

Издается с ноября 2013 года
Выходит один раз в квартал

№ 1 (6)

Март 2015

ВОПРОСЫ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

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

Главный редактор

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

Зам. главного редактора

д.т.н., профессор **Н.В. БЕКРЕНЕВ**

Ответственный секретарь

к.т.н. **В.С. АЛЕКСЕЕВ**

Редакционный совет

Ю.С. АРХАНГЕЛЬСКИЙ

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

Н.А. БУШУЕВ

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

С.М. ЛИСОВСКИЙ

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

А.А. СЫТНИК

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

Н.В. БЕКРЕНЕВ

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

Редакционная коллегия

И.Н. АНТОНОВ

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

Н.В. БЕКРЕНЕВ

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

В.Б. ДЕМИДОВИЧ

д.т.н., профессор, СПбГЭУ (ЛЭТИ), Санкт-Петербург

Л.С. ЗИМИН

д.т.н., профессор, СамГТУ, Самара

Н.И. ЛОВЦОВА

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

В.Н. ЛЯСНИКОВ

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

А.Н. МАКАРОВ

д.т.н., профессор, ТГТУ, Тверь

Г.А. МОРОЗОВ

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

Ю.П. ПЕРЕЛЫГИН

д.т.н., профессор, ПГУ, Пенза

А.Н. ПЛОТНИКОВ

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

В.П. РУБЦОВ

д.т.н., профессор, НИУ «МЭИ», Москва

Ф.Н. САРАПУЛОВ

д.т.н., профессор, УрФУ, Екатеринбург

Б.К. СИВЯКОВ

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

Ю.Б. ТОМАШЕВСКИЙ

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

Г.Г. УГАРОВ

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

В.Н. ХМЕЛЕВ

д.т.н., профессор, БТИ, Бийск

В.А. ЦАРЕВ

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

В.С. АЛЕКСЕЕВ

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

Since November 2013
Published Quarterly

№ 1 (6)

March 2015

JOURNAL OF ELECTROTECHNICS

Scientific and Technical Publication

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

Chief Editor

Assistant to the Chief Editor

Chief Executive Officer

Dr.Sc., Professor **YU.S. ARKHANGELSKIY**

Dr.Sc., Professor **N.V. BEKRENEV**

PhD **V.S. ALEKSEEV**

Editorial Advisory Committee

YU.S. ARKHANGELSKIY

Dr. Sc., Professor at Department of Automated Installations and Systems in Electrotechnology, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

N.A. BUSHUEV

Dr.Sc., Director General at JSC *Almaz*

S.M. LISOVSKIY

Dr.Sc., Professor at Department of Welding and Metallurgy, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Minister for Industry and Energy in Saratov oblast

A.A. SYTNIK

Dr.Sc., Professor, First Vice-Rector, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

N.V. BEKRENEV

Dr.Sc., Head at Department of Engineering Mechanics and Machine Elements, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Editorial Board Members

I.N. ANTONOV

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

N.V. BEKRENEV

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

V.B. DEMIDOVICH

Dr.Sc., Professor, Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI"

L.S. ZIMIN

Dr.Sc., Professor, Samara State Technical University

N.I. LOVTSOVA

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

V.N. LYASNIKOV

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

A.N. MAKAROV

Dr.Sc., Professor, Tver State Technical University

G.A. MOROZOV

Dr.Sc., Professor, Kazan National Research Technological University

YU.P. PERELYGIN

Dr.Sc., Professor, Penza State University

A.N. PLOTNIKOV

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

V.P. RUBTSOV

Dr.Sc., Professor, National Research University "Moscow Power Engineering Institute"

F.N. SARAPULOV

Dr.Sc., Professor, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, Ekaterinburg

B.K. SIVYAKOV

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

YU.B. TOMASHEVSKY

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

G.G. UGAROV

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

V.N. KHMELEV

Dr.Sc., Professor, Biysk Technological Institute

V.A. TSAREV

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

V.S. ALEKSEEV

PhD, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

СОДЕРЖАНИЕ

ЭЛЕКТРОТЕРМИЯ

- Гришина Е.М., Архангельский Ю.С.** Математическое моделирование термообработки в камерах лучевого типа СВЧ электротермических установок 5
- Алексеев В.С.** Применение программного комплекса Comsol Multiphysics для моделирования процесса сушки влажных капиллярно-пористых материалов 10
- Лысенко Ф.А.** Работа СВЧ электротермической установки в многочастотном режиме 15

ЭЛЕКТРОФИЗИКА

- Бекренев Н.В., Злобина И.В.** Развитие ультразвуковых технологий размерной обработки в Саратове 18
- Перевозникова Я.В., Перешивайлов В.К., Скупова А.В.** Вакуумное напыление прозрачных проводящих пленок на подложки с полимерной основой 28

ЭЛЕКТРОХИМИЯ

- Савельева Е.А., Дикун М.П.** Влияние технологических параметров на эффективность очистки растворов от ионов меди комбинированным способом 32
- Соловьева Н.Д., Фролова И.И., Рыбалкина И.П.** Нанесение никелевого покрытия из низкоконтрированного электролита в нестационарном режиме 37
- Соловьева Н.Д., Шевченко Т.Ю., Екимов И.А.** Электроосаждение композиционных покрытий цинк – углеродные нанотрубки 42
- Ченцова Е.В., Почкина С.Ю.** Электроосаждение покрытия цинк-никель-кобальт на сталь в сульфатно-глицинатном растворе 47
- Райгородский В.М.** Оптимизация процесса электролитического травления алюминиевых сплавов 51

ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ

- Артюхов И.И., Степанов С.Ф., Бочкарев Д.А., Ербаев Е.Т.** Особенности построения автономных систем электропитания на основе генераторов с изменяемой скоростью вращения вала 58
- Баташов С.И., Менщиков И.А., Ручкин А.И.** Факторный анализ энергозатрат в пригородном движении 65

ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА

- Менщиков И.А.** Оценка работоспособности троллейбусного тягового электро-

- двигателя серии ДК – 211БМ с помощью имитационного моделирования 71
- Мошкин В.И., Угаров Г.Г., Шестаков Д.Н., Помялов С.Ю.** Влияние укорочения магнитной системы на статические характеристики линейного электромагнитного двигателя с поперечным магнитным полем 77

ЭЛЕКТРОДИНАМИКА

- Скворцов А.А.** Определение параметров эквивалентной схемы для расчета критических длин основных волн двугребневого и четырехгребневого волноводов со слоистым диэлектрическим заполнением их центральных секций 83

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

- Сальников А.Н.** Диффузионная модель дислокационных эффектов 88
- Гестрин С.Г., Кочелаевская К.В.** Взаимодействие электрического поля заряженных дислокаций с примесными атомами в полупроводниках 93
- Пенкина Н.А., Устинова Т.П., Розов Р.М., Варюхин В.В.** Изучение влияния СВЧ-модификации волокнистого базальтового наполнителя на параметры синтеза и функциональные свойства фенолоформальдегидного катионита на его основе 100

СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

- Тригорный С.В., Томашевский Ю.Б., Алексеев В.С., Джема Д.В.** О задачах разработки интеллектуальных систем управления электротехнологическими установками и электропотреблением предприятий... 107

СОЦИАЛЬНЫЙ АСПЕКТ

- Кирьянова Т.А., Гришина Е.М., Архангельский Ю.С.** Студенты-электрики об учебном процессе на примере энергетического факультета сгту имени Гагарина Ю.А.... 115
- Сальников А.Н.** Развитие физического образования в технических вузах России в конце 20-го века 120

ЛЕТОПИСЬ

- Овчинникова Г.П.** По страницам жизни профессора Артеменко С.Е. 133
- Между нами, физиками. 136
- Архангельский Ю.С.** История СВЧ электротехнологии 144
- К сведению авторов 155

CONTENTS

ELECTROTHERMY

- Grishina E.M., Arkhangelskiy Yu.S.** Mathematical Modeling of Heat Treatment in the Beam-Type Microwave Chambers of Electrothermal Plants..... 5
- Alekseyev V.S.** Using the Comsol Multiphysics Software to Model Drying of Wet Capillary-Porous Materials..... 10
- Lysenko F.A.** Operation of a Microwave Electrothermal Installation in the Multi-Frequency Mode..... 15

ELECTROPHYSICS

- Bekrenev N.V., Zlobina I.V.** Development for Ultrasonic Technologies of Dimensional Processing in Saratov 18
- Perevoznikova Ya.V., Pereshivaylov V.K., Skupova A.V.** Vacuum Deposition Transparent Conductive Films on Substrates with Polymer-Based 28

ELECTROCHEMISTRY

- Savelyeva E.A., Dicun M.P.** Technological Parameters for Effective Purification of Solutions From Copper Ions Using a Combined Method..... 32
- Solovyova N.D., Frolova I.I., Rybalkina I.P.** Nickel Coatings with Low Concentration Electrolyte Under a non-Stationary Mode..... 37
- Solovyova N.D., Shevchenko T.Yu., Ekimov I.A.** Electrodeposition of Composite Zinc - Carbon Nanotube Coatings..... 42
- Chentsova E.V., Pochkina S.U.** Electrodeposition of Zinc-Nickel-Cobalt Coatings over the Steel in Sulfate-Glycinate Solutions..... 47
- Raigorodskiy V.M.** Optimization of Electrolytic Etching for Aluminium Alloys..... 51

ELECTRIC POWER SUPPLY

- Artyukhov I.I., Stepanov S.F., Bochkarev D.A., Erbaev E.T.** Features Build Autonomous Power Systems on the Basis of Generators with Variable Shaft Speed of Rotation..... 58
- Batashov S.I., Menshikov I.A., Ruchkin A.I.** The Factor Analysis of Energy Consumption in Suburban Traffic..... 65

ELECTROMECHANICS

- Menshikov I.A.** Performance Evaluation of Trolleybus Traction Motor Series DC - 211BM Using Simulation..... 71

- Moshkin V.I., Ugarov G.G., Shestakov D.N., Pomyalov S.Yu.** Influence of Magnetic Shortening on the Static Characterization of Linear Electromagnetic Motor with the Transverse Magnetic Field..... 77

ELECTRODYNAMICS

- Skvortsov A.A.** Determination of Equivalent Network Parameters For Calculating the Dominant Wavelengths of Double - and Four- Ridged Waveguides with the Layered Dielectric Filling in the Central Section 83

MATERIALS SCIENCE

- Salnikov A.N.** The Diffusion Model of Dislocation Effects..... 88
- Gestrin S.G., Kochelaevskaya K.V.** Interaction of the Electric Field of Charged Dislocations with Impurity Atoms in Semiconductors..... 93
- Penkina N.A., Ustinova T.P., Rozov R.M., Varyukhin V.V.** The Influence of Microwave Modification in the Fiber Basalt Filler on the Synthesis Parameters and Functional Properties of Phenolformaldehyde Cationics..... 100

CONTROLLING SYSTEMS

- Trigorly S.V., Tomashevskiy Yu.B., Alekseev V.S., Dzhema D.V.** Designing Intelligent Systems to Control Electro-Technological Plants and Power Consumption at Enterprises..... 107

SOCIAL ASPECT

- Kiriyanova T.A., Grishina E.M., Arkhangelskiy Yu.S.** Future Electrical Engineers about the Educational Process (a Case Study of the Power Engineering Faculty at Yuri Gagarin State Technical University of Saratov)..... 115
- Salnikov A.N.** Development of Physical Education in Technical Colleges Russia in Late 20th Century 120

CHRONICLE

- Ovchinnikova G.P.** Through the Pages of Life of a Professor Artemenko S.E..... 133
- Between us Physicists..... 136
- Arkhangelskiy Yu.S.** History of Microwave Electrotechnology 144
- Information for Authors..... 155

ЭЛЕКТРОТЕРМИЯ

УДК 621.365.5

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМООБРАБОТКИ В КАМЕРАХ ЛУЧЕВОГО ТИПА СВЧ ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Е.М. Гришина, Ю.С. Архангельский

MATHEMATICAL MODELING OF HEAT TREATMENT IN THE BEAM- TYPE MICROWAVE CHAMBERS OF ELECTROTHERMAL PLANTS

E.M. Grishina, Yu.S. Arkhangelskiy

Предложен метод математического моделирования нагрева диэлектриков в камерах лучевого типа СВЧ электротермических установках с учетом зависимости диэлектрических параметров обрабатываемого объекта от температуры.

Ключевые слова: *нагрев, математическое моделирование, камера лучевого типа, диэлектрические параметры, температура*

Термообработка диэлектриков в электромагнитном поле описывается уравнениями Максвелла и тепломассопереноса (теплопроводности) [1-3]. Решение самосогласованной краевой задачи электродинамики и тепломассопереноса (теплопроводности) в СВЧ электротермии позволяет проводить анализ и синтез рабочих камер СВЧ электротермических установок и математическое моделирование реализуемых в них процессов термообработки [2-4].

Задача существенно усложняется, если эти расчеты проводить с учетом зависимости диэлектрических параметров обрабатываемого диэлектрика от температуры $\varepsilon'(T)$, $\operatorname{tg} \delta(T)$, где ε' – относительная диэлектрическая проницаемость, $\operatorname{tg} \delta$ – тангенс угла диэлектрических потерь.

The proposed method for mathematical modeling of heat insulators in the cells of beam-type microwave electrothermal installations takes into account the dependence of dielectric parameters of the processed object on the temperature characteristics.

Keywords: *heating, mathematical modeling, luggage radial type, dielectric parameters, temperature*

Покажем, как этот учет можно провести, используя теорию цепей (теорию длинных линий).

Рассмотрим камеру лучевого типа (КЛТ) СВЧ электротермической установки, собранную на пирамидальном рупоре и работающую на полупространство с диэлектрическими параметрами $\varepsilon'(T)$, $\operatorname{tg} \delta(T)$ (рис. 1).

Пусть мощность СВЧ генератора P , частота электромагнитных колебаний f (длина волны λ), сечение апертуры рупора $a \times a$, излучение по сечению апертуры равномерное, перпендикулярное поверхности обрабатываемого диэлектрика.

Часть СВЧ мощности $P_{\text{отр}}$ от поверхности диэлектрика отражается, причем

$$P_{\text{отр}} = |\Gamma|^2 P,$$

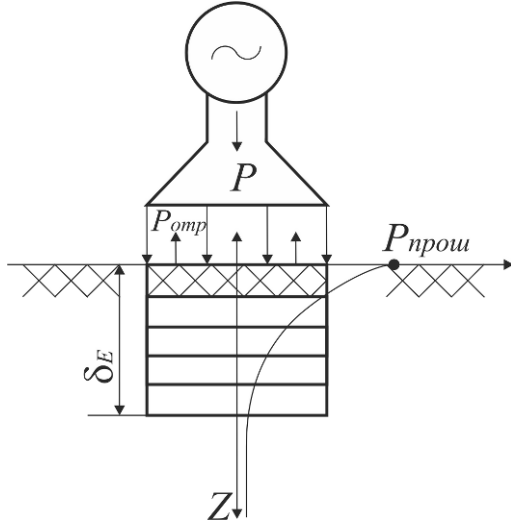


Рис. 1. КЛТ с рупорным пирамидальным излучателем, работающая на полупространство, заполненное диэлектриком с $\varepsilon'(T)$, $\text{tg}\delta(T)$

другая часть проходит в диэлектрик

$$P_{\text{прош}} = (1 - |\Gamma|^2)P = \eta P, \quad (1)$$

где Γ – коэффициент отражения от поверхности диэлектрика; $\eta = 1 - |\Gamma|^2$ – КПД по использованию СВЧ мощности.

Проходя в диэлектрик в направлении z , плоская электромагнитная волна затухает с коэффициентом затухания [1]

$$\alpha = \frac{\pi}{\lambda} \sqrt{2\varepsilon'(\sqrt{1 + \text{tg}^2 \delta} - 1)}, \quad (2)$$

то есть

$$P_{\text{прош}}(z) = P_{\text{прош}}(z=0)e^{-2\alpha(T)z}. \quad (3)$$

Здесь $\alpha(T)$, так как $\varepsilon'(T)$, $\text{tg}\delta(T)$.

За глубину проникновения электромагнитной волны в диэлектрик принимают величину δ_E , на которой напряженность электромагнитной волны E уменьшается в e раз:

$$\delta_E = \frac{\lambda}{\pi \sqrt{2\varepsilon'(\sqrt{1 + \text{tg}^2 \delta} - 1)}}. \quad (4)$$

Если охарактеризовать обрабатываемый диэлектрик, как это принято в теории цепей, некоторым входным сопротивлением $Z_{\text{вх}}$, то коэффициент отражения от поверхности диэлектрика равен [5]

$$\Gamma = \frac{Z_{\text{вх}} - Z_0}{Z_{\text{вх}} + Z_0}, \quad (5)$$

где Z_0 – волновое сопротивление среды, находящейся между рупорным излучателем и обрабатываемым диэлектриком, то есть воздуха, а это значит, что $Z_0 = 377$ Ом.

Чтобы рассчитать $Z_{\text{вх}}$, разобьем обрабатываемый диэлектрик на N слоев толщиной δ_E/N , на которых и будем рассчитывать изменение температуры во времени. При этом более глубокие слои, будем считать, находятся при начальной температуре (допустим 20°C). В таком случае слои будут толщиной δ_E оказываться нагруженными линией передачи с волновым сопротивлением

$$Z_{020^\circ\text{C}} = \frac{377}{\sqrt{\varepsilon'(1 - \text{tg} \delta)}}, \quad (6)$$

где $\varepsilon'(20^\circ\text{C})$; $\text{tg}\delta(20^\circ\text{C})$.

Входное сопротивление самого глубокого из N слоев равно [5]

$$Z_{\text{вх}} = Z_0 \frac{Z_H + Z_0 \text{th} \gamma \Delta z}{Z_0 + Z_H \text{th} \gamma \Delta z}, \quad (7)$$

где Z_0 – волновое сопротивление рассматриваемого слоя, записываемое по аналогии с (6), $\gamma = \alpha + j\beta$ – постоянная распространения рассматриваемого слоя; α – коэффициент затухания, рассчитываемый по (2); β – коэффициент фазы

$$\beta = \frac{\pi}{\lambda} \sqrt{2\varepsilon'(\sqrt{1 + \text{tg}^2 \delta} + 1)}, \quad (8)$$

а $Z_H = Z_{020^\circ\text{C}}$.

Входное сопротивление самого глубокого слоя, рассчитанное по (7), является нагрузкой для предпоследнего слоя, входное сопротивление которого записывается аналогично (7). Подобные расчеты поочередно до самого верхнего из N слоев дают возможность рассчитать η и $P_{\text{прош}}$.

Расчет $T(N, t)$ и $\eta(t)$ может быть произведен следующим образом.

1. В начальный момент времени все слои диэлектрика находятся при 20°C и ε' , $\text{tg } \delta$ у всех слоев одинаковы. В таком случае $Z_{\text{вх}}$ диэлектрика можно рассчитать по (7), по (5) найти Γ , а по (1) – $P_{\text{прош}}$ и η .

2. Для $\varepsilon'(20^\circ\text{C})$; $\text{tg } \delta(20^\circ\text{C})$ по (3) рассчитываем $P_{\text{прош}}(z)$, где

$$z = 0, \frac{\delta_E}{N}, \frac{2\delta_E}{N}, \dots, \delta_E.$$

3. Находим СВЧ мощность, поглощенную в каждом слое, например

$$\begin{aligned} \Delta P_1 &= P_{\text{прош}} - P_{\text{прош}} e^{-\frac{2\alpha\delta_E}{N}}; \\ \Delta P_2 &= P_{\text{прош}} e^{-\frac{2\alpha\delta_E}{N}} - P_{\text{прош}} e^{-\frac{4\alpha\delta_E}{N}}, \end{aligned} \quad (9)$$

4. Считаем, что на некотором интервале времени t_1 , диэлектрические параметры слоев остаются постоянными, так что время нагрева верхнего слоя до температуры T_{11} равно

$$t_1 = \frac{c\rho V(T_{11} - T_{\text{нач}})}{\Delta P_1}, \quad (10)$$

где c , ρ – удельная теплоемкость и плотность обрабатываемого объекта, $T_{\text{нач}}$ – начальная температура слоя (в данном случае $T_0 = 20^\circ\text{C}$); $V = a^2 \frac{\delta_E}{N}$ – объем каждого слоя.

5. Через время t_1 верхний первый слой будет иметь температуру T_{11} , температуру второго слоя можно рассчитать по соотношению

$$T_{21} = T_0 + \frac{\Delta P_2 t_1}{c\rho V}. \quad (11)$$

Аналогично рассчитываем $T_{31}, \dots, T_{N1}$.

6. Зная ε' , $\text{tg } \delta$, определим для каждого слоя $\varepsilon'(T_{11})$, $\varepsilon'(T_{21})$, $\dots$, $\varepsilon'(T_{N1})$ и $\text{tg } \delta(T_{11})$, $\text{tg } \delta(T_{21})$, $\dots$, $\text{tg } \delta(T_{N1})$.

7. С помощью (6) – (8) по описанной выше методике находим $Z_{\text{вх}}(z=0)$ с учетом изменившихся в слоях значений ε' и $\text{tg } \delta$.

8. По (5) и (1), зная $Z_{\text{вх}}$ в момент времени t_1 , находим новые значения Γ , η и $P_{\text{прош}}$.

9. Повторим для нового значения $P_{\text{прош}}$ расчет $P_{\text{прош}}(z)$, учитывая, что теперь в каждом слое изменились ε' , $\text{tg } \delta$, α и β .

10. Аналогично (9) находим новые значения ΔP_1 , ΔP_2 , $\dots$, ΔP_N , а затем по (10) определим время нагрева верхнего слоя до новой температуры, где $T_{\text{нач}}$ – температура первого слоя на первом шаге по времени.

11. В дальнейшем по предложенной схеме расчеты продолжаются по слоям и новым интервалам времени до достижения заданной температуры в верхнем слое.

Продemonстрируем предложенную схему расчета на примере нагрева мяса (говядины) на частоте 2450 МГц, при СВЧ мощности генератора $P=1000$ Вт, если $a \times a = 10 \times 10$ см. Зависимости ε' и $\text{tg } \delta$ приведены на рис. 2.

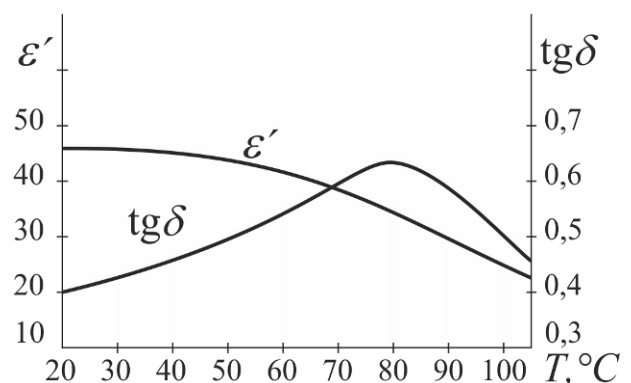


Рис. 2. Зависимости ε' и $\text{tg } \delta$ говядины на частоте 2450 МГц

На рис. 3 показаны зависимости $T(N)$ при t_1 – параметре, причем величина $\delta_E \approx 1,4$ см разбивалась на 14 слоев ($N=14$), так что толщина слоя 0,1 см.

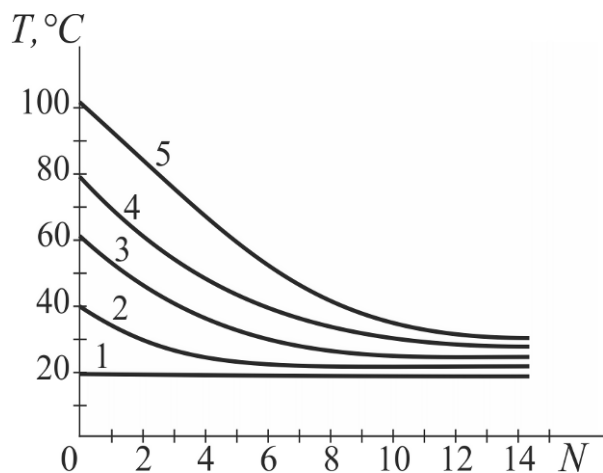


Рис. 3. Зависимость $T(N)$: 1 – $t_1 = 11,4$ с; 2 – $t_2 = 10,4$ с; 3 – $t_3 = 9,6$ с; 4 – $t_4 = 8,9$ с

Расчет, разумеется, упрощается, если провести его на средние значения ε' , $\text{tg} \delta$ обрабатываемого объекта. Так, у говядины в диапазоне $20 - 100^\circ\text{C}$ $\varepsilon'_{cp} = 38,3$, $\text{tg} \delta_{cp} = 0,52$, причем разница в значениях температуры, рассчитанной с учетом $\varepsilon'(T)$ и $\text{tg} \delta(T)$ и на ε'_{cp} и $\text{tg} \delta_{cp}$, составляет 1 – 3 %.

Зависимость $T(t)$ иллюстрирует рис. 4, а $\eta(t)$ рис. 5.

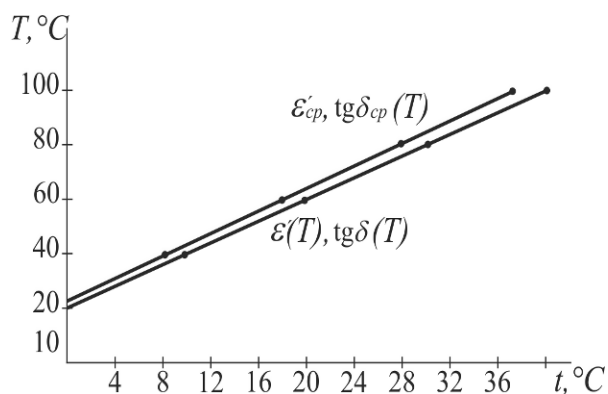


Рис. 4. Зависимости $T(t)$, рассчитанные при ε'_{cp} , $\text{tg} \delta_{cp}(T)$ и $\varepsilon'(T)$, $\text{tg} \delta(T)$

Длительность обработки, рассчитанная при ε'_{cp} , $\text{tg} \delta_{cp}$ меньше на 5,2 %, чем длительность, рассчитанная при $\varepsilon'(T)$ и $\text{tg} \delta(T)$.

Наконец, на рис. 5 показаны зависимости $\eta(t)$, рассчитанные при ε'_{cp} , $\text{tg} \delta_{cp}(T)$ и $\varepsilon'(T)$ и $\text{tg} \delta(T)$.

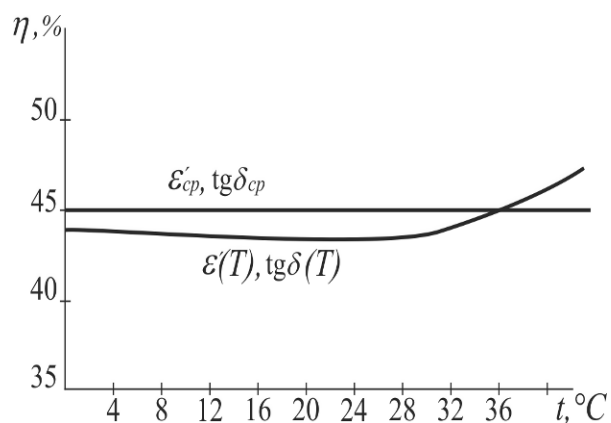


Рис. 5. Зависимости $\eta(t)$, рассчитанные при ε'_{cp} , $\text{tg} \delta_{cp}(T)$ и $\varepsilon'(T)$ и $\text{tg} \delta(T)$

Согласно рис. 5, η , рассчитанный при ε'_{cp} , $\text{tg} \delta_{cp}$ остается постоянным ($\eta = 45\%$), на большом интервале времени и несколько большим, чем η , рассчитанный для $\varepsilon'(T)$ и $\text{tg} \delta(T)$, так как $\varepsilon'_{cp} < \varepsilon'(20^\circ\text{C})$.

Таким образом, приведенные соотношения удобны для инженерных расчетов, так как в них нет трудных вычислений даже при современном уровне вычислительной техники, а конкретные величины позволяют оценить как энергетическую эффективность КЛТ, а с ней и всей СВЧ электротермической установки, так и ее производительность, а в конечном счете – и экономическую эффективность.

При этом надо иметь в виду, что результаты расчета при ε'_{cp} , $\text{tg} \delta_{cp}$ и $\varepsilon'(T)$ и $\text{tg} \delta(T)$ отличаются друг от друга тем больше, чем больше разница в первую очередь между ε'_{cp} и $\varepsilon'(20^\circ\text{C})$.

ЛИТЕРАТУРА

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

2. **Архангельский Ю.С.** СВЧ электротермические установки лучевого типа / Ю.С. Архангельский, С.В. Тригорлый. – Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2000. 122 с.

3. **Архангельский Ю.С.** Камеры луче-

вого типа СВЧ электротехнологических установок / Ю.С. Архангельский, К.Н. Огурцов, Е.М. Гришина. – Саратов: Изд-ий Дом «Полиграфия Поволжья», 2010. 229 с.

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

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

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

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

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

Статья поступила в редакцию 11.02.15, принята к опубликованию 16.02.15

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.

ПРИМЕНЕНИЕ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА COMSOL MULTIPHYSICS ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА СУШКИ ВЛАЖНЫХ КАПИЛЛЯРНО-ПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ

В.С. Алексеев

USING THE COMSOL MULTIPHYSICS SOFTWARE TO MODEL DRYING OF WET CAPILLARY-POROUS MATERIALS

V.S. Alekseyev

Рассматривается применение программного комплекса Comsol Multiphysics для моделирования взаимосвязанных задач. Приведено математическое моделирование процесса сушки капиллярно-пористого влажного материала.

Ключевые слова: Comsol Multiphysics, моделирование, самосогласованная задача, сушка, коэффициентная форма

The Comsol Multiphysics software used in modeling self-consistent problems is considered. The mathematical modeling is applied for drying capillary-porous wet materials.

Keywords: Comsol Multiphysics, modeling, self-consistent problem, drying, coefficient form

С развитием информационных и компьютерных технологий широкое применение получило математическое 3D моделирование физических процессов. Оно позволяет еще на начальном этапе исследования сделать вывод об эффективности физического эксперимента, зачастую проводимого на дорогостоящем оборудовании, тем самым позволяя в будущем избежать необоснованных финансовых издержек при его проведении. С другой стороны, математическое моделирование физических процессов в большинстве случаев является основой всего исследования, особенно в тех случаях, когда процессы протекают в недоступных для физического эксперимента местах.

Из всего многообразия современных программных продуктов хотелось бы выделить программный комплекс Comsol Multiphysics, разработанный шведской фирмой Comsol. Он позволяет разрабатывать трехмерные модели сложных технических устройств со всеми разнообраз-

ными физическими процессами, протекающими в этих устройствах [1]. Работа программного комплекса Comsol Multiphysics основана на методе конечных элементов, что, как правило, сопровождается большими объемами вычислений. Данный программный комплекс позволяет решать тот или иной класс задач в виде специальных прикладных режимов, при загрузке которых автоматически выбираются необходимые уравнение или система уравнений, описывающие исследуемый физический процесс, в которых требуется задать только коэффициенты и граничные условия. В Comsol Multiphysics доступны для решения классы задач электростатики, электродинамики, электромагнетизма, тепло- и массопереноса, акустики, теории упругости, гидродинамики, а также классические дифференциальные уравнения, такие как уравнения теплопроводности, массопроводности, которые наиболее часто встречаются при моделировании электротехнологических процессов. В выше-

указанных классах задач возможно проводить решения стационарных, нестационарных и параметрических задач, а также задач на собственные значения [2].

При наличии большого числа возможностей у программного комплекса Comsol Multiphysics, при моделировании некоторых физических процессов могут возникнуть трудности. Речь идет о так называемых самосогласованных задачах. Рассмотрим, к примеру, наиболее часто встречающийся физический процесс в области электротехнологии, а именно нагрев какого-либо объекта. Как известно, нагрев любого тела описывается уравнением теплопроводности, поэтому для исследования этого процесса в Comsol Multiphysics предусмотрен специальный прикладной режим Heat Transfer (теплоперенос), применение которого позволяет с достаточной точностью провести моделирование про-

цесса нагрева. Трудностей при этом особых не возникает. Другое дело, когда речь идет о взаимосвязанных процессах, например, о сушке материалов. При сушке помимо переноса теплоты происходит перенос массы, поэтому при моделировании процесса сушки в Comsol Multiphysics необходимо использовать два специальных прикладных режима – Heat Transfer и Convection and Diffusion (конвекция и диффузия), что может вызвать затруднения при их совместном использовании из-за необходимости их согласования между собой. Для того чтобы избежать этих трудностей, в программном комплексе предусмотрен общий прикладной режим Coefficient Form (коэффициентная форма), который позволяет моделировать любой физический процесс, так как уравнение процесса представлено в общем виде с соответствующим набором коэффициентов [3]:

$$e_a \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + d_a \frac{\partial u}{\partial t} + \nabla(-c \nabla u - \alpha u + \gamma) + \alpha u + \beta \nabla u = f, \quad (1)$$

где u – параметр, характеризующий процесс (искомое скалярное поле); e_a – массовый коэффициент, характеризующий волновое расширение нестационарного процесса; d_a – коэффициент демпфирования, характеризующий нестационарный процесс; c – коэффициент диффузии; α – коэффициент, характеризующий конвективный поток; γ – слагаемое, характеризующее поток источника (стока) поля; a – коэффициент абсорбции; β – коэффициент конвекции; f – слагаемое, характеризующее источник (сток) процесса; t – время.

Начальные условия в коэффициентной форме имеют вид:

$$\begin{aligned} u(t_0) &= \varphi(x, y, z), \\ u_t(t_0) &= \psi(x, y, z), \end{aligned} \quad (2)$$

где $u(t_0)$ и $u_t(t_0)$ – функции распределения и скорости изменения скалярного поля в начальный момент времени.

Граничные условия в коэффициентной форме имеют вид

$$\begin{aligned} n(c \nabla u + \alpha u - \gamma) + q u &= g - h^T \mu; \\ h u &= r, \end{aligned} \quad (3)$$

где n – вектор нормали; h^T – транспонированная матрица коэффициентов h ; q , g , h , r – коэффициенты, характеризующие распределение скалярного поля на границе объема; μ – множитель Лагранжа.

Рассмотрим математическое моделирование процесса сушки трехмерного капиллярно-пористого влажного тела (пластины). Процесс сушки в общем виде без учета фильтрационного переноса описывается уравнениями [4]

$$\begin{aligned} c_m \rho_0 \frac{\partial T}{\partial \tau} &= \nabla(\lambda \nabla T) + \frac{\varepsilon r_0}{c_m} \frac{\partial U}{\partial \tau}, \\ (1 - \varepsilon) \frac{\partial U}{\partial \tau} &= \nabla(a_m \nabla T + a_m \nabla U), \end{aligned} \quad (4)$$

начальными условиями

$$\begin{aligned} T(0) &= T_0; \quad U(0) = U_0, \\ \frac{\partial T(0)}{\partial \tau} &= \frac{\partial U(0)}{\partial \tau} = 0, \end{aligned} \quad (5)$$

и граничными условиями

$$\begin{aligned} -\lambda \nabla T + \alpha_T (T_c - T) - (1 - \varepsilon) r_0 \alpha_m \rho_0 (U - U_p) &= 0, \\ a_m \delta \nabla T + a_m \nabla U + \alpha_m (U - U_p) &= 0, \end{aligned} \quad (6)$$

где c_m – удельная теплоемкость влажного тела, Дж/(кг·К); ρ_0 – плотность сухого материала, кг/м³; T – температура тела, К; λ – коэффициент теплопроводности влажного тела, Вт/(м·К); ε – критерий фазового перехода; r_0 – удельная теплота парообразования, Дж/кг; U – влагосодержание тела; a_m – коэффициент диффузии влаги, м²/с; δ – относительный коэффициент термодиффузии, К⁻¹; α_m – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К); T_c – температура

окружающей среды, К; α_m – коэффициент массоотдачи, кг/(м²·с); T_0 – начальная температура тела, К; U_0 – начальное влагосодержание тела; U_p – равновесное влагосодержание тела; τ – время, с.

Приведем уравнения (4) – (6) к виду (1) – (3). Так как уравнения (4) – (6) представляют собой системы с двумя переменными, то переменные и коэффициенты в (1) – (3) будут представлены в матричном виде:

$$\begin{aligned} u &= \begin{pmatrix} T \\ U \end{pmatrix}; \quad d_a = \begin{pmatrix} c_m \rho_0 & \frac{\varepsilon r_0}{c_m} \\ 0 & 1 - \varepsilon \end{pmatrix}; \quad c = \begin{pmatrix} \lambda & 0 \\ a_m \delta & a_m \end{pmatrix}, \\ q &= \begin{pmatrix} \alpha & (1 - \varepsilon) r_0 \alpha_m \rho_0 \\ 0 & \alpha_m \end{pmatrix}; \quad g = \begin{pmatrix} \alpha_m T_c + (1 - \varepsilon) r_0 \alpha_m \rho_0 U_p \\ \alpha_m U_p \end{pmatrix}. \end{aligned} \quad (7)$$

Остальные коэффициенты в (1) – (3) с учетом (4) – (6) будут являться матрицами с нулевыми элементами.

Таким образом, система уравнений (4), начальные (5) и граничные (6) условия в коэффициентной форме будут иметь следующий вид:

$$\begin{pmatrix} c_m \rho_0 & \frac{\varepsilon r_0}{c_m} \\ 0 & 1 - \varepsilon \end{pmatrix} \frac{\partial}{\partial \tau} \begin{pmatrix} T \\ U \end{pmatrix} + \nabla \left[- \begin{pmatrix} \lambda & 0 \\ a_m \delta & a_m \end{pmatrix} \nabla \begin{pmatrix} T \\ U \end{pmatrix} \right] = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (8)$$

$$\begin{aligned} u(t_0) &= \begin{pmatrix} T_0 \\ U_0 \end{pmatrix}, \\ u_t(t_0) &= \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \end{aligned} \quad (9)$$

$$\mathbf{n} \left[\begin{pmatrix} \lambda & 0 \\ a_m \delta & a_m \end{pmatrix} \nabla \begin{pmatrix} T \\ U \end{pmatrix} \right] + \begin{pmatrix} \alpha & (1-\varepsilon)r_0\alpha_m\rho_0 \\ 0 & \alpha_m \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T \\ U \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \alpha_m T_c + (1-\varepsilon)r_0\alpha_m\rho_0 U_p \\ \alpha_m U_p \end{pmatrix}. \quad (10)$$

Используя соотношения (8) – (10) и интерфейс программного комплекса Comsol Multiphysics, а также численные значения коэффициентов $c_m = 960$ Дж/(кг·К), $\rho_0 = 390$ кг/м³, $\varepsilon = 0,7$, $r_0 = 2,26 \cdot 10^6$ Дж/кг, $\lambda = 0,35$ Вт/(м·К), $a_m = 2,3 \cdot 10^{-8}$ м²/с, $\delta = 2,5 \cdot 10^{-3}$ К⁻¹,

$\alpha_m = 60$ Вт/(м²·К), $T_0 = 293$ К, $U_0 = 0,5$, $T_c = 323$ К, $\alpha_m = 5 \cdot 10^{-2}$ кг/(м²·с), $U_p = 0,39$, было проведено моделирование процесса конвективной сушки асбоцементной плиты размером 1000×1000×50 мм, результаты которого представлены на рис. 1-3.

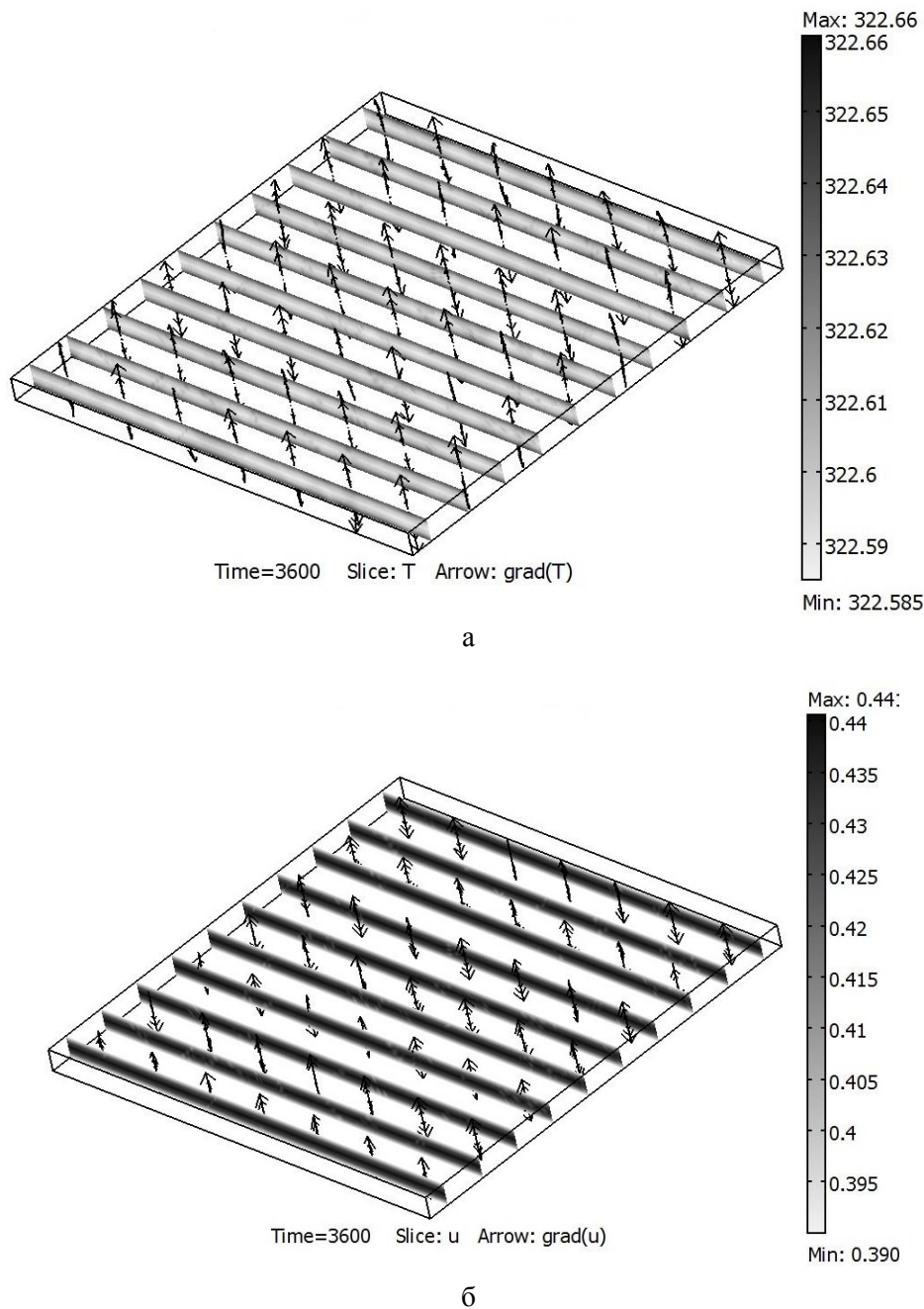


Рис. 1. Распределения температуры (а) и влагосодержания (б) по объему материала

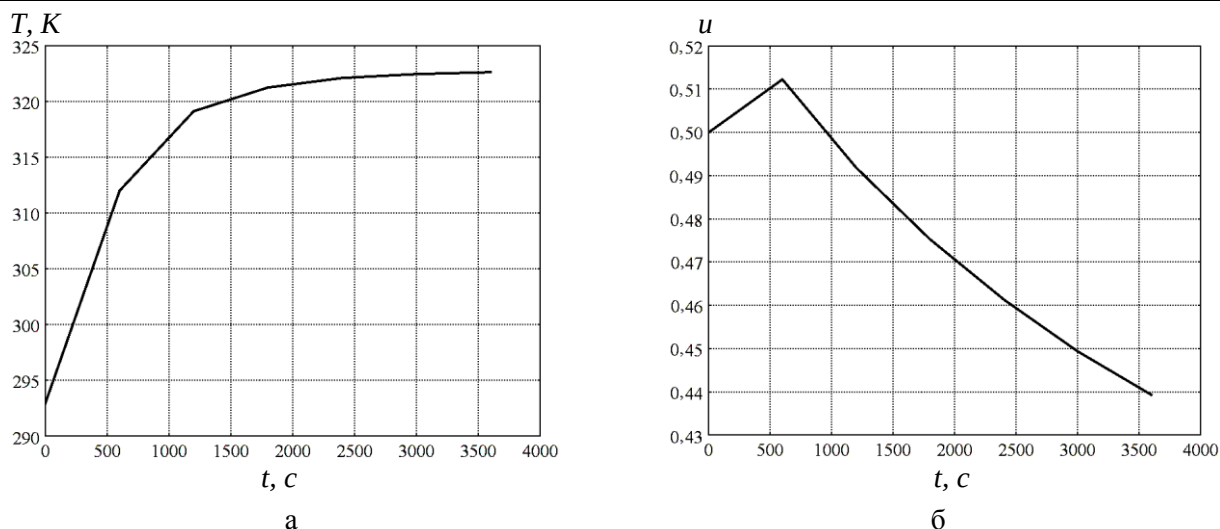


Рис. 2. Зависимости температуры (а) и влагосодержания (б) от времени в центре пластины

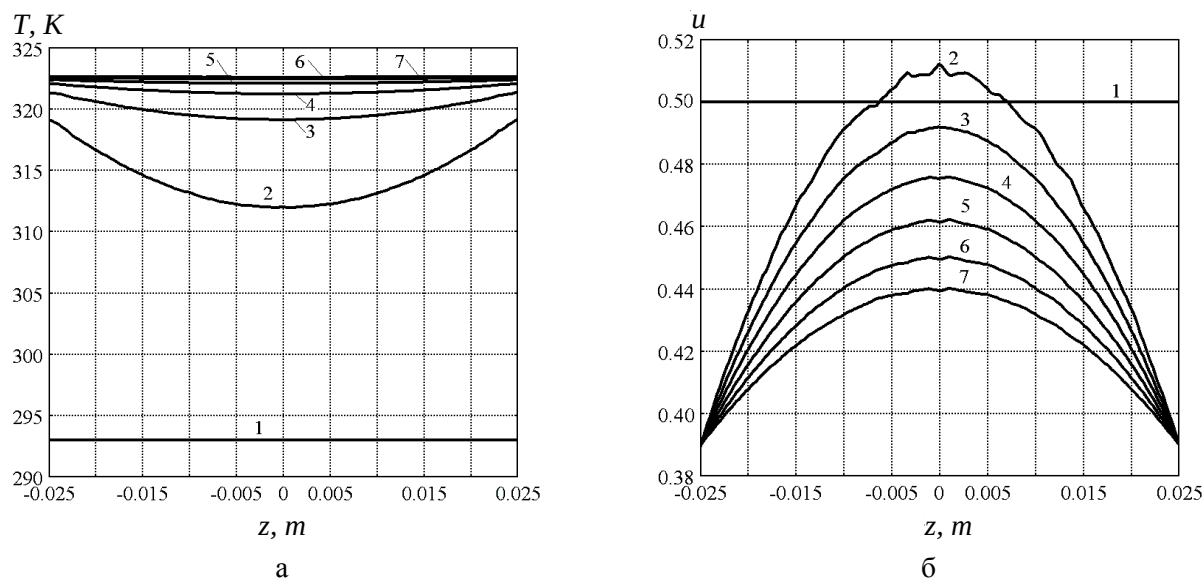


Рис. 3. Распределение температуры (а) и влагосодержания (б) по толщине пластины в момент времени: 1 – 0 с; 2 – 600 с; 3 – 1200 с; 4 – 1800 с; 5 – 2400 с; 6 – 3000 с; 7 – 3600 с

Анализируя результаты моделирования процесса сушки (рис. 1 – 3), можно прийти к выводу, что применение прикладного режима с коэффициентной формой в программном комплексе Comsol Multy-

physics для решения взаимосвязанных и самосогласованных задач является достаточно эффективным. Подтверждается это соответствием полученных результатов с данными, представленными в [5].

ЛИТЕРАТУРА

1. Потапов Л.А. Comsol Multiphysics: моделирование электромеханических устройств: учеб. пособие / Л.А. Потапов, И.Ю. Бутарев. Брянск: БГТУ, 2011. 112 с.
2. Красников Г.Е. Моделирование физических процессов с использованием пакета Comsol Multiphysics: учеб. пособие / Г.Е. Красников, О.В. Нагорнов, Н.В. Ста-

- ростин. М.: НИЯУ МИФИ, 2012. 184 с.
3. Comsol Multiphysics Modeling Guide. Version 3.5a. Stockholm: Comsol, 2008. 518 p.
4. Лыков А.В. Тепломассообмен: справочник/ А.В Лыков. М. Энергия, 1978. 480 с.
5. Лыков А.В. Теория сушки / А.В. Лыков. М. Энергия, 1968. 472 с.

Алексеев Вадим Сергеевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматизированные электротехнологические установки и системы» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Vadim S. Alekseyev – Ph.D., Associate Professor, Department of Automated Electro-Technological Plants and Systems, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 15.02.15, принята к опубликованию 16.02.15

УДК 621.365.5

РАБОТА СВЧ ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ В МНОГОЧАСТОТНОМ РЕЖИМЕ

Ф.А. Лысенко

OPERATION OF A MICROWAVE ELECTROTHERMAL INSTALLATION IN THE MULTI-FREQUENCY MODE

F.A. Lysenko

Рассмотрена проблема равномерности нагрева диэлектрика в электромагнитном поле и расчетным путем показана целесообразность применения широкополосного СВЧ генератора.

Ключевые слова: *электротермия, электротехнология, широкополосный СВЧ генератор, СВЧ нагрев*

Одной из ключевых проблем СВЧ термообработки является обеспечение равномерного нагрева диэлектрических материалов.

Существуют различные способы достижения равномерности нагрева в одноча-

The issues relating the uniformity of heating dielectric materials in the electromagnetic field is considered, and the data to prove the rational application of the broadband microwave generator is shown.

Keywords: *electrothermics, electrotechnology, broadband microwave generator, microwave heating*

стотном режиме термообработки, которые в основном связаны с расчетом параметров рабочей камеры. В камере со стоячей волной следует обеспечить большое число собственных видов колебаний, возбуждаемых в резонаторе, и механическое переме-

щение обрабатываемого материала, внутри рабочей камеры.

Эти методы имеют как достоинства, так и недостатки. Так, любой механически движущийся элемент снижает надежность установки и повышает ее стоимость, а вращение поддона с нагреваемым объектом приводит к возникновению радиальной неравномерности нагрева.

В то же время в камере с бегущей волной (КБВ), можно синхронно с изменением в процессе термообработки диэлектрических параметров обрабатываемого объекта изменять частоту СВЧ колебаний источника энергии, отчего изменяются параметры рабочей камеры и удается существенно улучшить равномерность термообработки. Это можно осуществить, если использовать широкополосные электронные приборы, в которых используется длительное взаимодействие электронов с электромагнитным полем.

Приборы, в которых используется взаимодействие электронов с обратными волнами (отрицательными пространственными гармониками), как известно, называются лампами обратной волны (ЛОВ). В этих приборах электронный поток движется навстречу потоку электромагнитной энергии в замедляющей системе, и в этом случае вывод энергии располагается на конце замедляющей системы со стороны катода.

К генератору с помощью фланцев крепится рабочая камера, например, КБВ на прямоугольном нерегулярном волноводе, на широкой стенке которого находится слой обрабатываемого диэлектрика. В процессе нагрева диэлектрические параметры ε' и $\operatorname{tg} \delta$ обрабатываемого материала изменяются, и электромагнитная волна частично от КБВ отражается. Отраженная волна проходит в направленный ответвитель [1], где установлена детекторная головка. С детекторной головки сигнал подается на систему управления технологическим процессом, которая выдает сигнал источнику питания на изменение питающего генератор напряжения. Это, в свою очередь, приводит к изменению длины

волны (частоты) генератора. Такое управление СВЧ генератором продолжается до тех пор, пока не закончится термообработка диэлектрика.

Чтобы получить при многочастотном режиме работы КБВ повышенную по сравнению с одночастотным режимом равномерность нагрева, следует проводить расчет геометрии камеры не для средних значений ε' и $\operatorname{tg} \delta$ и фиксированной длине электромагнитной волны, а для длины волны λ , выбранной за начальную, и для начальных значений диэлектрических параметров обрабатываемого объекта. Это позволит уже с начала технологического процесса обеспечить оптимальность профиля камеры и, как результат, более равномерную термообработку диэлектрика.

Диапазон длины электромагнитной волны определяется по условию [2]

$$a < \lambda < 2a,$$

где a - ширина стенки волновода КБВ.

Для практического расчета следует задаться начальной длиной волны. Пусть волновод КБВ имеет сечение 45×90 см, тогда

$$9 \text{ см} < \lambda < 18 \text{ см}.$$

Выбираем начальную длину электромагнитной волны $\lambda = 17$ см.

Глубина кюветы, в которой находится обрабатываемый диэлектрик, рассчитывается для начальной температуры и длины волны по соотношению [2]

$$d = \frac{0,7\lambda}{\sqrt{\varepsilon' \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \delta}}} = 1,45 \text{ см}.$$

Расчет длины волны с учетом изменения диэлектрических параметров проверяется по соотношению

$$\lambda(T) = \frac{b \sqrt{\varepsilon' \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \delta}}}{0,7}. \quad (1)$$

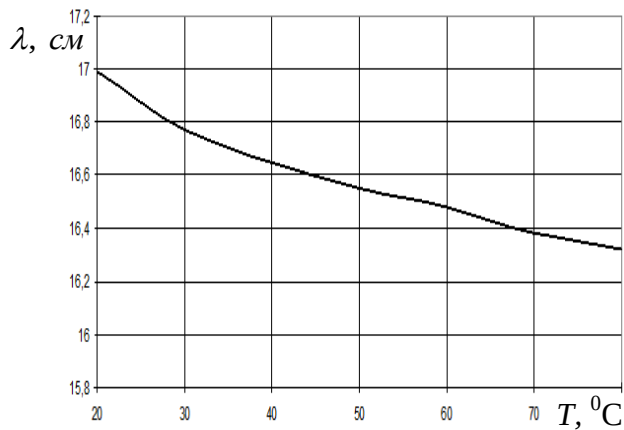


Рис. 1. Зависимость изменения длины волны от температуры

Результат расчета $\lambda(T)$ удовлетворяющий условию (1), показан на рис. 1. В качестве источника питания в СВЧ электро-термической установке должен быть использован СВЧ генератор с диапазоном

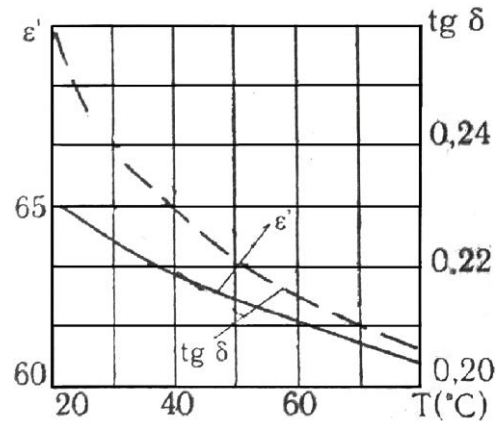


Рис. 2. Диэлектрические параметры обезжиренного молока в зависимости от температуры

длины волны, показанным на рис. 1, если в процессе нагрева диэлектрика его диэлектрические параметры изменяются так, как показано на рис. 2.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Тишер Ф.** Техника измерений на СВЧ / Ф. Тишер. М.: Физматгиз, 1963. 368 с.

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

Лысенко Филипп Алексеевич – студент кафедры «Автоматизированные электро-технологические установки и системы» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Philip A. Lysenko – Student, Department of Automated Electro-Technological Plants and Systems, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 30.01.15, принята к опубликованию 16.02.15

К СВЕДЕНИЮ ЧИТАТЕЛЕЙ!

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

ЭЛЕКТРОФИЗИКА

УДК 621.9.047/048

РАЗВИТИЕ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ РАЗМЕРНОЙ ОБРАБОТКИ В САРАТОВЕ

Н.В. Бекренев, И.В. Злобина

DEVELOPMENT OF ULTRASONIC TECHNOLOGIES FOR DIMENSIONAL PROCESSING IN SARATOV

N.V. Bekrenev, I.V. Zlobina

Рассмотрено становление и развитие ультразвуковых технологий в г. Саратове. Показана ведущая роль отечественной школы ультразвукового формообразования и вклад саратовских ученых и инженеров в разработку серийных ультразвуковых технологий и специального оборудования для их реализации.

Ключевые слова: ультразвуковые технологии и оборудование, труднообрабатываемые материалы, отраслевые институты.

Бурное развитие техники во второй половине XX века стимулировало в большинстве промышленно развитых государств опережающее развитие новых конструкционных материалов, обладающих высокой износостойкостью, жаропрочностью и коррозионной стойкостью. При этом значительный объем новых изделий отличался сложной формой и высокими требованиями к точности и качеству обработки.

Обработка сложных поверхностей в специальных титановых и железоникелевых сплавах решалась путем применения процессов электроэрозионной и электрохимической обработки, основанных на разрушении поверхностного слоя обрабатываемого материала с помощью электрических разрядов или анодного растворения. При

Formation and development of ultrasonic technologies in Saratov is considered. The authors demonstrate the leading role of the Russian scientific school in the development of ultrasonic shaping, and contribution of Saratov scientists and engineers into development of serial ultrasonic technologies and special equipment for realization of these technologies.

Keywords: ultrasonic technologies and the equipment, the hard-to-machine materials, branch institutes

этом необходимый профиль детали обеспечивался путем зеркального отображения специального инструмента или движения электрода-проволоки по заданной траектории.

Однако для непроводящих ток материалов (керамики, кварца, ситалла и других) эти методы неприменимы. С конца 50-х годов прошлого века в СССР, ФРГ, США, Великобритании, Чехословакии и Японии были начаты работы по изучению возможности использования колебаний инструмента с ультразвуковой частотой (более 18000 Гц) для формообразования деталей из твердых и хрупких материалов. Принцип размерной ультразвуковой обработки заключается в ударном воздействии инструмента, совершающего ультразвуковые колебания, на зерна абразива, передающие

энергию удара поверхностному слою обрабатываемого материала. В результате многократного воздействия вершин и граней абразивных зерен за короткое время превышает предел выносливости материала и под действием напряжений формируется сетка микротрещин, которые по мере роста пересекаются, что приводит к образованию фрагментов, отделяющихся от основного материала и удаляемых несущей абразив жидкостью. При этом жидкость (как правило, вода) осуществляет дополнительное расклинивающее действие, проникая в трещины в результате микрокапиллярного эффекта. Возникающие вследствие воздействия ультразвука течения и пульсирующие микропузырьки способствуют постоянному обновлению зерен абразива под инструментом, сохраняя высокую интенсивность процесса обработки. Настоящая энциклопедия применения ультразвука в различных областях, в том числе – для обработки, была написана Л.Бергманом [1].

Научные основы физики процесса ультразвукового формообразования деталей из хрупких материалов были заложены в трудах отечественных ученых Б.А. Аграната, В.Ф. Казанцева, А.И. Маркова, Л.Д. Розенберга и сотрудников Токийского университета Нишимура и Кумабэ. Первоначально теория ультразвуковой обработки основывалась на механике хрупкого разрушения, затем возобладали гидродинамическая теория, основанная на трудах П.А. Ребиндера. В настоящее время считается вполне адекватно описывающей процесс ультразвуковой размерной обработки изложенная выше физическая модель, объединяющая обе теории.

В СССР существовала достаточно стройная система создания и внедрения перспективных технологий, согласно которой разработка теоретико-экспериментальной базы новых процессов сосредотачивалась в академических институтах и вузах, оптимизация серийных технологий и разработка специального оборудования для их реализации была передана в так называемые отраслевые научно-исследовательские институты, которые осуществля-

ли их внедрение совместно с заводами-изготовителями изделий, для которых эти технологии создавались. Теоретическое обоснование рассматриваемых в настоящей статье процессов ультразвуковой обработки принадлежит Московскому авиационному институту имени С. Орджоникидзе, Московскому авиационно-технологическому институту и Московскому автомобильно-дорожному институту. Разработка универсальных источников питания – ультразвуковых генераторов осуществлялась во Всесоюзном научно-исследовательском институте токов высокой частоты (г. Ленинград), станки разрабатывали в ЭНИМС (г. Москва) под руководством Д.Ф. Яхимовича. При этом специальные технологии и оборудование разрабатывались в отраслевых НИИ. Опыт разработки электрофизических технологий и, в частности, ультразвуковых, освещался в ежемесячном журнале «Электрофизические и электрохимические методы обработки», а также на ежегодных научно-технических семинарах и конференциях.

Основными конструкционными элементами ультразвукового технологического оборудования являются генераторы и преобразователи двух типов: магнитострикционные и пьезокерамические. Работа преобразователей первого типа основана на эффекте магнитострикции [2-4], физическая сущность которого заключается в следующем.

При помещении стержня из ферромагнитного материала в магнитное поле, направленное вдоль его оси, длина стержня изменяется. Величина эта зависит от материала стержня, способа его обработки, величины предварительного подмагничивания и температуры. С повышением температуры эффект магнитострикции убывает и в точке Кюри исчезает вовсе. Кроме продольной существует объемная магнитострикция. Ее величина значительно меньше, но она не имеет насыщения.

При помещении стержня из магнитострикционного материала в электромагнитное поле он начнет в силу эффекта магнитострикции изменять свои размеры с частотой поля, то есть совершать механи-

ческие колебания. Таким образом, электрические колебания тока вызывают электромагнитные колебания, которые преобразуются в механические колебания (вибрацию). При совпадении собственной частоты колебаний магнитострикционного стержня и частоты внешнего электромагнитного поля наступает резонанс – резкое увеличение амплитуды смещения торцов стержня. Амплитуда колебаний магнитострикционных стержней на основной частоте имеет величину $10^{-4} l$, где l – длина стержня. В силу независимости деформации от направления поля в отсутствие подмагничивания частота колебаний стержня будет вдвое больше частоты поля.

Несмотря на возможность достижения высоких амплитуд и мощностей существенным недостатком магнитострикционных преобразователей являются вихревые токи, вызывающие нагрев пакета пластин, из которых состоит преобразователь. Это требует принудительного его охлаждения проточной водой, что увеличивает габаритные размеры и усложняет конструкцию преобразователя.

Пьезоэлектрический эффект (пьезоэффект) [2-4] – образование электрической поляризации при механической деформации и обратный пьезоэлектрический эффект – деформация кристалла при наложении разности потенциалов – присущи классу диэлектриков и полупроводников и являются частным случаем электрострикции – изменения размеров тела во внешнем электрическом поле, свойственной всем кристаллическим материалам.

Пьезоэффект в отличие от электрострикции наблюдают только у кристаллов, не имеющих центра симметрии. Кристаллическая решетка таких материалов состоит из полярных молекул [3].

Существуют тела, которые в обычном своем состоянии не имеют поляризации, но приобретают ее при механическом сжатии или растяжении. Это явление и было названо пьезоэлектрическим эффектом. На противоположных гранях пластины из вещества, обладающего пьезоэлектричес-

кими свойствами, при сжатии возникают разноименные электрические заряды. Если пластину растянуть, то также появятся электрические заряды, но знаки их будут обратными тем, которые были при сжатии. Попеременно сжимая и разжимая пластину, можно вызвать появление на ее противоположных гранях разноименных зарядов. Если металлизированные плоскости пьезоэлектрической пластины соединить с источником переменного тока, то синхронно с изменением полярности будет изменяться толщина пластины (обратный пьезоэлектрический эффект) [3]. Различают два вида пьезоэлектрических материалов (сегнетоэлектриков): монокристаллы (кварц, сегнетова соль, ниобат лития) и поляризованные поликристаллы (пьезокерамика) [3].

В отличие от магнитострикционных пьезоэлектрические преобразователи не нуждаются в принудительном охлаждении и существенно меньше по размерам. Однако на резонансных частотах их амплитуда колебаний не велика и составляет порядка 5-6 мкм.

Увеличение амплитуды колебаний как магнитострикционных, так и пьезоэлектрических преобразователей осуществляется при помощи трансформаторов скорости или концентраторов различной формы. Увеличение амплитуды в целом пропорционально отношению площадей входного и выходного торцов концентратора. Для сопряжения преобразователя и концентратора используют волноводы. Такая составная конструкция называется колебательной системой.

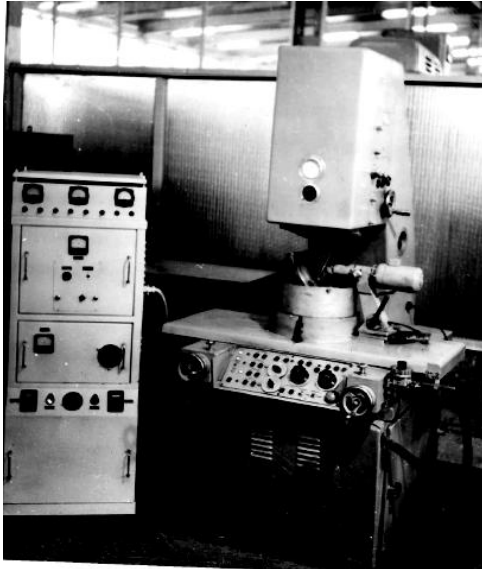
С начала 70-х годов XX века ультразвуковые технологии и оборудование разрабатывались и в Саратове. Создаваемое оборудование реализовывало широкий спектр технологий: размерная обработка твердых и хрупких материалов, сверление и резьбонарезание, доводка, пластическое деформирование, сварка, очистка и промывка.

Создание новых технологий и оборудования стимулировалось появлением перспективных для своего времени материалов и изделий. Так, было разработано обо-

рудования для размерной ультразвуковой обработки методом прямого копирования деталей из высокопрочной керамики.

Существовавшие в то время ультразвуковые станки ЭНИМСа не обеспечивали

требуемой точности, поэтому был разработан высокоточный станок УЗСТ-1 (рис. 1 а), не имевший в то время аналогов по жесткости конструкции и надежности работы ультразвуковой колебательной системы.



а



б

Рис. 1. Ультразвуковые прошивочные станки УЗСТ-1 (а) и УЗСТ-2 (б)

Станок имел оптические отсчетные линейки для контроля координатных перемещений. Для обработки сферических поверхностей был разработан способ их шлифования свободным шаром, совершающим хаотическое вращение под действием динамических нагрузок, вызванных ультразвуковыми колебаниями инструмента. Эта технология впоследствии длительно применялась на подшипниковом заводе для окончательной обработки твердосплавных матриц для штамповки шариков. С учетом опыта создания УЗСТ-1 был разработан станок УЗСТ-2 (рис. 1б) для обработки малогабаритных деталей. В этих станках использовались колебательные системы на основе магнитострикционных преобразователей. Это были последние станки, разработанные в Саратове, с преобразователями такого типа. В дальнейшем все модели ультразвукового оборудования, разработанного в Саратове, имели только пьезокерамические преобразователи. Саратовским ученым и инженерам принадлежит приоритет в создании методики

инженерного расчета и разработки конструкций составных пьезокерамических преобразователей волновой и полуволновой длины, в том числе вращающихся. Во второй половине 80-х годов для обработки точных спиральных канавок малой глубины в плоских поверхностях был разработан специальный настольный ультразвуковой станок (рис. 2), отличавшийся повышенной жесткостью шпиндельной группы, следящим приводом подачи инструмента и индуктивным датчиком контроля глубины прошивки.

В Саратове впервые в станке была реализована схема дополнительной стабилизации процесса обработки за счет включения оснастки и изделия в колебательную систему станка. При этом базовая поверхность оснастки приходилась на узел смещения, где амплитуда колебаний равнялась нулю. Это исключало передачу колебаний на станину станка, что могло вызывать потери акустической мощности и неустойчивость функционирования.

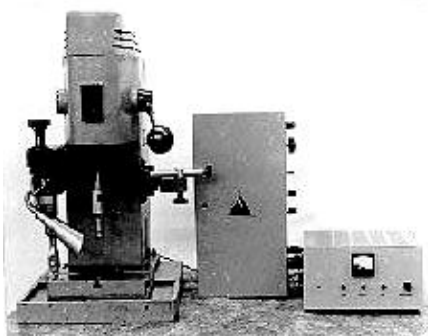


Рис. 2. Настольный прошивочный станок



Для оснащения разрабатываемого оборудования были созданы две модели генераторов (рис. 3) на основе тиристорного инвертора, оснащенные блоком автоподстройки частоты по сигналу обратной связи, снимаемому непосредственно с преобразователя. Это гарантировало от колебаний амплитуды вследствие рассогласования преобразователя и сигнала генератора и, следовательно, обеспечивало стабильность и требуемую точность обработки.



Рис. 3. Ультразвуковые тиристорные генераторы с системой автоподстройки частоты выходного сигнала

Для обработки каналов малого диаметра в твердых хрупких материалах и фрезерования был разработан специальный станок (рис. 4). За основу был взят электрохимико-ультразвуковой станок 4Д772Э.

Вместо магнитострикционного преобразователя установлена новая шпиндельная группа с планетарным вращением пьезокерамического шпинделя-преобразователя и следящим механизмом подачи. Вместо лампового генератора использован транзисторный. Установлен дополнительный электромеханический привод вращения стола.



Рис. 4. Прошивочный станок для фрезерования поверхностей и сверления отверстий алмазным вращающимся инструментом

В конце 80-х годов в станкостроении во всех промышленно развитых странах началось применение систем числового программного управления и создание так называемых гибких производственных модулей (ГПМ). В СССР при участии саратовских специалистов была начата работа по созданию уникального ультразвукового комплекса ГПМ, оснащенного системой технического зрения для позиционирования концентраторов, системой ЧПУ класса CNC, работающей в диалоговом режиме с оператором, тиристорным генератором и магазином из 8 преобразователей с инструментами различных типов для последовательной обработки поверхностей и

отверстий в керамических корпусах микросборок. Только после 2010 года, то есть спустя более 20 лет, в печати появилась информация о создании германской фирмой DMG ультразвуковых станков “Ultrasonic” с программируемыми циклами обработки, управляемыми от компьютера [6].

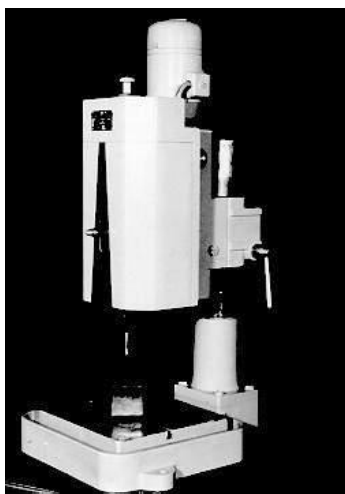
В агрегатостроении широко применяются помимо твердых материалов высокопрочные стали и сплавы, трудно обрабатываемые резанием [7]. Обработка подобных материалов, особенно отверстий в них, представляло весьма сложную проблему. Одним из путей решения проблемы стало сообщение инструменту ультразвуковых колебаний для снижения сил резания.

Благодаря исследованиям, проводившимся с 60-х годов XX века д.т.н., профессором А.И. Марковым и его учениками в области ультразвуковых технологий оформилось новое научное направление: комбинированное ультразвуковое резание или обработка труднообрабатываемых сталей и сплавов с сообщением режущему инструменту ультразвуковых колебаний малой амплитуды [8]. Отечественной школе следует отдать приоритет в этой сфере промышленного применения ультразвука, поскольку работы Кумабэ в Токийском университете были направлены в основном на разработку схем обработки без научной трактовки результатов и возникающих эф-

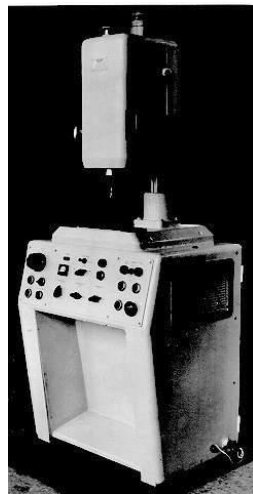
фектов. А.И. Марковым была выдвинута и затем подтверждена гипотеза о термическом механизме эффекта резкого снижения сил резания при сообщении инструменту колебаний ультразвуковой частоты, благодаря чему под режущим клином вследствие поглощения кинетической энергии колебаний мгновенная температура может достигать точки плавления, что приводит к замене сухого трения на жидкостное даже в условиях высоких давлений, когда смазочно-охлаждающая жидкость выдавливается из зоны резания.

Особенностью разработок ультразвуковых технологий и оборудования для комбинированной обработки в Саратове стала ориентация на создание специального оборудования для ультразвукового резания, а не отдельных ультразвуковых головок, устанавливаемых на существующие станки.

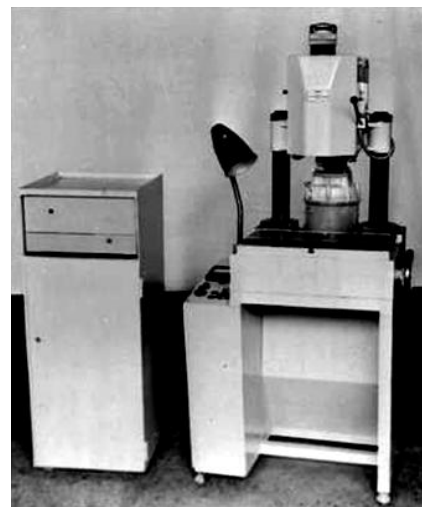
В 70-х годах были разработаны станки для нарезания резьб малого диаметра моделей ДИЭ-2586, СРС-2, СРС-3 (рис. 5 а, б). Сообщение инструменту-метчику колебаний с частотой 22 кГц и амплитудой 1-5 мкм способствовало снижению моментов резания на 50-60% значительно повышало стойкость инструментов и снижало вероятность их поломки. Дальнейшим развитием этой линейки станков стал станок со шпиндельной группой на двух опорах повышенной жесткости (рис. 5 в).



а



б



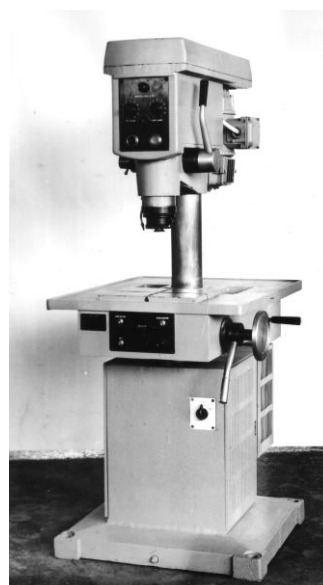
в

Рис. 5. Резьбонарезные ультразвуковые станки первого поколения: ДИЭ-2586 (а), СРС-2 (б), станок повышенной жесткости (в)

На основе выполненных исследований процессов сверления, зенкерования и развертывания с воздействием ультразвука, а также с учетом опыта внедрения резьбонарезных станков в середине 80-х годов были созданы станок ультразвукового развертывания отверстий диаметром 2-8 мм (рис. 6 а) и сверлильно-резьбонарезной станок (рис. 6 б). Станки имели напольную компоновку, двигатель постоянного тока с ти-



а



б

Рис. 6. Станки для комбинированной обработки отверстий: станок ультразвукового развертывания (а), сверлильно-резьбонарезной станок (б)

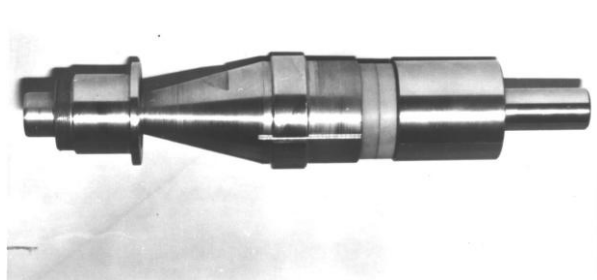


Рис. 7. Вращающийся ультразвуковой шпиндель-преобразователь станков для обработки отверстий

Для компенсации момента инерции тяжелого шпинделя, могущего привести к поломке инструмента при его заклинивании в сверлильно-резьбонарезном станке было применено разведение источника колебаний и инструмента путем размещения

ристорным приводом бесступенчатого регулирования частоты вращения. Особенностью станков было применение впервые в нашей стране двухопорных вращающихся шпинделей-преобразователей длиной 2λ (рис. 7). Применение станков дало возможность повысить производительность обработки отверстий 7-8 квалитетов точности, повысить стойкость инструментов в 2 раза.

последнего в специальной оправке, устанавливаемой в легком шпинделе фрикционной муфты предельного момента.

Последней разработкой саратовских специалистов в области ультразвукового резьбонарезания стал настольный станок (рис. 8), предназначенный для обработки сквозных и глухих отверстий методами нарезания и раскатывания.

Станок, относящийся ко 2-му поколению резьбонарезных ультразвуковых станков, имел облегченный шпиндель-преобразователь с пьезокерамическими кольцами. Отличительной особенностью было применение тиристорного генератора с обратной связью по частоте и частотного преобразователя для регулировки асинхронного двигателя привода вращения шпинделя.



Рис. 8. Настольный ультразвуковой резьбонарезной станок

За счет сообщения инструменту ультразвуковых колебаний силы резания снижаются в 1,2 – 2 раза, а стойкость инструмента повышается в 1,4 – 1,8 раза.

К деталям приборо- и агрегатостроения, а также топливной аппаратуры предъявляются жесткие требования к точности и качеству обработки. Особую сложность представляет обработка отверстий малого диаметра с точностью до 1 мкм методами абразивно-алмазной доводки. Необходимость получения оптимальных ско-

ростей резания требует частот вращения инструмента в несколько тысяч в минуту, что отрицательно сказывается на точности вследствие неизбежного радиального биения. Сообщение инструменту ультразвуковых колебаний позволяет снизить окружную скорость инструмента за счет появления дополнительной переменной составляющей. В этом случае снижаются динамические нагрузки на деталь, а абразивные зерна увеличивают свой путь по поверхности отверстия, что обеспечивает перекрытие их следов и снижение шероховатости при росте производительности до 2-х раз.

Для реализации технологии ультразвуковой доводки в 1982 году был разработан специальный станок (рис. 9 а). В процессе обработки инструмент совершает вращательное движение, а деталь - возвратно-поступательное. Деталь устанавливается в специальном приспособлении, имеющем 4 степени свободы, что обеспечивает базирование детали отверстием по инструменту и исключает нарушение ранее достигнутого расположения его оси. Станок снабжен двумя синхронно вращающимися соосными шпинделями, что обеспечивает применение инструментов в виде струны диаметром до 0,5 мм.



а



б

Рис. 9. Ультразвуковые доводочный станок (а) и полуавтомат с микропроцессорным управлением (б)

Применение деталей с износостойкими плазмонапыленными покрытиями, имеющими исходную неоднородную структуру, затрудняет процесс высокоточной обработки. Это потребовало создания высокоавтоматизированного оборудования, оснащенного системами управления и контроля процесса.

В соответствии с этим в середине 80-х годов был разработан ультразвуковой доводочный полуавтомат (рис. 9 б). Полуавтомат оснащен системой микропроцессорного управления типа HNC, программируемой с сенсорного пульта оператора при помощи специальной языковой системы. При этом в постоянном запоминающем устройстве системы «прошиты» обобщенные возможные циклы обработки и при необходимости с пульта вносятся только конкретные режимные параметры после вызова адреса необходимого цикла.

На основе результатов экспериментальных исследований обработки свободным абразивом плазмонапыленных твердых покрытий был разработан и изготовлен специальный полуавтомат, предназначенный для получения на цилиндрической поверхности деталей замкнутых винтовых канавок малой глубины. Полуавтомат (рис. 10) состоит из станины, на которой размещены стол и ультразвуковая головка, и системой управления типа HNC. Система управления обеспечивает цикл работы станка, программирование длины канавки, угла наклона канавки, числа канавок в ряду, числа

рядов канавок, числа проходов инструмента по канавке, а также скорости перемещения детали относительно инструмента. Все перечисленные параметры задаются с пульта оператора. Применен малогабаритный ультразвуковой преобразователь с пьезоэлементами. Рабочая частота преобразователя 18 кГц.

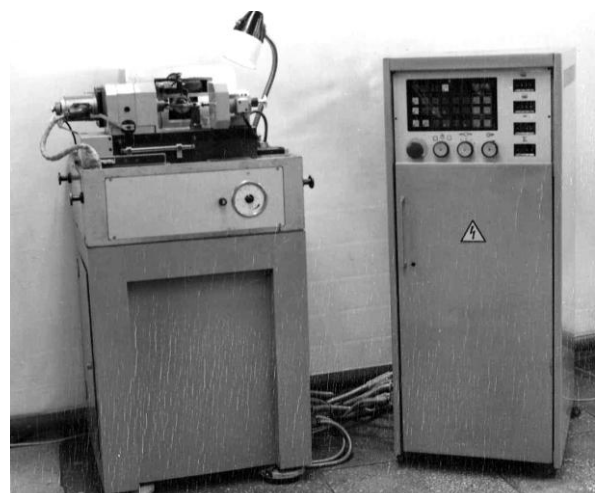


Рис. 10. Полуавтомат ультразвуковой доводки канавок КО-901

Применение программируемого управления циклом, в том числе – режимом работы ультразвукового генератора позволило сгладить влияние исходной неоднородности структуры покрытия на точность получения продольного и поперечного профиля канавок, реализовав специальный алгоритм управления [10].

ЛИТЕРАТУРА

1. **Бергман Л.** Ультразвук и его применение в науке и технике / Л. Бергман. – М.: Иностранная литература, 1957. 727 с.
2. **Розенберг Л. Д.** Источники мощного ультразвука / Л. Д. Розенберг. – М., 1967.
3. **Бржозовский Б.М.** Физические основы, технологические процессы и оборудование ультразвуковой обработки материалов / Б.М. Бржозовский, Н.В. Бекренев, О.В. Захаров, Д.В. Трофимов – Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2006. 205 с.
4. **Бржозовский Б.М.** Ультразвуковые технологические процессы и оборудование в машино- и приборостроении / Б.М. Бржозовский, Н.В. Бекренев. – Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2009. 348 с.
5. **Яффе Б.** Пьезоэлектрическая керамика / Б. Яффе, У. Кук, Г. Яффе; - М., 1974.
6. Состояние и перспективы развития ультразвуковой размерной обработки <http://www.mirprom.ru/public/sostoyanie-i-perspektivy-razvitiya-ultrazvukovoy-razmernoj-obrabotki.html>

7. Высокопрочные коррозионно-стойкие стали в современной авиации / науч. ред. А.Г.Братухин. – М.: изд-во МАИ, 2006. 656 с.

8. **Марков А.И.** Ультразвуковое резание труднообрабатываемых материалов / А.И. Марков. М.: Машиностроение, 1968. 367 с.

9. **Горбунов А.А.** Новый способ регулирования амплитуды колебаний метчиков

при ультразвуковом резьбонарезании / А.А. Горбунов, В.М. Салтанов, С.И. Петров, В.В. Захаров // Электрофизические и электрохимические методы обработки. 1977. № 5. С. 9-12.

10. **Бекренев Н.В.** Обработка твердых материалов с неоднородной структурой / Н.В. Бекренев, Ю.Н. Казаков, С.К. Сперанский // Автоматизация и современные технологии. 2004. № 5. С. 3-4.

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

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

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

Irina V. Zlobina - Assistant Lecturer, Department of Engineering Mechanics and Machine Elements, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 02.02.15, принята к опубликованию 16.02.15



ВАКУУМНОЕ НАПЫЛЕНИЕ ПРОЗРАЧНЫХ ПРОВОДЯЩИХ ПЛЕНОК НА ПОДЛОЖКИ С ПОЛИМЕРНОЙ ОСНОВОЙ

Я.В. Перевозникова, В.К. Перешивайлов, А.В. Скупова

VACUUM DEPOSITION TRANSPARENT CONDUCTIVE FILMS ON SUBSTRATES WITH POLYMER-BASED

Ya.V. Perevoznikova, V.K. Pereshivaylov, A.V. Skupova

Проведены эксперименты совершенствования технологии нанесения прозрачных проводящих пленок на подложки с полимерной основой с высокой степенью однородности и высокой скоростью напыления, которые ведут к уменьшению энергозатрат и стоимости процесса напыления.

Ключевые слова: оксид, электрод, тонкопленочные покрытия, осаждение, магнетронная система, полимерная основа

Одними из перспективных тонкопленочных покрытий являются прозрачные проводящие покрытия на основе оксидов металлов (цинка, олова, индия). Прозрачные проводящие оксиды принадлежат к классу полупроводников с широкой запрещенной зоной и находят широкое применение в производстве плоских дисплеев, прозрачных электродов в приборах.

Несмотря на огромное число появляющихся работ, в которых авторы предлагают замену прозрачного проводящего оксида на основе диоксида олова и оксида индия в качестве прозрачного электрода на индий-оловянный оксид, положительного результата нет.

Для нанесения прозрачных проводящих пленок магнетронное распыление начали использовать существенно позже. Это связано с более жесткими технологическими требованиями, которые должны быть выполнены при производстве высококачественных тонких пленок, по сравнению с другими методами осаждения тонких

Experiments improving technology of drawing of transparent conductive coating films on the substrate with the polymer base with a high degree of uniformity and high deposition rate which leads to a reduction in energy consumption and cost of the deposition process are carried out.

Keywords: oxide, electrode, the thin film coating, sedimentation, magnetron system, the polymer base

пленок, такими как термическое испарение, химическое газофазное осаждение или струйный пиролиз. Магнетронное распыление имеет ряд преимуществ: низкая температура подложки, хорошая адгезия пленки к подложке, высокие скорости осаждения (до 12 мкм/мин), а также могут наноситься покрытия сложного химического состава из металлических мишеней реактивным распылением в газовых смесях.

Однако разработанные способы магнетронного распыления обеспечивают получение прозрачного проводящего оксида на основе индия, олова с низким удельным сопротивлением только при температуре выше 200 °С, что ограничивает область их возможного применения. Так, напыление проводящих покрытий на полимерные подложки возможно при температурах, не превышающих температуру размягчения материала, которая для лавсана составляет 110 °С. Поэтому актуальной задачей является совершенствование технологии нанесения прозрачных проводящих пленок и

повышение эффективности оборудования для нанесения пленок на подложки с полимерной основой с высокой степенью однородности и достаточно высокой скоростью, а также уменьшение энергозатрат и стоимости процесса напыления. Эту задачу можно решить с использованием оборудования, позволяющего эффективно генерировать большие объемы плазмы.

Исследование основных параметров нанесения прозрачных проводящих покрытий на полимерную основу проводили в герметически замкнутом объеме вакуумной камеры оборудования магнетронного напыления (рис.1).



Рис. 1. Установка вакуумного напыления

Заготовкой для испытаний была полимерная пленка. Поддон с заготовкой устанавливается на лентопротяжную систему, после чего камера герметизируется.

Откачка производится в два этапа и осуществляется двумя типами насосов. На первом этапе откачка осуществляется механическим насосом, в результате чего в камере создается предварительный вакуум с давлением $\sim 10^{-1}$ Па. На втором этапе откачка из камеры осуществляется высоковакуумными диффузионными насосами. При этом в рабочей камере устанавливается высокий вакуум с давлением $\sim 5 \cdot 10^{-3}$ Па.

После установления в рабочей камере высокого вакуума производится продувка камеры инертным газом аргоном с целью устранения из объема камеры примесных газов.

Подача химически активного и инертного газа осуществляется через душирующие

устройства, расположенные вблизи магнетронной распылительной системы (МРС).

Проводилось напыление на образцы пленки и стекла при различных режимах.

МРС работает при напряжении разряда 500 В и токе разряда 15 А. Питание МРС осуществляется с помощью блока питания БПМ-30.

После установки необходимого режима в рабочей камере производился процесс напыления на первый образец прозрачных проводящих пленок на стекло из сплава индий-олово (ИНО-5), (индий-95%, олово-5%).

Процесс напыления проходит при следующих режимах:

- давление в камере напыления Ar $2 \cdot 10^{-1}$ Па и Ar+O₂ $3 \cdot 10^{-1}$ Па;
- напряжение разряда $U=250-280$ В;
- ток разряда 1-2 А;
- ток электромагнита МРС 1,7-2,0 А;
- число проходов под мишенью - 1;
- напряжение на якоре двигателя привода тележки с поддоном 50-60 В.

Через 40 с после подачи и стабилизации расхода кислорода напряжение разряда установилось в диапазоне 250-280 В. На толщину наносимой пленки влияют скорость перемещения тележки, находящейся внутри камеры, ток электромагнита и ток разряда. На сопротивление и прозрачность пленки существенно влияют ток разряда и ток электромагнита.

На второй образец проводилось напыление прозрачных проводящих пленок на полипропиленовую пленку из мишени из сплава индий-олово (ИНО-5), (индий-95%, олово-5%).

Режимы напыления следующие:

- давление в камере напыления Ar $2,2 \cdot 10^{-1}$ Па, Ar+O₂ $2,5 \cdot 10^{-1}$ Па;
- напряжение разряда $U=350$ В;
- ток разряда $I=2,4$ А;
- число проходов под мишенью - 2.

На третьем образце проводили напыление прозрачных проводящих пленок на стекло из сплава олово-сурьма (ОСу) (олово-90%, сурьма-10%).

Образец нагревали в шлюзе вакуумной камеры до температуры 250 °С, в камеру напыления подавался аргон, по вакуум-

метру ВИТ-3 устанавливалось давление $1,6 \cdot 10^{-1}$ Па, расход аргона – 4 л/ч.

На блоке питания (БП) МРУ устанавливается ток напыления 2 А, мишень распыляется до увеличения напряжения разряда до 640 В при токе электромагнита МРУ 2 А. Для ускорения процесса напряжение разряда может быть увеличено до 650 В путем уменьшения тока электромагнита МРУ до 1 А.

На БП по каналу через регулятор расхода газа (РРГ) в камеру напыления подается кислород с расходом 2,7 л/ч, ток напыления 2 А, напряжение 440-420 В. Число проходов под мишенью-2. После отключения подачи кислорода образцы выгружаются через шлюз, при этом расход аргона в камере напыления 1,8 л/ч.

После напыления сопротивление пленки составило 4 кОм при толщине 0,8 мкм.

На четвертом образце проводили напыление прозрачных проводящих пленок на матовую полипропиленовую пленку для ламинирования толщиной 10 мкм из мишени из сплава олово-сурьма (ОСу), (олово-90%, сурьма-10%).

Режимы напыления аналогичны режимам напыления на стекло, сопротивление пленки, расположенной при напылении на чистой алюминиевой пластине, составило 8 Ом/см², пленка прозрачная.

Осаждение на подложку в атмосфере, содержащей инертный газ, кислород и водород, когда в качестве подложки используется полимерный материал, прозрачное электропроводящее покрытие из оксида индия проводили путем распыления металлического индия методом катодного реактивного распыления при следующих соотношениях реактивных и инертных газов в распылительной камере: 75-77 % инертного газа, 6-7 % кислорода и 17-18 % водорода с медленным охлаждением подложки от 100 до 20 °С, при этом в качестве подложки использовали также полимерный материал, что намного расширяет возможности применения этих покрытий.

Затем проводят напуска воздуха в рабочую камеру с дальнейшей разгерметизацией рабочей камеры, отключение ионного источника и изъятие поддонов с готовыми образцами.

Таким образом, получение готового продукта происходит в едином замкнутом объеме, с использованием в различных технологических операциях одного и того же оборудования и расходных материалов, причем переход от одной технологической операции к другой осуществляется включением или выключением оборудования, или изменением режимов его работы.

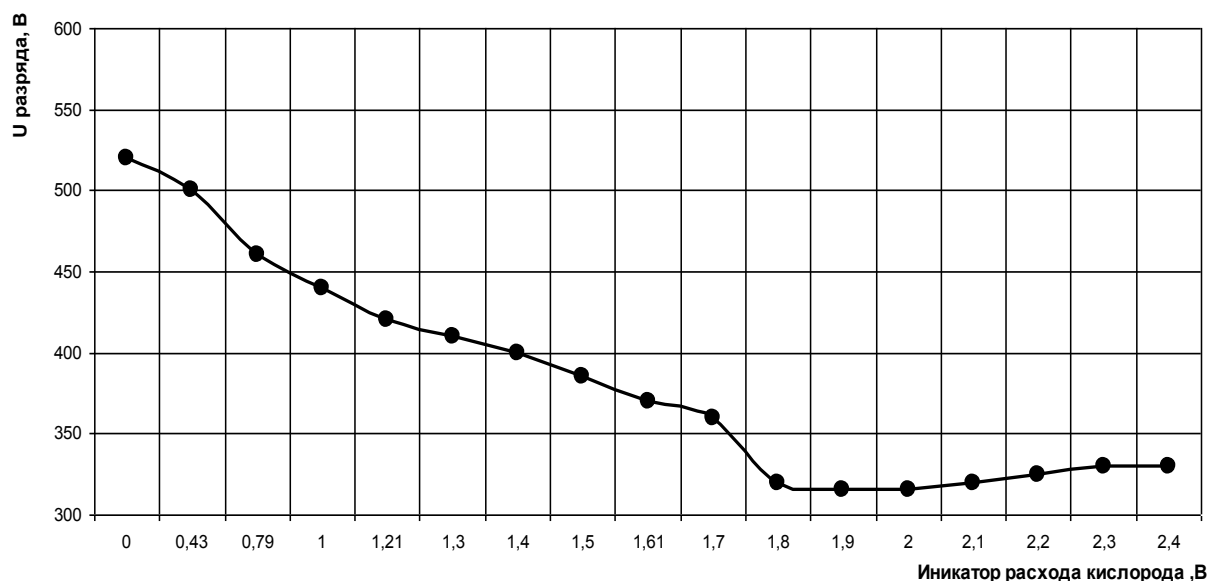


Рис. 2. Зависимости напряжения разряда от расхода кислорода (общее давление в камере напыления по аргону $1,6 \cdot 10^{-1}$ Па, сила тока разряда 2 А, сила тока электромагнита 2 А)

Экспериментальные работы показали (рис.2), что прозрачные проводящие пленки толщиной 10 мкм, напыленные на матовую полипропиленовую пленку для ламинирования из мишени сплава индий-олово (ИНО-5) (индий-95%, олово-5%), облада-

ют меньшим удельным сопротивлением и лучшими оптическими свойствами по сравнению со сплавом олово-сурьма (ОСу) (олово-90%, сурьма-10%) и являются весьма перспективными тонкопленочными покрытиями.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Перевозникова Я.В.** Исследование морфологии и химического элементного состава катодной фольги для модернизации вакуумной установки / Я.В. Перевозникова, В.К. Перешивайлов // XIX научно-техническая конференция «Вакуумная наука и техника». – М., 2012. С. 163.

2. **Перевозникова Я.В.** Оборудование для модификации электродной фольги перед нанесением электролита / Я.В. Пере-

возникова, В.В. Слепцов, В.К. Перешивайлов // «Вакуумная техника и технология-2012». – СПб., 2012. Т. 22. № 3. С.157-160.

3. **Перевозникова Я.В.** Вакуумная установка ионно-плазменного нанесения углеродных покрытий / Я.В. Перевозникова, В.К. Перешивайлов, А.В. Скупова // Математические методы в технике и технологиях - ММТТ-27: сб. тр. XXVII междунар. науч. конф. – Иваново, Т. 9. С. 160-163.

Перевозникова Яна Валерьевна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Сварка и металлургия» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Перешивайлов Виталий Константинович – аспирант кафедры «Сварка и металлургия» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Скупова Алина Владимировна – магистрант кафедры «Электронные приборы и устройства» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Yana V. Perevoznikova – Ph.D., Associate Professor, Department of Welding and Metallurgy, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov.

Vitaliy K. Pereshivaylov – Postgraduate, Department of Welding and Metallurgy, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov.

Alina V. Scupova – Master Student, Department of Electronic Devices and Equipment, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov.

Статья поступила в редакцию 25.01.15, принята к опубликованию 16.02.15

УДК 504.42.064

**ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ
НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ОЧИСТКИ РАСТВОРОВ ОТ ИОНОВ МЕДИ
КОМБИНИРОВАННЫМ СПОСОБОМ**

Е.А. Савельева, М.П. Дикун

**TECHNOLOGICAL PARAMETERS FOR EFFECTIVE
PURIFICATION OF SOLUTIONS FROM COPPER IONS
USING A COMBINED METHOD**

E.A. Savelyeva, M.P. Dicun

Проведено систематическое изучение влияния различных факторов на степень извлечения катионов меди из отработанных электролитов травления медных сплавов. Выявлены оптимальные условия доочистки разбавленных растворов в импульсном режиме на модельных электролитах (растворах сернокислой и азотнокислой меди). Разработана комплексная технология регенерации травильных растворов от катионов меди.

Ключевые слова: комплексная регенерация, травильные растворы, импульсная очистка, катионы меди

Гальваническое производство является одним из опасных с точки зрения экологии. Использование агрессивных электролитов создает загрязнения промывных и сточных вод, поступающих на очистные сооружения.

Особенно опасными являются тяжелые металлы, так как они обладают токсическим, канцерогенным и мутагенным действием на живые организмы, и поэтому вопросы эффективной очистки сточных вод в процессах обработки металлов в настоящее время очень актуальны [1-3].

Также важной проблемой становится регенерация химических реагентов. Отра-

A system-oriented research was applied to study the influence of various factors on the desorption of copper cations from the spent electrolytes of copper alloy etching. The optimal conditions were found for the post-treatment of dilute solutions using the pulsed mode in the model electrolyte (sulfuric acid and nitric acid solutions of copper). A complex technology was developed to regenerate the pickling solutions of copper cations.

Keywords: integrated regeneration, etching solutions, pulse cleaning, copper cations

ботанные растворы, образующиеся в больших количествах в гальваническом производстве, с одной стороны, относятся к опасным загрязнителям природной среды, а с другой – являются вторичными источниками получения многих цветных металлов. Высокая стоимость и дефицитность цветных металлов делает задачу утилизации отработанных электролитов из отходов производства все более актуальной. Для проведения различных технологических операций, таких как травление, применяются кислоты высокой концентрации. Раствор травления медных сплавов на основе азотной кислоты по мере на-

копления в нем катионов меди, постепенно выходит из строя и требует регенерации или утилизации [4].

На ООО ЭПО «Сигнал» г. Энгельса, как и на многих других предприятиях, существует проблема очистки сточных вод от катионов меди: отработанный раствор травления медных сплавов не подвергается очистке или регенерации, разбавляется водой в многократном объеме и в таком виде поступает на станцию нейтрализации на общую реагентную обработку. Но эта обработка не дает очистку до норм предельно-допустимых концентраций, и за это предприятию приходится ежегодно оплачивать штрафные санкции.

Общими недостатками существующих технологий извлечения ионов меди являются применение дорогостоящих реагентов и оборудования, сложность эксплуатации, а также безвозвратная потеря ионов меди.

Целью данной работы является исследование влияния технологических условий на эффективность очистки растворов от катионов меди и разработка предложений по комплексной утилизации отработанного раствора после операций травления деталей из медных сплавов.

Объекты исследования: отработанные растворы травления медных сплавов с предприятия ООО ЭПО «Сигнал» г. Энгельса.

Содержание катионов меди определялось по оптической плотности на фотокolorиметре марки КФК-3-01-«ЗОМЗ» при длине волны 900 нм.

В качестве рабочего электрода использовался графит. Вспомогательным электродом служил алюминий. Хлорсеребряный электрод сравнения (х.с.э.).

Частичная нейтрализация исходного раствора позволяет снизить кислотность раствора (до pH = 4-5). Потенциодинамические кривые на различных катод-

Частичная нейтрализация отработанного раствора проводилась раствором щелочи. Для цементационной очистки в качестве электродов использовались железо и цинковая стружка.

Доочистка растворов проводилась импульсной поляризацией [5] на потенциостате Р8 при различных режимах электролиза:

Опыт 1. $t_{\text{имп}} = 0,1$ с; $t_{\text{паузы}} = 5$ с; $i_k = 80$ мА/см². Общее время 6 часов.

Опыт 2. $t_{\text{имп}} = 0,1$ с; $t_{\text{паузы}} = 3$ с:

1) $i_k = 80$ мА/см². Общее время 2 ч 6 мин.

2) $i_k = 60$ мА/см². Общее время 1 ч 3 мин.

3) $i_k = 40$ мА/см². Общее время 1 ч 3 мин.

Опыт 3. $t_{\text{имп}} = 0,1$ с; $t_{\text{паузы}} = 3$ с:

1) $i_k = 80$ мА/см². Общее время 1 ч 3 мин.

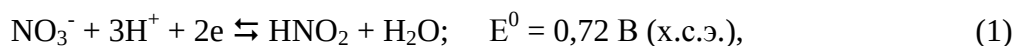
2) $i_k = 60$ мА/см². Общее время 1 ч 3 мин.

3) $i_k = 80$ мА/см². Общее время 1 ч 3 мин.

4) $i_k = 40$ мА/см². Общее время 1 ч 3 мин.

Исходный отработанный раствор травления нейтрализовывали до pH 4-5 (не допуская осаждения гидроксида меди), затем проводили цементацию на цинковой стружке, отфильтровывали и далее проводили импульсную доочистку в различных режимах, представленных выше. Для определения эффективности очистки после каждого опыта определялась оптическая плотность раствора, после чего по ранее построенной калибровочной кривой находили концентрацию катионов меди.

Ранее нами было установлено [6], что непосредственно из отработанного раствора невозможно осадить медь на катоде: из-за высокой концентрации азотной кислоты на катоде протекает процесс ее разложения и выделение NO₂ по реакциям:



дах, снятые в частично нейтрализованном растворе, показывают наличие области восстановления катионов меди (рис. 1).

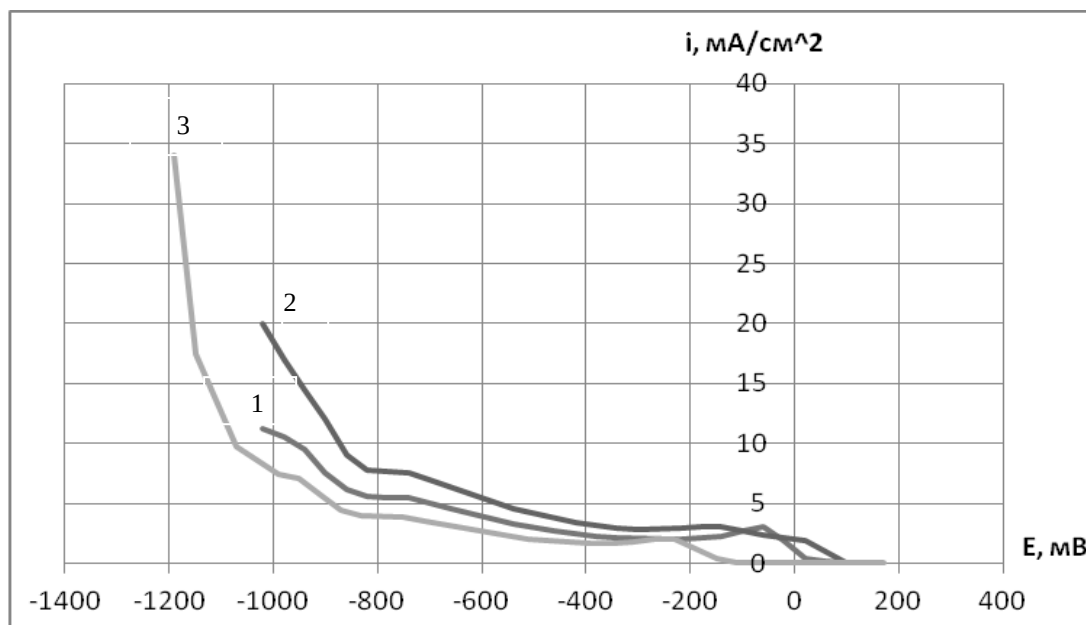


Рис. 1. ПДК в растворе после нейтрализации: 1) на графите; 2) на меди; 3) на титане

На рис. 2-5 представлены графики импульсной очистки при различных

режимах поляризации.

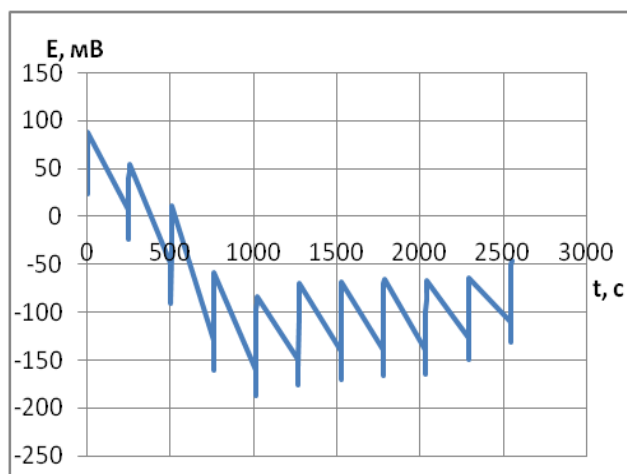


Рис. 2. Зависимость потенциала во времени для графитового катода в растворе ($\text{pH} = 4-5$) катионов меди при катодной поляризации в импульсном режиме: $i_{\text{кат}} = -80 \text{ mA/cm}^2$, $t_{\text{имп}} = 0,1 \text{ c}$, $t_{\text{паузы}} = 5 \text{ c}$. После 4 часов поляризации

На рис. 2 следует, что в течение всего опыта потенциал электрода лежит в области потенциалов электроосаждения меди; по окончании опыта электрод покрывается слоем блестящей меди.

При изменении режима доочистки (снижение времени паузы, снижение плотности тока в импульсе) (рис. 3 - 5) потен-

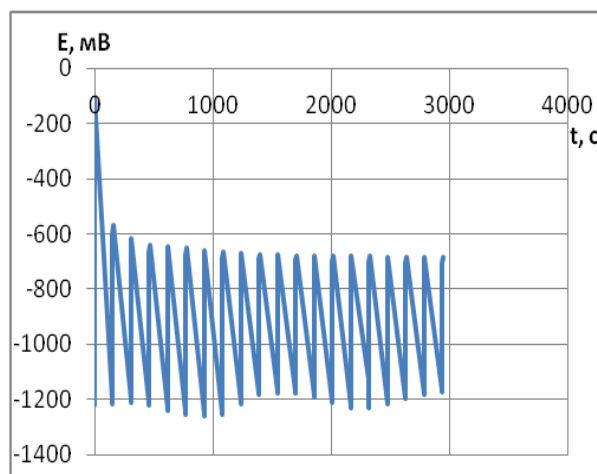


Рис. 3. Зависимость потенциала во времени для графитового катода в растворе ($\text{pH} = 4-5$) катионов меди при катодной поляризации в импульсном режиме: $i_{\text{кат}} = -80 \text{ mA/cm}^2$, $t_{\text{имп}} = 0,1 \text{ c}$, $t_{\text{паузы}} = 3 \text{ c}$. После 1 ч 3 мин поляризации

циалы на $E-t$ – кривых достигают высоких отрицательных величин, при которых возможно интенсивное выделение водорода. При этом приэлектродный слой подщелачивается, что способствует осаждению на электроде кроме металлической меди гидроксида меди $\text{Cu}(\text{OH})_2$ в виде голубого коллоидного осадка.

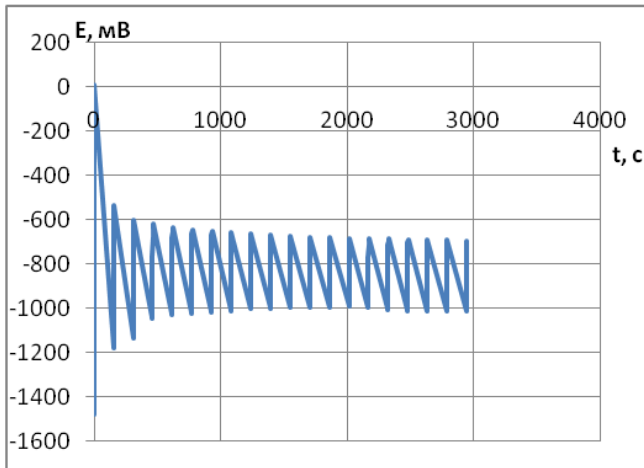


Рис. 4. Зависимость потенциала во времени для графитового катода в растворе (рН = 4-5) катионов меди при катодной поляризации в импульсном режиме: $i_{кат} = -60 \text{ мА/см}^2$, $t_{имп} = 0,1 \text{ с}$, $t_{паузы} = 3 \text{ с}$. После 2 ч 6 мин поляризации

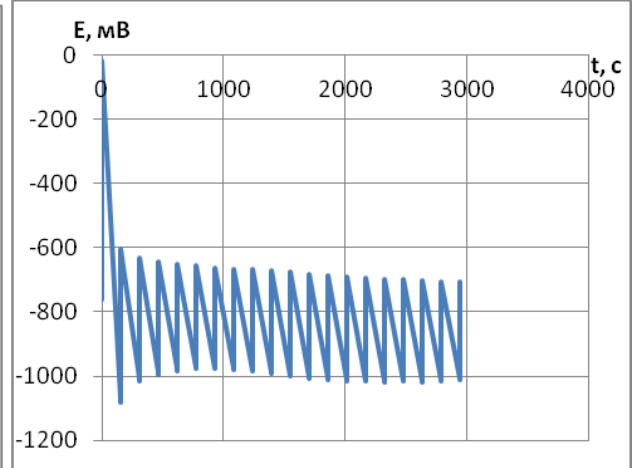


Рис. 5. Зависимость потенциала во времени для графитового катода в растворе (рН = 4-5) катионов меди при катодной поляризации в импульсном режиме: $i_{кат} = -40 \text{ мА/см}^2$, $t_{имп} = 0,1 \text{ с}$, $t_{паузы} = 3 \text{ с}$. После 3 ч 9 мин поляризации

Результаты по очистке в различных режимах представлены в таблице.

Степень эффективности очистки

Режим очистки	Исходный отработанный (1)	(1) + нейтрализация + цементация (30 мин) + фильтрация после каждой стадии (2)	(2) + опыт 1 + фильтрация после каждой стадии	(2) + опыт 2 + фильтрация после каждой стадии	(2) + опыт 3 + фильтрация после каждой стадии
Показатели					
Содержание катионов меди, г/л	148,48	1,0752	0,26	0,18496	0,63
Эффективность очистки, %	-	99,27	99,82	99,88	99,58

Из таблицы следует, что эффективность комплексной очистки раствора достигает 99,88% в случае доочистки при $t_{имп} = 0,1 \text{ с}$; $t_{паузы} = 3 \text{ с}$: 1) $i_k = 80 \text{ мА/см}^2$, время 2 ч 6 мин; 2) $i_k = 60 \text{ мА/см}^2$, время 1 ч 3 мин; 3) $i_k = 40 \text{ мА/см}^2$, время 1 ч 3 мин.

При увеличении $i_{имп}$ до 80 мА/см^2 при одновременном увеличении паузы до 5 с эффективность очистки возрастает.

Таким образом, для эффективной очистки отработанных растворов травления от катионов меди необходимо проведение следующих технологических операций:

- нейтрализация до рН=4-5;
- цементация на Zn- или Fe-стружке;

- доочистка импульсным электролизом в режимах, позволяющих осадить на катоде металлическую медь.

Таким образом, предложен комбинированный способ извлечения меди из отработанных растворов травления, включающий:

- нейтрализацию до рН=4-5;
- цементацию на Zn- или Fe-стружке;
- доочистку импульсным электролизом.

Установлено, что увеличение $i_{имп}$ и времени паузы увеличивает эффективность импульсной доочистки.

На графитовом катоде при оптимальных условиях осаждается слой металлической меди.

1. **Виноградов С.С.** Экологически безопасное гальваническое производство / С.С. Виноградов. М.: «Глобус», 2002. 302 с.

2. **Соловьева Н.Д.** Экологические проблемы электрохимических производств / Н.Д. Соловьева, Е.А. Савельева, О.В. Рябова. Энгельс: Изд-во ЭТИ (филиал) СГТУ имени Гагарина Ю.А., 2013. 68 с.

3. **Даценко В.В.** Регенерация травильных растворов гальванических производств / В.В. Даценко // Экология производства, 2014. №1. С. 63-67.

4. **Тураев Д.Ю.** Извлечение катионов тяжелых металлов из кислых растворов, содержащих сильные окислители /

Д.Ю. Тураев // Успехи в химии и химической технологии: тез. докл. Т. 24. №9 / РХТУ им. Д. И. Менделеева. М., 2010, С. 11-16.

5. **Борисова Т.Ф.** Извлечение металлов из разбавленных растворов при импульсном электролизе /Т.Ф. Борисова, В.И. Кичигин // Гальванотехника и обработка поверхности. 1999. №3. С. 43-47.

6. **Шумейко И.К.** Влияние материала катода и режима электролиза на эффективность очистки растворов от катионов меди / И.К. Шумейко, М.П. Дикун, Е.А. Савельева // Композит - 2013: Междунар. науч. конф. Саратов, 2013. С. 362-365.

Савельева Елена Анатольевна – кандидат химических наук, доцент кафедры «Химические технологии» Энгельсского технологического института Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Дикун Мария Павловна – студент кафедры «Химические технологии» Энгельсского технологического института Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Elena A. Savelyeva – Ph.D., Associate Professor, Department of Chemical Engineering, Engels Technological Institute of Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Mariya P. Dicun – Student, Department of Chemical Engineering, Engels Technological Institute of Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 10.03.15, принята к опубликованию 15.03.15

НАНЕСЕНИЕ НИКЕЛЕВОГО ПОКРЫТИЯ ИЗ НИЗКОКОНЦЕНТРИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОЛИТА В НЕСТАЦИОНАРНОМ РЕЖИМЕ

Н.Д. Соловьева, И.И. Фролова, И.П. Рыбалкина

NICKEL COATINGS WITH LOW CONCENTRATION ELECTROLYTE UNDER A NON-STATIONARY MODE

N.D. Solovyova, I.I. Frolova, I.P. Rybalkina

Рассматривается влияние импульсного и реверсивного режимов электролиза на морфологию поверхности и защитную способность никелевого покрытия.

Ключевые слова: никелевое покрытие, электролиз, импульсный режим, реверсивный режим, защитная способность, выход по току

Электролитические покрытия никелем находят широкое применение в промышленности в качестве защитно-декоративных, износостойких покрытий. Этим объясняется большой интерес к изучению процесса электрохимического никелирования. Совокупность исследовательских работ по процессу никелирования можно разделить на две группы: работы, направленные на изучение и подбор состава электролита [1-7]; работы, в которых исследуется влияние режима электролиза на качество никелевого покрытия [8-11]. В связи с все более возрастающими требованиями по сокращению в электролитах количества поверхностно-активных веществ (ПАВ), большое внимание уделяется нестационарным режимам, которые являются перспективным и надежным средством простого и эффективного управления структурой и свойствами функциональных покрытий [11].

Механизм действия импульсного и реверсивного токов аналогичен механизму действия органических добавок. [8-10]. Согласно [8] при импульсном электролизе ос-

The paper considers the impact of pulse and reverse modes of electrolysis on the surface morphology and protective ability of nickel coatings.

Keywords: nickel coating, electrolysis, pulse mode, reverse mode, protective ability, the current output

новную роль играют высокодисперсная, кинетически устойчивая коллоидная гидроокись никеля, а также пленка активного (способного восстанавливать гидроокись) атомарного водорода. Необходимые условия формирования указанных факторов создаются особенностями параметров импульсного тока. При реверсивном электролизе происходит периодическое изменение полярности электродов, приводящее к подщелачиванию прикатодного пространства в катодный период и увеличению концентрации Ni^{2+} в результате растворения металла в анодный период, а, следовательно, к образованию коллоидной гидроокиси никеля. Ее адсорбция на поверхности металла способствует получению гладких осадков и в отсутствии органических добавок в электролите [10]. Таким образом, использование различных видов нестационарного электролиза позволяет получить осадки требуемого качества без использования ПАВ.

Проведенные ранее исследования физико-химических свойств малокомпонентного электролита никелирования [12] и ис-

пользование импульсного режима электролиза в данном электролите [13] открыли возможность интенсификации процесса никелирования.

Целью данной работы явилось изучение влияния импульсного и реверсивного режимов электролиза на выход по току (Вт) и защитные свойства никелевых покрытий.

Электроосаждение никеля проводилось из электролитов состава: $\text{NiSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 140 г/л + $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 70 г/л + H_3BO_3 X г/л, где X – 25 г/л (электролит 1) и 30 г/л (электролит 2) на сталь марки 08кп в гальваностатическом, реверсивном и импульсном режимах. Катодная плотность тока (i_k) изменялась от 4,5 А/дм² до 6,0 А/дм². При нанесении покрытия в импульсном режиме длительность катодной поляризации (τ_K) составляла 1 с, длительность паузы (τ_{II}) – 0,08 с. Электроосаждение в реверсивном режиме проводилось при изменении i_k от 4,5 А/дм² до 6,0 А/дм², анодной поляризации – 1,0 А/дм², длительность катодной поляризации (τ_K) –

1 с, анодной поляризации (τ_A) – 0,08 с. Время электролиза рассчитывалось, исходя из толщины покрытия 15 мкм. Предварительная обработка стальной поверхности состояла в механической обработке, обезжиривании, травлении в 1N растворе соляной кислоты в течение 1 минуты. Примеры изменения потенциала электрода при нанесении никелевого покрытия в импульсном и реверсивном режимах из электролитов исследуемых составов приведены на рис. 1 а, б. Качество подготовки стали оценивали по потенциалу погружения электрода в рабочий электролит относительно насыщенного хлоридсеребряного электрода сравнения. Состояние поверхности электроосажденного покрытия оценивалось визуально и с помощью микроскопа Альтами МЕТ 5М при увеличении в 1200 раз. Адгезия определялась в соответствии с ГОСТ 9.302-88. Защитная способность никелевого покрытия оценивалась по экспресс-методике путем снятия потенциодинамических кривых в 3 % растворе NaCl при скорости развертки потенциала 4 мВ/с.

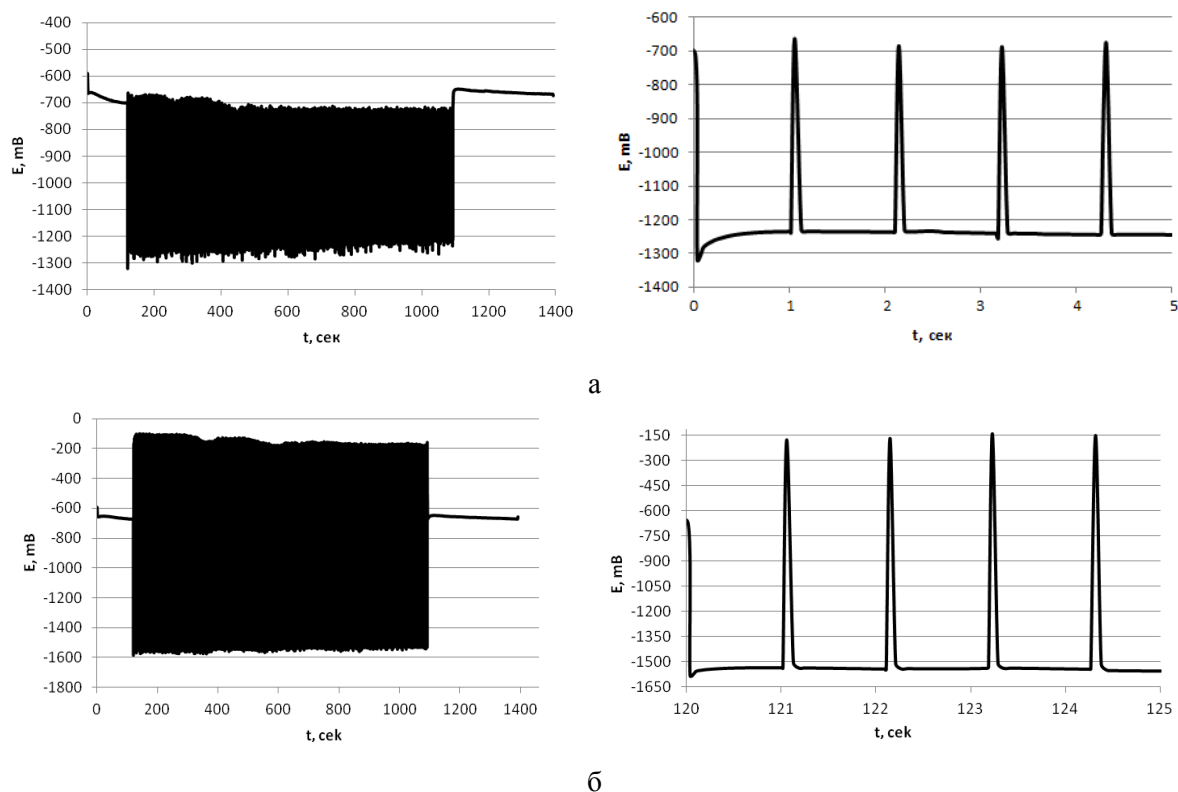


Рис. 1. E-t кривые электроосаждения никеля на стальную основу из электролита состава $\text{NiSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ – 140 г/л + $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ – 70 г/л + H_3BO_3 – 30 г/л (а – в импульсном режиме $\tau_K : \tau_{II} = 1 : 0,08$ с и плотности тока 5,0 А/дм², б – в реверсивном режиме при $i_k = 5,0$ А/дм², $i_A = 1,0$ А/дм²)

При проведении процесса в гальваностатическом режиме повышение плотности тока более $5,0 \text{ А/дм}^2$ приводит к получению плохо сцепленных с основой осадков. Применение импульсного и реверсивного режимов позволяет расширить диапазон катодных плотностей до 6 А/дм^2 , получая при этом полублестящие никелевые покрытия с выходом

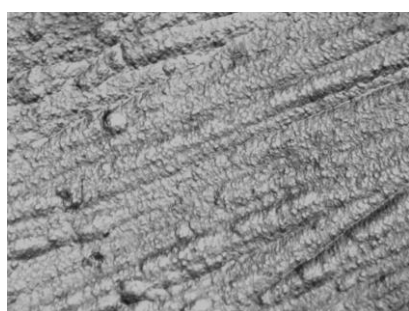
по току от 94 до 99 % (табл.). Наибольшие значения Вт до 99% и соответствующие им матовые никелевые покрытия с адгезией, отвечающей ГОСТ 9.302-88, были получены в электролите № 1 при использовании реверсивного режима в диапазоне плотностей тока $5,0 \div 6,0 \text{ А/дм}^2$.

Влияние плотности катодного тока i_k на выход по току Вт и защитную способность (область пассивного состояния ΔE , В) никелевого покрытия, осажденного из электролитов состава 1 и 2 в импульсном и реверсивном режимах

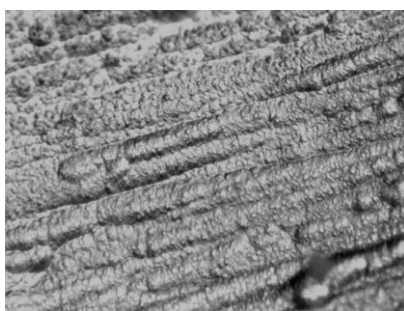
$i_k, \text{ А/дм}^2$	Электролит 1				Электролит 2			
	Импульсный режим		Реверсивный режим		Импульсный режим		Реверсивный режим	
	Вт, %	ΔE , В	Вт, %	ΔE , В	Вт, %	ΔE , В	Вт, %	ΔE , В
4,5	98	1,43	-	-	96	1,53	94	1,32
5,0	98	1,37	99	1,50	94	1,34	96	1,28
5,5	97	1,20	99	1,44	95	1,34	96	1,28
6,0	97	0,99	99	1,22	94	1,34	94	1,19

Анализ морфологии поверхности электроосажденного никелевого покрытия показал, что при использовании нестационарного

режима электролиза формируются мелкокристаллические осадки (рис. 2, 3).



а



б

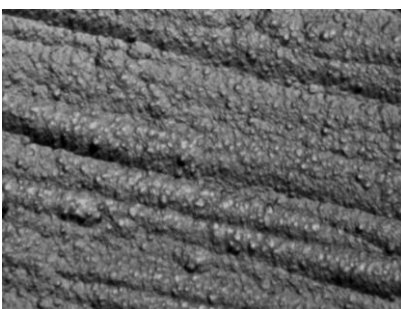


в

Рис. 2. Микрофотографии никелевого покрытия электроосажденного на стальную основу из электролита состава: $\text{NiSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 140 г/л + $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 70 г/л + H_3BO_3 25г/л в реверсивном режиме при i_k (а – 5,0; б – 5,5; в – 6,0, $i_A = 1,0 \text{ А/дм}^2$, $t = 25^\circ \text{C}$. Толщина покрытия 15 мкм. Увеличение 1200)



а



б



в

Рис. 3. Микрофотографии никелевого покрытия электроосажденного на стальную основу из электролита состава: $\text{NiSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 140 г/л + $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 70 г/л + H_3BO_3 30г/л в реверсивном режиме при i_k (а – 5,0; б – 5,5; в – 6,0, $i_A = 1,0 \text{ А/дм}^2$, $t = 25^\circ \text{C}$. Толщина покрытия 15 мкм. Увеличение 1200)

Оценка защитной способности электроосажденного никеля, проведенная по экспресс-методике путем снятия потенциодинамических кривых в 3% растворе NaCl (рис. 4) позволила установить, что наи-

большей защитной способностью ΔE , В обладают покрытия, полученные в реверсивном режиме из электролита состава: $\text{NiSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 140 г/л + $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 70 г/л + H_3BO_3 25г/л при $i_k = 5,0 \div 5,5 \text{ А/дм}^2$.

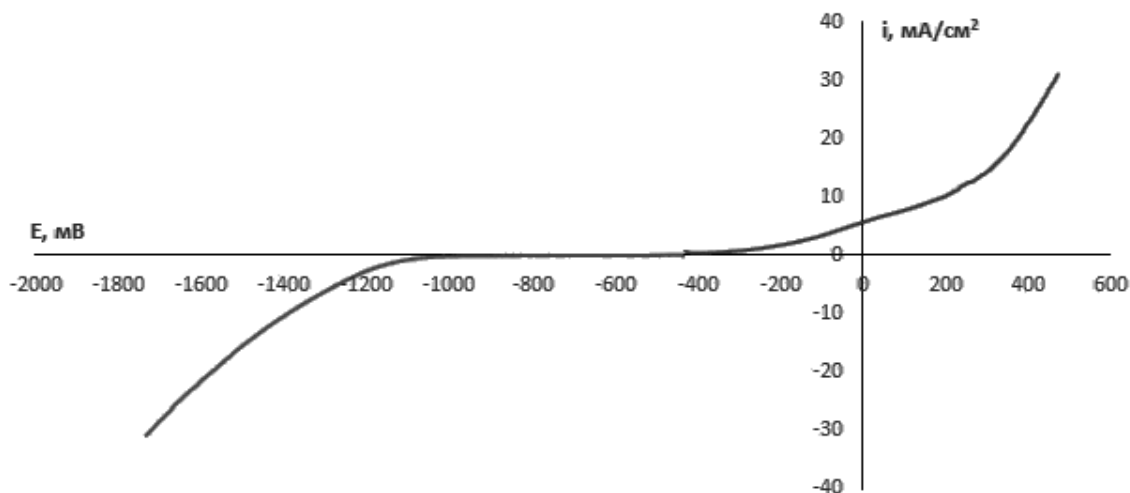


Рис. 4. Катодная и анодная ПДК в 3% растворе NaCl никелевого покрытия, электроосажденного из электролита 1 в реверсивном режиме при $i_k = 5,0 \text{ А/дм}^2$

Таким образом, применение импульсного и реверсивного токов способствует получению мелкокристаллических осадков без добавки ПАВ и обеспечивают защит-

ную способность никелевого покрытия в 1,5 раза выше по сравнению с покрытием, осажденном в гальваностатическом режиме электролиза ($\Delta E = 1,04 \text{ В}$).

ЛИТЕРАТУРА

1. **Таран Л.А.** Высокопроизводительный электролит блестящего никелирования / Л.А. Таран, Т.И. Райманова // Защита металлов. 1988. Т. 24. №1. С. 142-145.
2. **Костяновский М.А.** Электролит для электрохимического осаждения никелевых покрытий с повышенной пластичностью / М.А. Костяновский, В.А. Плохов, В.Н. Флеров // Защита металлов. 1987. Т. 23. №2. С. 324-326.
3. **Таран Л.А.** Электроосаждение никелевых покрытий из сульфатного электролита с добавками оксипиримидинов / Л.А. Таран, Т.И. Райманова // Гальванотехника и обработка поверхности. 1991. Т. 1. №1. С. 51-54.
4. **Гамбург Ю.Д.** Физико-механические свойства осадков никеля из ацетатных электролитов / Ю.Д. Гамбург, Нгуен Фыонг Нга, Т.Е. Цупак // Электрохимия. 1985. Т. 21. №10. С. 1400-1403.
5. **Андреев И.Н.** Влияние условий формирования на защитную способность гальванических никелевых покрытий / И.Н. Андреев и др // Защита металлов. 1985. Т. 21. №1. С. 144-148.
6. **Нивинскене О.В.** Хроматографический анализ 2-бутиндиола-1,4 и продуктов его превращения, образовавшихся при электроосаждении никеля / О.В. Нивинскене // Защита металлов. 1992. Т. 28. №6. С. 1028-1031.
7. **Смирнов А.В.** Электроосаждение никель-органического покрытия / А.В. Смирнов и др. // Защита металлов. 1992. Т. 28. №5. С. 811-815.

8. **Костин Н.А.** О механизме блескообразования никелевых покрытий при импульсном электролизе / Н.А. Костин и др. // Электрохимия. 1982. Т.18. №2. С. 210-213.

9. **Милушкин А.С.** Влияние реверсивного тока на наводороживание стали при электроосаждении никеля из сульфатного электролита в присутствии солей диалкилдиаминоэфиров / А.С. Милушкин, Г.В. Дундене // Защита металлов. 1995. Т. 28. №5. С. 806-810.

10. **Коллиа С.** Электроосаждение блестящих никелевых покрытий с использованием реверсивного импульсного тока / С. Коллиа, Ф. Котзиа, Н. Спиреллис // Гальванотехника и обработка поверхности. 1992. Т. 1. №1. С. 23-26.

11. **Костин Н.А.** Перспективы развития импульсного электролиза в гальванотехнике / Н.А. Костин // Гальванотехника и обработка поверхности. 1992. № 1-2. С. 16-18.

12. **Соловьева Н.Д.** Физико-химические свойства малокомпонентного электролита никелирования. / Н.Д. Соловьева, И.И. Фролова, Д.А. Легкая // Конденсированные среды и межфазные границы. 2014. Т. 16. № 2. С. 201-205.

13. **Фролова И.И.** Применение импульсного режима при электроосаждении никеля из малоцентрированного раствора / И.И. Фролова, Н.Д. Соловьева // Покрытия и обработка поверхности: сб. тр. 10-й Междунар. науч. конф. / РХТУ им. Д.И. Менделеева. М., 2013. С. 118-119.

Соловьева Нина Дмитриевна – доктор технических наук, профессор кафедры «Химические технологии» Энгельсского технологического института Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Фролова Ирина Ильинична – аспирант кафедры «Химические технологии» Энгельсского технологического института Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Рыбалкина Инна Павловна – студентка кафедры «Химические технологии» Энгельсского технологического института Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Nina D. Solovyoeva – Dr.Sc., Professor, Department of Chemical Engineering, Engels Technological Institute of Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Irina I. Frolova – Postgraduate, Department of Chemical Engineering, Engels Technological Institute of Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Inna P. Rybalkina – Undergraduate, Department of Chemical Engineering, Engels Technological Institute of Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 10.03.15, принята к опубликованию 15.03.15

ЭЛЕКТРООСАЖДЕНИЕ КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ ЦИНК – УГЛЕРОДНЫЕ НАНОТРУБКИ

Н.Д. Соловьева, Т.Ю. Шевченко, И.А. Екимов

ELECTRODEPOSITION OF COMPOSITE ZINC - CARBON NANOTUBE COATINGS

N.D. Solovyova, T.Yu. Shevchenko, I.A. Ekimov

Исследован процесс получения наномодифицированного цинкового покрытия углеродными нанотрубками марок «Таунит» и «Таунит – М». Проведены эксперименты по измерению защитной способности, коэффициента трения композиционного электрохимического покрытия на основе цинка, осажденного на стальные пластины. Установлена зависимость качества покрытия от плотности тока.

Ключевые слова: композиционные электрохимические покрытия (КЭП), дисперсная фаза (ДФ), углеродные нанотрубки

Основными областями применения цинковых покрытий являются: защита от коррозии деталей машин, крепежа, стальных листов, проволоки и деталей ширпотреба, работающих вне помещений, в различных климатических районах, а также в закрытых помещениях с умеренной влажностью и в помещениях, загрязненных газами и продуктами сгорания; защита изделий из черных металлов от коррозии в атмосфере, загрязненной сернистым газом, и от коррозионного воздействия бензина и масла; защита водопроводных труб, питательных резервуаров и предметов домашнего обихода из черных металлов, соприкасающихся с водой [1 - 5].

Широкое распространение цинковых покрытий в гальванической практике для защиты от коррозии изделий из черного металла объясняется их высокими защитными свойствами. Потенциал цинка отри-

The research is made into the process of obtaining nanomodified zinc coatings using the "Taunit" and "Taunit - M" carbon nanotubes. Experiments were carried out to estimate the protecting ability, and the friction coefficient of the composite electrochemical zinc-based coating for steel plates. The authors found the dependence of the quality of the coating on the density of the current.

Keywords: composite electrochemical coatings (CEC), dispersed phase, carbon nanotubes

цательнее потенциала черных металлов (стали, железа, чугуна), то есть цинк для указанных выше металлов является анодным покрытием и защищает их от коррозии электрохимически. Защитные свойства таких покрытий сохраняются даже при малой толщине слоя, а также при наличии в нем пор или обнаженных участков. Скорость разрушения цинкового покрытия составляет примерно 1,0–1,5 мкм/год для местности, характеризующейся наличием в атмосфере значительных количеств сернистого и углекислого газов.

Важную роль играет также низкая стоимость цинка по сравнению со многими цветными металлами.

Значительное уменьшение скорости разрушения цинковых покрытий достигается специальной обработкой их в растворах солей хромовой кислоты, а также за счет фосфатных и оксидных пленок, образующихся в результате применения хими-

ческих и электрохимических видов обработки цинкового покрытия [1 - 5]. Перспективным направлением в повышении защитной способности Zn покрытия является электроосаждение композиционных покрытий на его основе (КЭП).

Композиционные электрохимические покрытия получили за последние двадцать лет значительное развитие. В отличие от классических гальванических и химически осаждаемых покрытий, получаемых преимущественно как однофазные, КЭП являются многофазными, и их следует рассматривать как частный случай композиционных материалов. Композиционные покрытия создаются в тех случаях, когда предусматривается получение новых свойств, улучшение коррозионных и прочностных показателей, повышение жаропрочности и окислительной стойкости [4, 6-8].

Целью настоящей работы явилось изучение процесса электроосаждения композиционных цинковых покрытий, содержащих в своем составе углеродные нанотрубки марок Таунит и Таунит-М.

Объектами исследования являлись многокомпонентные сульфатные электролиты электроосаждения Zn состава: $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ – 310 г/л, $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ – 75 г/л, $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ – 30 г/л [1, 2, 6]; для получения КЭП на основе Zn в сульфатный электролит добавляли Таунит и Таунит-М; электролитические покрытия Zn и КЭП Zn – Таунит, КЭП Zn – Таунит-М; стальные электроды (Сталь 08 КП, ГОСТ 503-81). Катод имел рабочую поверхность 1 см². Анодом служил цинк марки ЦО. Рабочая поверхность стальных электродов подвергалась механическому шлифованию наждачной бумагой марки (ГОСТ 10054-80), химическому обезжириванию в растворе состава $\text{Na}(\text{OH})$ – 30 г/л в течение 15 минут, химическому травлению в растворе HCl – 5 % г/л в течение 15 минут [1]. После каждой операции проводились промывки в холодной проточной и дистиллированной воде. Для измерения потенциала исследуемого электрода использовали насыщенный хлоридсереб-

ряный электрод (ХСЭ) сравнения, заполненный насыщенным раствором KCl . Потенциал ХСЭ относительно водородного электрода составляет 0,223 В при 20 °С [1, 2].

Катодные плотности тока i_k изменялись от 4 до 6,5 А/дм². Толщина наносимого покрытия δ составляла 10, 15 мкм. Для исследований кинетики электроосаждения Zn и КЭП на его основе использовали электрохимические методы (гальваностатический, потенциодинамический) с применением потенциостатов IPC-2000, P-8S. У электроосажденных покрытий измерялись коэффициент трения по углу наклона образца, при котором происходило скалывание стального образца массой 1 г; адгезия покрытия к стальной поверхности оценивали путем нанесения сетки царапин в соответствии с ГОСТ 9.302-79. Анализ защитной способности электроосаждаемых покрытий проводили путем снятия на них потенциодинамических кривых в 3 % NaCl при скорости развертки потенциала 4 мВ/с от потенциала погружения в анодную и катодную области. Анализ морфологии поверхности покрытия проводили на микроскопе XSZ - 21 при увеличении в 200, 500 раз.

Оценка воспроизводимости экспериментальных данных осуществлялась с помощью критерия Кохрена.

Известно [8, 9], что включение наноразмерных частиц в металлическую матрицу позволяет получить мелкокристаллические покрытия, обладающие повышенной микротвердостью, износостойкостью, коррозионной стойкостью. С этой целью проводилось электроосаждение Zn из суспензии, содержащей добавку Таунит или Таунит-М.

Гальваностатические кривые электроосаждения изучаемых покрытий (рис. 1) показали, что наибольшая поляризация процесса наблюдается при использовании в качестве дисперсной фазы Таунита-М. Следовательно, присутствие данной добавки должно способствовать получению мелкокристаллических осадков.

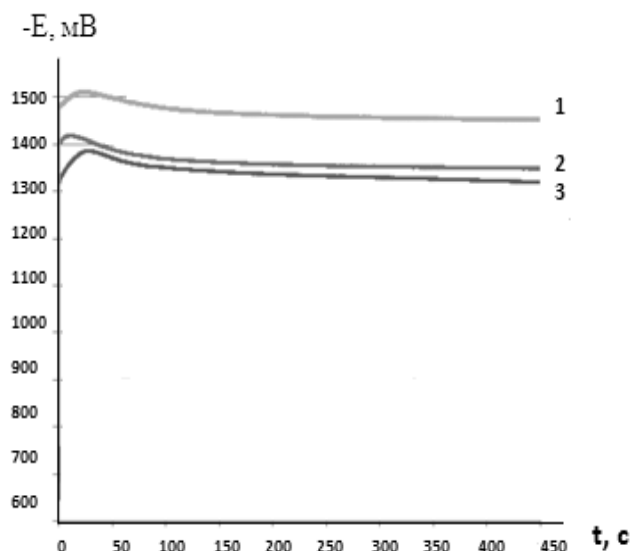


Рис. 1. Гальваностатические кривые электроосаждения Zn и КЭП на основе Zn при $i_k = 6,5 \text{ A/дм}^2$: 1 - Zn; 2 – Zn– Таунит; 3 – Zn–Таунит-М

Результаты эксперимента представлены в таблице. Покрытия, полученные в изучаемом диапазоне плотностей тока, светло-серые (рис. 2) с адгезией, соответствующей ГОСТ 9.302-88. При повышении катодной плотности тока до $5,5 \text{ A/дм}^2$ и более частицы углеродного наноматериала (УНМ) зарастают электролитическим цинком, формируя равномерные покрытия. Следует отметить, что для КЭП, осажден

ных с добавкой Таунит-М при увеличении толщины покрытия до 20 мкм, коэффициент трения покрытия несколько снижается. При использовании добавки Таунит изменение коэффициента трения при увеличении толщины покрытия не наблюдается (табл.). Включение в состав покрытия данных добавок обеспечивает снижение f по сравнению с цинковым покрытием. При адсорбции нанотрубок увеличивается число энергетически выгодных участков поверхности, благодаря изменению энергии межфазного взаимодействия. Это является причиной образования более мелкокристаллической металлической фазы. Изменение структуры покрытия приводит к повышению его защитной способности. Диапазон потенциалов области пассивного состояния ΔE для КЭП Zn – углеродный наноматериал превышает ΔE для цинкового покрытия в 2 – 2,5 раза в зависимости от плотности поляризующего тока. С повышением катодной плотности тока не наблюдается однозначного изменения защитной способности покрытия КЭП (табл.). Следует отметить, что с увеличением толщины осадка до 20 мкм ΔE уменьшается. Большая защитная способность КЭП наблюдается для покрытий с добавкой Таунит-М в диапазоне плотностей тока $5,0 – 5,5 \text{ A/дм}^2$.

Область пассивного состояния ΔE , коэффициент трения f покрытий Zn, Zn – нанотрубки, осажденных на сталь 08 КП

Состав электролита	$i_k, \text{ A/дм}^2$	Толщина покрытий, мкм			
		$\delta = 15 \text{ мкм}$		$\delta = 20 \text{ мкм}$	
		f	$\Delta E, \text{ В}$	f	$\Delta E, \text{ В}$
ZnSO ₄ ·7H ₂ O - 310 г/л, Na ₂ SO ₄ ·10H ₂ O - 75 г/л, Al ₂ (SO ₄) ₃ - 30 г/л	6,0	0,55	0,15	-	-
	6,5	0,60	0,20	-	-
ZnSO ₄ ·7H ₂ O 310 г/л, Na ₂ SO ₄ ·10H ₂ O - 75, г/л, Al ₂ (SO ₄) ₃ - 30 г/л, Таунит - 0,05 г/л	5,0	0,62	0,45	0,62	0,35
	5,5	0,52	0,40	0,52	0,35
	6,0	0,44	0,40	0,44	0,30
	6,5	0,42	0,45	0,42	0,40
ZnSO ₄ ·7H ₂ O 310 г/л, Na ₂ SO ₄ ·10H ₂ O - 75, г/л, Al ₂ (SO ₄) ₃ - 30 г/л, Таунит – М - 0,05 г/л	4,0	0,53	0,40	0,45	0,50
	4,5	0,49	0,40	0,53	0,50
	5,0	0,55	0,60	0,47	0,45
	5,5	0,55	0,55	0,40	0,60
	6,0	0,52	0,50	0,45	0,45
	6,5	0,47	0,50	0,38	0,44

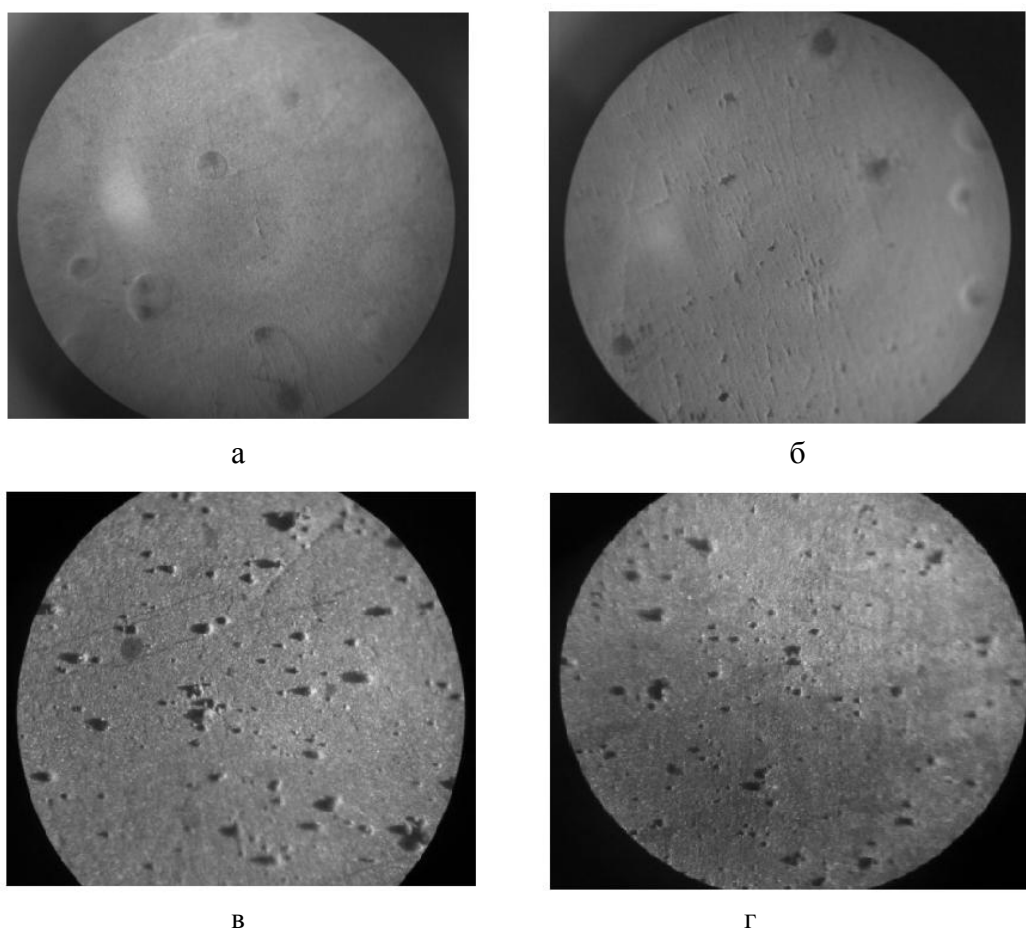


Рис. 2. Морфология поверхности КЭП на основе цинка, осажденных в сульфатном растворе с добавлением Таунита – М, нанесенного на сталь 08КП при плотностях тока: а – $5,5 \text{ А/дм}^2$; б – $6,0 \text{ А/дм}^2$; с добавлением Таунита при плотностях тока: в) $6,0 \text{ А/дм}^2$; г) $6,5 \text{ А/дм}^2$. Толщина покрытия - 15 мкм. Увеличение - 200 раз.

Таким образом, установлена возможность получение КЭП на основе цинка, модифицированных нанотрубками, обладающих большей защитной способностью, чем у электролитического цинка, а также

- изучено электроосаждение КЭП Zn-Таунит, Zn-Таунит-М из сернокислого электролита с добавками дисперсной фазы УНТ в гальваностатическом режиме;

- установлено, что углеродные нанотрубки включаются в состав цинкового по-

крытия, о чем свидетельствует морфология получаемого покрытия;

- показано, что введение УНТ в состав покрытия повышает его коррозионную стойкость в 2,5 раза по сравнению с чистым цинковым покрытием и снижает коэффициент трения;

- равномерное покрытие формируется при плотности тока $5,5 - 6,0 \text{ А/дм}^2$ без перемешивания электролита.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гальванические покрытия в машиностроении. Справочник. / Под ред. М.А. Шлугера. М.: Машиностроение, 1985. Т.1. 1985. 240 с.

2. Гальванотехника: справ. / Ф.Ф. Ажогин и др. М: Металлургия, 1987. 736 с.

3. Окулов В.В. Цинкование. Техника и технология / В.В. Окулов; М.: Глобус, 2008. 252 с.

4. Способ получения композиционных покрытий на основе цинка: пат. 2169798 РФ МПК(2006.01) С 25 D 3/22, С 25 D 15/00 /

Л. Бернгард и др. - № 2000104907/02; заявл. 21.02.2000; опубл. 27.06.2001.

5. Об областях применения цинковых покрытий; о составах фосфатирования под окраску; о составах раствора холодного оксидирования; о коррозионной стойкости Zn-покрытий с пассивацией; о «самозалечиваемости» пассивной Cr(VI) пленки; о цинк-ламельных покрытиях / В.Н. Кудрявцев и др. // Гальванотехника и обработка поверхности. 2011. Т. XIX. №4. С. 11 – 14.

6. **Сайфуллин Р.С.** Композиционные покрытия и материалы / Р.С. Сайфуллин. М.: Химия, 1977. 270 с.

7. **Шевченко Т.Ю.** Электроосаждение

композиционных покрытий на основе цинка, модифицированных углеродным материалом / Т.Ю. Шевченко и др. // Перспективные материалы. 2014. № 2. С. 71 - 76.

8. Получение наномодифицированных композиционных никелевых гальванических покрытий / А.Г. Ткачев и др. // Гальванотехника и обработка поверхности. 2010. Т. 18. №1. С. 17-21.

9. **Ткачев А.Г.** Углеродные нанотрубки «Таунит», состояние производства и перспективы развития / А.Г. Ткачев // Материалы II Всероссийской научно-инновационной молодежной конференции с международным участием, г. Тамбов, 2010. С.45-49.

Соловьева Нина Дмитриевна – доктор технических наук, профессор кафедры «Химические технологии» Энгельсского технологического института Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Шевченко Татьяна Юрьевна – кандидат технических наук, ассистент кафедры «Химические технологии» Энгельсского технологического института Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Екимов Иван Александрович – студент кафедры «Химические технологии» Энгельсского технологического института Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Nina D. Solovyoeva – Dr.Sc., Professor, Department of Chemical Engineering, Engels Technological Institute of Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Tatyana Yu. Shevchenko – Ph.D., Assistant Lecturer, Department of Chemical Engineering, Engels Technological Institute of Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Ivan A. Ekimov – Undergraduate, Department of Chemical Engineering, Engels Technological Institute of Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 10.03.15, принята к опубликованию 15.03.15

ЭЛЕКТРООСАЖДЕНИЕ ПОКРЫТИЯ ЦИНК-НИКЕЛЬ-КОБАЛЬТ НА СТАЛЬ В СУЛЬФАТНО-ГЛИЦИНАТНОМ РАСТВОРЕ

Е.В. Ченцова, С.Ю. Почкина

ELECTRODEPOSITION OF ZINC-NICKEL-COBALT COATINGS OVER THE STEEL IN SULFATE-GLYCINATE SOLUTIONS

E.V. Chentsova, S.U. Pochkina

Рассматривается процесс электрохимического формирования гальванического покрытия цинк-никель-кобальт на стали в сульфатно-глицинатном растворе в стационарном режиме электролиза при варьировании содержания сульфата никеля и сульфата кобальта в растворе, влияние режима осаждения на физико-химические свойства полученных образцов покрытий.

Ключевые слова: сплавы цинка, электроосаждение, физико-химические свойства

The paper considers electrochemical formation of the zinc-nickel-cobalt plating over the steel in the sulfate-glycinate solution under the stationary electrolysis mode by varying the content of nickel sulfate and cobalt sulfate in the solution, and the influence of the deposition mode on the physical and chemical properties of the sample coatings.

Keywords: zinc alloys, electrodeposition, physical-chemical properties

Электролитический сплав цинк-никель используется в промышленности для нанесения защитно-декоративных покрытий на стальные изделия. Одним из перспективных направлений исследования по улучшению функциональных свойств сплава цинк-никель является его легирование третьим компонентом. Согласно литературным данным, коррозионная стойкость покрытия тройным сплавом Zn-Ni-Co примерно в 10 раз выше, чем Zn-Ni и в 7 раз выше, чем Zn-Co [1, 2].

Покрытия цинк-никель-кобальт осаждали на подложку из стали Ст45. Подготовка поверхности подложки включала химическое обезжиривание в растворе состава Na_2CO_3 – 40 г/л, Na_3PO_4 – 40 г/л, NaOH – 40 г/л ($\tau=110$ с), травление в растворе состава HCl – 50 г/л ($\tau=110$ с), промывку в дистиллированной воде. Покрытие цинк-никель-кобальт наносили из сульфатно-глицинатного раствора ZnSO_4 0,21 моль/л, NiSO_4 0,07-0,12 моль/л, CoSO_4

0,07-0,18 моль/л, Na_2SO_4 0,50 моль/л, $\text{NH}_2\text{CH}_2\text{COOH}$ 0,93 моль/л. Значение pH раствора поддерживалось в интервале 5-6, температура 20 – 25 °С.

Покрытие наносили в гальваностатических условиях при плотности тока 10 – 60 мА/см². Время электролиза рассчитывали на толщину осаждаемого покрытия 10 мкм. В качестве противоиэлектрода использовали графитовый стержень, в качестве электрода сравнения – хлоридсеребряный электрод (0,222 В). Электроосаждение покрытия Zn-Ni-Co проводили с помощью потенциостата Р-8 в комплекте с персональным компьютером.

Коррозионную стойкость полученных образцов оценивали потенциодинамическим методом при скорости развертки потенциала 4 мВ/с в 3 % растворе NaCl . Кривые снимаются от бестокового потенциала образца в анодную и катодную сторону до резкого подъема тока. Коррозионная стойкость образца оценивается

по величине области пассивного состояния.

Количественный состав образцов определяли с помощью портативного анализатора химического состава X-Met 7500, modelXMD5 2726. Точность измерения $\pm 0,05$ %. Измерения проводились в трех точках образца.

Коэффициент трения полученных образцов рассчитывали по формуле:

$$f = F_{тр} / P = \operatorname{tg} \alpha,$$

где $F_{тр}$ – сила трения скольжения, Н; P – сила, с которой контртело массой 1 г давит на испытываемую поверхность, Н.

Микротвердость полученных образцов определяли с помощью микротвердомера ПМТ-3 методом вдавливания в испытываемый материал алмазного наконечника Виккерса с квадратным основанием четырехгранной пирамиды, обеспечивающей геометрическое и механическое подобие

отпечатков по мере углубления индентора под действием нагрузки.

Анализ кинетических закономерностей электроосаждения покрытия цинк-никель-кобальт на сталь по характеру E, t - кривых показал, что при повышении тока осаждения i_k и содержания ионов никеля в растворе возрастает поляризация процесса осаждения цинка, никеля и кобальта на стальном электроде (рис.1). Отмечено, что как при постоянной концентрации ионов никеля и повышении содержания ионов кобальта, так и при постоянном содержании ионов кобальта и увеличении концентрации ионов никеля поляризация процесса электроосаждения покрытия на электроде возрастает. Согласно литературным данным [3,4], перенапряжение выделения водорода на металлах группы железа меньше, чем на цинке. В соответствии с величинами выхода по току полученных образцов (табл. 1) полученные зависимости можно объяснить повышением скорости выделения водорода.

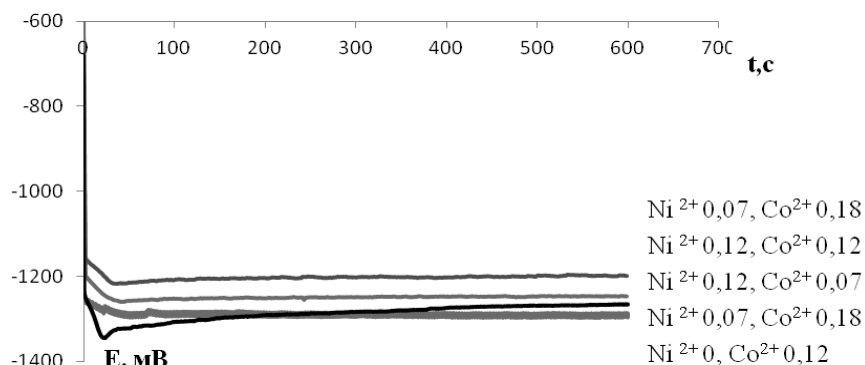


Рис. 1. Гальваностатические кривые электроосаждения покрытия цинк-никель-кобальт током 20 mA/cm^2 из сульфатно-глицинатного раствора

На электроде осадок формируется по аномальному механизму с преимущественным содержанием цинка в покрытии. При повышении времени электролиза и тока осаждения отмечено повышение содержания цинка и кобальта в гальваническом осадке (табл. 1, 2). Выход по току образцов зависит как от времени, так и от тока осаждения. Согласно полученным результатам, можно предположить, что при наложении поляризации на электроде преимущественно протекают процессы выделения никеля и водорода. С течением времени в при-

электродной области раствора формируется пленка из частиц гидроксида цинка, препятствующая осаждению никеля, повышается доля тока, идущего на процессы выделения цинка и кобальта. В диапазоне значений $20 - 60 \text{ mA/cm}^2$ состав покрытия незначительно зависит от тока осаждения, однако выход по току образцов цинк-никель-кобальт снижается, что связано с повышением скорости выделения водорода. Аномальный выход по току образца, осажденного током 60 mA/cm^2 (табл. 1), согласно литературным данным [3, 4],

можно объяснить включением в состав покрытия частиц гидроксидов металлов.

Значение стационарного потенциала $E_{стац}$ полученных осадков снижается при повышении времени электролиза в соответствии с увеличением содержания цинка в полученных образцах (табл. 2). Увеличение $E_{стац}$ при повышении тока

осаждения (табл. 1) можно объяснить повышением содержания никеля в поверхностных слоях образцов, обусловленным более равномерным распределением компонентов по толщине осадка в связи с перемешиванием приэлектродного слоя раствора выделяющимся водородом.

Таблица 1.

Влияние тока осаждения i_k на величину стационарного потенциала $E_{стац}$, соотношение компонентов в покрытии, выход по току ВТ, микротвердость H , коэффициент трения f и диапазон коррозионной устойчивости $\Delta E_{кор}$ образцов покрытия цинк-никель-кобальт на стальном электроде, осажденного из сульфатно-глицинатного раствора состава, моль/л: $ZnSO_4$ 0,21, $NiSO_4$ 0,07, $CoSO_4$ 0,12, Na_2SO_4 0,50, NH_2CH_2COOH 0,93

i_k , мА/см ²	$E_{стац.}$, В	Содержание, %			Выход по току, %	H , кг/мм ²	f	$\Delta E_{кор}$, В
		цинк	никель	кобальт				
10	-1,020	66,7	31,6	1,7	92,4	59,2	0,17	0,543
20	- 0,952	85,7	7,5	6,8	81,9	58,8	0,15	0,468
40	- 0,826	85,5	7,0	7,5	63,9	78,6	0,14	0,578
60	- 0,840	86,7	6,1	7,2	106,3	82,1	0,15	0,538

Таблица 2.

Влияние времени осаждения τ на состав и физико-химические свойства покрытия цинк-никель-кобальт на стали, осажденного током 20 мА/см² в растворе состава, моль/л: $ZnSO_4$ 0,21; $NiSO_4$ 0,12; $CoSO_4$ 0,12, Na_2SO_4 0,50; NH_2CH_2COOH 0,93

τ , с	$E_{стац.}$, В	Содержание, %			Выход по току, %	H , кг/мм ²	f
		Zn	Ni	Co			
30	-0,89	19,6	79,4	1,0	21,5	69,8	0,2
120	-0,92	87,9	10,5	1,6	77,3	41,6	0,16
600	-0,94	85,7	7,5	6,7	81,9	58,8	0,15

Отмечено, что увеличение концентрации ионов никеля в растворе способствует повышению содержания этого компонента в электролитическом покрытии, в то время как концентрация ионов кобальта в электролите незначительно влияет на его содержание в осадке и составляет 6 – 8 %.

Доминирующее влияние на микроструктуру полученных образцов покрытий цинк-никель-кобальт оказывает время и величина тока осаждения. С повышением времени электролиза и тока осаждения увеличиваются микродефекты гальвани-

ческого осадка (рис. 2). На поверхности образцов, полученных током 40 – 60 мА/см², наблюдаются углубления, образованные пузырьками водорода на поверхности электрода.

Исследование физико-химических свойств полученных образцов покрытий показало, что коэффициент трения покрытий цинк-никель-кобальт незначительно зависит от режима электролиза. Микротвердость электролитических осадков повышается при увеличении тока электролиза в связи с наводороживанием образцов.

Диапазон коррозионной устойчивости полученных образцов покрытий цинк-

никель-кобальт незначительно зависит от режима осаждения.

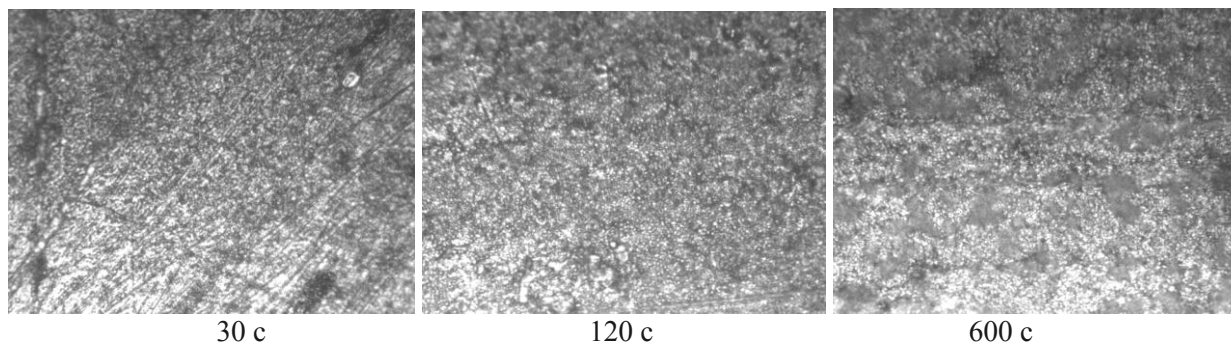


Рис 2. Микроструктура поверхности образцов цинк-никель-кобальт на стали осажденных током 20 мА/см² в электролите состава, моль/л: ZnSO₄ 0,21; NiSO₄ 0,07; CoSO₄ 0,12; NaSO₄ 0,50; NH₂CH₂COOH 0,93, увеличение в 1200 раз.

Таким образом

- при наложении поляризации на стальном электроде преимущественно выделяется никель и водород;
- электрохимическое формирование осадка цинк-никель-кобальт протекает по

аномальному механизму с преимущественным содержанием цинка;

- состав гальванических осадков цинк-никель-кобальт определяется величиной времени и тока осаждения.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Younan M.M.** Surface microstructure and corrosion resistance of electrodeposited ternary Zn-Ni-Co alloy / M.M.Younan // Journal of Applied Electrochemistry. 2000. V. 30. P. 55-60.

2. **Eliaz N.** Electroplating and characterization of Zn-Ni, Zn-Co and Zn-Ni-Co alloys / N.Eliaz, K.Venkatakrishna, A.Chitharanjan Hegde // Surface and Coatings Technology. 2010. V. 205. P. 1969-1978.

3. **Роев В.Г.** Явление деполяризации и дофазового осаждения цинка при соосаждении с никелем / В.Г. Роев, Н.В. Гудин // Электрохимия. 1996. Т.32. № 3. С.356-361.

4. **Харламов В.И.** К вопросу об аномальном осаждении сплава цинк-никель из сульфатно-хлоридных электролитов / В.И. Харламов, А.Б. Вакка, Т.Л. Азарченко, Т.А. Ваграмян // Электрохимия. 1991. Т.27. № 8. С.1062-1065.

Ченцова Елена Викторовна – кандидат химических наук, доцент кафедры «Химические технологии» Энгельсского технологического института Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Почкина Светлана Юрьевна – магистрант кафедры «Химические технологии» Энгельсского технологического института Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Elena V. Chentsova – Ph.D., Assistant Lecturer, Department of Chemical Engineering, Engels Technological Institute of Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Svetlana Yu. Pochkina – Master Student, Department of Chemical Engineering, Engels Technological Institute of Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 10.03.15, принята к опубликованию 15.03.15

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКОГО ТРАВЛЕНИЯ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

В.М. Райгородский

OPTIMIZATION OF ELECTROLITIC ETCHING FOR ALUMINIUM ALLOYS

V.M. Raigorodskiy

Статья посвящена оптимизации методики электролитического травления алюминиевых сплавов АД0, Д1, АЛ 4, АЛ 4-1, АЛ 5. Приведены рецепты электролитов и химических травителей для их травления.

Ключевые слова: электролит, электролитическое травление, химическое травление, алюминиевый сплав, легирующие компоненты

Электролитическое травление представляет собой процесс растворения металлов в электролитических ваннах с растворами солей или кислот. Чаще других применяется анодное травление, в котором анодом служит металл, подвергаемый травлению, а катодом - проводящая пластина, изготовленная из материала, нейтрального к действию электролита, например, из свинца или графита.

Процесс электролитического травления используется очень широко в самых различных областях промышленности. В полиграфии таким образом изготавливают полиметаллические печатные формы для офсетной печати. Эта технология используется в процессе изготовления интегральных схем, полупроводниковых лазеров. Очень широко этот метод используется при подготовке образцов к различным видам исследований: для приготовления металлографических шлифов, образцов для

The article is devoted to optimization of the electrolytic etching technique of aluminum alloys AD0, D1, AL 4, AL 4-1, AL 5. The recipes of electrolytes and chemical etchant used for etching the given alloys are provided.

Keywords: electrolyte, electrolytic etching, chemical etching, aluminum alloy, alloying components

просвечивающей электронной микроскопии и др.

Ранее нами было показано [1 - 4], что указанный процесс может широко использоваться в криминалистических исследованиях и судебной экспертизе, в частности, для восстановления измененных и уничтоженных маркировочных обозначений.

В этом случае процесс электролитического травления может быть реализован в трех вариантах:

- погружением изделия в ванну с электролитом. Анодом при этом служит само изделие. В качестве катода используют пластину из нейтрального к действию электролита металла, например, свинца. Пластины располагают параллельно изделию на расстоянии 3-5 мм;

- изготовлением ванночки из нейтральных пластичных материалов (воска, стеарина, пластилина) непосредственно на изделии, которое служит анодом. Катод в

виде проволоочки располагается параллельно восстанавливаемой поверхности на расстоянии 3-5 мм;

- путем контакта участка, на котором проводится восстановление, с ватным тампоном, смоченным электролитом. Анодом при этом служит само изделие, а катодом - металлический пинцет, зажимающий тампон и равномерно двигаемый вдоль поверхности. К пинцету при этом прикладывается отрицательный потенциал, а к изделию - положительный.

При использовании электролитического травления в криминалистических исследованиях и судебной экспертизе исследуемое изделие может иметь значительные размеры. Зачастую исследование необходимо проводить на вертикальных поверхностях. Указанные обстоятельства выделяют третий вариант реализации электролитического травления как наиболее предпочтительный. Следует отметить, что помимо перечисленных преимуществ в данном случае можно контролировать результат электролитического травления непосредственно в процессе его проведения, предотвращая «перетрав», либо, наоборот, увеличивая скорость растворения металла [1, 2, 4].

Одним из наиболее распространенных конструкционных материалов является алюминий и его сплавы, которые широко используются в самолетостроении для изготовления корпусов, в автомобилестроении для изготовления блоков двигателей, для корпусов и других элементов различных бытовых изделий, в электротехнике и т. д. Столь широкое применение алюминиевые сплавы находят из-за сочетания своих уникальных свойств: малого удельного веса изделия и одновременно высокой прочности, легкости механической обработки, возможности изготовления литевых изделий. Полученные изделия позволяют обеспечить герметичность, что важно, например, при их использовании в качестве блоков цилиндров двигателей автомобиля.

В частности, блоки цилиндров из алюминиевых сплавов используются в авто-

мобилях ГАЗ "Волга" и "Газель". До последнего времени их изготавливал Уфимский моторостроительный завод: двигатели моделей 412Э¹, 412Ю², 412ДЭ³, 412ДЮ⁴ для автомобилей "Москвич" ПО "Ижмаш". Блоки цилиндров из алюминиевых сплавов широко используют практически все крупные зарубежные автомобильные фирмы: BMW, Jaguar, Rover, Mercedes-Benz, Porsche, Audi, Chevrolet.

Необходимые прочностные свойства стенок цилиндров достигаются дополнительным введением либо в сам материал, либо в область, непосредственно прилегающую к стенке цилиндра, кремния, который гораздо прочнее чугуна, традиционно используемого для изготовления блоков цилиндров⁵.

В настоящей работе предпринята попытка оптимизации технологии электролитического травления алюминиевых сплавов с целью выбора наилучшего состава электролита, условий проведения процесса.

Для сравнительного исследования были выбраны пять различных марок алюминиевых сплавов: АЛ-4, АЛ-4-1, АЛ-5, АД0 и Д1, первые три из которых относятся к литевым сплавам (для изготовления отливок) и используются, в частности, для изготовления блоков цилиндров двигателей. Сплавы АД0 и Д1 относятся к деформируемым сплавам и широко используются для изготовления проката и поковок. При этом сплав АД0 относится к сплавам с низкой прочностью и высокой пластичностью, что является следствием отсутствия легирования. В этой связи данный вид сплавов относится к техническому алюминию без легирования. В

¹ Экспортное исполнение двигателя.

² Тропическое исполнение двигателя.

³ Дефорсированный двигатель в экспортном исполнении.

⁴ Дефорсированный двигатель в тропическом исполнении

⁵ Серый чугун используется для изготовления блоков цилиндров всех автомобилей марки ВАЗ. Ранее использовался для изготовления блока цилиндров двигателя МеМЗ-1102 Мелитопольского завода «Мотордеталь» для автомобиля ЗАЗ-1102 «Таврия».

отличие от него сплав Д1 легирован Al - Cu - Mg и относится к сплавам нормальной прочности (дюралюм).

При холодной прокатке и волочении происходит упрочнение сплавов АД0 и Д1. Поэтому они относятся к сплавам, упрочняемым давлением. Деформационное уп-

рочнение приводит к увеличению прочности и твердости, но уменьшает пластичность. Восстановление пластичности достигается последующим рекристаллизационным отжигом.

Состав исследуемых сплавов представлен в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Химический состав алюминиевых литейных сплавов, используемых для изготовления блоков двигателей транспортных средств¹

Марка сплава	Массовая доля основных компонентов, %						
	Mg	Si	Mn	Cu	Ti	Ni	Al
АЛ-4	0,17-0,30	8-10,5	0,2-0,5	—	—	—	Основа
АЛ-4-1	0,23-0,30	9-10,5	0,2-0,35	—	0,15	—	Основа
АЛ-5	0,35-0,6	4,5-5,5	—	1,0-1,5	—	—	Основа

Марка сплава	Массовая доля примесей, %							
	Fe		Cu	Zn	Be	Pb	Sn	
АЛ-4	0,9	Zr+Ti=0,15	0,3	0,3	0,10	0,05	0,01	Ni=0,10
АЛ-4-1	0,3	B=0,1	0,1	0,3	0,1	0,03	0,005	Zr=0,15
АЛ-5	1,2	Mn=0,5	1,8	1,8	—	—	—	Ni=0,5

Таблица 2

Химический состав алюминиевых деформируемых сплавов Д-1 и АД-0²

Марка сплава	Массовая доля основных компонентов, %									Сумма примесей
	Cu	Mg	Mn	Si	Fe	Zn	Ti	Cr	Al	
АД-0	0,05	0,05	0,05	0,25	0,40	0,07	0,05	-	Осн.	—
Д1	3,5-4,8	0,40-0,8	0,40-1,0	0,20-0,8	0,7	0,25	0,15	0,10	Осн.	Не более 0,15

¹ В соответствии с ГОСТ 1583-93. Сплавы алюминиевые литейные. Технические условия

² В соответствии с ГОСТ 4784-97. Алюминий и алюминиевые сплавы деформируемые

Для всех исследуемых сплавов помимо электролитического травления использовали химический метод травления, что позволило сравнить указанные методы. В обоих случаях травление осуществляли с помощью ватного тампона, смоченного электролитом или травителем.

Источником постоянного напряжения в процессе электролитического травления служил лабораторный блок питания НУ-1500, позволяющий стабилизировать напряжение до 15 В и ток – до 2 А. Процесс в большинстве случаев осуществляли при максимальных напряжениях и токе. Для улучшения электрического контакта на исследуемых образцах было изготовлено винтовое соединение. При отсутствии такого соединения, когда контакт осуществлялся лишь прижимом электрического провода к образцу вручную, электролитического травления не наблюдалось.

В качестве электролитов и химических травителей были опробованы практически все известные из литературы растворы, применяющиеся в криминалистических исследованиях для восстановления измененных и уничтоженных маркировочных обозначений на алюминиевых сплавах [5 - 7], а также использующиеся в металлографии для изготовления металлографических шлифов [8 - 10]. Среди них были электролиты и травящие растворы на основе едких щелочей КОН и NaOH, кислот: соляной, серной, азотной, уксусной, растворов хлористого натрия, хлорного железа, гипохлорида натрия и двуххромовокислого калия. Были использованы также растворы на основе смеси кислот, в том числе с этиловым спиртом и двуххромовокислым калием. Для выбранных электролитов и травителей по результатам предварительных испытаний проводили варьирование состава, позволившее найти наилучшее сочетание компонентов. Всего было приготовлено более 30 различных составов электролитов, используемых также для химического травления.

Анализ результатов травления оценивали визуально осмотром площадки, на

которой проводили травление. Площадку предварительно шлифовали с помощью шлифовальной бумаги мелкой зернистости. Кроме того проводили оценку контраста выявленных штрихов маркировочных обозначений, ранее набитых вручную ударом молотка по клейму и впоследствии уничтоженных на наждачном круге. В данном случае, помимо прочего, было возможно оценить селективные свойства электролита и травителя, заключающиеся в различии скоростей травления деформированных и недеформированных областей материала.

Проведенные исследования показали, что для электролитического и химического травления результаты в целом идентичны. Это понятно, поскольку в обоих случаях процесс состоит из двух этапов: окисления образца с образованием солей или оснований; растворение последних и их переход в раствор. Различие заключается лишь в том, что в процессе электролитического травления подвод диссоциированных ионов к образцу осуществляется под действием электрического напряжения, а в химическом травлении - вследствие диффузии. Различие в механизме подвода ионов позволило выявить различия в процессе. Процесс электролитического травления, как и следовало ожидать, оказался более управляемым, позволяющим регулировать скорость травления изменением подаваемого электрического напряжения, что особенно важно для анализа ранее удаленных и выявленных штрихов маркировочных обозначений. В целом процесс электролитического травления происходит быстрее, чем химического травления.

Результаты проведенных исследований можно условно разделить на следующие группы:

- травление образцов протекало крайне медленно, либо не наблюдалось вовсе. В этом случае, вопреки литературным данным, электролит и травитель никак не действовал на исследуемые образцы. Иллюстрацией данных результатов служит рис. 1;



Рис. 1. Отсутствие электролитического травления сплава АД0 при использовании в качестве электролита однопроцентного водного раствора серной кислоты. Аналогичный результат наблюдали при использовании пятипроцентного водного раствора хлористого натрия, тридцатипроцентного водного раствора азотной кислоты. Подобный результат наблюдали также для сплава Д1

- травление сопровождалось образованием на поверхности образцов темного налета. В некоторых случаях данный налет удавалось убрать обработкой поверхности дистиллированной водой или этиловым спиртом, в других случаях смыть налет было невозможно. Контраст выявленных маркировочных обозначений в этом случае почти или полностью отсутствовал. Иллюстрация данных результатов приведена на рис. 2, 3;

- при травлении происходил съем поверхностного слоя образца, приводящий к выявлению штрихов маркировочного обозначения. Поверхность образцов при этом оставалась светлой или чуть сероватого цвета, не мешающего наблюдению штрихов. Данные результаты считали оптимальными, их иллюстрация приведена на рис. 4, 5.



Рис. 2. Потемнение площадки в результате электролитического травления сплава Д1 при использовании в качестве электролита пятнадцатипроцентного раствора едкого натрия



Рис. 3. Потемнение площадки в результате электролитического травления сплава Д1 при использовании в качестве электролита смеси следующего состава: хлорное железо - 40 г; хлорная медь - 13 г; вода дистил. - 100 мл



Рис. 4. Положительный результат электролитического травления сплава Д1 при использовании в качестве электролита двадцатипроцентного водного раствора соляной кислоты

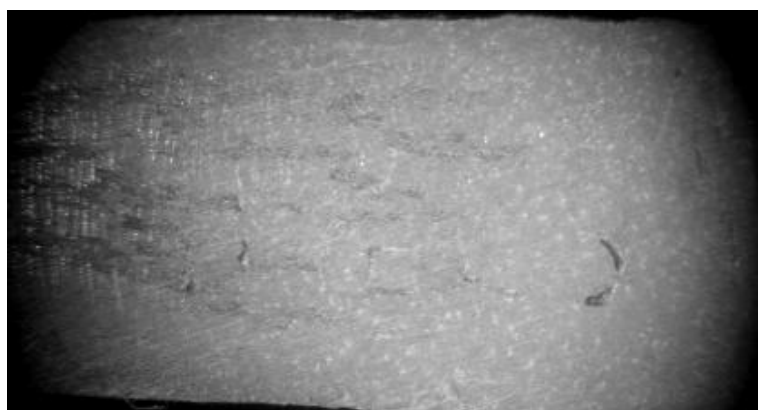


Рис. 5. Положительный результат электролитического травления сплава АД0 при использовании в качестве электролита двадцатипятипроцентного водного раствора едкого натра

Сложнее всего было определить оптимальный состав электролитов для сплава Д1, поскольку для большинства электролитов и травителей происходило образование темного налета, в том числе при использовании растворов едких щелочей КОН и NaOH. Образование темного налета, вероятно, связано с повышенным содержанием в сплаве легирующих компонентов Cu, Mg и Mn, образующих при взаимодействии с электролитом или травителем плохо растворимые соли соответствующих металлов темного цвета.

Наилучшие результаты для алюминиевого сплава Д1 были получены при использовании в качестве электролита и травителя восьми - десятипроцентного водного раствора соляной кислоты. Применение данного электролита и травителя полностью исключало образование на поверхности образца темного налета. Возможно увеличение содержания соляной кислоты до

30 %. Однако при этом процесс становится менее воспроизводимым и управляемым.

Для сплава АД0 набор электролитов и травителей, дающих положительный результат травления, оказался гораздо шире. Это понятно, поскольку в данном сплаве практически отсутствуют легирующие компоненты. Наилучшие результаты были получены при использовании в качестве электролитов и травителей растворов следующих веществ:

- водный раствор соляной кислоты с содержанием последней от 10 % до 30 %;
- пятнадцати - сорокапятипроцентный водный раствор едкой щелочи;
- раствор следующего состава:

соляная кислота -	40 мл.;
азотная кислота -	40 мл.;
вода дистил. -	150 мл.

Аналогичные результаты были получены для сплавов АЛ-4, АЛ-4-1, АЛ-5, не-

смотря на повышенное содержание кремния в данных сплавах. Последнее указывает на то, что образующиеся соли и основания кремния имеют светлый цвет и хорошо растворимы в воде.

Таким образом, в работе найдены электролиты и травители, для которых процесс электролитического и химического травления протекает оптимально. Сравнивая два используемых метода, можно сделать вывод, что оптимальным является метод электролитического травления, так как время

растворения материала в этом случае значительно уменьшается, а качество поверхности площадки, на которой проводилось электролитическое травление, не хуже, чем при химическом методе. Это же относится к результатам восстановления маркировочных обозначений на исследуемых алюминиевых сплавах. Электролитический метод травления, помимо прочего, позволяет регулировать процесс растворения материала изменением параметров (напряжения и тока) протекания процесса.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Райгородский В.М.** Экспертиза восстановления измененных и уничтоженных маркировочных обозначений / В.М. Райгородский, В.Н. Хрусталева, С.А. Ермолаев. Саратов: СЮИ МВД РФ, 1999. 72 с.

2. **Райгородский В.М.** Экспертиза по восстановлению измененных и уничтоженных маркировочных обозначений на различных материалах / В.М. Райгородский //Вестник криминалистики. 2010. Вып. 3 (35). С. 57 - 62.

3. **Поль К.Д.** Естественнонаучная криминалистика. (Опыт применения научно-технических средств при расследовании отдельных видов преступлений) / К.Д. Поль; М.: Спарк, 1985. 368 с.

4. **Райгородский В.М.** Использование электрохимических методов для восстановления измененных или уничтоженных маркировочных обозначений / В.М. Райгородский //Вопросы электротехнологии. 2014. № 1 (2). С. 52 – 57.

5. **Капитонов В.Е.** Техничко-криминалистические средства и методы розыска

автотранспортных средств / В.Е. Капитонов, В.М. Струков, А.Л. Чубченко. М.: ЭКЦ МВД России, 1997. 221 с.

6. **Кочубей А.В.** Восстановление удаленных маркировочных обозначений на металлах и сплавах / А.В. Кочубей //Криминалистическое исследование веществ, материалов и изделий. Волгоград: ВЮА МВД РФ, 2002. 325 с.

7. **Устинов С.Н.** Восстановление уничтоженных рельефных изображений на металле, полимере и дереве / С.Н. Устинов, В.М. Струков //Экспертная практика. 1989. № 27. С. 55-61.

8. **Барина Л.В.** Металлографическое травление металлов и сплавов: справ. / Л.В. Барина, Э.Л. Демина. М.: Металлургия, 1986. 256 с.

9. **Беккерт М.** Способы металлографического травления / М. Беккерт, Х. Клемм. М.: Металлургия, 1988. 400 с.

10. **Коваленко В.С.** Металлографические реактивы: справ. / В.С. Коваленко. - изд. М.: Металлургия, 1981. 122 с.

Райгородский Владимир Михайлович – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Инженерная физика» Саратовского государственного аграрного университета имени Н.И. Вавилова

Vladimir M. Raigorodskiy – Ph.D., Associate Professor, Department of Engineering Physics, N.I. Vavilov Saratov State Agrarian University

Статья поступила в редакцию 22.01.15, принята к опубликованию 16.02.15

ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ

УДК 621.314

ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ АВТОНОМНЫХ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ НА ОСНОВЕ ГЕНЕРАТОРОВ С ИЗМЕНЯЕМОЙ СКОРОСТЬЮ ВРАЩЕНИЯ ВАЛА

И.И. Артюхов, С.Ф. Степанов, Д.А. Бочкарев, Е.Т. Ербаев

FEATURES BUILD AUTONONOUS POWER SYSTEMS ON THE BASIS OF GENERATORS WITH VARIABLE SHAFT SPEED OF ROTATION

I.I. Artyukhov, S.F. Stepanov, D.A. Bochkarev, E.T. Erbaev

Рассмотрены особенности построения систем электропитания на основе генераторов с изменяемой скоростью вращения вала.

Ключевые слова: система электропитания, преобразователь частоты, качество электроэнергии

В автономных системах электропитания применяют, в основном, синхронные генераторы (СГ), которые рассчитаны на работу с постоянной скоростью n вращения вала отбора мощности. Частота f генерируемого напряжения при этом определяется формулой

$$f = \frac{np}{60}, \quad (1)$$

где p – число пар полюсов электрической машины.

Напряжение на выходе СГ при активно-индуктивной нагрузке определяется формулой

$$U_1 = \sqrt{E_0^2 - (x_1 I_a)^2}, \quad (2)$$

где E_0 – ЭДС генератора; x_1 – синхронное

The features of the construction of power supply systems based on generators with variable speed shaft are considered.

Keywords: installation of gas cooling, system control, PID controller, fuzzy logic

реактивное сопротивление якоря; I_a – ток якоря.

ЭДС генератора можно найти по формуле:

$$E_0 = C_e \Phi n, \quad (3)$$

где C_e – постоянная для каждой электрической машины величина; Φ – основной магнитный поток в воздушном зазоре, который зависит от тока нагрузки I_a и тока возбуждения I_B .

При увеличении нагрузки происходит размагничивающее действие реакции якоря, что приводит к снижению напряжения на зажимах СГ. В этом случае ток возбуждения I_B надо увеличивать. При уменьшении нагрузки происходит перенасыщение якоря, что приводит к увеличению напряжения, и ток возбуждения I_B надо уменьшать.

Принцип стабилизации выходного напряжения в существующих автономных системах электропитания на основе СГ поясняет рис. 1.

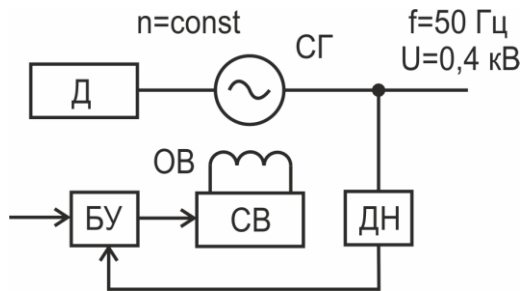


Рис. 1. Система стабилизации напряжения при фиксированной частоте вращения вала СГ

Скорость вращения вала n первичного двигателя Д поддерживается постоянной с помощью системы управления подачей топлива. Благодаря этому обеспечивается стабильность частоты f . Информация о величине напряжения U на выходе СГ с помощью датчика напряжения ДН подается в блок управления БУ, где сравнивается с опорным сигналом. На основе полученной разности сигналов блок управления БУ формирует задание для системы возбуждения СВ, которая за счет изменения тока возбуждения поддерживает напряжение U в заданных пределах.

Системы электропитания на основе СГ с фиксированной скоростью вращения вала имеют ряд недостатков. В частности, при использовании дизеля в качестве первичного двигателя фактический расход топлива при работе такой системы на переменную нагрузку оказывается значительно выше заявленной величины [1]. В газоперекачивающих агрегатах (ГПА) с генераторами собственных нужд на валу исключается вариация скорости вращения вала турбины, которая является эффективным фактором оптимизации режима работы магистрального газопровода [2].

С развитием силовой электроники появились новые возможности совершенствования систем генерирования электроэнергии. Основным моментом является работа генераторов с переменной скоростью вращения вала, причем могут быть приме-

нены как синхронные, так и асинхронные машины.

Работа генератора с изменяемой скоростью вращения вала может быть обусловлена режимом источника механической энергии. В частности, в таком режиме работает генератор ветроэнергетической установки. При этом изменение скорости вращения вала является случайным процессом. В дизель-генераторе скорость вращения вала генератора может устанавливаться принудительно, в соответствии с заданными настройками регулятора подачи топлива. Изменение скорости вращения вала СГ может происходить также вследствие целенаправленного изменения скорости вращения вала газовой турбины, осуществляющей привод нагнетателя в ГПА, для изменения режима транспорта газа.

Функции обеспечения параметров вырабатываемой электроэнергии (действующего значения, частоты и формы кривой генерируемого напряжения) в соответствии с требованиями ГОСТ 32144-2013 «Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения» при переменных, в общем случае, скорости вращения вала генератора, а также величине и характере нагрузки переносятся на преобразовательные устройства.

Возможны различные варианты построения автономных систем электропитания на базе генераторов с изменяемой скоростью вращения вала. В частности, они могут быть выполнены на основе синхронной или асинхронной машины с короткозамкнутым ротором и преобразователя частоты (ПЧ) в статорной цепи [3,4]. Кроме того, возможен вариант на основе асинхронной машины с фазным ротором и ПЧ в роторной цепи (генератор по схеме машины двойного питания) [5,6].

Если первичным источником электрической энергии является синхронный генератор (СГ), оснащенный системой возбуждения, то схема автономной системы электропитания при вариациях скорости вращения вала СГ будет иметь вид, показанный на рис. 2.

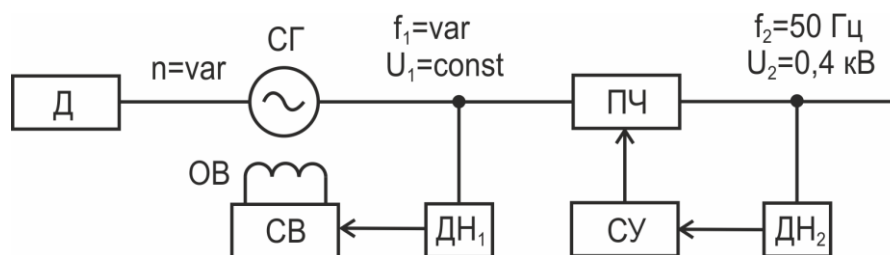


Рис. 2. Автономная система электропитания на основе СГ с электромагнитным возбуждением при изменяемой скорости вращения вала

Величина напряжения U_1 стабилизируется за счет изменения тока возбуждения. Для этого используется информация о напряжении U_1 , полученная с помощью датчика напряжения $ДН_1$. Электрическая энергия с параметрами U_1, f_1 с помощью ПЧ преобразуется в электрическую энергию с параметрами U_2, f_2 , которые поддерживаются в заданных пределах системой управления СУ на основании информации с

датчика напряжения $ДН_2$ за счет широтно-импульсной модуляции (ШИМ) инвертора напряжения.

Первичным источником энергии в автономной системе электропитания может служить СГ с постоянными магнитами. При этом номинальная частота СГ может быть выше промышленной частоты 50 Гц, что позволяет получить существенные преимущества в массе и габаритах. Один из вариантов построения такой системы показан на рис. 3.

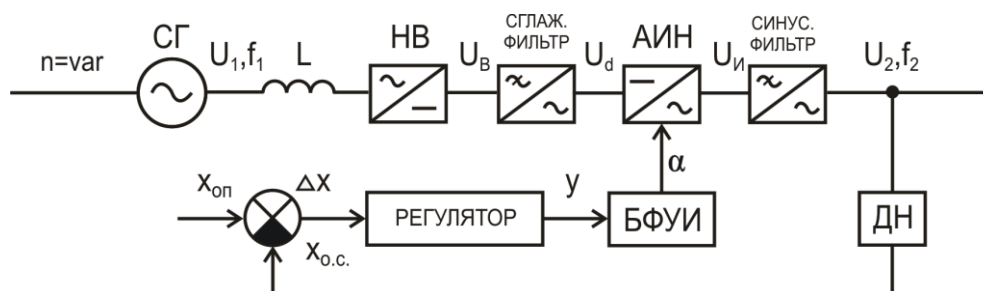


Рис. 3. Автономная система электропитания на основе СГ с постоянными магнитами при изменяемой скорости вращения вала

Выходное напряжение U_1 генератора через сетевой дроссель L поступает на вход неуправляемого выпрямителя НВ. Выпрямленное напряжение U_B через сглаживающий фильтр подается на автономный инвертор напряжения АИН, на выходе которого установлен синусоидальный фильтр. Сетевой дроссель L уменьшает негативное влияние НВ на синхронную машину за счет снижения уровня высших гармоник в токе якоря. Сглаживающий фильтр уменьшает пульсации напряжения U_d на входе АИН, синусоидальный

фильтр преобразует ступенчатое напряжение U_{II} на выходе АИН в напряжение квазисинусоидальной формы.

Каждый из силовых элементов схемы на рис. 3 обладает сопротивлением, которое зависит от частоты протекающего через него тока. На этих элементах создаются падения напряжений, в результате чего увеличивается зависимость выходного напряжения U_2 от тока нагрузки. Эта ситуация усложняет работу системы стабилизации напряжения, представленной на рис. 3.

С точки зрения теории автоматического управления задающим воздействием в рассматриваемой системе является опорный сигнал $X_{оп}$, который пропорционален требуемому значению напряжения U_2 на выходе системы электроснабжения. Возмущающими воздействиями являются скорость вращения n приводного вала СГ и ток нагрузки. Управляющее воздействие – параметр α , от которого зависит процесс формирования широтно-импульсной модуляции (ШИМ).

Информация о фактической величине напряжения U_2 от датчика напряжения ДН в виде сигнала обратной связи $X_{о.с.}$ сравнивается с величиной опорного сигнала $X_{оп}$. На основании разности сигналов $\Delta X = X_{оп} - X_{о.с.}$ регулятор формирует управляющий сигнал, от которого зависит параметр α . Блок формирования управляющих импульсов БФУИ задает частоту f_2 выходного напряжения АИН, а также его величину за счет ШИМ.

Предположим, что скорость n вращения вала имела номинальную величину. При этом система находилась в равновесии, при котором выходное напряжение U_2 также было равно номинальному значению. Затем произошло уменьшение скорости вращения вала на величину Δn . В результате величина напряжения U_1 и его частота f_1 уменьшились соответствующим образом.

В результате уменьшения величины напряжения U_1 уменьшаются напряжения U_B и U_D на выходах выпрямителя и сглаживающего фильтра соответственно. Предположим, что на рассматриваемый момент времени параметр α имел какое-то значение, сформированное регулятором. Поэтому вследствие уменьшения напряжения U_D , которое является входным напряжением для АИН, амплитуда напряжения на выходе последнего вначале также уменьшается, что приводит к уменьшению действующего значения напряжения U_H и сигнала обратной связи $X_{о.с.}$.

Разность сигналов $\Delta X = X_{оп} - X_{о.с.}$, получившая положительное приращение, воздействует на регулятор, который за счет соответствующего изменения сигнала управления увеличивает значение параметра α . Вследствие этого возрастает величина напряжения U_2 до заданного значения.

Процесс стабилизации напряжения может быть осуществлен до тех пор, пока параметр α не достигнет предельного значения, равного 1. После этого уменьшение скорости n вращения вала будет сопровождаться соответствующим уменьшением выходного напряжения.

При увеличении скорости n вращения вала система будет отрабатывать соответствующие увеличения напряжений U_1 , U_B , U_D за счет уменьшения параметра α , сохраняя величину напряжения U_2 на заданном уровне.

Для исследования характеристик автономной системы электроснабжения на основе генератора с изменяемой частотой вращения вала разработана математическая модель в среде MATLAB с пакетом расширения Simulink.

На рис. 4 представлены результаты численного эксперимента, проведенного на этой модели. Номинальная мощность синхронной машины была принята равной 250 кВт. Напряжение холостого хода составляло 400 В.

В процессе проведения численного эксперимента для заданной скорости вращения вала производилось изменение мощности нагрузки от 1 до 250 кВт при $\cos \varphi = 0,8$.

Графики на рисунке 4 построены при фиксированном значении параметра ШИМ $\alpha = 1$. Скорость n вращения приводного вала указана в относительных единицах.

Из графиков видно, что при фиксированных значениях параметра ШИМ изменение нагрузки приводит к уменьшению напряжения, причем в зависимости от значения скорости вращения вала падение напряжения составляет 6,7 – 10,7 % от напряжения холостого хода.

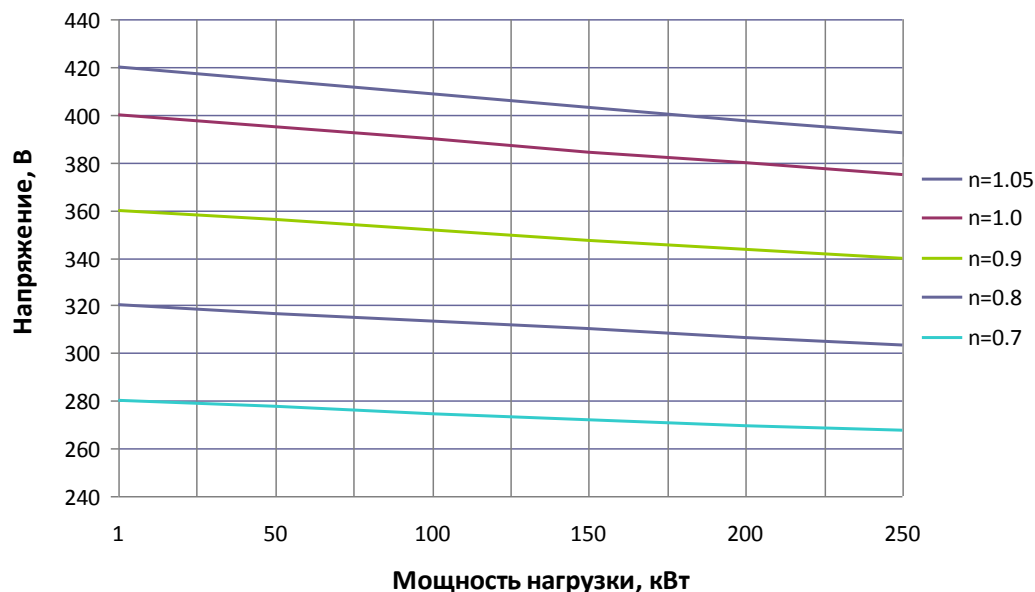


Рис. 4. Напряжение на нагрузке для различных скоростей вращения привода

В соответствии с требованиями ГОСТ 32144-2013 отклонения напряжения от номинального значения не должны превышать $\pm 10\%$, поэтому действующее значение напряжения на нагрузке не должно быть ниже $380 \cdot 0,9 = 342$ В.

На основании численного эксперимента на модели получено, что при номинальной нагрузке рассматриваемой системы электроснабжения уменьшение частоты вращения вала до 0,7 номинального значения приводит к снижению выходного напряжения до 250 В. Разница между этим значением напряжения и нижней границей нормального допустимого значения 342 В должна быть скомпенсирована одним из рассматриваемых ниже технических средств.

Вариант 1. На выходе системы электроснабжения устанавливается трансформатор, повышающий напряжение как минимум в 1,37 раза. Полученная таким образом схема показана на рис. 5.

Для поддержания напряжения на нагрузке на уровне $380 \text{ В} \pm 10\%$ напряжение на выходе синусоидального фильтра U_ϕ при изменении скорости вращения вала в заданном диапазоне будет составлять $277 \text{ В} \pm 10\%$. Стабилизация напряжения на этом уровне достигается за счет изменения параметра α от 1 (при скорости вращения вала, составляющей 70 % от номинального значения) до $\alpha_{\text{мин}}$ (при скорости вращения вала, превышающей номинальное значение на 5 %).

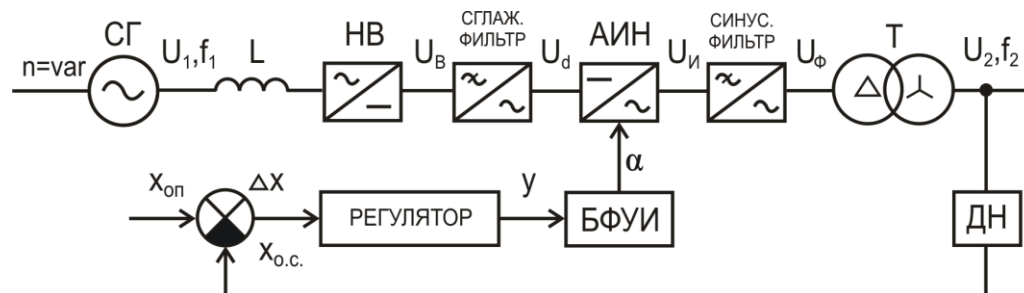


Рис. 5. Схема с выходным трансформатором

Вариант 2. После СГ устанавливается повышающий трансформатор. Схема этого варианта показана на рис. 6.

Для поддержания напряжения на нагрузке на уровне $380 \text{ В} \pm 10 \%$ в заданном

диапазоне изменения скорости вращения вала СГ напряжение U_T на вторичной обмотке трансформатора T при номинальной скорости вращения вала должно быть не менее 550 В.

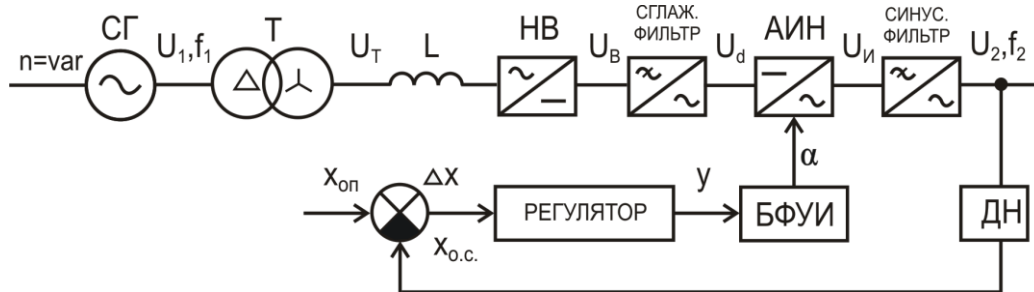


Рис. 6. Схема с входным трансформатором

Если сравнивать варианты схем на рис. 5 и 6, то второй вариант будет иметь определенные преимущества. Трансформатор в схеме на рис. 6 работает на повышенной частоте, вследствие чего его масса и габариты меньше, чем у трансформатора в схеме на рис. 5.

Вариант 3. СГ на постоянных магнитах должен иметь такое напряжение холостого хода при скорости вращения вала, составляющей 70 % от номинального значения, чтобы при номинальной нагрузке вентильного генератора обеспечивалось поддержание напряжения на уровне $380 \text{ В} \pm 10 \%$.

Согласно расчетам величина выходного напряжения синхронного генератора на постоянных магнитах при номинальной скорости вращения вала должна быть не менее 576 В.

Если ориентироваться на отечественный стандарт ГОСТ 21128-83, то номинальное напряжение СГ, используемого в схеме рис. 2, для поддержания напряжения на нагрузке на уровне $380 \text{ В} \pm 10 \%$ должно иметь величину 690 В.

Если сравнивать все три варианта, то последний вариант по массогабаритным показателям будет предпочтительным.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Лукутин Б.В.** Способы снижения расхода топлива дизельных электростанций / Б.В. Лукутин, Е.Б. Шандарова // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 2; URL [www.science-education.ru / 108-8615](http://www.science-education.ru/108-8615).
2. **Артюхов И.И.** Повышение эффективности газоперекачивающего агрегата, оснащенного генератором собственных нужд / И.И. Артюхов, Д.А. Бочкарев, А.А. Тримбач // Проблемы энерго- и ресурсосбережения: сб. науч. тр. Саратов: СГТУ, 2014. С. 104 – 109.
3. **Артюхов И.И.** Автономная система электроснабжения на основе генератора с

- изменяемой частотой вращения вала / И.И. Артюхов, Д.А. Бочкарев // Научное обозрение. 2014. № 3. С. 178 – 183.
4. **Артюхов И.И.** Стабилизация параметров электроэнергии на выходе машинно-вентильного генератора / И.И. Артюхов, Д.А. Бочкарев // Проблемы управления, обработки и передачи информации (АТМ-2013): сб. тр. III Междунар. науч. конф. Саратов: Издательский дом «Райт-Экспо», 2013. Т.1. С. 11 – 15.
5. **Хватов О.С.** Дизель-генераторная электростанция с переменной частотой вращения вала / О.С. Хватов, А.Б. Дарьенков, И.М. Тарасов // Вестник Ивановско-

го государственного энергетического университета. 2010. Вып. 2. С. 53 – 56.

6. Высокоэффективная дизель-генераторная электростанция переменной частоты

вращения на основе машины двойного питания / И.А. Тарпанов, О.С. Хватов, А.Б. Дарьенков и др. // Приводная техника. 2010. № 5. С. 14 – 19.

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

Степанов Сергей Федорович – доктор технических наук, профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Бочкарев Дмитрий Александрович – аспирант кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Ербаев Ербол Тулегенович – аспирант кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.; старший преподаватель кафедры «Энергетика» Западно-Казахстанского аграрно-технического университета им. Жангир хана

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

Sergey F. Stepanov – Dr. Sc., Professor, Department of Power Supply for Industrial Facilities, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Dmitry A. Bochkarev – Postgraduate, Department of Power Supply for Industrial Facilities, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Erbol T. Erbaev – Postgraduate, Department of Power Supply for Industrial Facilities, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov; Senior Lecturer, Department of Power Engineering at Zhangir-Khan Western Kazakhstan Agrarian-Technical University

Статья поступила в редакцию 05.02.15, принята к опубликованию 16.02.15

К СВЕДЕНИЮ ЧИТАТЕЛЕЙ!

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

ФАКТОРНЫЙ АНАЛИЗ ЭНЕРГОЗАТРАТ В ПРИГОРОДНОМ ДВИЖЕНИИ

С.И. Баташов, И.А. Меншиков, А.И. Ручкин

THE FACTOR ANALYSIS OF ENERGY CONSUMPTION IN SUBURBAN TRAFFIC

S.I. Batashov, I.A. Menshikov, A.I. Ruchkin

Исследовано влияние нормообразующих факторов на расход электроэнергии при движении моторвагонного подвижного состава. Установлено, что квалификация машиниста и климатические условия влияют на величину экономии электроэнергии. Вместе с тем, значимого влияния на расход электроэнергии эти факторы не оказывают.

Ключевые слова: удельный расход электроэнергии, экономия электроэнергии, нормирование энергозатрат, квалификация машиниста

В «Энергетической стратегии РЖД» определены направления работ по снижению энергозатрат в целом и на тягу поездов в частности. Одно из направлений – применение средств автоматизации ведения поезда. Однако известно, что лучшие машинисты в этом отношении превосходят систему автоведения и достигают экономии электроэнергии до 7% [1]. Это объясняется прежде всего тем, что опытный машинист как бы чувствует поезд. Не зная, какой должна быть энергооптимальная скорость, опытный машинист выбирает такой режим, при котором расход электроэнергии будет минимальным. Кроме того, знание поездной обстановки на участке и состояние пути также позволяет ему избежать лишних затрат энергии.

В процессе движения поезда на расход электроэнергии влияют различные факторы. К таким факторам относятся:

The paper presents the research into the influence of standard factors on power consumption when driving multiple units. It was found that the qualification of the driver and climatic conditions affect the amount of energy savings. However, the given factors do not have any significant effect on the power consumption.

Keywords: specific energy consumption, energy saving, energy rationing, qualification driver

- масса поезда;
- средняя нагрузка на ось вагонов в составе поезда;
- среднетехническая скорость движения;
- количество остановок на участке и др.

Анализ эксплуатационных данных показывает, что в наибольшей степени удельный расход электроэнергии зависит от массы поезда (в пригородном движении от загрузки вагонов) и нагрузки на ось вагонов в составе поезда. Все остальные факторы, влияющие на энергозатраты, считают второстепенными или дополнительными. Опираясь на нормообразующие факторы, производится нормирование расхода электроэнергии, что в конечном итоге определяет экономию или перерасход электроэнергии каждым машинистом за отдельную поездку.

Для установления зависимости экономии/перерасхода электроэнергии от различных параметров (факторов) был выполнен корреляционный анализ. Для этого рассчитан парный коэффициент корреляции первого порядка [2]

$$r_{xy} = \frac{\mu_{xy}}{\sigma_x \sigma_y}, \quad (1)$$

где σ_x, σ_y – среднее квадратическое отклонение величин X и Y соответственно; μ_{xy} – корреляционный момент величин X и Y , определяемый как

$$\mu_{xy} = \int_a^b \int_a^b [x - M(X)][y - M(Y)] f(x, y) dx dy, \quad (2)$$

где x и y – значения величин X и Y соответственно; $M(X)$ и $M(Y)$ – математические ожидания; $f(x, y)$ – плотность распределения.

По причине малого объема выборки, с помощью t -критерия проверена его значимость

$$t = \frac{\bar{x} - \bar{y}}{\sqrt{\frac{S^2}{n_1} + \frac{S^2}{n_2}}}, \quad (3)$$

где $\bar{x}$ и $\bar{y}$ – средние значения рассматриваемых совокупностей; n_1 и n_2 – объемы выборки совокупностей; S^2 – выборочная дисперсия, определяемая как

$$S^2 = \frac{1}{n_1 + n_2 - 2} \left[\sum_{i=1}^{n_1} (x_i - \bar{x})^2 + \sum_{i=1}^{n_2} (y_i - \bar{y})^2 \right], \quad (4)$$

где x_i, y_i – статистические значения рассматриваемых совокупностей.

Вычисленный t -критерий сравнивается с его критическим значением, определяемым по таблице критических значений. Если наблюдаемое значение меньше критического двустороннего, то гипотеза принимается. В противном случае гипотеза отвергается.

Были рассчитаны коэффициенты корреляции между экономией/перерасходом электроэнергии за поездку и отдельными параметрами, а именно погодными условиями, определяемыми температурой окружающего воздуха, и классом машиниста.

В качестве примера были рассмотрены маршруты машинистов, обслуживающих пригородные поезда на участке Брянск-1 – Суземка. Для определения влияния погодных условий (табл. 1, рис. 1) и класса машиниста (табл. 2, рис. 2) на расход электроэнергии был выполнен анализ работы одной из колонн за I квартал 2014 года.

Таблица 1

Результаты корреляционного анализа между экономией/перерасходом электроэнергии и температурой окружающего воздуха

Направление	Брянск-1 – Суземка	Суземка – Брянск-1
Коэффициент корреляции	0,08	-0,27
Т набл.	0,56	1,36
Т крит.	14,37	
Коррелированы?	Нет	Нет

Как видно из табл. 1, коэффициент корреляции между экономией / перерасходом электроэнергии и температурой окружающего воздуха может иметь как отрицательный, так и положительный

знак. При этом во всех случаях значимого влияния не наблюдается. Это свидетельствует о том, что нет прямой взаимосвязи между двумя этими параметрами.

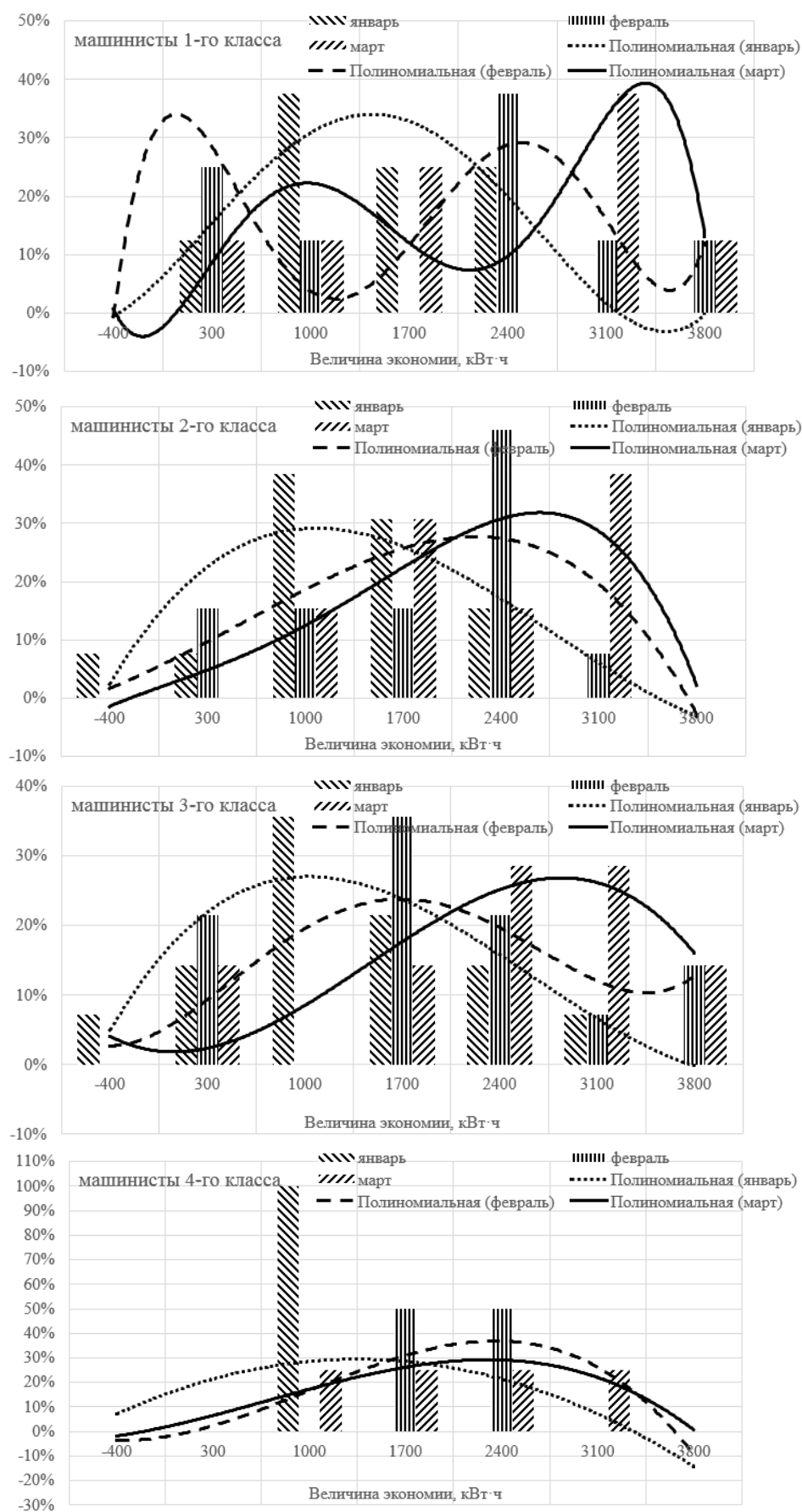


Рис. 1. Распределение экономии электроэнергии в зависимости от времени года

Однако анализ данных рис. 1 показывает, что с повышением температуры окружающего воздуха наблюдается некоторое смещение максимума тренда величин в сторону больших значений, то есть можно говорить о экономии электроэнергии. По

всей видимости это объясняется повышением тяговых свойств подвижного состава, снижением вероятности боксования колесных пар и меньшим количеством срабатываний аппаратов защиты. Но данный факт требует дополнительных исследований.

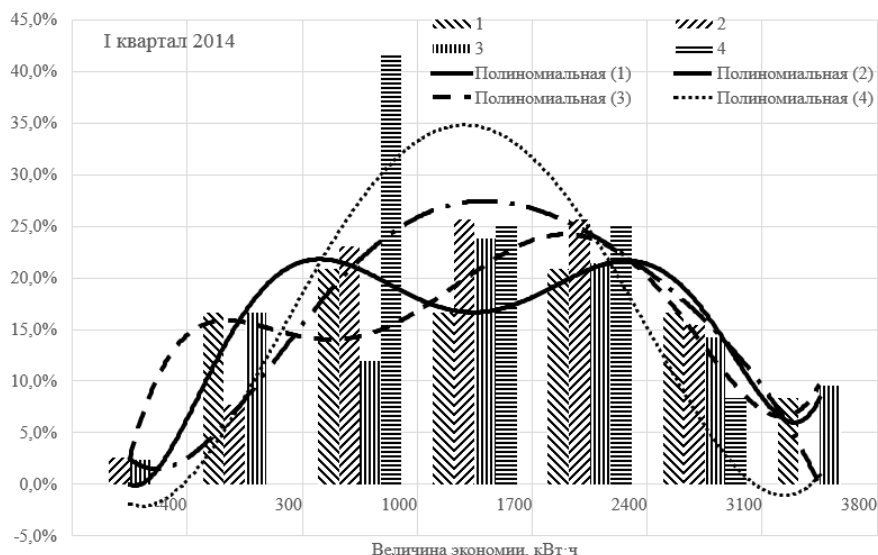


Рис. 2. Распределение экономии электроэнергии в зависимости от класса машиниста

Из рис. 2 видно, что класс машиниста также приводит к смещению пиков полиномиальных трендов в сторону больших значений, что свидетельствует о том, что повышение класса машиниста положительно влияет на величину экономии электроэнергии.

В табл. 2 приведены результаты расчета коэффициента корреляции (1) между классом квалификации машинистов и экономией/перерасходом электроэнергии за поездку, и по причине малого объема выборки с помощью t -критерия (3) проверена его значимость.

Таблица 2

Результаты корреляционного анализа между классом квалификации машинистов и экономией/перерасходом электроэнергии на участке Брянск-1 – Суземка

Тяговое плечо	Брянск-1 – Суземка	Суземка – Брянск-1
Коэффициент корреляции	0,12	0,25
$ T_{\text{набл.}} $	1,28	1,56
$T_{\text{крит.}}$	5,32	
Коррелированы?	Нет	Нет

Как видно из табл. 2, наблюдаемое значение t – критерия в обоих случаях менее критического. И хотя положительный знак коэффициента корреляции говорит о том, что машинисты более высокого класса квалификации расходуют на тягу меньшее количество электроэнергии, значимого

влияния на расход электроэнергии класс машиниста не оказывает. Данный результат подтверждается в работе [3].

Общее же количество бригад, работающих с экономией электроэнергии, значительно меняется в течение года и составляет от 20 до 100 % от списочного количества (рис. 3).

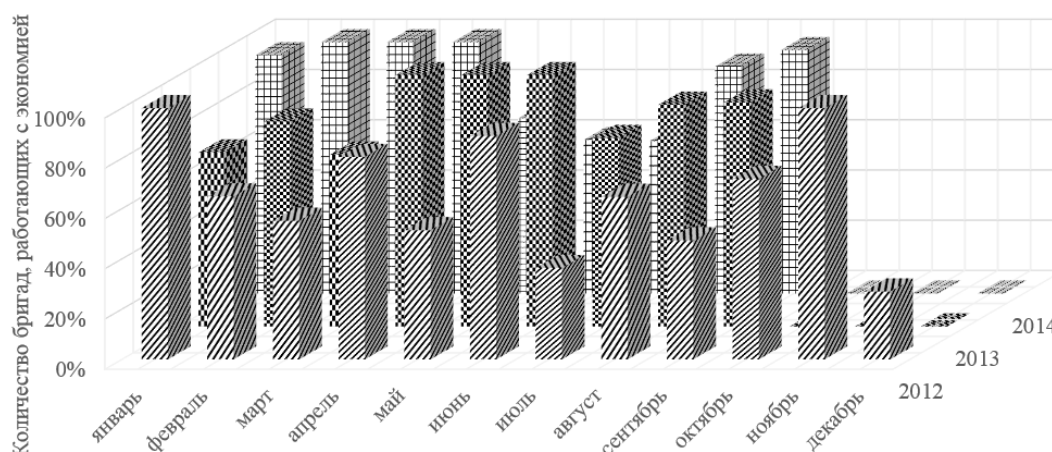


Рис. 3. Изменение количества бригад, работающих с экономией электроэнергии, в течение года

Из приведенных графиков видно, что энергозатраты на тягу, а, следовательно, и возможность экономии энергии, возрастают в одни месяцы и уменьшаются в другие. На основании этого можно сделать вывод, что расход электроэнергии зависит от других факторов, напрямую не связанных с температурой окружающего воздуха, то есть от таких климатических условий как осадки, влажность воздуха, ветер и т.д. Так, например, в сентябре и октябре месяцах в ходе осенних дождей, а также в связи с опаданием листвы на путь сцепление ухудшается, что приводит к снижению реализуемой локомотивом силы тяги и, как следствие, расход электроэнергии увеличивается. В июле месяце при засушливой погоде сцепление улучшается, улучшается реализация силы тяги, и расход электроэнергии уменьшается. Но данный факт требует дополнительных исследований.

Как показывают приведенные данные, удельный расход электроэнергии может увеличиваться не только в зимнее время, но и в течение всего года, причем в достаточно широком диапазоне, и может существенно отличаться в соседние месяцы одного времени года.

Таким образом, рассматривая машиниста как элемент системы управления электроподвижным составом, можно сделать следующий вывод: энергоэффективность управления поездом повышается при повышении квалификации машиниста. Следовательно, для повышения показателей энергосбережения особенно востребованными являются организационно-технические мероприятия, в частности повышение квалификации локомотивных бригад, не требующие значительных материальных затрат, но дающие ощутимый экономический эффект.

ЛИТЕРАТУРА

1. Система автоведения работает успешно /А.В. Коротких и др. // Локомотив. 2006. №2. С. 33-35.
2. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика / В.Е. Гмур-

ман.— М.: Высшая школа, 2004. 479 с.

3. Кучумов В.А. Учет электроэнергии на тягу поездов / В.А. Кучумов, Н. Ребрик // Локомотив. 1997. №8. С. 28-29.

Баташов Сергей Иванович кандидат технических наук, доцент кафедры «Тяговый подвижной состав» Московского государственного университета путей сообщения (МИИТ)

Sergey I. Batashov - Ph.D., Associate Professor, Department of Traction Rolling Stock, Moscow State University of Railway Engineering

Меншиков Игорь Александрович – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Электроснабжения промышленных предприятий» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю. А.

Ручкин Александр Иванович – студент кафедры «Тяговый подвижной состав» Московского государственного университета путей сообщения (МИИТ); машинист электропоезда мотор-вагонного депо Брянск-1

Igor A. Menshikov – Ph.D., Head: Department of Power Supply for Industrial Facilities, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Aleksandre I. Ruchkin – Student, Department of Traction Rolling Stock, Moscow State University of Railway Engineering; Electric train driver at Railcar Depot Bryansk-1

Статья поступила в редакцию 14.02.15, принята к опубликованию 15.03.15



ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА

УДК 681.171.5

ОЦЕНКА РАБОТОСПОСОБНОСТИ ТРОЛЛЕЙБУСНОГО ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ СЕРИИ ДК – 211БМ С ПОМОЩЬЮ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

И.А. Менщиков

PERFORMANCE EVALUATION OF TROLLEYBUS TRACTION MOTOR SERIES DC - 211BM USING SIMULATION

I.A. Menshikov

Приведены результаты исследования проблемы качества диагностирования троллейбусных тяговых электрических машин городского электротранспорта с повышенным отработанным ресурсом. Проблемы оценки работоспособности тяговых электрических машин городского электротранспорта с повышенным отработанным ресурсом предлагается решать с помощью имитационного моделирования в пакете MATLAB & SIMULINK. Имитационное моделирование базируются на использовании математических моделей электрических машин постоянного тока и выбранных наиболее информативных контролируемых параметров функционирования тягового электродвигателя.

Ключевые слова: городской электрический транспорт, электродвигатель, коллектор, коммутация, моделирование

Для троллейбусных тяговых электрических машин городского электротранспорта серии ДК – 211БМ (ЭМ) с повышенным отработанным ресурсом большое значение имеет автоматизированный контроль технического состояния изоляции обмоток, качество коммутации тока в цепи якоря и состояние подшипникового узла. Структурным признаком наступления фа-

The results of the research demonstrate the quality problems with diagnostics of trolleybus traction electric machines referred to municipal electric vehicles having increased waste resources. The problems with evaluation performance characteristics of the traction electric machines referred to municipal electric vehicles characterized for increased waste resources can be solved using the simulation modeling together with MATLAB & SIMULINK. The simulation modeling is based on the mathematical models of electric DC machines and most informational controlled operation parameters of traction motors.

Keywords: urban electric transport, electric motor, collector, commutation, modeling

зы критического износа и перехода ЭМ в состояние скрытого отказа служит образование сквозных трещин в межвитковой изоляционной композиции, замедленная или ускоренная коммутация цепи якоря. Дефекты несквозного характера (отслоения, экструзия) практически не снижают пробивного напряжения изоляции и не имеют тенденции к быстрому развитию.

ЭМ с такими повреждениями может безаварийно работать длительное время, тогда как автоматизированный контроль и техническая диагностика с помощью контролируемых параметров (тока разрыва цепи якоря I_p , угловой частоты вращения ротора ЭМ ω_a , вида корней характеристического уравнения переходного процесса пуска ЭМ, электромагнитного момента на валу ротора $M_{эм}$), чувствительных к любым неоднородностям изоляции и качеству коммутации, позволяет определить состояние обмотки возбуждения, якоря и щеточно-коллекторного узла и необходимость проведения профилактического обслуживания и ремонта ЭМ.

Таким образом, основным условием автоматизации контроля следует считать избирательную чувствительность выбранных параметров к сквозным повреждениям изоляционного слоя, ответственным за элек-

трический пробой и качество коммутации коллекторно-щеточного узла (КЩУ).

Установлено, что при ухудшении свойств изоляции якорных обмоток ЭМ необходимо анализировать электромагнитные явления и учитывать активные сопротивления цепей и индуктивность. При автоматизированном контроле активного сопротивления якорных обмоток необходимо учитывать увеличения эквивалентного сопротивления за счет коммутационных явлений, а также падения напряжения в щеточном контакте.

На основе проведенного анализа предложена концепция комплексного диагностического обслуживания ЭМ в виде единой системы методов и средств, необходимых и достаточных для обеспечения эксплуатационной надежности двигателей. Блок-схема методов и средств автоматизации контроля электромеханических систем показана на рис. 1.

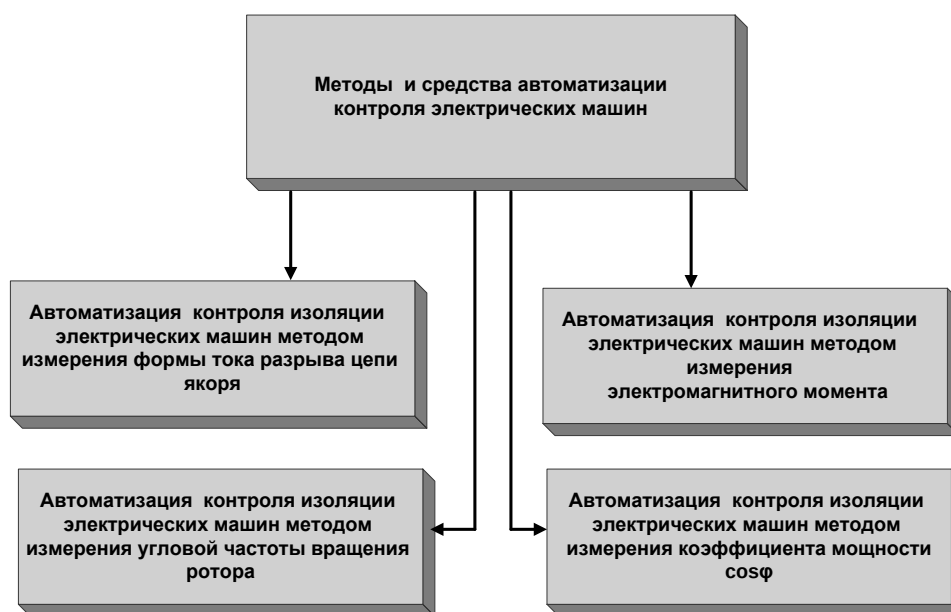


Рис. 1. Блок-схема методов и средств автоматизации контроля электрических машин

Для автоматизации контроля изоляции ЭМ разработана система тестовой диагностики, показанная на рис. 2. Данная система представляет собой стохастическую динамическую систему, в которой объект ЭМ преобразует входные зондирующие сигналы $G(t)$ в наблюдаемые $x(t)$ при помощи системного оператора $A(I_b, U_a, M_c)$. В ка-

честве тест – сигнала используется особым образом подаваемое на обмотки ЭМ сетевое напряжение, переменный статический механический момент нагрузки на валу ротора и ток в обмотке возбуждения. В качестве отклика $y(t)$ – высокочастотные колебания амплитуды и частоты тока разрыва цепи якоря.

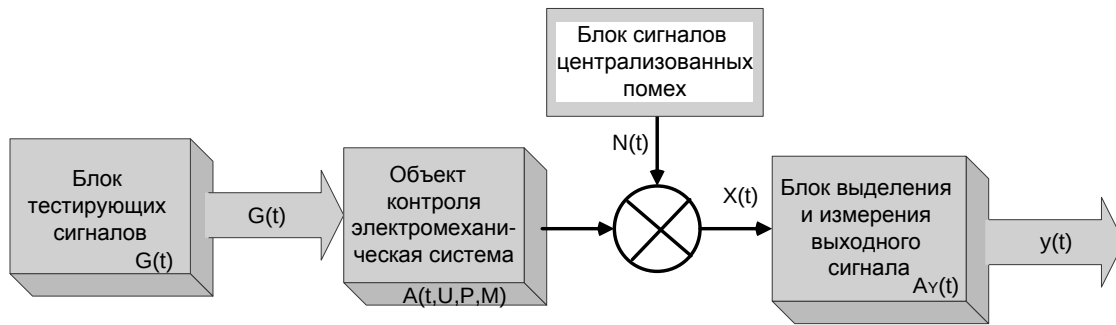


Рис. 2. Блок-схема тестовой диагностики электромеханической системы

Общий закон преобразования системы автоматизированного контроля

$$x(t) = A(U_a, M_c, I_B) \cdot G(t) + N(t). \quad (1)$$

Оператор $A(U_a, M_c, I_B)$ является функцией случайных параметров (напряжения сети U , статический механический момент нагрузки M_c , ток в обмотке возбуждения), отражающих структурные изменения в контролируемом объекте ЭМ (сквозные дефекты изоляции обмоток, короткие замыкания на корпус (землю), замедленная или ускоренная коммутация цепи якоря и т.д.). После преобразования в наблюдаемом сигнале $x(t)$ в смеси с помехами канала измерения N_j присутствует полезный информационный контролируемый сигнал $y(t)$, для выделения которого и принятия решения служит оператор $A_\gamma(t)$.

С информационной точки зрения для автоматизации контроля выходного параметра $y(t)$ необходимо выделить полезный сигнал $A_\gamma(t)$ из серии сигналов при наличии помехи измерительному каналу $N(t)$ и при наличии только полезного информационного сигнала $y(t)$.

Наиболее удобным показателем выделения информативного контролирующего случайного сигнала является средний квадрат ошибки, являющийся частным случаем среднего риска.

Наблюдаемый сигнал на входе блока выделения и измерения при центрировании

$$x^0(t) = v^0 + N^0(t), \quad (2)$$

где v^0 - центрированный контролируемый сигнал (ток разрыва цепи якоря I_p ; $N^0(t)$ - центрированный сигнал помехи.

С целью детального изучения влияния внешних возмущений на работоспособность ЭМ предлагается методика имитационного моделирования на основе применения современных компьютерных технологий, реализуемых в среде MATLAB & SIMULINK.

Уравнения электромагнитных и электромеханических процессов в двигателе постоянного тока с независимым возбуждением имеют вид:

$$\begin{cases} u_a = r_a \left(T_a \frac{di_a}{dt} + i_a \right) + e_a, \\ J \frac{d\omega}{dt} = M - M_a, \\ \omega_m = \frac{d\theta_m}{dt}, \\ e_a = K_E \omega_m, M = K_M i_a. \end{cases} \quad (3)$$

где u_a , i_a , e_a - напряжение, ток, противо ЭДС якоря; $T_a = \frac{L_a}{r_a}$ - электромагнитная постоянная времени якоря; $M_{ЭМ}$, M_c , ω_a , θ_a - электромагнитный момент, момент нагрузки, механическая угловая скорость и механический угол поворота вала; J - момент инерции ротора; r_a - активное сопротивление цепи якоря; параметры K_E , K_M являются конструктивными постоянными.

Номинальный момент ЭМ в Н·м, номинальный ток возбуждения в А, кон-

структивные постоянные и индуктивность якоря рассчитываются из уравнений:

$$\begin{cases} M_H = \frac{P_H}{\omega_H} = \frac{30P_H}{\pi \cdot n_H}, \\ I_B = \frac{U_B}{r_B}, K_M = \frac{M_H}{I_a}, \\ K_E = \frac{30 \cdot (U_a - r_a \cdot I_a)}{\pi \cdot n_H}, L_a = \frac{30 \cdot U_a \cdot C_x}{\pi \cdot n_H \cdot I_a}, \end{cases} \quad (4)$$

где $C_x = 0,3-0,4$ - эмпирический коэффициент.

Передаточные функции ЭМ по управляющему и возмущающему воздействиям представлены выражением:

$$W(s) = \frac{\omega_m(s)}{U_a(s)} = \frac{1/K_E}{\frac{T_a}{K_1 K_2 K_E} \cdot p^2 + \frac{1}{K_1 K_2 K_E} \cdot p + 1}. \quad (5)$$

$$W'(s) = \frac{\omega_m(s)}{U_a(s)} = -\frac{1/K_E}{\frac{T_a}{K_1 K_2 K_E} \cdot s^2 + \frac{1}{K_1 K_2 K_E} \cdot s + 1}. \quad (6)$$

В выражениях (5) и (6) введены следующие обозначения:

$$K_1 = \frac{1}{r_a}, \quad K_2 = \frac{K_M}{j}. \quad (7)$$

Корни характеристического уравнения определяются выражением

$$P_{1,2} = -\frac{1}{2T_a} \pm \frac{1}{2T_a} \sqrt{1 - 4T_a K_1 K_2 K_E}. \quad (8)$$

В зависимости от значения параметров T_a, K_1, K_2, K_E корни характеристического уравнения могут быть либо вещественными, либо комплексно-сопряженными. При выполнении условия $4T_a K_1 K_2 K_E \leq 1$ корни характеристического уравнения являются вещественными. Передаточную функцию ЭМ по управляющему воздействию можно представить двумя последовательно включенными аperiodическими звеньями первого порядка с постоянными времени T_1, T_2 и коэффициентом передачи $\frac{1}{K_E}$

$$W(s) = \frac{x(s)}{u_a(s)} = \frac{1/K_E}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)}, \quad (9)$$

где $T_1 = -\frac{1}{s_1}, T_2 = \frac{1}{s_2}$.

В качестве примера рассмотрим режимы работы тягового электродвигателя постоянного тока ДК-211БМ мощностью 170 кВт. Параметры двигателя, входящие в уравнения (3), также как и в первом примере, рассчитываются на основе паспортных данных, помещенных в справочных материалах и приведены в табл. 1.

Таблица 1

Паспортные данные тягового электродвигателя серии ДК-211БМ

Рн	U _a =U _B	n _H	I _a	r _a	r _B	J	M _H
кВт	В	об/мин	А	Ом	Ом	кгм ²	Н·м
170	550	1520	300	1,833	400	1,36	1068

Для оценки работоспособности двигателя ДК-211БМ по виду корней характеристического уравнения переходного процесса пуска с помощью математического моделирования получены расчетные дан-

ные для проверки теоретических расчетов по формулам (4) – (9), приведены в табл. 2. Имитационная модель тягового электродвигателя ДК-211БМ представлена на рис. 3.

Таблица 2

Расчетные данные тягового электродвигателя серии ДК – 211БМ

K ₁	K ₂	K _M	K _E	T _a	T ₁	T ₂	S ₁	S ₂
1/Ом	1/Амс ²	Н·м/А	В·с	с	с	с	-	-
0,546	0,434	3,56	6,2 · 10 ⁻⁴	2,51 · 10 ⁻³	2,513 · 10 ⁻³	6,72 · 10 ³	397,86	1,144 · 10 ⁻⁴

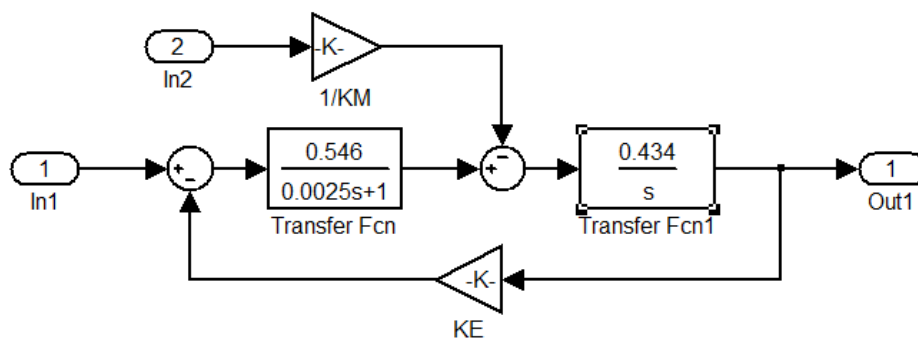


Рис. 3. Имитационная модель тягового электродвигателя ДК-211БМ

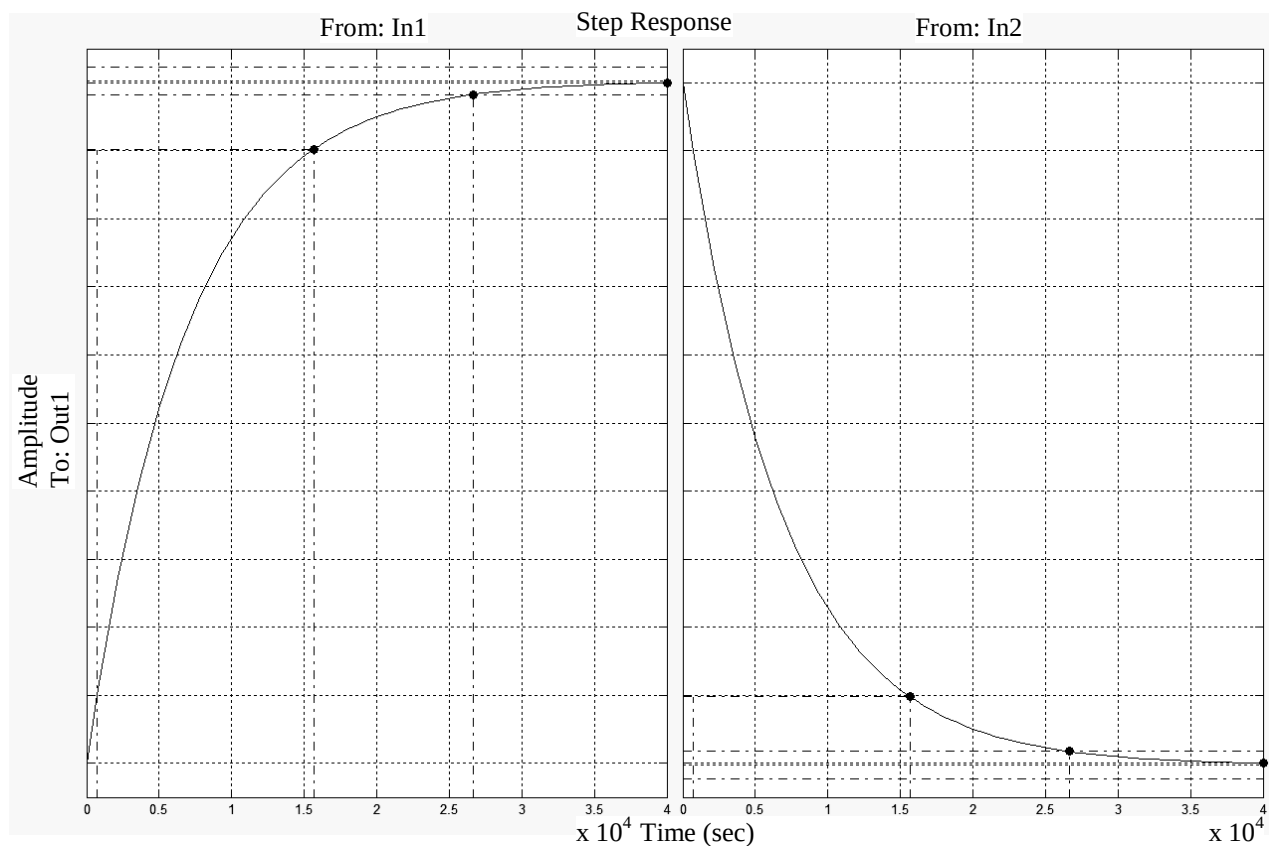


Рис. 4. Динамические характеристики по управлению и возмущению аperiodического вида работоспособного электродвигателя ДК-211БМ

Динамические характеристики по управлению и возмущению показаны на рис. 4 и рис. 5. На вход модели In1 подавались сигналы в виде постоянного напряжения питания в пределах $U_{min} = 500$ В и $U_{max} = 600$ В, а на вход модели In2 подавались сигналы в виде статического момента нагрузки на вал ротора в пределах $M_{min} = 1000$ Н·м и $M_{max} = 1136$ Н·м.

Для получения более достоверной оценки влияния контролируемых парамет-

ров на работоспособность ЭМ, необходимо исследовать дополнительные параметры контроля, поэтому для имитационного моделирования и исследования скоростных свойств электромеханических систем необходимо использовать в модели скоростной регулятор, структура и параметр которого зависит от параметров ЭМ и требований, предъявляемых к скоростному контуру.

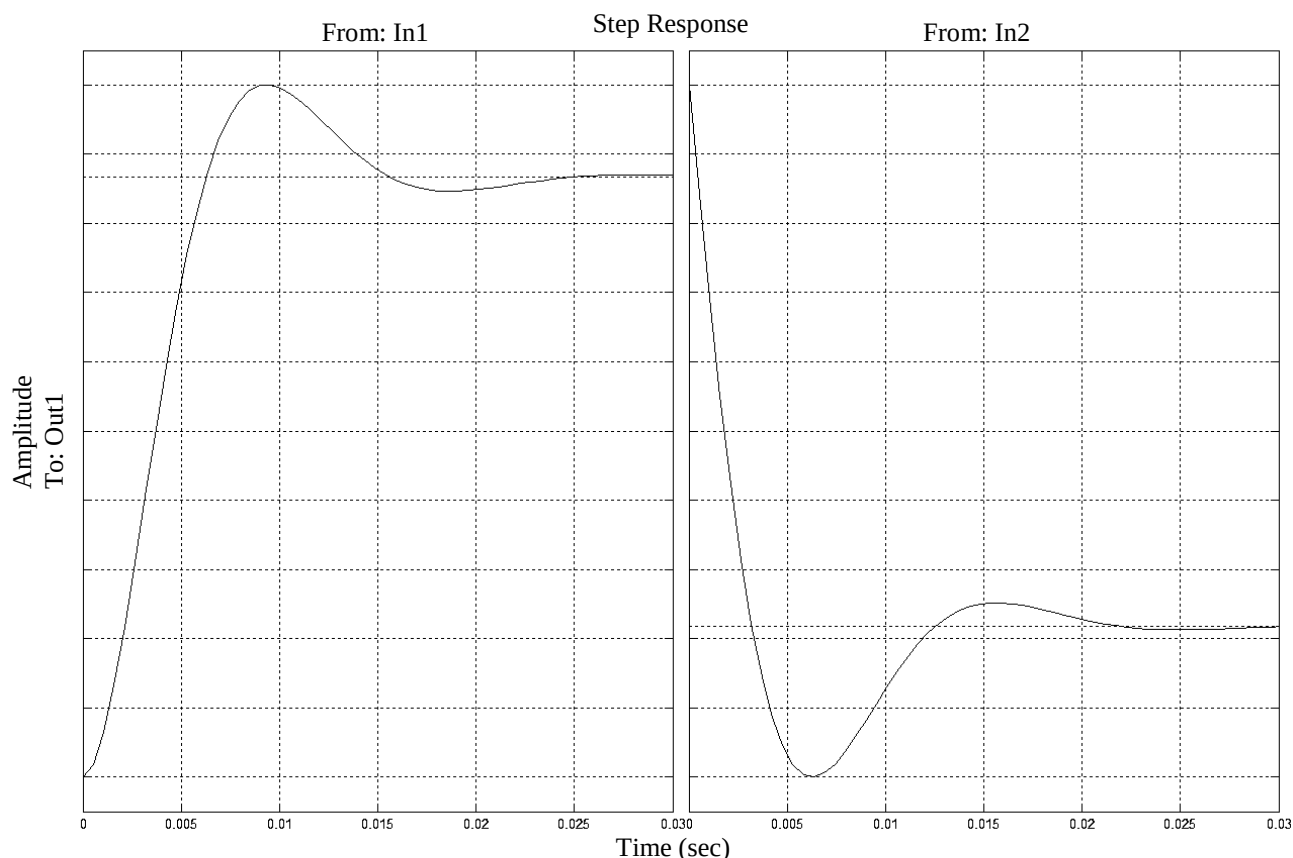


Рис. 5. Динамические характеристики по управлению и возмущению апериодического вида неработоспособного электродвигателя ДК-211БМ

Итак, из анализа динамических характеристик видно, что по управлению и возмущению двигатель ДК-211БМ с данными параметрами представляет собой апериодическое звено. Переходной процесс по управлению и возмущению заканчивается на 26 с. Согласно условиям устойчивости системы по методу А.М. Ляпунова, если все корни характеристического уравнения имеют отрицательные вещественные части, то реальная система будет устойчива, то есть тяговый электродвигатель ДК-211БМ будет работоспособным.

При моделировании снижения качества изоляции ЭМ и нарушения коммутации КЩУ коэффициент передачи по управлению K_E изменяет свои параметры ($K_E=52,5$), так как изменяются внутренние структурные параметры ЭМ (сопротивление цепи якоря r_a уменьшается и устанавли-

вается в пределах от 0,0081 до 0,0089 Ом, ток цепи якоря увеличивается от номинального значения 300 А до максимального 350 А, частота вращения ротора уменьшается от номинального значения и равна $n_{min}=100$ об/мин), при этом динамическая характеристика ДК-211БМ по управлению представляет апериодический процесс (монотонно расходящийся), в результате чего электрохимическая система имеет неустойчивый характер, так как идет процесс накопления энергии из внешней среды. В данном случае электрохимическая система не может восстановить равновесное состояние, значение управляемой координаты (тока разрыва цепи якоря I_a) все больше отклоняется от заданного значения, и двигатель ДК-211БМ считается неработоспособным (рис. 5).

ЛИТЕРАТУРА

1. Гольдберг О.Д. Надежность электрических машин / О.Д. Гольдберг, С.П. Хелем-

ская. – М.: Издательский центр «Академия», 2010. 288 с.

2. **Герман-Галкин С.Г.** Matlab & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК / С.Г. Герман-Галкин. – М.: «Корона Век», 2011. 368с.

3. **Менщиков И.А.** Эффективные методы автоматизации контроля технического состояния электромеханических систем. / И.А. Менщиков. Саратов: ООО «Издательский Центр «Наука», 2014. 141с.

Менщиков Игорь Александрович – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Электроснабжения промышленных предприятий» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю. А.

Igor A. Menshikov – Ph.D., Associate Professor, Head: Department of Power Supply for Industrial Facilities, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 29.01.15, принята к опубликованию 16.02.15

УДК 621.318.3

ВЛИЯНИЕ УКОРОЧЕНИЯ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ НА СТАТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛИНЕЙНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ДВИГАТЕЛЯ С ПОПЕРЕЧНЫМ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ

В.И. Мошкин, Г.Г. Угаров, Д.Н. Шестаков, С.Ю. Помялов

INFLUENCE OF MAGNETIC SHORTENING ON THE STATIC CHARACTERIZATION OF LINEAR ELECTROMAGNETIC MOTOR WITH THE TRANSVERSE MAGNETIC FIELD

V.I. Moshkin, G.G. Ugarov, D.N. Shestakov, S.Yu. Pomyalov

Актуальность работы обусловлена необходимостью создания машин с электромагнитным приводом для технологии безотходной обработки металла резанием в процессе его нанесения при электродуговой наплавке. Для одного и того же объема активных материалов исследуется влияние укорочения магнитной системы на статические характеристики линейного электромагнитного двигателя с поперечным магнитным полем.

Ключевые слова: импульсный линейный электромагнитный двигатель, тяговое усилие, радиус якоря, рабочий зазор

The relevance of the work is due to the need for creating machines with electromagnetic drives which can be applied for the waste-free metal cutting in the process of arc surfacing. The influence of shortening magnetic systems on the static characteristics of linear electromagnetic motors with the transverse magnetic field is investigated for the same amount of active materials.

Keywords: pulsed linear electromagnetic motor, traction, the radius of the armature, working air gap

Для реализации энергоэффективных импульсных технологий с помощью силовых электромагнитных импульсных систем необходимо повышение КПД, удельных силовых и энергетических показателей импульсных линейных электромагнитных двигателей (ЛЭМД).

В работах [1, 2] показано, что в случае укорочения магнитной системы импульсных ЛЭМД с продольным магнитным полем и двумя рабочими зазорами и при сохранении неизменным объема V_d активных материалов возможно повысить удельные силовые показатели двигателей на 20-40% при некотором возрастании плотности тока в обмотке возбуждения.

Повышение удельных силовых показателей отмеченных ЛЭМД базируется на принципе укорочения магнитной системы электромагнитного двигателя, сформулированном в работе [3]. Одним из путей совершенствования импульсных ЛЭМД с продольным магнитным полем за счет дальнейшего повышения их удельных силовых показателей является такое изменение геометрических параметров двигателей, когда при неизменном объеме активных материалов V_d двигателя увеличиваются его размеры в радиальном направлении при одновременном уменьшении осе-

вых размеров. Перераспределение размеров посредством укорочения магнитной системы импульсного ЛЭМД в осевом направлении позволяет увеличить степень неоднородности магнитного поля рабочих зазоров, что может стать предпосылкой роста удельных силовых показателей [2, 3].

В результате за счет роста взаимодействующих поверхностей якоря и статора возрастет удельное тяговое усилие $F^* = F/V_d$. Это выражение в дальнейшем используем как критерий сравнения импульсных ЛЭМД, имеющих базисную и укороченную магнитные системы.

Исследование различных типов магнитных систем показало, что тяговую характеристику импульсного ЛЭМД, имеющую схожий вид с механической характеристикой привода резца для технологического процесса, например, терморезания, можно получить лишь у импульсных ЛЭМД с продольно-поперечным и поперечным магнитным полем [4] (рис. 1). Поэтому для технологии безотходной обработки металла резанием в процессе его нанесения при электродуговой наплавке (рис. 2) наиболее эффективным приводом резца будет цилиндрический импульсный ЛЭМД с поперечным магнитным полем и кольцеобразным якорем.

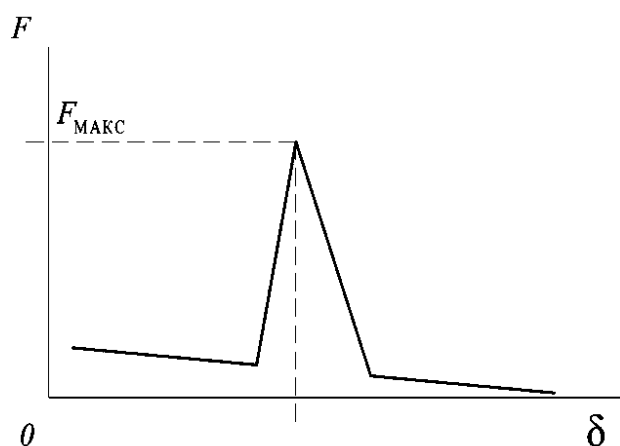


Рис. 1. Противодействующая характеристика процесса терморезания с учетом возвратной пружины двигателя

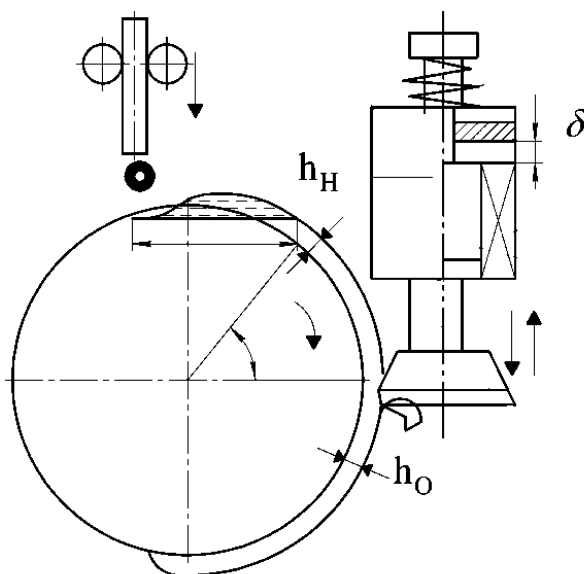


Рис. 2. Электромагнитный привод резца для технологии безотходной обработки металла резанием в процессе его нанесения при электродуговой наплавке

Оценим изменение статических характеристик импульсного ЛЭМД с поперечным магнитным полем при укорочении его магнитной системы и сохранении неизменным объема активных материалов двигателя. В качестве базисного взят импульсный ЛЭМД с поперечным магнитным полем и кольцеобразным ярком (рис. 3), магнитная система которого выполнена из конструкционной стали марки Ст3. Такой двигатель имеет известные экспериментальные тяговые статические характеристики [4, 5].

Укороченная конструкция магнитной системы имеет осевые размеры, уменьшенные в 1,5 раза по сравнению с базисной конструкцией при сохранении неизменным объема V_d активных материалов двигателя.

В качестве метода исследования магнитной системы импульсного ЛЭМД с поперечным магнитным полем и кольцеобразным ярком использовалось математическое моделирование с помощью программного комплекса Elcut [6].

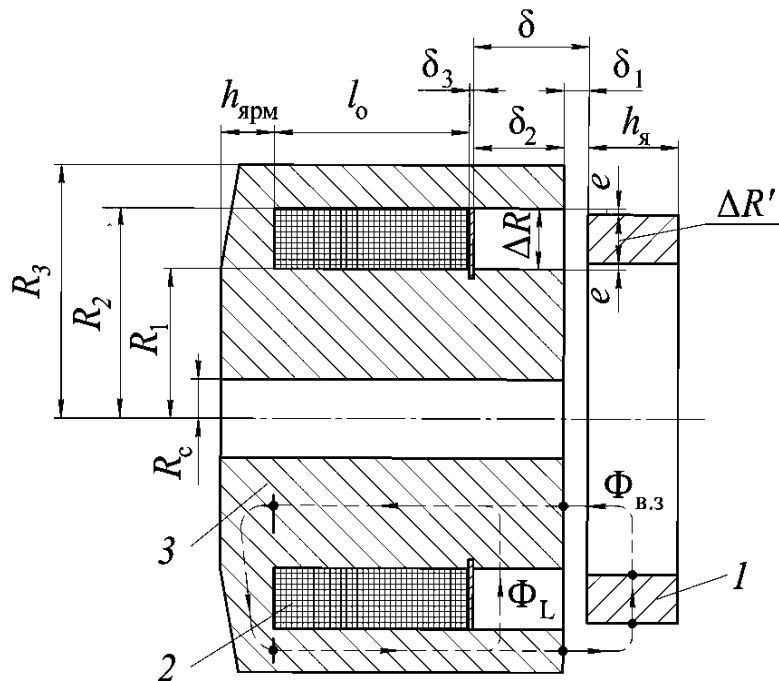


Рис. 3. Конструктивная схема магнитной системы импульсного ЛЭМД с поперечным магнитным полем и кольцеобразным ярком: 1 – ярко; 2 – обмотка возбуждения; 3 – статор (ярмо); R_1 , R_2 – внутренний и внешний радиусы обмотки возбуждения; R_3 – внешний радиус статора; R_c – радиус отверстия под направляющий стержень ярка; l_0 – длина обмотки; δ – рабочий зазор ($\delta = \delta_1 + \delta_2$); $h_{я,рм}$ и $h_я$ – высоты ярма и кольцеобразного ярка; δ_3 , e – технологические зазоры; $\Phi_{в.3}$ – магнитный поток воздушного зазора; Φ_L – радиальный магнитный поток рассеяния

С целью выяснения влияния укорочения магнитной системы импульсного ЛЭМД на его интегральную работу и тяговое усилие используем результаты проведенного математического моделирования базисного и укороченного вариантов двигателя. Для этого, как и в работе [1], была спроектирована пара образцов импульсных ЛЭМД с осевыми длинами магнитных систем и обмоток, отличающимися в 1,5 раза. Базисный двигатель имел относительную длину обмотки

у, равную значению $y = l_0/R_1 = 1,76$ [4, 5]. Другой, "короткий", был разработан нами с укороченной магнитной системой и относительной длиной $y_k = l_{ок}/R_{1к} = 0,96$. Пара таких импульсных ЛЭМД имела одинаковые геометрические соотношения и объемы V_d активных материалов. Магнитопроводы обоих двигателей выполнены из стали марки Ст3, величина МДС обмоток принята одинаковой и равной 2974,3 А, как и в работах [4, 5].

На рис. 4 приведены полученные при математическом моделировании статические тяговые характеристики исследуемых ЛЭМД, позволяющие провести их сравнение по величинам тягового усилия и интегральной работы. Максимальное тяговое усилие «короткого» двигателя, соответствующее началу входа якоря в расточку статора, превосходит аналогичное усилие базисного двигателя на 30 %. Это объясняется тем, что у «короткого» двигателя произошло увеличение поверхностей взаимо-

действия за счет увеличения размеров внешнего и центрального полюсов статора, а также ширины $\Delta R'$ якоря (рис. 3).

Поскольку исследуемые двигатели имеют различную длину обмоток возбуждения, которая определяет и различный рабочий ход якоря, сравнение двигателей по величине интегральной работы необходимо выполнить для одинакового относительного рабочего хода двигателей, равного $\delta_* = \delta / l_0 = 0,118$.

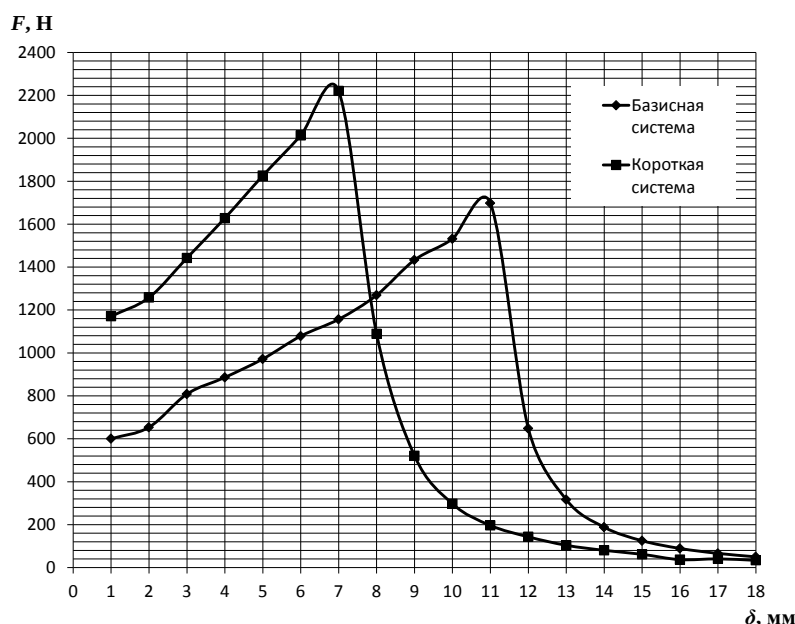


Рис. 4. Статические тяговые характеристики базисной и укороченной магнитной системы импульсного ЛЭМД с поперечным магнитным полем и кольцеобразным якорем

В качестве примера на рис. 5 представлена картина поля импульсного ЛЭМД с укороченной магнитной системой для ра-

бочего зазора $\delta = 7$ мм, соответствующего началу момента вхождения якоря в расточку статора.

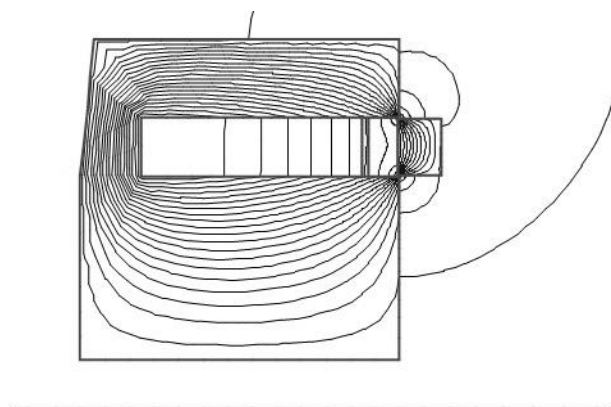


Рис. 5 Картина поля модели импульсного ЛЭМД с укороченной магнитной системой при зазоре $\delta = 7$ мм

При сравнении двигателей по величине интегральной работы целесообразно тяговую характеристику условно разделить на два участка: первый – от начала движения до начала вхождения якоря в расточку статора, второй – после вхождения якоря в расточку статора. Сравнение двигателей на первом участке проведем для одинакового относительного значения хода якоря $\delta_{*(1)} = \delta_{(1)}/l_0 = 0,092$, что соответствует абсолютным значениям хода якоря для базисного двигателя $\delta_{B(1)} = 7$ мм, а для «короткого» двигателя $\delta_{K(1)} = 4,7$ мм. В результате расчета получены следующие значения интегральных работ A_{II} на первом участке: у базисного ЛЭМД $A_{II.B(1)} = 2,61$ Дж, у «короткого» $A_{II.K(1)} = 3,32$ Дж. Рост интегральной работы у «короткого» двигателя вызван увеличением размера ΔR , за счет которого уменьшился паразитный радиальный поток рассеяния Φ_L (рис. 3), а полезный рабочий поток $\Phi_{\delta,3}$ воздушного зазора соответственно возрос, что определило повышение тягового усилия на участке $\delta_{K(1)}$ рабочего хода этого двигателя.

Сравнение двигателей на втором участке так же выполним для одинакового относительного значения хода якоря на этом участке $\delta_{*(2)} = \delta_{(2)}/l_0 = 0,118$, что соответствует абсолютным значениям хода якоря для базисного двигателя $\delta_{B(2)} = 9$ мм, а для «короткого» двигателя $\delta_{K(2)} = 6$ мм. В результате расчета получены следующие значения интегральных работ A_{II} на втором участке: у базисного ЛЭМД $A_{II.B(2)} = 9,87$ Дж, у «короткого» $A_{II.K(2)} = 9,39$ Дж, то есть они практически одинаковы.

Сравнение тяговых характеристик на всем рабочем ходе (на участках 1 и 2) показало, что двигатель с укороченной

магнитной системой и относительной длиной обмотки $y_k = 0,96$ при одинаковом относительном ходе якоря имеет практически ту же интегральную работу, что и базисный ЛЭМД с длиной обмотки $y = 1,76$. Отличие составляет около 2 %.

Таким образом, импульсные ЛЭМД одинакового объема с укороченной в осевом направлении магнитной системой и длиной обмотки $y_k = 0,96$ эффективнее базисных ЛЭМД с длиной $y = 1,76$ по удельным силовым показателям на относительно коротких ходах якоря, когда ход $\delta < 0,15l_0$. Применение импульсных ЛЭМД с укороченной магнитной системой в этом случае позволит при заданных значениях максимального тягового усилия снизить массу и добиться экономии активных материалов до 30 %. Для детального анализа необходимо сопоставить, как будут меняться плотность тока и максимальное тяговое усилие двигателя при укорочении магнитной системы. Это позволит определить диапазон изменения относительной длины обмотки при укорочении магнитной системы.

Недостатком «коротких» импульсных ЛЭМД является более напряженный тепловой режим обмотки возбуждения из-за уменьшенного объема обмотки и завышенной вследствие этого плотности в ней тока.

Итак, сравнение импульсных ЛЭМД с поперечным магнитным полем и кольцеобразным якорем и с укороченной в осевом направлении магнитной системой с базисными ЛЭМД того же объема на ходе якоря $\delta < 0,15l_0$ показало возможность увеличить удельное тяговое усилие и при заданном максимальном тяговом усилии снизить объем и добиться экономии активных материалов двигателя.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Мошкин В.И.** Повышение удельных силовых показателей импульсных линейных электромагнитных двигателей с комбинированным якорем и двумя рабочими

зазорами / В.И. Мошкин, Г.Г. Угаров //Импульсные линейные электромагнитные двигатели: сб. науч. трудов. Новосибирск: ИГД СО АН СССР, 1991. С.50-56.

2. **Мошкин В.И.** Импульсные линейные электромагнитные двигатели / В.И. Мошкин, В.Ю. Нейман, Г.Г. Угаров. Курган: Изд-во Курганского гос. ун-та, 2010. 220 с.

3. **Угаров Г.Г.** Принципы повышения удельных силовых и энергетических показателей импульсных линейных электромагнитных двигателей / Г.Г. Угаров // Импульсные линейные электрические двигатели: сб. науч. трудов. Новосибирск: ИГД СО АН СССР, 1991. С.43-54.

4. **Казаков Ю.Н.** Формообразование и свойства деталей при дуговых процессах с внешним воздействием / Ю.Н. Казаков,

В.В. Хорев, Г.Г. Угаров, А.В. Дмитриенко, А.А. Казинский. – Саратов: СГТУ, 2007. 328 с.

5. **Дмитриенко А.В.** Расчет статических тяговых характеристик цилиндрического ЛЭМД с поперечным магнитным полем и кольцеобразным якорем / А.В. Дмитриенко, В.И. Мошкин, Г.Г. Угаров // Вестник Курганского государственного университета. Серия «Технические науки». 2005. №2(02). Вып. 1. С. 236-238.

6. ELCUT. Моделирование электромагнитных, тепловых и упругих полей методом конечных элементов: рук-во пользователя. СПб: ООО «Тор», 2013. 295 с.

Мошкин Владимир Иванович – кандидат технических наук, заведующий кафедрой «Энергетика и технология металлов» Курганского государственного университета

Угаров Геннадий Григорьевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Шестаков Дмитрий Николаевич – доцент кафедры «Энергетика и технология металлов» Курганского государственного университета

Помялов Станислав Юрьевич – старший преподаватель кафедры «Энергетика и технология металлов» Курганского государственного университета

Vladimir I. Moshkin – Ph.D., Head: Department of Power Engineering and Metal Technology, Kurgan State University

Gennadiy G. Ugarov – Dr.Sc., Professor, Department of Power Supply for Industrial Facilities, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Dmitriy N. Shestakov – Associate Professor, Department of Power Engineering and Metal Technology, Kurgan State University

Stanislav Yu. Pomyalov – Senior Lecturer, Department of Power Engineering and Metal Technology, Kurgan State University

Статья поступила в редакцию 24.01.15, принята к опубликованию 16.02.15

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.

ЭЛЕКТРОДИНАМИКА

УДК 621.372.8

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЭКВИВАЛЕНТНОЙ СХЕМЫ ДЛЯ РАСЧЕТА КРИТИЧЕСКИХ ДЛИН ОСНОВНЫХ ВОЛН ДВУГРЕБНЕВОГО И ЧЕТЫРЕХГРЕБНЕВОГО ВОЛНОВОДОВ СО СЛОИСТЫМ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ЗАПОЛНЕНИЕМ ИХ ЦЕНТРАЛЬНЫХ СЕКЦИЙ

А.А. Скворцов

DETERMINATION OF EQUIVALENT NETWORK PARAMETERS FOR CALCULATING THE DOMINANT WAVELENGTHS OF DOUBLE - AND FOUR- RIDGED WAVEGUIDES WITH THE LAYERED DIELECTRIC FILLING IN THE CENTRAL SECTION

A.A. Skvortsov

На основе метода эквивалентных схем получены квазианалитические выражения, позволяющие оценить влияние геометрических размеров и электрофизических параметров слоистого диэлектрического заполнения центральных секций двугребневого и четырехгребневого волноводов на критические длины их основных волн с достаточной для практических целей точностью. Приводится сравнение результатов расчетов нормированной критической длины основной волны двугребневого волновода со слоистым диэлектрическим материалом в центральной секции, полученных методами эквивалентных схем и конечных элементов при различных значениях геометрических размеров и электрофизических параметров заполнения.

Ключевые слова: критическая длина, основная волна, квазианалитические выражения, двугребневый волновод, четырехгребневый волновод, слоистое диэлектрическое заполнение, метод эквивалентных схем, метод конечных элементов

Quasi-analytical expressions allow for sufficiently accurate evaluation of the influence of geometrical and electrophysical parameters referring the layered dielectric filling in the central section of the double- and four-ridged waveguides on the cutoff wavelengths of the dominant mode. The calculation data relating the normalized cutoff wavelengths of the dominant mode in the double-ridged waveguide is compared to the layered dielectric filling in the central section obtained due to the method of equivalent networks and finite elements under various values of geometrical sizes and electrophysical parameters of the filling.

Keywords: cutoff wavelength, dominant mode, quasi-analytical expressions, double-ridged waveguide, four-ridged waveguide, layered dielectric loading, method of equivalent networks, finite element method

Практический интерес к двугребневому (ДГВ) и четырехгребневому (ЧГВ) волноводам со слоистым диэлектрическим заполнением их центральных секций (рис. 1) обусловлен тем, что рассматриваемые структуры являются базовыми элементами для построения СВЧ-систем различного назначения, включая установки равномерного нагрева диэлектрических материалов [1-4]. Как показывает анализ известных конструкций СВЧ-устройств, возможно несколько вариантов расположения диэлектрического материала в центральных секциях ДГВ и ЧГВ. Так, в работах [1, 2] рассмотрены электродинамические свойства ДГВ и ЧГВ со слоистым диэлектрическим материалом в центральных секциях, когда границы слоев параллельны поперечной составляющей электрического поля основной волны.

Применение СВЧ-устройств на связанных посредством шлейфовых разветвлений линиях передачи рассматриваемых поперечных сечений для термообработки диэлектрических материалов делает актуальным исследование электродинамических параметров ДГВ и ЧГВ со слоистым диэлектриком в центральных секциях, у которого границы слоев перпендикулярны поперечной составляющей электрического поля основной волны [3, 4].

При любом варианте размещения диэлектрического материала в центральных секциях ДГВ и ЧГВ он оказывает су-

щественное влияние на электродинамические свойства анализируемых линий передачи.

Рассмотрим влияние слоистого диэлектрического заполнения центральных секций ДГВ и ЧГВ на критические длины их основных волн.

Определить критическую длину основной волны рассматриваемых линий передачи на основе точного аналитического решения внутренней краевой задачи электродинамики затруднительно из-за сложной формы границ и слоистого диэлектрического заполнения центральных секций ДГВ и ЧГВ, поэтому для ее расчета необходимо применять либо численные методы, либо различные квазианалитические подходы.

Квазианалитический расчет критических длин основных волн ДГВ и ЧГВ со слоистым диэлектрическим материалом в центральных секциях можно, как и в случае однородного диэлектрического заполнения [5], провести, заменив анализируемые линии передачи эквивалентной схемой из сосредоточенных индуктивностей и емкостей (рис. 1) по формуле

$$\lambda_{c1} = 2\pi c\sqrt{LC}, \quad (1)$$

где c – скорость света; L и C – погонные индуктивность и емкость эквивалентного колебательного контура.

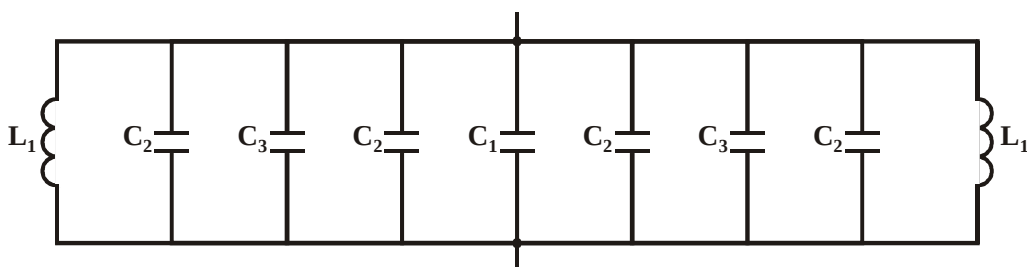


Рис. 1. Эквивалентная схема для расчета критических длин основных волн ДГВ и ЧГВ со слоистым диэлектрическим заполнением их центральных секций

Индуктивность эквивалентного контура можно представить в виде

$$L = \frac{L_1}{2}, \quad (2)$$

где L_1 – индуктивность боковой секции ДГВ или ЧГВ, определяемая выражением

$$L_1 = \frac{\mu_1 \mu_0 b (a - g - 2t)}{2}, \quad (3)$$

где μ_0 – магнитная постоянная; μ_1 – относительная магнитная проницаемость диэлектрического заполнения.

Емкость эквивалентного контура вычисляется из соотношения

$$C = C_1 + 2(2C_2 + C_3), \quad (4)$$

где C_1 и C_3 – электростатические емкости; C_2 – краевая емкость.

Анализ особенностей расположения диэлектрического материала в ДГВ и ЧГВ, показал, что слоистое диэлектрическое заполнение оказывает влияние только на электростатическую емкость C_1 , формулу для расчета которой можно представить в следующем виде:

$$C_1 = \frac{\varepsilon_{эфф} \varepsilon_0 g}{b}, \quad (5)$$

где ε_0 – электрическая постоянная; $\varepsilon_{эфф}$ – эффективная относительная диэлектрическая проницаемость слоистого заполнения центральной секции ДГВ или ЧГВ, определяемой размерами g и b .

В случае, когда границы слоев диэлектрического материала параллельны силовым линиям поперечной электрической составляющей основной волны (рис. 2, а, б) [6],

$$\varepsilon_{эфф} = \varepsilon_1 (1 - w/g) + \varepsilon_2 w/g, \quad (6)$$

где ε_1 и ε_2 – относительные диэлектрические проницаемости материалов, заполняющих ДГВ или ЧГВ.

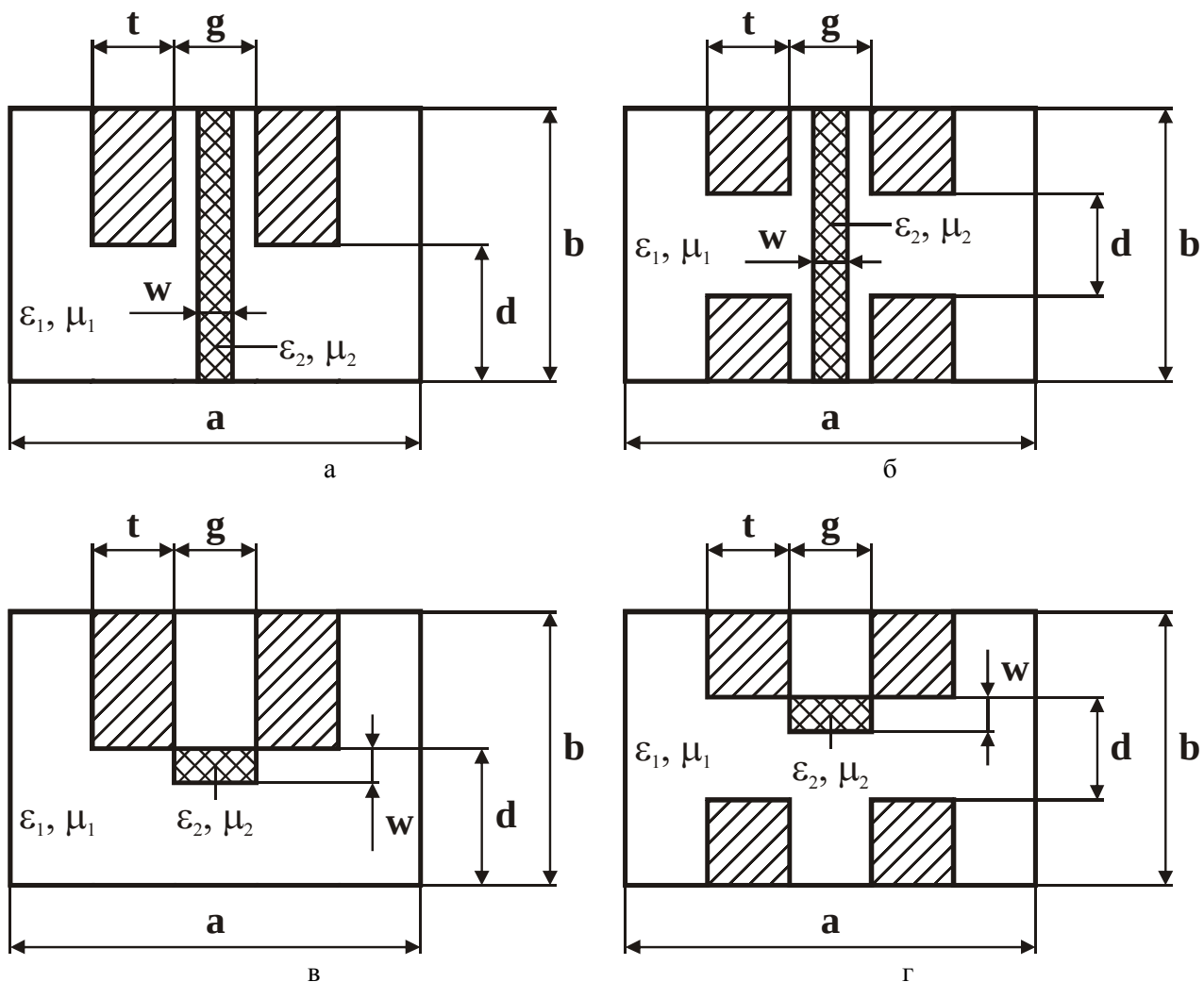


Рис. 2. Поперечные сечения ДГВ (а, в) и ЧГВ (б, г) с различными вариантами слоистого диэлектрического заполнения их центральных секций

Если границы слоев диэлектрического материала перпендикулярны силовым линиям поперечной электрической составляющей основной волны (рис. 2, в, з) [7], то

$$\varepsilon_{эфф} = \frac{\varepsilon_1 \varepsilon_2}{\varepsilon_1 w/b + \varepsilon_2 (1 - w/b)}. \quad (7)$$

$$C_2(\vartheta) = \frac{\varepsilon_1 \varepsilon_0}{\pi} \left[\frac{1 + \vartheta^2}{\vartheta} \operatorname{Arch} \left(\frac{1 + \vartheta^2}{1 - \vartheta^2} \right) - 2 \ln \left(\frac{4\vartheta}{1 - \vartheta^2} \right) \right] \times \begin{cases} 1 & \text{для ДГВ;} \\ 0,5 & \text{для ЧГВ,} \end{cases} \quad (9)$$

в которой $\vartheta = d/b$.

Электростатическая емкость C_3 определяется выражением

$$C_3 = \frac{\varepsilon_1 \varepsilon_0 t}{d}. \quad (10)$$

По формулам (1) – (10) проведен квазианалитический расчет критических длин основных волн ДГВ и ЧГВ при различных значениях геометрических размеров и электрофизических параметров слоистого диэлектрического заполнения. В качестве примера, иллюстрирующего эффектив-

Из выражений (6) и (7) следует, что

$$\varepsilon_{эфф} = \begin{cases} \varepsilon_1 & \text{при } w/g = 0 \text{ или } w/b = 0; \\ \varepsilon_2 & \text{при } w/g = 1 \text{ или } w/b = 1. \end{cases} \quad (8)$$

Краевая емкость C_2 вычисляется по формуле

ность рассмотренной выше квазианалитической методики, на рис. 3 а представлены графики зависимости нормированной критической длины основной волны (λ_{c1}/a) ДГВ (рис. 2, а) с параметрами $b/a = 0,5$; $g/a = 0,1$; $t/a = 0,2$; $d/b = 0,3$; $\varepsilon_1 = \mu_1 = \mu_2 = 1$, полученные методом эквивалентных схем (МЭС) и методом конечных элементов (МКЭ) при различных значениях w/a и ε_2 . Как видно из рис. 3, а, результаты расчетов λ_{c1}/a МЭС и МКЭ достаточно хорошо согласуются: их максимальное расхождение не превышает 11 % при $0,1 \leq w/a \leq 0,5$ и $2 \leq \varepsilon_2 \leq 9$.

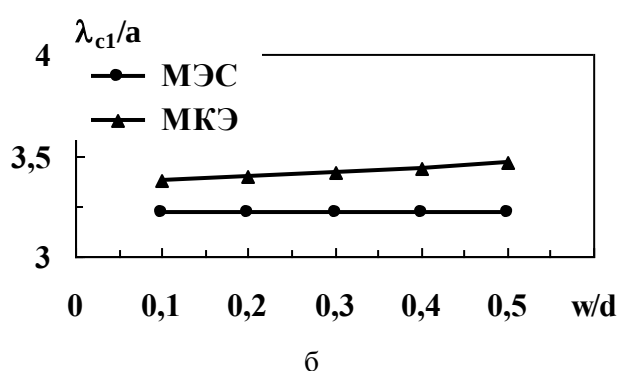
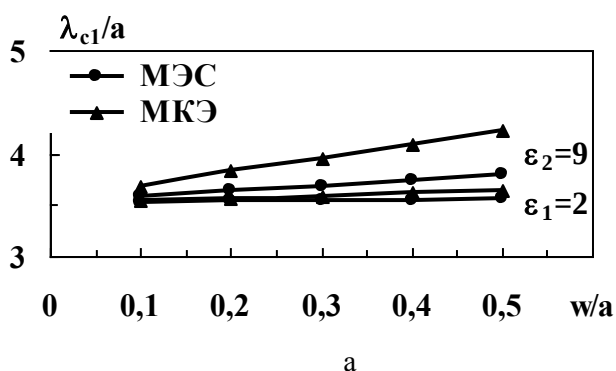


Рис. 3. Зависимости нормированной критической длины основной волны ДГВ от геометрических размеров и электрофизических свойств слоистого диэлектрического заполнения его центральной секции

В качестве другого примера, иллюстрирующего эффективность рассмотренных выше квазианалитических соотношений, на рис. 3 б представлены результаты расчетов нормированной критической длины основной волны (λ_{c1}/a) ДГВ (рис. 2 в) с параметрами $b/a = 0,5$; $g/a = 0,1$; $t/a = 0,2$; $d/b = 0,3$;

$\varepsilon_1 = \mu_1 = \mu_2 = 1$; $\varepsilon_2 = 2$, полученные МЭС и МКЭ при различных значениях w/d . Из рис. 3 б следует, что результаты расчетов λ_{c1}/a МЭС и МКЭ достаточно хорошо согласуются, а их максимальное расхождение не превышает 7 % при $0,1 \leq w/d \leq 0,5$.

Таким образом, в настоящей работе определена связь параметров эквивалентной схемы для квазианалитического расчета критических длин основных волн ДГВ и ЧГВ с геометрическими размерами и электрофизическими свойствами слоистого диэлектрического заполнения их цент-

тральных секций. Кроме того, рассмотренные выше квазианалитические выражения могут быть с успехом адаптированы для расчета критических длин основных волн ДГВ и ЧГВ с кусочно-слоистым диэлектрическим заполнением их центральных секций.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Bleackley W.J.** Ridged waveguide microwave applicators / W.J. Bleackley, A.L. Van Koughnett, W. Wysslouzil // *Microwave Power*. 1972. № 7. P. 23–29.

2. **El-Deek M. El-Sayed** Ridged waveguide applicators for uniform microwave heating of sheet materials / M. El-Sayed El-Deek, M.K. Hashem // *Microwave Power*. 1984. № 2. P. 111–117.

3. **Скворцов А.А.** СВЧ-устройство на связанных прямоугольном и двугребневом волноводах для термообработки диэлектриков / А.А. Скворцов // *Функциональные устройства низких и сверхвысоких частот: межвуз. науч. сб. / СГТУ. Саратов, 2002. С. 64–66.*

4. **Скворцов А.А.** Разработка СВЧ-устройства на связанных волноводах для равномерного нагрева диэлектрических материалов / А.А. Скворцов, М.А. Соловьев, Е.А. Торгашов // *Математические методы в технике и технологиях: сб. трудов XXV Междунар. науч. конф., Т. 9. / НТУ. Харьков, 2012. С. 165–167.*

5. **Скворцов А.А.** О расчете критической длины основной волны двугребневого волновода / А.А. Скворцов // *Функциональные электродинамические системы и устройства низких и сверхвысоких частот: межвуз. науч. сб. / СГТУ. Саратов, 2001. С. 59–61.*

6. **Скворцов А.А.** О расчете критической длины основной волны двух- и четырехгребневого волноводов со слоистым диэлектриком / А.А. Скворцов, В.А. Лойко, М.А. Соловьев // *Математические методы в технике и технологиях: сб. трудов XXVII Междунар. науч. конф. / ТГТУ. Тамбов, 2014. Т. 8. С. 270–272.*

7. **Скворцов А.А.** Квазистационарный расчет критической длины основной волны дву- и четырехгребневого волноводов со слоистым диэлектрическим заполнением их центральных секций / А.А. Скворцов [и др.] // *Актуальные проблемы электронного приборостроения (АПЭП-2014): материалы Междунар. науч.-техн. конф. / СГТУ. Саратов, 2014. Т. 1. С. 312–315.*

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

Aleksey A. Skvortsov – Ph.D., Associate Professor, Department of Radio Electronics and Telecommunications, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 06.02.15, принята к опубликованию 16.02.15

УДК 539.2

ДИФФУЗИННАЯ МОДЕЛЬ ДИСЛОКАЦИОННЫХ ЭФФЕКТОВ

А.Н. Сальников

THE DIFFUSION MODEL OF DISLOCATION EFFECTS

A.N. Salnikov

Построена диффузионная модель дислокационных эффектов взаимодействия заряженных дислокаций в щелочно-галогидных и ковалентных кристаллах с точечными дефектами. Приведены сравнительные численные оценки различных эффектов.

Ключевые слова: заряженные дислокации, точечные дефекты, дислокационные эффекты, диффузионная модель

В ионных и ковалентных кристаллах, к которым относятся щелочные галоиды ШГК и полупроводники, краевые дислокации несут электрический заряд [1], который переносится при ее движении.

За последние годы достигнут значительный прогресс в исследовании механизмов взаимодействия заряженных дислокаций и точечных дефектов. Несомненным важным результатом проводившихся десятилетиями исследований является формирование достаточно строгой модели заряженной дислокации в виде равномерно заряженной нити, окруженной цилиндром точечных дефектов с радиусом Дебая r_D или Риды (рис. 1).

Взаимодействие дислокаций с точечными дефектами приводит к множеству разнообразных явлений. Поскольку дислокации в ШГК обладают упругим и электрическим полем, а примесные атомы и собственные точечные дефекты создают в решетке упругие искажения и часто несут заряд, между ними действуют упругие и

The new diffusion model relates the dislocation effects in the interaction of charged dislocations within the alkali halide and covalent crystals characterized for point defects. The comparative analysis was applied to provide numeric estimates of the various effects.

Keywords: charged dislocations, point defects, dislocation effects, diffusion model

электрические силы. В результате упругого взаимодействия вблизи дислокации образуется атмосфера Коттрела, которая приводит к закреплению дислокаций [1].

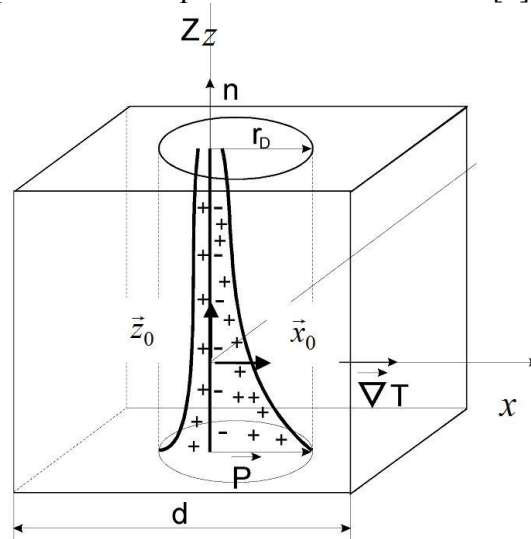


Рис. 1. Качественная картина поляризации кристалла с отрицательно заряженной дислокацией, окруженной облаком положительно заряженных точечных дефектов под действием температуры

Наряду с указанным внутрикристаллическим взаимодействием точечные дефекты и дислокации могут взаимодействовать при приложении к кристаллу внешних механических нагрузок или полей, что обуславливает многие важные свойства кристаллов – дислокационные эффекты.

В работе [2] построены аналитические модели ряда дислокационных эффектов. Методом последовательных приближений решена система уравнений, которая описывает поведение системы «заряженная дислокация – экранирующее облако точечных дефектов» двух различных знаков при воздействии на нее механического напряжения, электрического поля, градиента температуры, а также при совместном влиянии каждого из перечисленных факторов с магнитным полем. Установлено, во всех случаях возникает дипольный момент системы, пропорциональный величине оказываемого воздействия, что приводит к появлению разности потенциалов между гранями кристалла в направлении вектора поляризации (рис.2).

Если сравнивать направление вектора поляризации $\vec{P}$ в различных эффектах с направлением векторов внешних воздействий на кристалл (градиента $\vec{\nabla}T$ температуры, электрического $\vec{E}$ и магнитного $\vec{B}$ полей), то все дислокационные эффекты можно разбить на продольные и поперечные (рис. 2).

В продольных эффектах вектор $\vec{P}$ коллинеарен векторам внешних воздействий: $\vec{P} \uparrow \uparrow \left(\vec{\nabla}T = \frac{dT}{dx} \vec{x}_0 \right)$ ($\vec{x}_0$ – орт оси ox (рис. 1)) в дислокационном эффекте поляризации градиентом температуры $\vec{\nabla}T$ (рис. 2 а) и $\vec{P} \uparrow \uparrow \vec{E}$ – напряженности электрического поля в пьезоэлектрическом эффекте (рис. 2 б). Разность потенциалов U между гранями кристалла определяется соотношениями:

$$U = Ed = d \frac{\sigma_D k_B \rho_D}{nq^2} \alpha \frac{dT}{dx} \frac{1}{1 + \frac{\sigma_D \rho_D}{nq}}, \quad (1)$$

$$U = \frac{4\pi d}{\varepsilon} r_D^2 \frac{q \sigma_D \rho_D E}{k_B T}. \quad (2)$$

где σ_D – линейный заряд дислокации, ρ_D – плотность дислокаций, $r_D = \frac{1}{2q} \sqrt{\frac{\varepsilon k_B T}{\pi n}}$ – радиус Дебая дислокации (рис. 1), q – заряд точечных дефектов, n – равновесная концентрация подвижных точечных дефектов, k_B – постоянная Больцмана, d – размер кристалла в направлении вектора поляризации, ε – его диэлектрическая проницаемость, $\alpha \equiv \frac{E_a}{k_B T}$, E_a – энергия активации примеси.

В поперечных эффектах вектор $\vec{P}$ перпендикулярен векторам внешних воздействий: $\vec{P} \perp$ индукции магнитного поля $\vec{B}$ и $\left(\vec{\nabla}T = \frac{dT}{dz} \vec{z}_0 \right)$ ($\vec{z}_0$ – орт оси oz (рис. 1)) в поперечном эффекте Нернста – Эттингсхауза (рис. 2 в), $\vec{P} \perp \vec{E}$ и $\vec{B}$ в эффекте поляризации в скрещенном электрическом и магнитном поле (рис. 2 г), $\vec{P} \perp \vec{E}$ и $\vec{B}$ в дислокационном эффекте Холла (рис. 2 д) и $\vec{P} \perp \vec{B}$ и скорости движения дислокации $\vec{v}$ при поляризации в продольном магнитном поле (рис. 2 е). Разность потенциалов U между гранями кристалла определяется соотношениями:

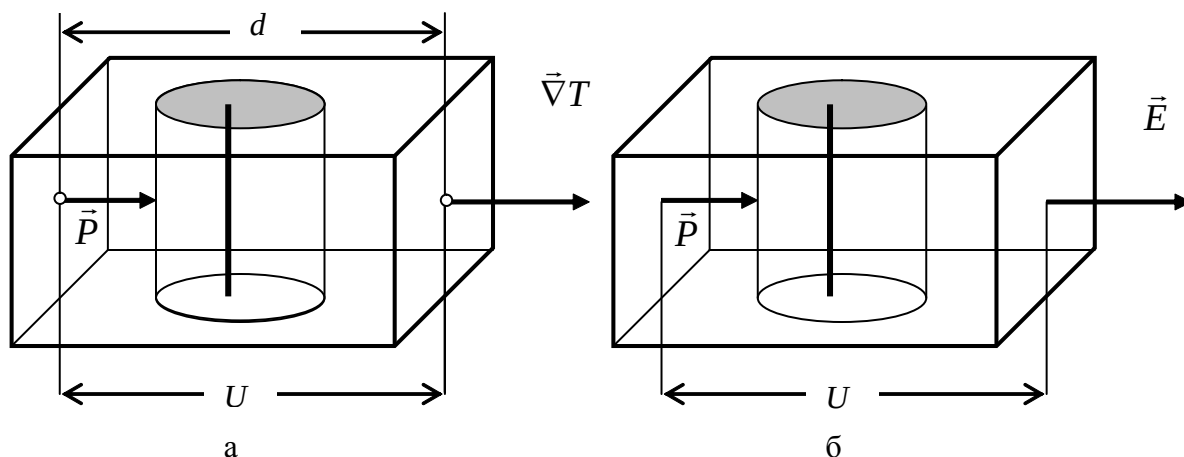
$$U = \frac{\rho_D \sigma_D k_B b B \alpha}{nqc} \frac{dT}{dz} \frac{d}{1 + \frac{\sigma_D \rho_D}{nq}}. \quad (3)$$

$$U = \frac{\rho_D \sigma_D b E B}{nc} \frac{d}{1 + \frac{\sigma_D \rho_D}{nq}}. \quad (4)$$

$$U = d \frac{\Delta \rho_D \sigma_D B v}{(qn + \sigma_D \rho_D) c}, \quad (5)$$

$$U = d \frac{\sigma_D}{2nq} \frac{B v}{c} \Delta \rho_D, \quad (6)$$

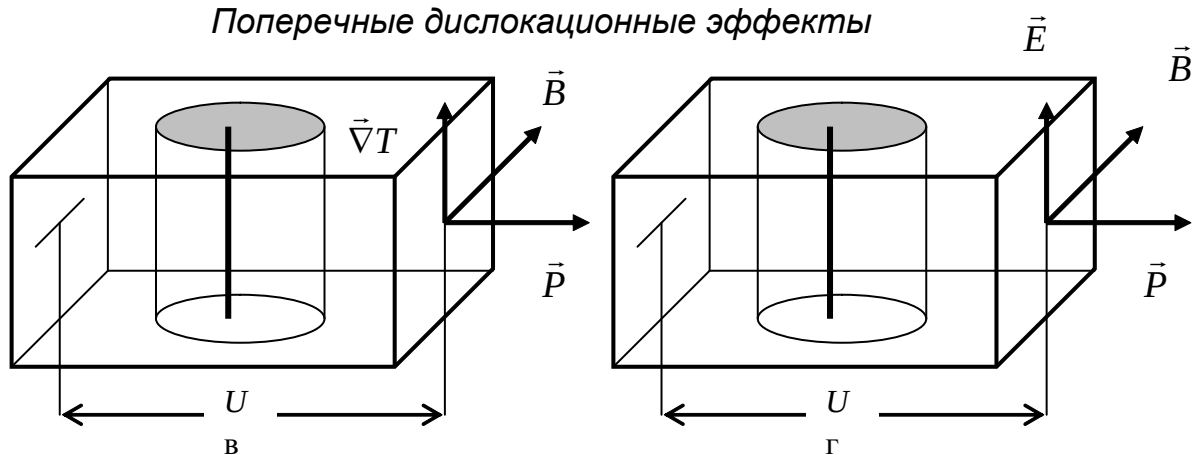
Продольные дислокационные эффекты



Поляризация градиентом температуры
(формула (1))

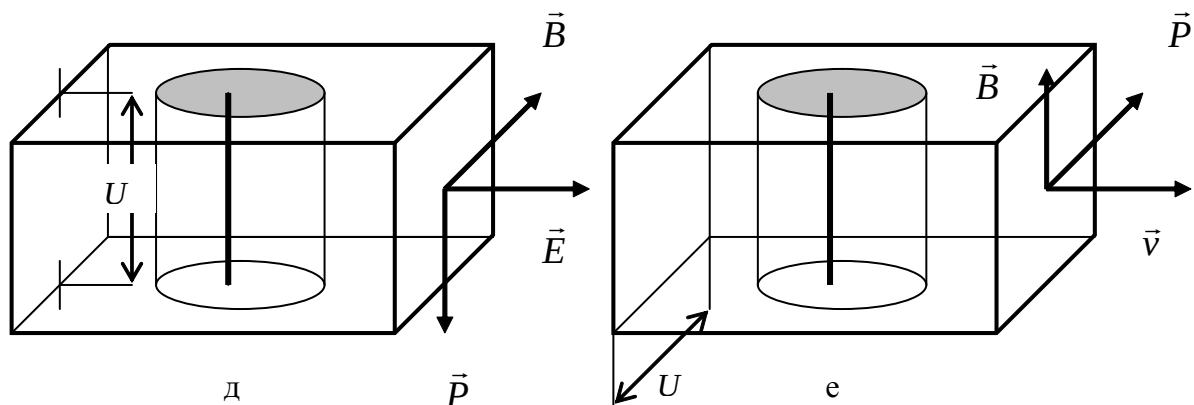
Прямой и обратный пьезоэффект
(формула (2))

Поперечные дислокационные эффекты



Поперечный эффект Нернста-
Эттингсхаузена (формула (3))

Поляризация в скрещенном электрическом
и магнитном поле (формула (4))



Эффект Холла (формула (5))

Поляризация в продольном
магнитном поле (формула (6))

Рис. 2. Классификация дислокационных эффектов

где $\bar{v}$ – скорость дислокации, b – подвижность дислокации, c – скорость света, $\Delta\rho_D \equiv \rho_{D1} - \rho_{D2}$ – изменение плотности дислокаций, ρ_{D1} и ρ_{D2} – плотности дислокаций разного механического знака.

Сравним по формулам (1) – (6) величины разности потенциалов между гранями кристалла в различных дислокационных эффектах. Для оценки U воспользуемся следующими значениями параметров: $\sigma_D = 2,5 \cdot 10^{-10}$ Кл/м, $\rho_D = 10^{11}$ м⁻², $n \approx 10^{21}$ м⁻³, $q = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл, $dT/dx \approx 10^3$ К/м, $\alpha \approx 1$, $d = 0,01$ м, $B = 1$ Тл, $E = 1$ В/м, $v = 0,1$ м/с, $\Delta\rho_D = 2 \cdot 10^9$ м⁻², $b \approx 10^{18}$ с/кг.

Для разности потенциалов различных дислокационных эффектов: а) и б) $\cong 10^{-4}$ В, в) $\cong 0,5 \cdot 10^{-4}$ В, г) $\cong 2 \cdot 10^{-4}$ В, д) и е) $\cong 10^{-6}$ В.

Таким образом, наиболее слабыми являются эффекты, связанные с действием силы Лоренца на увлекаемые движущейся дислокацией точечные дефекты. К ним относится дислокационный эффект Холла, а также эффект поляризации в продольном магнитном поле. Разность потенциалов составляет величину порядка 1 мкВ. Для сравнения отметим, что электродвижущая сила Холла в металлах в результате классического эффекта имеет тот же порядок величины. Другие дислокационные эффекты дают величину разности потенциалов между гранями кристалла примерно на два порядка больше.

Из этого следует, что в продольных эффектах разность потенциалов достигает больших значений, чем в поперечных, которые обусловлены действием на точечные дефекты силы Лоренца. Поскольку скорость дефектов, движущихся во внешнем электрическом поле, под действием градиента температуры или увлекаемых дислокацией, невелика, то для их наблюдения необходимо, чтобы кристалл находился в достаточно сильном магнитном поле, величина индукции которого должна быть около одной теслы.

В основе всех описанных выше дислокационных эффектов лежит диффузионный механизм переноса заряда. В ионных

кристаллах процессы проводимости сводятся к диффузии вакансий и междоузельных ионов, вызываемой тепловым возбуждением.

В состоянии термодинамического равновесия ион колеблется в узле кристаллической решетки с частотой $\nu_0 \sim 10^{14}$ Гц и его перескок в соседний узел происходит с частотой

$$\nu = \nu_0 \exp\left(-\frac{E_a}{k_B T}\right), \quad (7)$$

где E_a – энергия активации иона, ν_0 – равновесная частота колебаний иона кристаллической решетки.

Случайные термоактивированные перескоки ионов происходят при не очень низкой температуре довольно часто. Этот процесс называется самодиффузией.

Если в кристалле имеются примеси, то диффузия примесей внедрения совершается также путем перескока из одного узла кристаллической решетки в другой. Диффузионный поток вещества $\vec{i}$ возникает вследствие градиентов концентрации ∇n и температуры. Если градиенты концентрации и температуры невелики, то можно считать, что [3, 4]:

$$\vec{i} = -D\nabla n - bk_T \nabla T. \quad (8)$$

где D – коэффициент диффузии, k_T – термический коэффициент диффузии.

При действии в кристалле внешней силы в выражение (8) необходимо ввести слагаемое, связанное со скоростью, приобретенной дефектом под влиянием этой силы $\vec{F}$. Тогда [3, 4]:

$$\vec{i} = -D\nabla n - bk_T \nabla T + nb\vec{F}. \quad (9)$$

При этом коэффициент диффузии D в соответствии с формулой (7) оказывается экспоненциально зависящим от температуры при $D_0 = \nu_0 a^2$:

$$D \approx \nu_0 a^2 \exp\left(-\frac{E_a}{k_B T}\right). \quad (10)$$

где a – период кристаллической решетки.

Энергетические барьеры, определяющие скорость миграции вакансий, понижены в ядрах дислокаций, что может заметно увеличить диффузионные потоки, так как образуются сквозные каналы ускоренной диффузии, характеризуемые пониженной энергией активации [4].

Оценим время прохождения образца длиной в 1 см частицей при самодиффузии. Для этого запишем средний квадрат расстояния, на которое частица удалится от исходной точки в течение времени t :

$$\bar{r}^2 = \int_0^\infty r^2 w(r, t) dr, \quad (11)$$

где $w(r, t)dr$ – вероятность нахождения частицы в момент времени t на расстоянии от r до $r+dr$ от исходной точки [3, 4]:

$$w(r, t)dr = \frac{1}{2\sqrt{\pi D^3 t^3}} \exp\left(-\frac{r^2}{4Dt}\right) r^2 dr. \quad (12)$$

В результате интегрирования получим $\bar{r}^2 = 6Dt$. Тогда $t = \bar{r}^2 / 6D$.

Для $\bar{r} = 1$ см и $T \approx 300$ К, $\nu \approx 1\text{с}^{-1}$ для кристаллов NaCl и KCl получаем $t \approx \bar{r}^2 / 6\nu a^2 \approx 10^{16}$ с. Однако, если $\nu \approx 10^9 \text{с}^{-1}$, что соответствует температуре $T \approx 1000$ К для NaCl и KCl и $T \approx 300$ К для LiF, то на прохождение кристалла длиной в 1 см частице требуется время $t \approx 10^7 \text{с} \approx 100$ суток.

В случае, когда к кристаллу приложено внешнее электрическое поле, скорость направленного движения частицы определяется соотношением $\nu = bqE$, где $b = a^2 \nu / k_B T$ – подвижность ионов. Тогда при $E = 10$ В/см и $T = 100$ К, $\nu \approx 10^{-15}$ м/с, а при $T = 1000$ К скорость $\nu \approx 10^{-7}$ м/с и

время прохождения частицей расстояния в 1 см $t \approx 10^6 \text{с} \approx 10$ суток, то есть в 10 раз меньше, чем в отсутствии внешнего поля.

Представляет интерес оценить плотность потока вещества по формуле $\vec{i} = mn\vec{v}$. При $m \approx 10^{-26}$ кг, $n \approx 10^{21} \text{м}^{-3}$ и $v \approx 10^{-7}$ м/с, находим величину плотности потока $i \approx 10^{-8}$ г/см² сутки. При этом плотность электрического тока, текущего в кристалле, $j = env \approx 10^{-9}$ А/см².

В дислокационном эффекте поляризации ионного кристалла при наличии в нем градиента температуры возникает поток вещества $\vec{i} = -mDk_T \nabla T / k_B T$. Для оценки i положим $k_T \approx k_B n$ и $\nabla T \approx 10$ К/см, тогда $i \approx 10^{-8}$ г/см² сутки.

Таким образом, градиент температуры 1 К/см вызывает такой же поток вещества, что и внешнее электрическое поле с напряженностью 1 В/см.

Оценим среднюю скорость теплового движения точечных дефектов в кристалле, используя соотношение $\langle v \rangle = a\nu$. Для кристаллов NaCl, KCl при $T = 300$ К имеем $\langle v \rangle \approx 10^{-10}$ м/с, а при $T = 1000$ К $\langle v \rangle \approx 0,1$ м/с. Для кристаллов LiCl, LiBr $\langle v \rangle \approx 0,3$ м/с.

При анализе всех дислокационных эффектов используется приближение слабого магнитного поля, для применения которого необходимо выполнение неравенства $T_c \gg t_0$, где $T_c = 2\pi m / qB$, а $t_0 = 1/\nu$. Тогда при $m = 10^{-26}$ кг и $q = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл и $e = 1$ Тл, $\nu \approx 10^9 \text{с}^{-1}$ получаем $10^{-7} \gg 10^{-9}$. Следовательно, использованное для оценок значение магнитного поля $B \approx 1$ Тл не противоречит данному приближению.

Таким образом, приведенные оценки показывают, что вычисленная в диффузионной модели разность потенциалов между гранями кристалла в различных дислокационных эффектах является вполне измеримой в эксперименте величиной, по которой можно определить некоторые параметры дефектной структуры кристалла, в частности, плотность дислокаций, их скорость и величину заряда [4].

ЛИТЕРАТУРА

1. Тяпунина Н.А. Заряженные дислокации и свойства щелочногалидных кристаллов / Н.А. Тяпунина, Э.Н. Белозерова // УФН. 1988. №4. Т.156. С. 623-717.

2. Сальников А.Н. Заряженные дислокации и точечные дефекты в кристаллах / А.Н. Сальников, С.Г. Гестрин – Саратов: СГТУ, 2002. 222 с.

3. Ландау Л.Д. Теоретическая физика. Гидродинамика. / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц – М.: Наука, 1986. 736 с.

4. Ландау Л.Д. Электродинамика сплошных сред. / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц – М.: Наука, 1982. 619 с.

5. Орлов А.Н. Введение в теорию дефектов / А.Н. Орлов. – М.: Высшая школа, 1983. 144 с.

Сальников Александр Николаевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Физика» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Alexander N. Salnikov – Dr.Sc., Professor, Department of Physics, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 05.02.15, принята к опубликованию 16.02.15

УДК 583.911

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ ЗАРЯЖЕННЫХ ДИСЛОКАЦИЙ С ПРИМЕСНЫМИ АТОМАМИ В ПОЛУПРОВОДНИКАХ

С.Г. Гестрин, К.В. Кочелаевская

INTERACTION OF THE ELECTRIC FIELD OF CHARGED DISLOCATIONS WITH IMPURITY ATOMS IN SEMICONDUCTORS

S.G. Gestrin, K.V. Kochelaevskaya

Исследовано взаимодействие движущихся заряженных дислокаций с примесными атомами в полупроводниковых кристаллах при низких температурах. Показано, что электрическое поле дислокации возбуждает электронные переходы между энергетическими уровнями атомов, что приводит к потере энергии. Получено и исследовано выражение для силы торможения, действующей на единицу длины дислокации при малых и больших скоростях ее движения.

Ключевые слова: полупроводники, заряженные дислокации, примесные атомы, механизмы торможения

Interaction of the moving charged dislocations with impurity atoms in the semiconductor crystals at low temperatures was investigated. It is shown that the electric field of the dislocations excites electronic transitions between the energy levels of atoms, which results in the loss of energy. The expression was found for the damping force per unit length of the dislocation at low and high movement speeds.

Keywords: semiconductors, charged dislocations, impurity atoms, braking mechanisms

Известно, что наличие заряда на дислокациях в ионных и полупроводниковых кристаллах приводит к возникновению некоторых специфических механизмов их торможения [1]. Так, существенную роль может играть взаимодействие с поляронами сильной и слабой связи [2,3], а также экситонами Ванье–Мотта [4]. Ниже показано, что электрическое поле дислокации, движущейся со скоростью v , возбуждает энергетические уровни примесных атомов, и это приводит к диссипации энергии. Рассматриваемый механизм является существенным, когда дислокация движется с такой скоростью, что энергия $\hbar v a^{-1}$ ($\hbar$ – приведенная постоянная Планка, a – постоянная решетки) соизмерима с расстоянием между соседними энергетическими уровнями примесных атомов $\Delta E_{n+1,n} \approx 10^{-2} - 10^{-4} n^{-3}$ эВ (n – номер стационарного состояния). В дальнейшем для определенности все рассмотрение проведем для атомов донорной примеси, которые в

кристаллах с большой диэлектрической проницаемостью ε представляют водородоподобные образования с боровским радиусом $a_d = \varepsilon \hbar^2 m^{*-1} e_0^{-2}$, где m^* – эффективная масса электрона, e_0 – заряд электрона, и со значениями внутренней энергии $E_n = -2^{-1} e_0^4 m^* \varepsilon^{-2} \hbar^{-2} n^{-2}$ [5].

При комнатной температуре тепловая энергия электронов $k_B T$ больше энергии ионизации примесных атомов $E_J = 2^{-1} e_0^4 m^* \varepsilon^{-2} \hbar^{-2}$, и примесь ионизируется. Если принять характерное значение $E_J \approx 0,01$ эВ, то связанные состояния электрона и примесного иона существуют лишь при $T < 100$ К. Таким образом, рассматриваемый механизм торможения является низкотемпературным.

Сила торможения, действующая на заряженную дислокацию, движущуюся со скоростью v , в кристалле с концентрацией диссипативных центров N_d [2-4]:

$$F = \frac{8}{3} \frac{\sigma_D^2 N_d}{\varepsilon^2 \hbar v} \sum_n \left| \vec{d}_{0n} \right|^2 \arctg \frac{\hbar v}{a(E_n - E_0)} \approx \frac{8}{3} \frac{\sigma_D^2 N_d}{\varepsilon^2 \hbar v} \left[\frac{\pi}{2} \sum_n \left| \vec{d}_{0n} \right|^2 - \frac{a}{\hbar v} \sum_n \left| \vec{d}_{0n} \right|^2 (E_n - E_0) \right], \quad (1)$$

где σ_D – заряд, приходящийся на единицу длины дислокации, $\left| \vec{d}_{0n} \right|^2$ – квадрат модуля матричного элемента дипольного момента.

Из (1) получим выражения для F при различных соотношениях между $\hbar v a^{-1}$ и $\Delta E_{n+1,n}$. При выполнении условия $\hbar v a^{-1} \gg E_n - E_0$, воспользовавшись пра-

виллом сумм Томаса–Райхе–Куна, находим:

$$\sum_n \left| \vec{d}_{0n} \right|^2 (E_n - E_0) = \frac{3 \hbar^2 e_0^2}{2 m^*}. \quad (2)$$

Для вычисления суммы $\sum_n \left| \vec{d}_{0n} \right|^2$ водородоподобной системы в (1) воспользуемся результатом, приведенным в [6]:

$$\sum_{n'} \left| \langle n', l+1 \| r \| n, l \rangle \right|^2 = a_d^2 (l+1) \frac{n^2}{2} [5n^2 + 1 - 3l(l+1)], \quad (3)$$

где l – азимутальное квантовое число.

Если основное состояние атома является S – состоянием, ($l = 0$), то из (3) находим:

$$\sum_n \left| \vec{d}_{0n} \right|^2 = 3 \left(\frac{\hbar^2 \varepsilon}{m^* e_0^2} \right)^2 e_0^2 = 3 a_d^2 e_0^2. \quad (4)$$

Подставляя (2) и (4) в (1), получаем

$$F \approx 4\pi \frac{\sigma_D^2 \hbar^3 N_d}{m^* e_0^2} \frac{1}{v} \left(1 - \frac{2 E_J a}{\pi \hbar v} \right). \quad (5)$$

Рассмотрим теперь случай, когда энергия $\hbar v a^{-1} > E_{n+1} - E_n$ лишь начиная с некоторого значения $n \geq n_0$. Тогда в поглощении энергии движущейся дислокации участвуют только атомы, находящиеся в

состоянии с $n \geq n_0 \approx (2aE_J/\hbar v)^{1/3}$. В случае термодинамического равновесия распределение атомов по различным энергетическим состояниям определяется законом Больцмана

$$N_{n,l} = N_d \frac{(2l+1) \exp(-E_n/k_B T)}{\sum_j j^2 \exp(-E_j/k_B T)}. \quad (6)$$

$$F = \frac{8}{3} \frac{\sigma_D^2}{\varepsilon^2 \hbar} \frac{1}{v} \sum_{n > n_0} \sum_{l=0}^{n-1} \sum_{n' > n} \sum_{l'} (N_{n,l} - N_{n',l'}) \left| \vec{d}_{nl,n'l'} \right|^2 \arctg \frac{\hbar v}{a(E_{n'} - E_n)}. \quad (8)$$

В (8) суммирование по n следует проводить лишь до $n = n^*$, где n^* определяется условием $|E_{n'}| \approx k_B T$, так как при $n > n^* \equiv (E_J/k_B T)^{1/2}$ происходит ионизация атома. Правило отбора по четности запрещает электрические дипольные переходы без изменения l , возможны лишь переходы с $l \rightarrow l \pm 1$. Поэтому сумма по l' в (8) содержит два слагаемых $l' = l \pm 1$.

При записи выражения (8) учтено, что электрическое поле движущейся дислокации вызывает переходы примесных атомов не только из состояний с меньшей энергией в состояния с большей энергией, но и наоборот. Подобные переходы сопровождаются выделением энергии. Поскольку в

Здесь $N_{n,l}$ – концентрация атомов, внешний электрон которых обладает энергией E_n и азимутальным числом l .

Для случая $E_n - E_l \gg k_B T$ из (6) находим

$$N_{n,l} \approx N_d \exp(-E_J/k_B T) (2l+1) \exp(-E_n/k_B T). \quad (7)$$

Для силы торможения имеем

состояниях с большими значениями n всегда находится меньшее количество атомов, то поглощение энергии преобладает над выделением, и результирующая сила F является силой торможения.

Если энергии $\hbar v a^{-1}$ достаточно только для переходов электронов между соседними атомными уровнями, то в (8) в сумме по n' остается лишь одно слагаемое с $n' = n+1$.

Подставляя (7) в (8), при выполнении условия

$$2a(k_B T)^{3/2} \hbar^{-1} E_J^{-1/2} < v < 4a(k_B T)^{3/2} \hbar^{-1} E_J^{-1/2}, \quad (9)$$

получим выражение для силы торможения дислокации.¹

$$F \approx \frac{16a_d^2 e_0^2 \sigma_D^2}{\varepsilon^2 \hbar v} N_d \exp\left(-\frac{E_J}{k_B T}\right) \int_{n_0}^{n^*} \frac{1}{n} \exp\left(\frac{E_J}{k_B T n^2}\right) \arctg\left(\frac{\hbar v n^3}{2aE_J}\right) dn. \quad (10)$$

Для приближенного вычисления интеграла в (10) учтем, что величина $\arctg(\hbar v n^3/2aE_J) \approx \pi/4$, так как ее аргу-

мент близок к единице.

Тогда из (10) находим

$$F \approx \frac{4\pi \hbar^3 \sigma^2}{m^{*2} e_0^2 v} N_d \exp\left(-\frac{E_J}{k_B T}\right) \int_{n_0}^{n^*} \frac{1}{n} \exp\left(\frac{E_J}{k_B T n^2}\right) dn. \quad (11)$$

¹ При выводе формулы (10) были использованы соотношения: $\sum_{l=0}^{n-1} (2l+1) = n^2$ и $\left| \langle n', l' | \vec{r} | n, l \rangle \right|^2 \sim 3 \frac{a_d^2}{n'^3}$ – асимптотическое выражение для матричного элемента, справедливое при заданных значениях n и l и большом значении n' . Предполагалось также выполнение неравенства $N_{n,l} \gg N_{n+1,l'}$.

Выполним теперь замену переменной интегрирования $1/n^2 = x$:

$$F \approx \frac{2\pi\hbar^3\sigma_D^2}{m^*e_0^2v} N_d \exp\left(-\frac{E_J}{k_B T}\right) \int_{1/n^{*2}}^{1/n_0^2} \frac{1}{x} \exp\left(\frac{E_J}{k_B T} x\right) dx. \quad (12)$$

Учитывая, что подинтегральное выражение в (12) содержит медленно меняющийся множитель $1/x$ и быстро растущий экспоненциальный множитель, для при-

ближенного вычисления выносим $1/x$ за знак интеграла с подстановкой верхнего предела интегрирования, где быстро растущая экспонента достигает максимума

$$\int_{1/n^{*2}}^{1/n_0^2} \frac{1}{x} \exp\left(\frac{E_J}{k_B T} x\right) dx \approx n_0^2 \frac{k_B T}{E_J} \left(\exp\left(\frac{E_J}{k_B T n_0^2}\right) - \exp\left(\frac{E_J}{k_B T n^{*2}}\right) \right). \quad (13)$$

Учитывая, что первое экспоненциальное слагаемое в правой части (13) намного превосходит второе, оконча-

тельное выражение для силы торможения, действующей на дислокацию, принимает вид¹:

$$F \approx 2\pi \frac{\sigma_D^2 \hbar^3 N_d}{m^* e_0^2} \frac{k_B T}{E_J} \frac{1}{v} \left(\frac{2aE_J}{\hbar v} \right)^{2/3} \exp\left[\frac{E_J^{1/3}}{k_B T} \left(\frac{\hbar v}{2a} \right)^{2/3} \right] \exp\left(-\frac{E_J}{k_B T}\right). \quad (14)$$

Если условие $\hbar v a^{-1} > E_{n'} - E_n$ выполняется, начиная с $n = n_0$, и возможны переходы с

изменением n на любую величину в интервале от n_0 до n^* , то вместо (10) находим

$$F \approx \frac{16a_d^2 e_0^2 \sigma_D^2}{\varepsilon^2 \hbar v} N_d \exp\left(-\frac{E_J}{k_B T}\right) \int_{n_0}^{n^*} \int_{n+1}^{n^*} n^2 \exp\left(\frac{E_J}{k_B T n^2}\right) \frac{1}{n'^3} \operatorname{arctg}\left(\frac{\hbar v}{a(E_{n'} - E_n)}\right) dn' dn. \quad (15)$$

Для приближенного вычисления интеграла в (15) заменим $\operatorname{arctg}(\hbar v/a(E_{n'} - E_n))$

на $\pi/2$, так как его аргумент значительно превосходит единицу.

Из (15) имеем

$$F \approx \frac{4\pi a_d^2 e_0^2 \sigma_D^2}{\varepsilon^2 \hbar v} N_d \exp\left(-\frac{E_J}{k_B T}\right) \int_{n_0}^{n^*} \exp\left(\frac{E_J}{k_B T n^2}\right) \left(1 - \frac{n^2}{n^{*2}}\right) dn. \quad (16)$$

Выполним в (16) замену переменной $n/n^* = x$:

$$F \approx \frac{4\pi a_d^2 e_0^2 \sigma_D^2}{\varepsilon^2 \hbar v} N_d \exp\left(-\frac{E_J}{k_B T}\right) n^{*2} \int_{n_0/n^*}^1 \exp\left(\frac{1}{x^2}\right) (1-x)^2 dx. \quad (17)$$

¹ Следует отметить, что, в отличие от выражений (5) и (9) для силы F , остающихся конечными при $a \rightarrow 0$, аналогичный предельный переход в (14) формально дает бесконечное значение для F . Однако такой предельный переход в (14) является неправомерным, поскольку противоречит неравенствам, ограничивающим применимость данного выражения.

Преобразуем теперь интеграл, входящий в (17):

$$\int_{n_0/n^*}^1 \exp\left(\frac{1}{x^2}\right)(1-x)^2 dx = \int_{n_0/n^*}^1 \frac{2}{x^3} \exp\left(\frac{1}{x^2}\right) \frac{x^3}{2} (1-x)^2 dx. \quad (18)$$

Множитель $(2/x^3)\exp(1/x^2)$ представляет собой быстро меняющуюся на интервале интегрирования функцию, достигаю-

щую максимума на нижнем пределе.

Приближенно из (18) находим

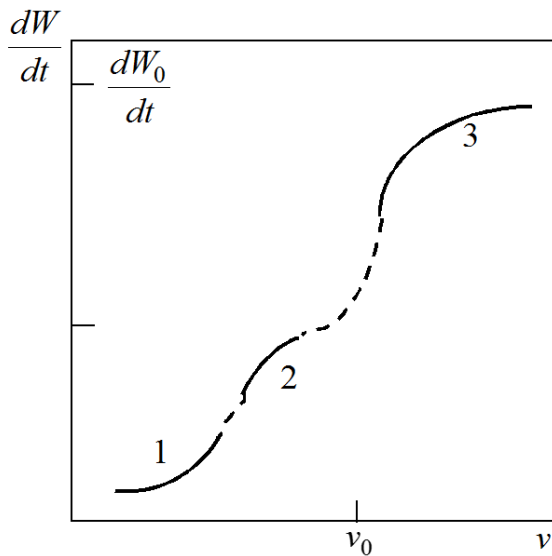
$$\begin{aligned} \int_{n_0/n^*}^1 \frac{2}{x^3} \exp\left(\frac{1}{x^2}\right) \frac{x^3}{2} (1-x)^2 dx &\approx -\frac{1}{2} \left(\frac{n_0}{n^*}\right)^3 \left(1 - \frac{n_0}{n^*}\right)^2 \int_{n_0/n^*}^1 d\left[\exp\left(\frac{1}{x^2}\right)\right] = \\ &= \frac{1}{2} \left(\frac{n_0}{n^*}\right)^3 \left(1 - \frac{n_0}{n^*}\right)^2 \left[\exp\left(\frac{n^*}{n_0}\right)^2 - e\right] \approx \frac{1}{2} \left(\frac{n_0}{n^*}\right)^3 \exp\left(\frac{n^*}{n_0}\right)^2. \end{aligned} \quad (19)$$

Подставляя (19) в (17), получаем окончательное выражение для силы торможения

в рассматриваемом предельном случае

$$F \approx 4\pi \frac{\sigma_D^2 \hbar^2 N_d}{m^{*2} e^2} \frac{k_B T a}{v^2} \exp\left[\frac{E_J^{1/3}}{k_B T} \left(\frac{\hbar v}{2a}\right)^{2/3}\right] \exp\left(-\frac{E_J}{k_B T}\right). \quad (20)$$

Зависимость dW/dt от v схематически представлена на рисунке.



Качественная зависимость мощности потерь $dW/dt = Fv$ от скорости дислокации. Участки кривой 1, 2 и 3, изображенные сплошной линией, соответствуют выражениям (14), (20) и (5)

При малой скорости движения дислокации в поглощении ее энергии участвует лишь малое количество атомов примеси,

электроны которых находятся на уровнях энергии с большими n . С ростом скорости и энергии $\hbar v a^{-1}$ вовлеченными в поглощение оказываются атомы с электронами, занимающими более низкие энергетические уровни, а также становятся возможными переходы электронов между уровнями энергии с n' и n , отличающимися более чем на единицу. В результате $dW/dt = Fv$ растет вначале пропорционально $v^{-2/3} \exp\left[E_J^{1/3} (\hbar v / 2a)^{2/3} (k_B T)^{-1}\right]$, как следует из (14), а затем пропорционально $v^{-1} \exp\left[E_J^{1/3} (\hbar v / 2a)^{2/3} (k_B T)^{-1}\right]$ в соответствии с формулой (20). Резкое увеличение dW/dt происходит при $v = v_0$, когда энергия $\hbar v a^{-1}$ становится равной $E_2 - E_1$. При этом в поглощение вовлекаются атомы, находящиеся в основном состоянии.

Как видно из (5), выражение для силы F в этом случае не содержит малый множитель $\exp(-E_J/k_B T)$, входящий в (14) и (20). Если $E_2 - E_1 \approx E_J \approx 0,001$ эВ, то $v_0 \approx 10^4$ см/с.

Одним из основных механизмов, ограничивающих скорость движения дислокаций в полупроводниках, является их взаимодействие с точечными дефектами. К ним относятся примесные атомы внедрения и замещения, собственные точечные дефекты и небольшие их кластеры. Точечные дефекты создают вокруг себя упругое поле, убывающее с расстоянием r по закону $1/r^2$, которое может отталкивать или притягивать дислокацию. В обоих случаях оно тормозит движение дислокации, так как на отрыв от дефекта требуется сила F , которая обеспечивается линейным натяжением дислокации. Таким образом, для преодоления стопора необходимо, чтобы приложенное к кристаллу напряжение σ превосходило некоторое критическое значение σ_s . Преодолению стопоров способствуют термические флуктуации, время ожидания которых $\tau = \nu_D^{-1} \exp[\varepsilon(\sigma)/k_B T]$, где $\varepsilon(\sigma)$ – энергия активации преодоления стопора, ν_D – частота порядка дебаевской. В среднем через время τ дислокация срывается с одного стопора и движется с большой скоростью к другому. Время движения между стопорами обычно значительно меньше времени ожидания. Средняя скорость дислокации в плоскости скольжения с концентрацией стопоров $c = L^{-2}$ равна $v = L/\tau = L\nu_D \exp[-\varepsilon(\sigma)/k_B T]$

и значительно меньше скорости ее движения между стопорами. Как показывает эксперимент, максимально возможная средняя скорость движения дислокаций в полупроводниках не превосходит 0,1 см/с. Скорость движения между стопорами на несколько порядков больше и лимитируется другими механизмами торможения, в том числе и тем, который рассмотрен в данном разделе.

При скорости движения дислокации между стопорами порядка 10 см/с получим $\hbar v a^{-1} \approx 10^{-18}$ эрг/с, что сравнимо с $\Delta E_{n+1,n} \approx 10^{-4}/n^3$ эВ уже при $n=5$. Используя для оценки силы, действующей на дислокацию, выражение (20) и подставляя в него следующие значения величин: $\sigma_D = 0,01 e_0 a^{-1}$, $e_0 = 4,8 \cdot 10^{-10}$ ед. СГСЭ, $a \approx 10^{-8}$ см, $m = 0,01 m_e \approx 10^{-29}$ г, $N_d = 10^{14}$ см $^{-3}$, $v = 10$ см/с, $\hbar \approx 10^{-27}$ эрг с, $E_j = 10 k_B T$ находим $F \sim 10^2$ дин/см. Разделив F на длину вектора Бюргерса $b \approx 10^{-8}$ см, определим напряжение сдвига необходимое для движения дислокации $\tau = Fb^{-1} \approx 10^{10}$ дин см $^{-2}$.

Таким образом, при низкой температуре, когда фононные механизмы торможения не существенны, рассмотренный выше механизм торможения дислокации при ее движении между стопорами может стать основным.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гестрин С.Г. Механизмы торможения заряженных дислокаций в ионных кристаллах / С.Г. Гестрин, А.Н. Сальников, Т.В. Самородина // Известия высших учебных заведений. Физика. 2005. №8. С.76–81.
2. Гестрин С.Г. Торможение заряженных дислокаций поляронами в ионных кристаллах при низких температурах / С.Г. Гестрин // Физ. низ. темп. 1994. Т.20. №1. С.71–75.
3. Гестрин С.Г. Поглощение дислокационных фононов поляронами сильной и слабой связи в щелочногалогенидных кристаллах при низких температурах / С.Г. Гестрин, А.Н. Сальников, Т.В. Самородина // Известия ВУЗов. Физика. 1999. №9. С.18–22.
4. Гестрин С.Г. Торможение заряженных дислокаций экситонами Ванье-Мотта в полупроводниках при низких температурах / С.Г. Гестрин // Известия ВУЗов. Физика. 1998. Т.41. №12. С.107–109.
5. Киттель Ч. Введение в физику твердого тела / Ч. Киттель. – М.: Наука, 1978. 792 с.
6. Берестецкий В.Б. Теоретическая физика. Т.IV. Квантовая электродинамика / В.Б. Берестецкий, Е.М. Лифшиц, Л.П. Питаевский. – М.: Наука, 1989. 724с.

Гестрин Сергей Геннадьевич – доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой «Инженерная физика» Саратовского государственного аграрного университета имени Н.И. Вавилова; профессор кафедры «Физика» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Кочелаевская Кристина Владимировна – кандидат философских наук, доцент кафедры «Инженерная физика» Саратовского государственного аграрного университета имени Н.И. Вавилова

Sergey G. Gestrin – Dr. Sc., Head: Department of Engineering Physics, N.I. Vavilov Saratov State Agrarian University; Professor, Department of Physics, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Kristina V. Kochelaevskaya – Ph.D., Associate Professor, Department of Engineering Physics, N.I. Vavilov Saratov State Agrarian University

Статья поступила в редакцию 26.01.15, принята к опубликованию 16.02.15



ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ СВЧ-МОДИФИКАЦИИ ВОЛОКНИСТОГО БАЗАЛЬТОВОГО НАПОЛНИТЕЛЯ НА ПАРАМЕТРЫ СИНТЕЗА И ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА ФЕНОЛОФОРМАЛЬДЕГИДНОГО КАТИОНИТА НА ЕГО ОСНОВЕ

Н.А. Пенкина, Т.П. Устинова, Р.М. Розов, В.В. Варюхин

THE INFLUENCE OF MICROWAVE MODIFICATION IN THE FIBER BASALT FILLER ON THE SYNTHESIS PARAMETERS AND FUNCTIONAL PROPERTIES OF PHENOLFORMALDEHYDE CATIONICS

N.A. Penkina, T.P. Ustinova, R.M. Rozov, V.V. Varyukhin

Обоснована целесообразность СВЧ-модификации базальтовых наполнителей при получении катионообменных волокнистых материалов методом поликонденсационного наполнения. Проведена оценка адгезионных свойств и параметров пористости модифицированных волокон и нитей. Изучено их влияние на структуру и функциональные характеристики разработанного катионита.

Ключевые слова: катионообменный волокнистый материал, базальтовый наполнитель, СВЧ-модификация, структурные особенности, свойства

Базальтовые волокнистые материалы относятся к числу перспективных армирующих систем в технологии поликонденсационного наполнения полимерных композиционных материалов [1,2]. Однако предварительные исследования возможности применения базальтовых нитей и волокон в интеркаляционной технологии катионообменных волокнистых материалов (КОВМ) в качестве волокнистого наполнителя показали низкую эффективность синтезируемого катионита по основной эксплуатационной характеристике - статической обменной емкости (табл. 1). Это определило необходимость

Expediency of obtaining the cation-exchange fibrous materials by the polycondensation filling method with UHF-modification of basalt fillers was proved. The adhesive properties and parameters of porosity of modified fibers and yarns were evaluated. Their influence on the structure and functional characteristics of the developed cation exchanger was investigated.

Keywords: cation-exchange fibrous material, basalt filler, UHF-modification, structural features, properties

модификации исследуемых нитей и волокон.

На основании анализа результатов ранее проведенных работ по синтезу катионообменных композитов на основе волокнистых наполнителей [3,4] для модификации базальтовых нитей и волокон были выбраны химическая, крио- и СВЧ-обработка (табл. 1).

Из приведенных данных следует, что все указанные методы модификации базальтовых волокнистых материалов приводят к увеличению статической обменной емкости КОВМ. Однако введение предварительной обработки исследуемых воло-

кон и нитей химически агрессивной серной кислотой снижает их прочностные характеристики и требует значительного времени, как и использование предварительной криообработки, что в обоих случаях резко снижает технологичность процесса получения КОВМ. СВЧ-обработка отличается простотой, технологичностью и обеспечивает сохранение свойств волокнистого

наполнителя. Из литературных данных [5,6] известно, что СВЧ-обработка способствует аморфизации полимера и, очевидно, должна приводить к более глубокой диффузии мономеров в объем нити при поликонденсационном наполнении, увеличению доли катионообменной матрицы и повышению статической обменной емкости синтезированных на их основе КОВМ.

Таблица 1

Влияние методов модификации базальтовых волокнистых материалов на статическую обменную емкость КОВМ на их основе

Волокнистый наполнитель	Статическая обменная емкость КОВМ, мг-экв/герц			
	исходный	криообработанный	химически обработанный	СВЧ-обработанный
Бн	0,1	0,45	0,7	0,9
Бв	0,4	0,8	1,2	1,3

Полученные экспериментальные данные свидетельствуют о том, что увеличение статической обменной емкости в большей степени характерно для КОВМ на основе базальтового волокна, что, очевидно, связано с его развитой текстильной структурой (вата), с большей поверхностью контакта наполнителя с синтезируемой матрицей.

Для определения оптимальных параметров СВЧ-модификации базальтового волокна использовали метод трехфакторного планирования эксперимента, с помощью которого установлены режимы СВЧ-модификации, обеспечивающие получение КОВМ с статической обменной

емкостью, равной 1,4 мг-экв/г и степенью отверждения, равной 99,8 %.

Известно, что свойства композитов в значительной степени зависят от поверхностных явлений, которые происходят на границе раздела фаз, и определяются такими характеристиками, как смачивание наполнителя и адсорбция полимера поверхностью волокна. Для исследования смачивания исходных и СВЧ-обработанных базальтовых волокон и нитей связующим был применен метод капиллярного поднятия. В качестве смачивающей жидкости использовали пропиточный состав, содержащий смесь парафенолсульфокислоты с формалином (рис. 1).

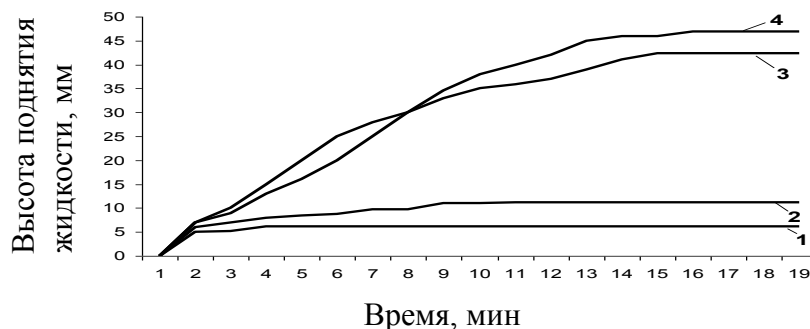


Рис. 1. Кинетические кривые смачивания: 1 — исходное базальтовое волокно; 2 - СВЧ- обработанное базальтовое волокно; 3 - исходная базальтовая нить; 4 - СВЧ-обработанная базальтовая нить

Полученные результаты свидетельствуют о том, что смачиваемость исследуемых волокнистых материалов определяется их текстильной структурой и изменением свойств их поверхности в результате модификации - у нитей высота поднятия жидкости на 30-35 мм выше, чем у волокон. Для модифицированных волокон и нитей максимальное значение высоты поднятия жидкости на 5-7 мм больше по сравнению с исходными волокнистыми материалами. Повышение адгезионной активности у СВЧ-обработанных базальтовых нитей и волокон, очевидно, связано с изменением микротопографии поверхности волокнистого наполнителя в результате модификации и, в частности, с изменением его сорбционных свойств.

Для определения сорбционных свойств использовалась базальтовая нить, так как

она отличается более высокой смачиваемостью. Сорбционные свойства базальтовой нити оценивали по изменению характеристик ее пористости.

Для оценки параметров пористой структуры базальтовой нити использовалась теория объемного заполнения микропор, предложенная Дубининым, которая позволяет количественно описать параметры адсорбционных равновесий в широких интервалах их изменения для любого микропористого адсорбента [7]. На основании результатов предварительного эксперимента была выбрана система: базальтовая нить - дихлорэтан - фенол. Экспериментально были получены изотермы адсорбции фенола на исходной и СВЧ-обработанной базальтовой нити при различных температурах (рис. 2).

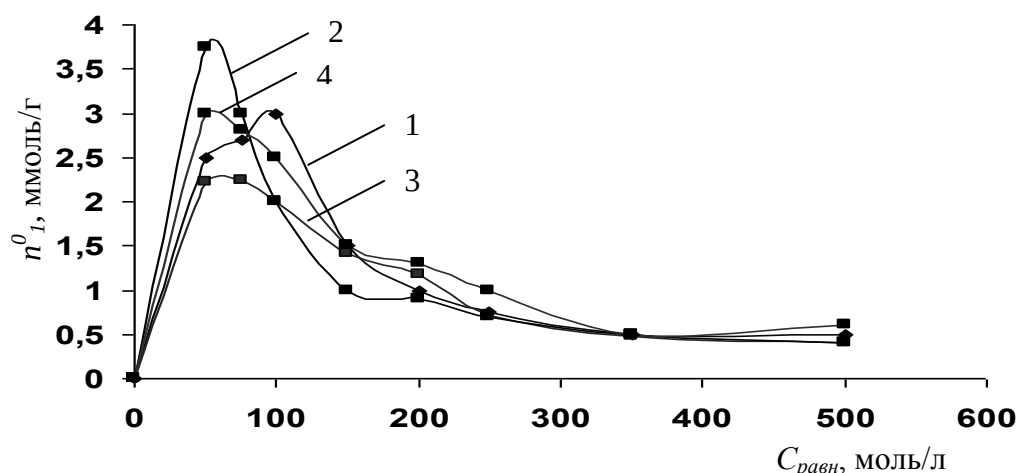


Рис. 2. Изотермы адсорбции исходной и СВЧ-обработанной базальтовой нити: 1 - исходная при 25 °C; 2 - исходная при 50 °C; 3 - СВЧ-обработанная при 25 °C; 4 - СВЧ-обработанная при 50 °C

Из полученных экспериментальных данных следует, что характер изотерм адсорбции для исходных и СВЧ-обработанных базальтовых нитей аналогичен и, как и следовало ожидать, с увеличением температуры адсорбция фенола волокнистой системой возрастает вследствие ослабления энергии адсорбционной связи растворителя (дихлорэтана) и увеличения доступной для фенола поверхности нити, то есть конкурирующая способность молекул растворителя становится малой.

Представление изотерм адсорбции фенола исходной и СВЧ-обработанной базальтовой нити в линейных координатах показало, что линейность хорошо выполняется при $n = 3$, что характерно для микропористых сорбентов. При этом теоретическая изотерма адсорбции практически совпадает с экспериментальной, что позволило использовать теорию объемного заполнения микропор для определения параметров пористости исследуемых волокнистых систем (табл. 2).

Таблица 2

Параметры пористой структуры базальтовой нити

Вид нити	n^c_i , моль/г	$E \cdot 10^{-3}$, кДж/моль	X , Нм(Å)
Исходная	2,7	20,0	0,6 (6,3)
СВЧ-обработанная	2,0	24,5	0,4 (4,1)

Примечание: n^c_i - предельная величина адсорбции; E - характеристическая энергия сорбции; X - ширина пор исследуемых нитей

Из данных таблицы видно, что размер пор, определенный для исходной и СВЧ-обработанной базальтовой нити (0,4 - 0,6 нм) соответствует размеру пор на микропористых сорбентах, то есть исследуемые нити характеризуются микропористой топографией поверхности.

В связи с повышением адгезионной активности СВЧ-модифицированных базаль-

товых волокон и нитей в работе изучено влияние волокнистого наполнителя на процесс синтеза олигомеров и их последующее отверждение при поликонденсационном наполнении методом дифференциальной сканирующей калориметрии по величине теплового эффекта реакции, начальной, конечной и максимальной температурах процесса (рис. 3).

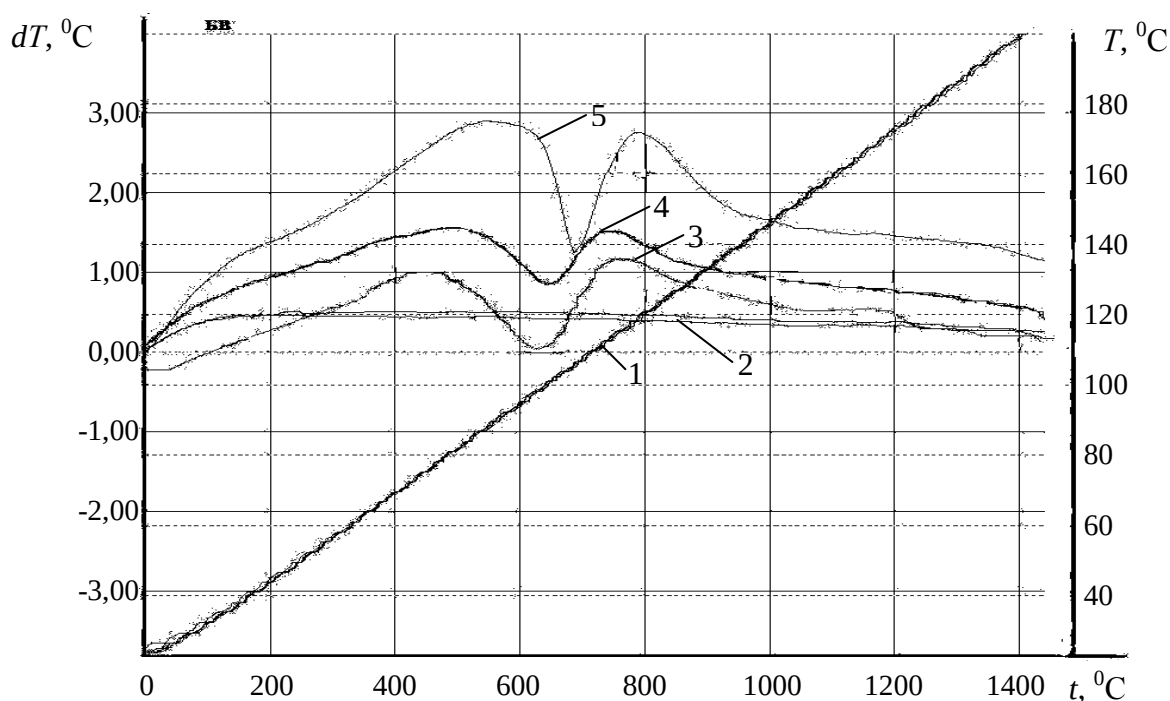


Рис. 3. Кривые ДСК: 1 - исходное БВ; 2 - СВЧ-обработанное БВ; 3 - пропиточный состав + исходное БВ; 4 - пропиточный состав + СВЧ-обработанное БВ; 5 - пропиточный состав

Из полученных экспериментальных данных видно, что введение базальтового волокна не изменяет характера кривых, описывающих процессы формирования матрицы - сохраняются четко выраженные пики, соответствующие синтезу олигомеров и отверждению фенолоформальдегидного катионита. Однако в присутствии во-

локнистого наполнителя синтез олигомеров и отверждение протекают интенсивнее, но с меньшими тепловыми эффектами (табл. 3), что свидетельствует о получении композита с более короткими олигомерными звеньями и меньшей частотой их сшивки, что обеспечивает большую доступность функциональных групп катионита.

Данные дифференциально - сканирующей калориметрии

Тип отверждаемой темы	Синтез		Отверждение		$\Sigma\Delta H$, Дж/г
	$\frac{T_H-T_K}{T_{MAX}}, ^\circ\text{C}$	ΔH , Дж/г	$\frac{T_H-T_K}{T_{MAX}}, ^\circ\text{C}$	ΔH , Дж/г	
Пропиточный состав	$\frac{25,1-100,7}{89,2}$	981,9	$\frac{106,8-155,5}{120,3}$	274,7	1256,6
Пропиточный состав + исходное БВ	$\frac{25,1-98,8}{75,3}$	316,9	$\frac{508,4-156,2}{118,2}$	664,7	981,6
Пропиточный состав + СВЧ-обработанное БВ	$\frac{25,4-99,8}{83,1}$ 81,1	844,	$\frac{101,6-155,7}{112,5}$	264,1	1108,2

Примечание: ΔH - тепловой эффект реакции

В то же время при армировании фенолоформальдегидной катионообменной матрицы базальтовыми волокнистыми материалами повышается термостойкость катионита. Методом термогравиметрического анализа показано, что введение базальто-

вого волокна в полимерную матрицу способствует смещению температурного интервала деструкции в область более высоких температур с одновременным снижением потерь массы (табл. 4).

Таблица 4

Данные термогравиметрического анализа

Исследуемый образец	Температурный интервал дегидратации, $^\circ\text{C}$	Потери массы, %	Температурный интервал деструкции, $^\circ\text{C}$	Потери массы, %	Суммарные потери массы, %	Энергия активации процесса деструкции, кДж/моль
КОВМ на основе исходного БВ	$\frac{53,1-111,7}{95}$	10,5	$\frac{203,1-572,3}{453}$	44,5	55	253
КОВМ на основе СВЧ-обработанного БВ	$\frac{45,5-121,6}{87,8}$	14,1	$\frac{178,4429,5-508,8}{508,8}$	40,5	54,6	276
Катионообменная матрица	$\frac{66,3-112,9}{98}$	12,4	$\frac{137,3-570,8}{533}$	46,8	59,2	161

При этом повышается энергия активации процесса деструкции на 92 кДж/моль для КОВМ на основе исходного базальтового волокна и на 115 кДж/моль для КОВМ на основе СВЧ-обработанного базальтового волокна по сравнению с катионообменной матрицей.

Комплексное изучение эксплуатационных свойств разработанных КОВМ (табл. 5)

подтвердило, что введение базальтового волокна, модифицированного СВЧ-обработкой, улучшает эксплуатационные свойства катионита, в частности, значительно (более чем в 2 раза) повышается его статическая обменная емкость при одновременном улучшении остальных функциональных характеристик композиционного материала.

Эксплуатационные свойства КОВМ на основе модифицированного базальтового волокна

Состав катинита	Удельный объем ионита в Н-форме, см ³ /г	Полная статическая обменная емкость, мг-экв/г	Динамическая обменная емкость, мг-моль/дм ³	Окисляемость фильтрата, мг/г, не более	Оптическая стабильность, %
Фенолоформальдегидный катионит	2,8-3,0	0,9-1,1	490-510	1,7-1,9	90-92
КОВМ на основе СВЧ-обработанного БВ	3,2-3,6	1,4-2,0	-	1,7-1,9	97,8-98,3
КОВМ на основе СВЧ-обработанного некондиционного БВ	3,4-3,8	1,8-2,4	470-490	1,7-1,8	98,0-98,4

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют об эффективности использования СВЧ-модифицированных базальтовых волокнистых материалов, ис-

пользуемых для получения катионообменных волокнистых материалов методом поликонденсационного наполнения.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Артеменко С.Е.** Полимерные композиционные материалы на основе углеродных, базальтовых и стеклянных волокон / С.Е. Артеменко, Ю.А. Кадыкова // Химические волокна. 2008. №1. С.30 - 32.

2. **Артеменко С.Е.** Физико-химические основы технологии базальтопластиков. Структура. Свойства. / С.Е. Артеменко, Ю.А. Кадыкова. Саратов. СГТУ. 2012. 134 с.

3. **Титоренко Е.И.** Структура и свойства ионообменных волокнистых материалов различного функционального назначения / Автореферат дисс. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук. 2000. Саратов. 19 с.

4. **Щелокова А.В.** Ионообменные композиционные материалы на основе модифицированных полипропиленовых нитей / А.В. Щелокова, Т.П. Устинова, Е.И. Тито-

ренко // Пластические массы. 2006. №5. С.50 - 52.

5. **Архангельский Ю.С.** Направляющие линии, функциональные устройства, элементы технологических установок / Ю.С. Архангельский, С.В. Тригорлый, В.А. Гильманова // Межвуз. науч. сб. Саратов: СГТУ, 1997. С.62 - 67.

6. **Гильманова В.А.** Технологические СВЧ установки, функциональные электродинамические устройства. // Межвуз. науч. сб. Саратов: СГТУ, 1998. С.110 - 113.

7. **Родзивилова И.С.** Роль адсорбционных процессов в формировании структуры и свойств полимерных композиционных материалов. / И.С. Родзивилова и др. Саратов: СГТУ, 2003. 52 с.

Пенкина Наталия Александровна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Химическая технология» Энгельсского технологического института Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Nataliya A. Penkina – Ph.D., Associate Professor, Department of Chemical Engineering, Engels Technological Institute of Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Устинова Татьяна Петровна – доктор технических наук, заведующая кафедрой «Химическая технология» Энгельсского технологического института Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Розов Роман Михайлович – аспирант, лаборант кафедры «Материаловедение» Энгельсского технологического института Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Варюхин Василий Владимирович – аспирант кафедры «Химическая технология»; младший научный сотрудник лаборатории «Ионика твердого тела» Энгельсского технологического института Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Tatyana P. Ustinova – Dc.Sc., Head: Department of Chemical Engineering, Engels Technological Institute of Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Roman M. Rozov – Postgraduate, Laboratory Assistant, Department of Materials Science, Engels Technological Institute of Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Vasiliy V. Varyukhin – Postgraduate, Department of Chemical Engineering, Engels Technological Institute of Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 10.03.15, принята к опубликованию 15.03.15



СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

УДК 621.365.5

О ЗАДАЧАХ РАЗРАБОТКИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ УСТАНОВКАМИ И ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЕМ ПРЕДПРИЯТИЙ

С.В. Тригорлый, Ю.Б. Томашевский, В.С. Алексеев, Д.В. Джема

DESIGNING INTELLIGENT SYSTEMS TO CONTROL ELECTRO-TECHNOLOGICAL PLANTS AND POWER CONSUMPTION AT ENTERPRISES

S.V. Trigorly, Yu.B. Tomashevskiy, V.S. Alekseev, D.V. Dzhema

Рассмотрены задачи разработки интеллектуальных систем управления электропотреблением предприятий, сверхвысокочастотными электротехнологическими установками периодического и методического действия. Решение указанных задач направлено на оптимизацию параметров технологических процессов, повышение энергетической эффективности электротехнологических установок, снижение затрат за потребленную электрическую энергию и мощность.

Ключевые слова: интеллектуальные системы управления, электропотребление, электротехнологические установки, сверхвысокочастотная термообработка, энергоэффективность

Увеличение стоимости энергоносителей приводит к необходимости повышения энергетической эффективности разрабатываемых и эксплуатируемых на промышленных предприятиях электротехнологических установок (ЭТУ), являющихся наиболее энергоемкими потребителями электрической энергии. Для промышленных предприятий в условиях ужесточения требований к суточному графику потребления

The paper considers the problems referring the design of intelligent systems to control power consumption at enterprises, and microwave electro-technological plants of periodic or methodical action. Solving these problems is aimed at optimization the parameters of the process, improvement the energy efficiency of electro-technological installations, reduction of the costs for the consumed electric energy and power capacity.

Keywords: intelligent control system, electro-consumption, electro-technological plants, microwave heat treatment, energy efficiency

электрической энергии актуальной задачей является оптимизация электропотребления с целью снижения оплаты за потребленную электрическую энергию и мощность.

Для решения указанных выше задач предлагается использование интеллектуальных систем управления (ИСУ). В данной работе рассмотрена постановка задач применения ИСУ при разработке ЭТУ на примере сверхвысокочастотных

ЭТУ, для повышения энергоэффективности эксплуатируемых ЭТУ и для управления режимами электропотребления на предприятиях.

Современные методы управления технологическими процессами на основе компьютерных технологий получили широкое распространение на многих промышленных предприятиях. Период с 80-х годов XX века до настоящего времени характеризуется использованием в различных областях науки и техники интеллектуальных систем управления (ИСУ) [1, 2]. В частности, ИСУ эффективно применяются для оптимизации различных технологических процессов в промышленности, в электроэнергетике, теплотехнологиях и др.

К интеллектуальным системам управления относятся, в частности, системы нечеткого регулирования («fuzzy control» - «нечеткое управление») [2], а также ИСУ с использованием нейронных систем и др. Отметим важные на наш взгляд положения, связанные с актуальностью применения интеллектуальных систем управления и их преимуществами перед известными классическими концепциями управления [2]:

1. Наблюдается *тенденция увеличения сложности математических моделей систем управления*, обусловленная желанием повысить их адекватность и учесть максимальное число различных факторов, влияющих на процесс управления. Однако традиционные методы построения моделей автоматизированных систем управления не приводят к нужным результатам, если исходное описание проблемы, подлежащей решению, заведомо является неточным и неполным. Следует отметить также, что стремление получить исчерпывающую информацию для построения точной математической модели сложного технологического процесса может привести к потере времени и средств, поскольку построить такую модель в ряде случаев затруднительно.

2. В этой связи целесообразно воспользоваться методами, которые специально ориентированы на *построение моделей, учитывающих неполноту и неточность исходных данных*. Именно в таких ситу-

ациях технология нечеткого управления оказывается наиболее эффективной, поскольку за последнее десятилетие на ее основе было решено большое количество задач управления.

3. Дальнейшее развитие интеллектуальных технологий дает возможность создавать принципиально новые устройства и технологии с высокими техническими характеристиками и функциональными возможностями.

Рассмотрим сначала задачи, связанные с применением ИСУ для СВЧ электротехнологических установок. При разработке высокопроизводительных и энергоемких СВЧ установок в условиях повышения требований к экономической эффективности промышленных технологий большое значение приобретает достижение необходимого качества термообработки (скорости и равномерности нагрева, сушки и др.) за счет оптимизации технологических процессов и установок и управления их рабочими режимами.

В электротехнологических установках методического действия СВЧ антенна перемещается относительно объекта нагрева (или нагреваемый объект перемещается относительно антенны на транспортирующей ленте). Для таких установок актуально решение следующих задач управления: перевод системы из начального состояния в заданное, стабилизация и слежение [3]. Электротехнологические установки периодического действия, в которых после загрузки в установку объект остается неподвижным, с точки зрения задач управления можно рассматривать как частный случай установок методического действия.

Математическая модель процесса СВЧ нагрева включает систему взаимосвязанных уравнений Максвелла и тепломассопереноса, которая должна быть дополнена соответствующими краевыми условиями. Математическое описание оптимизируемой системы включает также формулировку одной из задач управления с критериями оптимизации и соответствующими ограничениями.

При разработке системы управления следует учесть следующие обстоятельства:

1. Измеряемые параметры технологического процесса (например, температура, влажность), как правило, дают информацию лишь о локальном значении в заданный момент времени. Распределение, например, поля температуры по всему объему объекта определяется на основе имеющейся математической модели. Таким образом, при решении задачи оптимального управления нагревом должны учитываться как результаты измерений (температура, мощность СВЧ генератора и др.), так и данные компьютерного моделирования.

2. Основными управляющими воздействиями в процессах СВЧ нагрева и сушки являются:

- мощность СВЧ генератора (в зависимости от типа генератора может применяться импульсный режим регулирования мощности или непрерывное ее изменение во времени);
- частота СВЧ генератора (при использовании многочастотного режима);
- температура нагретого воздуха (при дополнительном поверхностном нагреве с целью выравнивания температуры по объему объекта);
- скорость (расход) воздуха в вентиляционной системе удаления паров влаги;
- скорость транспортировки объекта нагрева (в установках методического типа);
- расстояние до металлической отражающей стенки, положение которой можно изменять с помощью специального электропривода для смещения максимумов и минимумов напряженности электрического поля в объекте нагрева с целью выравнивания поля температур.

На рис. 1 в качестве примера приведена блок-схема интеллектуальной системы управления СВЧ установкой методического типа для нагрева и сушки диэлектрических материалов. На рисунке показаны основные узлы установки, система датчиков технологического процесса и управляющих воздействий (СВЧ мощности, скорости транспортировки объекта термообработки, температуры воздуха для дополнительного

нагрева) и элементы интеллектуальной системы управления.

Важной отличительной особенностью интеллектуальной системы управления по сравнению с традиционными автоматизированными системами управления является подключение к базе знаний через механизм вывода (рис.1). База знаний предполагает наличие информации о принципах построения и целях функционирования системы управления, специфике использования различных алгоритмов управления, данных об особенностях исполнительных механизмов и управляемого объекта [1]. При этом анализ имеющихся знаний с учетом текущей информации от измерительных датчиков обеспечивает настройку алгоритмов системы управления и выполнение заданных функций.

Основой компьютерного моделирования ИСУ применительно к СВЧ электротехнологическим установкам являются разработанные численные модели процессов электродинамики и теплопереноса в СВЧ установках с камерами бегущей волны и лучевого типа периодического и методического действия [3]. Предложенные алгоритмы оптимизации термообработки материалов в указанных установках позволяют учитывать возможности автоматического управления технологическими процессами. В табл. 1 в качестве примера представлены исходные данные для решения задач оптимального управления электротехнологическими установками с критериями оптимизации и контролируемыми параметрами технологического процесса.

Рассмотрим возможности повышения энергетической эффективности эксплуатируемых электротехнологических установок и оптимизации электропотребления предприятий на основе ИСУ. Проведенные энергетические обследования различных промышленных предприятий, использующих энергоемкие электротехнологические установки, выявили ряд общих проблем, связанных с их низкой энергетической эффективностью.

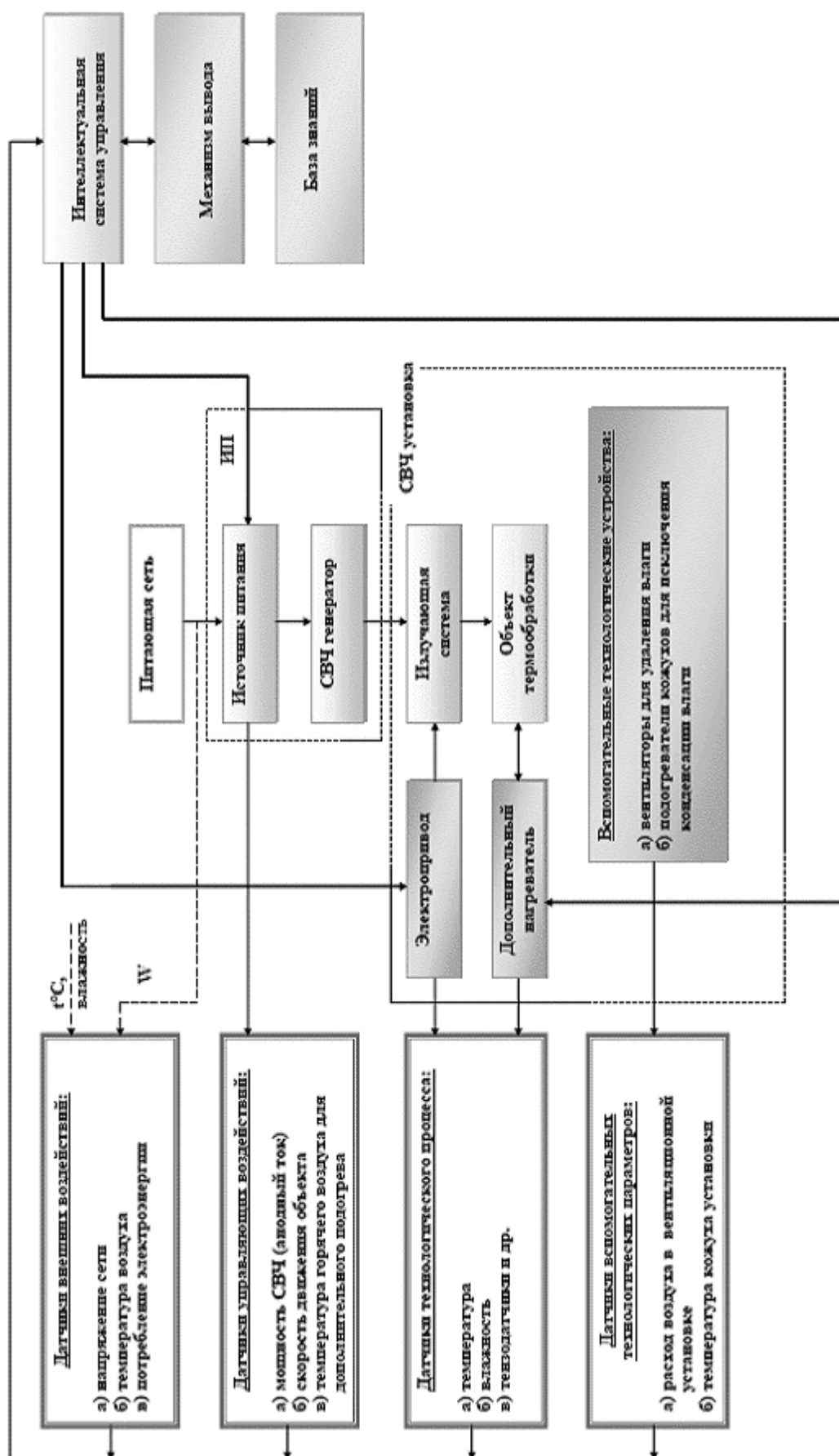


Рис. 1. Блок-схема интеллектуальной системы управления СВЧ ЭТУ

Сведения

об электротехнологических установках и процессах с критериями оптимального управления
и контролируемыми параметрами технологического процесса

Наименование технологического процесса и установки	Контролируемые параметры технологического процесса (ТП)			Регулирующие параметры ТП (управляющие воздействия)			Внешние воздействия, требующие контроля и внесения поправок на управляющие воздействия	
	Наименование параметра	Ограничения на параметры ТП (критерии оптимизации)	Измерительный датчик и прибор	Наименование управляющего воздействия	Ограничения на управляющее воздействие	Измерительный датчик и прибор	Наименование параметра	Измерительный датчик и прибор
1. Нагрев диэлектрического плоского объекта в СВЧ камерах лучевого типа	Температура наружной поверхности объекта (с двух сторон объекта)	$\text{Max } T(M,t) \leq T_{\text{доп}}$	Пирометр излучения	Мощность СВЧ излучения (изменяется за счет анодного тока магнетрона или за счет импульсного регулирования)	Величина максимальной мощности (или анодного тока)	Амперметр (анодный ток)	Температура воздуха	Термометр сопротивления
	Потребление электроэнергии	$\Theta \leq \Theta_{\text{доп}}$	Измеритель мощности и электронный прибор учета электроэнергии	Скорость перемещения транспортирующей ленты (или антенны) задается регулируемым электроприводом	Максимальная и минимальная скорость движения	Измеритель скорости движения	Напряжение питающей сети	Цифровой вольтметр
2. Нагрев материалов в камерных печах сопротивления	Температура наружной поверхности объекта	$\text{Max } T(M, t) \leq T_{\text{доп}}; \Theta \leq \Theta_{\text{доп}}$	Пирометр излучения (Траб > 1250°C); Термометр сопротивления (Траб < 1250°C)	Мощность нагрева (изменяется за счет тока нагревателей)	Величина максимального тока нагревателей	Амперметр (ток нагревателей)	Температура воздуха в рабочей камере	Термометр сопротивления

Суточные графики активной мощности для одного из промышленных предприятий имеют вид, представлен на рис. 2. Значительная нагрузка в ночные часы (до 30 % от максимальной нагрузки в дневное время) объясняется тем, что ночью, кроме освещения остается в работе часть технологического оборудования (компрессоры, электропечи и другие электроустановки). Значительная доля из этого электрооборудования приходится на электропечи сопротивления (ЭПС) различного назначения.

Энергетические обследования показали, что многие электропечи в ночные часы

не загружены, их оставляют включенными до утренней смены, поскольку в отсутствие автоматической системы управления при отключении питания незагруженной ЭПС вывести ее на нужный тепловой режим к утренней смене затруднительно. В этой связи для повышения энергетической эффективности эксплуатируемых ЭТУ могут быть использованы ИСУ при соответствующей проработке вопросов суточной загрузки ЭТУ и технологических требований к режимам термообработки изделий.

Одной из задач использования ИСУ применительно к нагреву, например, в

камерной ЭПС является задача перевода системы из начального состояния в заданное при следующих критериях оптимальности: точность перевода (по отклонению температуры) и быстродействие

перевода. В этом случае в качестве ограничений обычно используются требуемая по условиям технологии равномерность нагрева и минимальное потребление электрической энергии (табл.1)

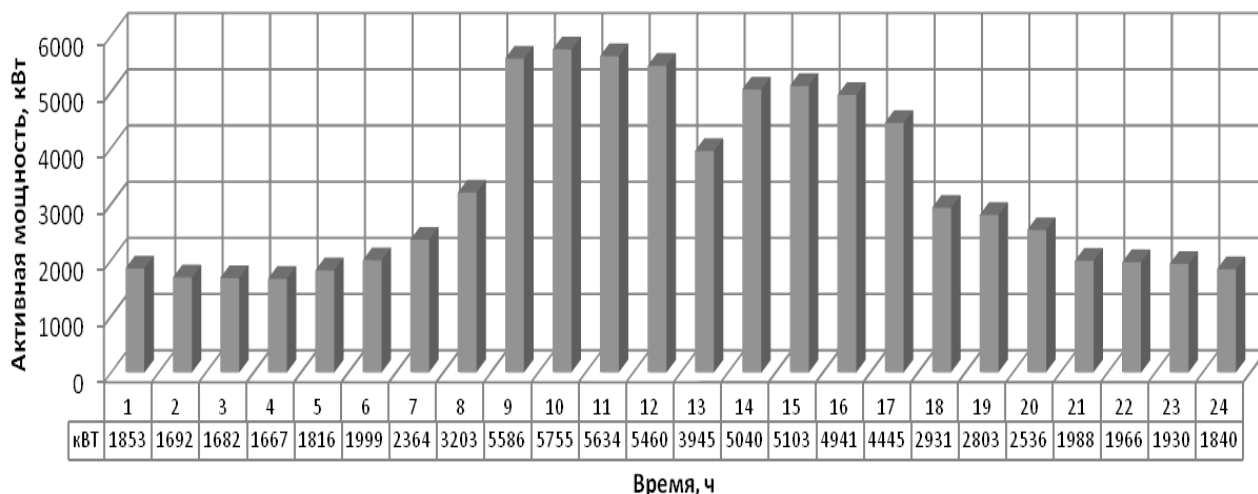


Рис. 2. Суточный графики нагрузок по предприятию

Для потребителей энергоресурсов вопросы оптимизации электропотребления и уменьшения оплаты за электроэнергию были всегда актуальными. Но в последние годы начал действовать оптовый и розничный рынок электрической энергии и мощности, и требования к планированию суточного потребления стали более жесткими, поэтому вопросы автоматизации учета потребленной электроэнергии и регулирования электропотребления приобретают большое значение.

Отметим, что с 1 января 2012 г. введены ценовые категории электроэнергии. Всего их шесть. В соответствии с Постановлением Правительства РФ №442 от 04.05.2012 г. особый порядок с 1 июля 2013 года установлен для потребителей с максимальной мощностью энергопринимающих устройств не менее 670 кВт. Такие потребители имеют право выбрать третью-шестую ценовые категории. В табл. 2 указаны сведения о ценовых категориях, обязанностях планирования почасового потребления и требованиях по учету электрической энергии [4]. Из анализа приведенных в табл. 2 данных следует:

1. Большинство предприятий и органи-

заций должно иметь автоматизированный почасовой учет электроэнергии (оплата зависит от почасового потребления мощности и энергии).

2. Крупные потребители, использующие 5 и 6 ценовые категории, должны планировать свое почасовое потребление электроэнергии на сутки вперед. Это дает возможность потребителям не оплачивать ошибки гарантирующего поставщика в планировании почасового потребления при покупке на оптовом рынке электрической энергии и мощности (ОРЭМ) в рамках балансирующего рынка. То есть потребители первой – четвертой ценовых категорий платят за усредненные отклонения фактического почасового потребления от планового гарантирующего поставщика (примерно 5% цены электроэнергии без учета мощности), а потребители пятой и шестой ценовой категории оплачивают только свои собственные отклонения.

В этой связи для управления электропотреблением предприятия необходимо решение задачи слежения [3] - поддержание минимального отклонения фактического часового электропотребления от заявленного почасового суточного графика.

Сведения о ценовых категориях

Ценовая категория	Способ трансляции цены покупки электроэнергии и мощности на оптовом рынке	Тариф на передачу	Обязанность планирования почасового потребления	Необходимый учет электроэнергии
I	Одноставочная цена	Одноставочный	Отсутствует	Интегральный
II	Одноставочная цена с дифференциацией по зонам суток			Зонный или почасовой
III	Дифференцированная по часам цена электроэнергии и оплата фактически потребленной мощности			Двухставочный
IV		Одноставочный		
V		Двухставочный		
VI		Двухставочный		

Использование интеллектуальной системы управления электропотреблением совместно с автоматизированной информационно-измерительной системой коммерческого учета электрической энергии (АИИС КУЭ) на предприятии позволило бы решать следующие задачи:

- на основе сведений о фактическом суточном электропотреблении, полученных с помощью АИИС КУЭ, и статистических данных о суточном, месячном и годовом потреблении давать прогноз о

почасовом суточном потреблении и формировать соответствующую заявку в энергоснабжающую организацию;

- проводить экономические расчеты с целью определения оптимальной ценовой категории;

- осуществлять регулирование электропотребления в течение суток (с использованием выделенных потребителей-регуляторов мощности), снижать оплату за потребленную электрическую энергию и мощность.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Макаров И.М.** Интеллектуальные системы автоматического управления / Под ред. И.М. Макарова, В.М. Лохина. – М: ФИЗМАТЛИТ, 2001. 576 с.

2. **Деменков Н.П.** Нечеткое управление в технических системах: учеб. Пособие / Н.П. Деменков. – М.: Изд-во МГТУ им. Баумана, 2005. 200 с.

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

4. ООО «ЭНКОСТ» [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://encost.ru>. Дата обращения (22.03.2015).

Тригорлый Сергей Викторович – кандидат технических наук, заведующий кафедрой «Автоматизированные электротехнологические установки и системы» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Sergey V. Trigorly – Ph.D., Head: Department of Automated Electro-Technological Plants and Systems, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Томашевский Юрий Болеславович – доктор технических наук, заведующий кафедрой «Системотехника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Алексеев Вадим Сергеевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматизированные электротехнологические установки и системы» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Джема Дмитрий Вячеславович – инженер кафедры «Автоматизированные электротехнологические установки и системы» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Yuri B. Tomashevskiy – D.Sc., Head: Department of Systems Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Vadim S. Alekseyev – Ph.D., Associate Professor, Department of Automated Electro-Technological Plants and Systems, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Dmitriy V. Dzhema – Engineer, Department of Automated Electro-Technological Plants and Systems, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 10.02.15, принята к опубликованию 16.02.15



СОЦИАЛЬНЫЙ АСПЕКТ

УДК 621.365.5

СТУДЕНТЫ-ЭЛЕКТРИКИ ОБ УЧЕБНОМ ПРОЦЕССЕ НА ПРИМЕРЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ФАКУЛЬТЕТА СГТУ ИМЕНИ ГАГАРИНА Ю.А.

Т.А. Кирьянова, Е.М. Гришина, Ю.С. Архангельский

FUTURE ELECTRICAL ENGINEERS ABOUT THE EDUCATIONAL PROCESS (A CASE STUDY OF THE POWER ENGINEERING FACULTY AT YURI GAGARIN STATE TECHNICAL UNIVERSITY OF SARATOV)

Т.А. Kiriyanova, E.M. Grishina, Yu.S. Arkhangelskiy

Приведены результаты и анализ опроса студентов-электриков энергетического факультета СГТУ имени Гагарина Ю.А.

Ключевые слова: социологическое исследование; оптимизация организации учебного процесса

The paper presents the summary findings and analysis from a survey conducted for the students of the power engineering faculty at Yuri Gagarin State Technical University of Saratov.

Keywords: sociological research; optimization of the educational process

В ноябре-декабре 2014 г. на энергетическом факультете Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А. было проведено социологическое исследование, направленное на оптимизацию организации учебного процесса. Опрашивались студенты-электрики дневного обучения 1-4 курсов бака-

лаврской подготовки по направлению «Электроэнергетика и электротехника» и 5 курса подготовки специалистов по профилю «Электротехнологические установки и системы» направления «Электроэнергетика и электротехника».

Результаты опроса в процентах приведены в таблице.

Результаты опроса студентов-электриков энергетического факультета СГТУ имени Гагарина Ю.А.

Вопросы	Курс				
	ЭЛЭТ-1	ЭЛЭТ-2	ЭЛЭТ-3	ЭЛЭТ-4	ЭТС-5
1	2	3	4	5	6
1. Я узнал о наличии в СГТУ имени Гагарина Ю.А. специальности, на которой я обучаюсь					
☐ от родителей, которые закончили данную специальность (факультет)	11,1	8,7	6,7	16,7	7,7
☐ от друзей, которые учатся на ней (на факультете)	11,1	26,1	6,7	2,8	7,7
☐ из информации, представленной на сайте СГТУ	57,9	34,8	60	66,7	69,2
☐ из интернета	11,1	21,7	13,3	13,8	7,7
☐ другое (школа, день открытых дверей, случайно)	8,8	8,7	13,3	-	7,7

1	2	3	4	5	6
2. Я выбрал данную специальность, потому что	43,9	27,8	13,3	15,8	50
☐ интересная специальность	31,7	29,8	20	39,5	30
☐ востребованная специальность	-	21,3	53,4	18,4	-
☐ перспективная специальность	2,4	4,4	-	2,6	-
☐ хорошая зарплата	5,1	-	-	-	-
☐ семья энергетиков	12,1	12,3	13,3	13,2	10
☐ по советам родителей, знакомых	2,4	-	-	-	-
☐ работаю энергетиком	2,4	4,4	-	10,5	10
☐ целевик, давно выбрал, важная специальность					
3. Расписание занятий удобно для посещения					
☐ да	75	62	73,4	54,5	100
☐ нет	14,6	19	13,3	30	-
☐ затрудняюсь ответить	10,4	19	13,3	15,5	-
4. Посещать все лекции и практические занятия в течение семестра мне мешает					
☐ график моей работы	2	6	-	-	41,6
☐ частые болезни	10	4	6,7	6,7	-
☐ занятия в спортивных секциях/творческих кружках	8	8	6,7	6,7	-
☐ я могу найти материал лекций в интернете и не считаю обязательным посещение занятий	4	12	-	6	-
☐ мне не интересно присутствовать на занятиях, так как я нахожу более полезную информацию по специальности в интернете	2	2	6,7	-	8,4
☐ ничего не мешает	70	68	79,1	53	50
☐ другое (рано вставать, некоторые ППС неинтересно ведут занятия, военкомат, далеко живу)	4	-	-	6	-
5. При поступлении в университет					
☐ я не знал, что посещение лекций и практических занятий строго обязательно	6	4,4	-	12,1	7,7
☐ я знал, что посещение занятий является строго обязательным	78	64	80	60,6	76,9
☐ я вообще не задумывался над этим	16	31,6	20	27,3	15,4
6. Отчислять за пропуски занятий, считаю, что это					
☐ правильно, так как существуют правила, закрепленные в уставе вуза, и их нужно соблюдать	39,1	27,3	26,7	22,6	7,2
☐ правильно, так как только личное общение с преподавателем способствует накоплению знаний	13	20,5	40	19,4	21,4
☐ неправильно, так как это нарушает мои права					
☐ неправильно, так как во многих зарубежных вузах практикуется свободное посещение занятий	2,2	-	6,7	3,2	-
	15,2	25	-	29	50
☐ неправильно, так как я пропускаю только те занятия, на которых я не узнаю ничего нового и полезного для моей будущей профессиональной деятельности	28,3	25	26,6	22,6	21,4
☐ другое (не отчислять, если студент сдает сессию, отчислять, если много пропусков)	2,2	2,2	-	3,2	-
7. Я считаю, что материалы лекций и практических занятий и те знания, которые я получаю при посещении,					
☐ значительно мне помогут в будущей работе	23,3	15,2	53,4	21,9	23,1
☐ как правило, пригодятся в будущей работе	60,5	43,5	33,3	62,5	7,7
☐ могут иногда пригодиться в будущей работе	14	28,3	13,3	15,6	61,5
☐ сомневаюсь, что мне они пригодятся в работе	2,2	13	-	-	-
☐ вообще не пригодятся в работе	-	-	-	-	7,7
☐ другое	-	-	-	-	-

Продолжение таблицы

1	2	3	4	5	6
8. Я считаю, что необходимо обязательно посещать					
☐ лекции и практические занятия по профессиональным дисциплинам	38,6	63,6	53,4	39,4	23,1
☐ лекции и практические занятия по всем дисциплинам в течение всего периода обучения	45,5	31,8	33,3	43,3	38,4
☐ только практические и лабораторные занятия по профессиональным дисциплинам	4,4	4,6	13,3	2,2	7,7
☐ только практические и лабораторные занятия по всем дисциплинам в течение всего периода обучения	4,5	17,4	-	2	23,1
☐ только лекции по профессиональным дисциплинам	-	-	-	-	-
☐ только лекции по всем дисциплинам в течение всего периода обучения	-	-	-	3	7,7
☐ другое (ППС должны заинтересовать студентов)	-	-	-	3	-
9. Мои ожидания от обучения по специальности					
☐ полностью оправдались	29,3	13	13,3	19,4	7,7
☐ практически оправдались	53,7	50	66,7	48,4	30,8
☐ частично оправдались	14,6	34,8	20	29	53,8
☐ не оправдались совсем	3,4	2,2	-	3,2	7,7
☐ другое	-	-	-	-	-
10. По моему мнению для улучшения посещаемости занятий необходимо (количество ответов, предложенных студентами)					
☐ мотивировать посещение занятий	4	10	3	9	1
☐ не надо ничего менять	2	3	-	1	2
☐ сделать свободным посещение	1	2	-	-	-
☐ сделать занятия более интересными	2	2	1	6	-
☐ строже контролировать посещение	3	3	-	2	-
☐ начинать занятия на час позже	4	2	1	3	1
☐ повысить стипендию	2	-	2	2	-
☐ принимать на учебу больше девушек	2	-	-	-	1
☐ больше практических занятий	1	1	2	1	1
☐ сообщать родителям	-	1	-	1	-
☐ преподаватель должен лучше работать	-	1	1	2	-

Оценим ответы студентов на заданные им вопросы.

Вопрос 1. В последние 5 лет большинство абитуриентов узнавали о возможности получить высшее образование в области электроэнергетики и электротехники в СГТУ из приведенной на сайте университета информации (от 34,8 до 69,2 %). Если учесть, что от 7,7 до 21,7 % абитуриентов получили ту же информацию из интернета, то количество абитуриентов, получивших информацию о подготовке в СГТУ электриков с помощью информационных технологий, становится от 56,5 до 80,5 %, так что следует признать современные информационные технологии доминирующим источником информации абитуриентов.

От ППС энергетического факультета можно слышать, что об их факультете школьникам рассказывают их родители-энергетики. Однако опрос студентов показал, что лишь 6,7 - 16,7 % абитуриентов узнали о подготовке в СГТУ энергетиков от родителей.

Наконец, университет большое внимание в профориентации абитуриентов уделяет «Дням открытых дверей», беседам преподавателей СГТУ со старшеклассниками в школах. Но согласно опроса лишь два студента сослались на информацию, полученную на встрече в школе с преподавателем СГТУ и лишь два студента – на «День открытых дверей».

Вопрос 2. Большинство абитуриентов выбирает подготовку в области электро-

энергетики и электротехники, потому что эта специальность востребована (от 20 до 39,5 %), перспективна (от 18,4 до 53,4 %), то есть ориентируется на общественную значимость отрасли. Для многих (от 13,3 до 50 %) важно, что эту специальность будет интересно изучать, а вот будущая заработная плата учитывается немногими (от 2,4 до 4,4 %).

Влияние родителей на выбор электрической специальности сравнительно невелико (от 10 до 13,3 %), и лишь один студент сослался на то, что он из семьи энергетиков.

Вопрос 3. От 54,5 до 100 % студентов считают, что расписание учебных занятий их полностью устраивает. Правда, на 4 курсе бакалавриата 30 % студентов считает, что расписание мешает им посещать занятия, но следует иметь в виду, что на этом курсе студенты начинают совмещать учебу с работой (14,5 %, см. вопрос 4).

Вопрос 4. Посещению занятий студентам больше всего мешает совмещение учебы с работой (14,5 % на 4 курсе и 41,6 % на 5 курсе). Однако большинству студентов посещать занятия ничего не мешает (от 50 до 79,1 %).

Вопрос 5. Большинство студентов (от 60,6 до 78 %) уже при поступлении в университет знали, что в вузе посещение всех занятий обязательно.

Вопрос 6. В ответах на вопрос об отчислении за пропуск занятий мнения студентов разделились. Так, одобряют отчисления в общей сложности от 38,6 до 67,7 % студентов, а против отчисления от 33,1 до 71,4 %. Весьма велико количество студентов, которые пропускают занятия, так как не узнают на них ничего нового и полезного для своей будущей профессиональной деятельности (от 21,4 до 28,3 %).

Вопрос 7. Разошлись студенты и в оценке полезности материалов лекций и практических занятий. От 15,2 до 53,4 % считают, что знания, получаемые ими за годы учебы, значительно помогут в будущей работе, а от 13,3 до 61,5 % считают, что эти знания лишь иногда могут пригодиться. 7,7 % студентов 5 курса уверены,

что полученные в университете знания им не пригодятся вовсе.

Вопрос 8. Разделил студентов и вопрос о том, какие занятия они считают посещать необходимо. От 31,8 до 45,5 % студентов считают, что посещать надо все занятия, от 23,1 до 53,4 % - занятия только по профессиональным дисциплинам, но от 13,3 до 39,5 % студентов считают, что достаточно посещать лишь практические занятия или только лекции.

Вопрос 9. От 38,5 до 83 % студентов считают, что их ожидания от обучения полностью или практически оправдались, но у значительного числа студентов ожидания на этот счет оправдались лишь частично или не оправдались совсем (от 17 до 61,5 %).

Вопрос 10. Что же нужно сделать для улучшения посещаемости занятий? 27 студентов предлагают мотивировать студентов к посещению занятий, 11 человек – перенести на один час начало занятий, сделать занятия более интересными, 8 человек – ничего не менять, строже контролировать посещаемость, 6 человек – больше практических занятий, повысить стипендию.

Анализ ответов студентов-электриков на вопросы анкеты дает основание для, во-первых, разработки мер по повышению эффективности «Дней открытых дверей» и профориентационной работы преподавателей университета в школах.

Во-вторых, при профориентационной работе среди абитуриентов следует особенно отмечать востребованность, перспективность специальности, подчеркивать, как интересно учиться этой специальностью.

В-третьих, сохраняя принципы составления расписания учебных занятий, следует рассмотреть возможность начинать утренние занятия на час позже.

В-четвертых, следует определить рамки допустимого отвлечения студента на работу, мешающую ему посещать все учебные занятия, планировать работу спортивных секций и творческих кружков так, чтобы она не отвлекала студента от посещения занятий, совершенствовать воспитатель-

ную работу со студентами, объясняя им взаимное дополнение знаний, полученных на учебных занятиях и в интернете.

В-пятых, с начала занятий на первом курсе нужно разъяснить студентам обязательность выполнения Устава университета, в частности, обязательное посещение учебных занятий.

В-шестых, усилить контроль за посещаемостью студентами учебных занятий.

В-седьмых, при проведении занятий преподавателям рекомендуется обращать внимание студентов на то, что знания, получаемые на этих занятиях, значительно помогут им в будущей работе.

В-восьмых, кураторам и преподавате-

лям дисциплин всех циклов учебного плана следует на своих занятиях объяснять студентам важность для их профессиональной подготовки посещения всех занятий, стоящих в расписании.

В-девятых, выпускающим кафедрам следует выяснить, почему на протяжении всех лет учебы у ряда студентов полностью не оправдались ожидания от обучения специальности.

И, наконец, в-десятых, следует разработать систему мотивации студентов к активной учебной работе, привлекать к учебе на энергофаке больше девушек, а также строго контролировать выполнение студентами Устава университета.

Кириянова Татьяна Алексеевна – заместитель начальника Управления контроля качества образования, руководитель отдела аттестации, лицензирования и аккредитации Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

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

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

Tatiana A. Kiriyanova – Deputy Head: Administration for Education Quality Control, Head: Department of Certification, Licensing and Accreditation, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

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

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

Статья поступила в редакцию 01.02.15, принята к опубликованию 16.02.15

УВАЖАЕМЫЕ ЧИТАТЕЛИ!

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

РАЗВИТИЕ ФИЗИЧЕСКОГО ОБРАЗОВАНИЯ В ТЕХНИЧЕСКИХ ВУЗАХ РОССИИ В КОНЦЕ 20-ГО ВЕКА

А.Н. Сальников

DEVELOPMENT OF PHYSICAL EDUCATION IN TECHNICAL COLLEGES RUSSIA IN LATE 20TH CENTURY

A.N. Salnikov

Изложены основные идеи естественно-научного образования в техническом ВУЗе применительно к многоуровневой системе высшего образования. Показана возможность его реализации с помощью обучающих двухуровневых систем, практически реализованных в Саратовском государственном техническом университете на примере физики.

Ключевые слова: *естественнонаучное образование, обучающая система, физика*

В конце 20-го века Россия переживала сложный исторический этап, связанный с принципиальными изменениями социального и политического строя, всех областей жизни. Переход к демократическому государству затрагивал все, в том числе, и образование, и требовал становления качественно новой системы высшего образования, включающей фундаментальное естественнонаучное и гуманитарное образование. Происходила смена образовательной парадигмы. Демократическому государству необходимо, чтобы народ был достаточно образован для осуществления демократии и самоуправления. Поэтому центр тяжести смещается от профессионализации к образованности. Осуществление этой парадигмы могло быть достигнуто в рамках проводимой реформы высшей школы, ориентированной на усиление фундаментализации высшего образования и переход к многоуровневой системе образования.

Введение многоуровневой структуры высшего образования в Российской Феде-

The paper presents the basic ideas related with teaching science at technical universities in terms of the multi-level system of higher education. The author demonstrates the possibilities for implementation of these ideas in teaching physics through a two-level training system practiced at the State Technical University of Saratov.

Keywords: *science education, training system, physics*

рации преследовало цель расширения возможностей высшей школы в удовлетворении многообразных культурно-образовательных запросов личности и общества, повышение гибкости общекультурной, научной и профессиональной подготовки специалистов с учетом изменяющихся потребностей новой экономики и рынка труда.

Эта структура учитывала отечественный и зарубежный опыт развития высшей школы и Международную стандартную классификацию образования, принятую ЮНЕСКО.

Существовавшая система образовательных-профессиональных программ высшего образования по специальностям вошла составной частью в новую многоуровневую структуру высшего образования. Смысл ее состоит в следующем.

Многоуровневая структура высшего образования реализуется различными по содержанию и срокам обучения образовательно - профессиональными программами трех уровней.

Образовательно-профессиональные программы первого уровня включают двухлетнее обучение по образовательным программам бакалавров и профессиональную подготовку в объеме, предусмотренном для специалистов со средним профессиональным образованием. Общая продолжительность обучения по этим программам составляет 3 – 3,5 года, и лицам, успешно завершившим двухлетнее обучение, выдается свидетельство о неполном высшем образовании, а освоившим всю программу первого уровня – диплом о неполном высшем образовании с присвоением квалификации согласно перечню специальностей среднего профессионального образования, утвержденному в установленном порядке.

Основа высшего образования – базовое высшее образование – составляют образовательно-профессиональные программы по направлениям обучения, охватывающим все области науки, техники и культуры – программы второго уровня. Они предоставляют возможность овладеть системой научных знаний о человеке и обществе, истории и культуре, получить фундаментальную естественнонаучную подготовку и основы профессиональных знаний, но направлениям обучения. Лица, освоившие программы второго уровня, подготовлены для продолжения образования по образовательно-профессиональным программам третьего уровня или самостоятельного овладения профессиональными знаниями и навыками, необходимыми для адаптации к трудовой деятельности.

Срок обучения по программам базового высшего образования не менее 4 лет на основе общего среднего образования, и лицам, получившим базовое высшее образование, выдается диплом о высшем образовании с присвоением степени бакалавра и указанием направления обучения.

Образовательно-профессиональные программы третьего уровня имеют целью подготовку специалистов, готовых к самостоятельной профессиональной творческой деятельности.

Программы этого уровня могут быть реализованы в двух формах.

На основе общего среднего образования – за счет существующих программ подготовки дипломированных специалистов с высшим образованием, основанных на объединении в единую программу по специальности образовательных и профессиональных курсов с общей продолжительностью обучения 5-6 лет. Лицам, завершившим обучение по этим программам, выдается диплом о высшем образовании с присвоением квалификации по полученной специальности.

На основе базового высшего образования – за счет дальнейшего развития и дифференциации образовательно-профессиональных программ базового высшего образования.

Образовательно-профессиональные программы для лиц, имеющих степень бакалавра, могут быть направлены на подготовку магистров наук или дипломированных специалистов с высшим образованием.

Программа подготовки магистра наук предполагает преимущественно исследовательский характер его будущей деятельности. Срок ее реализации 2-3 года. По ее окончании выдается диплом о высшем образовании с присвоением степени магистра наук и указанием специальности.

Завершившим программу подготовки дипломированного специалиста выдается диплом о высшем образовании с присвоением квалификации по полученной специальности. Срок реализации такой программы, в зависимости от квалификации, получаемой специалистом, от одного до трех лет.

Лица, завершившие любую образовательно-профессиональную программу третьего уровня, имеют право поступления в аспирантуру.

Были приняты перечни направлений и специальностей подготовки, государственные требования к содержанию и качеству высшего образования – стандарты – на всех его уровнях.

Для реализации многоуровневого образования была реорганизована высшая школа, в структуре которой на базе политехнических институтов появились техни-

ческие университеты с естественнонаучными и гуманитарными специальностями и факультетами.

Переход к многоуровневой системе и введение базового высшего образования был стратегическим решением, направленным на усиление фундаментализации высшего образования.

В течение многих лет научно-педагогическая общественность страны проявляла чрезвычайную озабоченность по поводу неудовлетворительного состояния преподавания фундаментальных естественнонаучных дисциплин – прежде всего физики и математики – в учебных заведениях разного уровня. Происходила утрата замечательных традиций российского естественнонаучного образования и его престижа в мировом сообществе. Многочисленные аварии и экологические катастрофы, например Чернобыль, ярко демонстрировали безграмотность узко подготовленных специалистов и населения в основах естественных наук. В средствах массовой информации получил значительное распространение антинаучный синдром, господствовали представления магии и астрологии. Усиливался разрыв с позициями мирового сообщества, рассматривающего естественнонаучное образование как равноправную компоненту фундаментального образования.

За последнее десятилетие в центральной печати были опубликованы статьи ряда известных ученых и педагогов, в которых указывалось на продолжающуюся деградацию фундаментального естественнонаучного образования. Этот вопрос неоднократно поднимался на пленумах научно-методических советов по естественнонаучным дисциплинам, совещаниях заведующих кафедрами вузов, заседаниях отделений Академии Наук и научных сообществ страны. Несмотря на значительные усилия научно-педагогической общественности, общее состояние преподавания фундаментальных естественнонаучных дисциплин продолжало ухудшаться с каждым годом. Особое опасение вызывало отсутствие у

многих руководителей учебных заведений понимания значения естествознания как фундаментальной интегрирующей дисциплины и существенной части общечеловеческой культуры. Даже среди специалистов не получил должного распространения современный взгляд на совокупность естественнонаучных дисциплин как единый комплекс наук о природе и месте в ней человека. Естественнонаучное образование в значительной степени выведено из-под контроля профессионалов и оказалось подчиненным узковедомственным интересам. Резко увеличился разрыв между достижениями в развитии самих естественных наук и уровнем естественнонаучного образования специалистов. Уровень фундаментальности высшего и среднего образования продолжал неуклонно снижаться. Все это ставило под угрозу дальнейшее развитие научно-технического потенциала страны, обеспечение ее безопасности и могло привести к полной утрате конкурентоспособности нашей науки и техники на мировом рынке, дальнейшему снижению надежности технологических решений, способствовать «утечке» интеллектуального потенциала страны. Такая политика лишала страну возможности активного участия в международном разделении труда в области естественнонаучного образования, в котором у нас имелись бесспорные достижения и международное признание.

Описанные идеи поддерживались и большим количеством естественнонаучных кафедр технических вузов, которые также пришли, несмотря на отдельные противоречия, к четкому пониманию необходимости естественнонаучного образования инженера.

К концу 80-х годов прошлого столетия в технических вузах Советского Союза возникла парадоксальная тенденция, которая активно влияла на весь процесс подготовки инженеров. Смысл ее сводился к тому, что дисциплины естественнонаучного цикла – математику, механику, физику, химию начали узко специализировать для различных инженерных специальностей.

тей и направлений, для чего в учебных планах резко снизили число часов на преподавание указанных дисциплин, были введены ограничения на тематику рассматриваемых в курсах вопросов, преподаватели естественнонаучных кафедр распределялись по специальным кафедрам и тому подобное.

Возникли термины «энергетическая математика», «машиностроительная физика», «строительная химия», которые возмущали своей необычностью и нелепостью.¹ Несколько лет тенденция поддерживалась административно, что привело в некоторых случаях к пересмотру не только лекционных курсов естественнонаучных дисциплин, в которых стала появляться чисто инженерная терминология, но и к реконструкции практикумов, изменению идеологии семинарских занятий, смысла экзаменов, и, в конечном счете, идеологии всего естественнонаучного образования.

Создавшаяся ситуация стимулировала проведение 26-27 ноября 1992 года на базе Московского государственного университета совещания «Естественнонаучное образование в высшей школе России», организованного министерством высшей школы и технической политики РФ, Академией наук РФ и МГУ, в котором приняли участие преподаватели, заведующие кафедрами, деканы и ректоры ведущих вузов и учебных заведений разного профиля, а также представители научно-педагогической общественности.

Учитывая сложившуюся в стране ситуацию, участники совещания приняли рекомендации, которые обозначили переход к широкому внедрению естественнонаучного образования.²

На совещании подчеркивалась ключевая роль фундаментального естественнонаучного образования в формировании современного специалиста, констатировалось

наличие серьезного кризиса фундаментального естественнонаучного образования и поддерживалась стратегическая линия на выход из него, заложенная в концепции усиления фундаментализации и диверсификации высшего образования, в том числе, путем перехода к многоуровневой структуре высшего образования, создания образовательно-профессиональных программ на основе широкой фундаментальной подготовки в области естественных и гуманитарных наук. Отмечалось, что при подготовке специалистов в рамках традиционной системы образования необходимо восстановить уровень фундаментального естественнонаучного образования, сложившийся к началу 70-х годов 20-го века.

Было отмечено, что важнейшей задачей является придание государственного статуса фундаментальному естественнонаучному образованию. Это означает признание его приоритетной областью деятельности, финансируемой из федерального бюджета, создание специального общественного органа, осуществляющего связь с Правительством и контроль над качеством образования со стороны профессионалов-естественников, выделение блока фундаментальных естественнонаучных дисциплин как специфической области учебно-методической и научно-методической работы в высшей школе. Признавалось необходимым и срочным начать разработку государственной программы «Научно-методическое и информационное обеспечение преподавания фундаментальных естественнонаучных дисциплин» и организовать фонд поддержки фундаментального естественнонаучного образования. Выделение средств из данного фонда должно производиться на конкурсной основе под приоритетные проекты в области фундаментального естественнонаучного образования.

Совещание сочло своим долгом подчеркнуть, что переход к базовому высшему образованию не сводится к простому увеличению объемов естественнонаучных дисциплин. Речь должна идти о качественно новых целях образования, о создании фунда-

¹ Отголоски этого можно встретить и в современных учебных планах, где нами обнаружена, например, дисциплина «Строительная теплофизика».

² Рекомендации написаны по материалам указанного совещания.

ментальных курсов физики, математики, информатики, химии и биологии с элементами экологии и их согласовании друг с другом для достижения нового качества образованности личности и общества.

Достижение перечисленных целей потребует значительного повышения уровня научно - методической работы в вузах в области фундаментального естественнонаучного образования и усиления его координации. Для обеспечения ее максимальной эффективности совещание обратилось с предложением осуществлять впредь финансирование научно - методической работы в области фундаментального естественнонаучного образования целевым образом через существующие головные научные центры фундаментального образования.

Совещание отметило постоянную необходимость переподготовки преподавателей, аттестации вузов по естественнонаучной компоненте образования, а также создания системы аттестации кадров на основе требований к качеству естественнонаучного образования. Признано целесообразным, чтобы был рассмотрен вопрос о создании в ведущих государственных университетах специальных факультетов и отделений по переподготовке и повышению квалификации преподавателей естественнонаучных дисциплин, включая их переподготовку для работы на гуманитарных специальностях.

Совещание сочло важнейшей задачей методическое обеспечение фундаментального естественнонаучного образования. Оно отметило тяжелейшее положение с изданием учебных пособий и обратилось с просьбой к Правительству России принять чрезвычайные меры по материальному, техническому и финансовому обеспечению скорейшей подготовки и издания учебников нового поколения по естественным наукам, предоставив приоритет изданию учебников для нужд базового высшего образования, введя для них систему государственных заказов и обеспечив финансирование за счет федерального бюджета. Реализация целей высшего базового образования настоятельно требует созда-

ния учебных пособий интегративного типа, а также выпуска специальной «Библиотеки естественнонаучного образования бакалавра».

Совещание отметило, что экспоненциальный рост естественнонаучных знаний должен сопровождаться активной творческой работой преподавательского корпуса по формированию структуры и усилению взаимосвязанности фундаментальных естественнонаучных дисциплин. Последнее может быть достигнуто только в ходе становления и дальнейшего развития эдукологии как специальной науки о современном высшем образовании, а также исследований по логике, методологии и философии естествознания. Важное значение имело бы привлечение к этой работе научных сотрудников институтов РАН и РАО, усиления их взаимодействия с вузами. Достижение нового качества фундаментального естественнонаучного образования требует дальнейшей интеграции науки и образования, усиления участия академических учреждений и специалистов в подготовке и переподготовке кадров.

Необходимо существенное расширение международного сотрудничества в области проблем современной эдукологии и логики, методологии и философии естествознания, разработка концепции современных учебников по естественным наукам с компьютерной поддержкой, создание международных стандартов фундаментального естественнонаучного образования и методов определения соответствия этим стандартам, международных учебных центров подготовки научных кадров высшей квалификации, включение отечественных учебных и научно-методических центров в систему международного сотрудничества в рамках ЮНЕСКО.

Совещание констатировало необходимость утверждения в высших учебных заведениях обстановки современной научной среды и нового стиля работы, обусловленных развитием академических свобод, университетской автономии, прав студентов на свободу выбора траектории обучения, вхождением нашего общества в цивили-

лизованные социально - экономические отношения.

Учитывая возрастающую роль высшего образования в создании условий для расцвета страны и правовую незащищенность этой сферы деятельности, совещание сочло вполне назревшей разработку специального Закона Российской Федерации «О высшем образовании», что впоследствии и было сделано.

Конкретными результатами совещания следует считать не только перечисленные рекомендации и указанные направления работы, но также обсужденные требования к уровню образованности бакалавров естественных и технических направлений по циклу фундаментальных естественнонаучных дисциплин.

Мы приводим их на примере курса физики.

Цели обучения физике бакалавров технических направлений, сформулированные в наиболее лаконичной форме, сводятся к следующим двум: научить понимать природу через язык физических моделей и конструктивно мыслить в любой деятельности, используя как прообраз методологию современного физического знания.

В связи с этим требования к фундаментальному физическому образованию можно представить в виде следующей формулы: постановка физического образования должна обеспечить создание современной научной информационной базы в области физики, а также интеллектуальную основу многогранной познавательной деятельности. Выходные требования к фундаментальному базовому физическому образованию можно сформулировать следующим образом: сформировать целостное инвариантное осмысление физического единства и многообразия мира, устойчивые навыки физического мышления как развитой формы научного познания, сформировать представления о фундаментальности, универсальности и конструктивности современного физического подхода к природе и технике, воплощенных в комплексном умении использовать физические модели для описания природы.

Требования к умениям в области физики для бакалавров формулируются на основе анализа деятельного (что делать) и процессуального (как делать) содержания общих целей обучения по отдельным разделам и структурным элементам курса.

Требования к умениям фактически сводятся к указанию того, в какой форме и степени активности должны использоваться знания по физике. Очевидно, что весь процесс обучения должен быть ориентирован не на приобретение умозрительных научных сведений, а на активную деятельность с ними. В этом смысле в традиционной последовательности «знания – умения» возникает не противопоставление одного элемента другому (что-либо знать, а что-то уметь), а их инверсная соподчиненность – умения рассматриваются как конечная цель обучения, а знания – как средство их достижения. В итоге возникает формула: знать для того, чтобы уметь. При этом имеются в виду не только практические расчетные умения, но и развитые интеллектуальные умения.

В обобщенной форме то, что должен уметь студент после обучения физике – это осуществлять физическое моделирование природы. Речь идет о более или менее свободном общении в режиме пользователя с базовым набором типовых физических моделей. Помимо этого, требования к умениям отражают направленность на максимальное приближение к предмету инженерной деятельности, осуществляемой на основе физических знаний. Как показывает экспертный анализ, существо ее сводится к решению двух взаимообратных задач:

– на основе физического моделирования качественно оценивать, рассчитывать и прогнозировать возможное поведение физических характеристик объектов и процессов в конкретных ситуациях;

– на основе физического моделирования воссоздавать основные черты физических ситуаций и определять возможные физические причины, обуславливающие определенное поведение физических характеристик реальных процессов.

С учетом изложенного, требования к уровню образованности бакалавра разбиваются на следующие группы:¹

I. Перечень объектов и процессов в физическом мире;

II. Перечень физических мировоззренческих проблем, актуальных для общей культуры;

III. Перечень стандартных базовых моделей;

IV. Обобщенные типовые собственно физические умения, соответствующие перечням базовых объектов, физических процессов и стандартных базовых моделей.

Для выполнения указанных требований необходимо было уйти от традиционного курса физики и разработать новый курс на основе концепции фундаментального естественнонаучного курса физики для бакалавриата, суть которой сводится к следующему.

Общепризнано, что физика относится к числу дисциплин, составляющих фундамент технического и естественнонаучного образования и теоретического мышления специалистов. Вместе с тем колоссальный объем знаний, накопленный физикой сегодня, делает задачу обучения необычайно трудной. В существующих условиях единственный путь решения проблемы – интенсификация процесса обучения на основе исключения элементарного, дублирующего среднюю школу материала, приближение уровня изложения к действительному содержанию физики как науки, глубокого структурирования программы, использования достижений в технологии обучения.

Чтобы курс физики имел право называться фундаментальным, он должен обладать рядом особенностей, принципиально отличающих его от традиционного курса.

Прежде всего, структурой, логикой и методом изложения он должен значительно отличаться от школьного курса, воспи-

тывающего лишь эмпирический тип мышления. Вместе с тем, он должен опираться на полученные в школе знания, а не начинать все «с чистого листа».

Далее, принципиальное значение имеет осознание того, что цели преподавания общенаучной дисциплины, в данном случае физики, непрофессионалам и самим физикам принципиально различны. Будущие физики проходят три уровня обучения – общая физика, теоретическая физика, специальные курсы по физике. Это необходимо как для обеспечения всестороннего знания предмета, так и для выработки критического отношения к имеющимся достижениям в физике с тем, чтобы в дальнейшем быть готовыми участвовать в их развитии или пересмотре. В то же время непрофессионалы изучают, как правило, всего один курс физики. Поэтому он не должен быть копией лишь университетского курса общей физики, а должен содержать концентрированное и сбалансированное изложение наиболее фундаментальных вопросов всех трех уровней обучения физике на физических факультетах, данное с единых позиций. Можно даже утверждать, что потребности развития общества сегодня таковы, что курс физики во ВТУЗах должен быть глубже, хотя и уже, курса общей физики на физических факультетах. Это должен быть целостный курс, окончательный и полный в рамках своих задач, определяющий уровень теоретического мышления будущего творца новой техники и технологии, и нацеленный, прежде всего на создание у него интеллектуального фундамента, что позволит обеспечить эффективность применения современной физики.

При такой постановке вопроса возникает сложнейшая задача – решить, что относится к фундаменту физики, а что является частным, хотя и важным в какой-то ее области законом, фактом. Как известно, понимание фундаментальности тех или иных законов физики меняется от эпохи к эпохе. На наш взгляд, было бы вполне естественно принять за основу выбора современную трактовку предмета физики как науки.

¹ В дальнейшем эти требования, равно как и по другим дисциплинам естественнонаучного цикла, нашли отражение в паспортах соответствующих специальностей и направлений.

Если в свете этой трактовки обратиться к содержанию, структуре и логике изложения традиционного курса физики, то противоречие между ним и предметом физики как науки окажется огромным. В нем фактически излагается не физика как единая, вполне сформировавшаяся наука, а конгломерат различных «физик», то есть отдельных разделов, насыщенных огромным эмпирическим материалом, но почти столь же мало связанных между собой, как и во времена И.Ньютона. Развертывание этих разделов во времени в ходе обучения повторяет внешнюю канву исторического развития физики, с которой студент уже ознакомился в школе, и практически не отражает присущую ей сегодня логику. Основное содержание курса соответствует физическому мировоззрению 1-ой четверти XX века. По существу, это классическая физика, базирующаяся на механике Ньютона, с некоторыми сведениями из релятивистской квантовой физики без указаний на принципиальное различие между микро- и макрофизикой, то есть то, что Р.Файнман назвал «физикой до 1920 года».

Между тем значение великой революции в физике, происшедшей в 1-ой четверти XX века, состоит не только в том, что она открыла новые области явлений природы. Главное ее достижение – это коренное изменение физического мировоззрения, изменение взгляда на природу в целом. С конца 20-х годов мы знаем, что представления о строении материи зиждется на трех «столпах»: а) на релятивистских идеях, фиксирующих выбор инвариантных физических величин; б) на законах квантовой физики, управляющих поведением отдельных «структурных элементов» материи; в) на статистических закономерностях, обеспечивающих переход к последовательному рассмотрению макроскопических объектов. Именно эти вопросы и должны составлять скелет фундаментального курса физики. Именно они, прежде всего, должны быть усвоены с целью формирования теоретического типа мышления.

Таким образом, фундаментальный курс физики призван решать три взаимосвязанные задачи:

1. Образовывающую – сообщать студентам логически упорядоченные знания о наиболее общих и важных законах и моделях описания природы;

2. Развивающую – использовать эти знания как ступени формирования у студентов теоретического типа мышления, развитие понятийного аппарата, применимого к анализу явлений природы, формирование сознательных ориентиров в окружающем мире;

3. Воспитывающую – формировать на основе этих знаний естественнонаучное мировоззрение, развивать способность к познанию и культуру мышления в целом.

Что же касается самого термина «фундаментальный», то он удачно объединяет в себе оба оттенка, обычно связанных с этим понятием. С одной стороны, фундаментальный курс служит фундаментом для изучения последующих дисциплин, переквалификации и профессиональной деятельности в непрерывно меняющихся условиях. С другой стороны, фундаментальный курс обладает монолитностью и внутренним единством, обеспечивающим его инвариантность по отношению к конкретному направлению бакалавриата.

Водоразделом между фундаментальным курсом физики и курсом теоретической физики является метод изложения, предопределяемый целевыми установками этих курсов. Поскольку теоретическая физика – второй уровень обучения для физиков, ее курс строится чисто дедуктивно. Цели же фундаментального курса в бакалавриате могут быть достигнуты лишь в том случае, если не только содержание, но и метод изложения будут отражать в некоем единстве лучшие черты обучения физике сегодня на физических факультетах, не будучи при этом эклектической мешаниной, получающейся тогда, когда в курс общей физики просто включают «куски» из курса теоретической физики.

Целостный метод фундаментального курса можно условно охарактеризовать как

научно-познавательный. Необходимо исходить из того, что физика – экспериментальная наука. Поэтому каждый раздел курса должен базироваться на совокупности фундаментальных фактов, излагаемых, однако, не в реальном историческом времени, а в последовательности, определяемой логикой развития современной физики. На этом достаточно кратком этапе господствует индукция, ведущая к формулировке фундаментальных понятий и моделей, пригодных для описания природы. После того как модель создана, из нее дедуктивно выводятся многочисленные следствия, проверяемые на эксперименте. Простейшие, точно решаемые примеры демонстрируют эффективность применения модели к окружающей реальной природе, учат тому, что законы физики важны не сами по себе, а лишь как могучее средство все более глубокого поэтапного ее познания. Важно только подчеркнуть, что последовательное использование логики в курсе вовсе не обозначает его математизации. Математический аппарат следует привлекать лишь в объеме, адекватном обсуждаемой физической проблеме, заменяя по возможности сложные математические конструкции подбором доступных примеров и используя оригинальные приемы изложения.

С методологических позиций предмет спора не в том, должен ли курс физики в большей мере быть традиционным – «общим» или фундаментальным – «теоретизированным». Вопрос в том, какова должна быть его направленность, какой тип мышления ставится целью воспитать у будущего бакалавра – эмпирический или теоретический. Поскольку эмпирический уровень мышления уже освоен в школе, фундаментальный курс, не будучи курсом теоретической физики, ставит целью сформировать более высокий, теоретический тип мышления. В этом отношении методология всех общенаучных курсов имеет общие основы. Согласно ей некоторую картину мира создаст и эмпирический способ мышления. Но стоит вопрос о формировании теоретического способа мышления у сту-

дентов, о преодолении эмпирического мышления. Обогащение и усложнение практики, развитие науки порождает новую форму отражения действительности – теоретическое мышление. Формирование такого мышления требует кардинальной перестройки учебного процесса: изменения содержания, структуры, логики изложения учебной дисциплины и новой организации ее усвоения.

Кардинальная перестройка учебного процесса по физике в техническом вузе может быть выражена, прежде всего, в многоступенчатости, реализуемой по схеме: фундаментальный курс физики, физические спецкурсы, спецглавы в курсах инженерных и специальных дисциплин. Для реализации этой схемы необходимо оговорить траектории обучения, то есть различные направления, по которым студент может продвигаться в течение всего процесса получения специальности. Разумеется, что число таких траекторий должно быть максимально большим. Желательно также экстраполировать их на довузовскую и школьную подготовку, заранее ориентируя ее на конечную цель подготовки инженера.

Почти очевидно, что при таком подходе необходимо создание не отдельных компонентов учебного процесса по конкретной дисциплине, но обучающей системы, которая включала бы все вышеперечисленные требования и давала бы возможность их реализовать.

В начале 90-х годов в Саратовском государственном техническом университете и в Саратовском научном центре РАН была разработана обучающая система по физике для вузов (СОФ ВУЗ), которая реализует описанные выше идеи фундаментальности и системный подход к образованию инженера в техническом вузе, построена на основе типовой программы по физике и включает специально разработанное для этих целей оборудование.

Комплексный подход, основанный на представлениях современной физической картины мира (ФКМ), сохраняет единство курса, многовариантность обучения позво-

ляет студентам разного уровня подготовки использовать одно и то же оборудование. При этом предусмотрена возможность не дублировать изучение материала в обучающих блоках, что особенно важно в условиях ограниченного времени, отводимого на изучение физики. Таким образом, реализуется основная цель, в соответствии с которой будущий инженер должен обладать комплексом знаний и навыков, достаточно универсальных, чтобы иметь современное мировоззрение, с одной стороны, и вполне конкретных, чтобы это знание реализовать на практике – с другой.

Главная роль в обучающей системе по физике принадлежит образовательному аспекту, реализованному в процессе построения современной физической картины мира в теоретическом блоке системы.

В физической картине мира осуществляется, с одной стороны, физическая конкретизация философских представлений о движении, пространстве и времени, с другой – обеспечивается взаимосвязь между различными физическими теориями, отражающими разные области физических явлений. Таким образом, ФКМ реализует связь между физикой, точнее физической теорией, и философией.

Не вызывает сомнения, что современная физическая картина мира может быть построена в наиболее законченной форме только в рамках комплексного подхода, который предполагает наличие в структуре ФКМ блоков анализа физических явлений природы и синтеза ее модели с указанием цепочек обратной связи через законы сохранения и законы философии. В блоке анализа выявляются соотношения между двумя основными методами исследования – теорией и экспериментом – и устанавливаются их взаимосвязи на основе принципа неопределенностей. Констатируя, таким образом, наличие четырех типов взаимодействий с соответствующими им полями и переносчиками этих взаимодействий, можно осуществить естественный переход к синтезу модели, в котором применяются классический и квантовомеханический подходы, строятся модели указанных взаи-

модействий, представляющие фактически различные исторически сменявшие друг друга физические картины мира.

Отметим, что описанная структура современной ФКМ допускает ее естественное наполнение конкретным содержанием: рассмотрением отдельных явлений, законов, их приложений и применений в технике, решением задач, исследованием отдельных законов и явлений в эксперименте.

Учитывая единство и взаимовлияние философии и физики, следует определить и еще одну цель, которая может быть достигнута при построении ФКМ в процессе обучения студента высшей технической школы – формирование мировоззрения, в котором показывается идея единства природы, приближенность, модельность наших знаний о ней и, что особенно важно, прослеживается мысль о бесконечности познания, как последовательности физических картин мира.

Важна в этой связи и проблема существования, кроме физической картины мира, соответствующих промежуточных звеньев между философией и другими науками: химией, биологией, геологией, то есть наличие соответствующих картин мира.

Этими двумя обстоятельствами не ограничивается роль физической картины мира в образовательном процессе студента. Построение курса физики как смены физических картин мира с выходом на современную ФКМ дает, на наш взгляд, широкие возможности для реализации отступлений в различные области знаний – биологию, химию, космологию, филологию и общественные науки, что еще больше усиливает образовательный аспект.

Обсуждая вопрос о месте ФКМ в процессе образования, следует учитывать специфику высшей технической школы, в которой преподавание физики осуществляется в условиях дефицита учебного времени, что исключает ретроспективный подход к изложению курса и делает единственно правильным его изучение как теоретического, ибо только на этом пути удастся решить проблему содержательности, так и вопрос завершенности. Построение ФКМ

реализуется на пути обсуждения неудовлетворенности наличием четырех фундаментальных взаимодействий и стремления найти единое универсальное взаимодействие, которое отрицает «элементарность» элементарных частиц и приводит к качественно новым представлениям о пространстве и времени. Указанное предполагает использование достаточно общих физических принципов: релятивизма, принципов дополненности и неопределенности, корпускулярно-волнового дуализма и других.

Также появляется возможность рассмотрения в курсе роли фундаментальных исследований в техническом прогрессе на примерах приложений конкретных физических явлений, технических методов исследований, основанных на физических принципах, отличительных особенностей подготовки профессионального физика и инженера.

Для проверки усвоения материала и выяснения результатов реализации предложенной концепции обучения в рамках СОФ ВУЗ используются различные методы: зачеты, экзамены, коллоквиумы, текущий контроль, выходной контроль и тому подобное. При этом становится важной не форма отчетности, а содержание вопросов, по которым осуществляется оценка знаний.

В состав системы входят.

I. МЕТОДИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ:

1. ОБУЧАЮЩАЯ СИСТЕМА ПО ФИЗИКЕ ДЛЯ ВУЗОВ (СОФ ВУЗ). Общее описание. Рабочая программа лекционного курса;

2. ЛЕКЦИОННЫЕ ДЕМОСТРАЦИИ. Методическое руководство по постановке и проведению опытов;

3. ФИЗИЧЕСКИЙ ПРАКТИКУМ: Часть I. Методическое руководство по выполнению лабораторных работ, Часть II. Методическое руководство по проведению измерений, Часть III. Методическое руководство по обработке результатов эксперимента, Часть IV. Методическое руководство по обработке результатов эксперимента на микрокалькуляторах;

4. ЭЛЕКТРОННЫЙ УЧЕБНИК. Методическое руководство к обучающе-контролирующей программе для персональной ЭВМ.

II. ДЕМОСТРАЦИОННАЯ И ЛАБОРАТОРНАЯ ТЕХНИКА:

1. КОМПЛЕКТ ДЕМОСТРАЦИОННЫХ УСТАНОВОК – 7 установок, 49 демонстраций;

2. КОМПЛЕКТ ЛАБОРАТОРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ – 20 установок.

III. ТЕХНИЧЕСКАЯ ДОКУМЕНТАЦИЯ:

1. Технические паспорта и описания демонстрационных и лабораторных установок.

IV. ОБУЧАЮЩЕ - КОНТРОЛИРУЮЩАЯ ПРОГРАММА ДЛЯ ПЕРСОНАЛЬНОЙ ЭВМ.

Таким образом, СОФ ВУЗ представляет законченный образовательный продукт, который полностью реализует требования к фундаментальному образованию в техническом вузе, в результате внедрения которой достигается основная цель: будущий инженер будет обладать комплексом знаний и навыков достаточно универсальных, чтобы иметь современное мировоззрение в сочетании с вполне конкретными, чтобы их реализовать на практике. Указанное позволит улучшить качество образования в техническом вузе и приблизит диплом инженера к конвертируемости. В этом случае возможность индивидуальной подготовки наиболее успешно решит проблему подготовки инженеров высшей квалификации.

Система СОФ ВУЗ адаптирована к курсу общей физики общеобразовательных школ и включает в себя дополнительно блок довузовской подготовки, который мы назвали СОФ ШОЛК.

Принципы построения СОФ ШОЛК вполне идентичны СОФ ВУЗ, однако имеют совершенно другую идеологию и техническую реализацию. Так, теоретический блок системы построен на основе типовой программы по физике средней школы, в котором даются представления об основных физических процессах и явлениях в их историческом развитии, что воспитывает эмпирический тип мышления и является базой для построения физической картины мира.

В качестве демонстраций в СОФ ШОЛК может использоваться часть описанных выше лекционных демонстраций

СОФ ВУЗ, чем достигается органичная связь обеих систем.

В методическом руководстве по физическому практикуму представлены описания двадцати специально сконструированных лабораторных работ.

Чтобы полностью реализовать идею непрерывности обучения по физике в вузе необходимо было доработать СОФ ШОЛК по тем же компонентам, что и СОФ ВУЗ, написать и реализовать рабочие программы спецкурсов, создать соответствующие физические практикумы для спецкурсов, разработать программы спецглав в курсах инженерных дисциплин, внедрить все описанное выше в учебный процесс и оценить эффективность работы.

Описанные нами разработки обучающих систем были проведены в период с 1990 по 1995 годы кафедрой прикладной физики Саратовского государственного технического университета и специальным конструкторским бюро Саратовского филиала института радиотехники и электроники РАН, и реализованы в виде полутора десятков практикумов для вузов, нескольких практикумов для школ со всей перечисленной выше документацией. В работе принимал участие коллектив авторов, которому удалось практически осуществить один из возможных вариантов обучающих систем по физике для технического вуза:

Доработка и внедрение обеих систем требовала серьезных финансовых вливаний, чему препятствовала ухудшающаяся экономическая ситуация в стране, что отражалось на экономическом положении и вузов, и научных учреждений. Поэтому в 1995 году мы по разным причинам были вынуждены полностью остановить работы на описанном выше этапе, так и не реализовав полностью СОФ ШОЛК и не апробировав полностью СОФ ВУЗ.

Ситуация от всплеска естественнонаучного образования в 1992 году всего за три года получила обратное развитие, несмотря на то, что на рынке лабораторного оборудования наряду с «Росучприбором» появился научно-технический центр «ВЛАДИС» при Московском инженерно-физи-

ческом институте и некоторые другие производители учебной техники, был достигнут существенный прогресс в использовании компьютерных средств обучения.

Этот поворот от фундаментализации был отмечен в решении 4-ой международной конференции «Физика в системе современного образования», проходившей 15-19 сентября 1997 года в Волгограде.

На конференции выражалась «обеспокоенность продолжающимся ухудшением качества естественнонаучного образования в Российской Федерации, что объясняется не только общей кризисной экономической ситуацией, но и снижением интереса молодежи к естественным наукам из-за отвержения молодежью насаждавшегося в предшествующий период техногенного типа культуры, из-за непрестижности в современных условиях научной и преподавательской деятельности». Отмечалось, что «недопустимо снижение уровня требования знаний по физике, связанное с переводом физики во «второстепенную» дисциплину, по которой необязательно при окончании школы сдавать выпускные экзамены, отменой вступительных экзаменов по физике при приеме на инженерные, естественнонаучные факультеты ВУЗов», и, что особенно важно, «невостребованность физики на общетехнических и профилирующих кафедрах инженерных и других ВУЗов»¹.

Конференция отметила и появившуюся новую тенденцию, которая является серьезной угрозой качеству подготовки специалистов, – «предоставление возможности обучающимся в системе многоуровневого образования выбирать образовательные траектории, исключаящие или существенно обедняющие освоение естественнонаучных дисциплин».

Таким образом, к концу 20-го века после резкого всплеска и активизации естественнонаучное образование в России практически вернулось на уровень начала се-

¹ Цитируется по материалам конференции из журнала «Физическое образование в ВУЗах», Т.3, №4, 1997.

СОЦИАЛЬНЫЙ АСПЕКТ

мидесятых годов, наработав, однако, серьезную идеологию, методы построения обучающих систем, технологии конструирования и изготовления учебной аппаратуры и современные компьютерные технологии.

В кратком очерке мы не ставили цели рассказать обо всем многообразии идей

фундаментального образования, методах их реализации и всех исторических этапах этого процесса. Однако мы хотели, и читателю судить, как нам это удалось, на примере одной разработки по физике показать всю сложность того, что называется «естественнонаучное образование».

Сальников Александр Николаевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Физика» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Alexander N. Salnikov – Dr. Sc., Professor, Department of Physics, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 05.02.15, принята к опубликованию 16.02.15



ЛЕТОПИСЬ

ПО СТРАНИЦАМ ЖИЗНИ ПРОФЕССОРА АРТЕМЕНКО С.Е.



***Спасибо науке!
Она не только наполняет
жизнь интересом и радостью,
но дает опору
чувству собственного
достоинства.***

И.П.Павлов

Есть категория людей, которые всю свою жизнь живут только одним делом, преданы ему до конца, и дело платит им за это рано или поздно пришедшей известностью. Так сложилось у Серафимы Ефимовны Артеменко, главным делом жизни которой стало занятие наукой.

Путь в науку профессора Артеменко С.Е. начался в 50-е годы в Харьковском политехническом институте им. В.И.Ленина, в котором она получила квалификацию инженера-химика, технолога неорганических производств. Ей предлагали продолжить обучение в аспирантуре, но она считала важным для себя участвовать в послевоенном восстановлении народного хозяйства и рвалась на производство.

Начало производственной деятельности Серафимы Ефимовны состоялось в городе Чапаевске Куйбышевской области, а в 1956 г. семья Артеменко переводится на Саратовский завод синтетического спирта, где Серафима Ефимовна успешно прошла путь от старшего инженера технического отдела до начальника цеха нитрилакриловой кислоты и сумела проявить свои лучшие профессиональные качества, свой организаторский талант и в среде произ-

водственников слыла заметной, яркой личностью. Но наибольшего расцвета её талант производственника проявился на Балаковском комбинате искусственного волокна, куда в 1960 году они с мужем отправались по распоряжению Саратовского Совнархоза. Там ей пришлось работать начальником технического отдела и затем – заместителем начальника производственно-технического отдела.

Серафиму Ефимовну ценят как специалиста, ей доверяют руководить производственной практикой студентов-дипломников, прибывающих на Балаковский комбинат из технологических вузов Ленинграда, Сибири, Ташкента, Иваново.

Серафима Ефимовна много работает. Подумать только, за четыре года работы на Балаковском комбинате искусственного волокна она разработала:

- всю технологическую документацию двух производств вискозного корда, производства серной кислоты, энергетической службы комбината;
- 17 технологических регламентов, более 250 рабочих инструкций;
- технические условия на новую продукцию;

- технологические расчеты различного назначения.

Работая на комбинате, Серафима Ефимовна написала две брошюры о производстве высокопрочного корда, которые длительное время являлись единственным учебным пособием для ИТР и рабочих. Она неоднократно писала статьи в городскую газету о производственных делах и перспективах развития комбината.

В 1964 году Серафима Ефимовна как крупный специалист в области технологии химических волокон была приглашена на работу в Саратовский политехнический институт, в котором планировалось начать подготовку инженерных кадров для строящихся химических предприятий Саратовской области, в первую очередь для Балаковского и Энгельсского заводов химических волокон.

Серафима Ефимовна согласилась, поставив перед собой задачу создать лучшую во всём кафедру по подготовке инженерных кадров в области полимерных волокон.

Превращению возглавляемой ею кафедры «Химическая технология» в кафедру с влиятельной научной школой способствовали не только неординарные качества руководителя, но и сформированная ею команда преимущественно из её же выпускников. Молодые люди видели в Серафиме Ефимовне личность, её увлечённость наукой, понимали, что этот человек и поможет, и подскажет, и научит, и поддержит. Серафима Ефимовна всегда утверждала, что наука должна быть стержнем, на котором держится учебный процесс.

Серафима Ефимовна страстно мечтала и добивалась объединения усилий предприятий и института для создания в городе молодёжного центра с научной, технической и культурной программой. Она считала, что такое содружество позволяет создать инженерную интеллигенцию города. Через несколько лет прообразом научно-технического центра стали в вузах технопарки.

В 70-80 годы были популярны межкафедральные всесоюзные совещания. На

ежегодных совещаниях обсуждались вопросы совершенствования учебного процесса, постановки и развития кафедральных научных исследований, кандидатские и докторские диссертации.

Если кафедры в других вузах совершенствовали технологии химических волокон, то новая кафедра С.Е. Артеменко в СПИ занималась вопросами использования химических волокон в качестве армирующей основы для синтетических смол. Это стало основным разногласием на межкафедральных совещаниях.

Серафима Ефимовна продолжала исследования в области полимерных композиционных материалов, и время подтвердило дальновидность С.Е. Артёменко: в 90 годы сформировалась научно-педагогическая школа С.Е.Артёменко «Разработка научных основ и технологических принципов создания полимерных композиционных материалов функционального назначения на основе дисперсно-волоконистых наполнителей».

Начались защиты кандидатских диссертаций. На кафедре появилась аспирантура, а позже – магистратура. Ряд первых преподавателей, кандидатов, выросли до докторов наук. Примером опять стала Серафима Ефимовна, которая защитила докторскую диссертацию в 1982 г. в Казанском химико-технологическом институте.

Назревала необходимость иметь диссертационный совет в СГТУ. Серафима Ефимовна и здесь добилась своего: в 1995 г. в СГТУ открыт диссертационный совет по защите кандидатских диссертаций, а в 2000 г. – докторских. Она же и стала первым председателем совета. В этом диссертационном совете защитили докторские диссертации преподаватели кафедры Панова Л.Г. (2000 г.), Устинова Т.П. (2004 г.); кандидатские и докторские – Кардаш М.М. (1996 г., 2006 г.); Арзамасцев С.В. (2002 г., 2011 г.), Кадыкова Ю.А. (2003 г., 2013 г.), кандидатские – Левкина Н.Л. (1999 г.), Свешникова Е.С. (2001 г.), Сладков О.М. (1999 г.), Абдуллин В.Ф. (2006 г.).

За последнее десятилетие кафедра сумела получить 11 грантов (С.Е. Артёменко,

Т.П. Устинова, Л.Г. Панова, Ю.А. Кадыкова, М.М. Кардаш, И.Н. Бурмистров, В.Ф. Абдуллин и др.).

Научный авторитет кафедры, созданный профессором Артеменко С.Е., послужил основанием для организации международных конференций «Композит». Они стали традиционными (1998, 2001, 2004, 2005, 2007, 2010, 2013 г.г.). В конференциях принимают участие научные коллективы Москвы, Санкт-Петербурга, Казани, Ярославля, Самары, Волгограда, Пензы, Краснодар, Алтая, Дальнего Востока и других регионов России, Казахстана, Узбекистана и др.

Серафима Ефимовна всей своей жизнью доказывала, чего может достичь женщина в науке. По её мнению, наука – высший уровень человеческой поэзии, потому что в ней соединяются интеллект, культура, образование, мировоззрение, поведение. Она считала, что женщина в науке играет колоссальную роль, что она всегда генерирует идеи.

И на родной кафедре Серафима Ефимовна твердо проводила государственную политику. Ее утверждение «Учебный процесс – святое дело» поддерживалось всеми. Любимой формой занятий и у Серафимы Ефимовны и у большинства преподавателей являются лекции.

Сама Серафима Ефимовна всегда была красивой. На вопрос, что является секретом ее красоты, отвечала: «Секрета у меня нет. Я всю жизнь работала в творческой атмосфере, была увлечена наукой, а наука развивает ум человека, палитру его знаний и вкусов».

По отношению к подчинённым Серафима Ефимовна держала дистанцию, и умела добиться нужных результатов.

Но, чувствуя проблемы своих сотрудников, обязательно поддерживала их, до-

бывалась решения их вопросов.

Очень трогательными и тёплыми воспоминаниями всех её учениц и учеников остались домашние приёмы Серафимы Ефимовны «с варениками». Для этого приглашалась вся кафедра, накрывался красиво сервированный стол. Велись весёлые разговоры, обсуждались рабочие вопросы, все лакомились украинскими блюдами.

Вот несколько штрихов к портрету Серафимы Ефимовны, взятые из интервью о ней у мужчин института по поводу ее 75-летнего юбилея:

- женщина с настойчивым характером;
- знает себе цену и как женщина, и как специалист;
- создала для себя основные приоритеты в жизни и всегда следует им;
- интересная, красивая, обаятельная;
- требовательная к себе и окружающим;
- реализует все поставленные цели;
- деловой, устремлённый человек;
- сильный, последовательный, умеющий достичь поставленную цель руководитель;
- тонкий психолог.

Серафима Ефимовна увлекалась искусством, чтение литературы было её любимым занятием, очень следила за своим здоровьем, ежедневно делала зарядку, много ходила пешком, плавала, увлекалась лыжами.

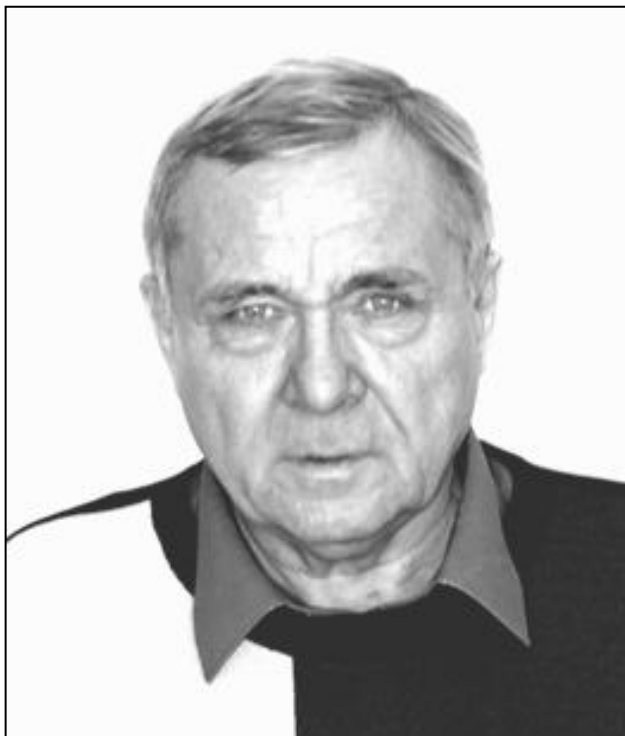
В 2008 году кафедра отмечала ее 80-летний юбилей. Присутствовали многочисленные гости...

Характер не позволял ей сдаваться. В её квартиру переместились научные семинары, консультации, деловые встречи. Так продолжалось до 5 сентября 2012 года...

Поставить точку также сложно, как вывести первое предложение. Заключительные слова должны быть все-таки о кафедре, которая должна стремиться всегда быть такой, какой ее хотела видеть Серафима Ефимовна Артеменко.

*Овчинникова Г.П., к.х.н., доцент, ветеран
кафедры «Химическая технология»,
Энгельсского технологического института
Саратовского государственного технического
университета имени Гагарина Ю.А.*

МЕЖДУ НАМИ, ФИЗИКАМИ...



Сальников Александр Николаевич, доктор технических наук, профессор, почетный работник высшего профессионального образования Российской Федерации.

Родился в г. Аткарске Саратовской обл. в 1947 году. В 1965 году окончил школу. В 1970 году – физический факультет Саратовского государственного университета, работал в НИИ, в промышленности. С 1973 года в Саратовском политехническом институте (ныне СГТУ), прошел путь от младшего научного сотрудника до профессора, заведующего кафедрой (1983 – 2011 г.г.) и руководителя учебно-исследовательского центра (1993 – 1998 г.г.). Опубликовал свыше 100 научных ста-

тей и несколько монографий в области физики поверхности и поверхностного слоя, физики дефектов. Организатор естественнонаучного образования по физике. Под его руководством в разные годы были созданы обучающие системы по физике для вузов и школ, которые успешно внедрены в различных учебных заведениях России. Автор учебников по физике. В настоящее время работает профессором кафедры «Физика» СГТУ.

«ВЭ» Поздравлем Вас с выходом в свет третьего тома Вашего учебника «ФИЗИКА».

А.Н.С. Спасибо за поздравления. Мне остается теперь только надеяться, что десятилетний труд не окажется напрасным, а учебник будет востребован.

Упомянутый учебник завершает курс физики для инженера и бакалавра. Он состоит из трех частей: «Физика 1» (классические представления), Саратов, 2006; «Физика 2» (современная картина мира), Саратов, 2011 и «Физика 3» (основные принципы), Саратов, 2014. Все тома учебника изданы в Саратовском государственном техническом университете. В учебнике реализована идея фундаментальности базового курса физики для

технических направлений бакалавриата, построенная на представлениях современной физической картины мира, которая основана на анализе четырех фундаментальных взаимодействий. Кроме того, 3-ий том можно рекомендовать как руководство для решения задач, основанное не на традиционной компоновке по разделам физики, а на использовании физических принципов, что значительно расширяет возможности семинаров для бакалавриата. Учитывая, что трудности фундаментальной естественнонаучной подготовки не являются специфическими для бакалавриата, можно думать, что курс окажется полезным при любой системе обучения инженера.

«ВЭ» Как Вы считаете, можно ли говорить об обостряющейся конкуренции на печатанных и электронных книг?

А.Н.С. Появление электронной книги на арене инновационных возможностей является прямой альтернативой печатного издания, так как имеет свои достоинства по сравнению с классической печатной продукцией. Это и мобильность – небольшая электронная библиотека помещается в кармане, это и многофункциональность, что дает возможность электронному гаджету – ридеру не только отображать текст и графику, но и прослушивать и просматривать аудио и видеoinформацию, это и низкий ценовой эквивалент, в результате чего купить электронную книгу себе может позволить каждый. Электронная книга, в отличие от печатной, улучшается каждый месяц. Экраны и устройства для чтения все время совершенствуются: они становятся дешевле, легче, более гибкими, получают больше возможностей, растет и их разнообразие. Проллежит жизнь батарей. Теперь в электронных книгах можно делать заметки, введенные с клавиатуры и написанные от руки. Они давно уже снабжены встроенными словарями и тому подобное.

Преимущества печатных книг особенно ярко стали проявляться с появлением книг электронных. Печатные издания всегда проверены литературными и научными редакторами и содержат поэтому достоверную грамотно изложенную информацию, они всегда красиво и по существу иллюстрированы, для чтения книги не требуется никаких устройств, кроме человеческого глаза, что дает возможность прочитать книгу от обложки до обложки.

В настоящее время наблюдается активное взаимопроникновение электронных и печатных средств. Простейшим вариантом этого является дублирование печатных изданий в электронном варианте. Кстати сказать, электронный вариант книги допускает его печатание различными компьютерными и типографскими средствами.

Согласно данным, собранным Международной ассоциацией издателей, тенденция развития рынка цифровых книг в

разных странах мира примерно одинакова и составляет от 0,1-0,5 % до 1 % от общего числа книжных продаж, хотя в каждой стране имеется своя специфика. Исключения составляют только Британия, где доля продаж электронных книг выросла с 1 % до 9 % в 2009 – 10 годах, и США, где на них спрос стабильно растет, и в настоящее время количество продаж электронных и печатных книг примерно одинаково.

На российском рынке по различным данным на сегодняшний день продажи электронных книг составляют менее 1 % от общего объема продаж книг.

Конкуренция печатных и электронных изданий, что это – миф или реальность? Я думаю, что никакой конкуренции сейчас нет, а есть взаимное дополнение, которое кроме удобства ничего плохого не дает. Возможно, в далеком будущем конкуренция и случится, но когда это произойдет, вряд ли кто возьмется прогнозировать.

«ВЭ» Не ожидает ли человечество закат эпохи напечатанных книг?

А.Н.С. Чтобы ответить на этот вопрос, кратко проанализируем биографию печатных и электронных книг. Известно, что первая, точно датированная русская печатная книга «Апостол» увидела свет в 1564 году. Ее создателем был первопечатник Иван Федоров. В течение XVI века в Москве вышло 17 печатных книг тиражом около 1000 экземпляров. В декабре 1702 года вышел первый номер первой русской газеты «Ведомости». В 1703 году вышла в свет «Арифметика» Л. Магницкого. С 1756 года начинается издательская деятельность Московского университета, за три года его типография выпустила около 100 книг. В первой половине XIX века наиболее известным издателем считался А.Ф. Смирдин, во второй половине XIX века – И.Д. Сытин. В 1919 году был создан Госиздат РСФСР, в 20-х годах в Москве возникают новые издательства, количество издаваемых книг увеличивается вдвое за год. К началу 90-х годов 70 столичных издательств выпускали 70% всей книжной продукции СССР. В среднем в течение года выходило около 85 тысяч названий книг и брошюр общим

тиражом около 2 миллиардов экземпляров на 60 языках народов СССР и на 50 иностранных языках. Годовой тираж газет и журналов, издаваемых в столице в те годы, составлял более 16 миллиардов экземпляров. Таким образом, история книгопечатания в России составляет почти 450 лет.

История электронных книг значительно короче, составляет два десятка лет, но темп их создания, как отмечалось выше, значительно больше.

За какое время сравниваются тиражи электронных и печатных книг, то есть реализуются условия их конкуренции, – сказать трудно. Поэтому можно считать, что если конкуренция печатных и электронных книг когда-нибудь случится, то результат окажется не в пользу печатных изданий. Но закат эпохи печатных изданий вряд ли когда-либо произойдет.

«ВЭ» В последнем государственном образовательном стандарте по направлению «Электроэнергетика и электротехника» говорится о необходимости широко использовать в учебном процессе электронную информацию – образовательную среду. Что будет с вузовскими библиотеками, с их книжным фондом?

А.Н.С. В настоящее время в связи с развитием открытого и дистанционного образования очень актуальными стали вопросы создания и поддержки в современном состоянии его методической и технологической базы, а именно информационно-образовательной среды (ИОС) вуза. Информационно-образовательная среда вуза – это программно-телекоммуникационная среда, обеспечивающая едиными технологическими средствами информационную поддержку и организацию учебного процесса, научные исследования, профессиональное консультирование слушателей вуза и всех желающих. Основной целью применения ИОС является создание условий повышения качества обучения, доступности образования, обеспечения эффективности образовательного процесса и конкурентоспособности вуза. ИОС рассматривается не только с точки зрения ее

зрения участия в трансфере знаний с другими вузами и организациями.

Одним из компонентов ИОС является электронная библиотека – совокупность баз данных, обеспечивающих возможность накопления и предоставления пользователям через корпоративную сеть информационных ресурсов, со своей системой документирования и защиты.

В связи с этим, наряду с традиционными, у университетских библиотек появляются иные функции. Поэтому в качестве перспективного общего направления развития научных библиотек технических университетов можно обозначить совершенствование структуры, механизма функционирования и управления их деятельностью посредством перехода к долгосрочному позитивному развитию, использованию процессно-ориентированного принципа организации работы и принятия решений в области стратегии и тактики деятельности библиотеки в условиях функционирования ИОС. Библиотеки должны превратиться в информационно-образовательные центры технического университета. Это чрезвычайно сложная задача должна решаться в комплексе с созданием ИОС.

Думаю, что роль университетской библиотеки возрастает в связи с модернизацией высшего образования, с введением новых образовательных стандартов, новых технологий в науке, образовании, библиотечной сфере, повышением спроса на образовательные и информационно-библиотечные услуги. Книжные фонды библиотеки в обозримом будущем будут, по-видимому, только расти.

«ВЭ» Мода и наука... Наука и мода... В технических науках можно говорить о череде модных направлений. Например, в последние двадцать лет мы стали свидетелями, а многие из физиков – участниками работы в таких модных направлениях, как электроэнергетика, нанотехнологии, инноватика, информационные технологии. А есть мода в физике? Какие направления исследований сейчас в физике модные?

А.Н.С. Как известно, мода действует в науке, так же, как и во многих других об-

ластях культуры. Мода в науке – это временное господство определенных взглядов и тенденций в какой-либо сфере знаний. Существование моды в науке является доказанным явлением.

Вопросы об отнесении тех или иных конкретных явлений науки к моде более разнообразны и противоречивы. Присутствие и влияние моды в науке невозможно оценивать однозначно, негативно или позитивно. Мода в науке, как и в искусстве, может, хотя и не обязательно, играть вполне позитивную роль и стимулировать ее развитие. Многие выдающиеся явления в науке и в искусстве начинались как моды, становились модами или были в моде, но это не помешало им стать классическими и остаться в них на века. В моде при жизни их создателей были теория относительности Эйнштейна и кибернетика. Сегодня никто не квалифицирует эти творения как «моды», хотя в свое время они являлись модными течениями. Сейчас это нанотехнологии, включая их физический аспект, ресурсосбережение и другие. Будущее определит, что было только модой, а что – еще и фундаментальным или даже выдающимся научным творением, которое надолго остается в обращении.

Ю. И. Семенов – российский историк и философ, специалист по теории познания пишет в одной из своих публикаций. «Ученому всегда должен быть присущ скептицизм, но особого рода. Этот скептицизм заключается вовсе не в отрицании возможности прийти к истине. Человек всерьез, а не на словах, отрицающий возможность познания мира, не допускающий возможность проникновения человеческого разума в сущность изучаемых явлений, не может быть подлинным исследователем. Скептицизм ученого состоит в неприятии ничего на веру. Для ученого не существует авторитетов, которым он бы поверил на слово. Он не только может, но и должен ставить под сомнение все».

Следовательно «...Для настоящего ученого в принципе неприемлемо понятие культовой фигуры и недопустимо существование в науке моды. Рассматривая су-

ществующие воззрения и концепции и, определяя свой выбор, он должен исходить не из того, модны они сейчас или не модны, выгодно их придерживаться или невыгодно. Единственный принцип, которым он должен руководствоваться, – стремление к истине».

«ВЭ» Сейчас позиции церкви в нашей стране укрепились, ее влияние расширяется. Современные физики признают божественное сотворение Мира? Кого среди нынешнего поколения физиков больше – атеистов или верующих?

А.Н.С. Божественное сотворение материального мира базируется на концепции креационизма (от латинского *creatio* – сотворение), которая основана на древних мифах и легендах разных народов, согласно которым всемогущий Бог создал окружающий мир и человека в шесть дней. Креационизм – религиозное учение о сотворении мира Богом из ничего – характерен для теистических религий – христианства, иудаизма и ислама. По мере развития естественных наук накапливалось все больше фактов, прямо противоречащих буквальному пониманию сотворения мира за шесть дней. Сильнейший удар креационизму нанесла теория Ч. Дарвина и, особенно, предложенный им механизм естественного отбора, который вообще отрицается креационизмом. Не выдерживает креационизм критики и со стороны современных физических теорий, а также теорий антропогенеза и мутагенеза.

Современные релятивистские представления о сверхсветовых движениях допускают существование тахионов, частиц, движущихся быстрее скорости света. Об этом достаточно подробно написано во втором томе нашего трехтомного базового курса. Может ли тахионному миру соответствовать какая-то реальность? В одной из теорий, в отличие от классической релятивистской теории тахионов, эти объекты не являются вещественными частицами и тахионные наблюдатели не могут быть материальными объектами. Ясно, что этот нематериальный мир не может быть предметом физики. В связи с этим была выска-

зана гипотеза, что тахионный мир – это мир духовного опыта. Мировая точка, где соприкасаются вещественный и тахионный миры, – это вещественный наблюдатель (человек); перед ним разворачивается во времени мир материальных объектов, а внутри него в совершенно других пространственно-временных отношениях пребывает духовный мир.

В релятивизме сопутствующая система отсчета вводится для того, чтобы рассмотреть объект как таковой, отвлекаясь от внешних по отношению к его природе обстоятельств. В вещественном мире таким внешним свойством объекта является его механическое движение, то есть перемещение его как целого в пространстве, не меняющее его внутреннего состояния. В сопутствующей системе отсчета объект покоится в пространстве, тем самым внешние обстоятельства устранены. Сущность этого объекта, его внутреннее содержание (то есть то, каким он может быть) раскрывается здесь во времени. В сопутствующей системе отсчета тахионного мира объект покоится во времени, а не в пространстве. Значит, в такой системе отсчета устранена временная эволюция объекта, то есть здесь внешним обстоятельством считается раскрытие сущности объекта во времени. Это означает, что в сопутствующей системе отсчета содержание объекта осуществлено в своей полноте, и во времени ничего не происходит. Такое состояние в философии называется вечностью или вневременным бытием. Но бытие в вечности не означает, что там вообще ничего не происходит: содержание объекта (скажем, мысли, идеи) разворачивается в пространстве.

Я думаю, что применительно к физикам деление их на верующих и неверующих слишком упрощено. Грамотный физик понимает, что физическое существование бога, в религиозном смысле творца, едва ли возможно. Что же касается души и даже ее определения, то здесь все сложно и непонятно, и, по-видимому, на основе тахионных представлений открываются возможности для естественно-научного описания духовного мира.

«ВЭ» В последние годы на тех или иных каналах телевидения много антинаучных передач. Но опровержений со стороны физиков не видно и не слышно. Почему?

А.Н.С. Существует множество причин роста влияния лженауки. Широкое внедрение компьютеров, а потом и Интернета сделало невозможным существовавший в прошлом тотальный контроль над печатным словом. Сильно повлияло введение в науку вненаучных, как правило, административных указаний, то есть, по определению, лженаучных факторов. Группу источников лженауки создает ложно понимаемый патриотизм и национализм – «мы впереди планеты всей...». Немаловажные причины роста влияния лженауки связаны с недостаточным финансированием науки. Есть целый ряд других причин.

Средством агитации и пропаганды в России антинаучных идей – астрологии, оккультизма, саентологии стали средства массовой информации, особенно телевидение. Все хорошо помнят Чумака и Кашпировского. Типичным примером являются страсти вокруг Большого Адронного Коллайдера, в котором, якобы, могут возникнуть губительные для человечества черные дыры.

Сейчас проводником мракобесия становится школа и, в некоторых случаях, ВУЗы. В учебной и методической литературе ставятся под сомнение общепринятые научные взгляды на происхождение человека и предлагается «уравновешивать» Дарвина религиозными идеями креационизма. Такое смешение научного знания и религиозного мышления создает питательную среду для различных спекуляций.

Социальная опасность лженауки состоит в том, что она, иногда необратимо, блокирует развитие важных направлений науки. Примером является генетика и кибернетика, которые одно время назывались «продажными девками империализма». Важнейшую научную проблему поиска внеземных цивилизаций дискредитируют «летающими тарелками». В повседневной жизни, когда необходимо вмешательство врача, люди обращаются к знахарям. Примеров можно привести сколько угодно.

Физики четко отслеживали лженауку. Академик В. Гинзбург констатировал: «Издающиеся большими тиражами газеты нередко печатают всякий антинаучный бред». Профессор С. Капица утверждал: «То, что сейчас делается на телевидении, нельзя назвать иначе, как преступление перед нашей страной и обществом. Это делается намеренно, расчетливо, очень изощренными методами и талантливыми людьми». Он борьбу с лженаукой практически реализовывал своей передачей «Очевидное-невероятное».

Попытки ученых противостоять широкой пропаганде антинаучных взглядов через СМИ оказались почти полностью безуспешными. Однако, несмотря на это, прогресс в борьбе с лженаукой все-таки происходит. Передача «Наука 2.0» сделала мощный шаг вперед в деле пропаганды истинной науки.

Имеет ли сопротивление мракобесию в центральных средствах массовой информации шансы на успех? Оптимистичные прогнозы утверждают, что имеют, так как надеются на общественное табу, которое все-таки что-то определяет в человеческом обществе. Но все успехи здесь еще впереди.

«ВЭ» В своей статье Вы пишете, что в 1992 году в МГУ состоялось совещание физиков, на котором был одобрен переход от подготовки инженеров, зародившийся в России еще при Петре 1 и Елизавете 1, к подготовке бакалавров и магистров. Но предложение перейти к двухуровневой системе вызвало тогда критику общественности, в первую очередь, преподавателей ВУЗов, включая ректоров. Так что, физики с самого начала были в авангарде сторонников перехода на англо-американскую, по сути дела, систему высшего образования в России?

А.Н.С. На упомянутом совещании в МГУ, кстати, не только физиков, но и представителей других естественнонаучных специальностей – химиков, биологов, экологов – организационный вопрос перехода к подготовке бакалавров и магистров вообще не обсуждался. Речь шла об идеологии и содержании курсов естественнонаучных дисциплин при многоуровневой подготовке. Следует здесь отметить, что

проблемы естественнонаучного образования не являются специфическими для многоуровневой системы, они характерны и для инженерной подготовки специалистов. С этим я столкнулся, будучи почти 30 лет заведующим кафедрой прикладной физики сначала Саратовского политехнического института, а затем Саратовского государственного технического университета. На многих совещаниях заведующих кафедрами физики страны мы слышали неудовлетворенность состоянием дел в этой области.

Вопрос состоял в том, как учить физике инженера. Здесь было много путей и вариантов. И именно нужный вариант и был предложен на указанном совещании. В наших последующих разработках он был конкретизирован в виде двух обучающих систем по физике СОФ ВУЗ (система обучающая для ВУЗов) и СОФ ШОЛК (система обучающая для общеобразовательных школ, лицеев и колледжей), идеология и реализация которых подробно описаны в упомянутой Вами статье.

В прямом ответе на Ваш вопрос следует сказать, что физики были не в авангарде сторонников перехода на англо-американскую систему преподавания, а на систему фундаментализации технического образования. Как потом выяснилось, эта проблема одинаково остро стоит и в системе специалитета, и в системе бакалавриата. Именно поэтому мы и стали ею заниматься задолго до перехода на бакалаврско-магистерскую подготовку.

«ВЭ» В 2015 году состоится последний выпуск специалистов по профилю «Электротехнологические установки и системы». В дальнейшем университет будет выпускать бакалавров и магистров по направлению «Электроэнергетика и электротехника». Но в учебных планах подготовки бакалавров по сравнению с учебными планами специалистов лекций меньше на 40 %, курсовых проектов и работ на 38 %. Невозможно себе представить электротехника, особенно электротехнолога, без фундаментальных знаний физики. Но в бакалаврских планах на изучение физики отводится почти на 50 % часов меньше, чем в планах подготовки специалиста. Как

надо перестроить обучение электриков по курсу физики, чтобы бакалавры отвечали современным требованиям производства?

А.Н.С. Чтобы осуществить это, необходимо применить СОФ ВУЗ, то есть устроить для электротехнологов три ступени преподавания физики: базовый курс, спецкурсы, спецглавы, что опробовалось нами достаточно давно при внедрении указанной системы на студентах-механиках.

Применительно к направлению «Электроэнергетика и электротехника» это может выглядеть так.

I. Преподавать фундаментальный теоретический базовый курс, примером реализации которого являются первые два тома трехтомного учебника «Физика»: «Физика 1», изд. СГТУ. Саратов. 2006 и «Физика 2», изд. СГТУ. Саратов. 2011, или близкий им по идеологии учебник. На семинарских занятиях для решения задач использовать идеологию физических принципов, описанную в учебнике «Физика 3», изд. СГТУ. Саратов. 2013. Это, конечно, потребует тщательного подбора соответствующих задач, может быть, ориентированных на электротехнологии. В лабораторном практикуме реализовать измерения только с анализом погрешностей, может быть, сужая тематику лабораторных работ до раздела «Электричество и магнетизм». При этом можно использовать разработанные нами учебники: «Физический практикум 2», изд. СГТУ. Саратов, 2003 и Физический практикум 4», изд. СГТУ, Саратов. 2007.

II. Физические спецкурсы строить строго на базе фундаментального курса, дополняя его необходимыми техническими приложениями.

III. Спецглавы в прикладных спецкурсах также необходимо ориентировать на базовый курс, усиливая его чисто практическими аспектами.

Такой подход несколько компенсирует уменьшение часов аудиторной работы, но не полностью. Остальная компенсация будет зависеть от того, как устроена самостоятельная работа студентов.

«ВЭ» В учебных планах бакалаврской подготовки на 20,4 % увеличено время на

самостоятельную работу студентов. В планах магистерской подготовки предусмотрено три-четыре лекции, а часов на самостоятельную работу в два-три раза больше, чем аудиторных. Как Вы считаете, преподаватель должен перестроить работу со студентами в связи с этими особенностями учебных планов? Каким образом побудить студента учиться, по сути дела, самостоятельно?

А.Н.С. Вопрос «Как заставить себя учиться?», чаще всего задают студенты. Существует целый комплекс рекомендаций от серьезных до не очень, как это сделать: найти мотивацию (причину) учиться хорошо, обустроить свое рабочее место, изменить стиль одежды, создать из обучения увлекательное занятие, поощрять себя за успехи, учиться хорошо с первого семестра, работать больше в аудитории, чтобы меньше оставалось на дом, правильно распоряжаться своим временем, развивать силу воли и тому подобное.

Образование должно быть систематическим, а поэтому нужны меры со стороны преподавателей, призванные подвигнуть студента систематически работать на протяжении всего учебного года. Для этого можно использовать старую хорошо забытую модульно-рейтинговую систему, снабдив ее современными атрибутами, связанными с использованием ИОС, как это сделано, например, в МГУ имени М.В. Ломоносова. Суть программа расчета рейтинговой оценки знаний и успеваемости студентов сводится к тому, что итоговая оценка успеваемости за семестр по каждой дисциплине учитывает не только ответ в день экзамена, но и сумму рейтинговых баллов, полученных на всех контрольных работах и коллоквиумах в течение семестра и во время зачетной сессии. В конце семестра студенту могут дать возможность компенсировать часть «потерянных» баллов с помощью дополнительного задания. Система оценки оставляет место для преподавательского поощрения. Так, например, преподаватель имеет право дать студенту надбавку «за отношение к учебе» – отсутствие пропусков, хорошее выполнение домашних заданий, активность на занятиях. Эта надбавка – в пределах 5 % максимально-

го семестрового балла. Система не исключает и «автоматы». Но отчеты о текущей успеваемости студентов идут в учебную часть факультета три раза в семестр. Если в каком-либо отчете студент имеет хотя бы по одной дисциплине рейтинговый балл, составляющий менее 40 % от максимального, он считается «существенно отстающим». В этом случае может быть поставлен вопрос о дальнейшем обучении студента в вузе. Используя данное нововведение, отчислить нерадивых студентов станет намного проще.

В эту систему органически можно вписать и большую по объему самостоятельную работу, которую предусматривают бакалаврские учебные планы, и которую необходимо структурировать по объему часов, так как способности студентов различны, и каждому требуется разное время для изучения одной и той же темы.

Но есть единственный верный способ, только он и может помочь – нужно просто «приковать» себя к рабочему месту, на котором вы учитесь. Может это и шутка, но с большой долей истины – только так можно заставить себя учиться всю жизнь, а это и есть одна из главных целей образования – «научиться учиться».

«ВЭ» В СГТУ имени Гагарина Ю.А. работает немало выпускников физического факультета СГУ имени Н.Г. Чернышевского. Мы знаем друг друга, но общаемся мало, профессиональные вопросы не обсуждаем вовсе. Как Вы считаете, в условиях реформы высшей школы, появления новых, серьезных задач, которые предстоит решать педагогам высшей школы, не следует ли найти форму более тесного профессионального общения физиков, работающих в СГТУ на разных кафедрах? Можно было бы, например, ежегодно проводить «Физические чтения». Материалы таких чтений могли бы найти отражение на страницах нашего журнала.

А.Н.С. Идея, безусловно, чрезвычайно плодотворна. Но нужно вспомнить, что она была реализована в нашем ВУЗе в середине 90-х годов 20-го века, когда при непосред-

ственном участии Ю.С. Архангельского в качестве проректора по учебной работе были созданы два учебно – исследовательских центра – по механике и математике и по физике, химии и экологии. Потом они трансформировались в один центр естественных наук. Таким образом, структура общения и работы преподавателей естественнонаучных дисциплин в течение почти 15-ти лет занималась вопросами фундаментального образования не только по физике, но и по математике, и химии, и механике. Получены серьезные наработки по разным аспектам преподавания дисциплин естественнонаучного профиля. Прошло всего пять лет со дня упразднения этой структуры, но уже опять назрела необходимость формализации локальных внутривузовских контактов физиков, как, впрочем, и других специалистов в области естественных наук независимо от их работы на конкретных кафедрах. Это позволило бы, наряду с реализацией ранее наработанных идей и разработкой новых, освободиться от всевозможных ненужных реорганизаций в виде преподавания, например, физики, непрофильными кафедрами, выработать взаимопроникающие учебные планы по базовым курсам, по спецкурсам и спецглавам в специальных дисциплинах, выработать единые критерии контроля знаний и сделать множество других полезных вещей, которые были получены для специалитета, но потерялись при переходе на бакалаврскую подготовку.

Необходимо возрождение научно-методического совета института, который все конструктивное оформлял бы в виде обязательных для выполнения решений, и, конечно, широкая публикация получаемых новых результатов, в том числе и в журнале «Вопросы электротехнологии».

«ВЭ» Спасибо за ответы на вопросы.

А.Н.С. Я, в свою очередь, благодарю за предоставленную возможность высказаться по различным темам, и за глубокие содержательные вопросы, которые позволили мне это сделать.

ИСТОРИЯ СВЧ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ

Ю.С. Архангельский

Окончание

15

В первые же недели работы на энергофаке СПИ Ю.С. Архангельский столкнулся с незнакомым ему по прежнему факультету: декан, теплоэнергетик, на заседаниях деканата постоянно резко критиковал электрические кафедры и в первую очередь кафедру ЭПП, и ни слова в адрес тепловых кафедр.

- Да, все это так, – подтвердили его наблюдение заведующие двух других электрических кафедр. – Надо с этим бороться. Вы моложе нас, вот и начинайте, а мы вас поддержим...

- Почему вы так ругаете электриков? – спросил он декана на очередном заседании. – У нас те же показатели, что и у теплоэнергетиков, а их вы хвалите.

- Да, почему? – подхватили электрики...

Между тем защитили кандидатские диссертации по СВЧ нагреву Л.Г. Бунин, Т.Н. Шишмило, заканчивал работу над кандидатской диссертацией Е.В. Колесников.

На заседаниях докторского диссертационного совета по энергетике ученики А.Н. Андрющенко защищали диссертации о технико-экономических расчетах при проектировании АЭС, ТЭС, линий теплопередачи. «А ведь такие расчеты у нас в СВЧ нагреве могли бы ответить на многие вопросы», – все чаще думал он...

А на дворе уже началась эпоха перестройки. В СПИ стали создавать малые предприятия. Он предложил создать такое предприятие. Создали. Планировали выпускать СВЧ электротермические установки, но скоро он понял, что предпринимательство – не его стихия. Не нашлось на кафедре предпринимателей и среди других

преподавателей. Пришлось малое предприятие закрыть.

Ускорение, перестройка, гласность... Дело дошло до выборов ректоров вузов. В СПИ пошли разговоры: «А.И. Андрющенко пойдет на выборы? Нет? А кто будет вместо него? А как будет? А когда?»... Выборы ректора СПИ были бурными. Победил проректор по научной работе В.В. Петров.

Победа В.В.Петрова стала для него счастливым событием. Но на энергофаке все осталось по-старому. Сколько все это может продолжаться?.. Заведующие электрическими кафедрами пришли к новому ректору и предложили разделить энергофак на два факультета – теплоэнергетический и электротехнический. Подробный план реорганизации факультета произвел на ректора В.В. Петрова впечатление, и он обещал подумать ...

Факультет делить не стали, но деканом назначали Е.А. Ларина. И тотчас на заседаниях в деканате постоянные выпады, придирики к электрикам прекратились.

Вскоре ректор В.В.Петров предложил ему должность проректора по учебной работе. Этого он не ожидал. Да, прежний проректор по учебной работе перешел в обком КПСС. Но почему В.В. Петров предложил эту должность ему? Что же, у него появляется возможность принять участие в реализации ректорской программы гуманитаризации учебного процесса. Так он стал проректором по учебной работе.

- Не так сели. – сказал в свое время Б.Н. Ельцин, рассмотрев размещение за столом своих соратников. – Пересядьте!

На заседании ректората все расселись правильно без специального указания ректора, и для него началась новая жизнь...

Четвертый этап работы в области СВЧ электротермии начался с переходом нашей страны к рыночным отношениям. В условиях рынка для успешной конкуренции продукции необходимо техническое перевооружение производства. И здесь весьма перспективны установки, использующие электрофизические методы обработки.

В нашей стране появились новые коллективы разработчиков в области СВЧ электротермии, новые фирмы. Анализ рекламируемых ими СВЧ установок давал основание утверждать, что новое поколение разработчиков по-прежнему мало уделяет внимания научному обоснованию кон-

струкций СВЧ электротехнологических установок и, главное, проблеме их эффективности. Может быть утерян интерес к СВЧ установкам, если еще на стадии их проектирования не учитывать многочисленные параметры, характеризующие проект, включая стоимостные параметры.

Возможность учета большого числа параметров, характеризующих установку, ее структуру, элементную базу, режим работы, свойства объекта обработки, условия и порядок эксплуатации, стоимостные характеристики проекта, представляет интегральный за срок службы установки доход (чистый дисконтированный доход, интегральный эффект или социально-экономический эффект)

$$\mathcal{E}_{\Sigma} = \sum_{t=0}^T \left[\sum_{j=1}^n (P_j C_{nj})_t + H_t + S_t + M_t - Z_t \right] (1+E)^{-t} + \Phi_T (1+E)^{-T}, \quad (10)$$

где P_j – количество j -й продукции, выпускаемой установкой на t -м шаге расчета; C_{nj} – цена единицы продукции на t -м шаге расчета; n – число видов продукции, выпускаемой на горизонте расчета T ; H_t – стоимостная оценка сопутствующего эффекта в производственной сфере на t -м шаге, S_t – стоимостная оценка социального эффекта на t -м шаге, M_t – остаточная стоимость основных фондов производственной инфраструктуры, исчисляемой из эксплуатации на t -м шаге, Z_t – эксплуатационные издержки на работу установки, включающие налоги и платежи на t -м шаге, E – норма дисконта, Φ_T – остаточная на момент времени T стоимость основных фондов; $T = t_{cl}$ – срок службы (эксплуатации) установки

Технико-экономические расчеты составляют одно из направлений четвертого этапа работ в области СВЧ электротермии (электротехнологии).

Общее решение задачи технико-экономической оптимизации СВЧ электротермических установок сводится к нахождению такого сочетания параметров установки и технологического процесса, при котором достигается $\mathcal{E}_{\Sigma_{\max}}$.

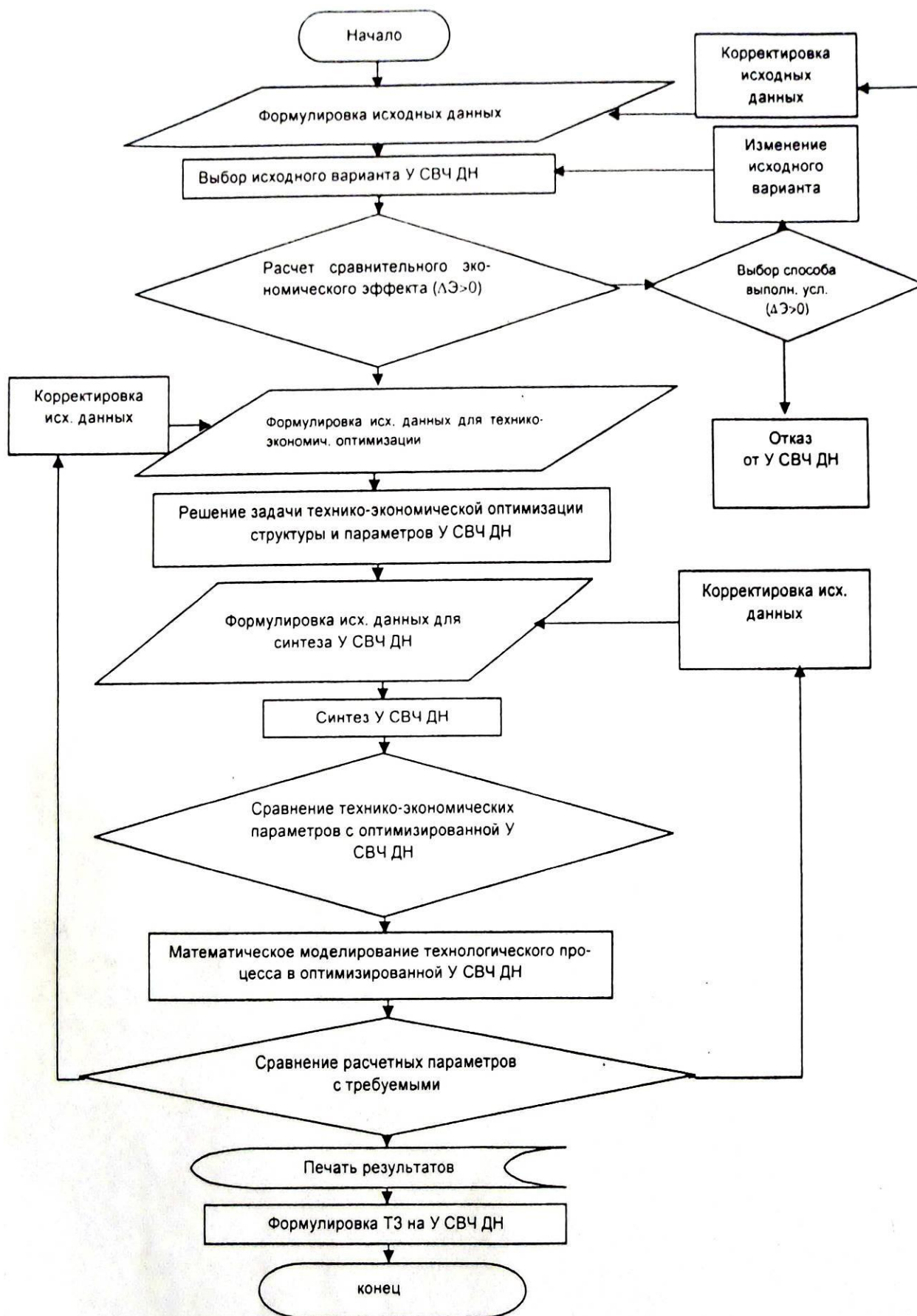
Задача сводится к решению системы уравнений

$$\frac{d\mathcal{E}_{\Sigma}}{dx_i} = 0 \quad (i=1, 2, \dots, n). \quad (11)$$

Особое место в проектировании СВЧ установок с учетом фактора рыночной экономики занимает обоснование целесообразности применения конкретного технологического процесса. Речь идет о критериях эффективности, которые можно записать в виде

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_{\Sigma_{\max}} &> 0, \\ t_{\text{вн}} &< t_{\text{вн } \phi}, \\ \mathcal{E}_{\Sigma_{2\max}} - \mathcal{E}_{\Sigma_{1\max}} &> 0, \end{aligned} \quad (12)$$

где $t_{\text{вн}}$ – расчетный срок возврата инвестиций; $t_{\text{вн } \phi}$ – усредненный в рассматриваемый период для данного города (района) срок возврата инвестиций в различные отрасли хозяйства, индексы 1 и 2 соответствуют базовой установке и сравниваемой с ней СВЧ установке.

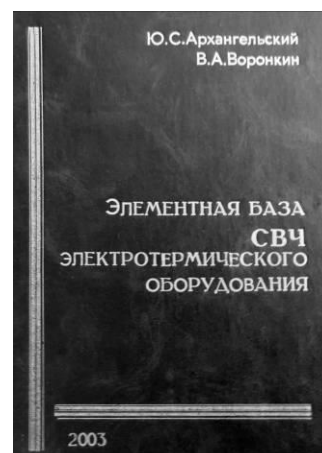


Алгоритм технико-экономического проектирования СВЧ электротермических устройств

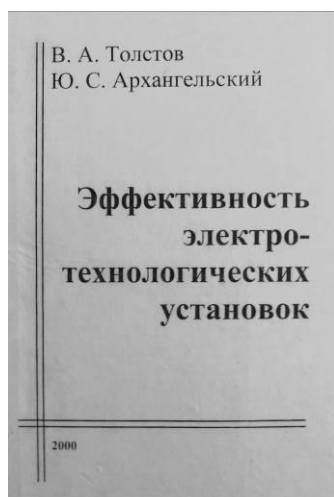
Если экономические расчеты не подтверждают целесообразности проектирования СВЧ оборудования, то всякая попытка его использования в промышленности приводит к дискредитации этого оборудования.

Вопросы технико-экономического проектирования СВЧ электротермических установок изложены в монографиях «СВЧ электротермия» Ю.С. Архангельского (1998 г.) «Эффективность электротехнологических установок» В.А. Толстова, Ю.С. Архангельского (2000 г.), «СВЧ электротермические установки лучевого типа» Ю.С. Архангельского, С.В. Тригорлого (2000 г.), «Элементная база СВЧ электротермического оборудования» Ю.С. Архангельского, В.А. Воронгина (2003 г.), «Проектирование электротехнологических установок» Е.В. Колесникова (2006 г.), «Проектирование и эксплуатация электротехнологических установок» Е.В. Колесникова, Ю.С. Архангельского (2008 г.), «Ущерб и резервирование в СВЧ электротермии» Ю.С. Архангельского, А.В. Доценко (2010 г.), «Камеры лучевого типа СВЧ электротехнологических установок» Ю.С. Архангельского, К.Н. Огурцова, Е.М. Гришиной (2010 г.).

смотрены проблемы надежности и резервирования.

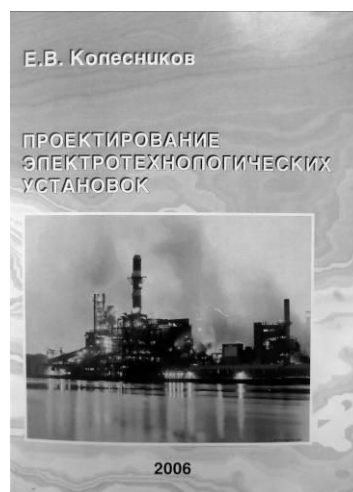


Предложена обобщенная структурная схема СВЧ электротермического оборудования и описана его элементная база. С помощью системного подхода предложена процедура технико-экономической оптимизации элементной базы и структуры СВЧ электротермического оборудования, позволяющая проектировать высокоэффективные процессы производства изделий из диэлектриков в отсутствие и при наличии фазовых переходов.



Предложены пути повышения энергетической эффективности и экономии электроэнергии. На базе системного подхода предложена процедура технико-экономической оптимизации и сопоставления электротехнологических установок.

Проанализированы рабочие схемы, режимы и параметры СВЧ установок, рас-



Изложены методы проектирования электротехнологических установок. В основу положено решение самосогласованной задачи технико-экономической оптимизации установки и анализ ее рабочей камеры. Возможности проиллюстрированы на примере СВЧ электротермических установок.



Изложены основы проектирования и эксплуатации электротехнологических установок. Рассмотрены экономические аспекты электротехнологии, а также эффективность электротехнологических процессов и установок, согласованная задача технико-экономической оптимизации и анализа электротехнологических установок, энергообследование промышленных предприятий с электротехнологическими установками и учет энергоресурсов.



Рассмотрены вопросы ущерба и резервирования в установках и системах СВЧ нагрева. На базе системного подхода проведена оптимизация ущерба и резервирования, обеспечивающая максимальную экономическую эффективность СВЧ электротехнологического оборудования.

Применение экономических расчетов стало принципиально новым в проектировании СВЧ электротехнологического оборудования. В СПИ разработана процедура

системного подхода к выбору элементной базы СВЧ установок, оптимизации структуры и параметров этих установок, их источников СВЧ энергии с учетом их технических, технологических характеристик, тарифов на электроэнергию и воду, цены готовой продукции, количества обслуживающего персонала и его зарплаты, системы налогов и платежей.

Экономические расчеты позволили ответить на вопросы об оптимальной мощности СВЧ энергии и частоте СВЧ генератора, конкурентоспособности СВЧ установок на рынке технологического оборудования. Показано, что с помощью экономических расчетов можно определить целесообразность разработки данного проекта СВЧ электротехнологического оборудования.

Только технико-экономические расчеты позволили рассчитывать ущерб от перерыва в работе СВЧ оборудования и оценить экономическую эффективность различных вариантов резервирования.

Наконец, экономические расчеты дают возможность оценить влияние на эффективность СВЧ установок заданных параметров, таких как тарифы, налоги и платежи.

17

Многое было ему в диковинку. Например, у него появилась служебная машина. На крыле «Волги» была ржавая дыра.

- А у ректора где дыра? – спросили его сослуживцы.

У ректорской машины дыр не было, но все мысли были о реализации предвыборной программы ректора В.В. Петрова.

Каждое утро к нему приходил М.Е. Любимов, начальник учебно-методического управления, ставший при жизни легендой. Бывший военный, кандидат технических наук, доцент, давно работает в этой должности, а его работоспособности могут завидовать многие.

- Михаил Егорович, очень много бумаг, очень много!

- Будем сокращать.

Сократили. Всем понравилось. Но все проблемы учебной работы СПИ были мел-

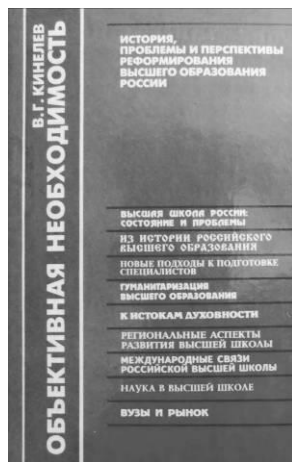
кими на фоне происходившего в эти годы в стране.

- То ли еще будет, – качали головой электрики после событий в Прибалтике...

И грянул гром. В Крыму блокировали Генерального секретаря ЦК КПСС, в Москве объявился ГКЧП.

Периферия ахнула, и, как могла, следила за происходящим в Москве. Б.Н. Ельцин залез на танк, объявил о запрещении КПСС, в Беловежской пуще заявили о роспуске СССР, народ узнал о А.Б. Чубайсе, приватизации...

О событиях тех лет в высшей школе заинтересованный читатель узнает в книге «Объективная необходимость» председателя Государственного комитета РФ по высшему образованию В.Г. Кинелева.



В книге анализируются проблемы, обусловившие необходимость глубоких изменений в системе высшего образования России на рубеже XX-XXI вв., оценивается состояние и размышляется о возможных путях дальнейшего развития высшей школы страны. Особое внимание уделяется вопросам повышения уровня гуманитарной направленности образования в процессе обновления духовной жизни общества.

Книга В.Г. Кинелева звала к размышлениям.

Высшая школа России, состояние проблемы. Государственная политика в области образования основывается на приоритете общечеловеческих ценностей... История развития высшего образования, цари

Борис Годунов, Петр 1, Московский университет, М.В. Ломоносов... Массовая математизация наук при советской власти... Сейчас главное – реформа высшего образования, необходимо использовать американскую систему подготовки бакалавров и магистров... Региональные аспекты, междисциплинарные связи, коммерциализация высшей школы.

Тогда это увлекало, вдохновляло... В.В. Петров сразу принял его предложение создать на энергофаке кафедру электротехнологии, и 12 мая 1992 года был издан приказ о создании кафедры «Автоматизированные электротехнологические установки и системы» (АЭУ). На новую кафедру с ним ушли молодые С.В. Тригорный, Е.В. Колесников, опытные В.Ю. Кожевников, А.А. Осколков.

Кафедру АЭУ пришлось создавать с нуля, и в каких сложных условиях! Спасибо ректору В.В. Перову, находившему средства на лабораторное оборудование, и заводу «Сарэлектротерм-93» за поддержку.

Архангельский Ю.С. поддержал предложение профессора-экономиста М.Е. Залмановой объединить на одном факультете экономические кафедры, разбросанные по техническим факультетам, и предложил ректору В.В. Петрову создать институт гуманитарных наук, собрав и экономистов, и историков, и социологов. Наконец была открыта первая выпускающая гуманитарная кафедра «Социальная работа».

18

В 90-е годы в СГТУ начались работы в области так называемой нетепловой СВЧ модификации полимеров.

Еще в начале исследований в области СВЧ нагрева появились работы об СВЧ пастеризации молока. Выяснилось, что в СВЧ электромагнитном поле микроорганизмы гибнут при более низкой температуре молока. Стали говорить о специфическом действии СВЧ электромагнитных колебаний на биополимеры (микроорганизмы). Исследованиями в этой области занимались на биологическом факультете

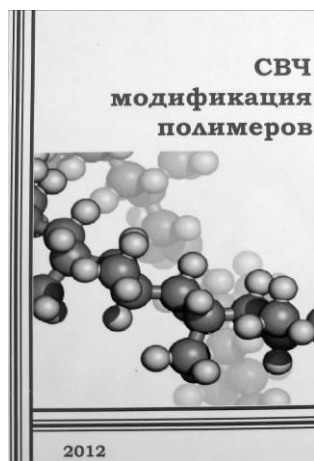
СГУ имени Н.Г. Чернышевского и в Институте физиологии растений и микроорганизмов АН СССР в Саратове В.В. Игнатов и В.И. Панасенко. Экспериментальная установка была разработана в СПИ Ю.С. Архангельским и изготовлена на заводе А.П. Пиденко.

Механизм был найден, но микробиологи не советовали использовать СВЧ пастеризацию молока, так как тогда не было уверенности, что при этом будет подавлена жизнедеятельность всех возможных в молоке микроорганизмов.

И вот в середине 90-х Ю.С. Архангельский сформулировал гипотезу о специфическом воздействии СВЧ электромагнитных колебаний на полимеры.

Такое специфическое воздействие стало называться нетепловым. Его обнаружение сулило придание полимерным материалам новых технологических свойств.

Сначала гипотеза была подтверждена В.А. Гильмановой на полисульфоне: уже короткое пребывание полисульфона в СВЧ электромагнитном поле показало, что это влияет на ряд свойств полисульфоновых листов.

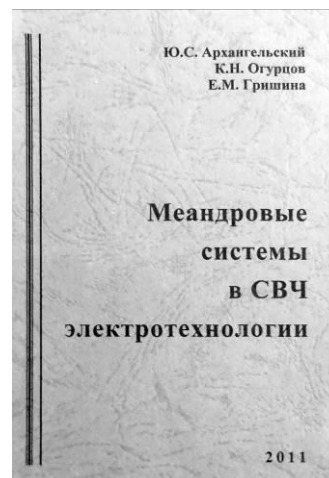


Систематизированы результаты экспериментальных исследований тепловой и нетепловой СВЧ модификации полимеров, приведена теория рабочих камер и методы проектирования СВЧ электротехнологических установок, реализующих СВЧ модификацию полимерных материалов.

Позднее аналогичные исследования на поликапроамидных нитях и тканях на их

основе провела С.К. Слепцова, а на эпоксидных компаундах – В.А. Лаврентьев. Наконец, все эти исследования были обобщены в докторской диссертации С.Г. Калгановой.

Вопросы нетепловой СВЧ модификации изложены в монографиях «СВЧ модификация полимеров» Ю.С. Архангельского, Е.М. Гришиной, В.А. Лаврентьева, С.К. Слепцовой (2012 г.), «Меандровые системы в СВЧ электротехнологии» Ю.С. Архангельского, К.Н. Огурцова, Е.М. Гришиной (2011 г.).

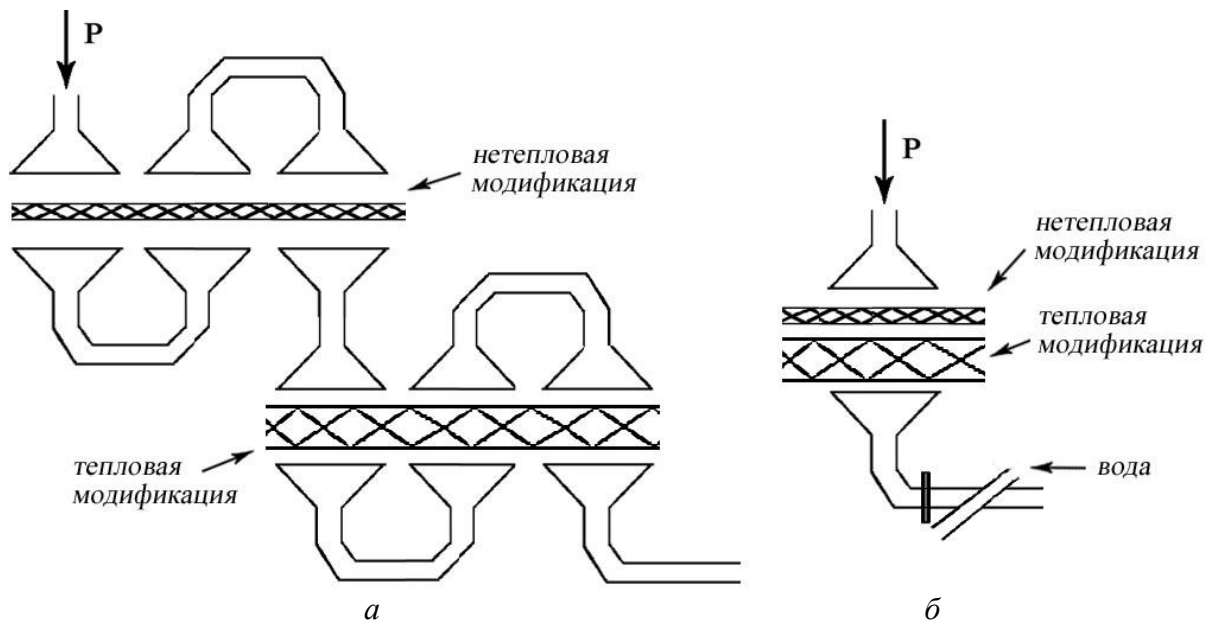


Приведены сведения о тепловой и нетепловой СВЧ модификации диэлектриков и реализующих эти процессы СВЧ электроустановках. Рассмотрены вопросы СВЧ модификации диэлектриков с большими поверхностями и объемами. Приведены конструкции рабочих камер меандрового типа. Рассмотрены методы проектирования меандровых систем в камерах с бегущей волной и в камерах лучевого типа.

19

Самой масштабной работой, в которой он как проректор участвовал, было получение их институтом статуса технического университета. Идея эта не нашла поддержки среди многих преподавателей.

- Зачем нам это? – приходили к нему заведующие кафедрами. – Мы – знаменитый Саратовский политех. А что это такое, СГТУ? Не надо нам этого!



Варианты применения СВЧ энергии для нетепловой СВЧ модификации диэлектриках в гибридных камерах лучевого типа: а - тепловая и нетепловая СВЧ модификации в двух отдельных камерах; б - тепловая и нетепловая СВЧ модификации в одной камере.

Приходилось объяснять.

- Мы выполняем предвыборную программу В.В. Петрова. В СПИ открылась гуманитарная специальность. Мы уже не политехники в старом смысле слова.

- Не бывает каких-то технических университетов. Есть СГУ, а что такое технический университет?

- Университет, в котором преобладают технические специальности.

- Это пока. А кончится тем, что гуманитарных станет больше...

Через двадцать лет, летом 2013 года в СГТУ был прием абитуриентов на 43 технические направления по 83 профилям и на 22 гуманитарные направления по 52 профилям. Преобладание технических профилей и направлений над гуманитарными в СГТУ сохраняется, но, надо признать, сократилось.

Подготовка к аттестации вуза потребовала времени и нервов. Реформирование гуманитарной подготовки было закончено. Ветераны ушли, оставшиеся преподаватели прошли переподготовку. Теперь нужно составлять учебные планы. Вся эта работа легла на плечи заместителя начальника учебно-методического управления М.Г. Мельмонт.

На время работы аттестационной комиссии функции проректоров были четко распределены. Ему предстояло обеспечить выполнение всех аттестационных мероприятий. Всю эту работу он потом сравнивал с переносом неимоверной тяжести по скользкой дороге под дождем при сильном ветре...

Но вот Саратовский политехнический институт превратился в Саратовский государственный технический университет. Он имел право чувствовать себя не последним, кто обеспечил это превращение.

В.Г. Кинелеву не удалось ввести в вузах России подготовку бакалавров и магистров вместо подготовки инженеров. Довод против этого был увесистый: во всем мире советское высшее образование считалось лучшим. В последние годы специалистов из России в странах Европы и США охотно принимали на службу. Зачем же ломать налаженную систему? Надо ее совершенствовать.

- Посмотрим, что лучше, – предложили в Москве.

В вузах вздохнули с облегчением... Стало модно применять так называемые новые технологии. Например, анонимное анкетирование студентов «Преподаватель глазами студентов». Быстро появились

вопросы. Один преподаватель опытный, строгий, ответственный, другой – молодой. Кто по мнению студентов лучше? Оказывается, молодой. И что делать проректору по учебной работе? Молодого и неопытного в одночасье опытным и ответственным не сделаешь.

Модной в те годы была идея проведения учебного процесса по модулям. Занятия по каждому курсу разбиваются в два-три модуля. После каждого модуля – контроль знаний студентов. Все было согласовано, спланировано, разработано, но начинание провалилось: в последний момент ректор В.В. Петров разрешил факультетам самим решать, вводить ли модульную систему. Та же участь постигла и рейтинговую систему: никакие доплаты к зарплате преподавателю не предполагались.

Наступил 1996 г. В декабре ему исполнилось 60 лет. Он чувствовал, что накопи-

лись усталость и раздражение. Начало учебного года 1997 г. он начал заведующим кафедрой АЭУ.

С.В. Тригорлого на кафедре уже не было. Ушел работать на предприятие. Заместителем заведующего кафедрой стал Е.В. Колесников. Вскоре ушел и он. Надо было искать пополнение, и он пригласил на должность доцента С.Г. Калганову, только что защитившую кандидатскую диссертацию по специальности «Электротехнология». А между тем в университете сменился ректор. Ректором стал первый проректор Ю.В. Чеботаревский.

Работа на кафедре шла своим чередом. Деньги по министерскому гранту на развитие экспериментальной базы были потрачены на создание установки для изучения влияния СВЧ электромагнитного поля на диэлектрики.



Установка для исследования воздействия на диэлектрики СВЧ электромагнитного поля

На этой установке эксперименты для своих диссертаций выполнили С.Г. Калганова, С.К. Слепцова, В.А. Лаврентьев, сту-

денты экспериментировали в дни научно-производственной работы и дипломного проектирования.

Потом пришла пора уступать место и ректору Ю.В. Чеботаревскому.

20

В 2006 г. на основании конкурса, проведенного в Москве по программе государственной поддержки научных школ России, научная школа СГТУ в составе заслуженного деятеля науки РФ, почетного работника высшего профессионального образования РФ, д.т.н., профессора Ю.С. Архангельского, почетного работника высшего профессионального образования РФ, д.т.н., профессора И.И. Артюхова, лауреата Государственной премии СССР, д.т.н. профессора М.А. Фурсаева, д.т.н., профессоров В.А. Царева, Г.Г. Угарова, И.Н. Антонова, к.т.н. доцентов В.Ю. Кожевникова, Д.А. Давыдова, С.Ф. Степанова, И.Б. Яковлевой, К.Н. Огурцова, С.Г. Калгановой была признана ведущей научной школой России в области инженерных и технических наук (НШ-9553.2006.8) Научная школа вела исследования по всем основным разделам СВЧ электротехнологии: источники СВЧ энергии, линии передачи, рабочие камеры, транспортные системы на базе электроприводов, системы управления СВЧ электротехнологических установок, электротехнологические процессы, измерения в СВЧ электротехнологии, модификация диэлектриков и получение новых материалов с применением СВЧ энергии, энергосбережение в СВЧ электротехнологии, экономические, технические, технологические и социальные аспекты электротехники и электротехнологии.

Позднее члены научной школы С.Ф. Степанов, С.Г. Калганов защитили докторские диссертации. В разные годы из-за увольнения из СГТУ из состава научной школы выбыли И.Б. Яковлева, С.Г. Калганов. В феврале 2013 года состоялось собрание научной школы НШ-9553.2006.8, на котором были подведены итоги работы, определены направления работ в дальнейшем и решено включить в состав школы выразивших желание принять участие в ее работе д.т.н., профессора Б.К. Сивякова, к.т.н., доцентов Е.М. Гришину, В.А. Лаврентьева, Т.Ю. Дунаеву.

Между тем на конференции трудового коллектива СГТУ новым ректором был избран доктор исторических наук, профессор И.Р. Плеве, человек инициативный, уже имеющий опыт работы ректором и министром образования правительства Саратовской области. Ректор создал Совет старейшин, включив в него ветеранов, наиболее авторитетных в университете. Вошел в Совет старейшин и Ю.С. Архангельский. Председателем Совета был назначен В.В. Петров. В университете начались большие перемены...

В начале 2011 г. он ушел с должности заведующего кафедрой АЭУ по состоянию здоровья.

21

Научная школа НШ-9553.2006.8 за 2006-2013 гг. подготовила 5 докторов технических наук, 30 кандидатов технических наук. Ее участники опубликовали за эти годы 12 монографий, 138 статей в журналах из списка ВАК, 87 статей в других журналах, получила 22 патента. Эти публикации характеризуют научную активность участников научной школы, широту их научных интересов. По инициативе участников научной школы НШ-9553.2006.8 в СГТУ было издано несколько номеров научно-технического журнала «Вестник СГТУ».

Публикации по СВЧ нагреву (СВЧ электротехнологии) в Саратове начались после создания в СПИ научной группы на кафедре электроники. Сначала это были публикации в регулярно издаваемых научных трудах этой кафедры, затем – публикации в материалах научно-технических конференций, проводившихся Саратовским отделением НТО РЭС имени Попова А.С., Саратовским областным Домом Техники, а также публикации в материалах международных научно-технических конференций, проводимых кафедрами АЭУ, ЭПУ, публикации в сборниках научных трудов кафедр ЭПУ, АЭУ и ЭПП («Вопросы электронной техники», «Применение СВЧ энергии в энергосберегающих технологических процессах», «Электротехнология на рубеже веков», «Актуальные про-

блемы электронного приборостроения», «Успехи современной электротехнологии», «Электо- и технологические процессы и установки», «Проблемы электроэнергетики»).

В 2013 г. в СГТУ имени Гагарина Ю.А. организован научно-технический журнал «Вопросы электротехнологии».

В 2014 г. в СГТУ начался очередной этап в развитии СВЧ электротехнологии. На этом этапе, разумеется, речь должна идти о реализации инновационных предложений, сформулированных в результате, в частности, исследований нетепловой

СВЧ модификации полимеров. Предстоит сформулировать темы новых научных исследований и разработок в области СВЧ электротехнологии. Задача организации этой работы в определенной мере осложняется естественной сменой поколений исследователей научной школы СГТУ в области СВЧ электротехнологии. Через несколько лет исполнится 50 лет НИР и ОКР по применению СВЧ энергии в технологических процессах, и дальнейшие успехи исследований в этой области зависят от того, как быстро и полно удастся решить текущие проблемы.



К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ

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

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

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

8(8452)99-87-21 — Алексеев Вадим Сергеевич (ответственный секретарь).

Просьба направлять публикации по адресу:

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

Требования к оформлению публикаций

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

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

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

Формулы и буквенные обозначения величин должны быть набраны в редакторе формул **Microsoft Equation 3.0** и иметь нумерацию.

Размерность всех величин, принятых в статье, должна соответствовать Международной системе единиц измерений (СИ). Не следует употреблять сокращенных слов, кроме общепринятых (т.е., и т.д., и т.п.). Допускается введение предварительно расшифрованных сокращений.

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

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

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

Публикации принимаются в течение всего года.

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

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

Редактор Л.А. Скворцова
Компьютерная верстка Ю.Л. Жупиловой
Перевод на английский язык А.Х. Аскаровой

Почтовый адрес: 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77
Телефон: (845-2) 99-87-63
E-mail: aeu@sstu.ru

Подписано в печать __.__.2015
Формат 60×84 1/8 Бум. офсет.
Усл. печ. л. 11,5 Уч. изд. л. 5,1
Тираж 500 экз. Заказ 121 Цена свободная
Отпечатано в Издательстве СГТУ, 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77.
E-mail: izdat@sstu.ru
Полная электронная версия журнала размещена в системе РИНЦ
в открытом доступе на платформе eLIBRARY.RU
Подписной индекс 70841 (каталог «Газеты. Журналы» на 1-е полугодие 2015 г.)
Свидетельство о регистрации СМИ *ПИ № ФС77-54621 от 01.07.2013*

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

Address: 77 Politekhnikeskaya Str., 410054, Saratov, Russia
Tel.: (845-2) 99-87-63
E-mail: aeu@sstu.ru

Print date: __.__.2015
Paper size: 60×84 1/8 Offset-Print
Conventional printed sheet 11,5 Publication base sheet 5,1
Circulation: 500 printed copies Order 121 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*

Энгельсский технологический институт Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.



Датой основания Энгельсского технологического института Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А. считается 1956 год, когда интенсивное развитие промышленности г. Энгельса в послевоенные годы привело к необходимости подготовки собственных инженерных кадров. На базе троллейбусного завода им. Урицкого был создан опорный пункт Всесоюзного заочного политехнического института, который стал первым учреждением высшего образования в г. Энгельсе.

В 1962 г. Энгельсский вуз получил статус структурного подразделения Саратовского политехнического института сначала как учебно-консультационный пункт, затем в качестве общетехнического факультета (1965 г.), затем технологического факультета (1970 г.), позднее филиала (1978 г.).

За свою более чем полувековую историю Энгельсский технологический институт внес значительный вклад в развитие образования, науки и культуры Саратовской области и России. Из его стен вышли более 12 тысяч специалистов технического профиля, которые составляют основу инженерного корпуса не только города Энгельса, но и всей Саратовской области, соседних регионов России.

В настоящее время Энгельсский технический институт располагает современной учебно-лабораторной базой и развитой социальной инфраструктурой, в составе которой научно-техническая библиотека, спортивный и тренажерные залы, студенческое общежитие.

В структуре вуза три факультета: механико-машиностроительный, технологический и вечерне-заочный. Образовательная деятельность ведется по 13 направлениям подготовки бакалавров (из 16 лицензированных направлений) и 4 магистерским программам, в 2016 г. завершается обучение по 9 специальностям. Ведется подготовка кадров высшей квалификации в аспирантуре СГТУ имени Гагарина Ю.А. по научным направлениям Энгельсского технологического института.

Пять кафедр Энгельсского технологического института имеют филиалы на ведущих предприятиях региона – ЗАО «НИИГиМ-2», ВолжНИИГиМ, ОАО «Тролза», «ВНИИгаздобыча», «Eram Systems».

Высококвалифицированный научно-педагогический коллектив, в составе которого 73 кандидата наук и 18 докторов наук, ведет работу по 9 научным направлениям в рамках базовой и проектной частей госзадания и исследований по грантам.

По результатам последнего мониторинга эффективности вузов институт признан эффективным филиалом вуза.

Энгельсский технологический институт готовит специалистов с высшим профессиональным образованием для Энгельсского муниципального района и Левобережья Саратовской области. Их подготовка отвечает современным требованиям, сочетает общекультурную основу, теоретические знания и практические навыки, умение решать научно-технические задачи. Многие выпускники Энгельсского технологического института являются руководителями и инженерно-техническими работниками современных промышленных предприятий, топ-менеджерами крупных организаций, трудятся в банковской сфере, в области информационных технологий.