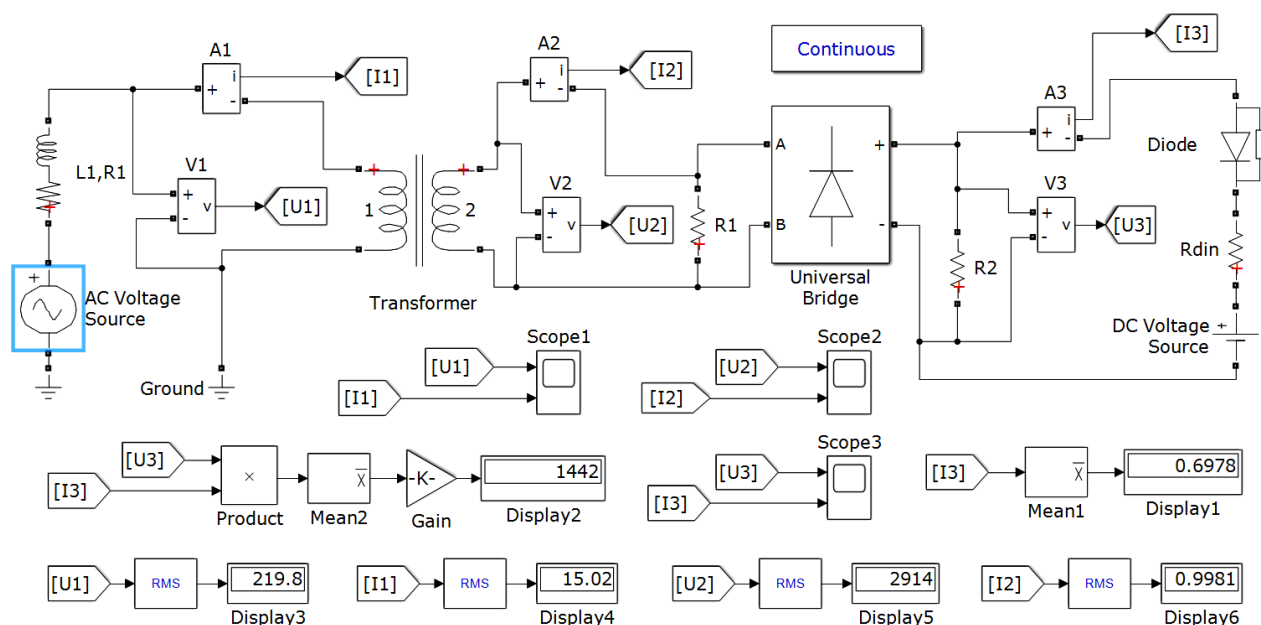


Рис. 3. Имитационная модель системы электропитания магнетрона

Параметры блока Transformer

Параметр	Единица измерения	Значение
Номинальная мощность	В·А	3200
Частота	Гц	50
Параметры первичной обмотки		
Номинальное напряжение	В	220
Индуктивность рассеяния	Гн	$3,6 \cdot 10^{-3}$
Сопротивление обмотки	Ом	0,6
Параметры вторичной обмотки		
Номинальное напряжение	В	3100...3500
Индуктивность рассеяния	Гн	1,3
Сопротивление обмотки	Ом	135
Параметры цепи намагничивания		
Индуктивность	Гн	8
Сопротивление	Ом	$1 \cdot 10^4$

Питающая сеть моделировалась блоками AC Voltage Source и L1, R1. Активное сопротивление и индуктивность сети составляли 0,01 Ом и 50 мкГн соответственно.

При проведении численных экспериментов напряжение сети варьировалось в пределах от 0,9 до 1,1 номинального значения, равного 220 В.

Силовая часть системы электропитания магнетрона представлена блоками Transformer и Universal Bridge. Параметры блока Transformer приведены в таблице. Магнетрон моделируется схемой замещения в виде последовательно соединенных диодов (блок Diode), динамического сопротивления (блок R_{din}) и включенного во встречном направлении источника постоянного напряжения (блок DC Voltage Source), величина которого соответствует пороговому напряжению U_0 моделируемого магнетрона. Для магнетрона 2M164 на основании его паспортных характеристик были приняты следующие значения: $R_{din} = 100 \text{ Ом}$; $U_0 = 3100 \text{ В}$.

В составе модели на рис. 3 имеются также элементы, предназначенные для расчета среднего значения анодного тока (блок Mean1) и среднего значения выходной мощности магнетрона (блоки Product, Mean2 и Gain). На основании характеристик магнетрона 2M164 было сделано допущение о том, что его КПД является постоянной величиной, которая задается в блоке Gain. Информация о среднем значении анодного тока и выходной мощности выводится на дисплеи 1 и 2 соответственно.

Для расчета действующих значений напряжений и токов предусмотрены блоки RMS, на входы которых поступают сигналы от соответствующих измерителей. Информация отображается на дисплеях 3-6.

В результате моделирования получены виртуальные осциллограммы токов и напряжений, которые представлены на рис. 4-6. Осциллограммы показаны для трех значений сетевого напряжения. Номера осциллограмм 1, 2 и 3 соответствуют значениям 198, 220 и 242 В.

Магнетроны имеют ярко выраженную нелинейную зависимость анодного тока от напряжения u_{ak} между анодом и катодом. Генерация СВЧ колебаний осуществляется только в том случае, когда напряжение u_{ak} превышает порогового значения U_0 . В результате анодный ток i_a имеет импульсный характер. При этом с ростом величины сетевого напряжения существенно увеличиваются амплитуда анодного тока и его среднее значение.

Так как напряжение u_{ak} между анодом и катодом магнетрона VL формируется однофазным мостовым выпрямителем, работа системы электропитания состоит из двух симметричных полупериодов. В свою очередь, каждый из полупериодов состоит из нескольких интервалов, длительность которых, как видно из приведенных осциллограмм, зависит от величины сетевого напряжения.

На первом интервале, пока напряжение $u_{ak} < U_0$, повышающий трансформатор работает практически на холостом ходу. Напряжение u_2 на вторичной обмотке трансформатора повторяет кривую ЭДС e_2 , а ток вторичной обмотки $i_2 = 0$.

На втором интервале при выполнении условия $u_{ak} > U_0$ параллельно вторичной обмотке трансформатора подключается нагрузка, представляющая собой динамическое сопротивление R_{din} магнетрона. После этого начинается процесс протекания тока, который описывается дифференциальным уравнением

$$L_{s2} \frac{di_a}{dt} + (R_{s2} + R_{din})i_a = e_2 - U_0,$$

где L_{s2} , R_{s2} – индуктивность рассеяния и активное сопротивление вторичной обмотки повышающего трансформатора.

Напряжение на магнетроне при этом описывается выражением

$$u_{ak} = R_{din} i_a + U_0 = e_2 - L_{s2} \frac{di_a}{dt} - R_{s2} i_a$$

и имеет форму, представленную на рис. 6.

Аналогичную форму имеет напряжение на вторичной обмотке трансформатора (рис. 5).

Рассмотренный на втором интервале процесс продолжается до тех пор, пока ток i_a не уменьшится до нуля. Как видно из осциллограмм, длительность интервала зависит от величины сетевого напряжения. Если сетевое напряжение меньше определенного значения, то второй интервал заканчивается до момента перехода кривой сетевого напряжения через ноль (осциллограммы токов с номерами 1 и 2 на рис. 4-6). Далее имеет место третий интер-

вал, когда ток i_a остается равным нулю до начала следующего полупериода. Однако возможны ситуации, когда сразу после

окончания второго интервала начинается следующий полупериод работы схемы (осциллограммы токов 3 на рис. 4-6).

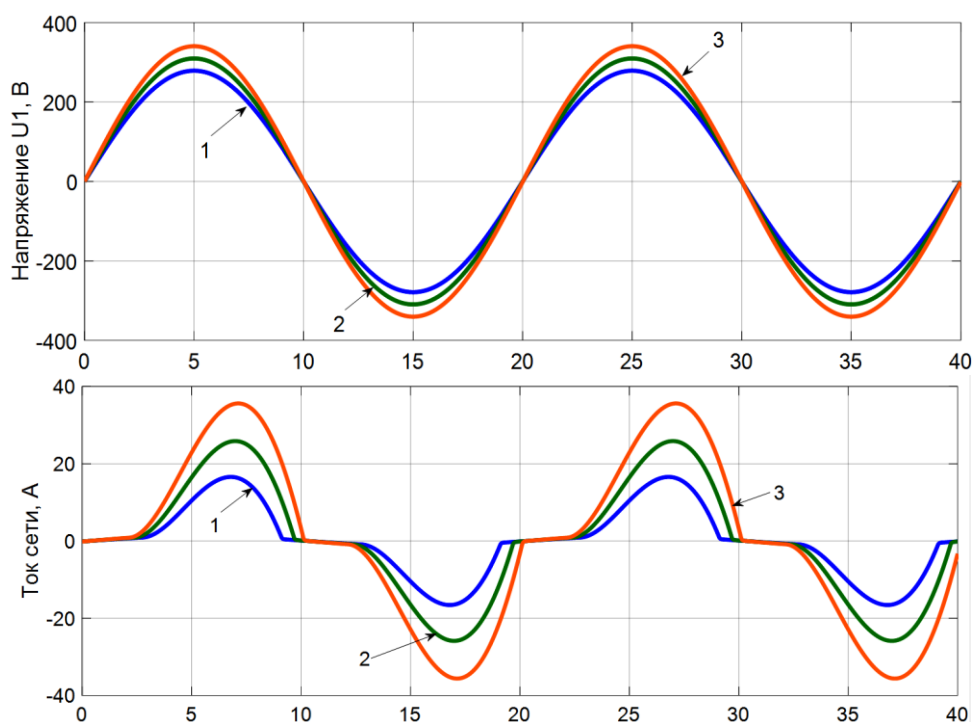


Рис. 4. Виртуальные осциллограммы напряжения и тока сети (по оси абсцисс – время в миллисекундах)

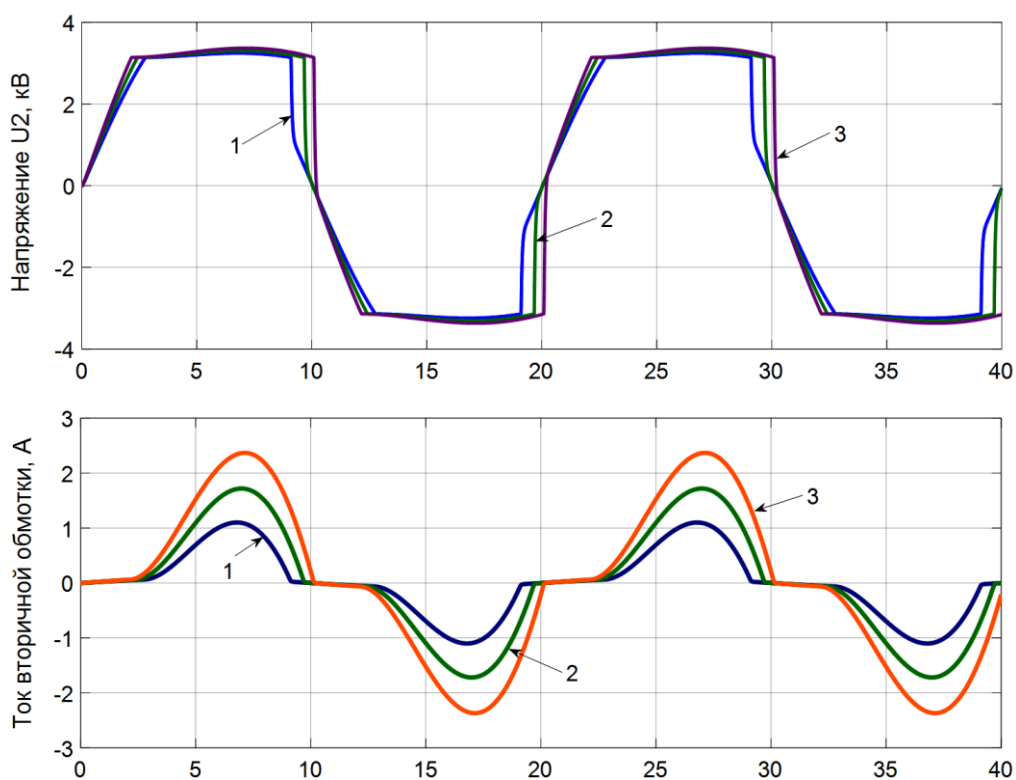


Рис. 5. Виртуальные осциллограммы напряжения и тока на вторичной обмотке трансформатора (по оси абсцисс – время в миллисекундах)

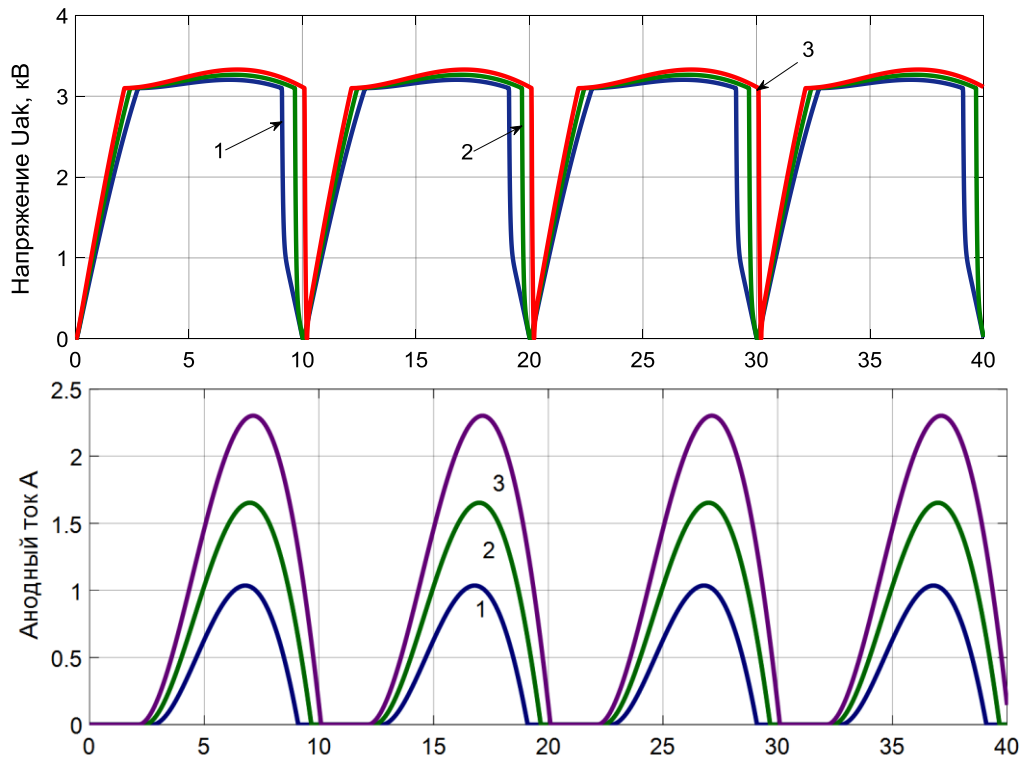


Рис. 6. Виртуальные осциллограммы напряжения и тока анодной цепи магнетрона (по оси абсцисс – время в миллисекундах)

На рис. 7 и 8 показаны графики зависимостей среднего значения анодного тока и выходной мощности магнетрона при изменении сетевого напряжения в пределах, допускаемых ГОСТ 32144-2013 «Нормы ка-

чества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения». Зависимости рассчитаны для ряда значений напряжения на вторичной обмотке повышающего трансформатора.

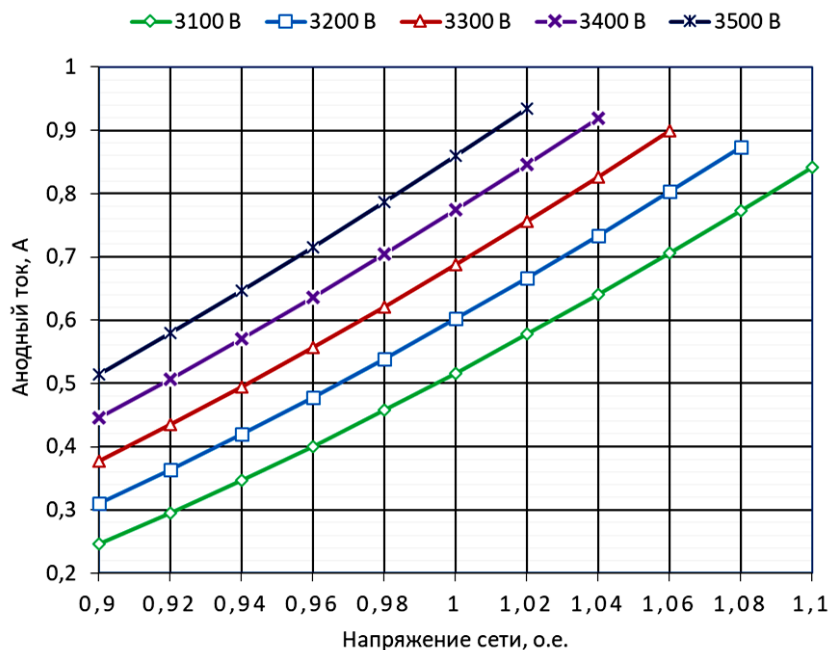


Рис. 7. Зависимость среднего значения анодного тока магнетрона от напряжения сети

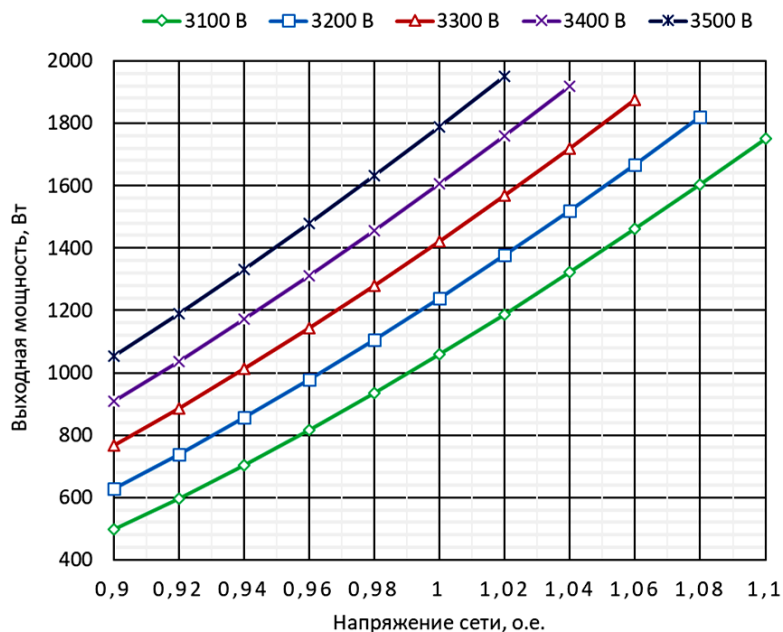


Рис. 8. Зависимость выходной мощности СВЧ-генератора от напряжения сети

Графики показывают, что режим работы магнетрона очень сильно зависит от величины сетевого напряжения. Отклонения сетевого напряжения даже в пределах $\pm 10\%$ от номинального значения могут привести либо к аварийной ситуации из-за перегрузки магнетрона, либо к существенному уменьшению его выходной мощности. Поэтому система электропитания магнетрона должна быть оснащена стабилизатором напряжения. Возможный вариант решения проблемы предполагает использование тиристорного регулятора напряжения с импульсно-фазовой системой управления [7].

Для проектирования СВЧ электротехнологической установки необходимо знать технические требования, которые предъявляются к элементам системы электропитания. Ответственными элементами системы электропитания (рис. 2) являются высоковольтные трансформатор и выпрямитель.

Осциллограммы на рис. 4 и 5 показывают, что токи обмоток имеют несинусоидальную форму, что должно быть учтено при разработке трансформатора. Модель на рис. 3 позволяет не только рассчитать действующие значения токов, но и определить их гармонический состав с помощью встроенного инструмента FFT (быстрое преобразование Фурье). Проведенные рас-

четы показали, что суммарный коэффициент гармонических составляющих токов в обмотках высоковольтного трансформатора составляет около 30 % и может варьироваться в ту или иную сторону в зависимости от величины сетевого напряжения. При этом наибольший вклад в искажение формы кривых вносит третья гармоника. Это обстоятельство необходимо учитывать при разработке трансформатора и выборе коммутационной аппаратуры.

Для выбора диодов высоковольтного выпрямителя необходимо учитывать, что через них протекают импульсные токи. Амплитуда этих токов превышает средние значения больше, чем в π раз. Возьмем, например, расчетную точку, в которой среднее и амплитудное значения анодного тока составляют 0,7 и 1,7 А соответственно. Среднее значение тока, протекающего через диод, будет равно половине от среднего значения анодного тока, т.е. 0,35 А. В результате отношение амплитуды тока диода к его среднему значению составляет 4,85. Таким образом, по среднему значению тока диоды выбирать нельзя.

Максимальное напряжение на закрытом диоде равно амплитуде напряжения на вторичной обмотке трансформатора. При этом надо учитывать тот момент, что даже со-

гласно действующему стандарту на качество электрической энергии допускается превышение сетевого напряжения на 10 % относительно номинального значения. Например, при напряжении 3300 В на вто-

ричной обмотке трансформатора возможная величина напряжения на закрытом диоде составит 5118 В. Для надежной работы системы электропитания диоды необходимо выбрать на напряжение порядка 7000 В.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Okress E.** Microwave Power Engineering / E. Okress // Vol. 1. New York: Acad. Press, 1968.

2. Промышленное применение СВЧ-нагрева / О. Морозов, А. Каргин, Г. Савенко, В. Требух, И. Воробьев // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. 2010. № 3. С. 2-6.

3. Novel foodstuff conveyor belts compound for energy saving: the effect of microwave pre-heating and mixed fillerson mechanical properties / S. Limhengha, S. Limnararat, I. Jangchud, W. Sriseubsai // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2017. Vol. 12. № 4. P. 1105-1110.

4. Massalfa Microwave [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.massalfa.org/factory-22110-microwave-dryer>.

5. TOSHIBA Industrial Magnetron 2M164. [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.hokuto.co.jp/eng/products/ind_magnetron/pdf/2M164_E.pdf.

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

7. **Артюхов И.И.** Имитационная модель регулируемого источника анодного напряжения для пакетированного магнетрона промышленного назначения / И.И. Артюхов, А.И. Земцов, Е.С. Гордеев // Вопросы электротехнологии. 2016. № 4 (13). С. 33-38.

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

Земцов Артем Иванович – кандидат технических наук, заведующий кафедрой «Электроснабжение промышленных предприятий» филиала Самарского государственного технического университета в г. Сызрани

Пыльская Елена Константиновна – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Электроэнергетика и электротехника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Процветов Дмитрий Евгеньевич – студент направления «Электроэнергетика и электротехника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

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

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

Elena K. Pylskaya – Ph.D., Associate Professor, Department of Power Engineering and Electrical Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Dmitry E. Protsvetov – Undergraduate, Department of Power Engineering and Electrical Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 20.10.20, принята к опубликованию 14.12.20

**ЛУЧШИЕ ДОКЛАДЫ
ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ «ЭЛЭТ-2020:
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА»**

СГТУ имени Гагарина Ю.А., 22-23 декабря 2020 г., г. Саратов

УДК 621.316.1.05

**АВТОНОМНОЕ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ
ДЕТСКОГО СПОРТИВНОГО ЛАГЕРЯ**

Д.А. Сарапулов, В.В. Коваленко

**SELF-CONTAINED ENERGY SUPPLY SYSTEM
IN THE CHILDREN'S HEALTH CAMP**

D.A. Sarapulov, V.V. Kovalenko

Проведен анализ применения различных автономных источников питания для детского спортивного лагеря. Предложен вариант гибридной системы электроснабжения.

Ключевые слова: автономное электроснабжение, возобновляемые источники энергии, ветровая электростанция, солнечная электростанция, дизельная электростанция

Энергетика является базовой отраслью промышленности любого государства. Именно состояние энергетической отрасли во многом определяет экономическое развитие страны. В то же время энергетика является одним из главных источников неблагоприятного воздействия на окружающую среду и человека. Значительная часть современной энергетики обеспечивается потреблением энергии, освобождающейся при сжигании органического ископаемого топлива. Это приводит к потреблению кислорода и выбросу в атмосферу токсичных газов. Приоритетное направление энергетики – создание новых эффективных, экологически чистых техно-

The article presents the analysis relating the use of various self-contained power sources in the children's health camp. The proposed type deals with a hybrid power supply system.

Keywords: self-contained power supply, renewable energy sources, wind power plant, solar power plant, diesel power plant

логий получения электрической энергии, основанных на возобновляемой энергетике. Возобновляемая энергетика также способна внести значительный вклад в решение проблемы энергообеспечения децентрализованных районов и районов, с частыми перебоями в электроснабжении. Наиболее перспективными вариантами построения автономных систем являются способы с участием ветровых, солнечных электростанций и их интеграция в дизельную систему электроснабжения.

Гелиоэнергетический потенциал

Одной из самых важных характеристик для гелиоэнергетики является продолжи-

тельность солнечного сияния. На северо-западе Саратовской области средняя продолжительность составляет 2100-2200 часов в год. Наибольшее число часов с солнечным сиянием отмечается в июне-июле, что и приходится на время максимального использования электроэнергии объектом. Зимой в связи с короткими днями, небольшой высотой солнца над горизонтом и увеличением облачности продолжительность солнечного сияния невелика – 30-80 часов в месяц. Наибольшая продолжительность солнечного сияния в июле – до 350 часов в месяц. В апреле и сентябре – около 220-230 часов. При реальных условиях облачности приход прямой радиации в теплый период года колеблется в пределах 600-700 кВт·ч/м². При этом наибольшее количество тепла поступает в июне – около 210 кВт·ч/м². Средний за год приход прямой солнечной радиации на горизонтальную поверхность составляет около 1400 кВт·ч/м². Для оценки запасов потенциальной солнечной энергии в исследуемой местности воспользуемся формулой

$$A(n) = N \cdot S, \quad (1)$$

где N – годовой поток солнечной энергии на горизонтальную площадь 1 м², кВт·ч/м²; S – площадь исследуемой местности, м². Примем, что N составит около 1200 кВт·ч/м². Площадь территории рассматриваемого лагеря составляет 57600 м². Получим $A(n) \approx 69,12 \cdot 10^6$ кВт·ч/год.

Вышеприведенная оценка является верхним предельным уровнем солнечной энергии, который не может быть полностью утилизирован. В реальных условиях приходится учитывать коэффициент полезного действия солнечных батарей и занятую ими ограниченную площадь.

Максимально возможная площадь, занимаемая солнечными батареями, составит ≈ 2400 м², среднее значение КПД для солнечных панелей примем 15 %. Следовательно, примерный потенциал солнечной энергии для данной территории будет равен 432 МВт·ч в год.

Ветроэнергетический потенциал

Ветер характеризуется скоростью, являющейся случайной переменной в пространстве и времени. Поэтому на современном уровне исследований энергетические характеристики ветра представляются вероятностным описанием случайного процесса изменения ветроэнергетического потенциала.

Данные наблюдений представлены в электронной базе «Сервер погода России», которая представляет собой ежедневные результаты измерений на конкретной метеостанции. Для ближайшей метеостанции к объекту среднегодовая скорость ветра составляет 3,7 м/с. Причем в зимнее время – 4,1 м/с, в летнее – 3,3 м/с.

Средняя скорость ветра служит ориентировочным показателем, характеризующим возможность применения ветроэлектростанций в данной местности. Критерием служит значение скорости ветра, при котором современные ветроустановки начинают вращаться и развивают свою номинальную мощность.

Известно, что скорость ветра по мере удаления от подстилающей поверхности возрастает и воздушный поток становится более устойчивым.

Скорость ветра на высоте 12 м – 3,9 м/с; 15 м – 4,1 м/с; 20 м – 4,4 м/с; 40 м – 5,1 м/с.

Таким образом, рассмотрев основные характеристики ветра, можно сделать вывод, что при данной скорости ветра экономически выгодно эксплуатировать ВЭУ малой мощности на высоте до 15 м и ВЭУ средней мощности – на высоте более 15 м. В среднем у ВЭУ малой и средней мощности высота мачты составляет от 8 до 15 м, поэтому необходимо предусмотреть установку ВЭУ на возвышенности; поскольку естественных возвышений нет, будем использовать искусственные.

Теоретический ветроэнергетический потенциал оценивается с помощью формулы

$$P = 0,95 \rho_{cp} (V_{cp})^3, \quad (2)$$

где ρ_{cp} – средняя плотность воздуха, кг/м³; V_{cp} – средняя скорость ветра для определенной высоты, м/с.

Для ВЭУ малой мощности ветроэнергетический потенциал составит $\approx 67 \text{ Вт/м}^2$; для ВЭУ средней мощности $\approx 100 \text{ Вт/м}^2$.

Выбор электрооборудования ветроэлектростанции

Выбор оборудования ВЭС определяется ветроэнергетическим потенциалом местности и предполагаемым объемом производимой электроэнергии.

Связь электрической мощности, развиваемой ветрогенератором, со скоростью ветра устанавливается соотношением

$$P_{эл} = \xi 0,5\pi R^2 \rho V_{cp}^3 \eta, \quad (3)$$

где ξ – коэффициент использования энергии ветра (для быстроходных ветротурбин в номинальном режиме достигает своего максимума $= 0,4-0,5$); R – радиус ротора ветротурбины; V_{cp} – среднегодовая скорость ветра; η – КПД электромеханического преобразователя энергии ($= 0,7-0,9$).

Ориентируясь на предполагаемое количество генерируемой энергии и на среднегодовую скорость ветра можно из предла-

гаемых на рынке ветрогенераторов выбрать предварительно подходящие варианты.

При выборе исходим из того, что нагрузка с июня по август достигает $\approx 200 \text{ кВт}\cdot\text{ч/сут.}$, в остальные месяцы $\approx 60 \text{ кВт}\cdot\text{ч/сут.}$ Анализируя предыдущую формулу, приходим к выводу, что необходимо устанавливать ветрогенератор с максимально возможным радиусом ротора ветротурбины.

Первый вариант системы электрообеспечения с использованием ВЭУ

Рассмотрим ветрогенератор типа Condor Air 60, который разработан для эксплуатации в регионах со средним и слабым ветром. Старт ветрогенератора осуществляется при скорости ветра от $2,5 \text{ м/с}$. Диаметр ветроколеса составляет $17,5 \text{ м}$. Номинальная мощность 60 кВт . Рабочая скорость ветра $3-20 \text{ м/с}$. Коэффициент использования энергии ветра $0,42$. Высота мачты 18 м .

Определим энергию ветрогенератора по формуле (3) для каждого месяца.

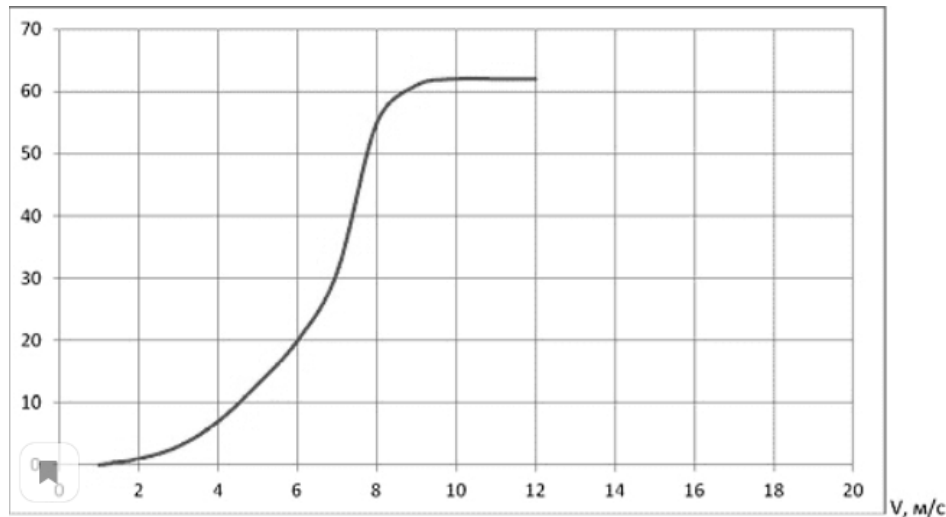


Рис. 1. Зависимость мощности ветрогенератора от скорости ветра

Таблица 1 – Энергия, вырабатываемая ВЭУ, и требуемая энергия

Месяц	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Энергия ВЭУ, кВт·ч	3960	3384	3168	4536	2520	1728	1944	1944	1944	2664	2520	3384
Требуемая энергия, кВт·ч	1800	1800	1800	1800	1800	6000	6000	6000	1800	1800	1800	1800

По данным таблицы можно сделать вывод, что в летнее время мощность ветрогенератора покрывает лишь треть нагрузки, в остальные месяцы – наоборот, вырабатываемая мощность слишком велика. Необходимо создание ветродизельной системы электроснабжения для покрытия нагрузки дизель-генератором в летнее время.

Выбор оборудования ДЭС

По данным графика покрытия нагрузки ветрогенератором, делаем вывод, что минимальная мощность, выдаваемая ДЭС должна быть не менее 7,5 кВт (загрузка дизель-генератора должна быть не более 80% от номинальной).

Из представленных на рынке ДЭС больше всего подходит ДЭС марки Euro Power EPS113TDE с номинальными параметрами: номинальная мощность – 8 кВт, емкость топливного бака – 25 л, расход топлива – 2,5 л/ч.

Зная удельное потребление дизеля и объем произведенной электроэнергии, можно определить количество израсходованного топлива за период времени:

$$Q_m = G_1 W, \quad (4)$$

где G_1 – фактический расход топлива (для большинства двигателей мощностью десятки-сотни кВт – 230-250 г/кВт·ч), W – энергия, произведенная за месяц, кВт·ч.

$Q_m = 1335$ л – июнь; $Q_m = 1267$ л – июль; $Q_m = 1267$ л – август.

Расчет примерных затрат

В стоимость ВЭУ уже входит стоимость электрогенератора, мачты, ветроколеса, системы контроля напряжения, инвертор, аккумуляторная батарея. Полная стоимость указана на сайте производителя и составляет 3150000 руб. К капитальным затратам также следует отнести стоимость строительных работ.

Стоимость строительных работ можно рассчитать по приближенной формуле

$$K_{cmp} = \kappa_p \cdot K_{уст}, \quad (5)$$

где κ_p – коэффициент затрат на установку станции, принимаем = 0,04; $K_{уст}$ – стоимость установки;

$$K_{cmp} = 0,04 \cdot 3150000 \text{ руб.} = 126000 \text{ руб.}$$

Стоимость ДЭС также указана на сайте производителя и равна 740000 руб. Стоимость топлива в год составит 185712 руб. (при цене дизельного топлива 48 руб. за литр на декабрь 2020 года).

Таким образом, полная примерная стоимость составит 4201712 руб.

Второй вариант электроснабжения с использованием ВЭУ

Примем к установке ветрогенератор меньшей мощности, но той же марки – Condor Air 20. Диаметр ветроколеса составляет 11,5 м. Номинальная мощность 20 кВт. Рабочая скорость ветра 3-20 м/с. Коэффициент использования энергии ветра 0,42. Высота мачты 18 м. Аналогично составим таблицу мощностей.

Таблица 2 – Энергия, вырабатываемая ВЭУ, и требуемая энергия

Месяц	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Энергия ВЭУ, кВт·ч	2100	1800	1700	2300	1300	1000	1100	1100	1100	1400	1300	1800
Требуемая энергия, кВт·ч	1800	1800	1800	1800	1800	6000	6000	6000	1800	1800	1800	1800

Мощность дизель-генератора должна быть не менее 9 кВт. Принимаем к установке Euro Power EPS113TDE с номинальными параметрами: номинальная мощ-

ность – 9,6 кВт, емкость топливного бака – 25 л, расход топлива – 3,3 л/ч.

Расчет примерных затрат ведем также, как и для предыдущего варианта.

Стоимость ВЭУ – 1155000 руб.; стоимость строительных работ – 46200 руб.; стоимость ДЭС – 800000 руб.; стоимость топлива – 279312 руб.

Итого: 2280512 руб.

Второй вариант реализуется гораздо дешевле, чем первый. Связано это, во-первых, с тем, что кривые зависимости мощности от скорости ветра для ВЭУ разных мощностей на малых значениях ветра почти одинаковы, а стоимость ВЭУ значительно увеличивается с ростом ее номинальной мощности. Дальше уменьшать номинальную мощность ВЭУ невозможно, поскольку высота мачты также уменьшается, и, соответственно, уменьшает-

ся скорость ветра по логарифмическому закону. Это приведет к абсолютной неэффективности ВЭУ. Отказ от ВЭУ и установка только ДЭС также неэффективны, поскольку в таком случае необходимы как минимум два дизель-генератора (обычное время работы ДЭС без остановки составляет от 8 до 12 часов).

Выбор электрооборудования солнечной электростанции

Принимая КПД солнечного модуля 15 %, рассчитаем суммарную вырабатываемую электроэнергию за каждый месяц с одного квадратного метра.

Таблица 3 – Энергия, вырабатываемая солнечными модулями с 1 м²

Месяц	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Е, кВт·ч/м ²	9,84	15,35	21,22	25,45	31,47	32,89	32,33	28,41	21,78	15,2	9,89	8

К использованию примем панели мощностью 250 Вт, которые чаще всего используются для средних и больших систем, поскольку они наиболее оптимальны с точки зрения монтажа. Площадь такой панели составляет 1,63 м². Зная площадь одной панели и необходимую энергию в конкретный месяц, можно определить необходимую площадь панелей и, соответственно, количество панелей. Исходим из наихудших условий и рассчитаем количество панелей, чтобы полностью покрыть нагрузки только за счет СЭС. Из исходных данных получаем, что число солнечных панелей составит 130 шт. Расчетную мощность СЭС опреде-

лим по формуле

$$P_{\text{уст}} = P_{\text{ед}} \cdot n = 250 \text{ Вт} \cdot 130 \text{ шт.} = 32,5 \text{ кВт.}$$

Первый вариант электроснабжения с использованием СЭС

К установке принимаем уже готовую солнечную электростанцию фирмы Real Solar типа SOFAR 50 кВт. Данная промышленная солнечная электростанция предназначена для генерации электроэнергии в сеть 380 В, может полностью замещать электропотребление из внешней сети. В комплект входит трехфазный световой солнечный инвертор Sofar 50000 TL, 200 солнечных батарей Delta SM 250, УЗИП переменного тока, УЗИП постоянного тока, а также необходимая коммутационная аппаратура и крепежные элементы.

Таблица 4 – Энергия, вырабатываемая СЭС, и требуемая энергия

Месяц	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Энергия СЭС, кВт·ч	3207	5004	6917	8297	10259	10722	10540	9262	7100	4955	3224	2608
Требуемая энергия, кВт·ч	1800	1800	1800	1800	1800	6000	6000	6000	1800	1800	1800	1800

По таблице можно сделать вывод, что энергия, вырабатываемая данной солнечной электростанцией, полностью покрывает затраты энергии объектом, но ее значения слишком велики, в них нет необходимости.

Второй вариант электроснабжения с использованием СЭС

Установим СЭС той же компании, но меньшей мощности, а именно SOFAR 30 кВт, в комплект которой входят 120 солнечных панелей Delta SM 250, а

также вся необходимая комплектация. Определим вырабатываемую энергию СЭС и сравним ее с требуемой.

Необходимо покрыть недостатки энергии за два месяца: август и декабрь. Решим эту проблему установкой дизель-генератора. Достаточно принять мощность ДЭС до 2 кВт. Выберем дизель-генератор ТСС 100018 номинальной мощностью 1,9 кВт. Расход топлива 2,5 л/ч. Количество топлива, израсходованного за август, – 728 л; за декабрь – 387 л.

Таблица 5 – Энергия, вырабатываемая СЭС, и требуемая энергия

Месяц	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Энергия СЭС, кВт·ч	1925	3002	4151	4978	6156	6433	6324	5557	4260	2973	1934	1565
Требуемая энергия, кВт·ч	1800	1800	1800	1800	1800	6000	6000	6000	1800	1800	1800	1800

Примерные затраты

Стоимость полного комплекта СЭС – 1349150 руб.;

Затраты на обслуживание и ремонт СЭС – 202372 руб.;

Стоимость дизель-генератора – 77000 руб.;

Затраты на топливо для ДЭС – 53520 руб.;

Общие затраты – 1682082 руб.

Третий вариант электроснабжения с использованием СЭС

Принимаем СЭС SOFAR 15 кВт с количеством солнечных панелей 60 шт.

Таблица 6 – Энергия, вырабатываемая СЭС, и требуемая энергия

Месяц	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Энергия СЭС, кВт·ч	963	1501	2076	2489	3078	3217	3162	2779	2130	1487	967	783
Требуемая энергия, кВт·ч	1800	1800	1800	1800	1800	6000	6000	6000	1800	1800	1800	1800

Устанавливаем ДЭС типа Hyundai DHY 8500SE-T с номинальной мощностью 6,5 кВт. Расход топлива – 2,7 л/ч. По методике, изложенной выше, определим израсходованное топливо за год – 5043 л. Затраты определяем аналогично предыдущим пунктам – 1041171 руб.

Дальнейшее снижение мощности СЭС и увеличение мощности ДЭС экономически невыгодны, поскольку в таком случае, дизель-генератор попадает в категорию промышленных, где их цена резко

возрастает, также увеличивается расход топлива.

Заключение

Произведя предварительный анализ возможных вариантов автономного электроснабжения объекта как по экономическим, так и по территориальным факторам, можно прийти к выводу, что наиболее оптимальным вариантом будет создание гибридной системы электроснабжения с совместной солнечно-дизельной генерацией.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лукутин Б.В. Возобновляемые источники электроэнергии: учеб. пособие / Б.В. Лукутин. Томск: Изд-во Том. политехн. ун-та, 2008. 187 с.

2. Лукутин Б.В. Децентрализованные

системы электроснабжения с ветровыми и солнечными электростанциями: учеб. пособие / Б.В. Лукутин, И.О. Муравлев, И.А. Плотников. Томск: Изд-во Том. политехн. ун-та, 2015. 100 с.

Сарапулов Дмитрий Александрович – студент 4 курса кафедры «Электроэнергетика и электротехника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Коваленко Василина Васильевна – доцент кафедры «Электроэнергетика и электротехника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Dmitriy A. Sarapulov – Undergraduate, Department of Power Engineering and Electrical Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

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

Статья поступила в редакцию 11.10.20, принята к опубликованию 14.12.20

УДК 681.171.5

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ

А.В. Левушкин, И.А. Менщиков

IMPROVING RELAY PROTECTION OF POWER TRANSFORMERS APPLIED IN THE POWER GENERATING INDUSTRY

A.V. Levushkin, I.A. Menshchikov

Представлены результаты исследования в области совершенствования релейной защиты силовых трансформаторов в электроэнергетике. Технический результат достигается тем, что решение задачи автоматизации контроля технического состояния обмоток силовых трансформаторов удобно выполнять с помощью микропроцессорных релейных защит и устройств автоматики. Это позволяет обходиться малыми выборками и обеспечивать высокую надежность распознавания технического состояния силовых трансформаторов.

Ключевые слова: релейная защита, электроэнергетика, силовые трансформаторы

Среди оборудования электрических сетей одними из наиболее сложных и многофункциональных устройств являются устройства релейной защиты (РЗ).

Основным назначением РЗ является выявление места возникновения короткого замыкания и быстрое автоматическое отключение выключателей поврежденного оборудования или участка сети от остальной неповрежденной части электрической установки или сети. Это необходимо для минимизации ущерба оборудованию сети от действия токов короткого замыкания, предотвращения дальнейшего его выхода из строя и развития аварии, а также восстановления нормальной работы неповрежденного оборудования.

Дополнительным назначением РЗ и автоматики является выявление нарушений

The results of research into improving relay protection of power transformers applied in electric power industry are presented. The technical improvements can be achieved by solving the problems related with automation of condition monitoring of power transformer windings, which can be more effective using microprocessor relay protection and automation devices. This can provide a possibility to deal with a small sample inspection and ensure high reliability in identifying technical conditions of power transformers.

Keywords: relay protection, electric power industry, power transformers

нормальных режимов работы оборудования, которые могут привести к аварии, и подача предупредительных сигналов обслуживающему персоналу, или отключение оборудования с выдержкой времени [1]. К аномальным режимам работы относятся: перегрузка, замыкание на землю одной фазы в сети с изолированной нейтралью, выделение газа в результате разложения масла в трансформаторе или понижение уровня масла в его расширителе, отклонение значений частоты и напряжения в сети от номинальных и др. [2].

Одними из наиболее важных и дорогостоящих элементов на электрических станциях и подстанциях являются силовые трансформаторы, от стабильной работы которых зависят функционирование всего объекта и надежное электроснабжение по-

требителей. В данной работе рассматривается способ совершенствования РЗ силовых трансформаторов с помощью внедрения наиболее совершенных и многофункциональных среди современных устройств РЗ, построенных на принципах микропроцессорной электроники.

Под устройством релейной защиты подразумевается совокупность реле, приборов и вспомогательных элементов, которые при возникновении повреждений и ненормальных режимов работы оборудования должны действовать на его отключение или на сигнал [3].

По назначению устройства релейной защиты и автоматики (РЗА) электрических сетей делятся собственно на устройства автоматики и устройства РЗ. К устройствам автоматики относятся: сетевая автоматика, противоаварийная автоматика, режимная автоматика, регистрация аварийных событий и процессов, технологическая автоматика объектов электроэнергетики.

Устройства РЗ, к которым относится и РЗ силовых трансформаторов, рассматриваемая в данной работе, классифицируются на:

- основные защиты ЛЭП и оборудования;
- резервные защиты ЛЭП и оборудования;
- устройство резервирования отказа выключателей (УРОВ) [4].

Для силовых трансформаторов основные защиты защищают трансформатор от внутренних повреждений и ненормальных режимов в самом трансформаторе или на его ошиновках. Резервные защиты защищают обмотки трансформатора от сверхтоков внешних коротких замыканий при повреждениях на присоединениях прилегающей сети, а также по возможности резервируют основные защиты трансформатора.

По элементной базе РЗ может быть:

- электромеханическая РЗ, принцип действия которой основан на притяжении стальной подвижной системы к электромагниту при прохождении тока по его обмотке. Реле такой защиты имеют электромагнитный, индукционный и магнитоэлектрический принцип работы.

На рис. 1 представлена электромеханическая релейная защита;



Рис. 1. Электромеханическая релейная защита

– полупроводниковая микроэлектронная РЗ, изготавливаемая из отдельных диодов, транзисторов и вспомогательных деталей на интегральных микросхемах или так называемых статических реле;

– микропроцессорные (цифровые) устройства РЗА основаны на программированных цифровых устройствах, так называемые микропроцессорные системы, обрабатывающие вводимые в них данные и управляющие внешними устройствами. При использовании микропроцессоров алгоритм функционирования РЗ задается программой, хранящейся в памяти микропроцессора. Для изменения алгоритма достаточно изменить программу, не меняя элементы РЗ и связи между ними. Выполняемые таким образом РЗ называются программными, или микропроцессорными [5] (рис. 2).

По способу обеспечения селективности при внешних КЗ защиты относят к двум группам: защиты с относительной селективностью и защиты с абсолютной селективностью. В группу защит с относительной селективностью входят токовые, токовые направленные и дистанционные защиты. Кроме них, сюда можно отнести и защиты напряжения. Общим для всех этих защит является то, что время срабатывания защиты зависит от расстояния между местом ее включения и точкой КЗ. С увеличением расстояния увеличивается и время срабаты-

ния. Это, а также соответствующий выбор параметров срабатывания измерительных органов обеспечивают селективное действие защиты при внешних КЗ. Защиты с абсолютной селективностью основаны на сравнении однородных электрических величин (чаще всего тока) по концам защищаемого участка или в соответствующих ветвях параллельно соединенных элементов электрической установки, или же в нескольких элементах, присоединенных к общим шинам.



Рис. 2. Микропроцессорные (цифровые) устройства РЗА

В тематической литературе [1, 3, 5, 6] сформулированы четыре основных требования, предъявляемые к РЗ, это: селективность – действие защиты, обеспечивающее отключение только поврежденного элемента системы посредством его выключателей; быстродействие – способность работать с минимально допустимой выдержкой времени. Без выдержки времени могут работать только защиты, обладающие абсолютной селективностью; чувствительность – способность релейной защиты реагировать на минимальные короткие замыкания, что особенно важно для протяженных электрических сетей, где токи короткого замыкания в конце защищаемого участка соизмеримы с рабочими токами; надёжность – правильное и безотказное действие защиты на отключение выключателей оборудования при всех его повреждениях и нарушениях нормального режима работы, на дей-

ствия при которых она предназначена, и недействие в режимах, при которых её работа не предусматривается.

Некоторые авторы [2] выделяют ещё одно требование, предъявляемое к выбираемой к установке РЗ:

- минимальная стоимость – из нескольких вариантов реализации РЗ с одинаковой функциональностью выбирают наиболее экономически выгодный. Наиболее дорогостоящей является быстродействующая защита;

- структурно нормативно-техническую документацию (НТД) по организации и эксплуатации РЗА в электрических сетях Российской Федерации можно разделить на пять уровней соответственно значимости.

К основополагающим базовым НТД, регламентирующим устройства и эксплуатацию РЗ, относятся:

- раздел 3 Правил устройства электроустановок (ПУЭ) [7], конкретно РЗ посвящена глава 3.2;

- РД 153-34.0-04.418-98. Типовое положение о службах релейной защиты и электроавтоматики;

- концепция развития релейной защиты и автоматики электросетевого комплекса.

Это глобальные документы, призванные упорядочить и максимально настроить и организовать работу служб РЗА и выстроить взаимодействия с другими подразделениями в энергетике и определяющие базовые требования к составу и функциям устройств РЗА.

Ко второму уровню НТД можно отнести ГОСТы и НТД Министерства энергетики в области РЗА. Это нормативные документы, закрепляющие общий регламент взаимодействий и требований в области РЗА, а также Стандарты в области противоаварийной автоматики «Системного оператора». На третьем уровне располагаются общие организационные требования к техническому обслуживанию устройств РЗА:

- РД 153-34.3-35.613-00. Правила технического обслуживания устройств релейной защиты и электроавтоматики электрических сетей 0,4-35 кВ;

– РД 153-34.0-35.617-2001 Правила технического обслуживания устройств релейной защиты, электроавтоматики, дистанционного управления и сигнализации электростанций и подстанций 110-750 кВ;

Стандарты организации ПАО «Россети», регламентирующие деятельность служб РЗА, такие как:

– СТО 59012820.29.020.002-2012. Релейная защита и автоматика. Взаимодействие субъектов электроэнергетики, потребителей электрической энергии при создании (модернизации) и организации эксплуатации и др.;

– СТО 56947007-33.040.20.181-2014. Типовая инструкция по организации и производству работ в устройствах релейной защиты и электроавтоматики подстанций; а также требования к содержанию рабочих программ вывода в проверку (ввода в работу) устройств релейной защиты и автоматики на электросетевых объектах.

К четвертому уровню НТД относятся стандарты и требования по функциональному и конструктивному исполнению устройств и шкафов РЗА. Данные стандарты необходимы прежде всего для унификации и стандартизации технических решений по шкафам РЗА при проектировании и изготовлении, с учетом требований функциональности, эргономики при обслуживании, надежности типовых блоков и узлов, интеграции в АСУ, защиты информации.

К НТД последнего «полевого» уровня относятся методические указания по техническому обслуживанию устройств РЗА (по типам), вторичных цепей ТТ, ТН и тому подобные документы. Их насчитывается наибольшее количество, и они охватывают всё многообразие технических устройств, относящихся в службам РЗА электрических сетей.

На рис. 3 представлена регламентирующая нормативно-техническая документация.



Рис. 3. Регламентирующая нормативно-техническая документация

Можно выделить целый спектр аварийных ситуаций и ненормальных режимов работы, угрожающих силовым трансформаторам. Среди них, согласно [7]: многофазные замыкания в обмотках и на выводах; однофазные замыкания на землю в обмотке и на выводах, присоединенных

к сети с глухозаземленной нейтралью; межвитковые замыкания в обмотках; токи в обмотках, обусловленные внешними КЗ; токи в обмотках, обусловленные перегрузкой; понижение уровня масла; частичный пробой изоляции вводов 500 кВ; однофазные замыкания на землю в сетях 3-10 кВ

с изолированной нейтралью, если трансформатор питает сеть, в которой отключение однофазных замыканий на землю необходимо по требованиям безопасности.

Перечисленные состояния могут привести к повреждению, возгораниям, сокращают срок службы силовых трансформаторов, а также другого оборудования подстанции. Поэтому для быстрой ликвидации аварийных состояний и сигнализации о нарушении нормальных режимов работы в силовых трансформаторах применяется целый комплекс автоматических релейных защит, резервирующих друг друга. К ним относятся: газовая защита (ГЗ), устанавливаемая внутри бака силового трансформатора и устройства РПН, в том числе на струйных реле; дифференциальная токовая защита; токовая отсечка (ТО); максимальная токовая защита (МТЗ); направленные токовые защиты, среди них токовая направленная защита нулевой последовательности (ТНЗНП); дистанционная защита (ДЗ); защита от токов перегрузки.

Рассмотрим подробнее каждый из видов защит:

Дифференциальная токовая защита бывает продольной и поперечной, для защиты трансформаторов используется первый тип. Принцип действия основан на сравнении токов, протекающих через трансформаторы тока, установленные перед и после защищаемого силового трансформатора. Для подключения этого типа релейной защиты могут использоваться как трансформаторы тока, встроенные в силовой трансформатор, так и устанавливаемые отдельно, в этом случае в зону защиты входят также ближайшие шины. Благодаря особой схеме включения вторичных обмоток трансформаторов тока, на токовое реле подается разность их токов. В нормальном режиме эта разность незначительна и называется небалансом токов, который обусловлен неидентичностью любых двух трансформаторов тока и отличием сопротивлений их вторичных цепей. В случае короткого замыкания (КЗ) на трансформаторе, его выводах или шинах ток, текущий к трансформатору с одной из сторон

цепи, превышает вытекающий из противоположной, на токовом реле возникает скачок тока, и в зависимости от значения тока уставки реле срабатывает, подавая сигнал на отключение трансформатора, а также, возможно, на активацию системы пожаротушения.

Токовая отсечка является наиболее простым для понимания видом релейной защиты. Принцип действия основан на различиях значений тока уставки для токовых реле, защищающих различные по удаленности участки цепи. Так, при КЗ на самых отдаленных участках разветвленной распределительной сети величина тока КЗ будет ниже, чем при КЗ вблизи от источника. Поэтому для обеспечения селективности защиты уставки выбираются таким образом, чтобы первыми срабатывали реле, подающие сигнал на выключение самых отдаленных выключателей. Если же величина тока КЗ более существенна, отключаются более обширные и электрически близкие к источникам участки сети. Таким образом, «отсекаются» некоторые пороговые значения токов аварийных или ненормальных режимов.

Максимальная токовая защита по принципу действия схожа с ТО, только в данном виде релейной защиты селективность обеспечивается не за счет величины тока срабатывания, а за счет временной выдержки перед подачей сигнала на коммутационные аппараты. Для реализации временной выдержки в схему МТЗ вводятся специальные реле времени, которые отсчитывают время от срабатывания реле тока в результате превышения порогового значения тока в цепи до подачи сигнала управления на выключатель. Таким образом, при возникновении в цепи силового трансформатора токов КЗ срабатывают токовые реле сразу всех участков сети, но отключаются они последовательно, начиная с самого отдаленного, пока превышение тока не будет устранено.

Принцип действия **дистанционной защиты** основан на косвенном определении расстояния (дистанции) до участка сети, который нужно отключить, через величину то-

ка и напряжения в аварийном режиме. Как известно, короткое замыкание вызывает скачок тока и падение напряжения в цепи от источника до места КЗ. Благодаря устройству, называемому реле сопротивления, которое является частью дистанционной защиты, через значения напряжения и силы тока возможно определить сопротивление до места КЗ и сравнить его со значением уставки. Если сопротивление окажется ниже порогового значения, подается сигнал на выключение участка сети, соответствующего данному значению. Таким образом, данный вид релейной защиты тоже обеспечивает относительно селективность.

Токовая направленная защита нулевой последовательности по своей сути является МТЗ, реагирующей на ток нулевой последовательности в трехфазных сетях, который возникает в результате несимметричных КЗ. Реле тока здесь подсоединено к нулевому проводнику звезды трех трансформаторов тока, и при возникновении несимметричного режима возникающий ток нулевой последовательности на землю заставляет реле сработать. Другое название ТНЗНП – земляная защита (ЗЗ). Как и в любой другой направленной защите здесь помимо токового реле и реле времени присутствует реле мощности, которое помимо трансформатора тока присоединяется также и к трансформатору напряжения и отвечает за распознавание направления протекания мощности, обусловленной токами КЗ.

Защита от токов перегрузки. Согласно [8], на трансформаторах 40 кВА и более, подверженных перегрузкам, предусматривается максимальная токовая защита от токов перегрузки с действием на сигнал с выдержкой времени. Устанавливается на каждой части расщепленной обмотки. Продолжительность срабатывания такой защиты должна быть выбрана примерно на 30 % больше продолжительности пуска или самозапуска электродвигателей, получающих питание от защищаемого трансформатора, если эти процессы приводят к его перегрузке.

Отдельно стоит рассмотреть **газовую защиту** трансформаторов. Она основана на элементе, называемом газовое реле, которое

устанавливается в маслопроводе между баком и расширителем силового трансформатора. Принцип действия основан на явлении расширения трансформаторного масла и газообразования в нем при значительном повышении температуры масла. Такая ситуация может возникнуть в результате КЗ внутри трансформатора, в том числе и межвитковых. Образовавшиеся в результате теплового разложения масла газообразные продукты выталкиваются в камеру газового реле, в которой находятся два поплавковых элемента. Один из этих поплавков при достаточном заполнении реле газом замыкает контакты цепей управления защиты, а другой действует аналогично при критическом понижении уровня масла в реле. Также в состав газовой защиты может входить струйное реле, которое тоже устанавливается в рассечку маслопровода от расширителя к баку трансформатора и срабатывает при превышении скорости движения масла в нем. Струйное реле срабатывает при резком увеличении давления внутри бака трансформатора, вызываемом междофазными КЗ. А газовое реле, кроме этого, может реагировать на постепенное увеличение пузырьков газа в баке, аккумулируя их внутри своей камеры, что позволяет реагировать на межвитковые замыкания в обмотках. Для срабатывания газа в верхней части имеется специальный клапан.

Среди перечисленных к основным видам защит силовых трансформаторов относятся газовая и дифференциальная токовые защиты, они обладают абсолютной селективностью, то есть отключают или сигнализируют о аварийном режиме только на тех участках сети, на которых и происходит повреждение. Остальные виды защит являются резервными.

Повышение работоспособности рассмотренных защит возможно по направлению улучшения четырех основных свойств релейной защиты: селективности, надежности, быстродействия и чувствительности. Практически на существующих распределительных подстанциях совершенствование РЗ можно реализовать несколькими методами: замена устаревшего электромеханического

оборудования (в первую очередь самих реле тока, времени, мощности и др.) на микроэлектронное или даже микропроцессорное с более высокими характеристиками; применение более точного оборудования релейной защиты за счет использования источников оперативного тока (трансформаторов тока и трансформаторов напряжения) с более высоким классом точности; применение более качественных комплектующих и запасных частей для уже имеющегося оборудования.

Последний пункт связан с низкой надежностью и качеством изделий релейной защиты, в том числе электронных плат, производимых в Китайской республике, которые часто применяются на распределительных подстанциях ввиду более низкой стоимости по сравнению с европейскими аналогами. Возможно, ситуация изменится к лучшему с развитием импортозамещения в данной отрасли, освоением массового производства микропроцессорного оборудования в нашей стране и из отечественных электронных компонентов.

Рассматривая три перечисленных варианта улучшения характеристик РЗ, наиболее перспективным для реального практического внедрения считаем первый способ, основанный на замене электромеханического оборудования систем РЗ микропроцессорным.

Второй вариант труднореализуем на практике, так как измерительные трансформаторы тока в цепях релейной защиты должны работать с требуемой точностью измерений в аварийных режимах (при КЗ), когда ток в их первичной цепи на порядки превышает заявленный номинальный. Это налагает технические ограничения на создание трансформаторов тока для цепей релейной защиты с высоким классом точности, и массовое их внедрение становится невозможным по экономическим соображениям. Поэтому согласно нормативным документам токовая погрешность трансформаторов тока, применяемых в цепях релейной защиты, должна быть не более 10 %. Также для ТТ РЗ существуют два специальных класса точности 5Р и 10Р (погрешность 5 и 10 % соответственно), с ко-

торыми ТТ могут измерять большие значения токов КЗ не превышая погрешности.

Микропроцессорные устройства релейной защиты (МУРЗ) физически представляют собой несколько электронных плат и микросхем, связанных друг с другом и выполняющих функцию релейной защиты. В состав МУРЗ входят: аналого-цифровые преобразователи, с помощью которых значения величин тока и напряжения на вторичных обмотках измерительных трансформаторов тока и напряжения преобразуются в информационные сигналы, обрабатываемые микропроцессором; центральный процессор, производящий основные логические операции и вычисления; постоянное запоминающее устройство и оперативная память (ОЗУ); узлы аналоговых и цифровых входов; выходные электромагнитные реле; источник питания.

Конструктивно платы МУРЗ собраны вместе по модульной схеме, и в случае необходимости замены или ремонта одного из элементов заменяется весь модуль целиком. Это является одним из недостатков электронных релейных защит, особенно если учесть, что большинство компонентов не являются взаимозаменяемыми даже в МУРЗ одного производителя, и требуется заказывать поврежденный модуль и ждать доставки с завода-изготовителя. Кроме того, МУРЗ обладают низкой ремонтпригодностью, что связано с отсутствием в комплекте инструкций по ремонту и схем, описывающих внутреннюю работу модулей, а также с недостаточной квалификацией персонала распределительных подстанций, привыкшего работать с электромеханическими устройствами РЗ. Все это отрицательно сказывается на надежности электроснабжения потребителей и времени устранения возможных неисправностей.

К достоинствам же МУРЗ относятся: улучшенные основные показатели: быстродействие, чувствительность за счет применения микропроцессоров; принципиально более высокая надежность и ресурс работы по сравнению с электромеханическими реле, обусловленные намного меньшим числом движущихся реле и контактных соединений,

подверженных окислению; компактность; многофункциональность; снижение потребления по цепи оперативного тока.

Отдельно хотелось бы сказать о многофункциональности МУРЗ. Благодаря наличию постоянного запоминающего устройства МУРЗ могут регистрировать данные из вторичных обмоток измерительных трансформаторов и пересчитывать их в величины для первичной цепи. Помимо этого, в памяти сохраняются и многие другие данные: причина отключения, время и дата отключения, ток и длительность аварийной ситуации, векторная диаграмма напряжений и токов в линии в момент отключения и прочие.

Среди значимых уязвимостей можно упомянуть низкую электромагнитную совместимость микропроцессорных элементов по сравнению с электромеханическими, что особенно существенно может проявляться на подстанциях высокого и сверхвысокого напряжений.

Заключение

Актуальность проблемы совершенствования РЗ элементов электрических сетей и, в частности, силовых трансформаторов путём замены устаревших устройств РЗ на современные МУРЗ объясняется принципиальными преимуществами данных устройств перед устаревающими микроэлектронными и уже далеко устаревшими механическими системами РЗ. Проанализировав современный рынок терминалов РЗ, можно утверждать, что отечественные производители по качеству и функциональности продукции не уступают иностранным коллегам, а по адаптированности к российским электрическим сетям и стоимости продукции даже обходят зарубежные аналоги. В целом на рынке представлено широкое многообразие устройств РЗА различного назначения, данную отрасль можно назвать высококонкурентной.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Чернобровов Н.В.** Релейная защита энергетических систем / Н.В. Чернобровов. М.: Энергоатомиздат, 1998. 189 с.

2. **Тельманова Е.Д.** Автоматизация управления системами электроснабжения: электрон. учебник / Е.Д. Тельманова. Екатеринбург: Изд-во Рос. гос. проф.-пед. ун-та, 2009. 88 с.

3. **Шабад М.А.** Расчеты релейной защиты и автоматики распределительных сетей / М.А. Шабад; 4-е изд., испр. и доп. СПб.: ПЭИПК, 2010. 349 с.

4. ГОСТ Р 55438-2013. Единая энергетическая система и изолированно работающие энергосистемы. Оперативно-диспетчерское управление. Релейная защита и автоматика. Взаимодействие субъектов электроэнергетики и потребителей электрической энергии при создании (модернизации) и эксплуатации. Общие требования. Введ. 2014-04-01. М.: Стандартинформ, 2014. 29 с.

5. **Федоров В.А.** Библия релейной защиты и автоматики / В.А. Федоров. Новосибирск: Новосиб. ин-т повышения квалификации, 2004. 277 с.

6. **Андреев В.А.** Релейная защита и автоматика систем электроснабжения / В.А. Андреев. М.: Высш. шк., 2006. 639 с.

7. Правила устройства электроустановок: утверждены Министерством энергетики Российской Федерации: все действующие разделы шестого и седьмого изданий [по состоянию на 1 октября 2018 г.]. М.: Проспект, 2019. 831 с.

8. Руководящие указания по релейной защите. Защита понижающих трансформаторов и автотрансформаторов. М.: Энергоатомиздат, 2014. 125 с.

9. **Гуревич В.И.** Надежность микропроцессорных устройств релейной защиты: мифы и реальность / В.И. Гуревич // Вести в электроэнергетике. 2010. № 4. С. 29-37.

10. **Гуревич В.И.** Микропроцессорные реле защиты: альтернативный взгляд / В.И. Гуревич // Электроинфо. 2014. № 4 (30). С. 40-46.

11. **Гловацкий В.Г.** Современные средства релейной защиты и автоматики электросетей / В.Г. Гловацкий. М.: Энергомашвин, 2013. 256 с.

12. Методические указания по выбору характеристик и защиты электрооборудования с использованием микропроцессорных терминалов. М., 2013. 189 с.

13. Методика выбора уставок. Дифференциальная защита трансформатора [Электронный ресурс]. Режим доступа:

<http://www.ekra.ru> (дата обращения 11.12.2020).

14. Методические указания по выбору параметров срабатывания устройств РЗА подстанционного оборудования производства ООО НПП «ЭКРА» Издание официальное. ОАО «ФСК ЕЭС», 2012. 214 с.

Левушкин Александр Владимирович – студент 4 курса кафедры «Электроэнергетика и электротехника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Alexander V. Levushkin – Undergraduate, Department of Power Engineering and Electrical Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

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

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

Статья поступила в редакцию 11.10.20, принята к опубликованию 14.12.20

УДК 621.311

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НАКОПИТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ В КОМБИНИРОВАННЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ НА ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКАХ ЭНЕРГИИ

К.А. Бардакова, Т.Х. Айсина, А.Г. Сошинов

USING ENERGY STORAGE SYSTEMS IN COMBINED POWER PLANTS WITH RENEWABLE ENERGY SOURCES

K.A. Bardakova, T.Kh. Aisina, A.G. Soshinov

Одним из элементов автономных комбинированных энергетических установок на возобновляемых источниках энергии являются накопители энергии. В данной работе рассмотрена возможность использования литий-ионных аккумуляторов в качестве таких накопителей. В статье приведен сравнительный анализ энергетических и эксплуатационных характеристик, срока службы свинцово-кислотных и литий-ионных аккумуляторов.

Ключевые слова: автономные комбинированные энергетические установки, накопители энергии, свинцово-кислотные и литий-ионные аккумуляторы

В настоящее время в мире резко возрос интерес к применению накопителей энергии в электроэнергетических системах. В России также актуальны перспективы использования накопителей энергии в энергетических установках на возобновляемых источниках энергии (ВИЭ). Внедрение ВИЭ в систему энергообеспечения удалённых районов позволит существенно развить энергетическую инфраструктуру этих регионов страны за счет их универсальности и автономности. Это объясняется как тенденциями развития генерирующих мощностей, так и новыми технологиями производства некоторых типов накопителей энергии. Так, например, при регулировании электрических сетей можно отказаться от строительства крупных ГАЭС и заняться

One of the elements of autonomous combined power plants based on renewable energy sources are energy storage systems. This paper considers a possibility to use lithium-ion accumulators for the given power storage units. The article provides a comparative analysis of energy and operational characteristics, as well as service life of the lead-acid and lithium-ion accumulators.

Keywords: autonomous combined power plants, energy accumulators, lead-acid and lithium-ion accumulators

созданием распределенных сетей на аккумуляторных накопителях.

Применение накопителей энергии в энергетических системах, содержащих ВИЭ, позволяет: выравнять переменные графики работы, снизить колебания мощности, обеспечить требуемое количество электроэнергии, обеспечить бесперебойное электроснабжение потребителей.

По мнению авторов, для электроснабжения удалённых районов перспективно применение автономных комбинированных энергетических установок (АКЭУ) малой мощности на ВИЭ.

Автономная комбинированная энергетическая установка на ВИЭ с накопителем энергии это полностью интегрированная, саморегулирующаяся и самовосстанавли-

вающаяся электроэнергетическая система, имеющая сетевую топологию. Она включает все генерирующие источники, магистральные и распределительные сети, все виды потребителей электрической энергии, управляется единой сетью информационно-управляющих устройств в режиме реального времени [1].

Одним из элементов этих установок являются накопители энергии. В связи с прогрессом в области эксплуатационных характеристик химических аккумуляторов (в частности, литий-ионных), а также из-за снижения их стоимости в ближайшем будущем ожидается значительное расширение сферы экономически обоснованного применения этих накопителей энергии.

Для данного типа аккумуляторов характерны высокая энергоемкость, глубокие циклы заряда – разряда (70-80 %), отсутствие эффекта памяти. В то же время ресурс и стоимость таких аккумуляторов зависят от типа электрохимических систем, применяемых на катоде и аноде, а также от температуры и режимов эксплуатации.

В 2003 году в Массачусетском технологическом институте впервые было предложено использовать феррофосфат лития (LiFePO_4) в качестве катодного материала. Это химическое соединение доступно и нетоксично в отличие от кадмия и никеля, которые используются в аккумуляторах. Феррофосфат способен отдать практически весь накопленный литий, оставаясь устойчивым. При этом сохраняется главное свойство литий-ионных аккумуляторов – большая удельная емкость. Таким образом, эти литий-ионные аккумуляторы (ЛИА) стали безопасными, высокоэнергетическими и экологичными. Налажено производство этих аккумуляторов на запуске в декабре 2011 года заводе под Новосибирском.

Сравнительные характеристики свинцово-кислотных (СКА) и литий-ионных аккумуляторов [2] приведены в таблице.

Таким образом, исходя из приведенных сравнительных характеристик СКА и ЛИА, литий-ионные аккумуляторы имеют больший срок службы и удельную плотность

энергии, менее чувствительны к изменению температуры, имеют способность сохранять первоначальную емкость при повышенных токах разряда и не нуждаются в постоянном контроле основных параметров. Поэтому применение ЛИА в качестве накопителей автономной комбинированной энергетической установки (АКЭУ) с использованием ВИЭ весьма перспективно [3].

Характеристики аккумуляторов

Характеристики	Типы аккумуляторов	
	СКА	ЛИА
Рабочее напряжение, В	2	3,7
Удельная энергия, Вт·ч/кг	30	150
Цикл заряда/разряда	1000	2000-3000
Саморазряд (в месяц), %	2	4,1
Рабочая температура, °С	-5...+40	-30...+50

В [4] приведён расчет автономной комбинированной энергетической установки (АКЭУ) на ВИЭ с накопителем энергии.

Для расчета фактической мощности автономной комбинированной энергетической установки на ВИЭ с накопителем энергии составляют систему уравнений:

$$W_{AKЭУ} = W_{OЭ} + W_{AB}, \quad (1)$$

$$W_{AKЭУ} = P_{AKЭУ} \cdot T_{AKЭУ}, \quad (2)$$

$$W_{OЭ} = P_{OЭ} \cdot T_{AKЭУ}, \quad (3)$$

$$W_{AB} = P_{OЭ} \cdot (24 - T_{AKЭУ}), \quad (4)$$

где $W_{AKЭУ}$ – работа автономной комбинированной энергетической установки, кВт·ч/сут., $W_{OЭ}$ – энергия, потребляемая объектом, кВт·ч/сут., W_{AB} – энергия, переданная накопителю, кВт·ч/сут., $P_{AKЭУ}$ – фактическая мощность автономной комбинированной энергетической установки, кВт, $T_{AKЭУ}$ – время работы автономной комбинированной энергетической установки (принимается в расчетах равным от 8 до 16 часов в сутки), $P_{OЭ}$ – номинальная мощность объекта энергопотребления, кВт.

$$P_{AKЭУ} \cdot T_{AKЭУ} = P_{OЭ} \cdot T_{AKЭУ} + P_{OЭ} \cdot (24 - T_{AKЭУ}) = 24 \cdot P_{OЭ}, \quad (5)$$

$$P_{AKЭУ} = 24 \cdot P_{OЭ} / T_{AKЭУ}. \quad (6)$$

Таким образом, авторами проведен анализ практической перспективы использования накопителей энергии в АКЭУ на воз-

обновляемых источниках энергии (ВИЭ), приведена методика расчета фактической мощности автономной комбинированной энергетической установки на ВИЭ с накопителем энергии. В дальнейшем авторами планируется произвести расчет АКЭУ на возобновляемых источниках энергии (ВИЭ).

ЛИТЕРАТУРА

1. **Смоленцев Н.И.** Накопители энергии в локальных электрических сетях / Н.И. Смоленцев // Ползуновский вестник. 2013. № 4-2. С. 176-181.

2. **Divya K.C.** Battery energy storage technology for power systems – An overview / K.C. Divya, J. Ostergaard // Electric Power Systems Research. 2009. Vol. 79. P. 511-520. DOI.org/10.1016/j.epsr.2008.09.017.

3. **Фатыхов Р.Р.** Перспективы применения литий-ионных аккумуляторов в качестве резервных источников питания на электрических станциях / Р.Р. Фатыхов, С.М. Хантимеров, Н.М. Сулейманов // Вестник Казанского государственного

энергетического университета. 2017. № 4 (36). С. 45-53.

4. **Бессель В.В.** Экономико-математическое моделирование показателей инвестиционной привлекательности проекта создания автономной комбинированной энергетической установки на возобновляемых источниках энергии с накопителем энергии / В.В. Бессель [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.gubkin.ru/faculty/pipeline_network_design/chairs_and_departments/thermodynamics_and_thermal_engine/metodicheskie-materialy/ (дата обращения: 01.03.2020).

Бардакова Кристина Андреевна – студент Камышинского технологического института (филиала) Волгоградского государственного технического университета

Айсина Татьяна Харисовна – студент Камышинского технологического института (филиала) Волгоградского государственного технического университета

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

Kristina A. Bardakova – Undergraduate, Kamishin Technological Institute, (branch) Volgograd State Technical University

Tatyana Kh. Aisina – Undergraduate, Kamishin Technological Institute (branch) Volgograd State Technical University

Anatolii G. Soshinov – PhD, Associate Professor, Head: Department of Power Supply of Industrial Enterprises, Kamishin Technological Institute (branch) Volgograd State Technical University

Статья поступила в редакцию 15.11.20, принята к опубликованию 14.12.20

УДК 54.07

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СВЧ НЕТЕПЛОВОЙ МОДИФИКАЦИИ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА В КАМЕРЕ С БЕГУЩЕЙ ВОЛНОЙ

П.О. Трухин, С.Г. Калганова

MATHEMATICAL MODELING OF MICROWAVE NON-THERMAL MODIFICATION OF A COMPOSITE MATERIAL IN A TRAVELING WAVE CHAMBER

P.O. Trukhin, S.G. Kalganova

Предложена математическая модель для СВЧ нетепловой модификации композиционного материала на базе камеры с бегущей волной на частотах 433 и 915 МГц в программной среде COMSOL Multiphysics.

Ключевые слова: математическое моделирование, СВЧ нетепловая модификация, композиционный материал, камера с бегущей волной

Известно, что при СВЧ воздействии на эпоксидный базальтонаполненный композиционный материал в течение 11 с уровнем напряженности электрического поля электромагнитной волны в пределах от 102 до 170 В/см повышается прочность его до 40 % по сравнению с отверждением на воздухе. Построение математической модели, описывающей распределение СВЧ электромагнитной волны на частотах 433 и 915 МГц в программной среде COMSOL Multiphysics, представляет определенный научный интерес [1].

Величина мощности, задаваемая в возбуждающем порту, равна 50 кВт для частоты 433 МГц, 25 кВт – для частоты 915 МГц. Данные величины мощности были взяты с характеристик промышленных магнетронов.

В качестве диэлектрика используется эпоксидная смола холодного отверждения марки ЭД-20.

Для нахождения решения полей внутри области моделирования модуль радиоча-

A mathematical model is proposed for a microwave non-thermal modification of a composite material based on a traveling wave camera at the frequencies 433 and 915 MHz in the COMSOL Multiphysics software environment.

Keywords: mathematical modeling, microwave non-thermal modification, composite material, traveling wave chamber

стоты содержит полноволновую формулировку на основе волнового уравнения:

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

где μ_r – относительная магнитная проницаемость; ϵ_r – относительная диэлектрическая проницаемость; σ – электропроводность; ω – круговая частота; ϵ_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума; ∇ – дифференциальный оператор набла; k – волновое число.

На рис. 1 видны ассоциации, очевидно, что они связаны с отражением от диэлектрика. На рис. 2 видно, что наибольшему влиянию подвержены слои диэлектрика по ширине от 100 до 300 мм, т. е. ширина диэлектрика должна быть 200 мм.

На рис. 3 наибольшему влиянию подвержены слои диэлектрика по ширине от 30 до 170 мм, т. е. ширина диэлектрика должна быть 140 мм. По центру диэлектрика виден пик напряженности 250 В/см.

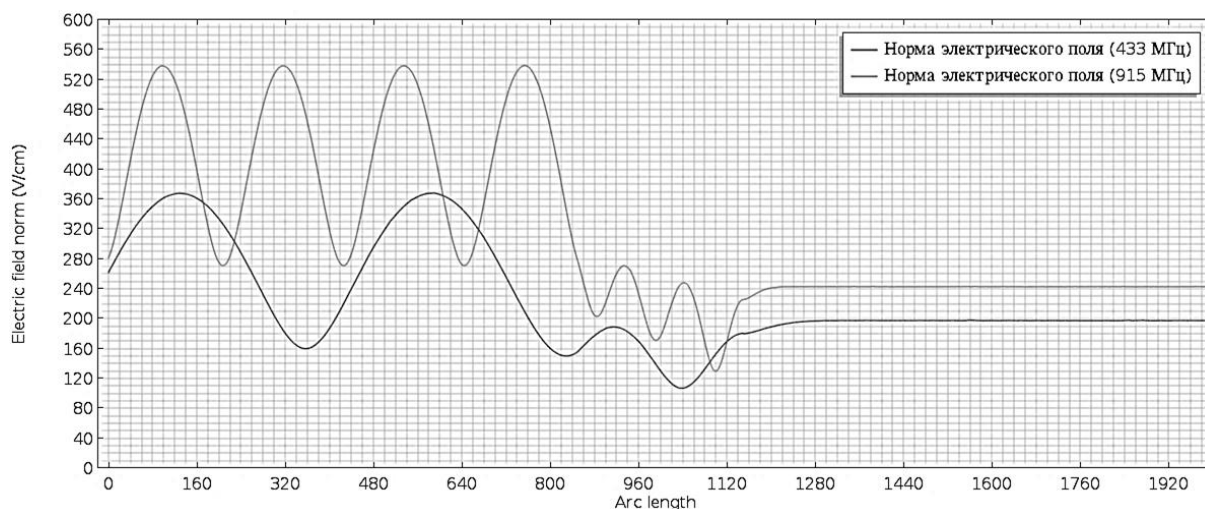


Рис. 1. Величины нормы электрического поля для частот 433 и 915 МГц в продольном сечении по центру волновода с диэлектриком

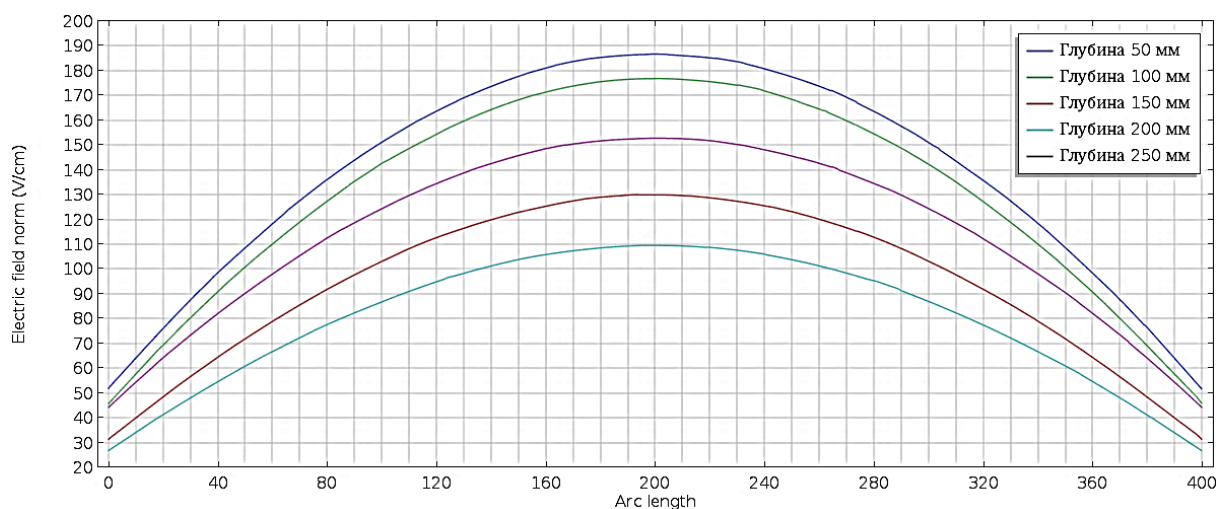


Рис. 2. Величины нормы электрического поля для частоты 433 МГц в поперечном сечении при различной глубине по центру толщины диэлектрика

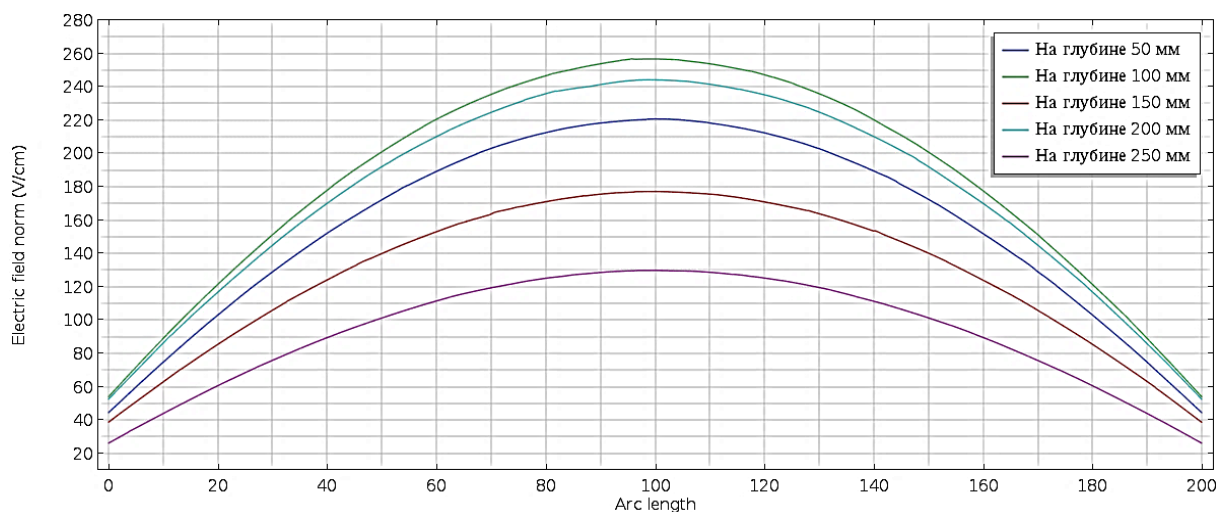


Рис. 3. Величины нормы электрического поля для частоты 915 МГц в поперечном сечении при различной глубине по центру толщины диэлектрика

В результате математического моделирования процесса СВЧ нетепловой модификации композиционного материала в камере бегущей волны на частотах 433 и 915 МГц с использованием метода конечных элементов можно сделать следующие выводы:

1. Равномерности распределения напряженности электрического поля на частоте 433 МГц и мощностью 50 кВт можно добиться путем добавления подвижного механизма для диэлектрика в волноводе. Максимальное значение напряженности в диэлектрике будет не более 190 В/см.

2. СВЧ нетепловая модификация на частоте 915 МГц и мощностью 25 кВт не подходит для обработки композитного материала в связи с большой напряженностью электрического поля электромагнитной волны – 260-180 В/см. Средняя напряженность в диэлектрике составляет ≈ 204 В/см. При данной напряженности электрического поля электромагнитной волны свойства композиционного материала на частоте 915 МГц не изучены.

3. В целом результаты математического моделирования соответствуют известным представлениям о процессах нетепловой модификации диэлектриков в поле СВЧ [2].

ЛИТЕРАТУРА

1. Влияние электромагнитного поля СВЧ на структуру полимеров / E. Vasinkina, S. Kalganova, V. Alekseev et al. // Journal of Physics: Conference Series. 2018. 1124 (7). статья № 071018, DOI: 10.1088/1742-6596/1124/7/071018.

2. Simulation of carbon fibre composites in an industrial microwave / B. Nuhji et al. // Materials Today: Proceedings. 2020 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.01.284>. 26.11.2020.

Трухин Павел Олегович – студент кафедры «Электроснабжение и электро-технология» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Pavel O. Trukhin – Undergraduate, Department of Power Supply and Electrical Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

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

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

Статья поступила в редакцию 11.11.20, принята к опубликованию 14.12.20

УДК 621.365.5; 678.8

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ МОДИФИКАЦИИ ОХРАНАПОЛНЕННЫХ ЭПОКСИДНЫХ ПОЛИМЕРОВ В СВЧ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ПОЛЕ

Ю.А. Кадыкова, А.С. Мостовой, И.Д. Чапов

INVESTIGATION INTO EFFECTIVE MODIFICATION OF OCHER/EPOXY POLYMERS IN THE MICROWAVE ELECTROMAGNETIC FIELD

Yu.A. Kadykova, A.S. Mostovoy, I.D. Chapov

В работе установлена целесообразность обработки охранаполненного эпоксидного компаунда в СВЧ электромагнитном поле. Установлено, что при обработке со скоростью 1,989 м/мин и мощностью 350 Вт по сравнению с необработанным в СВЧ магнитном поле полимером увеличиваются изгибающее напряжение, модуль упругости на изгибе, прочность при растяжении, модуль упругости на растяжении, ударная вязкость, снижается относительное удлинение при растяжении.

Ключевые слова: эпоксидная смола, модификация, охра, пластификатор, СВЧ электромагнитное поле, деформационно-прочностные свойства

Полимерные композиционные материалы на основе эпоксидных смол обладают рядом ценных характеристик, что позволяет использовать их в различных отраслях промышленности. Однако они имеют и недостатки, такие как повышенная хрупкость и легкая воспламеняемость. Улучшение свойств эпоксидных материалов достигается введением минеральных дисперсных наполнителей и пластификаторов-антипиренов [1-3]. Также в настоящее время для интенсификации процессов модификации полимерных материалов широко используются различные электрофизические методы, среди которых высокоэффективным методом является обработка полимеров сверхвысоко-частотным (СВЧ) электромагнитным полем

The article considers effectiveness of processing ochre/epoxy compounds in the microwave electromagnetic field. It has been found that processing at the speed of 1,989 m/min and the power of 350 W, if compared to the polymers untreated in the microwave magnetic field, results in an increase in the bending stress, transverse elasticity, tensile strength, tensile modulus, impact resilience, whereas tensile elongation decreases.

Keywords: epoxy resin, modification, ochre, plasticizer, microwave electromagnetic field, deformation and strength properties

(ЭМП), что может приводить к изменениям физико-механических и физико-химических свойств материала в результате теплового или нетеплового воздействия [4, 5].

Поэтому перспективно исследование влияния СВЧ ЭМП на свойства охранаполненной эпоксидной композиции, пластифицированной олиго(резорцин)дифенилфосфатом Fyrolflex (ОРДФФ).

Технологический процесс создания охранаполненного эпоксидного компаунда (ЭК) для изучения его свойств состоит из следующих основных этапов:

- смешивание эпоксидной смолы (ЭС) с пластификатором в соответствии с заданной рецептурой (100 масс. ч. ЭД-20 и 40 масс. ч. FF);

- введение охры в количестве 75 масс. ч.;
- обработка ультразвуком (продолжительность 1 час, частота обработки 22 кГц);
- обработка в СВЧ камере (мощность СВЧ установки от 200 до 500 Вт; скорость конвейерной ленты от 0,786 до 1,989 м/мин);
- введение отвердителя (15 масс. ч. ПЭПА), заливка компаунда в формы.

Первый и последний этапы относятся к созданию полимерной матрицы, состав которой был разработан ранее [3].

Для модификации эпоксидного компаунда применялась модульная конвейерная установка СВЧ воздействия с регулировкой уровня СВЧ мощности и продолжительности процесса [6].

Для определения мощности, поглощенной ЭК, использовались следующие формулы:

$$P_{\text{полг}} = P_{\text{исх}} - P_{\text{прои}}; \quad (1)$$

$$P_{\text{прои}} = G \cdot \Delta t \cdot 70, \quad (2)$$

где $P_{\text{полг}}$ – поглощенная мощность, Вт; $P_{\text{исх}}$ – исходная мощность СВЧ установки, Вт; $P_{\text{прои}}$ – мощность, не поглощенная ЭК, Вт; G – расход воды, л/мин; Δt – разность температуры воды на входе и выходе.

В результате проведенных исследований выявлено, что при исходной мощности в 300 Вт, но различной скорости обработки количество поглощенной мощности изменяется (табл. 1). При воздействии СВЧ электромагнитного поля со скоростью 1,989 м/мин. (табл. 2) наблюдается наибольшее изменение свойств охранополненного эпоксидного компаунда.

Таблица 1 – Зависимость поглощенной мощности от скорости обработки охранополненного эпоксидного компаунда в СВЧ электромагнитном поле

Скорость конвейерной ленты, м/мин	Поглощенная мощность $P_{\text{полг}}$, Вт	Поглощенная мощность $P_{\text{полг}}$, %
1,03	157	52
1,989	218	73
3,965	240	80

Таблица 2 – Свойства охранополненного эпоксидного компаунда при различной скорости обработки в СВЧ электромагнитном поле

Скорость конвейерной ленты, м/мин	$G_{\text{из}}$, МПа	$E_{\text{из}}$, МПа	$G_{\text{сж}}$, МПа	G_p , МПа	E_p , МПа	$a_{\text{уд}}$, кДж/м ²
1,03	100	4101	55	2039	3,2	7
1,989	132	3861	75	2674	3,8	12
3,965	110	3645	60	2147	3,4	9

Примечание: $G_{\text{из}}$ – разрушающее напряжение при изгибе; $E_{\text{из}}$ – модуль упругости при изгибе; $G_{\text{сж}}$ – разрушающее напряжение при сжатии; G_p – разрушающее напряжение при растяжении; E_p – модуль упругости при растяжении; $a_{\text{уд}}$ – ударная вязкость; коэффициент вариации по свойствам 3-5%

Таким образом, для дальнейшего изучения режима модификации охранаполненного эпоксидного компаунда в СВЧ электромагнитном поле была выбрана скорость обработки в 1,989 м/мин.

В дальнейших исследованиях определялась оптимальная мощность обработки охранаполненного эпоксидного компаун-

да в СВЧ электромагнитном поле. Установлено, что при увеличении мощности СВЧ установки количество поглощенной энергии также увеличивается (табл. 3). Результаты испытаний показали, что наилучшие показатели наблюдаются у образцов, обработанных при 300 Вт (табл. 4).

Таблица 3 – Изучение поглощенной мощности при модификации охранаполненного эпоксидного компаунда в СВЧ электромагнитном поле

Исходная мощность $P_{исх}$, Вт	Поглощенная мощность $P_{полг}$, Вт	Поглощенная мощность $P_{полг}$, %
200	122	61
250	183	73
300	218	73
350	282	80
400	330	82
500	432	86

Таблица 4 – Свойства охранаполненного эпоксидного компаунда в СВЧ электромагнитном поле при различном мощности СВЧ установки

Мощность СВЧ установки, Вт	$G_{из}$, МПа	$E_{из}$, МПа	G_p , МПа	E_p , МПа	ε , %	$a_{уд}$, кДж/м ²
Без обработки в СВЧ ЭМП	105	3500	58	2317	6,5	11
200	128	4438	63	2889	4,5	13
250	130	4892	59	3162	3,0	13
300	132	3861	75	2674	3,8	12
350	158	5193	75	3075	3,5	15
400	121	3685	58	2628	3,5	10
500	115	3470	45	2031	2,0	8

Примечание: $G_{из}$ – изгибающее напряжение; $E_{из}$ – модуль упругости при изгибе; G_p – прочность при растяжении; E_p – модуль упругости при растяжении; $a_{уд}$ – ударная вязкость; ε – относительное удлинение при растяжении; коэффициент вариации по свойствам 4-6%

Было установлено, что при обработке охраниоленного эпоксидного компаунда мощностью 350 Вт, по сравнению с необработанным композитом в СВЧ ЭМП, изгибающее напряжение увеличивается на 50%, модуль упругости на изгибе повышается на 48%, на 30% повышается прочность при растяжении, на 33% повышается модуль упругости на растяжении, относительное удлинение при растяжении уменьшается на 46%, ударная вязкость увеличивается на 36%.

Поскольку в процессе исследования влияния СВЧ ЭМП на свойства охраниоленного эпоксидного компаунда у всех образцов снималась температура до и после СВЧ обработки, можно говорить о том, что основное влияние на процесс модификации полимера оказывает тепловое воздействие СВЧ энергии [7]. Среднее изменение температуры образцов при скорости обработки 1,989 м/мин представлено в табл. 5.

Установлено, что при превышении порога мощности в 400 Вт разница температур образцов до и после обработки превышает допустимую, поскольку на мощности 400 и более Вт свойства охраниоленного эпоксидного компаунда начинают снижаться. Это связано с тем, что охра поляризуется в СВЧ ЭМП интенсивнее, чем эпоксидная смола, тем самым нагревается до более высоких температур и вызывает локальные перегревы внутри состава, тем са-

мым снижая его физико-механические свойства.

Таблица 5 – Изменение температуры образцов до и после СВЧ обработки

Мощность СВЧ установки, Вт	Δt , °C
250	90
300	98
350	110
400	125
500	140

Таким образом, для повышения физико-механических свойств охраниоленного эпоксидного компаунда в данной работе были выбраны оптимальные режимы его обработки СВЧ электромагнитным полем. При обработке со скоростью 1,989 м/мин и мощностью 350 Вт по сравнению с не обработанным в СВЧ магнитном поле полимером увеличиваются изгибающее напряжение, модуль упругости на изгибе, прочность при растяжении, модуль упругости на растяжении, ударная вязкость, снижается относительное удлинение при растяжении.

Таким образом, проведенные исследования показали целесообразность и перспективность применения модификации СВЧ электромагнитным полем эпоксидных композитов, наполненных охрой.

ЛИТЕРАТУРА

1. Epoxy composites modified with microfibers of potassium polytitanates / A.S. Mostovoi, Yu.A. Kadykova, Y.A. Bekeshev, L.K. Tastanova // Journal of Applied Polymer Science. 2018. Vol. 135 (35). № 46651. P. 1-8.
2. Highly Efficient Plasticizers-Antipirenes for Epoxy Polymers / A.S. Mostovoi, A.S. Nurtazina, Yu.A. Kadykova, A.Z. Bekeshev // Inorganic Materials: Applied Research. 2019. Vol. 10. № 5. P. 1135-1139.

3. Дисперснонаполненные пожаробезопасные эпоксидные композиты / А.С. Mostovoi, А.З. Бекешев, Ю.А. Кадыкова, Н.В. Теслина // Технологии и оборудование химической, биотехнологической и пищевой промышленности: материалы XI Всерос. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием. 2018. С. 135-136.

4. Научные основы модификации полимерных материалов в СВЧ электромагнитном поле / С.Г. Калганова, Ю.С. Архан-

гельский, В.А. Лаврентьев, С.В. Тригорный // Вопросы электротехнологии. 2017. № 1 (14). С. 26-35.2.

5. СВЧ-энергия в производстве композиционных материалов / С.Г. Калганова, В.А. Лаврентьев, Ю.С. Архангельский и др. // Решетневские чтения. 2017. Т. 1. С. 369-371.

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

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

Кадыкова Юлия Александровна – доктор технических наук, профессор кафедры «Электроэнергетика и электротехника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Мостовой Антон Станиславович – кандидат технических наук, заведующий кафедрой «Естественные и математические науки» Энгельсского технологического института (филиала) Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Чапов Игорь Дмитриевич – магистрант направления «Электроэнергетика и электротехника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Yulia A. Kadykova – Dr Sc., Professor, Department of Electric Power and Electrical Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Anton S. Mostovoy – PhD, Associate Professor, Head: Department of Natural and Mathematical Sciences, Engels Technological Institute, (branch), Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Igor D. Chapov – Master's student of the direction «Electric power and electrical engineering», Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 11.11.20, принята к опубликованию 14.12.20

ЛЕТОПИСЬ

ПАМЯТИ ПРОФЕССОРА ВЛАДИМИРА СЕМЁНОВИЧА ЧЕРЕДНИЧЕНКО



9 ноября 2020 г. скончался Владимир Семёнович Чередниченко – известный ученый, доктор технических наук, профессор, действительный член Академии электротехнических наук Российской Федерации, основатель Сибирской школы электротехнологов, создавший в 1974 г. и возглавлявший в течение 30 лет кафедру автоматизированных электротехнологических установок (АЭТУ) Новосибирского государственного технического университета (НГТУ), лауреат Государственной премии Новосибирской области в области науки и техники.

В 1963 г. после окончания Московского энергетического института В.С. Чередниченко начал научную и производственную деятельность в СКБ Электротермического оборудования (ныне АО «СКБ Сибэлектротерм») в г. Новосибирске. Он быстро вошел в когорту ведущих инженеров-конструкторов СКБ и, выполняя конструкторскую

работу, совмещал ее с научными исследованиями.

В 1970 г. В.С. Чередниченко защитил кандидатскую диссертацию по принципиально новому направлению развития электротехнологий – получение чистых и сверхчистых цветных металлов с использованием принципов паровфазной металлургии, выполненную под научным руководством основоположника электротермии в СССР профессора А.Д. Свенчанского. В 1986 г. В.С. Чередниченко защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук по теме «Дистилляционные электропечи. Теория и практика».

Начиная с 1974 года В.С. Чередниченко 30 лет возглавлял научную и учебную работу созданной им кафедры автоматизированных электротехнологических установок НГТУ. С 2004 г. В.С. Чередниченко работал профессором кафедры АЭТУ и по совместительству – главным конструктором Сибирского завода электротермического оборудования. Новизна и перспективность развития научного направления по новым электротехнологиям, научным руководителем которого является В.С. Чередниченко, послужили основой создания в 1975 г. Министерством электротехнической промышленности и Минвузом СССР отраслевой научно-исследовательской лаборатории электродугового нагрева при кафедре АЭТУ.

Научная школа профессора В.С. Чередниченко получила всероссийское и международное признание. Проведенные фундаментальные исследования по теории и практике дистилляционных электропечей позволили создать новое направление в развитии электротермии, которое широко используется в России, Германии, Боливии, Мексике, Австралии и Казахстане. За создание серии дистилляционных печей, базирующихся на теории, разработанной В.С. Чередниченко,

СКБ НПО «Сибэлектротерм» получило Государственную премию СССР.

Профессору В.С. Чередниченко принадлежит авторство теории и практики создания отечественных вакуумных плазменных электродов. На основе оригинальных научных и прикладных результатов создано оборудование для переплавных технологических процессов, восстановления тугоплавких и реакционных металлов (урана, тантала, ниобия, циркония и др.), нагрева порошковых материалов в неравновесной плазме для рафинирования, сфероидизации, плакирования и получения чешуйчатых порошков, создания интенсивных потоков неравновесной плазмы и паровых потоков веществ для получения конденсационных материалов, слоистых изделий и нанесения покрытий.

Профессор В.С. Чередниченко вел подготовку научных кадров. Под его руководством и консультированием подготовлены 4 доктора наук и 15 кандидатов наук.

Наряду с активной творческой, научной и педагогической деятельностью по подготовке инженерных и научных кадров профессор В.С. Чередниченко вел научно-просветительскую работу, являясь инициатором подготовки отечественными и зарубежными специалистами и редактором серии монографий «Современные электротехнологии», включающей 12 томов, он является автором 29 учебников и учебных пособий, 9 монографий, охватывающих основные направления развития электротермической техники. В.С. Чередниченко являлся членом редакционной коллегии

журнала «Электromеталлургия» и научных изданий Новосибирского государственного технического университета. Профессор В.С. Чередниченко являлся членом международных, всесоюзных и российских научных организаций.

С 1971 г. входил в состав Советского Национального комитета по электротермии Международного союза UIE, избран академиком Российской академии электротехнических наук, Международной энергетической Академии, Академии электротехнических наук Чувашии. В период с 1971 по 1979 годы входил в состав Научно-технического Совета Минвуза СССР, с 1971 по 1991 годы – член Президиума научно-методического Совета по электротермической технике Минвуза СССР. В.С. Чередниченко удостоен звания Почетного работника высшего профессионального образования РФ, почетного профессора НГТУ и награжден медалями «За заслуги в электротехнике» и «За достижения по охране окружающей среды», почетными грамотами губернатора Новосибирской области и мэрии г. Новосибирска.

Необходимо отметить высокие личные качества В.С. Чередниченко. Его требовательность сочеталась с внимательным отношением к возникающим проблемам, доброе отношение к людям, стремление всегда помочь вызвали к нему искреннее уважение. Светлый образ Владимира Семёновича Чередниченко навсегда останется в памяти его коллег, учеников, друзей.

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 (951) 880-19-13 – Юдина Виолетта Олеговна (ответственный секретарь).

Просьба направлять публикации по адресу:

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

Требования к оформлению публикаций

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

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

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

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

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

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

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

Специалисты в технических и 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. Аскарова

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

Подписано в печать 25.12.2020
Формат 60×84 1/8 Бум. офсет.
Усл. печ. л. 11,75 Уч. изд. л. 5,3
Тираж 500 экз. Заказ 104 Цена свободная
Отпечатано в Издательстве СГТУ, 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77.
E-mail: izdat@sstu.ru
Полная электронная версия журнала размещена в системе РИНЦ
в открытом доступе на платформе eLIBRARY.RU
Подписной индекс 70841 (каталог «Газеты. Журналы» на 1-е полугодие 2021 г.)
Свидетельство о регистрации СМИ *ПИ № ФС77-54621 от 01.07.2013*

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

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

Print date: 25.12.2020
Paper size: 60×84 1/8. Offset-Print
Conventional printed sheet 11,75 Publication base sheet 5,3
Circulation: 500 printed copies. Order 104 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 dated 1 July 2013*