

Издается с ноября 2013 года
Выходит один раз в квартал

№ 2 (27)

Июнь 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

В.Н. ЛЯСНИКОВ

А.Н. МАКАРОВ

Г.А. МОРОЗОВ

Ю.П. ПЕРЕЛЫГИН

А.Ф. РЕЗЧИКОВ

И.В. РОДИОНОВ

В.П. РУБЦОВ

Ф.Н. САРАПУЛОВ

Ю.Б. ТОМАШЕВСКИЙ

Г.Г. УГАРОВ

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, 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, НИУ «МЭИ», Москва

д.т.н., профессор, УрФУ, Екатеринбург

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

д.т.н., профессор, КТИ, Камышин

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

№ 2 (27)
June 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
V.N. LYASNIKOV	Dr.Sc., Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov
A.N. MAKAROV	Dr.Sc., Professor, Tver State Technical University, Tver
G.A. MOROZOV	Dr.Sc., Professor, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI, Kazan
Yu.P. PERELIGIN	Dr.I.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
V.P. RUBTSOV	Dr.Sc., Professor, National Research University «Moscow Power Engineering Institute», Moscow
F.N. SARAPULOV	Dr.Sc., Professor, Ural Federal University, Ekaterinburg
Yu.B. TOMASHEVSKY	Dr.Sc., Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov
G.G. UGAROV	Dr.Sc., Professor, Kamishin
V.N. KHMELEV	Dr.Sc., Professor, Biysk Technological Institute, Biysk
V.A. TSAREV	Dr.Sc., Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov
V.O. YUDINA	Assistant, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov

СОДЕРЖАНИЕ

ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЯ

- Кожевников В.Ю., Федотов В.Д.** СВЧ камеры с бегущей волной для синтеза сферических оксидных наночастиц 5
- Маркелова О.А., Таран В.М., Фомин А.А.** Электроплазменное напыление покрытий с пористой структурой, заполняемой жидкими веществами..... 10

ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ

- Смирнова С.В., Болотов П.В., Петрушин Д.Е., Глухов Д.А., Попов М.Г.** Тренд времени – распределенная генерация: как он реализуется в России и как влияет на отрасль 20

ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА

- Менщиков И.А.** Прогнозирование остаточного ресурса тягового электропривода электропоезда серии ЭД9Т с помощью нечеткого моделирования гибридной нейронной сети..... 29

ЭЛЕКТРОДИНАМИКА

- Коняев А.Ю., Абдуллаев Ж.О., Багин Д.Н., Фоминых С.И.** Исследование электродинамических сепараторов для индукционной сортировки автомобильного лома..... 38

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

- Мостовой А.С., Кадыкова Ю.А., Неверная О.Г., Прохорова И.Е.** Направленное регулирование структуры и физико-механических характеристик эпоксидных композитов с применением электрофизического метода модификации композиции..... 48
- Злобина И.В.** Оценка влияния СВЧ электромагнитного поля на структурные изменения в армированных углеродными волокнами ПКМ с распределенными металлическими элементами на основе анализа сигналов акустической эмиссии 54

СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

- Сафина Г.Ф., Сафиуллин Р.А.** Автоматизация процесса расчета расхода электродов для сварочных соединений при монтаже тепловых электростанций ... 60

СОЦИАЛЬНЫЙ АСПЕКТ

- Ермолаева В.В.** Создание на территории СГТУ интеллектуальной электрозарядной сети для электрических инвалидных колясок во исполнение федерального закона о маломобильных группах населения 69
- К сведению авторов 73

CONTENTS

ELECTROTHERMY

- Kozhevnikov V.Yu., Fedotov V.D.**
Traveling wave microwave chambers for
the synthesis of spherical oxide
nanoparticles 5
- Markelova O.A., Taran V.M., Fomin A.A.**
Plasma spraying of coatings with porous
structures filled with liquid substances 10

ELECTRIC POWER SUPPLY

- Smirnova S.V., Bolotov P.V., Petru-
shin D.E., Glukhov D.A., Popov M.G.**
Distributed generation trending today:
its implementation and effects in
Russia..... 20

ELECTROMECHANICS

- Menschikov I.A.** Residual operation life
assessment of an electric traction drive in
the electric train ED9M using a hybrid
fuzzy neural network..... 29

ELECTRODYNAMICS

- Konyaev A.Yu., Abdullaev Z.O.,
Bagin D.N., Fominykh S.I.** Investigation
of electrodynamic separators for induction
sorting of automobile scrap..... 38

MATERIALS SCIENCE

- Mostovoy A.S., Kadykova Yu.A.,
Nevernaya O.G., Prokhorova I.E.**
Directed adjustment of the structure and
physical and mechanical characteristics of
epoxy composites using an electrophysical
method of composition modification..... 48
- Zlobina I.V.** Estimation of the of the
microwave electromagnetic field effect on
structural changes in carbon fiber
reinforced PCM with distributed metal
elements based on the analysis of acoustic
emission signals 54

CONTROL SYSTEM

- Safina G.F., Safiullin R.A.** Automation
of consumption calculation of electrodes
for he welding joints on installation of
thermal power plants..... 60

SOCIAL ASPECT

- Ermolaeva V.V.** SSTU creates a smart
electro-charging network for electric
wheelchairs pursuant to the federal law on
persons with limited mobility 69
- Information for Authors 73

ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЯ

УДК 621.313

СВЧ КАМЕРЫ С БЕГУЩЕЙ ВОЛНОЙ ДЛЯ СИНТЕЗА СФЕРИЧЕСКИХ ОКСИДНЫХ НАНОЧАСТИЦ

В.Ю. Кожевников, В.Д. Федотов

TRAVELING WAVE MICROWAVE CHAMBERS FOR THE SYNTHESIS OF SPHERICAL OXIDE NANOPARTICLES

V.Yu. Kozhevnikov, V.D. Fedotov

Рассмотрена технология получения наночастиц металлов при СВЧ воздействии на коллоидные растворы. Приведены результаты проектирования СВЧ камер бегущей волны, моделирования процесса нагрева в СВЧ электромагнитном поле потока жидкости

Ключевые слова: наночастицы металлов, СВЧ воздействие, моделирование в COMSOL Multiphysics

Разработка методов, используемых для синтеза сферических оксидных частиц, важна при проектировании новых керамических и каталитических материалов [1]. Среди многочисленных методов, предлагаемых для получения сферических частиц, золь-гель метод в настоящее время является наиболее перспективным. Методы «мягкой химии» не позволяют использовать высококонцентрированные растворы, что значительно снижает их эффективность. Таким образом, важно разработать новый метод, который позволил бы получать сферические оксидные частицы с узким распределением по размерам из концентрированных растворов. Эта проблема может быть решена путем воздействия на солевые растворы микроволнового излучения в процессе гидролиза [1], скорость гидротермального синтеза различных порошков оксидов может быть увеличена под действи-

The article covers the technology used to obtain metal nanoparticles with microwave effects on colloidal solutions. The design outputs describe the microwave chamber with a traveling wave and models of liquid flow heating processes in the microwave electromagnetic field.

Keywords: metal nanoparticles, microwave exposure, modeling based on COMSOL Multiphysics

ем микроволнового излучения на несколько порядков. Гидролиз концентрированных водных и водно-спиртовых солевых растворов позволяет получать сферические оксидные частицы с узким распределением по размерам.

Экспериментальные исследования влияния параметров микроволновой обработки, типа растворителя на образование, морфологию и характер распределения частиц оксида по размерам проводились со следующими реагентами: Ni (NO₃)₂·6H₂O, ZrO (NO₃)₂·8H₂O, ZrOC₁₂·8H₂O, (NH₄)₂ [Ce (NO₃)₆]. Растворы нагревали в микроволновой печи Samsung M1712R (максимальная мощность – 850 Вт; частота СВЧ – 2,45 ГГц).

Фазовый состав и степень кристалличность полученных оксидных образцов контролировали методом рентгеновской порошковой дифракции.

В результате проведенных исследований установлено, что микроволновая обработка водных и водно-спиртовых растворов Zr (IV), Ce(IV) и Ni(II) приводит к их исчерпывающему гидролизу с получением соответствующих гидрооксидных продуктов. Микроволновый гидролиз дает возможность получать частицы преимущественно сферической формы и с более узким распределением по размерам по сравнению с гидролизом при обычном нагревании.

Целью работы является разработка СВЧ камеры для получения наночастиц оксидов металлов в непрерывном режиме, моделирование процессов при синтезе наночастиц.

Одним из наиболее перспективных способов синтеза наночастиц в водных растворах является метод химического восстановления при СВЧ воздействии [2]. Размер образующихся частиц лежит в диапазоне 0,7-2,8 нм. СВЧ нагрев имеет ряд других преимуществ перед традиционными способами нагрева.



Рис. 1. Структурная схема СВЧ установки

Для расчета параметров камеры использован метод эквивалентных схем, который позволяет существенно ускорить проектирование рабочих камер и получить общий алгоритм решения задачи синтеза КБВ.

Исходные данные для расчета: $f = 2450 \cdot 10^6$ Гц – частота СВЧ генератора, $\lambda = 0,122$ м – длина волны (м), $Z_0 = 50$ Ом – волновое сопротивление СВЧ разъема линии, диэлектрические параметры ϵ' , $\text{tg } \delta$ взяты из работы [4].

Расчет камеры начинается с определения ϵ' , $\text{tg } \delta$, так как эти параметры в ходе нагрева практически не изменяются, при-

СВЧ установка для получения наночастиц в водных растворах состоит из следующих основных узлов: источника СВЧ энергии, линии передачи, рабочей камеры проточного типа, позволяющей обеспечивать эффективное взаимодействие энергии СВЧ электромагнитного поля с раствором, системы загрузки-выгрузки и системы управления (рис. 1).

В данной работе произведен расчет камеры СВЧ установки. Для эффективного синтеза нано частиц предложена камера с бегущей волной (КБВ) на круглом волноводе с экспоненциальным согласующим экраном. Этот тип камеры позволяет получить не только практически идеальное согласование рабочей камеры с линией передачи, но и равномерное тепловыделение в обрабатываемом объекте по всей длине камеры [3], а это является одним из условий образования наночастиц меньшего размера и более узкого распределения размеров.

нимаем значения $\epsilon' = 81,93$, $\text{tg } \delta = 0,14$.

В таком случае $\sqrt{\epsilon' \sqrt{1 + \text{tg}^2 \delta}} = 8,91$.

По зависимостям $F_R = 2\pi r R_n / |\eta_2|$; $F_X = 2\pi r X_n / |\eta_2|$, где $|\eta_2| = \left| 377 / \sqrt{\epsilon' \sqrt{1 + \text{tg}^2 \delta}} \right|$ (рис. 2) находим, что

$$r \sqrt{\epsilon' \sqrt{1 + \text{tg}^2 \delta}} / \lambda = 0,85, \quad (1)$$

при котором $F_X = 0$, а F_R минимально, что позволяет получить наиболее узкий диапазон изменения значения R_n , X_n – активная и реактивная составляющая погонного сопротивления обрабатываемого объекта.

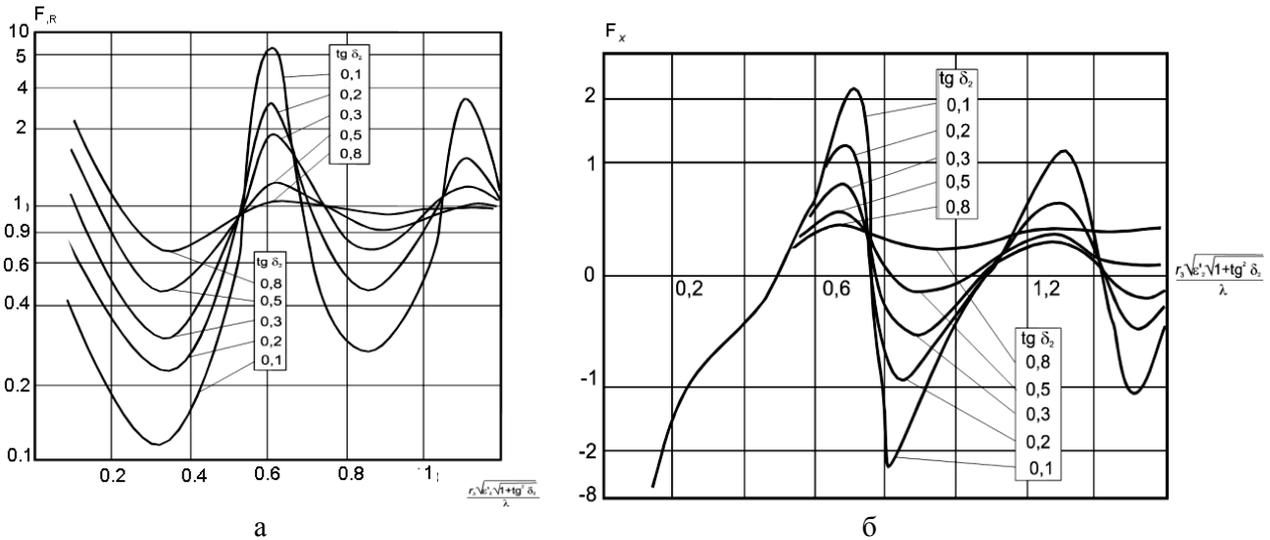


Рис. 2. Зависимости $F_R\left(r\sqrt{\varepsilon'\sqrt{1+\operatorname{tg}^2\delta}}/\lambda\right)$ и $F_X\left(r\sqrt{\varepsilon'\sqrt{1+\operatorname{tg}^2\delta}}/\lambda\right)$ для круглого волновода с поглощающим стержнем вдоль оси

Тогда из (1) $r = \lambda \cdot 0,85 / \sqrt{\varepsilon'\sqrt{1+\operatorname{tg}^2\delta}}$. Из зависимостей $F_R\left(r\sqrt{\varepsilon'\sqrt{1+\operatorname{tg}^2\delta}}/\lambda\right)$ и $F_X\left(r\sqrt{\varepsilon'\sqrt{1+\operatorname{tg}^2\delta}}/\lambda\right)$ находим значения погонных сопротивлений $R_n = 289,3$, $X_n = 0$.

Для согласования КБВ с линией передачи используется так называемый согласующий экран. Для определения параметров экрана нужно рассчитать значение входного сопротивления.

Входное сопротивление КБВ с экспоненциальным профилем рассчитывается из соотношения

$$\frac{dZ_{ex}}{dz} = R_n + jX_n + \frac{\left(\frac{j2\pi}{\lambda}\right)(Z_0^2 - Z_{ex}^2)}{Z_0}, \quad (2)$$

но при $X_n = 0$ имеем

$$Z_{ex}(z) = \operatorname{Re} Z_{ex}(z) = R_n \cdot z. \quad (3)$$

При $Z_0 = R_n l$ имеет место полное согласование рабочей камеры с линией передачи, где l – длина камеры, так что $l = \frac{Z_0}{R_n}$.

Согласующий экран с изменяющимся внешним проводником при воздушном заполнении над обрабатываемой средой рассчитывается по соотношению

$$D(z) = 2r \cdot \exp\left\{\left[-\lambda X_n / 4\pi + \sqrt{(\lambda X_n / 4\pi)^2 + (R_n z)^2}\right] / 60\right\}. \quad (4)$$

Рабочая камера должна быть хорошо согласованна с питающим трактом, поскольку в этом случае максимально используется СВЧ энергия. Для оценки согласования используется коэффициент стоячей волны по напряжению, расчет которого сводится к определению входного сопротивления камеры:

$$K_{cmU} = \frac{(1+|\Gamma|)}{(1-|\Gamma|)}, \text{ где } \Gamma = \frac{(Z_{ex} - Z_0)}{(Z_{ex} + Z_0)}. \quad (5)$$

Алгоритм расчета был реализован в программе Mathcad, который позволил рассчитать основные параметры камеры: длина камеры $l = 0,175$ м, радиус внутреннего проводника (технологического канала)

$r = 0,012$ м, внешний проводник $D(0.175) = 0,054$ м, КСВ = 1.

На рис. 3 представлен общий вид СВЧ камеры проточного типа для воздействия на жидкую среду, где 1 – прямоугольный

волновод, 2 – согласующий экран, 3 – диэлектрическая трубка, 4 – волноводно-коаксиальный переход, 5 – обрабатываемая жидкость.

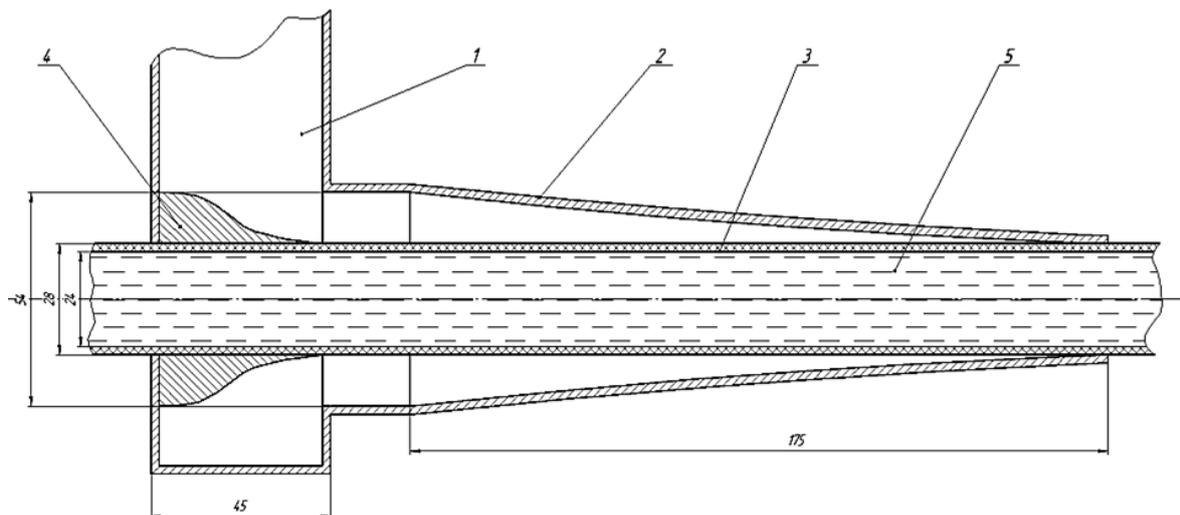


Рис. 3. СВЧ камера проточного типа

После разработки эскиза рабочей камеры решалась задача численного моделирования процесса нагрева раствора солей. Математическая модель, описывающая процесс СВЧ нагрева диэлектрика, представляет собой самосогласованную задачу электродинамики и теплопереноса [3].

Задача электродинамики описывается уравнениями Максвелла. Для описания волновых процессов используется их преобразование к виду уравнений Гельмгольца для векторов напряженности электрического и магнитного поля [3]. Волновое уравнение для вектора напряженности электрического поля E записывается в виде

$$\nabla \times (\mu_r^{-1} \nabla \times E) - k_0^2 \left(\epsilon_r' - \frac{j\sigma}{\omega \epsilon_0} \right) E = 0, \quad (6)$$

где μ_r – относительная магнитная проницаемость; $k_0 = \omega \sqrt{\epsilon_0 \mu_0}$ – волновое число; ϵ_r' – относительная диэлектрическая проницаемость (действительная часть); $\sigma = \omega \epsilon_0 \epsilon_r''$ – электрическая проводимость; ω – угловая частота, и ϵ_0 – электрическая постоянная, ϵ_r'' – фактор потерь (мнимая часть диэлектрической проницаемости).

На внутренних металлических границах рабочей камеры задается граничное условие, характеризующее неидеальное отражение электромагнитной волны от поверхностей (тангенциальная составляющая вектора E близка к нулю, но не равна нулю):

$$\sqrt{\frac{\mu_0 \mu_r}{\epsilon_0 \epsilon_r - j\sigma/\omega}} \mathbf{n} \times \mathbf{H} + \mathbf{E} - (\mathbf{n} \cdot \mathbf{E}) \mathbf{n} = 0,$$

где μ_0 – магнитная постоянная; \mathbf{n} – единичный вектор нормали к поверхности; \mathbf{H} – вектор напряженности магнитного поля.

Между всеми контактирующими областями расчетной модели рабочей камеры (воздух – кварцевая труба, кварцевая труба – жидкость) имеют место граничные условия сопряжения:

$$\begin{aligned} [\mathbf{H}_2 - \mathbf{H}_1, \mathbf{n}] &= 0, \quad [\mathbf{n}, \mathbf{E}_2 - \mathbf{E}_1] = 0, \\ \mathbf{n}(\mathbf{D}_2 - \mathbf{D}_1) &= 0, \quad \mathbf{n}(\mathbf{B}_2 - \mathbf{B}_1) = 0, \end{aligned}$$

где $\mathbf{H}_2, \mathbf{H}_1, \mathbf{E}_2, \mathbf{E}_1$ – векторы напряженности магнитного и электрического поля; $\mathbf{D}_2, \mathbf{D}_1, \mathbf{B}_2, \mathbf{B}_1$ – векторы электрической и магнитной индукции для сред 2 и 1 соответственно; \mathbf{n} – единичный вектор нормали к поверхности, направленный из среды 1 в среду 2.

Напряженность электрического поля, полученная выше из уравнения (6), и свойства материала необходимы для расчета объемной мощности за счет СВЧ воздействия, с помощью следующего уравнения:

$$Q = \sigma |\vec{E}|^2 = 2\pi \varepsilon_0 \varepsilon'' f |\vec{E}|^2, \quad (7)$$

где σ – электрическая проводимость материала (См/м); ε_0 – абсолютная диэлектрическая проницаемость ($8,854 \times 10^{-12}$, Ф/м) и f – частота (Гц).

Задача теплопроводности для каждого из элементов конструкции СВЧ камеры описывается уравнением

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T + \nabla \cdot \mathbf{q} = Q, \quad (8)$$

$$\mathbf{q} = -k \nabla T,$$

где ρ – плотность; C_p – удельная теплоемкость; T – температура; t – время; k – коэффициент теплопроводности; \mathbf{u} – скорость жидкости; Q_v – мощность внутренних источников теплоты.

Алгоритм для решения самосогласованной задачи электродинамики и теплопроводности потока жидкой смеси был реализован в COMSOL Multiphysics. Из решения волнового уравнения (6) были определены распределение электромагнитных полей и мощность внутренних источников теплоты. Диэлектрические свойства жидкой смеси были экспериментально измерены методом волнового тройника на частоте 3000 МГц. Результаты моделирования нагрева раствора солей металлов представлены на рис. 4.

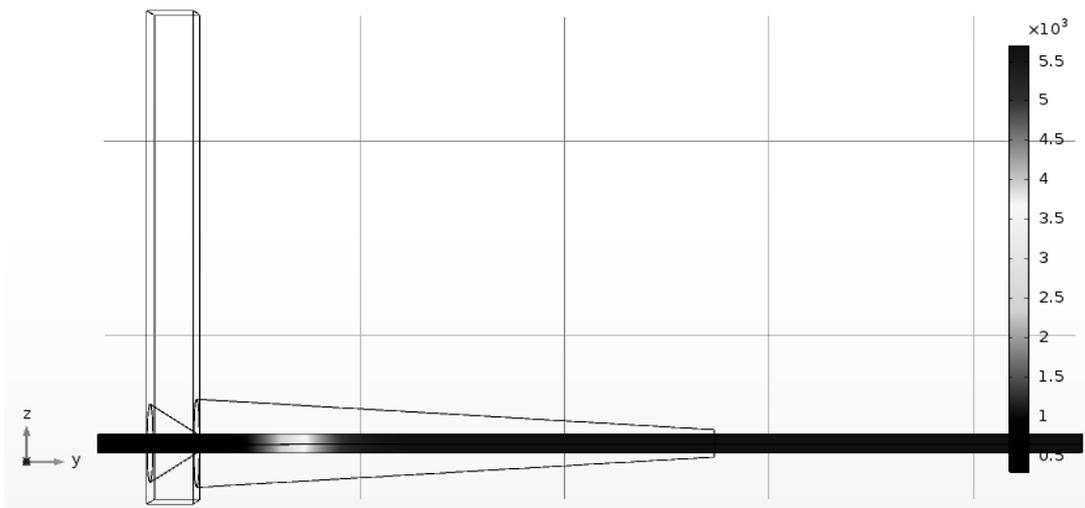


Рис. 4. Распределение температуры вдоль СВЧ камеры бегущей волны

Из рисунка видно, что поток раствора солей эффективно взаимодействует с СВЧ энергией и нагревается до высоких температур.

Таким образом, данный метод получения наночастиц оксидов металлов в коллоидных растворах может быть реализован в промышленных масштабах.

Выводы. СВЧ нагрев имеет ряд преимуществ перед традиционными способами нагрева: интенсификация процесса термообработки за счет объемного нагрева раствора, существенное сокращение времени реакции, высокое качество

нагрева за счет большой равномерности тепловыделения, высокая точность управления технологическим процессом благодаря возможности точного дозирования СВЧ энергии. Все эти преимущества и приводят к уменьшению размера образующихся частиц [2].

Таким образом, разработанная рабочая камера позволит получить производительность установки 40 л/ч. При такой производительности требуется СВЧ мощность 3,7 кВт. В качестве источника СВЧ энергии может быть выбран генератор с варьируемой мощностью от 1,5 до 5 кВт.

ЛИТЕРАТУРА

1. Doklady Chemistry. 2002. Vol. 385. № 1-3. P. 175-177. Translated from Doklady Akademii Nauk. 2002. Vol. 385. № 1. P. 67-70. Original Russian Text Copyright © 2002 by Vanetsev, Ivanov, Kolen'ko, Oleinikov, Murav'eva, Tret'yakov.

2. Access to small size distributions of nanoparticles by microwave-assisted synthesis. Formation of Ag nanoparticles in aqueous carboxymethylcellulose solutions in batch and continuous-flow reactors / S. Horikoshi, H. Abe, K. Torigoe, M. Abe, N. Serpone // Nanoscale. 2010. Vol. 2. P. 1441-1447.

3. **Архангельский Ю.С.** Установки диэлектрического нагрева. СВЧ установки: учеб. пособие. Саратов: СГТУ, 2003. 344 с.

4. **Кожевников В.Ю.** Исследование диэлектрических параметров водного раствора наночастиц серебра / В.Ю. Кожевников, Д.В. Дихор, Е.А. Добролюбова // Состояние и перспективы развития электротехнологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф. (XVII Бенардосовские чтения). Иваново, 2013.

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

Федотов Владислав Дмитриевич – бакалавр кафедры «Электроэнергетика и электротехника» СГТУ имени Гагарина Ю.А.

V.Yu. Kozhevnikov – PhD, Associate Professor, Department of Electric Power Engineering and Electrotechnology, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Vladislav D. Fedotov – Bachelor student at the Department of Electric Power Engineering and Electrotechnology, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 17.12.2019, принята к опубликованию 15.02.20

УДК 621.793.71

ЭЛЕКТРОПЛАЗМЕННОЕ НАПЫЛЕНИЕ ПОКРЫТИЙ С ПОРИСТОЙ СТРУКТУРОЙ, ЗАПОЛНЯЕМОЙ ЖИДКИМИ ВЕЩЕСТВАМИ

О.А. Маркелова, В.М. Таран, А.А. Фомин

PLASMA SPRAYING OF COATINGS WITH POROUS STRUCTURES FILLED WITH LIQUID SUBSTANCES

O.A. Markelova, V.M. Taran, A.A. Fomin

Определены регрессионные зависимости, описывающие изменение параметров структуры и механических свойств газо-

The article presents the regression dependencies determined to describe the changes in the structure parameters and

термических покрытий от тока дуги плазмотрона и дистанции напыления. Показано, что при изменении тока в диапазоне от 300 до 400 А и дистанции напыления от 50 до 150 мм общая пористость составила от 14 до 52 %, микротвердость – от 4,4 до 6,8 ГПа и адгезионная прочность – от 7,6 до 14,2 МПа. Установлена величина продолжительности пропитки гидроксиапатитовых покрытий с различной пористостью жидкими лекарственными веществами под действием ультразвуковых колебаний с частотой 22 кГц.

Ключевые слова: *электроплазменное напыление, покрытие, гидроксиапатит, ультразвуковые колебания, пропитка*

Введение

В современном машино- и приборостроении, а также медицинской технике для повышения эффективности ее работы достаточно часто используются функциональные материалы или покрытия, которые способны выступать в качестве носителей жидких веществ [1, 2]. Таким жидким компонентом выступают лекарственные вещества для покрытий медицинского назначения, смазочно-охлаждающая жидкость для деталей машин, жидкие электролиты в химической промышленности [3-5].

Формирование пористых покрытий на металлах осуществляется множеством методов, например золь-гелевой технологией, прессованием с последующим спеканием, электрофизической и высокотемпературной модификацией поверхности токами высокой частоты, в частности малогабаритных титановых конструкций, вакуумно-конденсационным нанесением тонких пленок, а также газотермическим напылением [6-8]. Электроплазменное напыление позволяет формировать покрытия, обладающие пористостью около 30-50 % в сочетании с адгезионной прочностью не менее 10-15 МПа, что является рациональным с позиции биологической и биомеханической совместимости для покрытий внутрикостных конструкций [9,10]. Для введения жидких компонентов в пористую структуру в ряде исследований предлагается использо-

mechanical properties of thermal gas coatings related the plasma torch arc current and spraying distance. It is shown that with the current changes ranging from 300 to 400 A and the spraying distance from 50 to 150 mm, the total porosity makes from 14 to 52 %, the microhardness from 4.4 to 6.8 GPa, and adhesive strength from 7.6 to 14. 2 MPa. The duration rate for impregnation of hydroxyapatite coatings with various porosity using liquid medicinal substances under the impact of ultrasonic vibrations with the frequency of 22 kHz has been established.

Keywords: *plasma spraying, coating, hydroxyapatite, ultrasonic vibrations, impregnation*

вать метод ультразвуковой обработки, отличающийся технической простотой реализации наряду с высокой эффективностью [11-13]. Особенностью данного процесса является равномерность и возможность регулирования глубины пропитки пористой структуры изделия, которое располагается в технологической емкости с жидким функциональным веществом.

Таким образом, целью данного исследования является разработка электротехнологического процесса формирования функциональных покрытий, в частности на титановых конструкциях для восстановительной медицины, методом электроплазменного напыления с последующей пропиткой пористой структуры жидкими веществами под действием ультразвуковых колебаний.

Материалы и методы исследования

Газотермическое покрытие гидроксиапатита (ГА) с титановым подслоем формировалось на образцах из технического титана марки ВТ1-00 с применением полуавтоматической установки плазменного напыления «УПН-28». Основными технологическими параметрами были выбраны ток дуги плазмотрона и дистанция напыления при фиксированном размере напыляемых порошков титана марки ПТС и синтезированного жидкофазным методом гидроксиапатита (табл. 1) [14]. Титановый подслои, обеспечивающий

требуемую адгезию вышележащего слоя гидроксиапатита, формировался при фиксированных параметрах тока дуги плазмотрона,

равного 350 А, дистанции напыления 150-200 мм и дисперсности титанового порошка 100-150 мкм [15,16].

Таблица 1

Технологические режимы нанесения гидроксиапатитовых покрытий

Номера групп образцов	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Ток дуги плазмотрона (<i>I</i>), А	300	300	300	350	350	350	400	400	400
Дистанция напыления (<i>L</i>), мм	150	100	50	150	100	50	150	100	50
Дисперсность порошка (<i>Δ</i>), мкм	70-90								

Образцы перед процессом плазменного напыления подвергались очистке в ультразвуковой (УЗ) ванне «СВО-40» (ПСБ-ГАЛС) в водном растворе ПАВ в течение 7-10 мин при рабочей частоте 22 кГц. Последующая воздушно-абразивная обработка поверхности основы титановых образцов осуществлялась с использованием порошка электрокорунда (шлифзерно F60 с дисперсностью 0,25-0,30 мм) в течение 5-7 мин на аппарате «АСОЗ 1.2 МЕГА».

Пропитку сформированных покрытий осуществляли водным раствором 3 %-го повидаргола (лекарственное вещество, содержащее высокодисперсное металлическое серебро) с использованием УЗ колебаний (частотой 22±0,5 кГц, интенсивностью не более 10 Вт/см²) при продолжительности τ = 60, 120 и 300 с.

Контроль пористости проводился с использованием анализатора для определения площади удельной поверхности «NOVA 2000e», металлографического микроскопа «МИМ-8» и анализатора геометрических параметров микрообъектов «АГМП-6М».

Микротвердость покрытий измерялась с использованием цифрового микротвердомера HVS-1000В. Нагрузка, прикладываемая к индентору Виккерса, составила 200 гс при стандартной выдержке 15 с. Адгезию пористого покрытия измеряли на универсальной испытательной машине «ИР 5082-100» методом нормального отрыва склеенных торцевыми поверхностями образцов эпоксидной смолой ЭД-20.

Глубину проникновения жидкого вещества в объем пористого покрытия исследовали по распределению частиц серебра в глубину с использованием лазерного спектроаналитического комплекса «Спектр-2000» при нескольких циклах измерения на выбранном участке образцов. Скорость выхода жидкого вещества из структуры покрытия определяли методом комплексометрического титрования [17].

Результаты и обсуждение

Возрастание тока дуги плазмотрона с 300 до 400 А при фиксированной дистанции напыления характеризовалось снижением величины общей пористости покрытия в среднем на 13-20 % (табл. 2).

Регрессионная зависимость для определения тока дуги плазмотрона от необходимой общей пористости покрытия с учетом дистанции напыления имеет вид дробнополиномиальной функции:

$$I = 515 - 4,4 \cdot L - \frac{9003}{P^2} + 0,01 \cdot L^2 + \frac{13,9 \cdot 10^4}{P^2} + 104,2 \cdot \frac{L}{P}, \tag{1}$$

где *I* – ток дуги плазмотрона, А; *P* – общая пористость, %; *L* – дистанция напыления порошка, мкм. Для данной зависимости коэффициент множественной детерминации *R*² = 0,915, что характеризует высокую точность описания экспериментальных результатов выбранной теоретической зависимостью.

Таблица 2

Общая пористость покрытий, полученных при различных режимах плазменного напыления

Дистанция напыления, мм	Ток дуги, А	Общая пористость, %	Средняя величина пор, мкм
150	300	52,3±0,2	52,4
	350	42,4±0,2	41,2
	400	38,7±0,4	40,1
100	300	45,7±0,2	38,6
	350	31,8±0,1	33,2
	400	31,2±0,2	23,7
50	300	53,4±0,5	34,5
	350	30,6±0,4	27,1
	400	24,7±0,3	14,2

Уменьшение значения общей пористости покрытия при изменении тока от 300 до 400 А предположительно связано с проплавлением твердого ядра напыляемых частиц под действием большей тепловой мощности и, как следствие, уплотнения сплюснутых частиц в виде покрытия с низкой пористостью. При уменьшении дистанции напыления от 150 до 50 мм напыляемые частицы не успевают приобрести большую скорость, благодаря которой возможно их диспергирование на более мелкие фрагменты при ударе о подложку, и формируют малопо-

ристое покрытие. Так, наименьшую общую пористость 24,7 % имеют покрытия, полученные при токе дуги $I = 400$ А и дистанции напыления $L = 50$ мм, что подтверждает выдвинутое предположение.

Увеличение микротвердости характерно для покрытия, полученного при токе дуги плазматрона более 300 А (рис. 1, табл. 3). Наибольшая микротвердость около 6,8 ГПа наблюдалась у покрытия, полученного при токе дуги $I = 400$ А на дистанции $L = 50$ мм. Это может быть связано с малым значением общей пористости покрытия и наличием уплотненной структуры.

Таблица 3

Показатели микротвердости покрытий, полученных методом плазменного напыления

Дистанция напыления, мм	Ток дуги плазматрона, А	Значения микротвердости образцов, ГПа
150	300	4,42±0,2
	350	4,72±0,1
	400	5,27±0,1
100	300	5,75±0,2
	350	5,29±0,1
	400	5,86±0,2
50	300	5,10±0,2
	350	6,38±0,1
	400	6,80±0,2

Получена регрессионная зависимость для определения значений тока дуги плазмотрона при необходимых показателях микротвердости электроплазменного покрытия и дистанции напыления:

$$I = 1,3 \cdot 10^5 - 1,2 \cdot 10^5 \cdot H + 4,8 \cdot 10^4 \cdot H^2 - 9185 \cdot H^3 + 857 \cdot H^4 - 31 \cdot H^5 + 0,96 \cdot L, \quad (2)$$

где H – микротвердость покрытия, ГПа; L – дистанция напыления, мм; I – ток дуги, А. Для зависимости (2) коэффициент мно-

жественной детерминации имеет несколько меньшее значение $R^2 = 0,68$.

Таким образом, дистанция напыления связана с током дуги плазмотрона прямой пропорциональностью, что упрощает объяснение влияния геометрического фактора на основной электротехнологический параметр процесса плазменного напыления.

С увеличением тока дуги плазмотрона от 300 до 400 А адгезионная прочность σ покрытий увеличивается с 7,6 до 14,2 МПа (табл. 4, рис. 2).

Таблица 4

Адгезионная прочность покрытий, полученных методом плазменного напыления

Дистанция напыления, мм	Ток дуги плазмотрона, А	Адгезионная прочность, МПа
150	300	7,6±0,1
	350	8,4±0,2
	400	8,6±0,2
100	300	7,8±0,1
	350	9,8±0,2
	400	10,3±0,2
50	300	7,5±0,1
	350	11,9±0,2
	400	14,2±0,2

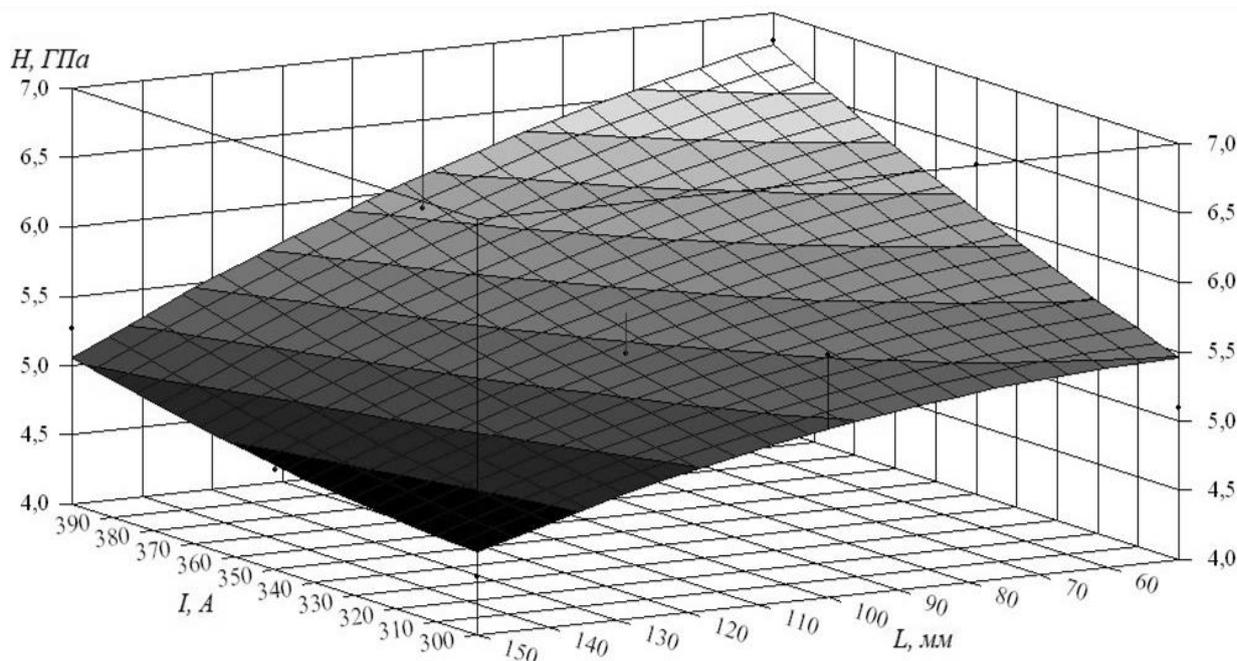


Рис. 1. Зависимость микротвердости (H) плазменного гидроксиапатитового покрытия от тока дуги (I) и дистанции напыления (L)

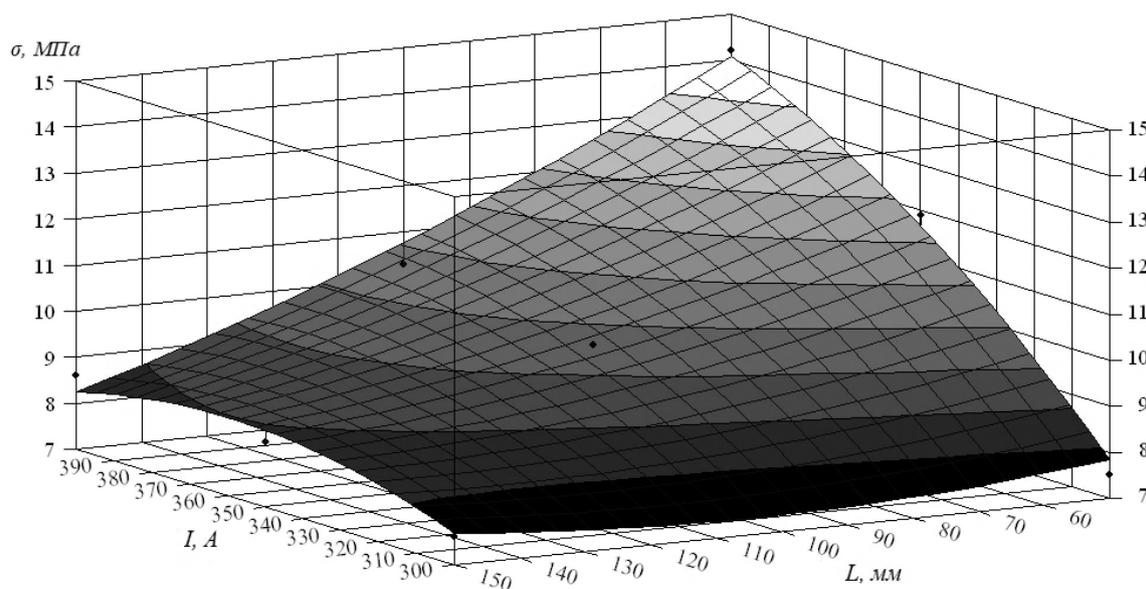


Рис. 2. Зависимость адгезионной прочности σ электроплазменных гидроксипатитовых покрытий от тока дуги плазматрона I и дистанции напыления L

Полученные зависимости адгезионной прочности покрытий взаимосвязаны с открытой пористостью, а именно с увеличением значений открытой пористости σ снижается. Так, максимальной адгезии, равной 14,2 МПа, покрытие достигает при токе дуги плазматрона 400 А и дистанции 50 мм, общая пористость покрытия при этом составляет минимальную величину 27,7 %.

Регрессионная модель для определения значений тока дуги плазматрона в зависимости от необходимой адгезионной прочности электроплазменного покрытия и дистанции напыления описывается квадратичной функцией с учетом взаимодействия факторов:

$$I = 745 - 65 \cdot \sigma - 7 \cdot L + 2 \cdot \sigma^2 + 0,009 \cdot L^2 + 0,7 \cdot L \cdot \sigma, \quad (3)$$

где σ – адгезионная прочность покрытия, МПа; L – дистанция напыления, мм; I – ток дуги, А.

Полученные пористые покрытия далее подвергались пропитке жидким веществом – наполнителем пористой структуры. При продолжительной пропитке $t = 300$ с покрытия, полученные при токе дуги 300 А и дистанции 150 мм, заполняются на 80-85 %, а при

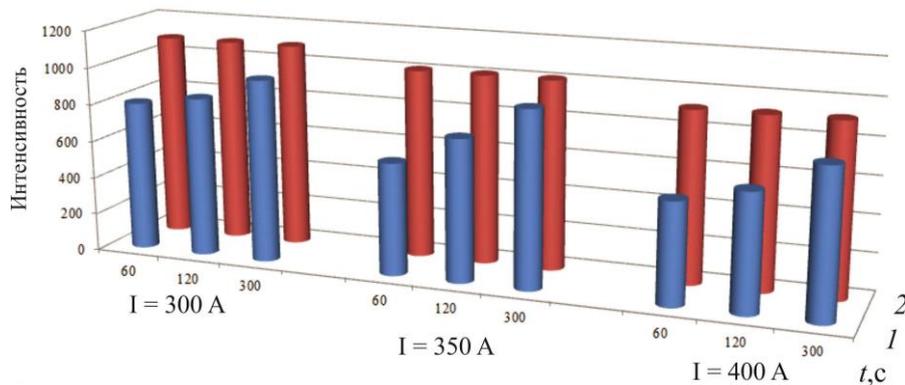
уменьшении времени УЗ-пропитки до $t = 60$ с заполнение покрытия происходит на 65-70 %. В свою очередь, для покрытий, сформированных при токе дуги 400 А на дистанции напыления 50 мм, при пропитке в течение $t = 60$ с зафиксировано заполнение покрытия на 25-30 %, при увеличении продолжительности пропитки до $t = 300$ с покрытие заполняется на 80-85 % (рис. 3). Данная закономерность связана с наличием мелких пор в структуре покрытия, проницаемость которой затруднена.

Для данных покрытий важно установить также функциональную способность к высвобождению жидкого наполнителя. Покрытия, сформированные при токе дуги 300 А, характеризуются быстрым выходом жидкого вещества из структуры покрытия к 10-15 суткам. Для покрытий, полученных при токе дуги 350 А, максимальная концентрация жидкого вещества достигается на 20-25 сутки, а для покрытий, полученных при токе 400 А, – на 30 сутки и более (рис. 4).

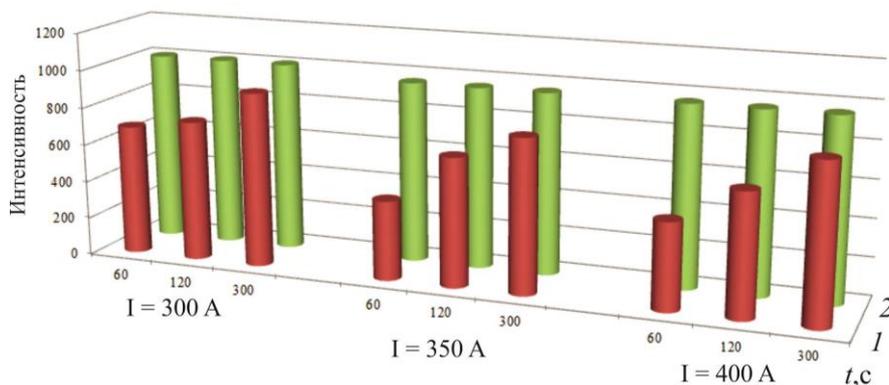
Полученные данные позволяют установить взаимосвязь пористости покрытия, параметров плазменного напыления (ток дуги плазматрона, дистанция напыления) и скорости высвобождения жидкого вещества

(наполнителя повияргола) из структуры функционального слоя титановых изделий. Так, при токе дуги 300 А и дистанции напыления 150 мм возможна ускоренная доставка жидких веществ в место предполагаемого контакта внутрикостных конструкций с костной тканью, а при токе дуги 400 А и ди-

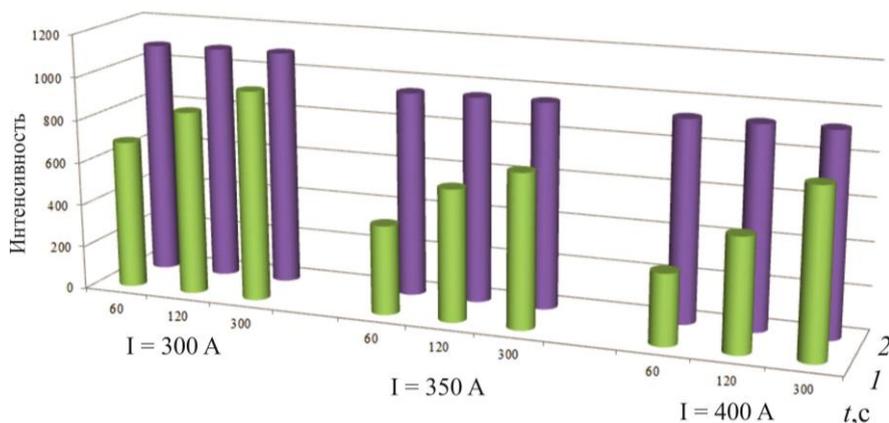
станции 50 мм возможно пролонгированное высвобождение жидкого вещества. Данная способность полученного покрытия гидроксипатита имеет особое значение при выборе способа лечебного воздействия с применением внутрикостных конструкций и металлических изделий с покрытиями.



а



б



в

Рис. 3. Зависимость интенсивности пропитки (связанной с объемом внедряемого жидкого наполнителя) от тока дуги плазмотрона I и продолжительности t пропитки 3 % водным раствором повияргола в направлении от поверхности 15-20 мкм (2) в глубину покрытия и на глубине около 60 мкм (I):
а – $L = 150$ мм; б – $L = 100$ мм; в – $L = 50$ мм

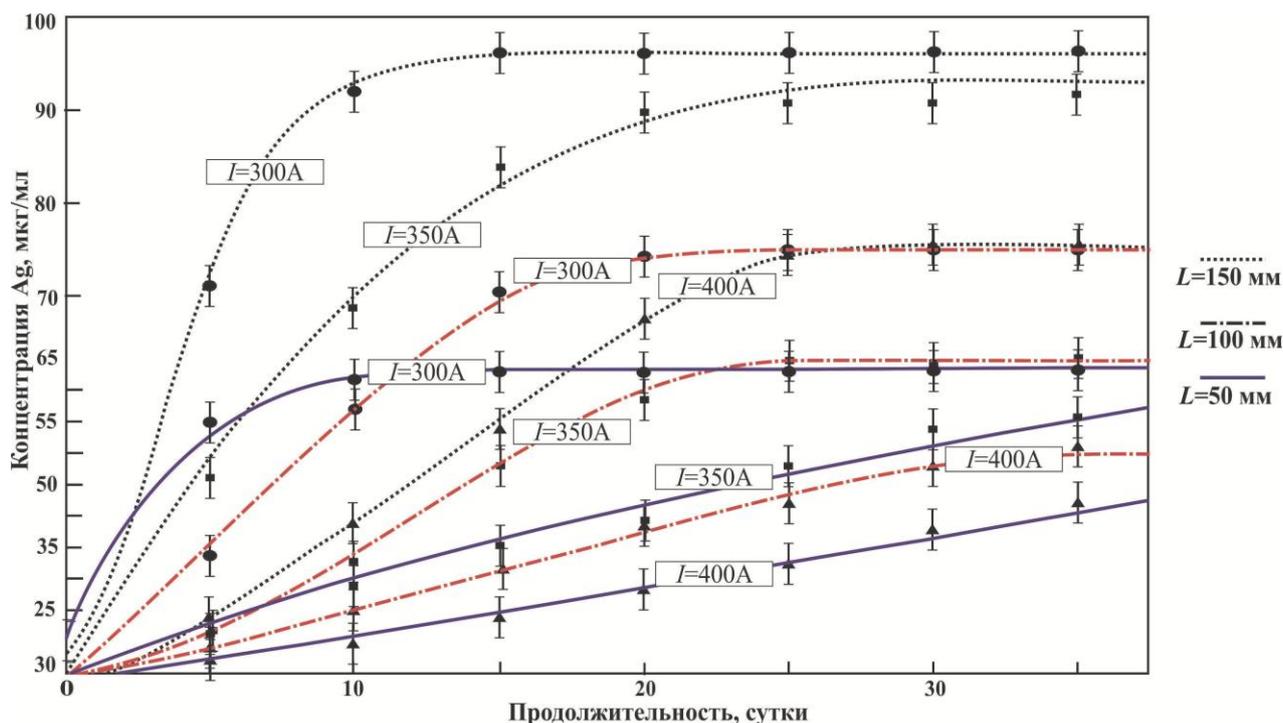


Рис. 4. Скорость выхода повииаргола из пористого покрытия, полученного методом плазменного напыления при различных токах дуги плазмотрона и дистанции напыления

Выводы

1. Общая пористость покрытия, полученного методом электроплазменного напыления, на основе порошка гидроксиапатита на титановой основе изделия с титановым подслоем зависит от режимов формирования покрытия, а именно тока дуги плазмотрона и дистанции напыления. С увеличением тока дуги плазмотрона от 300 до 400 А при фиксированной дистанции напыления прослеживается тенденция к снижению величины общей пористости покрытия с 51-52 до 24-25 %.

2. Адгезионная прочность покрытий, полученных методом плазменного напыления порошка гидроксиапатита, на титановой основе изделия с титановым подслоем связана с открытой пористостью покрытий и параметрами их нанесения. С увеличением значений открытой пористости адгезионная прочность снижается, а именно максимальной адгезии 14,2 МПа покрытие достигает при токе дуги плазмотрона 400 А и дистанции напыления 50 мм, общая пористость покрытия при этом составляет минимальную величину 24,7 %.

3. С увеличением тока дуги до 400 А и уменьшением дистанции напыления до 50 мм микротвердость покрытий достигает 6,8 ГПа; при токе дуги 300 А и дистанции напыления 150 мм микротвердость имеет минимальную величину — около 4,42 ГПа.

4. Продолжительность УЗ обработки влияет на глубину и качество пропитки. При наибольшей длительности пропитки, равной 300 с, объем покрытий заполняется жидким веществом (наполнителем повииаргола) на 70-85 %.

5. Скорость высвобождения жидкого вещества из пористого газотермического покрытия зависит от его общей пористости. При токе дуги 300 А и дистанции напыления 150 мм зафиксировано ускоренное высвобождение жидкого наполнителя к 10-15 суткам, а при токе дуги 400 А и дистанции 50 мм — пролонгированное высвобождение в течение 30 суток и более.

Исследование выполнено при финансовой поддержке стипендии Президента РФ для молодых ученых и аспирантов СП-63.2019.4.

ЛИТЕРАТУРА

1. Композиционные биоматериалы ГАП-Ti: получение, структура, свойства / О.В. Скачкова, В.М. Скачков, Е.А. Богданова и др. // Вестник Бурятского государственного университета. Химия. Физика. 2016. № 2-3. С. 47-56.
2. Исследование ГАП-содержащих биокмпозитов на основе титана различной пористости методом сканирующей электронной микроскопии / И.Г. Григоров, А.Г. Широкова, Е.А. Богданова и др. // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов: межвуз. сб. науч. тр.; под общ. ред. В.М. Самсонова, Н.Ю. Сдобнякова. Тверь: Твер. гос. ун-т, 2016. Вып. 8. С. 105-109.
3. Self-Lubricating PEO Coating on an Al Alloy Produced by Vacuum Impregnation Post-treatment / L. Hong, D. Wang, G.D. Bian et al. // Acta Metallurgica Sinica-English Letters. 2015. Vol. 28. Iss. 8. P. 965-974.
4. Структура и коррозионно-электрохимическое поведение систем «аморфное плазменное покрытие на основе железа – стальная подложка» / Ю.А. Пустов, А.С. Золотарев, Н.А. Гладких и др. // Физика и химия обработки материалов. 2015. № 3. С. 35-43.
5. **Алексеев Н.С.** Шлифование микропористых покрытий импрегнированными кругами / Н.С. Алексеев, В.А. Капорин, С.В. Иванов // Обработка металлов. 2015. № 3 (68). С. 66-74.
6. Влияние температурного режима в системе покрытие-основание на формирование элементов неравновесных структур плазменных покрытий / В.А. Оковитый, Ф.И. Пантелеенко, В.А. Асташинский, В.В. Оковитый // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. 2017. № 4 (59). С. 43-47.
7. Повышение эффективности плазменного напыления порошковых покрытий / В.И. Кузьмин, Е.В. Картаев, С.П. Ващенко и др. // Вестник Югорского государственного университета. 2014. № 2 (33). С. 7-14.
8. Характеристики прочности и пластичности титанового сплава ВТ16 после высокотемпературной обработки ТВЧ / А.А. Фомин, М.А. Фомина, А.В. Войко и др. // Вопросы электротехнологии. 2017. № 1 (14). С. 73-82.
9. Биоактивные многослойные покрытия, инициирующие рост костной ткани: структура и свойства / Л. Имин, А.В. Рогачев, М.А. Ярмоленко и др. // Проблемы физики, математики и техники. 2019. № 2 (39). С. 28-35.
10. Механизмы изменений костной ткани в зоне «имплантат – кость» при использовании металлоконструкций с синтетическим биоактивным покрытием / А.А. Марков, О.З. Мустаев, А.Е. Коровин и др. // Клиническая патофизиология. 2019. Т. 25. № 2. С. 43-49.
11. Investigation of zinc powder modified by ultrasonic impregnation of rare earth lanthanum / L.Q. Zhu, H. Zhang, W.P. Li et al. // Applied surface science. 2007. Vol. 253. Iss.24. P. 9443-9449.
12. **Фахрутдинова Р.Р.** Перспективы использования ультразвуковой пропитки для герметизации пористых порошковых материалов / Р.Р. Фахрутдинова // Инженерные кадры – будущее инновационной экономики России. 2019. № 1. С. 175-177.
13. **Разинская О.И.** Воздействие ультразвуковых волн на процесс инфильтрации дисперсных частиц в поры порошкового материала / О.И. Разинская, С.Я. Алибеков, В.В. Фоминых // Известия высших учебных заведений. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. 2016. № 1. С. 67-71.
14. **Баринов С.М.** Биокерамика на основе фосфатов кальция / С.М. Баринов, В.С. Комлев. М.: Наука, 2005. 204 с.
15. **Hong Z.** Microstructure and Phase Composition of Titanium Coatings Plasma Sprayed with a Shroud / Z. Hong, L. Zhi, L. Liancong // MATEC Web of Conferences, 2018. С. 142-147.
16. Теоретические основы разработки плазменных технологий и оборудования: монография / В.М. Таран, А.В. Лясникова,

О.А. Дударева и др. Днепропетровск:
ФООП Середняк Т.К., 2014. 880 с.

17. Шванцербах Г. Комплексометрическое титрование / Г. Шванцербах. М.: Химия, 1970. 360 с.

Маркелова Ольга Анатольевна – ассистент кафедры «Материаловедение и биомедицинская инженерия» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Olga A. Markelova – Assistant Lecturer, Department of Materials Science and Biomedical Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Таран Владимир Маркович – доктор технических наук, профессор кафедры «Материаловедение и биомедицинская инженерия» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Vladimir M. Taran – D.Sc., Professor, Department of Materials Science and Biomedical Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

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

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

Статья поступила в редакцию 20.01.20, принята к опубликованию 15.02.20

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.

ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ

УДК 621.311

ТРЕНД ВРЕМЕНИ – РАСПРЕДЕЛЕННАЯ ГЕНЕРАЦИЯ: КАК ОН РЕАЛИЗУЕТСЯ В РОССИИ И КАК ВЛИЯЕТ НА ОТРАСЛЬ

С.В. Смирнова, П.В. Болотов, Д.Е. Петрушин,
Д.А. Глухов, М.Г. Попов

DISTRIBUTED GENERATION TRENDING TODAY: ITS IMPLEMENTATION AND EFFECTS IN RUSSIA

S.V. Smirnova, P.V. Bolotov, D.E. Petrushin, D.A. Glukhov, M.G. Popov

Распределённая генерация (РГ) – мировой тренд, активно распространяющийся в России. В отличие от западных стран основным стимулом распространения РГ в России служит стремление собственников промышленных предприятий (ПП) снизить конечную стоимость электроэнергии. Кроме этого, РГ может успешно решать задачу электроснабжения изолированных и труднодоступных территорий (ИТТ), а также замещения устаревшей и неэффективной генерации. Широкое распространение РГ, в том числе на основе возобновляемых источников энергии (ВИЭ), приводит к необходимости создания перспективных моделей включения РГ в Единую энергетическую систему (ЕЭС).

Ключевые слова: *распределенная генерация, ВИЭ, энергоэффективность*

Введение

В настоящий момент времени для России характерна модель централизованной генерации, в которую входят 846 электростанций установленной мощностью более 5 МВт [1]. Такая схема развития российской электроэнергетики обусловлена большими расстояниями между источниками и потребителями электроэнергии, а также неоднородностью распределения первичных энергоресурсов (нефть, газ, уголь, крупные реки) с центрами потребления энергии.

Distributed generation is a global trend, which is developing in Russia. Compared to European countries, the driving force for spreading distributed generation in Russia is the tendency expressed by the owners of industrial enterprises to reduce electricity costs. Additionally, distributed generation in Russia can be effective in solving the problem of power supply to the hard-to-reach areas and replacement of obsolete and non-effective generation. Wide spread distributed generation based on renewable energy sources leads to the need to create the target systems integrating distributed generation into the Unified Energy System.

Keywords: *distributed generation, renewable energy, energy efficiency*

Общемировой тенденцией становится постепенный отказ от централизованной модели и переход к модели распределённой энергетики, а также снижение доли ископаемых первичных энергоресурсов и увеличение ВИЭ [2].

Распределенная генерация

В настоящей работе под объектом РГ понимается электростанция, состоящая из одной или нескольких генерирующих установок (ГУ), подключаемая к распределительным сетям или сетям внутреннего

электроснабжения потребителей на напряжении до 110 кВ включительно, максимально приближенная к узлу(-ам) электропотребления, работающая параллельно с электроэнергетической системой или в островном (автономном) режимах, имеющая в точке общего присоединения суммарную установленную мощность до 25 МВт и использующая для производства всех видов энергии (электрическая, тепловая, холодо-

вая и др.) любые первичные источники энергии, включая ВИЭ [3].

Согласно отчёту консалтинговой компании Guidehouse Research (США), к 2025 г. общемировой объём установленной мощности РГ составит более 200 ГВт, при этом половина установленной мощности придется на солнечные электростанции (СЭС) на фотоэлектрических модулях (рис. 1) [2].

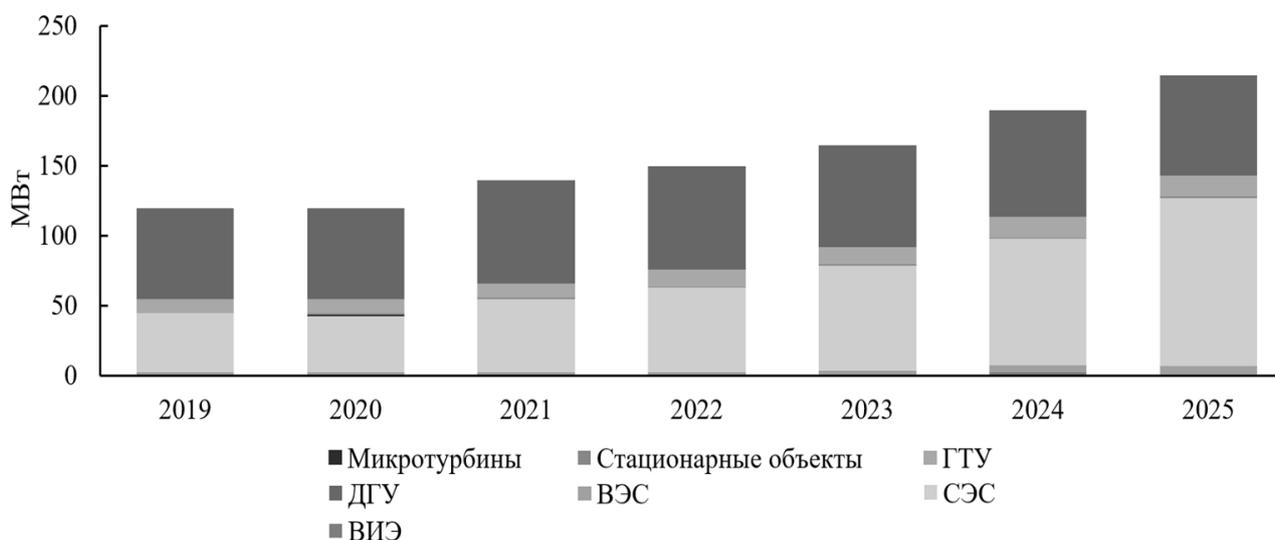


Рис. 1. Рост установленной мощности РГ в мире до 2025 г., МВт

Актуальность РГ

В последние десятилетия в мировой энергетике отчётливо прослеживается тренд 3D: Decarbonization, Decentralization, Digitalization (Декарбонизация, Децентрализация, Цифровизация). Причины модельных и структурных изменений в энергетике обусловлены комплексом различных причин.

Для западных стран одним из стимулов для энергетического перехода является стремление правительств, основанное на запросе населения, к скорейшему переходу на низкоуглеродную экономику в целом и низкоуглеродную энергетику, в частности. Также всеобщая электрификация, приводящая к увеличению электропотребления, создает требования потребителей к повышению оперативности и гибкости технологий электроснабжения промышленности и бытовой нагрузки.

На примере энергетики ФРГ как ведущей экономики ЕС и мира можно отчётливо проследить влияние технологического тренда 3D на структуру и объём электроэнергетической отрасли (табл. 1). За 2019 год общее количество произведённой электроэнергии в ФРГ составило 518 ТВт·ч [4], причём около 40 % всего объёма составила выработка электроэнергии из ВИЭ. Большая часть электроэнергии, выработанной установками на основе ВИЭ, является РГ.

Отдельным аспектом развития электроэнергетики Германии является конечная стоимость электроэнергии для промышленного и бытового использования. По оценкам НП «Сообщество потребителей энергии», конечная цена для ПП в Германии является одной из самых высоких в мире, что обусловлено высокой долей установленной мощности генерирующих объектов (ГО) на основе ВИЭ (рис. 2).

Структура электроэнергетической отрасли ФРГ и РФ

Страна	Установленная мощность ГО, ГВт	Установленная мощность ГО на основе ВИЭ, ГВт (без ГЭС)	Установленная мощность объектов РГ, ГВт	Средняя стоимость ЭЭ для населения [5] / для ПП, руб. за кВт·ч	Общая выработка ЭЭ, ТВт·ч	Выработка ЭЭ ВИЭ, ТВт·ч (без ГЭС)
ФРГ	290	119	73 [6]	10,48/8,92	518	217
РФ	246	3	24	3,31/4,46	1080,6	1,6

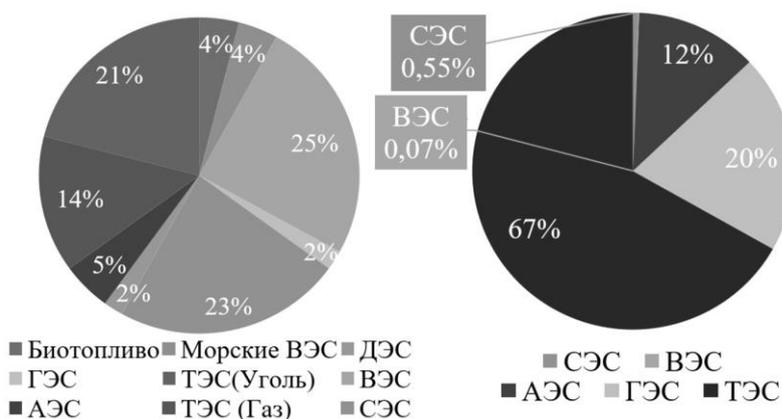


Рис. 2. Структура установленной генерирующей мощности на 2019 г. в Германии [слева] и России [7] [справа]

Для России влияние тренда 3D не так заметно вследствие относительно дешёвого природного газа, кредитной политики государства с высокими процентными ставками и низкого запроса населения на экологическую политику. В 2019 г. большая часть электроэнергии выработана централизованными электростанциями на углеводородном топливе. Доля установленной мощности электростанций на ВИЭ – около 1 % всей установленной мощности. По оценкам экспертов, доля РГ на углеводородном топливе и работающей по когенерационному циклу, составляет 7 % от общей установленной мощности России.

Текущее состояние РГ в России

В России наблюдается ежегодный рост вводов объектов РГ. По данным ИНЭИ РАН, за последние 10 лет прирост общей установленной мощности электростанций до 25 МВт составил около 30 %. При этом в отличие от большинства стран мира, где в большей степени вводятся объекты РГ на

базе ВИЭ, в России увеличение их количества идет за счет тепловых электростанций с газотурбинными установками (ГТУ), дизель-генераторными установками (ДГУ) и газопоршневые установками (ГПУ), которые, как правило, подключаются к распределительным электрическим сетям или к сетям внутреннего электроснабжения промышленных предприятий (ПП).

Основным стимулом ввода РГ в России является желание собственника ПП снизить стоимость электроэнергии для повышения операционной эффективности производства. На фоне роста цен на электроэнергию Минэкономразвития прогнозирует индексацию оптовых цен на газ (основное топливо для РГ в РФ) для всех категорий потребителей (исключая население), на 2-3 % в год до 2030 г., что означает повышение привлекательности РГ в ближайшей перспективе.

Сложно точно оценить текущий объём РГ в составе ЕЭС. Росстат и Министерство энергетики России в своих официальных статистических годовых и оперативных отчётах

не выделяют этот вид генерации в отдельные показатели. Основными источниками данных являются оценки экспертов, научных организаций, показатели предприятий и аналитические работы консалтинговых компаний. Кроме того, в России существует серая зона объектов РГ, которые работают без подключения к ЕЭС. По примерной оценке, на начало 2020 года в России в составе ЕЭС функционируют 487 ГО РГ с общей установленной мощностью 6 ГВт. Основной объём ГО приходится на электростанции ПП на углеводородном топливе или сжигании

побочных продуктов производства – 260 ГО суммарной мощностью 3360 МВт.

По расчётам одного из ведущих инжиниринговых предприятий РФ ГК «МКС» и Московской школы управления «Сколково», использование собственной генерации ПП позволяет экономить до 3 руб. с одного кВт·ч электроэнергии, несмотря на высокую стоимость эксплуатации РГ (рис. 3).

Мировой тренд развития РГ на основе ВИЭ прослеживается и в России. Сводные значения по объектам РГ, работающих в составе ЕЭС, приведены в табл. 2.

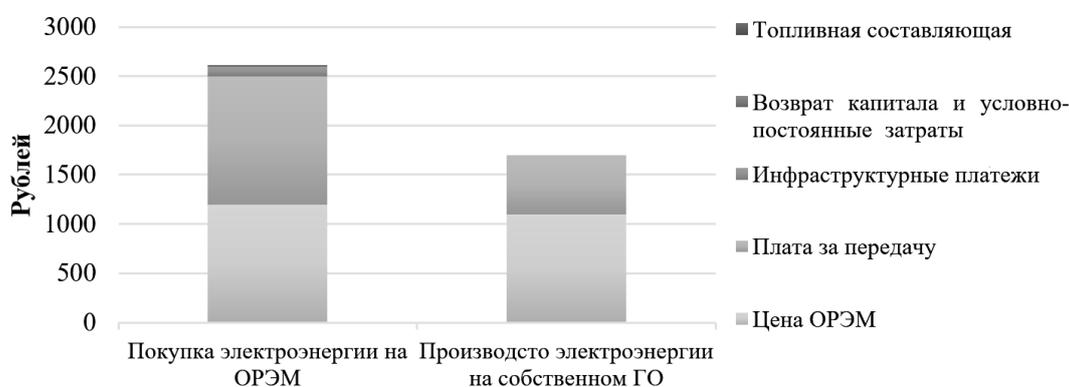


Рис. 3. Сравнение стоимости электроэнергии для предприятий при покупке на рынке/использовании собственной генерации

Таблица 2

Сводные данные по РГ в России

Тип	Эл. ПП	МГЭС	ВЭС	СЭС	ПЭС	БиоТЭС	ТЭС
Мощность, МВт	3360	480	98	634	1,1	2,4	1395
Количество объектов	260	76	11	46	1	1	94

Без учёта малых гидроэлектростанций (МГЭС) в России на 2020 г. находится в эксплуатации 59 объектов РГ на основе ВИЭ общая установленная мощность которых составляет 735 МВт.

На особом месте находятся объекты РГ, расположенные в ИТТ, работающие в островном режиме количеством 2005 ГО. Их суммарная установленная мощность оценивается в 840,3 МВт. Основной процент установленной мощности (63 % – 525 МВт) этих ГО расположен в четырёх регионах: Республика Саха (Якутия), Камчатский край, Красноярский край и Ямало-Ненецкий АО. На остальные 19 регионов приходится

315 МВт установленной мощности ГО. Основным видом топлива является дизельное топливо, но присутствуют ГО, использующие ВИЭ, чей общий объём мощности на конец 2018 г. равен 16,6 МВт (39 ГО). Сводные значения по объектам РГ с ВИЭ в ИТТ в табл. 3. Основная особенность генерации в ИТТ – субсидирование государством стоимости электроэнергии для компенсации разницы между экономически обоснованным тарифом и установленными тарифами для населения и ПП. По оценкам Аналитического центра при Правительстве РФ, удельные расходы на выработку электроэнергии доходят до 42,7 руб./кВт·ч.

Сводные данные по РГ, использующим ВИЭ в ИТГ

Тип	ВЭС	СЭС	ВСЭС	ВДЭС	ГЭС	АГЭУ	ВСДЭС
Мощность, кВт	3171	1606	221,5	7683	2740	520	224
Количество объектов	5	19	2	6	3	1	4

В настоящее время в России отсутствует нормативно-правовая база для гармоничного развития РГ в составе ЕЭС. Важно отметить, что в последние годы законодательные органы совместно с профильными министерствами и энергетическим сообществом активно занимаются законотворческой деятельностью. За последнее два года Правительством РФ и Министерством энергетики уже утверждена [8] часть основополагающих НТД, содержащих нормативную и терминологическую базу для РГ, которые обеспечат стабильное, последовательное развитие энергетики и применение новых технологий в рамках правового поля.

Тенденции и технологические тренды в РГ

Для эффективной работы РГ в составе ЕЭС необходимы эффективные механизмы интеграции, управления и регулирования таких источников электроэнергии. Развитие информационных, микропроцессорных технологий и технологий связи в последние десятилетия совместно с современными экономическими моделями дало активный стимул к развитию РГ. Из-за большого распространения РГ и необходимости эффективной интеграции ее в ЕЭС возникло понятие виртуальной электростанции (Virtual Power Plant) – IT системы, к которой подключены распределённые источники электроэнергии, преимущественно на основе ВИЭ. В управлении режимами работы РГ и биржевой торговли электроэнергией свое применение получила технология блокчейн (Blockchain) [9].

Цифровизация РГ соотносится со стратегическими направлениями программы

Минэнерго РФ «Цифровая трансформация электроэнергетики РФ». На данный момент в России развивается цифровой пилотный проект по созданию новой системы взаимоотношений потребителей розничного рынка электроэнергии и оптимизации их затрат – АЭК [10] – совместная разработка АО «СО ЕЭС», группы компаний «НТЦ ЕЭС», Минэнерго РФ и «Энерджинет». Физически АЭК представляет собой микроэнергосистему, состоящую из собственной генерации, потребителей электроэнергии и сетевой инфраструктуры. Производство и потребление электроэнергии осуществляются через управляемое интеллектуальное соединение. Экономическая целесообразность АЭК заключается в возможности каждого участника оплачивать тариф на содержание электрических сетей в пределах разрешенной величины, но не более своего фактического потребления из сети при условии гарантий, что его потребление может быть ограничено до установленного уровня.

Важным фактором и предпосылкой развития РГ, характерным для всех стран, является постепенное устаревание основных производственных фондов (рис. 4), необходимость замещения устаревшей и неэффективной генерации, а также строительство новой для покрытия растущего потребления.

Согласно энергетической стратегии России, в период до 2035 г. общая установленная мощность электростанций в составе ЕЭС должна составлять 251-264 ГВт [11], что с учетом прогнозируемого вывода ГО [11] потребует ввода до 48 ГВт новых мощностей. Одним из вариантов частичного покрытия этого объёма мощности – строительство объектов РГ.

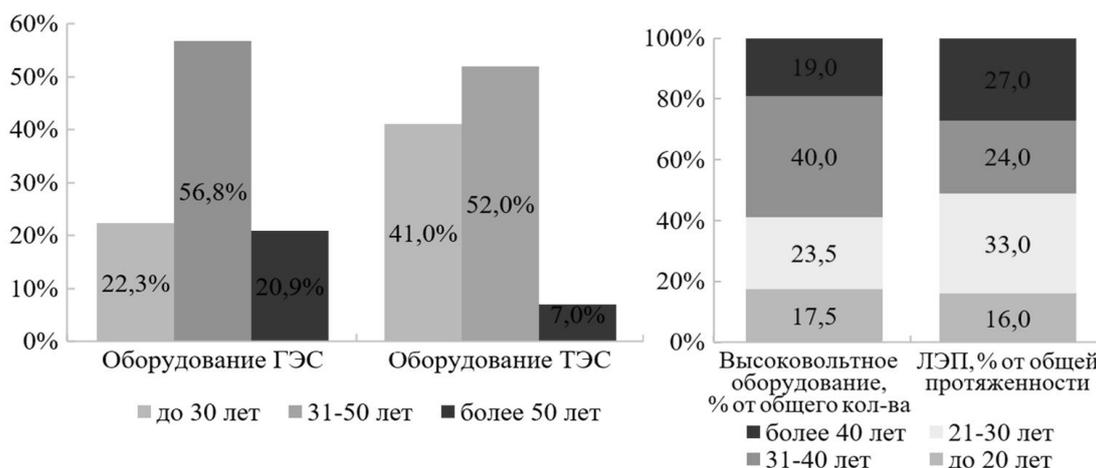


Рис. 4. Возрастная структура генерирующего оборудования, работающего в составе ЕЭС (процент от установленной мощности) [слева], и электросетевого оборудования Единой национальной электрической и распределительных сетей [справа]

Перспективы развития РГ в России до 2035 г.

Дорогостоящее технологическое присоединение (ТП), высокие издержки при передаче электроэнергии, необходимость в замещении изношенных и устаревающих мощностей делают стоимость электроэнергии для конечного потребителя высокой.

По расчётам компании АЛЪТЭКО [12], среднее прогнозируемое повышение цены на электроэнергию для бытового потребителя до 2035 г. составит около 4 %. В то

же время, по данным НП «Сообщества потребителей энергии» [13] и Ассоциации «НП Совет рынка», цена электроэнергии на оптовом рынке за 1 полугодие 2019 года существенно выросла – на 9 % относительно декабря 2018 г. Цена на природный газ для ПП по прогнозам [14] до 2024 г. значительно не увеличится (рис. 5) и составит в среднем 3 % в год [15]. Такое соотношение цен является стимулом для строительства собственной генерации.

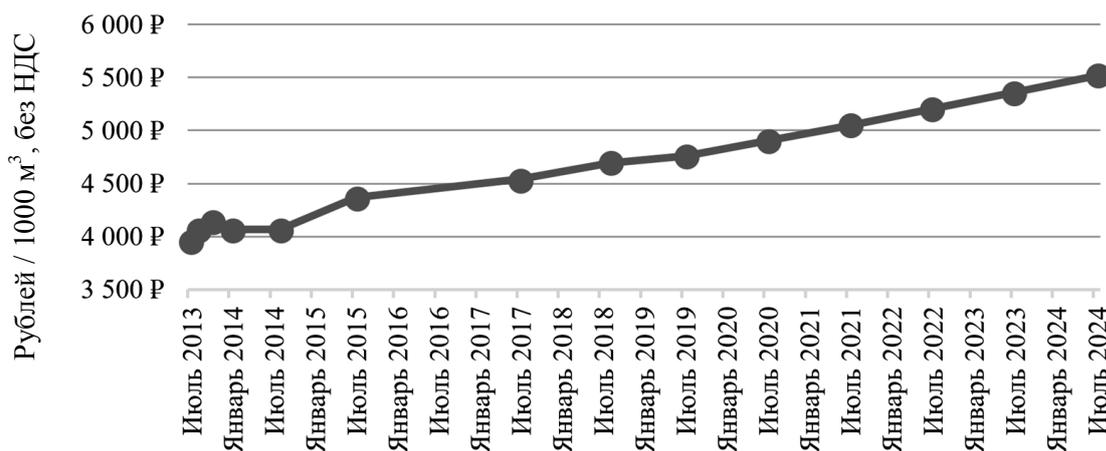


Рис. 5. Прогноз цены на природный газ для ПП до 2024 г.

Кроме экономических стимулов в развитии РГ на базе углеводородов до 2035 г., важной составляющей является заложенная в «Энергетической стратегии РФ на период до 2035 года» цель по уве-

личению доли РГ в общем объёме генерации и концентрации нагрузки в региональных энергосистемах. Это достигается за счёт необходимости масштабного обновления ТЭС с помощью установки теп-

лофикационных ГТУ мощностью до 25 МВт общим количеством 250-350 шт. с суммарной установленной мощностью 3,6 ГВт, и с помощью реконструкции муниципальных котельных с преобразованием их в ГТУ/ГПУ расположенных на мини-ТЭЦ, что суммарно составит до 70 ГВт вновь введённой мощности до 2035 г. Всё это создаёт благоприятные условия для развития собственной генерации ПП и муниципальными предприятиями, а также

увеличения общего количества РГ на углеводородном топливе.

Заключение

Для успешного развития и функционирования РГ определены рекомендации в виде взаимосвязанной системы с выделением ограничений, окон возможностей и эффектов на энергетическую отрасль и на экономику в целом (табл. 4).

Таблица 4

Рекомендации проведения политики для развития и распространения РГ

Ограничение	Окно возможностей	Эффект
Увеличение теплотребления вследствие масштабного жилищного строительства	Замещение местных котельных на объекты распределённой когенерации	Развитие отечественного машиностроения, создание новых рабочих мест
Недостаток квалификации кадров, эксплуатирующих РГ	Применение дистанционного управления объектами РГ из ДЦ	Снижение требований к кадрам в организации, эксплуатирующей РГ. Увеличение числа и объёма средств управления электроэнергетическим режимом у диспетчерского персонала
Увеличение сложности управления режимом работы энергосистемы	Развитие и промышленное применение новых ПТК, систем управления и релейной защиты сетей и объектов РГ	Повышение наблюдаемости и управляемости объектов РГ и электрических сетей
Увеличение количества разрозненных объектов РГ	Стимулирование процесса объединения объектов РГ в энергокластеры: АЭК, виртуальная электростанция	Изменение структуры энергетики, переход к локально децентрализованной энергосистеме
Переход на интеллектуальные сети – увеличение угрозы кибератак	Создание киберзащищённых стандартов передачи данных. Создание «энергетической цифровой сети»	Устранение угрозы кибератак на критически важную энергетическую инфраструктуру
Физические ограничения распределительной сети	Модернизация действующей распределительной сети напряжением 35 кВ и ниже	Устранение электросетевых барьеров для развития РГ
Санкционный режим в рамках импорта технологий	Увеличение инвестиций в НИОКР и создание программы инновационного развития	Увеличение степени локализации производимого оборудования при соответствии оборудования современным стандартам, снижение зависимости от иностранного оборудования
Санкционный режим в рамках экспорта энергоресурсов	Переориентация поставок энергоресурсов на внутренний рынок	Увеличение ГО РГ, использующего природный газ

Ограничение	Окно возможностей	Эффект
Отставание НТД и НПА от современных тенденций в энергетике	Принятие изменений и разработка новых и опережающих НТД и НПА. Формирование современной НП базы	Нормативные документы выступают в роли драйвера развития отрасли
Устаревание объектов генерации	Замещение устаревших энергетических объектов (ТЭЦ, муниципальных котельных) энергоэффективными установками РГ	Увеличение количества объектов РГ, повышение экономической эффективности производства тепла и электроэнергии

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ) в рамках научного проекта № 19-38-90123.

Acknowledgments: The reported study was funded by RFBR, project number 19-38-90123.

ЛИТЕРАТУРА

1. Единая энергетическая система России [Электронный ресурс]: Акционерное общество «Системный оператор Единой энергетической системы». Электрон. текстовые дан. 2020. Режим доступа: <https://www.so-ops.ru/?id=962>, свободный.

2. **Pritil G.** Global Additions in Distributed Generation Capacity to Increase Significantly [Электронный ресурс] Insights / G. Pritil. Guidehouse. Электрон. текстовые дан. 2019. Режим доступа: <https://guidehouseinsights.com/news-and-views/global-additions-in-distributed-generation-capacity-to-increase-significantly>, свободный.

3. **Гуревич Ю.Е.** Особенности расчетов режимов в энергорайонах с распределенной генерацией: монография / Ю.Е. Гуревич, П.В. Илюшин. Н. Новгород: НИУ РАН-ХиГС, 2018. 280 с.

4. Зарубежная электроэнергетика [Электронный ресурс]: Ассоциация «НП СОВЕТ РЫНКА» – 2020. Режим доступа: <https://www.np-sr.ru/ru/market/cominfo/foreign/index.htm>, свободный.

5. **Акимов И.** Балансирующая энергетика [Электронный ресурс] / И. Акимов // Газета.Ру. 2020. Режим доступа: <https://www.gazeta.ru/business/2019/12/06/12850154.shtml>, свободный.

6. Распределенная генерация [Электронный ресурс] // Газовые машины. 2020.

Режим доступа: <https://gmenergo.ru/gaspredeleennaya-generaciya>, свободный.

7. Единая энергетическая система России [Электронный ресурс] // Акционерное общество «Системный оператор Единой энергетической системы». Электрон. текстовые дан. 2020. Режим доступа: <https://www.so-ops.ru/?id=962>, свободный.

8. Об утверждении Правил технологического функционирования электроэнергетических систем и о внесении изменений в некоторые акты Правительства Российской Федерации : Постановление Правительства РФ от 13.08.2018 № 937 // Собрание законодательства. 2018. № 34. Ст. 5483.

9. Применение технологии блокчейн в распределенной генерации на основе возобновляемых источников энергии [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=37180207>, свободный.

10. О внесении изменений в некоторые акты Правительства Российской Федерации по вопросам функционирования активных энергетических комплексов: Постановление Правительства РФ от 21.03.2020 № 320 // Собрание законодательства. 2020. № 13. Ст. 1932.

11. Об утверждении Энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2035 года]: Распоряжение Правительства РФ от 09.06.2020 № 1523-р [Электронный

ресурс] // Официальный сайт Правительства Российской Федерации. 2020. Режим доступа: <http://static.government.ru/media/files/w4sigFOiDjGVDYT4IgsApssm6mZRb7wx.pdf>, свободный.

12. Рост тарифов в России. Прогноз до 2035 года [Электронный ресурс]: ООО «Центр энергетических инноваций». 2020. Режим доступа: http://www.altecology.ru/article/rost_tarifov_v_rossii_prognoz_do_2035_goda/, свободный.

13. Электроэнергия для промышленности в России в 2019 году оказалась дороже, чем в США и целом ряде стран Евросоюза [Электронный ресурс]: Ассоциация (некоммерческое партнерство) «Сообщество потребителей энергии». 2019. Режим доступа: <https://www.np-ace.ru/news/partnership/1384/>, свободный.

14. Оптовая цена на газ, добываемый ПАО «Газпром» и его аффилированными лицами, реализуемый потребителям Российской Федерации (Москва) с 1 июля 2013 по 1 июля 2024 [Электронный ресурс]: Газойл Медиа. 2020. Режим доступа: http://prices.gasoil.media/gas/dynamics/forecast/?analysis=gas&name=natural_gas&company_id=101&category=industry&source=consultantplus&group_id=102§ion_id=157, свободный.

15. **Жуков А.** Конкурентная модель. К 2026 году собственных энергоисточников станет в 3 раза больше, чем централизованных [Электронный ресурс] / А. Жуков. АО «ДП Бизнес Пресс», 2020. Режим доступа: https://www.dp.ru/a/2020/02/11/Konkurentnaja_model, свободный.

Смирнова Светлана Владимировна – специалист 1 категории Отдела балансов мощности, электроэнергетики и статистики Службы энергетических режимов, балансов и развития Филиала АО «СО ЕЭС» Тульское РДУ

Болотов Павел Викторович – старший диспетчер Оперативно-диспетчерской службы Филиала АО «СО ЕЭС» Владимирское РДУ

Петрушин Денис Евгеньевич – главный специалист Службы электрических режимов Филиала АО «СО ЕЭС» Карельское РДУ, инженер высшей школы высоковольтной энергетики Института энергетики ФГАОУ ВО «СПбПУ», преподаватель кафедры энергообеспечения предприятий и энергосбережения Физико-технического института ФГБОУ ВО «ПетрГУ»

Глухов Дмитрий Александрович – ведущий эксперт Отдела технического контроллинга Филиала АО «СО ЕЭС» Саратовское РДУ

Попов Максим Георгиевич – доктор технических наук, профессор высшей школы высоковольтной энергетики Института энергетики ФГАОУ ВО «СПбПУ»

Svetlana V. Smirnova – 1st Class Specialist, Department of Power Balance, Electricity and Statistics of the Energy Efficiency, Balances and Development Agency, Branch of SO UES JSC, Tula Regional Dispatching Office

Pavel V. Bolotov – Senior Dispatcher, Dispatching Service of System Operator of the United Power System, Vladimir branch

Denis E. Petrushin – Chief Specialist, Electrical Services of System Operator of the United Power System, Karelia branch, Engineer of the Higher School of High Voltage Energy of Institute of Energy SPbPU, Lecturer of Energy Supply for Enterprises and Energy Saving Department of the Institute of Physics and Technology PetrSU

Dmitry A. Glukhov – Leading Expert, Technical Controlling of System Operator of the United Power System, Saratov branch

Maksim G. Popov – D. Sc., Professor, Higher School of High Voltage Energy of the Institute of Energy SPbPU

Статья поступила в редакцию 20.01.20, принята к опубликованию 15.02.20

ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА

УДК 681.171.5

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ЭЛЕКТРОПОЕЗДА СЕРИИ ЭД9Т С ПОМОЩЬЮ НЕЧЕТКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ГИБРИДНОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

И.А. Менщиков

RESIDUAL OPERATION LIFE ASSESSMENT OF AN ELECTRIC TRACTION DRIVE IN THE ELECTRIC TRAIN ED9M USING A HYBRID FUZZY NEURAL NETWORK

I.A. Menschikov

Представлены результаты исследования в области прогнозирования остаточного ресурса элементов тягового электропривода типа РТ-51М электропоезда переменного тока серии ЭД9Т с помощью нечеткой модульной динамической нейронной сети. Проблемы оценки надежности тяговых электроприводов на железнодорожном транспорте с повышенным отработанным ресурсом предлагается решать с помощью имитационного моделирования гибридной нейронной сети ANFIS в пакете MATLAB 7. В результате моделирования статистических диагностических параметров контроля тягового электропривода были получены графики прогноза остаточного ресурса элементов тягового электропривода и представлены рекомендации по техническому обслуживанию электроприводов в зависимости от их технического состояния на текущий момент времени эксплуатации.

Ключевые слова: *техническая диагностика, контроль, тяговый электропривод, нечеткое моделирование гибридная нейронная сеть*

Модульные динамические нейронные сети (МДНС) призваны объединить в себе достоинства нейронных сетей и систем

The article presents the results of research into assessment of residual operation life of components of the electric traction drive RT-51M in the AC electric train ED9T using a fuzzy modular dynamic neural network. The problems relating reliability estimation of traction electric drives in the rail transport with an expired service life can be solved using simulation modeling of the ANFIS hybrid neural network based on the MATLAB 7 package. Modeling statistical diagnostic parameters applied to control traction electric drives allowed for designing the graphs to be used in forecasting residual operation life of traction drive components. The maintenance recommendations for electric drives are provided depending on their current technical status.

Keywords: *technical diagnostics, control, electric traction drive, hybrid fuzzy neural network*

нечёткого вывода. Они позволяют разрабатывать и представлять модели систем в форме правил нечётких продукций. В по-

следнее время аппарат МДНС считается специалистами как один из наиболее перспективных для решения задач прикладного системного анализа и прогнозирования остаточного ресурса элементов электромеханических систем.

Основная идея, положенная в основу модели МДНС, заключается в том, чтобы использовать существующую выборку данных для определения параметров функций принадлежности, которые лучше всего соответствуют некоторой системе нечеткого вывода. При этом для нахождения параметров функций принадлежности используются известные процедуры обучения нейронных сетей [1-4].

В пакете Fuzzy Logic Toolbox системы MATLAB искусственные нейронные сети реализованы в форме так называемой адаптивной системы нейронечеткого вывода ANFIS. ANFIS – адаптивная НС, основанная на системе нечеткого вывода (adaptive network based Fuzzy Inference System).

Задача исследования устойчивости функционирования тягового электропривода

(ТЭП) и прогнозирования остаточного ресурса состоит в том, чтобы разработать некоторую экспертную оценку, которая была бы реализована в виде системы нечеткого вывода и позволила бы определить устойчивость функционирования ТЭП на основе субъективных оценок входных диагностических признаков (параметров) [1, 2].

В качестве входных параметров системы нечеткого вывода будем рассматривать 3 нечеткие лингвистические переменные (паспортные значения ТЭП типа РТ-51М): изменение напряжения на обмотке якоря в пределах 10 % от номинального значения 825 В, изменение статического момента на валу якоря в пределах 10 % от номинального значения 1068 Нм и изменение тока в обмотке возбуждения главных полюсов пределах 10 % от номинального значения 270 А. Функцию нечеткой меры терм-множества первой лингвистической переменной T_1 зададим с помощью графика (рис. 1).

Функцию нечеткой меры терм-множества второй лингвистической переменной T_2 зададим с помощью графика (рис. 2).

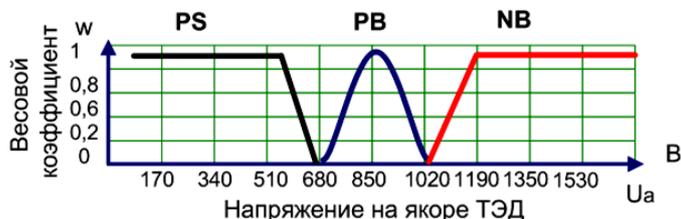


Рис. 1. Графики функции принадлежности для входного термина «Напряжение на якоре ТЭД»

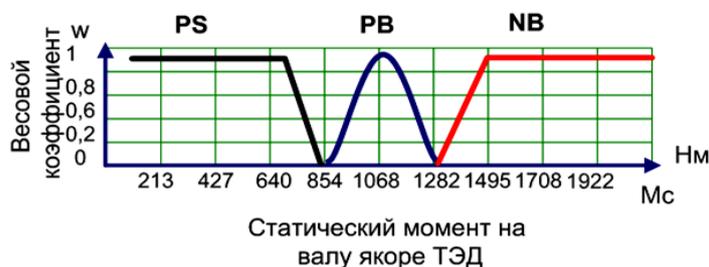


Рис. 2. Графики функции принадлежности для входного термина «Статический момент нагрузки на валу якоря ТЭД»

В качестве терм-множества первой лингвистической переменной «Напряжение на обмотке якоря ТЭД» будем использовать множество $T_1 = \{\text{«Минимальное напряжение на якоре } U_{\min}\text{», «Номинальное напряжение$

на якоре $U_{\text{ном}}\text{»}, \text{«максимальное напряжение на якоре } U_{\text{max}}\text{»}\}$, в качестве терм-множества второй лингвистической переменной «Статический момент на валу якоря ТЭД» будем использовать множество $T_2 = \{\text{«Минималь-$

ная статическая нагрузка M_{\min} », «Номинальная статическая нагрузка $M_{\text{ном}}$ », «Максимальная статическая нагрузка M_{\max} »}, в качестве терм-множества третьей лингвистической переменной «Ток в обмотке возбуждения ТЭД» будем использовать множество $T_3 = \{\text{«Минимальный ток в обмотке возбуждения } I_{b,\min}\text{», «Номинальный ток в обмотке возбуждения } I_{b,\text{ном}}\text{», «Максимальный ток в обмотке возбуждения } I_{b,\max}\text{»}\}$.

Функцию нечеткой меры терм-множества второй лингвистической пере-

менной T_3 зададим с помощью графика (рис. 3).

В качестве терм-множества выходной лингвистической переменной «Устойчивость функционирования ТЭП» будем использовать терм-множества $T_3 = \{\text{«Устойчивое функционирование ТЭП», «Неустойчивое функционирование ТЭП (межвитковое замыкание секций обмотки якоря ТЭД)»}\}$. Запишем лингвистические значения выходных диагностических параметров тягового электропривода в табл. 1.

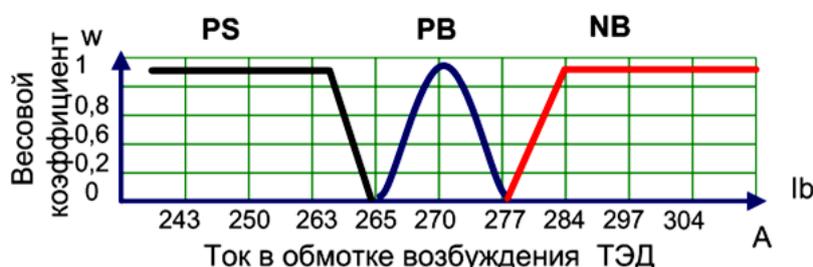


Рис. 3. Графики функции принадлежности для входного термина «Ток в цепи обмотки возбуждения ТЭД»

Таблица 1

Лингвистические значения выходных диагностических параметров тягового электропривода

Наименование диагностического параметра	PB Положительное большое (все параметры на уровне нормативных)	PS Положительное малое (отклонение диагностических признаков на уровне допустимого)	NS Отрицательное малое (наличие диагностических признаков аварии на начальной стадии развития)	NM Отрицательное среднее (наличие устойчивых диагностических признаков дефекта)	NB Отрицательное большое (наличие устойчивых диагностических признаков значительного развития дефекта)
Значение тока в цепи якоря ТЭД I_a , А	<357> 321; 392	>410	>428	>464	>499
Значение электромагнитного момента ТЭД $M_{эм}$, Нм	<878> 790; 966	>1009	>1053	>1141	>1129
Значение угловой частоты вращения якоря ТЭД ω , рад/с	<158> 153; 187	134<	126<	110<	94,8<
Значение активной мощности ТЭД P , кВт	<170> 153; 187	>195	>204	>221	>280

Наименование диагностического параметра	PB Положительное большое (все параметры на уровне нормативных)	PS Положительное малое (отклонение диагностических признаков на уровне допустимого)	NS Отрицательное малое (наличие диагностических признаков аварии на начальной стадии развития)	NM Отрицательное среднее (наличие устойчивых диагностических признаков дефекта)	NB Отрицательное большое (наличие устойчивых диагностических признаков значительного развития дефекта)
Значение полной мощности ТЭД S , кВА	<200> 180; 220	>230	>240	>260	>280
Значение коэффициента потери мощности K_m	<0,85> 0,76; 0,93	0,72<	0,68<	0,59<	0,51<

С помощью нечеткой модели МДНС рассмотрим процесс прогнозирования остаточного ресурса тягового электропривода типа РТ-51М в устойчивом режиме функционирования.

Цель процесса прогнозирования остаточного ресурса ТЭП с помощью нечеткой модели МДНС заключается в том, что, зная динамику изменения лингвистических коэффициентов K_i тягового электропривода (PB, PS, NS, NM, NB), характеризующих изменение диагностических параметров в момент времени $(t - t_0)$ за фиксированный момент времени, возможно предсказание значений лингвистических коэффициентов K_i на определенный момент в будущем.

Значение лингвистических коэффициентов можно определить как

$$K_i = \frac{PB_i}{NS_i}, \quad (1)$$

где PB_i – положительное лингвистическое значение диагностических параметров, при этом большинство диагностических параметров соответствуют нормативным значениям, ТЭП функционирует устойчиво; NS_i – отрицательное малое лингвистическое значение диагностических параметров, наличие признаков отказов на начальной стадии.

В качестве исходных данных воспользуемся информацией о динамике изменения

лингвистических коэффициентов K_i за определенный интервал времени. Исходную информацию предоставим в табличной форме (табл. 2), за начало отсчета примем время $T = 0$. Для решения задачи прогнозирования могут применяться различные модели технического анализа, основанные на использовании различных параметров (индикаторов) технического состояния электроподвижного состава.

Однако наличие неявных тенденций в динамике изменения лингвистического коэффициента K_i , позволяет использовать модель адаптивных динамических нейронных сетей.

Для создания обучающей выборки значений лингвистических коэффициентов K_i предположим, что нечеткая модель МДНС будет иметь 4 входные переменные. При этом первая входная переменная будет соответствовать K_i на текущий момент времени, или 132-й месяц эксплуатации ТЭП, вторая переменная – K_i на предыдущее время $(i - 1)$, т.е. 126-й месяц эксплуатации ТЭП. Третья входная переменная будет соответствовать K_i на время $(i - 2)$, т.е. 120-й месяц эксплуатации ТЭП. Четвертая переменная K_i будет соответствовать $(i - 3)$, т.е. 114-й месяц эксплуатации ТЭП. Соответствующие обучающие данные запишем в табл. 3.

Таблица 2

Исходная информация динамики изменения параметров контроля исправного электропривода типа РТ-51М

№	T, мес.	K ₁	Лингвист. значение	№	T, мес.	K ₁	Лингвист. значение	№	T, мес.	K ₁	Лингвист. значение
1	0	1	PВ	9	48	0,985	PВ	17	96	0,939	PВ
2	6	1	PВ	10	54	0,985	PВ	18	102	0,927	PВ
3	12	0,995	PВ	11	60	0,983	PВ	19	108	0,915	PВ
4	18	0,994	PВ	12	66	0,978	PВ	20	114	0,910	PВ
5	24	0,994	PВ	13	72	0,978	PВ	21	120	0,870	PS
6	30	0,991	PВ	14	78	0,964	PВ	22	126	0,834	NS
7	36	0,991	PВ	15	84	0,964	PВ	23	132	0,769	NM
8	42	0,991	PВ	16	90	0,952	PВ	24	138	0,765	NВ

Таблица 3

Значения лингвистических коэффициентов обучающих данных

1-я входная переменная	2-я входная переменная	3-я входная переменная	4-я входная переменная	Выходная переменная
0,994	1	1	1	0,994
0,994	0,995	1	1	0,991
0,991	0,994	0,995	0,995	0,991
0,991	0,994	0,994	0,994	0,991
0,991	0,991	0,994	0,994	0,985
0,985	0,985	0,991	0,991	0,983
0,983	0,983	0,985	0,985	0,983
0,983	0,983	0,983	0,983	0,978
0,978	0,978	0,983	0,983	0,964
0,964	0,964	0,978	0,978	0,952
0,952	0,952	0,964	0,964	0,939
0,939	0,939	0,952	0,952	0,927
0,927	0,927	0,939	0,939	0,915
0,915	0,915	0,927	0,927	0,910
0,910	0,910	0,915	0,927	0,870
0,870	0,870	0,910	0,925	0,834
0,834	0,876	0,876	0,920	0,834
0,834	0,870	0,876	0,915	0,769
0,769	0,834	0,870	0,910	0,764

Сохраним обучающую выборку во внешнем файле под именем Prognoz. dat. После этого откроем редактор программы

ANFIS с помощью команды anfisedit, которая позволяет загрузить обобщенную выборку (рис. 4).

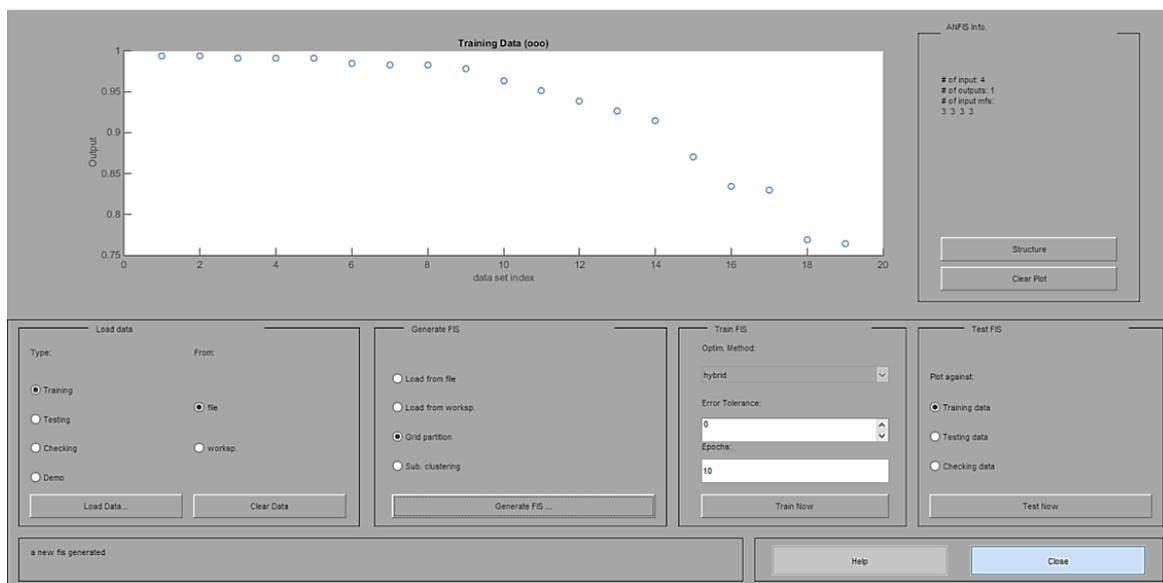


Рис. 4. Графический интерфейс редактора ANFIS после загрузки и обучающих данных

Перед началом генерации структуры МДНС нечеткого вывода типа Сугено после вызова диалогового окна (рис. 5) зададим для каждой из входных переменных по три лингвистических термина, а в качестве типа их функции активации выберем треугольные функции.

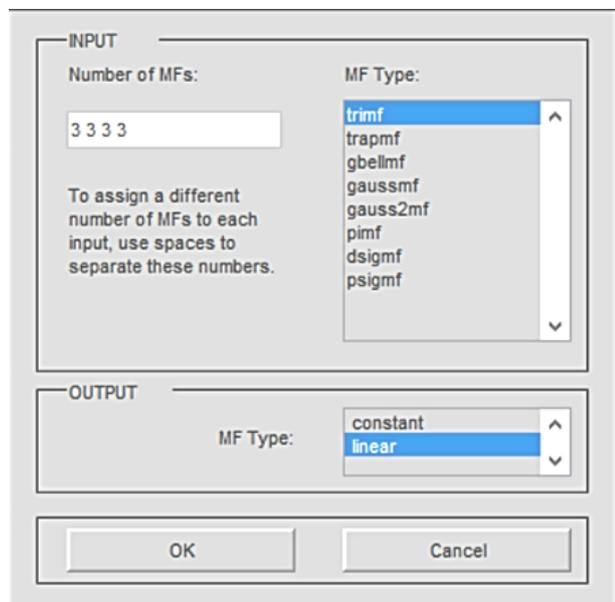


Рис. 5. Диалоговое окно задания качества и типа функции принадлежности

Для обучения МДНС воспользуемся методом обучения с уровнем ошибки 0, количество циклов обучения зададим 10. После процесса обучения МДНС можно выпол-

нить анализ графика ошибки обучения (рис. 6), процесс обучения практически заканчивается после 18-го цикла.

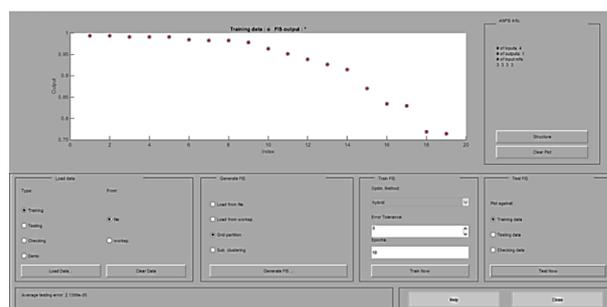


Рис. 6. График зависимости ошибки обучения от количества циклов

После обучения МДНС можно оценить структуру полученной модели МДНС (рис. 7).

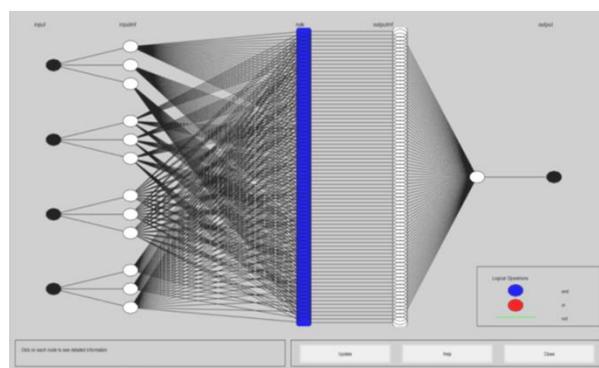


Рис. 7. Структура сгенерированной системы нейронечеткого вывода

Для выполнения соответствующих операций можно воспользоваться редактором функций принадлежности.

На рис. 8 представлен вид функции принадлежности для первой входной переменной. Однако до проверки адекватности построенной нечеткой модели оставим все параметры функций принадлежности без изменений.

С помощью графического редактора Fuzzy системы MATLAB можно контролировать настройку параметров функции принадлежности (активации) входных переменных и правил нечеткой логики.

Выполним проверку адекватности построенной нечеткой модели гибридной сети. Для этой цели сделаем ретроспективный прогноз значения SR на будущее время, например, на 138 месяц, считая для этого случая текущим 132 месяц. С помощью программы просмотра правил нечеткого вывода (рис. 9), определим значение прогнозируемого коэффициента $K_{138} = 0,764$.

Для окончательного анализа разработанной нечеткой модели можно воспользоваться программой просмотра поверхности нечеткого вывода View>Surface редактора FIS (рис. 10).

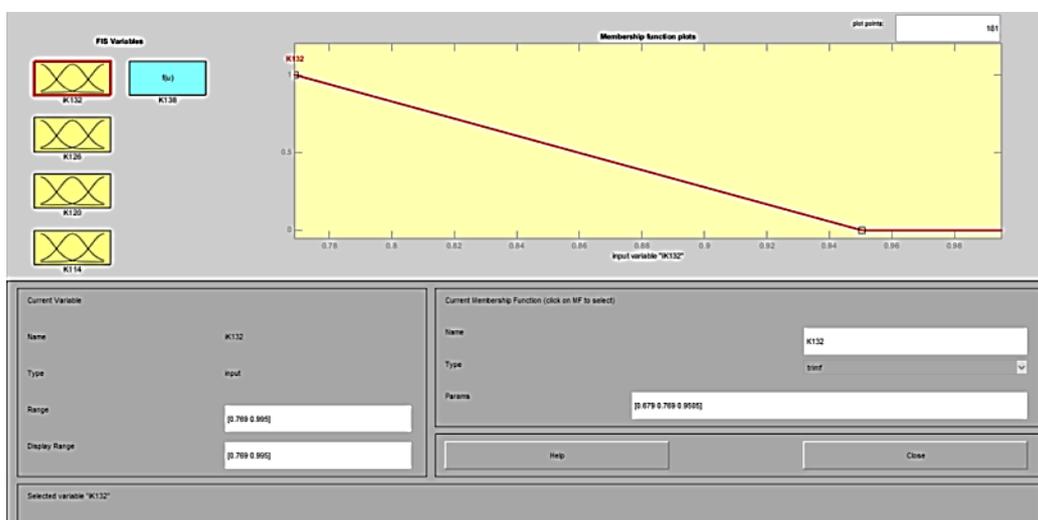


Рис. 8. Вид функции принадлежности построенной системы нейронечеткого вывода для первой входной переменной



Рис. 9. Вид программы просмотра правил нечеткого вывода

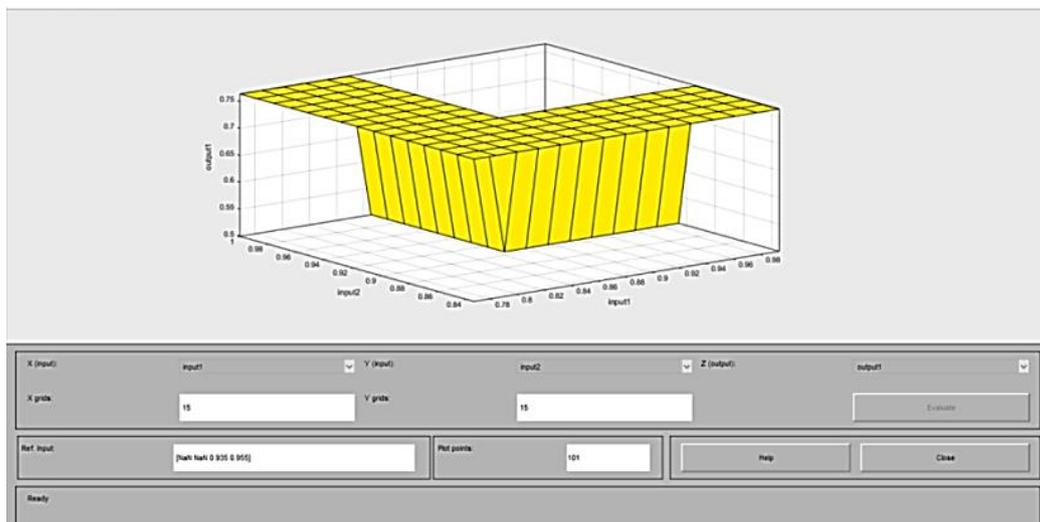


Рис. 10. Вид программы просмотра поверхности нечеткого вывода для разработанной нечеткой модели прогнозирования ТЭП

Процесс нечеткого моделирования предполагает анализ результатов (прогнозирование коэффициента нечеткого вывода K_{138} после 138 месяцев эксплуатации ТЭП) с целью установления адекватности разработанной нечеткой модели (в данном случае система нечеткого вывода спрогнозировала коэффициент $K_{138} = 0,764$). Сравнивая полученное значение коэффициента нечеткого вывода с соответствующим табличным значением из табл. 3, можно констатировать абсолютное совпадение этих значений. Таким образом, проверка построенной нечеткой модели модульной динамической гибридной сети показывает достаточно высокую степень адекватности реальным исходным данным, что позволяет сделать вывод о возможности ее практического использования для прогнозирования остаточного ресурса элементов ТЭП и организации технического обслуживания по фактическому состоянию элементов ТЭП и

недопущению аварийных отказов, т.е. ТЭП необходимо обслуживать после 99360 часов эксплуатации.

Согласно инструкции ЦТ-ЦТВР-4782 «Правила ремонта электрических машин электроподвижного состава» в среднем по сети железных дорог между видами ремонта электрических машин в каждом интервале цикла устанавливаются следующие нормы пробега в тыс. км: для электрических машин электровозов – 350; для электрических машин электропоездов – 300; но не более 8 лет эксплуатации. Поэтому для повышения эффективности технического обслуживания электрических машин электроподвижного состава можно использовать рассмотренный подход нечеткого прогнозирования ТЭП, который является перспективным направлением организации технического обслуживания электрических машин по их фактическому состоянию.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Леоненков А.В.** Нечеткое моделирование в среде MATLAB fuzzy TECH / А.В. Леоненков. СПб.: БХВ – Петербург, 2003. 736 с.

2. **Менщиков И.А.** Математическое моделирование в программе Matlab/Fuzzy Logic Toolbox устойчивости функционирования тягового электропривода постоянно-

го тока электропоезда серии ЭД9Т / И.А. Менщиков, С.И. Баташов // Электроника и электрооборудование транспорта. 2019. № 4. С. 43-47.

3. Применение методов нейронных сетей и генетических алгоритмов в системах управления электроприводами / В.Б. Клепиков, С.А. Сергеев, К.В. Махотило,

И.В. Обруч // Электротехника. 1999. № 5. С. 2-6.

4. **Дорогов А.Ю.** Теория и проектирование быстрых перестраиваемых преобра-

зований и слабосвязанных нейронных сетей. / А.Ю. Дорогов. СПб.: Политехника, 2014. 328 с.

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

Igor A. Menshikov – PhD, Associate Professor, Department of Electric Power Engineering and Electrotechnology, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 10.01.20, принята к опубликованию 15.02.20

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.

ЭЛЕКТРОДИНАМИКА

УДК 621.313.17: 621.928.1

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ СЕПАРАТОРОВ ДЛЯ ИНДУКЦИОННОЙ СОРТИРОВКИ АВТОМОБИЛЬНОГО ЛОМА

А.Ю. Коняев, Ж.О. Абдуллаев, Д.Н. Багин, С.И. Фоминых

INVESTIGATION OF ELECTRODYNAMIC SEPARATORS FOR INDUCTION SORTING OF AUTOMOBILE SCRAP

A.Yu. Konyayev, Z.O. Abdullaev, D.N. Bagin, S.I. Fominykh

Анализ литературных источников позволил выявить тенденции роста доли алюминия в конструкциях автомобилей и увеличения номенклатуры применяемых алюминиевых сплавов, как литейных, так и деформируемых. С учетом этого при промышленной переработке автомобильного лома целесообразно не только извлекать цветные металлы из шредерных отходов, но и сортировать цветные металлы по видам, группам и маркам сплавов. Проведенные теоретические и экспериментальные исследования показали возможность использования для индукционной сортировки автомобильного лома электродинамических сепараторов с бегущим магнитным полем.

Ключевые слова: электродинамическая сепарация, индукционная сортировка металлов, результаты исследований

Одним из направлений развития экономики является рост производства вторичных металлов. Это обусловлено целым рядом факторов: экономических, связанных с сокращением издержек на производство металлов из вторсырья по сравнению с производством их из минерального сырья, и экологических, отражающих степень предотвращения негативного воздействия отходов горнодобывающих и металлургических производств на окружающую среду. В наибольшей степени указанные достоинства присущи производству вторичных алюминиевых

Analysis of the sources of literature facilitated finding out the trends in the growing share of aluminum used in car designs, and an increase in the nomenclature of applied aluminum alloys both cast and wrought. Therefore, at industrial recycling of the automobile scrap, it is advisable not only to extract non-ferrous metals from the auto shredder residue, but also sort out the non-ferrous alloys by type, group, and alloy grade. The conducted theoretical and experimental studies have shown a possibility to utilize electrodynamic separators with a traveling magnetic field in induction sorting of automobile scrap.

Keywords: eddy current separation, induction sorting of metals, research results

сплавов [1-2]. Мировое производство вторичных металлов непрерывно растет и становится соизмеримым с производством металлов из минерального сырья. Например, в странах Евросоюза и США доля рециклинга в производстве алюминия составляет около 40 % [1]. В нашей стране доля вторичного сырья в производстве алюминия пока не столь велика. Это объясняется тем, что значительная часть амортизационного лома, на долю которого приходится до 40 % потенциального вторичного сырья, безвозвратно теряется в связи с нехваткой современных про-

изводств по переработке отходов. Основной причиной этого является отсутствие отечественных технологий и оборудования для сбора и дометаллургической подготовки лома и отходов цветных металлов [3-4].

Другой проблемой вторичной цветной металлургии является низкое качество сплавов, получаемых из вторичного сырья [2-4]. Это объясняется тем, что чаще всего такое сырье поступает на металлургические заводы в виде смешанного несортированного лома. Например, по данным [3] в нашей стране в 2018 г. в структуре производства вторичного алюминия преобладали подготовительные (базовые) сплавы (38 %) и литейные сплавы (19 %). При отсутствии сортировки лома для получения из вторичного алюминиевого сырья качественных сплавов как у нас в стране, так и за рубежом основным методом остается разбавление расплавов первичным алюминием [5-6].

Необходимость решения указанных проблем можно увязать с необходимостью развития в нашей стране индустрии авторециклинга, поскольку при промышленной переработке автомобильного лома значительное внимание уделяется технологиям получения селективных концентратов металлов. Возможностям рециклинга алюминиевых сплавов и сплавов других цветных металлов из автомобильного лома посвящена данная статья.

Лом вышедших из эксплуатации транспортных средств (ВЭТС, по международной терминологии – ELV – end-of-life vehicle) является одним из быстрорастущих многотоннажных видов твердых отходов. При этом 70-80 % от массы автомобиля приходится на черные и цветные металлы, что делает автомобильный лом одним из основных ресурсов вторичной металлургии. По данным [7,8], в мире действует около 800 заводов по утилизации ВЭТС, имеющих шредерные установки для фрагментации и дробления автомобилей и линии сортировки материалов с выделением утилизируемых компонентов. При этом коэффициент вторичной переработки материалов (использование в качестве вторсырья) в ЕС достигает 85 % от массы автомобиля, а коэффициент утилизации (вклю-

чая сжигание остатков с получением энергии) – 95 %. В России количество шредерных заводов можно пересчитать по пальцам одной руки [9]. При этом расположены они только в европейской части страны (Московская, Ленинградская, Белгородская области, Краснодарский край) и не способны решить проблемы авторециклинга даже в указанных регионах. В сложившейся ситуации представляется актуальным анализ технологических схем утилизации ВЭТС с учетом мирового опыта в области авторециклинга и тенденций развития автомобилестроения.

В обзорной публикации японских и европейских исследователей [8] представлены наиболее распространенные технологические схемы шредерных заводов и описано применяемое технологическое оборудование. Обобщенная технологическая схема утилизации автолома с некоторыми дополнениями авторов статьи приведена на рис. 1. Сбор ВЭТС производится непосредственно на шредерных заводах либо на предприятиях, занимающихся демонтажом автомобилей.

На первой стадии производится удаление из автомобилей экологически опасных (топливо, эксплуатационные жидкости, фильтры, газобаллонное оборудование, детали, содержащие ртуть и др.) и обязательных (пиропатроны подушек безопасности) компонентов. Далее выполняется частичный демонтаж автомобилей, предполагающий снятие ряда ресурсоценных компонентов для последующей экономически эффективной утилизации либо восстановления (шины, бамперы, аккумуляторные батареи, электронные блоки и т.п.). На данном этапе желателен демонтаж электрооборудования, на которое приходится основное содержание меди в автомобиле, поскольку выделение меди и медных сплавов, представленных проводниками, контактами, мелкими деталями, на последующих стадиях (после дробления) затруднительно. В то же время попадание медных включений в виде сростков в ферромагнитную фракцию является одним из основных факторов ухудшения качества стали, выплавляемой из автолома.



Рис. 1. Технологическая схема утилизации ВЭТС

После этого производится дробление автомобилей на шредерных установках. В результате происходит уменьшение размеров и раскрытие материалов, при этом с измельченных фрагментов сбиваются краска, ржавчина и другие загрязнения. После дробления материалы подвергаются магнитной сепарации и разделяются по крупности путем грохочения. Надрешетные фракции (куски крупнее 60-65 мм) разбираются вручную, при этом цветные металлы могут идентифицироваться с помощью металлоанализаторов (например, лазерных или рентгеновских спектрометров). Мелкие фракции поступают на механизированную обработку. С помощью пневмосепарации из смеси материалов извлекается легкая фракция, содержащая ткани, резину, некоторые виды пластиков. На этой стадии возможна дополнительная магнитная сепарация для удаления мелких включений черных металлов и сростков. Затем с применением электродинамической сепарации или сепарации в тяжелых средах разделяются оставшиеся материалы: прежде всего, цветные металлы отделяются от остальных отходов (окалина, краска, стекло, тяжелые полимеры и др.).

Следует отметить, что указанные технологии выделения цветных металлов из дробленого автолома освоены лишь на отдельных заводах. При этом выделяемая фракция представляет собой коллективный концентрат металлов, содержащий преимущественно алюминий. Как отмечалось, из такого лома могут быть получены только литейные сплавы алюминия. В автомобилях, выпущенных до 2010 г., доля алюминиевых сплавов была относительно невелика (6-10 % от массы автомобиля), поэтому литейные сплавы, изготавливаемые из сырья, полученного на шредерных заводах, возвращались в автомобильную промышленность. В настоящее время с учетом устойчивой тенденции уменьшения массы автомобилей за счет применения легких сплавов ситуация изменилась: в автомобилях ведущих мировых автомобильных компаний доля алюминия достигла уже 15-20 % и прогнозируется ее рост в последующие десятилетия до 30-40 % [6, 10-11]. Это приводит к тому, что получаемое на шредерных заводах вторичное алюминиевое сырье становится избыточным для производства отливок для автомобилестроения, а для других

применений получаемые вторичные сплавы непригодны.

Наряду с ростом доли алюминия следует отметить расширение списка алюминиевых сплавов, применяемых в автомобилестроении, прежде всего за счет деформируемых сплавов. Ранее для изготовления деталей моторов, корпусов коробок передач и т.д. широко применялись литейные алюминиевые сплавы (марки по ISO-209-1: А359, А356, А361, А413 и др.). В последние годы к ним добавляются конструкции, выполненные из деформируемых сплавов алюминия (АА6060, АА6061, АА6063, АА6016, АА3003, АА5754 и др.): рамы корпуса, каркасы сидений, обшивка салона и дверей, бамперы, теплообменники и др. [10-11]. Отмечается, что рост доли алюминия в автомобиле происходит за счет увеличения количества деталей и компонентов из деформируемых сплавов, масса которых к 2030 г. может превысить массу деталей из литейных сплавов.

Увеличение доли легких сплавов (кроме алюминиевых, сплавы магния, цинка и др.) в автоломе требует совершенствования технологий извлечения его из смеси материалов, получаемых после дробления, прежде всего, в направлении селективного сбора металлов. С учетом этого предлагается дополнить технологическую схему шредерного завода, представленную на рис. 1, дополнительными операциями. При этом представляется целе-

сообразным решение трёх последовательных технологических задач:

- выделение цветных металлов из потока неметаллов после шредерной обработки и магнитной сепарации;
- разделение лома цветных металлов по видам сплавов (алюминиевые, магниевые, медные, цинковые);
- разделение алюминиевого лома по группам и маркам сплавов.

Для реализации указанных операций целесообразно использовать методы электродинамической сепарации, основанные на различии физических свойств цветных металлов и сплавов (прежде всего, удельной электропроводности и плотности). Такие методы являются экологически чистыми, в частности не требуют применения технологических жидкостей и не создают новых отходов.

Основные конструкции сепараторов, применяемых для решения первой технологической задачи (выделения металлов из потока неметаллов), показаны на рис. 2. Сепараторы на основе вращающихся индукторов с постоянными магнитами отличаются малым энергопотреблением, поскольку не требуют энергии на возбуждение магнитного поля. Сепараторы на основе линейных индукторов легко вписываются в готовые технологические линии, отличаются простотой конструкции и высокой производительностью.

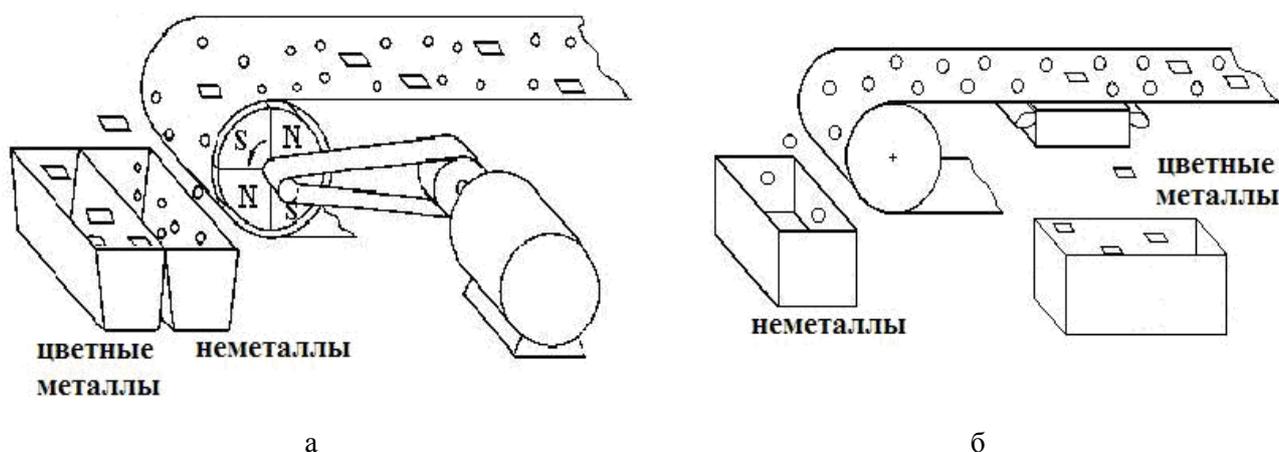


Рис. 2. Электродинамические сепараторы с вращающимся индуктором на основе постоянных магнитов (а) и с линейным индуктором (б)

Наиболее существенными факторами, влияющими на эффективность сепарации, являются размеры извлекаемых металлических частиц и их электропроводность. Для оценки такого влияния выполнены исследования опытных установок для сортировки

сплавов цветных металлов с использованием образцов металлов, предоставленных заинтересованными предприятиями. Для целевого исследования отобраны сплавы, применяемые в автомобилестроении. Физические свойства таких сплавов показаны в табл. 1.

Таблица 1

Физические свойства некоторых сплавов цветных металлов, содержащихся в автомобильном ломе

Сплав	Удельная электропроводность γ , МСм/м	Плотность ρ , г/см ³	Разделительный признак $\gamma/\rho \times 10^{-3}$, (См \times м ²)/кг
АД31	29	2,71	10,7
АЛ2 (АК12)	18,2	2,65	6,87
АМГ3,5	17,5	2,66	6,58
МЛ5	7,5	1,81	4,12
ЦАМ4-1	16,5	6,7	2,46
Л63	14,5	8,47	1,71

При исследованиях использовались частицы квадратной формы со стороной квадрата от 10 до 60 мм. Например, на рис. 3 показаны зависимости удельного электромагнитного усилия ($F_m = F_{эм}/m$ – отношение электромагнитного усилия к массе частицы, Н/кг или м/с²) от крупности частиц b при одинаковой их толщине $d = 2$ мм,

рассчитанные по методике, разработанной в УрФУ [12, 13]. Параметры одностороннего линейного индуктора: полюсное деление $\tau = 0,198$ м; частота питающей сети $f = 50$ Гц; амплитуда линейной плотности тока индуктора $J_{nm} = 100000$ А/м; скольжение $s = 1$; удаление частицы от поверхности индуктора равно $h = 0,005$ м.

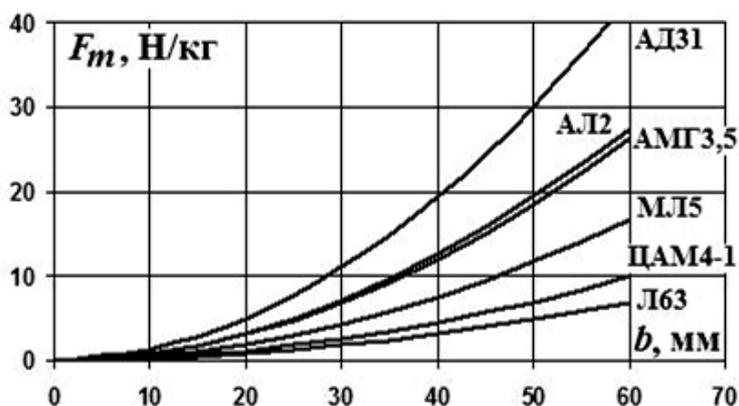


Рис. 3. Зависимости удельных электромагнитных усилий от крупности частиц разных сплавов

Удельное усилие, требуемое для сепарации, зависит от ширины ленты и скорости конвейера, от коэффициента трения, от вязкости материалов в потоке, определяющей силы сопротивления среды. Требуемое усилие растет с увеличением производи-

тельности установки. При этом электромагнитное усилие может оказаться недостаточным для извлечения мелких частиц. В приведенном примере при требуемом усилии 20 Н/кг надежно будут извлекаться только частицы сплава АД31 крупностью

более 40 мм. Для извлечения металлических частиц малой крупности необходимо увеличивать частоту и интенсивность бегущего магнитного поля либо искать пути снижения требуемых для сепарации усилий. Первый путь связан с ростом энергопотребления и увеличением нагрева обмоток. Поэтому основные исследования были направлены на снижение требуемых усилий. Расчеты показали, что за счет рационального выбора размеров сепаратора и расположения линейных индукторов на конвейере можно снизить требуемое усилие до уровня 4-5 Н/кг [12]. Как видно на рис. 3, в этом случае для рассматриваемой установки из потока отходов будут извлекаться частицы всех сплавов крупностью более 40 мм и частицы алюминиевых сплавов крупнее 15-20 мм. Для увеличения выхода из отходов мелких фракций металлов целесообразно перед электродинамической сепарацией разделять поток материалов по крупности, например выделять фракции +30 –65 мм и +0 –30 мм. При этом для обработки мелкой фракции появляется возможность использовать более мощный сепаратор с двухсторонним линейным индуктором и зазором 35-40 мм.

Более сложной технологической задачей является сортировка извлеченного лома по видам сплавов, а также разделение деформируемых и литейных алюминиевых спла-

вов. В этом случае наиболее значимым показателем становится селективность сепарации. Принципиальная возможность индукционной сортировки сплавов цветных металлов, извлекаемых из дробленого автолома, видна из табл. 1 и рис. 3. Качество сортировки можно охарактеризовать коэффициентом селективности $k_{сел}$, который предварительно можно определить как отношение удельных электромагнитных усилий, действующих на частицы разных сплавов. В примере, рассмотренном выше, для сепаратора с полюсным делением $\tau = 0,198$ м при размере частиц 60 мм для пары АД31 (сплав 1) и АЛ2 (сплав 2) коэффициент равен

$$k_{сел1-2} = \frac{F_{m1}}{F_{m2}} = \frac{42,9}{27,6} = 1,56.$$

Можно отметить, что для рассматриваемых параметров сепаратора коэффициенты селективности, определенные через отношение удельных электромагнитных усилий, практически совпадают с коэффициентами, рассчитанными через разделительный признак (отношение γ/ρ). Значения коэффициентов селективности, определенные указанным образом для сплавов, представленных в табл. 1, при одинаковой крупности частиц показаны в табл. 2.

Таблица 2

Коэффициенты селективности для пар разных сплавов при крупности частиц 60 мм

	АД31	АЛ2	АМГ3,5	МЛ5	ЦАМ4-1	Л63
АД31	1,00	–	–	–	–	–
АЛ2	1,56	1,00	–	–	–	–
АМГ3,5	1,63	1,04	1,00	–	–	–
МЛ5	2,60	1,67	1,60	1,00	–	–
ЦАМ4-1	4,35	2,79	2,67	1,67	1,00	–
Л63	6,26	4,02	3,85	2,41	1,44	1,00

Как видно из табл. 2, при одинаковой крупности частиц удельные электромагнитные усилия в большинстве случаев существенно различаются. Это обеспечивает различие траекторий движения ча-

стиц и возможность сортировки сплавов. Исключение составляет пара алюминиевых сплавов АЛ2 и АМГ3,5, которые не могут быть разделены рассматриваемым методом.

Однако в реальных производственных условиях сепарации подвергаются частицы металлов в широком диапазоне размеров при различной их форме и ориентации в бегущем магнитном поле. Все эти факторы обуславливают уменьшение коэффициентов селективности. Для конструкций сепараторов, показанных на рис. 2, к указанным возмущающим факторам добавляются неодинаковое расположение частиц на ленте конвейера, различия в силах сопротивления движению и др. По этим причинам рассмотренные конструкции сепараторов с подачей материалов по ленте конвейера для индукционной сортировки сплавов цветных металлов непригодны. Для такой сортировки предпочтительна

конструкция сепаратора на основе линейных индукторов с подачей материалов по наклонной плоскости, показанная на рис. 4. В этой установке сортируемые материалы подаются вдоль линии подачи узким потоком, ширина которого определяется размером частиц. При этом все металлические частицы имеют одинаковые начальные условия, и различия в траекториях их движения зависят только от физических свойств частиц и их размеров. Кроме того, в таком сепараторе появляются дополнительные возможности по формированию траекторий движения частиц, например за счет изменения размеров и расположения линейного индуктора, а также изменения размеров плоскости подачи.

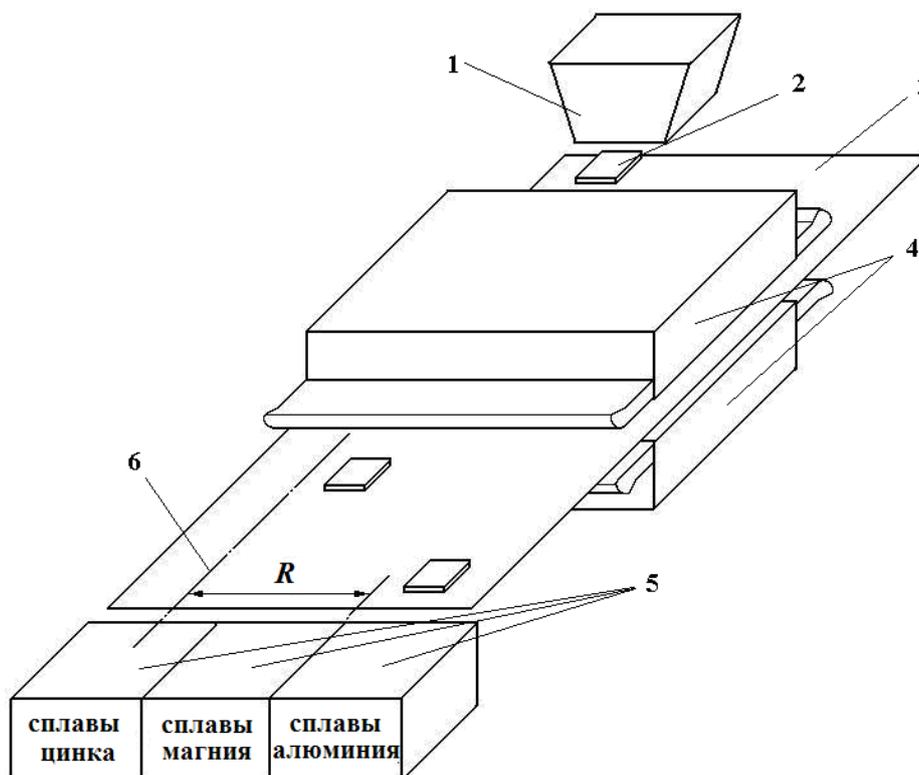


Рис. 4. Электродинамический сепаратор на основе двустороннего линейного индуктора с подачей материала по наклонной плоскости: 1 – загрузочный бункер; 2 – частица металла; 3 – плоскость подачи; 4 – линейные индукторы; 5 – приемники металлов; 6 – линия подачи; R – положение разделителя потока

Как показано на рис. 4, частицы разных сплавов под действием электромагнитных сил будут отклоняться от линии подачи на разные расстояния, зная которые, можно определить положение разделителей потока (R) и приемников продуктов разделе-

ния. В этом случае качество сортировки сплавов будет характеризоваться различием в итоговых отклонениях частиц в конце плоскости подачи. Ранее в работах [12, 14] на основе решения уравнений движения частиц в сепараторе рассматриваемого ти-

па с учетом совместного действия на них электромагнитных и механических сил была показана возможность расчета траекторий движения частиц и их отклонений от линии подачи. По указанной методике были рассчитаны итоговые отклонения частиц в зависимости от величины удельных электромагнитных усилий F_m при различных размерах плоскости (L_n – расстояние от индуктора до приемников). Параметры опытной установки: ширина индуктора –

$L_u = 0,15$ м; расстояние от точки подачи до индуктора – $L_0 = 0,130$ м; угол наклона плоскости – $\alpha = 30^\circ$; коэффициент трения – $k_{mp} = 0,35$; скорость частицы в начальной точке – $V_k = 0$ м/с. Значения электромагнитных усилий соответствуют полученным ранее данным, представленным на рис. 3. Результаты расчетов отклонений частиц от линии подачи представлены в табл. 3.

Таблица 3

Отклонения частиц в сепараторе в зависимости от удельных электромагнитных усилий при разных расстояниях от индуктора до приемников

$L_n, \text{ м}$	Удельное электромагнитное усилие, $F_m, \text{ Н/кг}$				
	0	10	20	30	40
0	0	0,085	0,186	0,287	0,388
0,3	0	0,253	0,626	0,998	1,368
0,6	0	0,296	0,899	1,496	2,089

Представленные в табл. 3 результаты расчетов наглядно демонстрируют возможности предлагаемой конструкции сепаратора, связанные с увеличением селективности сортировки. Конечный результат сепарации можно охарактеризовать коэффициентом сепарации, определенным через итоговые отклонения частиц от линии подачи. Например, когда на частицу первого сплава действует удельное электромагнитное усилие 40 Н/кг, а на частицу второго – 10 Н/кг, коэффициент селективности, определенный предварительно через такие усилия, составляет $k_{сел1-2} = 4,0$. В то же время коэффициент селективности, определенный через итоговые отклонения частиц по табл. 3, равен $k_{сел1-2} = 1,368/0,253 = 5,41$ (для расстояния $L_n = 0,3$ м) и 7,06 (для $L_n = 0,6$ м). Как видно из примера, увеличение расстояния L_n является одним из простых и эффективных способов повышения селективности сортировки сплавов цветных металлов.

Теоретические выводы были подтверждены в ходе экспериментальных исследований опытной установки электродинами-

ческой сепарации, подобной показанной на рис. 4. В ходе экспериментов измерялись отклонения частиц различных размеров из сплавов цветных металлов, представленных в табл. 1. Для уменьшения влияния случайных факторов опыты повторялись многократно с последующей обработкой результатов методами математической статистики [15]. Некоторые из результатов экспериментов представлены на рис. 5. Варьируемым параметром в ходе опытов являлось расстояние от точки подачи до входного края линейного индуктора L_0 . На рис. 5 можно видеть разброс отклонений частиц одного и того же сплава при изменении крупности частиц от 20 до 40 мм. В то же время сегменты, соответствующие сплавам АД31 и ЦАМ4-1, не пересекаются, что свидетельствует о возможности получения селективных концентратов данных сплавов в указанном диапазоне крупности. Например, при подаче металлических частиц с расстояния $L_0 = 0,1$ м можно расположить разделитель потока на расстоянии $R = 0,1$ м и получить надежное разделение частиц данных сплавов на фракции.

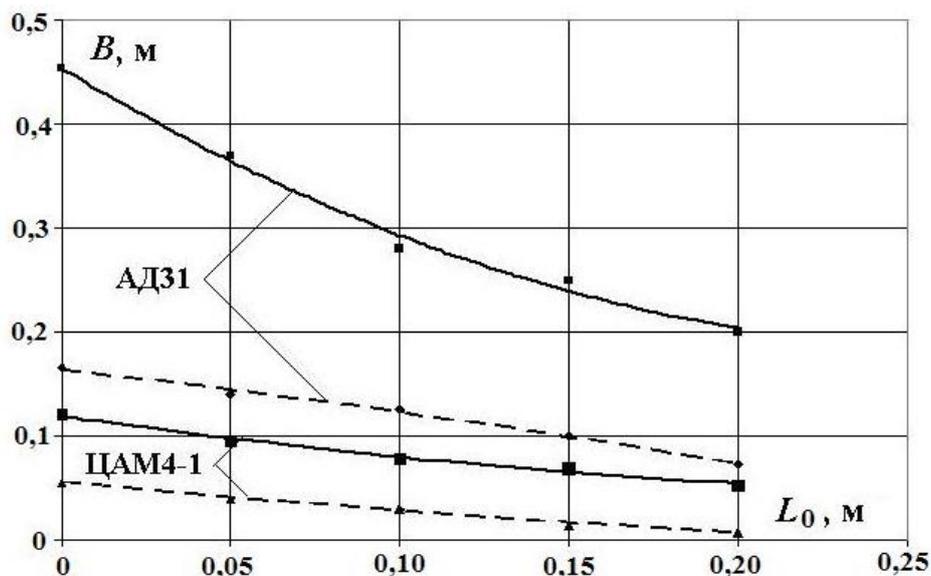


Рис. 5. Отклонения частиц разных сплавов от линии подачи (B) в зависимости от удаления начальной точки от края индуктора: 40×40 мм – сплошные линии, 20×20 мм – пунктир

Таким образом, представленные в статье результаты теоретических и экспериментальных исследований подтверждают целесообразность применения электродинамических сепараторов как для извлечения цветных металлов из потока сыпучих

отходов, так и для индукционной сортировки цветных металлов по видам и группам сплавов. В частности, такие установки можно рекомендовать для сбора и сортировки цветных металлов при послешредерной обработке автомобильного лома.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тенденции и перспективы развития рециклинга металлов / А.И. Татаркин, О.А. Романова, В.Г. Дюбанов и др. // Экология и промышленность России. 2013. № 5. С. 4-10.

2. Бейлис К. Роль рециклинга в устойчивом развитии рынка алюминия / К. Бейлис, К. Цесмелис // Цветные металлы. 2014. № 5. С. 71-76.

2. Макаров Г.С. Современные проблемы и перспективы рециклинга алюминия в России / Г.С. Макаров // Metallurgy машиностроения. 2019. № 2. С. 28-33.

3. Пузанов Д.С. Вторичная алюминиевая промышленность России в цифрах и новые вызовы 2017 г. / Д.С. Пузанов // Вторичные металлы. 2017. № 1. С. 8-10.

4. Овсянников Б.В. Изготовление деформированных изделий с использованием лома и отходов алюминиевых сплавов / Б.В. Овсянников // Цветные металлы. 2014. № 5. С. 66-70.

5. Arovsola A. Aluminum Alloys in Autobodies: Sources and Sinks / A. Arovsola, G. Gaustad, L. Brooks // The Minerals, Metals & Materials Society. 2019. Light Metals. P. 1381-1383. doi.org/10.1007/978-3-030-05864-7_171.

6. Петров Р.Л. Европейский опыт авто-рециклинга для развития системы утилизации отслуживших автомобилей в России / Р.Л. Петров // Журнал автомобильных инженеров. 2012. № 5 (76). С. 52-57.

7. An international comparative study of end-of-life vehicle (ELV) recycling systems / S. Sakai, H. Yoshida, F. Passarini etc. // Journal of Material Cycles and Waste Management. February 2014. Vol. 16. Iss. 1. P. 2-20. doi: 10.1007/s10163-013-0173-2.

8. Митрохин Н.Н. Утилизация и рециклинг автомобилей / Н.Н. Митрохин, А.П. Павлов. М.: МАДИ, 2015. 120 с.

9. Modaresi R. Component- and alloy-specific modeling for evaluating aluminium

recycling strategies for vehicles / R. Modaresi, A.N. Lovik, D.B. Muller // Journal of Metals. 2014. Vol. 66. Iss. 11. P. 2262-2271. doi: 10.1007/s11837-014-0900-8.

10. Aluminum flows in vehicles: enhancing the recovery at end-of-life / F. Passarini, L. Ciacci, A. Santini et al. // Journal of Material Cycles and Waste Management. February 2014. Vol. 16. Iss. 1. P. 39-45. DOI:10.1007/s10163-013-0175-0.

11. Электродинамические сепараторы с бегущим магнитным полем: основы теории и расчета / А.Ю. Коняев, И.А. Коняев, С.Л. Назаров, Н.Е. Маркин. Екатеринбург: Изд-во УрФУ, 2012. 104 с.

12. **Коняев А.Ю.** Исследования характеристик электродинамических сепараторов на основе двумерной модели / А.Ю. Коняев, С.Л. Назаров // Электротехника. 1998. № 5. С. 52-57.

13. **Коняев А.Ю.** Моделирование электродинамического сепаратора на основе линейного индуктора / А.Ю. Коняев, Д.Н. Багин // Электротехника. 2018. № 3. С. 34-40. DOI:10.3103/s1068371218030100.

14. ГОСТ Р 8.736-2011. Государственная система обеспечения единства измерений. Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. М.: Стандартиформ, 2013. 19 с.

Коняев Андрей Юрьевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Электротехника» Уральского федерального университета (УрФУ)

Абдуллаев Жяхонгир Одашжонович – аспирант кафедры «Электротехника» Уральского федерального университета (УрФУ)

Багин Дмитрий Николаевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электротехника» Уральского федерального университета (УрФУ)

Фоминых Сергей Иванович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология машиностроения» Уральского федерального университета (УрФУ)

Andrey Yu. Konyaev – D.Sc., Professor, Department of Electrical Engineering, Urals Federal University

Zahongir O. Abdullaev – Postgraduate Student of the Department of Electrical Engineering, Urals Federal University

Dmitriy N. Bagin – PhD, Associate Professor, Department of Electrical Engineering, Urals Federal University

Sergey I. Fominykh – PhD, Associate Professor, Department of Mechanical Engineering Technology, Urals Federal University

Статья поступила в редакцию 14.01.20, принята к опубликованию 15.02.20

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

УДК 678.5

НАПРАВЛЕННОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭПОКСИДНЫХ КОМПОЗИТОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКОГО МЕТОДА МОДИФИКАЦИИ КОМПОЗИЦИИ

А.С. Мостовой, Ю.А. Кадыкова, О.Г. Неверная, И.Е. Прохорова

DIRECTED ADJUSTMENT OF THE STRUCTURE AND PHYSICAL AND MECHANICAL CHARACTERISTICS OF EPOXY COMPOSITES USING AN ELECTROPHYSICAL METHOD OF COMPOSITION MODIFICATION

A.S. Mostovoy, Yu.A. Kadykova, O.G. Nevernaya, I.E. Prokhorova

В результате проведенных исследований доказана возможность направленного регулирования структуры и эксплуатационных свойств эпоксидных композитов за счет введения в состав композиции тонкоизмельченной охры и применения СВЧ модификации эпоксидной композиции. Доказана эффективность применения и выбраны оптимальные параметры СВЧ модификации (мощность – 350 Вт, продолжительность – 30 с) эпоксидных композиций, наполненных охрой, обеспечивающие повышение физико-механических характеристик композитов.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-33-70002.

Ключевые слова: эпоксидная смола, модификация, наполнитель, охра, СВЧ модификация

Введение

В настоящее время для интенсификации процессов модификации полимерных материалов широко используются электрофизические методы, такие как упругие колебания звукового и ультразвукового диапазонов частот, виброобработка, токи высокой частоты, лазерное, электронное, ультрафиолетовое из-

The conducted investigations have proved a possibility for a directed adjustment of operational properties of the epoxy composites by adding a finely-ground ochre and using a microwave modification of the epoxy composition. The research has provided evidence for effectiveness of the selected optimal parameters to the microwave modification (the power at 350 W, and duration of 30 sec) of the epoxy compositions filled with ochre, which ensure improvement of the physical-mechanical characteristics of the composites.

The given investigation is funded by RFBR within the framework of the research project № 20-33-70002.

Keywords: epoxy resin, modification, filler, ochre, microwave modification

лучения. Необходимость в альтернативных технологиях модификации полимеров связана с многостадийностью традиционных процессов, высокими энерго- и трудовыми затратами, экологической напряженностью производства [1-4].

Исследования по применению электрофизических методов обработки материалов и

изделий показали эффективность использования для этой цели энергии сверхвысокочастотных (СВЧ) электромагнитных колебаний. Микроволновые технологии в отличие от традиционных методов модификации обладают рядом преимуществ: сокращение длительности технологических процессов, упрощение производственной установки, более низкое энергопотребление, улучшение экологического состояния и чистоты на производстве, возможность получения изделий нового, лучшего качества, объемный и безынерционный нагрев, возможность формирования и поддержания требуемого распределения температурного поля в любой конечной области пространства и т.д. [1-4].

Поэтому целью данной работы является повышение физико-механических свойств композитов на основе эпоксидной смолы путём введения дисперсного минерального наполнителя – охры и применения электрофизического метода модификации композиций.

Материалы и методы исследования

Разрабатывались составы на основе эпоксидной диановой смолы марки ЭД-20 (ГОСТ 10587-93). В качестве отвердителя эпоксидного олигомера применялся отвердитель аминного типа – полиэтиленполиамин (ПЭПА) (ТУ 6-02-594-85), способный формировать трехмерную сетчатую структуру в отсутствие нагрева.

Для пластификации эпоксидных композитов в работе использовали олиго(резорцинфенилфосфат) с концевыми фенильными группами Fylolflex (ОРФФ) производства ICL Industrial Products America Inc. (США) со степенью чистоты 99 %.

ОРФФ – олигомерный безгалогенный пластификатор с антипиреновыми свойствами, разработанный специально для использования в качестве антипирена для конструкционных полимеров, таких как модифицированный полифениленоксид и сополимеры поликарбоната. По сравнению с другими безгалогенными (фосфатными) антипиренами относительно стабилен при низкой летучести, удовлетворяя технологическим требованиям производства большинства технических пластиков (начало термической

деструкции при +300°C). Преимущество ОРФФ над другими бис-фосфатами заключается в более низкой вязкости, что облегчает обращение с продуктом и улучшает его технологические свойства (более низкая температура смешивания) [5-7].

Выбор ОРФФ обусловлен наличием в его составе ингибитора горения – фосфора (10,7 %), который структурирует эпоксидный полимер при воздействии на него повышенных температур и обеспечивает увеличение выхода карбонизованных структур, которые, в свою очередь, являются физическим барьером для взаимодиффузии горючих газов и окислителя в зону горения, что снижает горючесть эпоксидного композита [5-7].

Большие потенциальные возможности улучшения характеристик композиционных материалов заложены в использовании как пластификаторов, так и недорогих и эффективных наполнителей [6-9], в число которых входят дисперсные минеральные наполнители, в частности измельченная охра. Использовали охру Приорского месторождения (Новороссийский район Актюбинской области, Казахстан). По химическому составу охра преимущественно состоит из оксидов железа, оксида алюминия, хрома и никеля, а также содержит небольшие примеси оксидов Ti, Cu, Ca, такой состав свидетельствует об экологической безопасности данного продукта и, соответственно, возможности использования ее в качестве наполнителя эпоксидного композита [10].

Фракционный состав охры характеризуется бимодальным распределением и представлен частицами от 0,1 до 100 мкм со средними размерами частиц 2-3 и 30-40 мкм, значение удельной поверхности частиц охры составляет 7,2 м²/г.

Требуется предварительная сушка наполнителя, так как содержание влаги в охре составляет 27 %. Сушку проводили при 105°C до постоянной массы, которая достигается за 3 часа.

Охра вводилась в эпоксидный композит в качестве модифицирующей добавки (0,1-1,0 масс.ч.) и наполнителя (10-100 масс.ч.). Для обеспечения равномерного распределения охры и активации ее поверхности и

связующего состав подвергали ультразвуковой обработке при 22 ± 2 кГц в течение 60 мин. Смесь дегазировали при $25 \pm 5^\circ\text{C}$ в течение 30 мин под вакуумом перед отверждением. Эпоксидная композиция, не содержащая отвердитель, была подвергнута СВЧ модификации после ультразвукового диспергирования компонентов, затем вводили отвердитель, и процесс отверждения проводился в нормальных условиях при комнатной температуре.

В работе исследования выполнены с применением следующих методов:

- определение изгибающего напряжения [ГОСТ 4648-2014];
- определение прочности при растяжении [ГОСТ 11262-80];
- определение модуля упругости при растяжении и изгибе [ГОСТ 9550-81];
- определение прочности при сжатии [ГОСТ 4648-71];
- определение ударной вязкости [ГОСТ 4647-80];
- определение твердости по Бринеллю [ГОСТ 4670-91];

– исследование морфологии поверхности образцов проводилось с помощью сканирующего электронного микроскопа Tescan VEGA 3 SBH.

Результаты экспериментов и их обсуждение

Большие потенциальные возможности улучшения характеристик композиционных материалов заложены в использовании как пластификаторов, так и недорогих и эффективных наполнителей, в число которых входят дисперсные минеральные наполнители, в частности измельченная охра.

Проведенные исследования показали, что наиболее рациональным является введение охры в качестве модифицирующей добавки в количестве 0,5 масс.ч., так как при этом достигаются более высокие показатели исследуемых физико-механических свойств: на 30 % возрастает изгибающее напряжение и на 58 % модуль упругости при изгибе, на 75 % возрастает прочность и на 20 % модуль упругости при растяжении, на 83 % возрастает ударная вязкость (табл. 1).

Таблица 1

Свойства эпоксидных композитов

Состав композиции, масс.ч., отвержденной 15 масс.ч. ПЭПА	$G_{из}$, МПа	$E_{из}$, МПа	$G_{сж}$, МПа	G_p , МПа	E_p , МПа	$a_{уд}$, кДж/м ²
100 ЭД-20+40 ОРФФ	8±3,2	2210±88	100±4,0	30±1,5	1896±75	6±0,3
100 ЭД-20+40 ОРФФ+0.1 Охра	87±3,5	3206±120	102±4,1	41±2,0	2113±84	7±0,3
100 ЭД-20+40 ОРФФ+0.5 Охра	105±4,2	3500±140	105±4,1	53±2,6	2317±92	11±0,5
100 ЭД-20+40 ОРФФ+1.0 Охра	75±3,0	4073±152	110±4,4	43±2,2	3040±121	5±0,2
100 ЭД-20+40 ОРФФ+10 Охра	80±3,2	4373±164	114±4,5	53±2,6	3242±122	5±0,2
100 ЭД-20+40 ОРФФ+30 Охра	76±2,8	5568±220	125±5,0	36±1,8	3512±140	7±0,3
100 ЭД-20+40 ОРФФ+50 Охра	74±2,2	7462±240	145±5,6	41±2,0	4000±156	5±0,2
100 ЭД-20+40 ОРФФ+75 Охра	102±4,1	10163±350	156±5,8	45±2,3	4110±160	9±0,4
100 ЭД-20+40 ОРФФ+100 Охра	55±2,0	12120±445	95±4,0	32±1,6	4860±184	4±0,2

Примечание: $G_{из}$ – изгибающее напряжение; $E_{из}$ – модуль упругости при изгибе; $G_{сж}$ – прочность при сжатии; G_p – прочность при растяжении; E_p – модуль упругости при растяжении; $a_{уд}$ – ударная вязкость.

С точки зрения снижения себестоимости продукции эффективно введение охры как наполнителя эпоксидного композита (50-100 масс. ч.), при этом наиболее рациональным является введение 75 масс. ч., так как при этом возрастают физико-механические характеристики: на 27 % повышается изгибающее напряжение и в 4,5 раза возрастает модуль упругости при изгибе, на 5 % повышается прочность и в 2 раза модуль упругости при растяжении, на 50 % возрастает устойчивость к ударным нагрузкам, а также отмечено повышение на 56 % разрушающего напряжения при сжатии по сравнению с ненаполненным пла-

стифицированным эпоксидным композитом (табл. 1).

Для повышения деформационно-прочностных свойств эпоксидных композитов применяли СВЧ-модификацию. Проведенные исследования позволили определить наиболее рациональный режим СВЧ-обработки: мощность – 350 Вт, продолжительность – 30 с (табл. 2), при этом обеспечивается достижение максимальных показателей физико-механических характеристик: на 26 % возрастает прочность композитов при изгибе, на 29 % повышается прочность при растяжении и на 18 % повышается ударная вязкость (рис. 1).

Таблица 2

Свойства эпоксидных композитов

Параметры СВЧ модификации эпоксидной композиции (масс.ч. 100ЭД-20+40ОРФФ+0,5Охра+15ПЭПА)	$G_{из}$, МПа	$E_{из}$, МПа	G_p , МПа	E_p , МПа	$a_{уд}$, кДж/м ²
Без СВЧ модификации	105 ±4.2	3500 ±140	58 ±2.6	2317 ±92	11 ±0.5
200 Вт, 15 с	108 ±4.3	4192 ±165	57 ±2.3	2804 ±112	11 ±0.5
200 Вт, 30 с	128 ±4.5	4438 ±168	63 ±2.8	2889 ±115	13 ±0.6
200 Вт, 45 с	100 ±4.0	4101 ±145	55 ±2.0	2039 ±81	7 ±0.4
250 Вт, 30 с	130 ±4.5	4892 ±175	59 ±2.4	3162 ±125	13 ±0.6
300 Вт, 30 с	132 ±4.6	3861 ±145	75 ±3.0	2674 ±110	12 ±0.5
350 Вт, 30 с	158 ±6.0	5193 ±200	75 ±3.0	3075 ±123	15 ±0.7
400 Вт, 30 с	121 ±4.8	3685 ±142	58 ±2.3	2628 ±105	10 ±0.5
500 Вт, 30 с	115 ±4.6	3470 ±135	45 ±1.8	2031 ±81	8 ±0.4

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.

Таким образом, проведенные исследования показали эффективность применения СВЧ модификации эпоксидных композиций, наполненных охрой, которая обеспечила повышение физико-механических ха-

рактеристик композитов, что объясняется дополнительным структурированием материала в результате СВЧ обработки.

На рис. 2 б, в можно увидеть поверхность разрушения эпоксидного композита

после СВЧ модификации эпоксидных композиций. В образце появляется очень большая доля пластического разрушения, границы чешуек становятся размытыми,

размер их увеличивается. Это может быть связано с образованием под воздействием СВЧ плотной сетки сшивок вокруг частиц охры с эпоксидными группами олигомера.

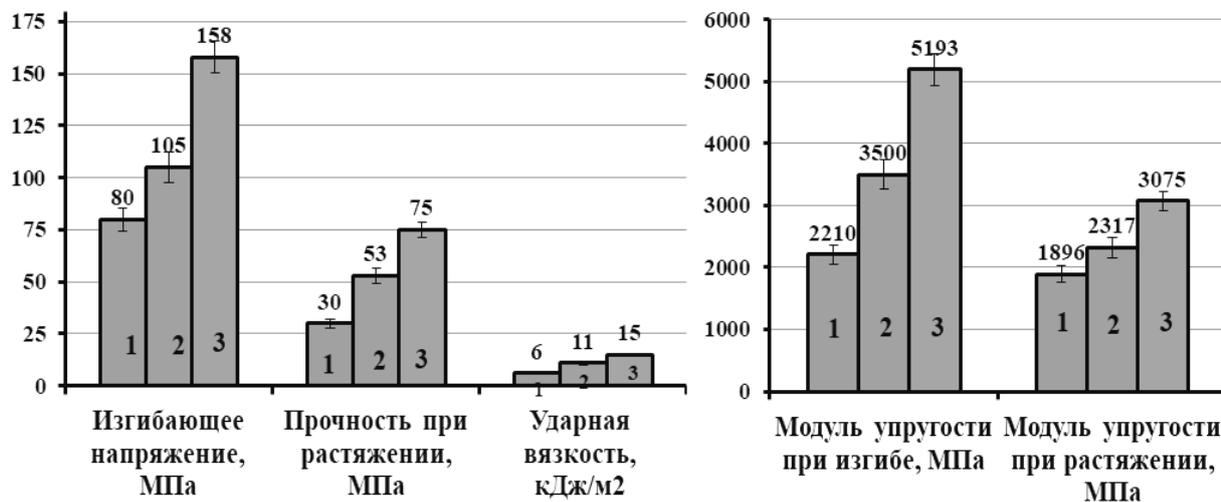


Рис. 1. Физико-механические характеристики эпоксидных композитов: 1 – эпоксидный композит, без наполнителя и СВЧ модификации; 2 – эпоксидный композит с 0,1 масс. ч. охры относительно ЭД-20, без СВЧ модификации состава; 3 – эпоксидный композит с 0,1 масс. ч. охры относительно ЭД-20, после СВЧ модификации состава

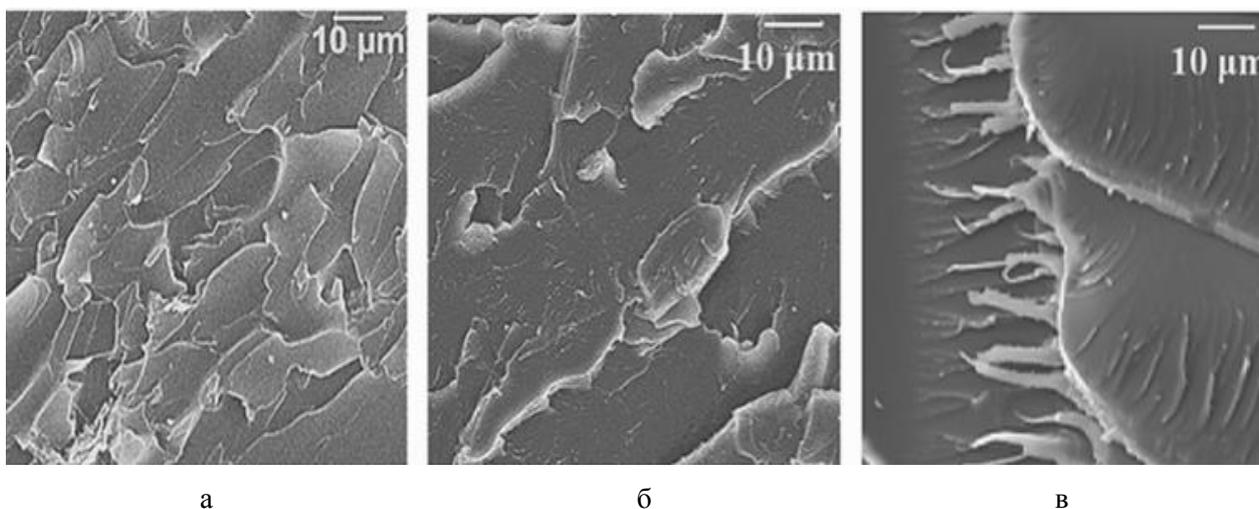


Рис. 2. СЭМ поверхности разрушения эпоксидных композитов: а – без СВЧ модификации; б, в – после СВЧ модификации

Заключение

В результате проведенных исследований доказана возможность направленного регулирования структуры и эксплуатационных свойств эпоксидных композитов за счет введения в состав композиции тонкоизмельченной охры и применения СВЧ модификации эпоксидной композиции. Доказана эффективность применения и выбраны

оптимальные параметры СВЧ модификации (мощность – 350 Вт, продолжительность – 30 с) эпоксидных композиций, наполненных охрой, обеспечивающие повышение физико-механических характеристик композитов: на 26 % возрастает прочность композитов при изгибе, на 29 % повышается прочность при растяжении и на 18 % повышается ударная вязкость.

Кроме того, доказано, что СВЧ модификация оказывает влияние на структуру эпоксидного композита, в образце появляется большая доля пластического разрушения, что может быть связано с образованием под воздействием СВЧ плотной сетки сшивок

вокруг частиц охры с эпоксидными группами олигомера.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-33-70002.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Черемухина И.В.** Оценка физико-химической активности различных способов физической модификации / И.В. Черемухина, В.Н. Студенцов // *Фундаментальные исследования*. 2016. № 2 (2). С. 299-302.

2. **Zavrzhin D.** Microwave Modification of Polymer-Carbon Materials / D. Zavrzhin, C. Zavrzhina // *Materials Science Forum*. 2019. № 945. P. 443-447.

3. **Zlobina I.** The Influence of Electromagnetic Field Microwave on Physical and Mechanical Characteristics of CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer) Structural / I. Zlobina, N. Bekrenev // *Materials Science Forum*. 2016. № 870. P. 101-106.

4. **Al-Harhi M.A.** Influence of applying microwave radiation on the LDPE/MWCNTs nanocomposite / M.A. Al-Harhi // *Polym. Compos.* 2014. № 35. P. 2036-2042.

5. **Высокоэффективные пластификаторы-антипирены для эпоксидных полимеров** / А.С. Мостовой, А.С. Нуртазина, Ю.А. Кадыкова, А.З. Бекешев // *Перспективные материалы*. 2019. № 2. С. 36-43.

6. **Исследование влияния тонкоизмельченного хромита на физико-химические и механические свойства модифицированных эпоксидных композитов** / А.С. Мостовой,

А.С. Нуртазина, И.Н. Бурмистров, Ю.А. Кадыкова // *Журнал прикладной химии*. 2018. Т. 91. № 11. С. 1549-1558.

7. **Мостовой А.С.** Эпоксидные композиты с повышенными эксплуатационными характеристиками, наполненные дисперсными минеральными наполнителями / А.С. Мостовой, А.С. Нуртазина, Ю.А. Кадыкова // *Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий*. 2018. Т. 80. № 3. С. 330-335.

8. **Старокадомский Д.Л.** Некоторые особенности набухания фотополимерных композитов с различным содержанием высокодисперсного кремнезёма / Д.Л. Старокадомский // *Пластические массы*. 2008. № 2. С. 33-36.

9. **Starokadomskii D.L.** Epoxy composites with 10 and 50 wt % micronanoiron: strength, microstructure, and chemical and thermal resistance / D.L. Starokadomskii // *Russian Journal of Applied Chemistry*. 2017. № 90 (8). P. 1337-1345.

10. **Reinforcement of Epoxy Composites with Application of Finely-ground Ochre and Electrophysical Method of the Composition Modification** / A. Bekeshev, A. Mostovoy, L. Tastanova, et al. M.: *Polymers*, 2020. 12, 1437.

Мостовой Антон Станиславович – кандидат технических наук, и.о. заведующего кафедрой «Естественные и математические науки», заведующий лабораторией «Современные методы исследования функциональных материалов и систем» Энгельского технологического института (филиала) Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Anton S. Mostovoy – PhD, Head: Department of Natural and Mathematical Sciences, Head of Laboratory of Modern Research Methods of Functional Materials and Systems, Engels Technological Institute of Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Engels, Russia

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

Неверная Ольга Геннадьевна – кандидат химических наук, доцент кафедры «Естественные и математические науки» Энгельсского технологического института (филиала) Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Прохорова Инна Евгеньевна – инженер кафедры «Электроэнергетика и электротехника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Yulia A. Kadykova – D.Sc., Professor, Department of Electric Power Engineering and Electrotechnology, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov, Russia

Olga G. Nevernaya – PhD, Associate Professor, Department of Natural and Mathematical Sciences, Engels Technological Institute of Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Engels, Russia

Inna E. Prokhorova – Engineer of the Department of Electric Power Engineering and Electrotechnology, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov, Russia

Статья поступила в редакцию 20.01.20, принята к опубликованию 15.02.20

УДК 621-039-419; 620.22-419; 537.868

**ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ СВЧ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ
НА СТРУКТУРНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ В АРМИРОВАННЫХ
УГЛЕРОДНЫМИ ВОЛОКНАМИ ПКМ С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ
МЕТАЛЛИЧЕСКИМИ ЭЛЕМЕНТАМИ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА
СИГНАЛОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ**

И.В. Злобина

**ESTIMATION OF THE OF THE MICROWAVE ELECTROMAGNETIC
FIELD EFFECT ON STRUCTURAL CHANGES IN CARBON FIBER
REINFORCED PCM WITH DISTRIBUTED METAL ELEMENTS
BASED ON THE ANALYSIS OF ACOUSTIC EMISSION SIGNALS**

I.V. Zlobina

Выполнены исследования методом акустической эмиссии процесса развития повреждений в процессе нагружения образцов углепластика изгибающей силой по схеме трехточечного изгиба. Изучена кинетика образования дефектов в контрольных образцах и образцах, подвергнутых в отвержденном состоянии воздействию

The article deals with acoustic emission studies, conducted in line with a three-point bending scheme, of the failure progress when loading carbon fiber samples characterized for the bending force. The focus is made on kinetics of defect formation in the check samples, as well as in the samples affected in the cured state by the microwave

СВЧ электромагнитного поля. Установлено значительное снижение интенсивности сигналов, что свидетельствует об уменьшении размеров дефектов и, соответственно, может подтверждать механизм повышения прочности модифицированных углепластиков за счет увеличения степени кристалличности матрицы и увеличения количества точек контактного взаимодействия в области «матрица-волокно».

Ключевые слова: полимерные композиционные материалы, углепластик, акустическая эмиссия, повреждения, СВЧ электромагнитное поле, модифицирование

Анализ сигналов акустической эмиссии широко используется при изучении кинетики разрушения (трещинообразования) различных конструкционных материалов [1, 2]. Особый интерес представляет использование данного метода для неразрушающего изучения развития повреждений в полимерных композиционных материалах (ПКМ), характеризующихся выраженной анизотропией механических характеристик и значимым (как минимум на порядок) различием прочностных свойств матрицы и волоконного наполнителя [3]. Неоднородность структуры матрицы и многокомпонентный состав, а также различные схемы армирования являются причиной того, что прочность ПКМ в направлении, перпендикулярном армированию волокнами, на один-два порядка ниже, что усложняет решение задачи создания равнопрочных конструкций. Для повышения прочностных характеристик ПКМ используются различные физико-химические методы, среди которых весьма эффективно воздействие СВЧ электромагнитного поля на исходные компоненты или на композит в процессе отверждения матрицы [4-7]. Нами показана возможность упрочняющего СВЧ модифицирования структуры ПКМ в составе изделия (в отвержденном состоянии) [8, 9]. При этом необходимо учитывать широкое распространение в конструкциях из ПКМ для авиационной техники и ветроэнергетических установок так называемых молниезащитных покрытий (МЗП) в виде распре-

electromagnetic field. A significant decrease in signal intensity was found, which indicates a decrease in the size of defects and, correspondingly, can verify a mechanism for increasing strength of the modified carbon fibers due to an increase in crystallinity percent of the matrix, and an increase in the number of contact points in the «matrix-fiber» area.

Keywords: polymer composite materials, carbon fiber, acoustic emission, failure, microwave electromagnetic field, verification

ленной в поверхностном слое металлической сетки для защиты от поражения разрядами атмосферного электричества. Наличие МЗП усложняет картину взаимодействия изделия с СВЧ электромагнитным полем, что требует проведения дополнительных исследований повреждаемости таких объектов под нагрузкой.

Для принятия решений о разработке и внедрении технологий упрочняющего модифицирования изделий из ПКМ в СВЧ электромагнитном поле целесообразно исследовать кинетику развития повреждений в образце до момента его разрушения, чтобы определить эффективные направления и режимы воздействия.

При помощи комплекса оборудования в составе датчиков акустической эмиссии ZET – 601, ZET – 7140E, ZET – 7191, ZET – 7174 и программного обеспечения SCADA система ZETView производства ЗАО «Электронные технологии и метрологические системы» (г. Зеленоград Московской обл.) выполнены исследования кинетики и характеристик процессов трещинообразования в ПКМ с распределенными в поверхностном слое металлическими элементами в виде молниезащитной медной сетки завода «Текстильмаш». Использовали плоскопараллельные образцы углепластика ООО «Еврокомплект» (г. Калуга) размерами 70×30×5 мм. Вид испытаний – трехточечный изгиб при значении приложенной нагрузки 50 Н. Опытные образцы до испытаний модифицировали в СВЧ электромаг-

нитном поле частотой 2450 МГц на экспериментальной установке, созданной на базе микроволнового излучателя «Жук-2-02» (ООО НПП «АгроЭкоТех», г. Обнинск Калужской обл.). Обработку осуществляли в течение 2 минут при плотности потока энергии $(17-18) \times 10^4$ мкВт/см². Согласно предварительным исследованиям, при данных условиях достигается наибольший эффект упрочнения углепластика по напряжениям изгиба и межслоевого сдвига.

Запись сигналов акустической эмиссии представлена на рис.1 и 2, анализ результатов – в таблице.

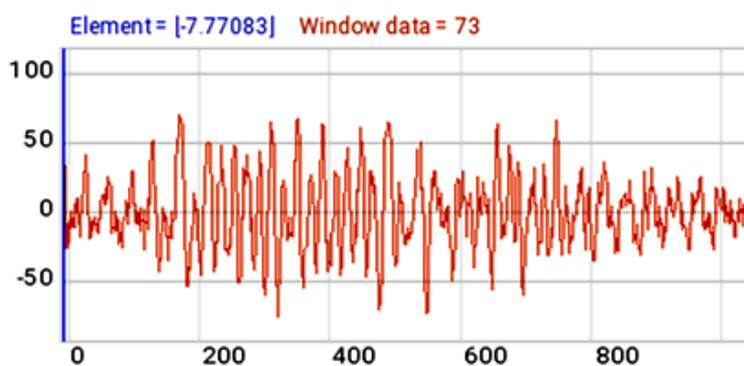
Анализ полученных данных позволяет сделать следующие выводы.

Опыты показали снижение амплитуды сигнала в опытных образцах углепластика по сравнению с контрольными на 62,2 % и количества превышений порога – на 45,5 %. При этом энергия сигнала, поступающего с опытного образца, выше в 2,26 раза, что свидетельствует о большем расходовании энергии разрушения на рост трещин в контрольном образце.

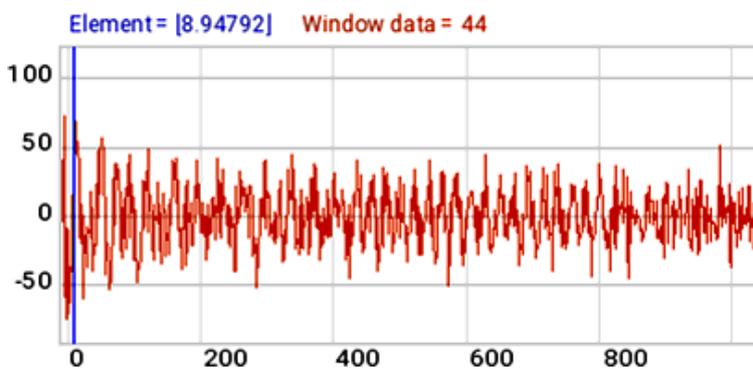
Процесс трещинообразования в опытном образце развивается более длительно (рост фронта продолжается дольше более, чем в 10 раз). При этом процесс останавливается быстрее в 3 раза (длительность спада). Это подтверждает множественность мелких «короткоживущих» трещин в опытном образце.

Результаты анализа сигналов акустической эмиссии

Вид образца	Амплитуда сигнала, дБ	Длительность фронта, мкс	Длительность спада, мкс	Количество превышений порога	Энергия сигнала, мВ·с
Контрольный	1,64491	65,4167	934,583	11	0,000141
Опытный	0,621825	711,667	288,333	6	0,000319

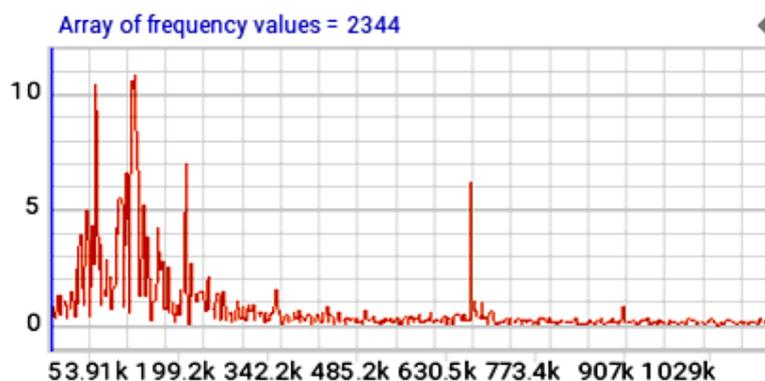


а

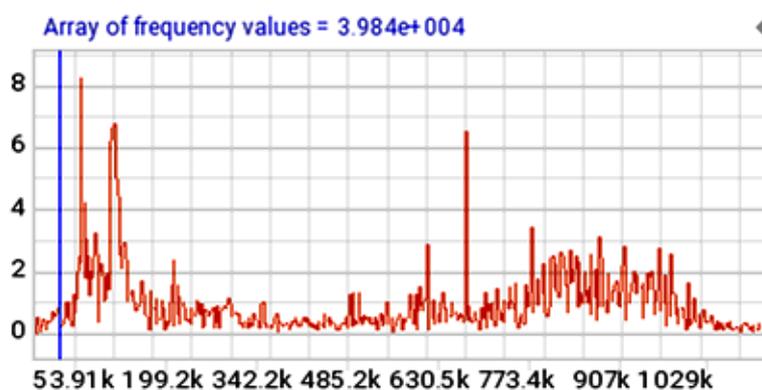


б

Рис. 1. Сигналы акустической эмиссии при нагружении контрольного (а) и опытного (б) образцов



а



б

Рис. 2. Распределение частот сигналов акустической эмиссии при нагружении контрольного (а) и опытного (б) образцов

Характер сигналов в контрольном и опытном образцах различается:

- в контрольном образце сигналы имеют значительный разброс по амплитуде и периоду возникновения;

- в опытном образце сигналы вполне однородные, их амплитуда значимо (по графику примерно в 1,5 раза) меньше;

- спектр частот акустических колебаний, вызванных трещинообразованием в контрольном образце, смещен в область низких значений (54-199 кГц), что связано с преимущественно протяженными трещинами, вызывающими длинноволновые колебания;

- опытный образец характеризуется двумя областями частот (54-100 кГц и 800-1000 кГц), при этом доля низкочастотных спектров меньше на 45 % по сравнению со спектром контрольного образца, что связано с образованием коротких трещин по межзеренным границам.

Обоснование полученным результатам может быть предложено следующее. Сигналы акустической эмиссии различаются для кристаллических и аморфных тел. В кристаллических телах трещинообразование (разрушение) начинается и происходит преимущественно по границам зерен, что определяет относительно большое число трещин с малой протяженностью, т.к. хаотически расположенные зерна становятся препятствием для роста трещин. Соответственно сигналы эмиссии имеют малую амплитуду, однако сам процесс может быть длительным, т.к. возникает много малых по интенсивности событий. В аморфных телах разрушение начинается в областях с меньшей прочностью (вблизи возможных дефектов). В связи с более однородной структурой имеется мало препятствий росту трещины. Поэтому возникают трещины большой протяженности. Это приводит к мощным высокоамплитудным сигналам

акустической эмиссии. При этом самих событий может быть меньше, т.к. трещин может образовываться мало, энергия затрачивается преимущественно на рост сформировавшихся первичных трещин, а не на возникновение новых. Происходит макро-разрушение и исчерпание предела прочности материала.

ПКМ состоят из упругих волокон и относительно хрупкой матрицы, которая в целом аморфная, но при этом обладает определенной степенью кристалличности. Соответственно, если степень кристалличности выше, то сигналы акустической эмиссии при силовом воздействии на материал будут более соответствовать особенностям, указанным для кристаллических тел.

Воздействие СВЧ электромагнитного поля, как показали исследования ДСК углеродного стеклопластика, приводит к увеличению исходной степени кристалличности матрицы соответственно на 42 и 22 %. Соответственно сигналы акустической эмиссии при трещинообразовании в опытных образцах ПКМ по своим характеристикам смещаются в область кристаллических тел, т.е. имеют меньшие амплитуды.

Наличие в структуре деформируемых элементов с высокой вязкостью разрушения типа металлических сеток может способствовать как уменьшению количества событий, так и снижению амплитуды сигналов акустической эмиссии. Поскольку

воздействие СВЧ электромагнитного поля вызывает увеличение количества контактных поверхностей агломератов матрицы и армирующих структур, можно предположить усиление механических связей матрицы и металлических элементов, что приведет к более значимому снижению сигналов акустической эмиссии по сравнению с контрольными образцами с МЗП.

Таким образом, использование метода акустической эмиссии может позволить осуществлять с достаточной достоверностью оценку изменений в структуре матрицы и межфазного слоя ПКМ в результате воздействия СВЧ электромагнитного поля, а также дать качественную оценку изменения фазового состава матрицы. Сигналы акустической эмиссии можно также использовать для анализа степени СВЧ упрочнения ПКМ по изменению их амплитуды и количества превышений заданного порога.

Исследования выполнены при поддержке гранта РНФ № 18-79-00240 «Раскрытие механизма взаимодействия микроволнового излучения с отвержденными полимерными композиционными материалами на основе углеродных волокон в сочетании с внедренными в поверхностный слой связанными металлическими элементами, периодически распределенными в плоскости армирования наполнителем, применительно к конструкционным элементам авиационных робототехнических комплексов».

ЛИТЕРАТУРА

1. **Буйло С.И.** Физико-механические, статистические и химические аспекты акустико-эмиссионной диагностики: монография / С.И. Буйло; Южный федеральный университет, Ростов-н/Д. – Таганрог: Изд-во Южн. федерал. ун-та, 2017. 184 с.

2. Акустико-эмиссионный метод оценки повреждаемости полимерных композитных материалов / Г.Н. Финогенов, Е.Г. Риттер, А.Г. Мухутдинов и др. // Заводская лаборатория. 1995. № 12.

3. **Михайлин Ю.А.** Конструкционные полимерные композиционные материалы /

Ю.А. Михайлин; 2-е изд. СПб.: Научные основы и технологии, 2010. 822 с.

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

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

6. **Калганова С.Г.** Электротехнология нетепловой модификации полимерных материалов в СВЧ электромагнитном поле: дис. ... д-ра техн. наук / С.Г. Калганова. Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2009.

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

8. Вязано-паяные проволочные сетки для молниезащиты лопастей ветрогенераторов / Л.Р. Вишняков, О.В. Зубков, В.А. Коханый, И.Н. Коханая // Технологические системы. 2014. № 1. С. 58-63.

9. Молниезащитные покрытия для конструктивных углепластиков, содержащие

наночастицы / Г.М. Гуняев, Л.В. Чурсова, А.Е. Раскутин и др. // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2012. № 3.

10. **Злобина И.В.** Новые конструкторско-технологические методы повышения прочности конструктивных элементов из неметаллических композиционных материалов: монография / И.В. Злобина, Н.В. Бекренев. Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2017. 164 с.

11. **Злобина И.В.** Прочностные испытания модифицированных в СВЧ электромагнитном поле композиционных материалов / И.В. Злобина, Н.В. Бекренев, С.П. Павлов // Вестник Чувашского государственного педагогического университета им. И.Я. Яковлева. Сер. Механика предельного состояния. 2017. № 3 (33). С. 42-57.

Злобина Ирина Владимировна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Техническая механика и мехатроника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Irina V. Zlobina – PhD, Associate Professor, Department of Technical Mechanics and Mechatronics, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 25.01.20, принята к опубликованию 15.02.20

СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

УДК 681.518.25

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА РАСЧЕТА РАСХОДА ЭЛЕКТРОДОВ ДЛЯ СВАРОЧНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПРИ МОНТАЖЕ ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

Г.Ф. Сафина, Р.А. Сафиуллин

AUTOMATION OF CONSUMPTION CALCULATION OF ELECTRODES FOR HE WELDING JOINTS ON INSTALLATION OF THERMAL POWER PLANTS

G.F. Safina, R.A. Safiullin

В статье приведены математические модели и программная реализация расчета расхода электродов сварных соединений конструкций при монтаже электростанций. Модели созданы на основе конструктивных элементов свариваемых кромок и сварного шва стыковых и угловых типов соединений, широко применяемых в ручной дуговой сварке металлических труб. База данных для электродов создана в СУБД MS Access и подключается для расчета в программу, созданную на языке программирования Borland Delphi. Разработанная программа, соответствующая ГОСТам и технологическим инструкциям по сварочному производству, позволяет автоматизировать процесс расчета расхода электродов различных марок, необходимых для проведения сварных соединений металлических материалов.

Ключевые слова: математическая модель, сварные соединения материалов, расход электродов, база данных, язык программирования Delphi

Введение

В настоящее время тепловые электрические станции (ТЭС) возводятся сооружением большого количества структурных объектов и электрического оборудования, с замкнутым тепловым циклом. Основными

The article presents mathematical models and software implementation of calculation of the consumption of electrodes of welded joints of structures during installation of power plants. The models are based on the structural elements of the welded edges and the weld of butt and corner types of joints that are widely used in manual arc welding of metal pipes. The database for electrodes is created in the MS Access DBMS and is connected for calculation to a program created in the Borland Delphi programming language. The developed program, which corresponds to GOST Standards and technological instructions for welding production, allows you to automate the process of calculating the consumption of electrodes of various brands required for welding metal materials.

Keywords: mathematical model, welded joints of materials, electrode consumption, database, Delphi programming language

объектами являются энергоблоки, рассчитанные на большие мощности (до 800 тыс. кВт) и на высокие рабочие параметры пара (давление от 140 до 240 атм и температура перегретого пара до 570°C и выше). Поэтому особое значение приобретают качество

и технический уровень выполнения монтажно-сварных работ при возведении таких сложных монтируемых объектов [1].

При монтаже основного оборудования электрических станций используются разнообразные металлические конструкции, получаемые сварным соединением различных марок сталей, труб различного типа-размера и диапазона, профилей проката. Оптимальное задание расчетной толщины шва используется для снижения расхода сварочных материалов и уменьшения металлоемкости сварных соединений конструкций. Целесообразность и возможность назначения определенного класса эксплуатации сварных швов изначально согласовывается с ответственным технологом по сварке. Сложность выполняемых сварных работ в них связана с необходимостью выполнения качественных швов во всех пространственных положениях, сложностью выполнения операций по климатическим условиям и труднодоступностью узлов, большим объемом работ при сжатых сроках – что определяет специфику производства при монтаже данных объектов [2, 3].

Сварочное производство и монтаж тепловых, электрических и атомных энергетических установок подчиняются ГОСТ. Эти документы жестко регламентируют все этапы подготовки, производства и контроля сварных соединений. В соответствии с этими основными правилами в сварочном производстве осуществляется нормативное управление качеством сварных соединений. Это управление заключается в том, что на этапе подготовки производства осуществляются всесторонний контроль и аттестация технологических свойств оператора-сварщика, сварочных материалов и оборудования. Необходимо также отметить, что этап подготовки производства при изготовлении корпусного оборудования сопряжен со значительными материальными затратами, а по времени превосходит собственно само производство этого оборудования [2-9].

Постановка задачи

В производственном цикле на производстве перед началом выполнения сва-

рочных работ технологу по сварке часто требуется осуществить предварительный расчет количества электродов по нормативам, которые будут израсходованы в результате проведенных работ [2-6]. В связи с тем, что существует большое многообразие сварных соединений разных конструкций и их типоразмеров, процесс расчета часто является трудоемким и занимает немало времени. По этой причине данный процесс требует автоматизации для предварительной укомплектованности выполняемых работ. Несмотря на наличие инновационных технологий в области сварочных работ с элементами механизации, практически отсутствуют программные продукты, которые рассчитывали бы расход электродов для сварных соединений металлических материалов, поэтому исследование данного вопроса является актуальной задачей технологического процесса на монтаже таких электрических сооружений [10-12].

В данной работе получены математические модели и приведена программная реализация такого автоматизированного процесса расчета.

Математическое моделирование задачи

Рассмотрим модели, которые получают при производстве сварных соединений для металлических материалов разных конструкций: стыковые С17, С19 и угловые У8 и У19. Данные типы, а также их конструктивные элементы и размеры указаны согласно ГОСТу 16037-80 [5]. При этом для часто используемой на практике ручной дуговой сварки конструктивными элементами сварного соединения являются: β – угол скоса кромок; s – толщины стенок свариваемых деталей; b – зазор между кромками свариваемых деталей; e – ширина сварного шва; c – притупление кромки; g – высота сварного шва.

Образец размеров конструктивных элементов, например, для типа соединения С19 согласно [5] представлен в табл. 1. Для типов соединений С17, У8 и У19 имеются аналогичные таблицы типоразмеров.

Размеры конструктивных элементов соединения С19

Условное обозначение сварного соединения	Способ сварки	$s = s_1$	Конструктивные элементы и их размеры, мм							
			b		e		c		g	
			номин.	пред. откл.	номин.	пред. откл.	номин.	пред. откл.	номин.	пред. откл.
С19	ЗП; ЗН; Р; Г	3	1,0	+0,5	7	+2	0,5	+0,5	1,5	+1,5 -1,0
		4			8					
		5	1,5		9		+3			
		6			11					
		7			12					
	ЗП; ЗН; Р	8	2,0	+1,0	13	+4	1,0	±0,5	2,0	+2,0 -1,5
		10			16					
		12			18					
		14			21					
		16	+1,5	23	+6	1,5				
		18		26						
		20		28						

Здесь введены обозначения: ЗП – дуговая сварка в защитном газе плавящимся электродом; ЗН – дуговая сварка в защитном газе неплавящимся электродом; Р – ручная дуговая сварка; Г – газовая сварка. На практике расчет расхода электродов ведется как на сварку одного погонного метра шва, так и на сварку одного стыка металлических конструкций.

Расчет расхода электродов на сварку одного стыка труб для типов сварных соединений С17, С19, У8 и У19 произведен по формуле [12]:

$$q = B \cdot \rho \cdot F \cdot C \cdot B_1, \quad (1)$$

где q – удельный расход электродов на сварку одного стыка труб; B – коэффициент наплавки марки электродов; ρ – плотность материала трубы; F – площадь поперечного сечения сварного шва; C – средний периметр трубы, определяемый как $C = 0,5\pi(D_n + D_v)$, D_n и D_v – наружный и внутренний диаметры трубы; B_1 –

коэффициент положения шва в пространстве [5].

В формуле (1) значения коэффициентов B и B_1 берутся исходя от марки электрода [10, 13], а площадь поперечного сечения F сварного шва зависит от типа соединения. И именно для определения параметра F необходимо создание математических моделей, которые для каждого из типов имеют свою индивидуальную форму.

Для удобства разработки математических моделей площади F наплавленного металла поперечное сечение каждого сварного соединения разделено нами на составные части $f_k (k = 1, 2, 3, \dots, n)$. На рис. 1 а, б представлены схемы сварных соединений типа С17 и С19.

Геометрические модели угловых типов У8 и У19 сварных соединений представлены на рис. 2 а, б. Здесь, кроме стандартных конструктивных элементов любых соединений, даны также катет K углового шва и фаска f фланца, где $f = K - 1$.

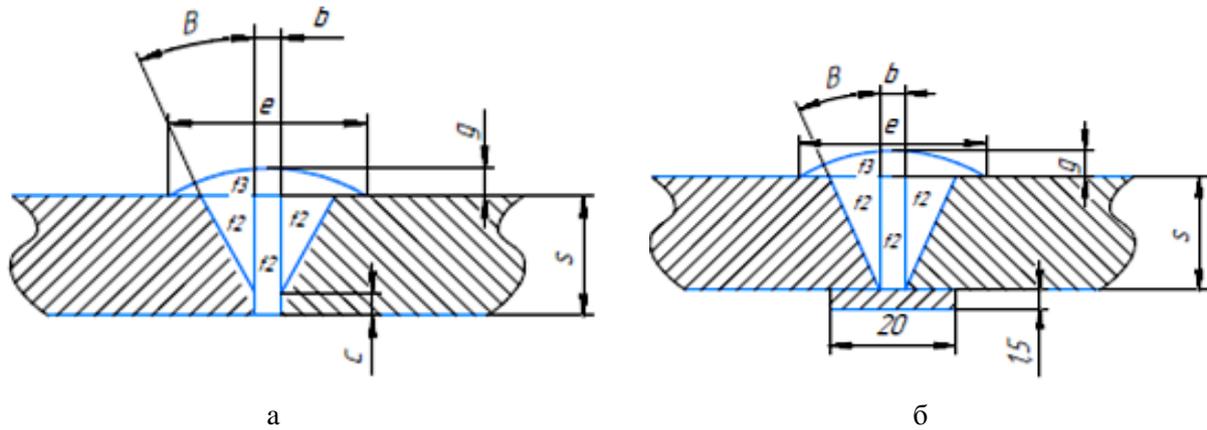


Рис. 1. Схемы сварных соединений С17 (а) и С19 (б)

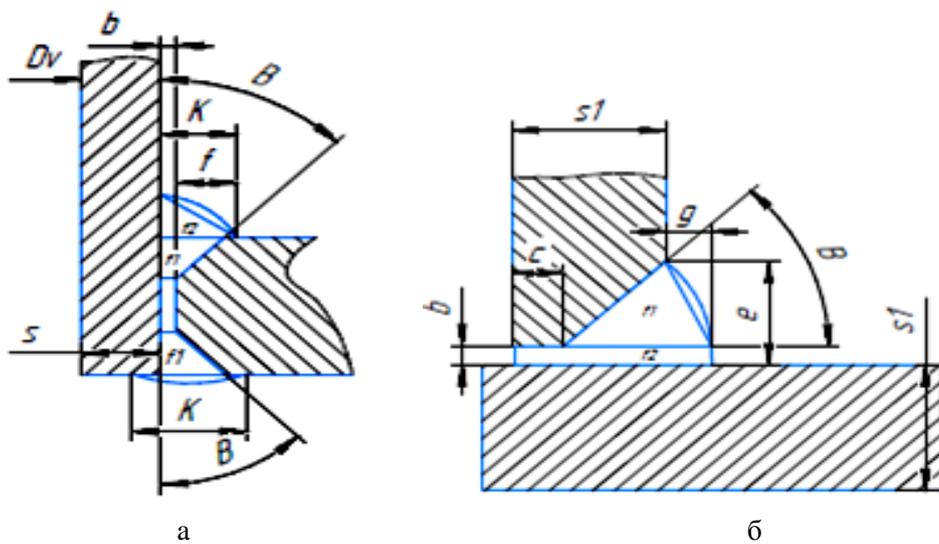


Рис. 2. Схемы сварных соединений У8 (а) и У19 (б)

Математические модели для площади поперечного сечения сварного шва получены как аналитическими, так и численными

$$F = sb + (s - c)^2 \operatorname{tg} \beta + 2 \int_0^{e/2} \sqrt{R^2 - x^2} dx - e \sqrt{R^2 - (e/2)^2}; \quad (2)$$

$$F = sb + s^2 \operatorname{tg} \beta + 2 \int_0^{e/2} \sqrt{R^2 - x^2} dx - e \sqrt{R^2 - (e/2)^2}. \quad (3)$$

Для угловых соединений швов типа У8 и У19 получено соответственно

$$F = f(f + 2b) \operatorname{tg} \beta + 0,5K^2; \quad (4)$$

$$F = 1,3 \left(0,5 \sqrt{(s_1 - c)^2 + (e - b)^2} (s_1 + g - c) \sin \beta + b(s_1 + g) \right). \quad (5)$$

Подставляя найденные выражения (2)-(5) параметров F в формулу (1), имеем модели расчета расхода электродов для указанных типов сварных соединений швов

методами. В результате для соединений типа С17 и С19 модели приняты вид

металлических материалов. Численные методы для вычисления интегралов в (2) и (3) используются для удобства программирования выполняемых расчетов.

Разработка программного приложения

Для автоматизации проводимых по математическим моделям расчетов разработано программное приложение на языке программирования Borland Delphi [14, 15]. Весь массив используемых данных (из [4-6]) помещен в базу данных «welding.mdb», созданную в Microsoft

Access, и заполненная база подключена к среде программирования.

С помощью компонента ADOConnection осуществлено (рис. 3) и проверено подключение к базе данных. Так как работа велась с СУБД MS Access [16], был использован провайдер Microsoft Jet 4.0 OLE DB Provider.

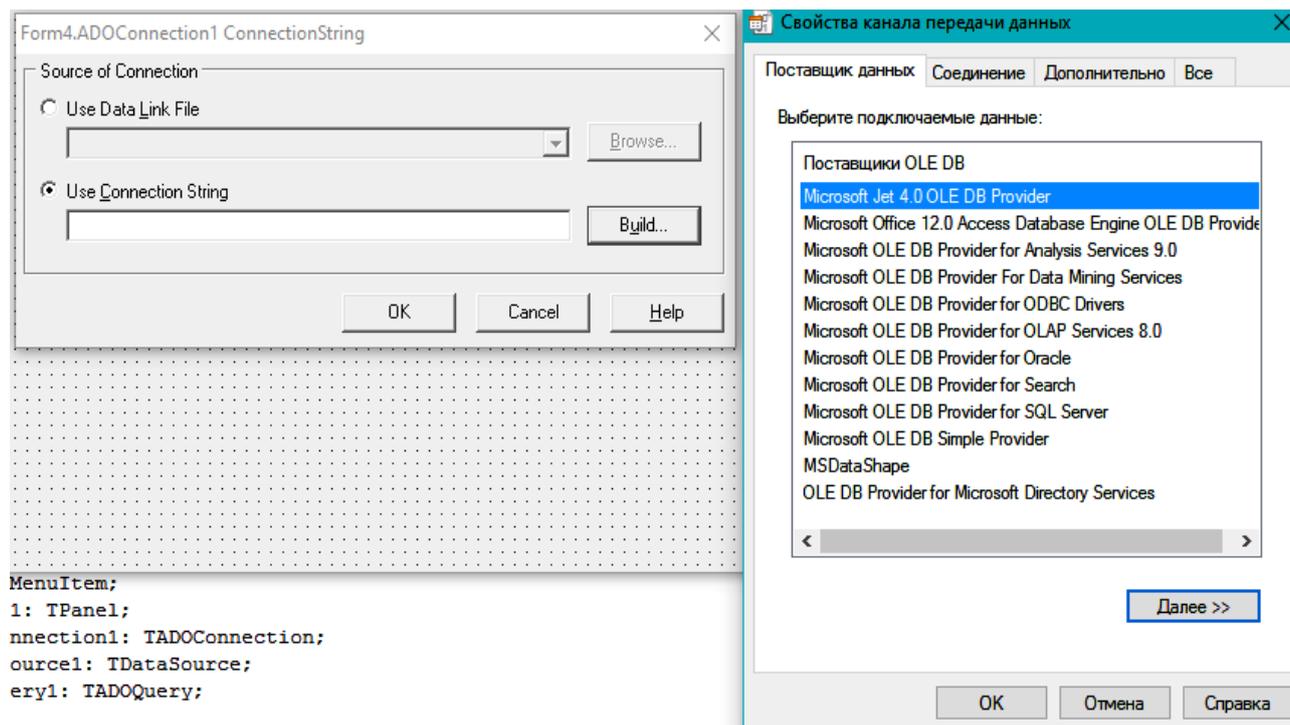


Рис. 3. Подключение к базе данных с помощью компонента ADOConnection

Далее проведены стандартные работы с компонентами DataSource и ADOQuery. В компоненте ADOQuery составлен SQL-запрос к базе данных «welding.mdb»: «Select*from table_c17 ORDER BY id_c17», – в результате которого из таблицы «table_c17» отображаются все записи, причем их сортировка происходит по столбцу «id_c17». Аналогичные запросы осуществлены к таблицам «table_c19», «table_y8», «table_y19».

На рис. 4 представлено главное окно программы, с помощью которого может быть выбран тип нужного сварного соединения металлических материалов.

В окне выбранного типа соединения (рис. 5) можно указать все входные данные конструктивных элементов сварного со-

единения, при этом соответствующие ячейки могут заполняться как вручную, так и из базы данных автоматически. Далее при нажатии на кнопку «Рассчитать» появляется результат вычислений.

В приложении имеется возможность вводить новые данные в базу данных Access, редактировать и удалять записи. В главном окне для таких операций имеется вкладка «Данные», нажав на которую, можно открыть базу данных, в которой располагаются все необходимые с учетом ГОСТ таблицы. Одна из таблиц представлена на рис. 6.

Результаты расчета расхода электродов для некоторых толщин стенок труб всех типов сварных соединений представлены в табл. 2.

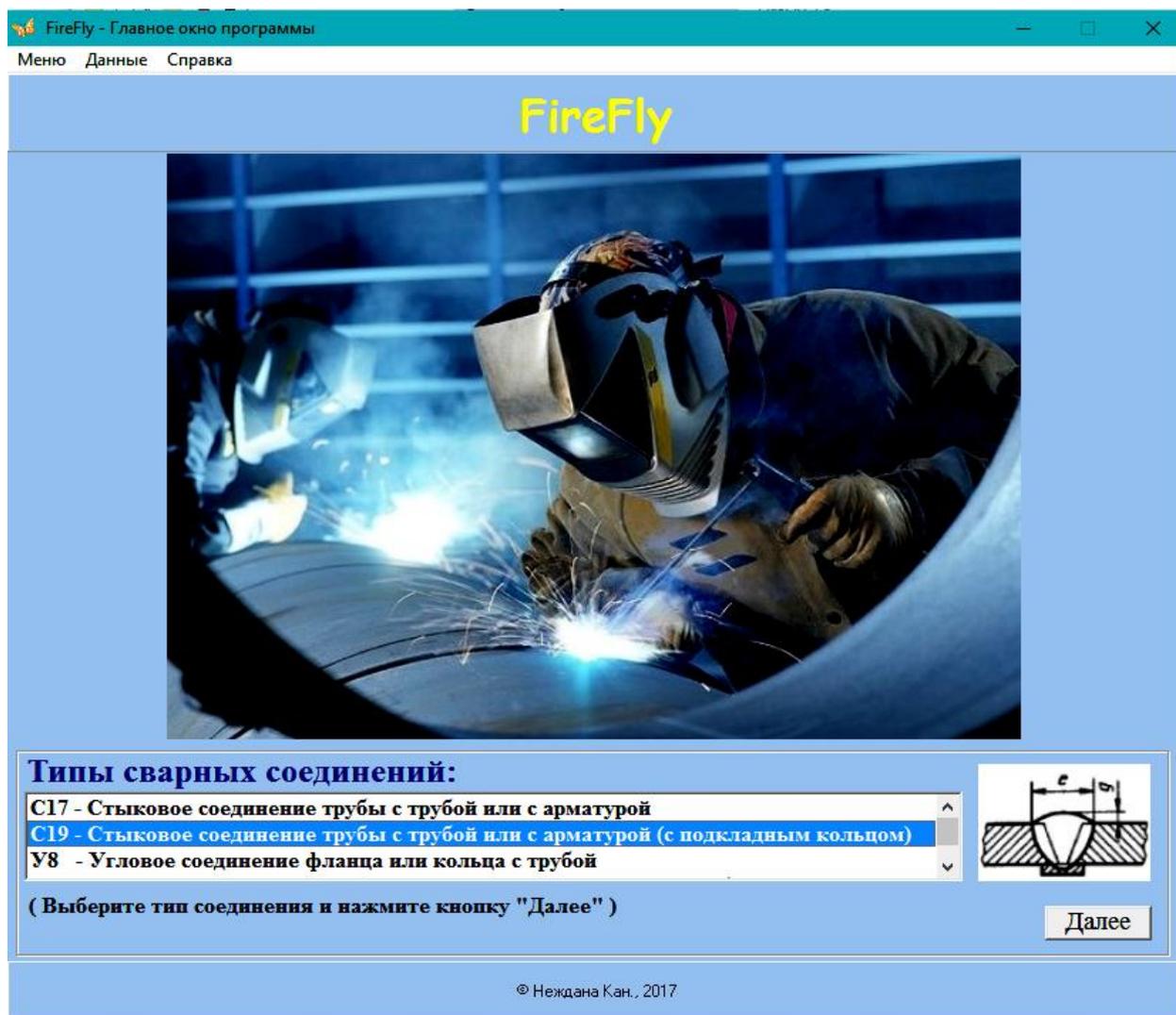


Рис. 4. Главное окно приложения

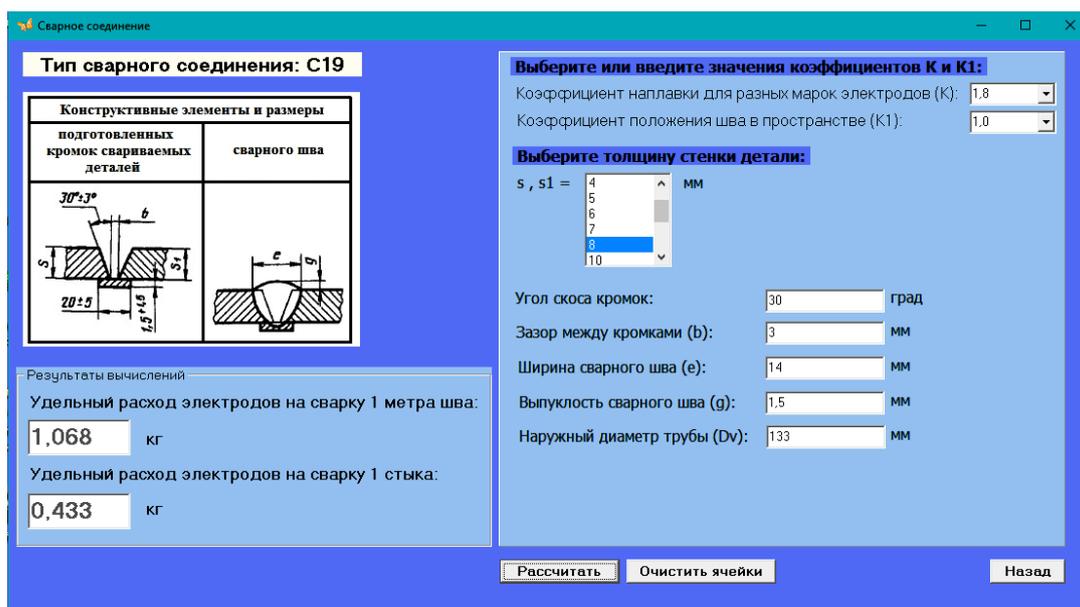


Рис. 5. Окно для расчета расхода электродов

Таблица: сварное соединение У8

Запись

Добавить
Изменить
Удалить

	beta-	beta+	Зазор, b	Фаска фланца, f	Катет шва, K	Толщина стенки трубы, s	s1
1	3	3	0,5	2	3	3	3
2	15	55	3	3	0,5	2	3
3	16	55	3	3	0,5	2	3
4	17	55	3	3	0,5	2	3
5	18	55	3	3	0,5	2	3
6	19	55	3	3	0,5	2	3
7	20	55	3	3	0,5	2	3
8	21	55	3	3	0,5	2	3
9	22	55	3	3	0,5	2	3
10	23	55	3	3	0,5	2	3
11	24	55	3	3	0,5	2	3
12	25	55	3	3	0,5	2	3
13	32	55	3	3	0,5	3	4
14	33	55	3	3	0,5	3	4
15	34	55	3	3	0,5	3	4
16	35	55	3	3	0,5	3	4
17	36	55	3	3	0,5	3	4
18	37	55	3	3	0,5	3	4
19	38	55	3	3	0,5	3	4
20	39	55	3	3	0,5	3	4
21	40	55	3	3	0,5	3	4
22	41	55	3	3	0,5	3	4
23	42	55	3	3	0,5	3	4
24	43	55	3	3	0,5	3	4

Назад

Рис. 6. Таблица базы данных

Таблица 2

Результат работы приложения для некоторых толщин стенок труб

Тип соединения	β , град	s, мм	b, мм	e, мм	g, мм	D_v , мм	c, мм	f, мм	K, мм	Расход, кг
С17	30	10	2	16	2	108	1	—	—	1,256
		12	2	18	2	159	1	—	—	1,679
	15	14	2	21	2	273	1	—	—	1,443
		16	2	23	2	325	1,5	—	—	1,694
		18	2	26	2	377	1,5	—	—	2,044
С19	30	20	2	28	2	530	1,5	—	—	2,405
		14	5	23	2	273	—	—	—	3,043
		16	5	25	2	325	—	—	—	3,715
		18	5	27	2	377	—	—	—	4,454
У8	55	20	5	30	2	530	—	—	—	5,276
		3	0,5	—	—	25	—	2	3	0,123
		4	0,5	—	—	57	—	3	4	0,233
		5	1	—	—	77	—	4	5	0,416
		6	1	—	—	194	—	5	6	0,604
		6	1,5	—	—	245	—	7	8	1,152
		8	1,5	—	—	277	—	8	9	1,452
8	1,5	—	—	393	—	9	10	1,786		
У19	50	10	1	16	3	159	1	—	—	1,584
		12	1	19	5	273	1	—	—	2,484

Заключение

Приложение имеет широкий спектр применения в сварочных производствах различных конструкций, так как согласовано с ГОСТом 16037-80 «Соединения сварные стальных трубопроводов» и технологической инструкцией «Нормы расхода сварочных материалов на ремонт энергетического оборудования и изготовление нестандартного оборудования № 033.ПИ033.117-023-2014».

К достоинствам разработанного приложения следует отнести: точность вычислений (до третьего знака после запятой включительно), удобный интерфейс, наличие собственной базы данных, предназначенной для хранения используемых при расчете исходных данных, возможность работы с базой данных непосредственно из приложения, высокую скорость работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Ядыкин В.К.** Анализ реализации инновационных стратегий развития мировой и российской электроэнергетики / В.К. Ядыкин // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Экономические науки, 2015. № 4 (223). С. 140-156.
2. **Ротштейн А.В.** Сварочные работы на монтаже тепловых электростанций / А.В. Ротштейн, С.С. Якобсон. М.: Энергия, 1969. 408 с.
3. Оборудование и трубопроводы атомных энергетических установок. Сварка и наплавка. Основные положения (ПИ АЭ Г-7-009-89). Сварные соединения и наплавки. Правила контроля (ПН АЭ Г-7-010-89) / Госатомэнергонадзор. М.: Энергоатомиздат, 1991. 320 с.
4. ГОСТ 9467-75. Электроды покрытые металлические для ручной дуговой сварки конструкционных и теплоустойчивых сталей. Введ. 1977-01-01. М.: Изд-во стандартов, 1977. 7 с.
5. ГОСТ 16037-80. Соединения сварные стальных трубопроводов. Введ. 1981-07-01. М.: Изд-во стандартов, 1980. 25 с.
6. ГОСТ 5264-80. Ручная дуговая сварка. Соединения сварные. Введ. 1981-07-01. М.: Изд-во стандартов, 1980. 34 с.
7. Проектирование дефектоскопа на основе спирального электропривода / Р.А. Сафиуллин, И.Ф. Янгиров, Ю.Г. Ишмуратов, Р.А. Ямалтдинов // Актуальные проблемы электроэнергетики: сб. науч.-техн. статей. Н. Новгород: Нижегород. гос. техн. ун-т им. Р.Е. Алексеева, 2019. С. 121-128.
8. Spring drive for defectoscope / R.A. Safiullin, I.F. Yangirov, A.R. Khalikov, A.R. Ayupova // International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (2019ICOECS) Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russia, October 22-25, 2019. P. 618-621.
9. **Бартенев А.М.** Автоматизированное устройство вихревой диагностики / А.М. Бартенев // Новые материалы и технологии: сб. науч. ст. III Российско-Казахстанской молодежной науч.-техн. конф. Барнаул, 2015. С. 175-178.
10. Технологическая инструкция. Нормы расхода сварочных материалов на ремонт энергетического оборудования и изготовление нестандартного оборудования № 033.ПИ033.117-023-2014. Введ. 2014-02-04. Уфа: Редакция 1.0, 2014. 68 с.
11. **Колганов Л.А.** Сварочное производство / Л.А. Колганов. Ростов н/Д.: Феникс, 2002. 512 с.
12. **Хромченко Ф.А.** Сварка оборудования электростанций / Ф.А. Хромченко. М.: Энергия, 1977. 368 с.
13. **Шатерин М.А.** Технология конструкционных материалов: учеб. пособие для вузов / М.А. Шатерин, А.Г. Алексеев. СПб.: Политехника, 2012. 597 с.
14. **Гофман В.Э.** Delphi 6 / В.Э. Гофман, А.Д. Хомоненко. СПб: БХВ-Петербург, 2007. 288 с.
15. **Кен Х.** Delphi 3 и системы клиент/сервер. Руководство разработчика: пер. с англ. / Х. Кен. Киев: Диалектика, 2008. 736 с.
16. **Грофф Дж.** Энциклопедия SQL. 3-е изд. (+ CD) / Дж. Грофф, П. Вайнберг. СПб.: Питер, 2004. 376 с.

Сафина Гульнара Фриловна – кандидат физико-математических наук, доцент Нефтекамского филиала ФГБОУ ВО «Башкирский государственный университет»

Сафиуллин Рузил Ахнафович – кандидат физико-математических наук, доцент Нефтекамского филиала ФГБОУ ВО «Башкирский государственный университет»

Gulnara F. Safina – PhD, Associate Professor, Neftekamsk branch of Bashkir State University

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

Статья поступила в редакцию 27.01.20, принята к опубликованию 15.02.20

СОЦИАЛЬНЫЙ АСПЕКТ

УДК 621.331

СОЗДАНИЕ НА ТЕРРИТОРИИ СГТУ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОЗАРЯДНОЙ СЕТИ ДЛЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ИНВАЛИДНЫХ КОЛЯСОК ВО ИСПОЛНЕНИЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ЗАКОНА О МАЛОМОБИЛЬНЫХ ГРУППАХ НАСЕЛЕНИЯ

В.В. Ермолаева

SSTU CREATES A SMART ELECTRO-CHARGING NETWORK FOR ELECTRIC WHEELCHAIRS PURSUANT TO THE FEDERAL LAW ON PERSONS WITH LIMITED MOBILITY

V.V. Ermolaeva

В настоящее время особую актуальность приобрела проблема средств подзарядки моторизированных инвалидных кресел с аккумуляторными батареями на территории Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Ключевые слова: умные розетки, СГТУ, обеспечение Федерального закона о маломобильных группах населения на территории федерального государственного бюджетного образовательного учреждения, маломобильные группы населения

Введение

Целью проекта является обеспечение Федерального закона о маломобильных группах населения на территории федерального государственного бюджетного образовательного учреждения. В данном случае субъект маломобильной группы населения должен получить услугу по зарядке своего электромобильного транспортного средства при необходимости его подзарядки. Время подзарядки должно составить порядка 15 минут для обеспечения перемещения внутри объекта федеральной собственности. Соответственно субъект

Currently, the problem of means for recharging motorized wheelchairs with rechargeable batteries on the territory of Yuri Gagarin State Technical University of Saratov has acquired particular relevance.

Keywords: smart sockets, SSTU, enforcement of the Federal law on persons with limited mobility on the territory of the Federal state budgetary educational institution, people with restricted mobility

маломобильной группы населения должен иметь возможность реализовать свое право на подзарядку.

Эту проблему можно решить путем создания во всех корпусах СГТУ специализированных мест, оборудованных «умными» розетками, управляемыми через Интернет. Все розетки объединены в единую систему. Каждая такая розетка имеет свой индивидуальный номер в системе, что позволяет активировать ее независимо от остальных. Для того, чтобы воспользоваться этой розеткой, субъект маломобильной группы населения должен быть в ней заранее заре-

гистрирован с помощью специального программного обеспечения.

Использование современных технологий для реализации подзарядки инвалидных кресел

Для чего нужна система, если можно осуществить подзарядку от простой розетки? Пользоваться простой розеткой неудобно, должно быть специально оборудованное место для подзарядки, реализованное специально для предостав-

ления услуги (рис. 1). Оно должно быть расположено так, чтобы не мешать передвижению студентов по коридорам учебного корпуса, и желательно там, где постоянно находятся люди, которые смогут помочь при возникновении непредвиденных чрезвычайных ситуаций, например короткого замыкания в случае неисправности системы подзарядки или электрооборудования инвалидной коляски. Таким местом может быть специально отведенная территория возле вахтера или в районе гардероба.



Рис. 1. Пример установки умной розетки

Также простая неотключаемая розетка не обеспечивает приоритетности субъекта маломобильной группы населения при необходимости ее использования. То есть она может быть занята другим студентом, которому в это же время потребовалось что-то подзарядить. Эта проблема снимается, если для подзарядки инвалидной коляски используется специально оборудованное место, которое никто не должен занимать. Также это место должно быть всегда свободно от посторонних предметов. За этим может следить находящийся рядом вахтер.

Предполагается, что потребительской функцией является получение образова-

тельной услуги, соответственно, образовательный ценз должен позволять обеспечивать потребительские свойства, в том числе с использованием смартфонов, планшетов или ноутбуков, подключенных к сети Интернет. В данном случае человек должен подъехать ручным или механизированным ходом к месту подзарядки, выполненному на основе управляемой через интернет смарт-розетки, запустить на своем телефоне или планшете специальное приложение, с помощью которого система его идентифицирует, и указать номер используемой розетки с необходимым временем подзарядки (рис. 2). Далее ему необходимо во-

ткнуть вилку от электрической системы инвалидного кресла в розетку и запустить процесс зарядки с помощью приложения.



Рис. 2. Принцип использования умной розетки

В данном случае происходит интерактивный режим управления субъектом маломобильной группы населения с помощью смартфона или планшета через интернет этой розеткой. Таким образом, осуществляется обеспечение потребительских функций, разрешение доступа к этому виду государственной услуги, дается задание на время подзарядки или на режим подзарядки. Достаточно, чтобы в рамках перемены в течение 15 минут инвалидное кресло подзарядилось, для того чтобы обеспечить субъекту маломобильной группы населения возможность перемещения в пределах всех доступных зон конкретного учебного корпуса. Подзарядка продолжается в течение 15 минут, после чего приложение на смартфоне сообщает о том, что время закончилось, зарядка реализована, и будет предложено вынуть вилку из уже обесточенной розетки. После того как вилка вытаскивается, субъект маломобильной группы населения подтверждает окончание сеанса взаимодействия с электрозарядным устройством и имеет возможность перемещаться внутри корпуса Саратовского государственного технического университета.

Когда нет зарядки, розетка (гнездо для подключения вилки для зарядки инвалид-

ной коляски) не запитана, поэтому она электробезопасна. Нет необходимости в антивандальном корпусе, так как система управления розеткой может находиться где угодно, например, в отдельной закрытой комнате, а сама розетка – это фактически удлинитель, подведенный к тому месту, куда можно подъехать на инвалидной коляске для подзарядки, и ничем не отличается от других электрических розеток, встроенных в стены здания, кроме графического обозначения, указывающего на ее функцию, номер в системе и, возможно, световой индикации наличия напряжения в ней. В качестве светового индикатора может выступать обычный светодиод, встроенный в корпус розетки (рис. 3). Время, оставшееся до конца зарядки, при этом отображается на экране смартфона субъекта, производящего зарядку в данный момент.



Рис. 3. Пример умной розетки

Могут ли остальные студенты воспользоваться этой услугой? Например, для подзарядки электросамокатов? Да, могут. Каждый студент может создать свой аккаунт, например, по номеру зачетной книжки, может зайти в личный кабинет и управлять любой из розеток, входящих в систему. Студенты могут пользоваться всеми услугами на территории СГТУ, но сначала пропускают перед собой (обеспечивают приоритет) инвалидов, так как в первую очередь система создана именно для них.

Заключение

Разработка проекта, программного обеспечения, конструкции устройства, изготовление, установка и тестирование системы может проводиться бесплатно в рамках курсовых и дипломных работ. Финансовых вложений потребует только

закупка самих типовых дистанционно управляемых через интернет интеллектуальных электрических розеток в количестве, необходимом для развертывания системы. Стоимость одной такой розетки в розницу порядка 1000 рублей.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Тиматков В.В.** Электротранспорт как часть электрического мира. Факты и прогнозы / под ред. В.В. Бушуева. М.: ИД «Энергия», 2015. 48 с. [Электронный ресурс]. URL: http://www.energystrategy.ru/editions/docs/EL_TR.pdf (дата обращения: 05.08.2018).

2. **Батова С.** Троллейбусы смогут объезжать заторы // Российская газета. 2013. 14 февраля. [Электронный ресурс]. URL: <https://rg.ru/2013/02/14/trolleibusi-site.html> (дата обращения: 05.08.2018).

3. В Екатеринбурге представлен низкопольный трамвай // Коммерсантъ Екатеринбург. 2013. 20 декабря. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.kommersant.ru/doc/2374279> (дата обращения: 05.08.2018).

4. **Duncan G-R.** Denmark to power electric cars by wind in vehicle-to-grid experiment // The Guardian. 2009. 19 June. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.theguardian.com/environment/2009/jun/>

19/denmark-wind-electric-cars (дата обращения: 05.08.2018).

5. Транспорт и связь в России: статистический сборник. Федеральная служба государственной статистики, 2014. [Электронный ресурс]. URL: http://www.gks.ru/bgd/regl/B14_5563/Main.htm (дата обращения: 05.08.2018).

6. Энергетическая стратегия холдинга «Российские железные дороги» на период до 2015 года и на перспективу до 2030 года». Москва, 2011. 96 с. [Электронный ресурс]. URL: http://www.rzd-expo.ru/doc/Energ_Strateg_new.pdf (дата обращения: 05.08.2018).

7. «Энергетическая стратегия России на период до 2030 года». Утверждена Распоряжением Правительства РФ от 13.11.2009 г. № 1715-р. [Электронный ресурс]. URL: <https://minenergo.gov.ru/node/1026> (дата обращения: 05.08.2018).

Ермолаева Вероника Викторовна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроэнергетика и электротехника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Veronika V. Ermolaeva – Ph.D., Associate Professor, Department of Electric Power Engineering and Electrotechnology, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 25.01.20, принята к опубликованию 15.02.20

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.

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. Аскаровой

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

Подписано в печать 29.06.2020
Формат 60×84 1/8 Бум. офсет.
Усл. печ. л. 9,25 Уч. изд. л. 4,5
Тираж 500 экз. Заказ 86 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 2-е полугодие 2020 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: 29.06.2020
Paper size: 60×84 1/8. Offset-Print
Conventional printed sheet 9,25 Publication base sheet 4,5
Circulation: 500 printed copies. Order 86 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*