

*Издается с ноября 2013 года
Выходит один раз в квартал*

№ 1 (22)

Март 2019

ВОПРОСЫ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

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

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

**Главный редактор
Зам. главного редактора
Ответственный секретарь**

**АРХАНГЕЛЬСКИЙ ЮРИЙ СЕРГЕЕВИЧ
БЕКРЕНЕВ НИКОЛАЙ ВАЛЕРЬЕВИЧ
ЮДИНА ВИОЛЕТТА ОЛЕГОВНА**

Редакционная коллегия

Ю.С. АРХАНГЕЛЬСКИЙ	д.т.н., профессор, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов
Н.В. БЕКРЕНЕВ	д.т.н., профессор, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов
Ю.В. ГУЛЯЕВ	д.ф.-м.н., профессор, академик РАН, ИРЭ имени В.А. Котельникова РАН, Москва
В.Б. ДЕМИДОВИЧ	д.т.н., профессор, СПбГЭТУ «ЛЭТИ», Санкт-Петербург
Л.С. ЗИМИН	д.т.н., профессор, СамГТУ, Самара
С.Г. КАЛГАНОВА	д.т.н., доцент, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов
В.А. КОЛОМЕЙЦЕВ	д.т.н., профессор, НПЦ «Алмаз-Фазотрон», Саратов
В.Н. ЛЯСНИКОВ	д.т.н., профессор, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов
А.Н. МАКАРОВ	д.т.н., профессор, ТвГТУ, Тверь
Г.А. МОРОЗОВ	д.т.н., профессор, КНИТУ-КАИ имени А.Н. Туполева, Казань
Ю.П. ПЕРЕЛЫГИН	д.т.н., профессор, ПГУ, Пенза
А.Ф. РЕЗЧИКОВ	д.т.н., профессор, член-корреспондент РАН, ИПТМУ РАН, Саратов
И.В. РОДИОНОВ	д.т.н., доцент, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов
В.П. РУБЦОВ	д.т.н., профессор, НИУ «МЭИ», Москва
Ф.Н. САРАПУЛОВ	д.т.н., профессор, УрФУ, Екатеринбург
Ю.Б. ТОМАШЕВСКИЙ	д.т.н., профессор, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов
Г.Г. УГАРОВ	д.т.н., профессор, КТИ, Камышин
В.Н. ХМЕЛЕВ	д.т.н., профессор, БТИ, Бийск
В.А. ЦАРЕВ	д.т.н., профессор, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов
В.О. ЮДИНА	ассистент, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов

Since November 2013
Published Quarterly

№ 1 (22)
March 2019

JOURNAL OF ELECTROTECHNICS

Scientific and Technical Publication

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

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

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

ARKHANGELSKY YURIY SERGEEVICH
BEKRENEV NIKOLAY VALERYEVICH
YUDINA VIOLETTA OLEGOVNA

Editorial Board Members

Yu. S. ARKHANGELSKY	Dr.Sc., Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov
N.V. BEKRENEV	Dr.Sc., Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov
Yu.V. GULYAEV	Dr.Sc., Professor, Academician of RAS, Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of RAS, Moscow
V.B. DEMIDOVICH	Dr.Sc., Professor, Saint Petersburg State Electrotechnical University "LETI", St. Petersburg
L.S.ZIMIN	Dr.Sc., Professor, Samara State Technical University, Samara
S.G. KALGANOVA	Dr.Sc., Associate Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov
V.A. KOLOMEITSEV	Dr.Sc., Professor, JSC Scientific-Production Center «Almaz-Phazotron», Saratov
V.N. LYASNIKOV	Dr.Sc., Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov
A.N. MAKAROV	Dr.Sc., Professor, Tver State Technical University, Tver
G.A. MOROZOV	Dr.Sc., Professor, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI, Kazan
Yu. P. PERELIGIN	Dr.I.Sc., Professor, Penza State University, Penza
A.F. REZCHIKOV	Dr.Sc., Professor, Corresponding Member of RAS, Institute of Precision Mechanics and Control of RAS, Saratov
I. V. RODIONOV	Dr.Sc., Associate Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov
V.P. RUBTSOV	Dr.Sc., Professor, National Research University «Moscow Power Engineering Institute», Moscow
F.N. SARAPULOV	Dr.Sc., Professor, Ural Federal University, Ekaterinburg
Yu. B. TOMASHEVSKY	Dr.Sc., Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov
S.V. TRIGORLY	PhD, Associate Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov
G.G. UGAROV	Dr.Sc., Professor, Kamishin
V.N. KHMELEV	Dr.Sc., Professor, Biysk Technological Institute, Biysk
V.A. TSAREV	Dr.Sc., Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov
V.O.YDINA	Assistant, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov

СОДЕРЖАНИЕ

ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЯ

Агапов С.И., Толстяков А.Ф., Корпелянский О.Ф. Определение рациональных условий сборки и настройки пьезокерамических преобразователей при резании металлов 5

Сивяков Б.К., Григорьян С.В. Установка СВЧ сушки сельскохозяйственных продуктов в фермерских хозяйствах 9

Огурцов К.Н., Антонов И.Н., Бурков А.В., Семочкин В.С., Симаганов А.Ю. СВЧ установка для регенерации цеолитов 14

Юдина В.О., Архангельский Ю.С. Применение СВЧ энергии для нагрева жидкости в потоке 22

ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА

Тимашёв Э.О., Чирков Д.А., Шулаков Н.В., Коротаев А.Д. Оптимизация вторичного элемента цилиндрического линейного вентильного двигателя 35

Менщиков И.А. Повышение эффективности функционирования приборов безопасности электровоза переменного тока серии ВЛ-80 40

Менщиков И.А. Разработка системы технической диагностики синхронного тягового генератора тепловоза серии ТЭП-70 49

ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ

Шклярский Я.Э., Растворова Ю.В., Петров И.С. Оценка вклада потребителей в ухудшение показателей качества электроэнергии 56

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Злобина И.В., Бекренев Н.В., Бодягина К.С. Компьютерное моделирование структурных изменений в от-

вержденных полимерных композиционных материалах под действием СВЧ электромагнитного поля 64

Клейменова Т.Н., Раецкая О.В. Использование соединений кремния 74

СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

Давыдов Д.А., Попов А.В. Интеллектуальные системы управления дуговым переплавом 85

ВСЕРОССИЙСКАЯ МОЛОДЕЖНАЯ НАУЧНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

«Наукоемкие проекты и технологии в машино- и приборостроении, медицине» 89

Галкин В.В., Гаврилов Г.Н., Братухин А.В., Дербенев А.А. Исследование деформационного и структурно-механического состояния стали 16ХСН в процессе высадки винтов с потайной головкой и крестообразным шлицем 89

Маркелова О.А., Гришина И.П. Технология импрегнации пористых плазмонапыленных покрытий, полученных при различных технологических режимах напыления, жидкими веществами под действием ультразвуковых колебаний 98

Таран В.М., Лясникова А.В., Дударева О.А., Маркелова О.А., Гришина И.П. Алгоритмическое обеспечение численного моделирования прочности плазмонапыленных пористых покрытий 102

ЛЕТОПИСЬ

Может ли научно-технический прогресс представлять угрозу человеку? Беседа с Н.В. Бекреневым 109

К сведению авторов 114

CONTENTS

ELECTROTHERMY

- Agapov S.I., Tolstyakov A.F., Korpelyanskiy O.F.** Determination of rational conditions for assembly and adjustment of piezoceramic transducers when cutting metals 5
- Siviyakov B. K., Grigoryan S.V.** Installation of microwaves for drying agricultural products by farming enterprises 9
- Ogurtsov K.N., Antonov I.N., Burkov A.V., Semochkin V.S., Simaganov A.Yu.** Microwave assisted regeneration of zeolites 14
- Yudina V.O., Arkhangelskiy Yu.S.** Using the microwave energy for heating the fluid flow 22

ELECTROMECHANICS

- Timashev E.O., Chirkov D.A., Shulakov N.V., Korotaev A.D.** Cylindrical linear electronic motor slider optimization 35
- Menshikov I.A.** Upgrading efficiency of the safety devices in the electric alternating current transmission line of the VL-80^s series 40
- Menshikov I.A.** Development of the system of technical diagnostics for the synchronous traction generator of the TEP-70 locomotive 49

ELECTRIC POWER SUPPLY

- Shklyarskiy Y.E., Rastvorova Iu.V., Petrov I.S.** Estimating consumers' contribution to deterioration of electric power quality indicators 56

MATERIALS SCIENCE

- Zlobina I.V., Bekrenev N.V., Bodyagina K.S.** Computer simulation of structural changes in the cured polymeric

- composite materials under the influence of the microwave electromagnetic field 64
- Kleimenova T.N., Raetskaya O.V.** Utilization of silicon connections 74

CONTROLLING SYSTEMS

- Davidov D.A., Popov A.V. Using intelligent systems to control the arc remelt processes 85

ALL-RUSSIAN CONFERENCE OF YOUNG SCIENTISTS «High Tech Projects and Technologies in Mechanical Engineering, Instrumentation and Medicine» 89

- Galkin V.V., Gavrilov G.N., Bratukhin A.V., Derbenev A.A.** Investigating the deformation and structural-mechanical condition of the 16XCH steel in the process of heading the screws with a countersunk head and cross-shaped slot 89
- Markelova O.A., Grishina I.P.** Impregnation technology of plasma-sprayed porous coatings obtained at various modes of spraying by liquid substances under the influence of ultrasound oscillations 98
- Taran V.M., Lyasnikova A.V., Dudareva O.A., Markelova O.A., Grishina I.P.** Providing algorithms for numerical modeling of strength of plasma-sprayed porous coatings 102

CHRONICLE

- Can scientific and technological progress pose a threat to man? Conversation with N.V. Bekrenev 109
- Information for Authors 114

ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЯ

УДК 621.9.048.6

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ СБОРКИ И НАСТРОЙКИ ПЬЕЗОКЕРАМИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ПРИ РЕЗАНИИ МЕТАЛЛОВ

С.И. Агапов, А.Ф. Толстяков, О.Ф. Корпелянский

DETERMINATION OF RATIONAL CONDITIONS FOR ASSEMBLY AND ADJUSTMENT OF PIEZOCERAMIC TRANSDUCERS WHEN CUTTING METALS

S.I. Agapov, A.F. Tolstyakov, O.F. Korpelyanskiy

Рассмотрены вопросы рациональных условий сборки и настройки пьезокерамических преобразователей, применяемых при лезвийной обработке материалов.

Ключевые слова: пьезокерамические преобразователи, ультразвуковые колебания, зубофрезерование, зубодолбление

При резании труднообрабатываемых материалов сталкиваются с целым рядом трудностей. Одним из наиболее эффективных способов лезвийной обработки является введение в зону резания ультразвуковых колебаний (УЗК) с частотой 18...22 кГц. При сборке пьезокерамических преобразователей большое значение имеют вопросы рациональных условий сборки для получения максимальной амплитуды колебаний на излучающем торце. В работах [1-3] показано, что рациональная амплитуда ξ УЗК для механической обработки равна 4...6 мм. На рис. 1 изображен пьезокерамический преобразователь.

Известные ультразвуковые устройства имеют невысокий технический уровень, определяемый невозможностью рационального выбора материала наиболее слабого звена – центральной соединительной шпильки.

The paper discusses the issues of rational conditions for the assembly and adjustment of piezoceramic transducers used in blade processing of materials.

Keywords: piezoceramic transducers, ultrasonic vibrations, gear milling, gear shaping

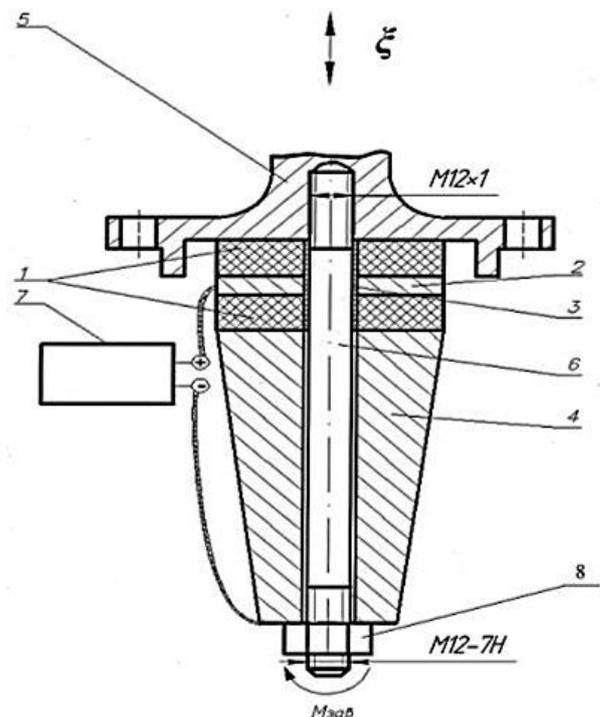


Рис. 1. Пьезокерамический преобразователь

Пьезокерамический преобразователь содержит два пьезокольца 1, между которыми заключена металлическая прокладка из отожженной меди 2 и изолирующая втулка из электротехнического текстолита 3, которые сжимаются частотопонижающими накладками 4 и 5, при этом накладка 4 является отражающей, а накладка 5 – излучающей. Излучающая накладка выполнена из стали 40Х, закаленная до HRC₃, 44..46, а отражающая – из стали 10. Жесткий акустический контакт осуществляется с помощью соединительного элемента в виде шпильки 6 и гайки 8. Завинчивание осуществляется динамометрическим ключом. С ультразвукового генератора 7 подаются электрические сигналы на пьезокерамический преобразователь.

Большой проблемой долговечности работы пьезокерамического преобразователя является работоспособность центральной шпильки при работе пьезокерамических преобразователей под нагрузкой. В связи с большим влиянием напряженного состояния на стойкость крепежного соединения повышение срока его гарантийной работы может быть достигнуто при максимальном уменьшении в нем знакопеременных напряжений. В связи с этим в концентраторах следует избегать резких перепадов сечений. Особое внимание следует уделять резьбовым соединениям, так как именно в зоне резьбы происходит возрастание напряжения, которое может привести к разрушению соответствующего элемента колебательной системы [4-6].

Очень важно при сборке ультразвукового блока (накладка, пьезокерамические кольца, концентратор) обеспечить прочное и плотное соединение поверхностей накладок и пьезоэлементов. Для улучшения работы блока между накладкой, пьезокерамическими кольцами и концентратором устанавливаются прокладки, изготовленные из мягкой отожженной медной фольги. Перед сборкой поверхности в местах соединения тщательно протираются и обезжириваются спиртом.

Наиболее прочное соединение всего блока достигается путем стягивания накладки, пьезоэлементов и концентратора при помо-

щи центральной шпильки и гайки, так как именно оптимальная затяжка во многом определяет амплитуду колебаний на торце инструмента и долговечность шпильки.

С увеличением крутящего момента, приложенного к гайке, с 20 до 100 Нм напряжение возбуждения уменьшается с 120 до 25 В (рис. 2), что позволяет подвести повышенное напряжение к пьезоэлектрическим преобразователям. В это время амплитуда УЗК на торце инструмента также увеличивается с 2 до 6 мкм (рис. 3), то есть наиболее простой способ увеличения амплитуды УЗК – повышение крутящего момента при затягивании гайки. Однако с увеличением крутящего момента увеличиваются и напряжения в шпильке, что ведет к ее разрушению.

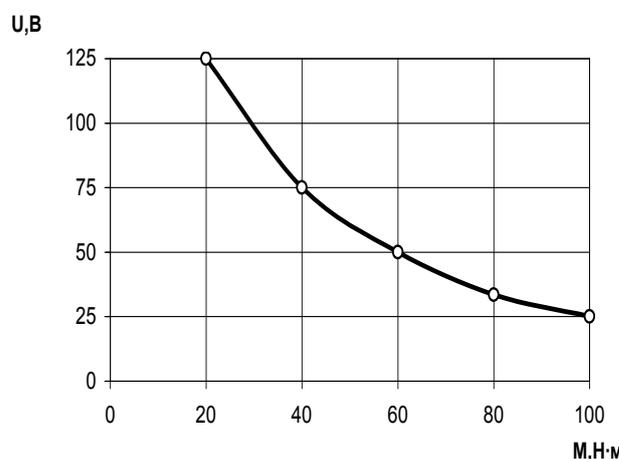


Рис. 2. Влияние крутящего момента на напряжение возбуждения ультразвукового блока

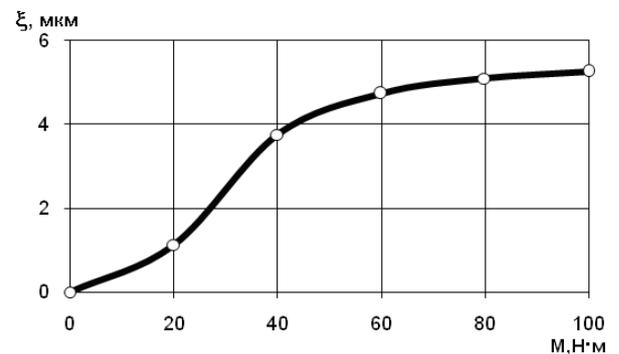


Рис. 3. Влияние крутящего момента на амплитуду колебаний рабочего торца излучающей накладки

Результаты экспериментов свидетельствуют о сложном воздействии УЗК на процесс пластического деформирования и

разрушения шпилек-образцов. По данным работы [2] установлено, что условные пределы текучести всех материалов при ультразвуковом нагружении уменьшаются при соответствующем повышении растяжения. Такое изменение физико-механических свойств металлов может быть объяснено теорией дислокаций.

В теории деформационного упрочнения предполагается, что упрочненный материал содержит дислокации, которые расположены беспорядочно, а внутри кристалла имеются хаотически распределенные внутренние напряжения. Знакопеременные напряжения увеличивают напряжения в кристаллах. Для объяснения процесса разрушения металла при знакопеременном напряжении в настоящее время широкое распространение получила теория Мотто. При получении УЗК предполагается, что выделяемая при этом энергия вызывает периодические колебания активных дислокаций возле положения равновесия.

Согласно цепной теории дислокаций при столкновении единичных дислокаций образуются группы малоподвижных (сидячих) дислокаций, благодаря чему в металле возникают субмикротрещины. Их накопление на границах или внутри зерен вызывает потерю устойчивости материала, то есть ослабление прочности металла и снижение модуля упругости. Слияние соседних субмикротрещин образует усталостную трещину.

Наложение УЗК на металл способствует более быстрому наступлению потери устойчивости кристаллических решеток при воздействии внешних нагрузок. При статических нагружениях с наложением УЗК на испытываемый образец условный предел текучести материалов снижается на 10-21% [4]. Поэтому наиболее нагруженную деталь (шпильку ультразвукового блока), находящуюся под воздействием УЗК, следует изготавливать из материалов с возможно большим пределом текучести, что подтверждается и нашими опытами со шпильками из стали 40X, закаленной до HRC_э 44...46, стали 40 с HRC_э 30...32 и стали 12X18H10T. Фотографии разрушения этих шпилек по резьбе 12×1 представлены

на рис. 4. В наших условиях *Мзав* составляет 60...80 Нм, так как при этом обеспечивается оптимальное сочетание амплитуды УЗК на торце инструмента и долговечности шпильки ультразвуковой головки.

Наиболее простой способ увеличения амплитуды УЗК на торце концентратора – повышение момента завинчивания *Мзав* соединительного элемента (шпильки и гайки), однако с увеличением момента завинчивания соединительного элемента увеличиваются напряжения в нем, что ведёт к разрушению шпильки по внутреннему диаметру резьбы [1].

Исследования по определению оптимальной марки материала для изготовления соединительных элементов показали, что время работы до разрушения при моменте завинчивания 150 Нм были следующие:

- для шпильки, изготовленной из стали 40X и закалённой до HRC_э, 44...46 часов;
- для шпильки, изготовленной из стали 40X и закалённой, примерно 120 часов;
- для шпильки, изготовленной из стали 12X18H10T, свыше 800 часов.

Результаты эксперимента свидетельствуют о сложном воздействии УЗК на процесс пластического деформирования и разрушения шпилек-образцов. На всех шпильках наблюдается опережающая трещина.

На основании проведенных исследований можно сделать вывод: резьбовая часть шпильки, присоединенная к излучающей накладке (концентратору), должна выполняться на резьбошлифовальном станке для уменьшения концентратора напряжений. Наилучшие результаты наблюдаются при изготовлении шпильки из стали 12X18H10T.

Условные пределы текучести всех материалов при ультразвуковом нагружении уменьшаются, что может быть объяснено теорией дислокаций. Для объяснения процесса разрушения металла при знакопеременном напряжении в настоящее время широкое распространение получила теория Мотто. При получении УЗК предполагается, что выделяемая при этом энергия вызывает периодические колебания активных дислокаций возле положения равновесия. Согласно цепной теории дислокаций при столкновении

единичных дислокаций образуются группы малоподвижных «сидячих» дислокаций, благодаря чему в металле возникают субмикротрещины. Их накопление на границах или внутри зёрен вызывает потерю устойчивости

материала, то есть ослабление прочности металла и снижение модуля упругости, которое возрастает с увеличением амплитуды УЗК. Слияние соседних субмикротрещин образует усталостную трещину.

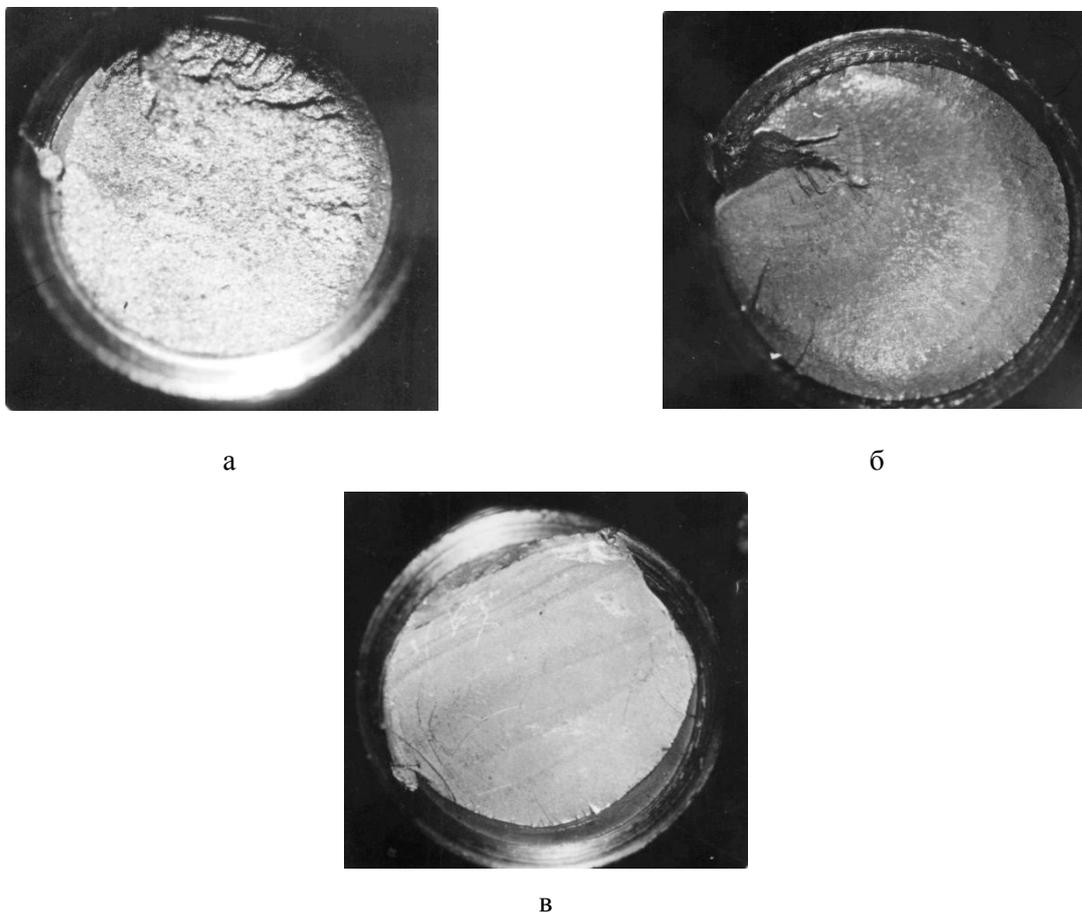


Рис. 4. Фотографии разрушения шпильки ультразвукового блока по резьбе 12×1:
а – материал шпильки 40Х, HRC₃ 44...46; *б* – материал шпильки сталь 40 HRC₃ 30...32;
в – материал шпильки 12Х18Н10Т

Наложение УЗК на металл способствует более быстрому наступлению потери устойчивости кристаллических решёток при воздействии внешних нагрузок. При статических нагружениях с наложением

УЗК на испытываемый образец условный предел текучести материалов снижается на 12-15%. Материал шпильки следует изготавливать из материала с большим пределом текучести [2].

ЛИТЕРАТУРА

1. **Агапов С.И.** Повышение эффективности механической обработки путем применения ультразвука / С.И. Агапов, В.В. Головкин. Самара: Изд-во СНЦ, 2010. 134 с.

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

3. **Мартынов В.Д.** Исследование влияния ультразвуковых колебаний на механические свойства стали / В.Д. Мартынов, А.А. Полозков, Н.П. Гребенков // Автоматизация производственных процессов. Ростов-н/Д., 1969. С. 43-46.

4. **Казанцев В.Ф.** Расчёт колебательных систем ультразвуковых станков / В.Ф. Казан-

цев // Электрохимические и электрофизические методы обработки. 1974. Вып. 8. С. 1-4.

5. Меркулов Л.Г. Теория и расчёт составных концентраторов / Л.Г. Меркулов, А.В. Харитонов // Акустический журнал. 1959. Т. 5. Вып. 2. С. 183-190.

6. Kazantsev V.F. Calculating the oscillation systems of ultrasonic mashines / V.F. Kazantsev // Electrochemical and electrophysical machining techniques. 1974. 8. P. 1-4.

Агапов Сергей Иванович – доктор технических наук, профессор кафедры «Технология машиностроения» Волгоградского государственного технического университета

Толстяков Андрей Федорович – аспирант кафедры «Технология машиностроения» Волгоградского государственного технического университета

Корпелянский Олег Федорович – аспирант кафедры «Технология машиностроения» Волгоградского государственного технического университета

Sergei I. Agapov – Dr. Sc., Professor Department of Mechanical Engineering Technology, Volgograd State Technical University

Andrei F. Tolstyakov – Postgraduate Department of Mechanical Engineering Technology, Volgograd State Technical University

Oleg F. Korpelyanskiy – Postgraduate Department of Mechanical Engineering Technology, Volgograd State Technical University

Статья поступила в редакцию 01.03.19, принята к опубликованию 15.03.19

УДК 621.37, 621.365

УСТАНОВКА СВЧ СУШКИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ПРОДУКТОВ В ФЕРМЕРСКИХ ХОЗЯЙСТВАХ

Б.К. Сивяков, С.В. Григорьян

INSTALLATION OF MICROWAVES FOR DRYING AGRICULTURAL PRODUCTS BY FARMING ENTERPRISES

B.K. Sivyakov, S.V. Grigoryan

Предложен вариант СВЧ установки с круговым движением сельхозпродуктов через совокупность желобковых волноводов, реализующей циклическую технологию сушки сельхозпродуктов. Это позволяет повысить эффективность сушки при относительно малых габаритах установки и снизить потребление электроэнергии, что важно для фермерских хозяйств.

Ключевые слова: установка циклической СВЧ сушки сельскохозяйственной

The article presents an option for a microwave installation with a circular motion of agricultural products through a set of groove type waveguides to implement a cyclic technology of drying agricultural products. This technology increases the drying efficiency under relatively small dimensions of the installation, and allows for reducing electricity consumption, which is important for farming enterprises.

Keywords: installation of a cyclic microwave dryer of agricultural products, circular move-

продукции, круговое движение продукта в СВЧ поле, желобковые волноводы, встречное движение потоков СВЧ энергии в волноводах, анализ потерь энергии в продукте

ment of the product in the microwave field, groove type waveguides, counter movement of the microwave energy flows in the waveguides, analysis of energy loss in the product

В последние десятилетия СВЧ технологии занимают все большее место в сельском хозяйстве и в перерабатывающей промышленности. В частности, все более важное значение приобретают оборудование и технологии сушки различной сельхозпродукции и предварительной обработки ее перед закладкой на длительное хранение.

До настоящего времени основное внимание уделялось созданию мощного промышленного оборудования СВЧ и комбинированной (СВЧ конвективной) сушки различных диэлектрических материалов [1, 2]. При высоких результатах, достигаемых при использовании такого оборудования, для ряда применений в перерабатывающей промышленности оно оказалось малоприменимым из-за больших габаритов и электропотребления. Особенно это актуально для малых и средних фермерских хозяйств с малыми объемами производства.

В данной работе предлагается СВЧ установка с круговым движением сельхозпродуктов через систему квазиоптических желобковых волноводов (ЖВ), реализующая циклическую технологию сушки продуктов. Эта волноведущая система обладает уникальными возможностями: широкой (до 7 октав) рабочей полосой, что позволяет на рабочих частотах, разрешенных для технологических устройств СВЧ, работать с волноводами, имеющими большие размеры поперечного сечения; практически вся энергия бегущей по ЖВ электромагнитной волны распространяется на основном типе волны H_{11} , жестко связанным с желобом и не излучающимся в окружающее пространство при открытых боковых стенках ЖВ. Циклическая технология сушки продукта позволяет существенно уменьшить габариты СВЧ установки и снизить потребление электроэнергии.

Анализ процесса обработки сельхозпродуктов в СВЧ установке с круговым движением. Предлагаемая установка

состоит из нескольких параллельно расположенных желобковых волноводов, через которые на кольцевом транспортере движется продукт. Энергия от СВЧ генераторов поступает с обоих концов волноводов и поглощается в продукте (рис. 1). В результате встречных потоков СВЧ энергии обеспечивается повышение интенсивности сушки продукта и, следовательно, существенно сокращаются габариты установки.

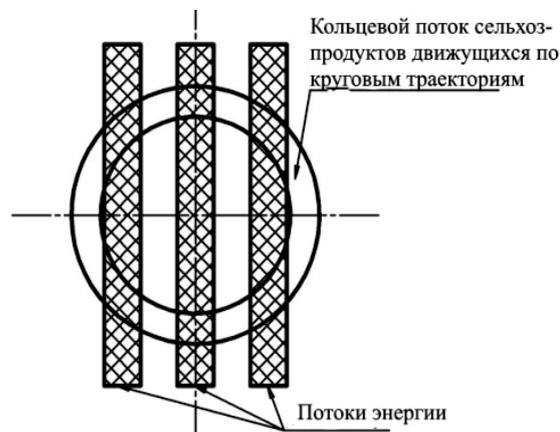


Рис. 1. Потоки СВЧ энергии в трех желобковых волноводах и пересекающие их на кольцевом транспортере продукты

Рассмотрим распределение СВЧ мощности на основном типе волны H_{11} по сечению потока (вдоль оси x) – $P_0(x)$. Оно может быть представлено в виде [3]:

$$P_0(x) = kP_0 \cos \frac{\pi}{2} \left[\frac{x}{a} \right], \quad (1)$$

где k – нормировочный коэффициент; P_0 – поток мощности СВЧ волны в сечении z , начало системы координат расположим в середине потока, тогда a – половина ширины потока СВЧ энергии, x – текущая координата.

Такое распределение (рис. 2) хорошо соответствует экспериментально измеренному распределению СВЧ электромагнитного поля по сечению потока [3].

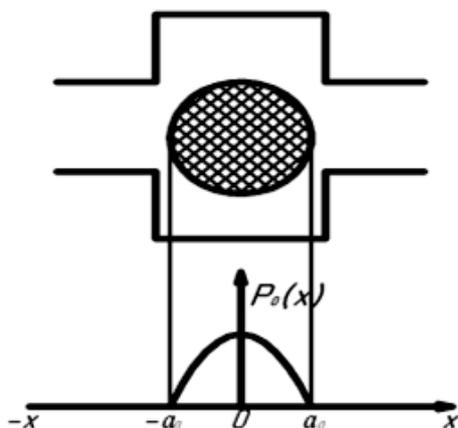


Рис. 2. Распределение СВЧ мощности в поперечном сечении ЖВ, распространяющейся по оси u вдоль волновода, на основном типе волны H_{11}

При наличии в ЖВ продукта распределение поля несколько иное, поскольку поле «втягивается» в продукт из-за его более высокой диэлектрической проницаемости и становится более концентрированным (рис. 3).

Как показывают экспериментальные исследования [4], оно еще ближе к косинусоидальному.

Рассмотрим процессы в системе ЖВ при круговом движении продуктов. В каждом ЖВ уровень энергии убывает по мере

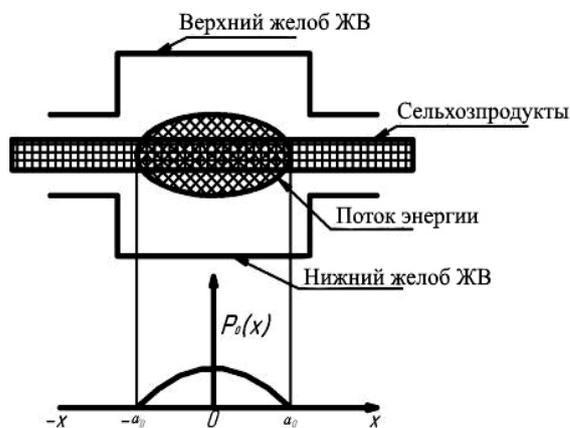


Рис. 3. Распределение СВЧ мощности в поперечном сечении ЖВ, нагруженного продуктом

Поскольку источники энергии располагаются с двух концов каждого ЖВ для повышения интенсивности сушки, энергия вдоль ЖВ распространяется во встречных направлениях.

Вначале рассмотрим более простой для анализа случай центрального ЖВ. В этом случае продукт движется перпендикулярно оси потока СВЧ энергии (рис. 4).

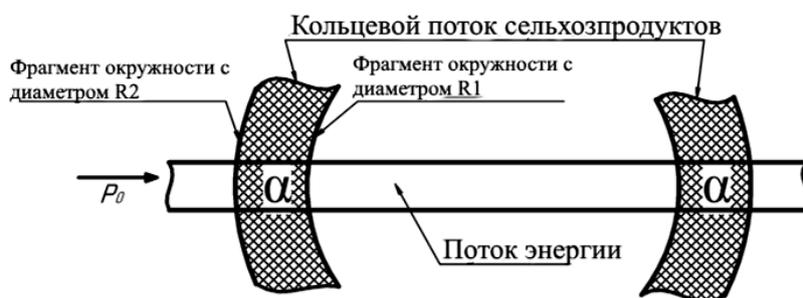


Рис. 4. Фрагмент кольцевого потока продукта, пересекающего поток СВЧ энергии в центральном ЖВ

Со стороны внешней границы слоя с радиусом R_2 в продукт поступает энергия от источника P_0 , а со стороны внутренней границы слоя с радиусом R_1 поступает энергия от другого такого же источника, но уже ослабленная в сегменте слоя продукта, расположенном с другой стороны кольца (рис. 5).

Следовательно, в рассматриваемый сегмент продукта со стороны внутренней гра-

ницы R_1 поступит ослабленный поток мощности:

$$1 - 10^{-0,1\alpha\Delta y} \approx P_0 \left(1 - 10^{-0,1\alpha(R_2 - R_1)} \right). \quad (2)$$

Здесь не учтено, что небольшая часть потока СВЧ мощности пройдет по поперечному сечению ЖВ вне продукта, но для начальных оценок им можно воспользоваться.



Рис. 5. Схема взаимодействия кольцевого потока продукта и линейного потока СВЧ энергии в ЖВ

В процессе прохождения по слою продукта СВЧ энергия будет поглощаться продуктом и выделяться в нем в виде тепловой энергии. Схематически для находящегося в СВЧ электромагнитном поле

фрагмента продукта это можно представить следующим образом (рис. 6). Тогда на произвольном радиусе y уровень суммарной, приходящей с двух сторон, мощности будет равна

$$P(y) = P_0 \left\{ \left[1 - 10^{-0,1\alpha(R_2-y)} \right] + \left[1 - 10^{-0,1\alpha(R_2-R_1)} 10^{-0,1\alpha(y-R_1)} \right] \right\} \cong P_0 \left\{ 2 - 10^{-0,1\alpha(R_2-y)} - 10^{-0,1\alpha[R_2-2R_1+y]} \right\}. \quad (3)$$

На удалении от центрального сечения потока энергии (в точке с координатами (x, y)) уровень взаимодействующей с продуктом мощности будет, соответственно:

$$P(x, y) = kP_{0н} \cos \frac{\pi}{2} \left[\frac{x}{a} \right] \left\{ 2 - 10^{-0,1\alpha(R_2-y)} - 10^{-0,1\alpha[R_2-2R_1+y]} \right\}. \quad (4)$$

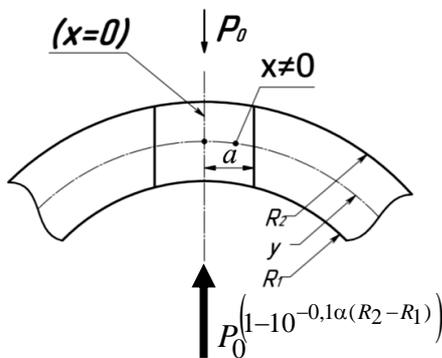


Рис. 6. Схематическое представление входящих с двух сторон в кольцевой поток продукта потоков СВЧ энергии

Рассмотрим случай однородного по диэлектрическим параметрам ϵ' и $\text{tg } \delta$ продукта с постоянным по всему его объему затуханием α . Определим энергию, выделяемую в единичном объеме за время

прохождения его через поперечное сечение потока энергии в волноводе. Для расчета примем следующие исходные условия.

1. Через электродинамическую систему движется кольцевой поток продукта с внутренним радиусом кольца R_1 , внешним радиусом R_2 и с постоянной по всей площади кольца высотой Z_0 . При этом количество выделяемой СВЧ энергии не зависит от координаты y , иными словами одинаково на любой высоте продукта.
2. Кольцо вращается вокруг своей оси с постоянной угловой скоростью

$$\omega = \frac{d\varphi}{dt}. \quad (5)$$

В точке с координатами (x, y) СВЧ мощность будет равна

$$P_{[1]}(x, y) \cong \frac{kP_{0н} \cos \frac{\pi}{2} \left[\frac{x}{a} \right]}{z_0 2a_0 (R_2 - R_1)} \left\{ 2 - 10^{-0,1\alpha(R_2-y)} - 10^{-0,1\alpha[R_2-2R_1+y]} \right\}. \quad (6)$$

3. За время прохождения через поперечное сечение потока СВЧ энергии в волноводе этот единичный объем продукта получит энергию, равную

$$W_{[1]} = \int_0^T P_{[1]}(x, y) dt, \quad (7)$$

где T – время прохождения границ потока с координатами $-a_0$ и $+a_0$. Но на каждом значении радиуса R время прохождения $T = 2r/V_{\text{линейное}}$.

$$W_{[1]} = \int_{-a_0}^{+a_0} P_{[1]}(x, y) \frac{1}{R\omega} dx = \int_{-a_0}^{+a_0} \frac{k P_{0H} \cos \frac{\pi}{2} \left[\frac{x}{a} \right]}{2a_0(R_2 - R_1) R\omega} \left\{ 2 - 10^{-0,1\alpha(R_2 - y)} - 10^{-0,1\alpha[R_2 - 2R_1 + y]} \right\} dx. \quad (9)$$

Таким образом, на единичном кольце большего радиуса движение единичных объемов продукта через поток СВЧ энергии в ЖВ за счет большей линейной скорости занимает меньше времени, и поэтому, казалось бы, чем больше радиус единичного кольца, тем меньше энергии выделяется в единичном объеме этого кольца. Но, с другой стороны, чем меньше радиус единичного кольца, тем меньший уровень мощности от источника до него дойдет в силу частичного поглощения в предыдущих (большого диаметра) слоях. В результате происходит выравнивание энергии, поглощенной в продукте, и обеспечивается более высокая равномерность сушки продукта.

В свою очередь $V_{\text{лин}} = R \frac{d\phi}{dt}$, соответственно

$$\frac{dx}{dt} = R \frac{d\phi}{dt} \text{ или } dt = \frac{dx}{R\omega}, \quad (8)$$

где $-a_0 \leq x \leq +a_0$. Тогда энергия, получаемая единичным объемом продукта:

Итак, проведен анализ процесса поглощения СВЧ энергии в продукте при его сушке в СВЧ установке с круговым движением сельхозпродуктов через систему квазиоптических желобковых волноводов, реализующая циклическую технологию сушки продуктов. Установка ориентирована на использование в фермерских хозяйствах с незначительными объемами продукции и, соответственно, малым электропотреблением. Построена математическая модель установки с рабочей камерой на желобковом волноводе, которая может быть использована при проектировании установки.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Архангельский Ю.С.** СВЧ электротермия / Ю.С. Архангельский. Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 1998. 408 с.
2. **Явчуновский В.Я.** Микроволновая и комбинированная сушка: физические основы, технологии и оборудование / В.Я. Явчуновский. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1999. 217 с.
3. **Грайсмен Д.** Желобковый волновод / Д. Грайсмен. М.: Иностран. лит., 1966.

4. **Львицын А.В.** Решение задач преобразования и транспортировки электромагнитных СВЧ колебаний применительно к оборудованию микроволновой сушки диэлектрических объектов / А.В. Львицын, В.А. Малярчук, С.В. Явчуновская // Вопросы преобразовательной техники, частотно-го электропривода и управления: межвуз. науч. сб. Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 1996. С. 47-58.

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

Григорьян Сейран Вагифович – аспирант кафедры «Электротехника и электроника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Boris K. Sivyakov – Dr.Sc., Professor Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Seiran V. Grigoryan – Postgraduate Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 20.02.19, принята к опубликованию 15.03.19

УДК 621.365

СВЧ УСТАНОВКА ДЛЯ РЕГЕНЕРАЦИИ ЦЕОЛИТОВ

**К.Н. Огурцов, И.Н. Антонов, А.В. Бурков,
В.С. Семочкин, А.Ю. Симаганов**

MICROWAVE DEVICE FOR THE REGENERATION OF ZEOLITES

K.N. Ogurtsov, I.N. Antonov, A.V. Burkov, V.S. Semochkin, A.Yu. Simaganov

Представлен опыт разработки установок и методов регенерации сорбентов в устройствах подготовки импульсного газа.

Ключевые слова: СВЧ диэлектрический нагрев, цеолит, регенерация, адсорбция, десорбция

Присутствие паров воды и примесей в природном газе негативно сказывается на состоянии аппаратов и коммуникаций установок переработки и транспорта газа вследствие образования в них гидратов. Поэтому обязательным условием подготовки газа перед использованием является его осушка и очистка.

Для этих целей используются разнообразные виды сорбентов: силикагели, цеолиты.

Для надежной эксплуатации запорной арматуры требуется обеспечить точку росы в газе, соответствующую региону экс-

The article presents an experience relating the development of devices and methods for regeneration of sorbents in the devices for instrument gas preparation.

Keywords: microwave dielectric heating, zeolite, regeneration, adsorption, desorption

плуатации оборудования. Большая часть газовых месторождений находится в северных регионах нашей Родины, а необходимая точка росы для этих районов должна быть ниже -70°C . Для ее достижения в современные адсорбционные колонны засыпают синтетические цеолиты марок NaA, NaX, CaA и др. Со временем цеолит в колоннах насыщается влагой и другими составляющими природного газа, а температура точки росы растет. Это вынуждает либо менять цеолит в колонне, либо осуществлять его регенерацию. Оборудование по осушке-регенерации

сорбента в колоннах, как правило, изготавливается парным комплектом (рис. 1). При насыщении влагой одной группой

колонн поток неосушенного газа направляется на другую группу колонн, а в первой начинается процесс регенерации.

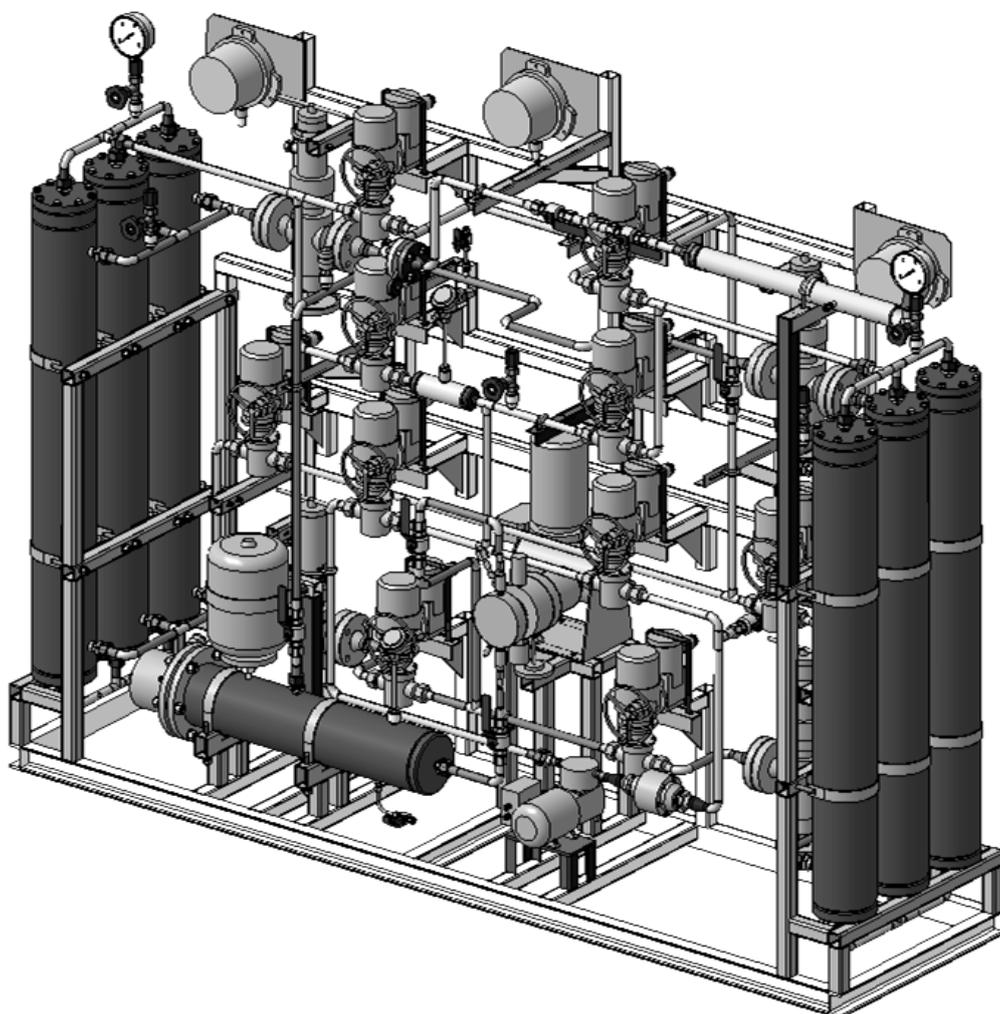


Рис. 1. Комплект оборудования для осушки импульсного газа БПИГ

Традиционная регенерация цеолитов производится методом его нагрева и сушки при температурах 250-350°C.

Для реализации процесса регенерации цеолита непосредственно в адсорбционной колонне можно использовать:

- нагревать сорбент горячим теплоносителем (газом);
- поместить в адсорбционную колонну источник нагрева (трубку с жидким теплоносителем, ТЭН);
- нагревать всю адсорбционную колонну (греющий кабель, индукционный нагрев);
- нагревать сорбент энергией электромагнитного поля.

У первых трех способов имеется общий недостаток – теплота от промежуточного теплоносителя медленно передается сорбенту в силу низкого коэффициента теплопроводности цеолитов (например, у цеолита NaX $\lambda = 0,0065$ Вт/(м·К)).

Нагрев сорбента горячим теплоносителем требует источник сухого и разогретого до 250-350°C газа большой производительности. Обычно нагрев газа осуществляется с помощью огневого подогревателя, что небезопасно.

ООО «Завод Газпроммаш» были разработаны конструкции блоков осушки импульсного газа БПИГ с нагревом-сушкой методом кондуктивного (контакт-

ного) нагрева цеолита от теплоносителя, пропускаемого по металлической трубке, расположенной в адсорбционной колонне (рис. 2). Технологическая схема ГПМ БПИГ предусматривает возможность регенерации используемого адсорбента в том числе без демонтажа баллонов, в ко-

торых производятся процессы осушки и очистки газа. Теплоноситель нагревался трубчатым электронагревателем в специальном баке. Для ускорения вывода водяных паров из колонны применяется вакуумирование с последующим сбросом паров.

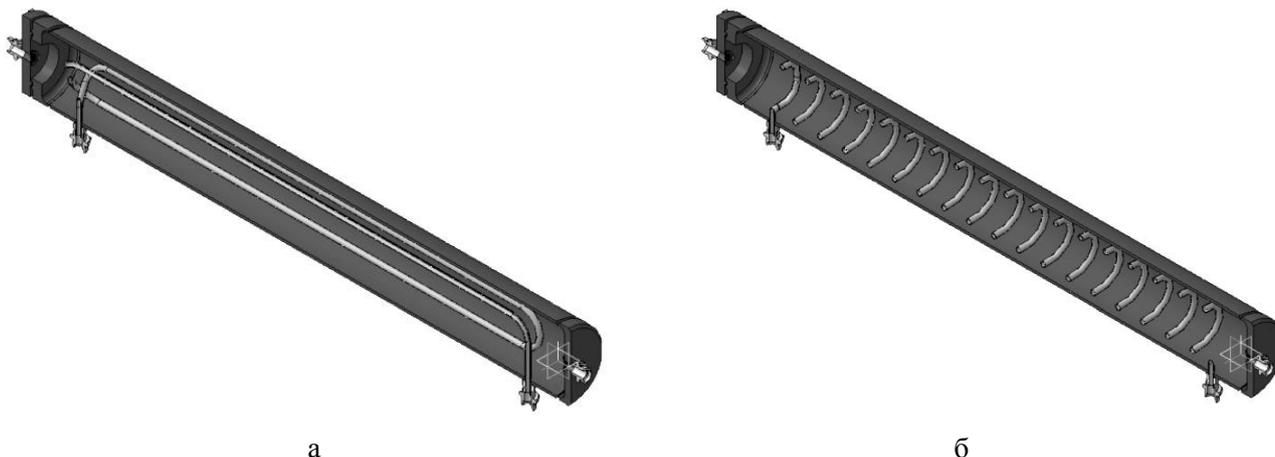


Рис. 2. Система подогрева цеолита в адсорбционной колонне: *а* – продольная труба с теплоносителем; *б* – спиралевидная труба с теплоносителем

Осушка и очистка газа производятся методом адсорбции в процессе пропускания газа через блок баллонов с адсорбентом. Значения точки росы контролируются датчиком точки росы, а концентрация примесей – газоанализатором (приборы входят в комплект поставки).

Установленный на входе фильтр улавливает механические примеси, присутствующие в газе, а фильтр на выходе очищает высушенный газ от частиц адсорбента.

Процесс регенерации адсорбента происходит следующим образом.

Блок подогрева нагревает теплоноситель, который, в свою очередь, через змеевик в баллоне нагревает адсорбент. После нагрева адсорбента до нужной температуры, контролируемой соответствующим датчиком температуры, вакуумным насосом создается разрежение в камере. В результате адсорбент начинает регенерировать, отдавая влагу и поглощенные примеси.

В зависимости от состава поглощенных примесей газ после регенерации выводится либо на факельную горелку, либо на свечу сброса в соответствии с предъявляемыми нормами безопасности.

При адсорбционной осушке наличие в газе тяжелых фракций углеводородов (от бутанов и выше) процесс усложняет, так как эти углеводороды поглощаются в стадии адсорбции на выходной части слоя адсорбента и в процессе десорбции воды (при высокой температуре) склонны к образованию коксовых отложений в порах адсорбента. Постепенное закоксовывание адсорбента ведет к снижению его адсорбционной емкости, поэтому требуется периодически регенерировать адсорбент более жестким способом, выжигая из его пор кокс.

Время регенерации сорбента при этом составляет 7 часов. Из-за присутствия в системе промежуточного теплоносителя и малой поверхности контакта трубки с теплоносителем и поверхностью сорбента, а также низкой теплопроводности сорбента эффективность такой установки невысока, хотя она и справляется с возложенными на нее задачами.

Для увеличения площади теплового контакта сорбента с источником теплоты была предложена конструкция адсорбционной колонны, в которой источником теп-

лоты для регенерации адсорбента служит высокотемпературный греющий кабель, охватывающий колонну по периметру (рис. 3). Теплота в такой системе от кабеля передается металлическому корпусу колонны, а от него сорбенту. При должной теплоизоляции колонны такой теплоподвод

позволил увеличить эффективность процесса регенерации и снизить тепловые потери в системе. Комбинирование нагрева колонн греющим кабелем с вакуумированием позволило проводить регенерацию за 6 часов при сохранении количества циклов регенерации за время службы адсорбентов.

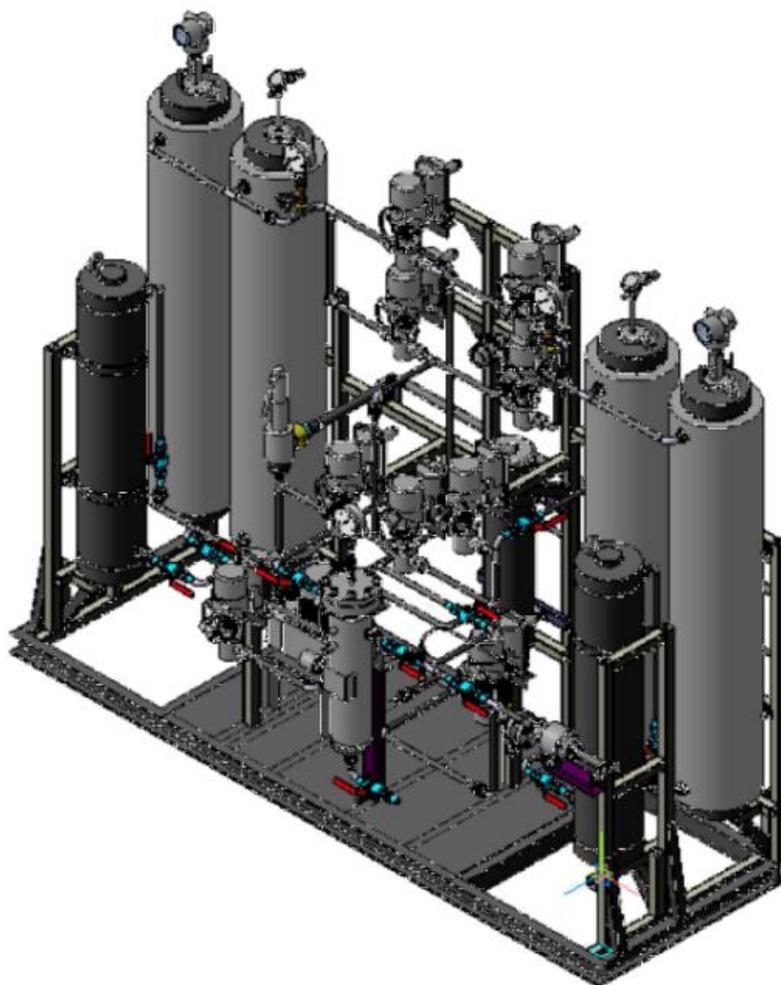


Рис. 3. БПИГ с нагревом колонн греющим кабелем

Для интенсификации процесса нагрева цеолита целесообразно использование СВЧ диэлектрического нагрева. Этот вид нагрева характеризуется высокой равномерностью при высоких темпах нагрева и особенно хорошо зарекомендовал себя при нагреве материалов с низкой теплопроводностью, к которым относятся искусственные цеолиты.

Для реализации процесса регенерации цеолита в адсорбционных колоннах блока подготовки импульсного газа в конструкцию были добавлены источник СВЧ энергии, устройство ввода СВЧ энергии в ад-

сорбционную колонну, система управления режимом работы СВЧ генератора. Для уменьшения энергоемкости процесса регенерации СВЧ нагрев также сочетается с вакуумированием.

Технологическая схема ГПМ БПИГ с СВЧ энергоподводом также предусматривает возможность регенерации используемого адсорбента без демонтажа баллонов, в которых производятся процессы осушки и очистки газа.

Предлагаемый способ регенерации цеолита заключается в нагреве цеолита, распо-

ложенного в адсорбционной колонне, электромагнитным полем СВЧ диапазона с помощью источника СВЧ энергии.

В процессе нагрева осуществляют циркуляцию парогазовой смеси, образующейся в рабочей камере при нагреве цеолита, через слои цеолита.

Циркуляция парогазовой смеси через рабочую камеру в процессе СВЧ воздействия обеспечивает выравнивание температуры по объему цеолита в рабочей камере, а периодический режим воздействия СВЧ

энергии позволяет разогревать цеолит до температуры, обеспечивающей выход молекул воды из ячеек цеолита, не разрушая его и не перегревая.

В процессе обработки цеолита в СВЧ электромагнитном поле осуществляют контроль влажности, и давления парогазовой смеси посредством датчика точки росы и датчика давления. Предлагаемый способ может быть реализован с помощью устройства, функциональная схема которого представлена на рис. 4.

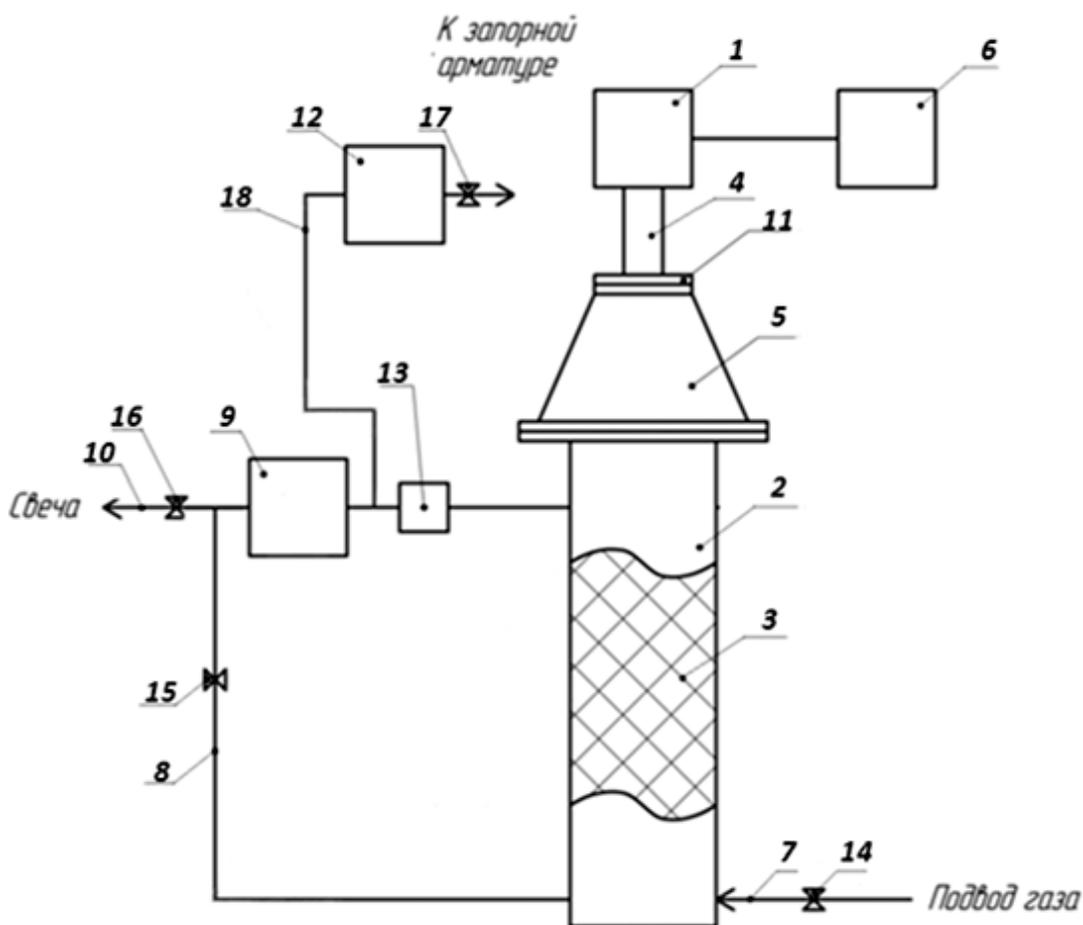


Рис. 4. Функциональная схема СВЧ установки для регенерации сорбента

Устройство для регенерации цеолита включает СВЧ генератор 1 с источником питания, рабочую камеру 2, заполненную цеолитом 3 и связанную с СВЧ генератором посредством прямоугольного волновода 4 и согласующего волноводного устройства 5. При этом к источнику питания генератора подключен блок управления 6, обеспечивающий включение/выключение СВЧ генератора в заданном режиме.

К рабочей камере 2 подключен трубопровод 7 подачи газа в рабочую камеру с запорной арматурой 14, а также замкнутый контур 8 для циркуляции парогазовой смеси, выполненный в виде трубопровода, один конец которого подключен к верхней части рабочей камеры 2, а другой – к ее нижней части. Контур 8 снабжен вакуумным насосом 9, обеспечивающим откачку парогазовой смеси, образующейся в рабо-

чей камере при регенерации сорбента, из верхней части камеры и ее циркуляцию по замкнутому контуру 8 через сорбент в рабочей камере, что дает возможность выравнивания температуры и влагосодержания по высоте рабочей камеры. Такое направление циркуляции позволяет одновременно остужать верхние слои сорбента и подогревать нижнюю часть регенерационной колонны. Замкнутый контур 8 также снабжен запорной арматурой 15, расположенной между вакуумным насосом 9 и входом парогазовой смеси в рабочую камеру 2. Кроме того, устройство содержит трубопровод 10 сброса парогазовой смеси на свечу с запорной арматурой 16, связанный с выходом вакуумного насоса 9 и обеспечивающий сброс парогазовой смеси при отключении (перекрытии) замкнутого контура посредством запорной арматуры 15.

В качестве блока управления 6, осуществляющего управление режимом работы генератора, может быть использовано реле-регулятор с таймером, подключенным к источнику питания генератора. При этом СВЧ генератор может представлять собой магнетрон, а источник питания магнетрона – преобразователь напряжения на повышенной частоте, который запитывает магнетрон высоким напряжением, а катод магнетрона – низким. Магнетрон может быть установлен в середине широкой стенки прямоугольного волновода 4 на расстоянии не менее 10 мм от короткозамкнутого конца волновода.

Согласующее волноводное устройство 5 предназначено для согласования СВЧ генератора с рабочей камерой 2 и представляет собой плавный переход с прямоугольного сечения на круглое, обеспечивающее уменьшение коэффициента стоячей волны по напряжению. При этом длина перехода должна быть не менее длины волны генератора в свободном пространстве.

Между согласующим устройством 5 и рабочей камерой 2 расположена герметичная вставка 11 из радиопрозрачного материала, позволяющая проникать СВЧ электромагнитному излучению в рабочую камеру 2 с цеолитом. В одном из вариантов реализации устройства, герметичная вставка пред-

ставляет собой радиопрозрачное окно из кварцевого стекла с уплотнениями. В другом варианте вставка может быть выполнена в виде конической керамической вставки, припаянной к стенкам согласующего устройства. При такой системе уплотнения при избыточном давлении место соединения керамики с металлом будет «работать» на сжатие и позволит обеспечить требуемую герметичность. Герметичная вставка 11 из радиопрозрачного материала обеспечивает защиту магнетрона от избыточного давления газа в процессе адсорбции и включения запорной арматуры. Кроме того, герметизация защищает магнетрон от низкого давления в процессе регенерации и десорбции сорбентов в рабочей камере.

Устройство также содержит датчик точки росы 12, подключенный к контуру 8, сигнализирующий о необходимости регенерации. Кроме того, устройство может содержать датчик давления 13, расположенный на выходе парогазовой смеси из рабочей камеры 2.

Предлагаемое устройство работает следующим образом.

По сигналу с датчика точки росы 12 оператор узнает о необходимости регенерировать сорбент.

Перед началом регенерации осуществляют проверку герметичности уплотнений, для чего перекрывают задвижку 14, при этом давление внутри камеры не должно снижаться; а также осуществляют проверку запорной аппаратуры установки (при закрытых задвижках 15, 16 и 17).

Для подачи природного газа в рабочую камеру 2 открывают задвижку 14 и наполняют рабочую камеру 2 газом под давлением, после чего задвижку 14 закрывают. С помощью датчика точки росы 9 измеряют температуру точки росы. Если температура точки росы выше допустимой, начинают процесс регенерации. Для этого сбрасывают давление в рабочей камере до атмосферного путем открытия задвижки 16 (сброс газа на свечу). Далее закрывают задвижку 16 и открывают задвижку 15, включают вакуумный насос 12, в результате чего образовавшаяся в рабочей камере

парогазовая смесь начинает циркулировать по замкнутому контуру 8, и включают СВЧ генератор 1 с источником питания, осуществляя таким образом СВЧ воздействие на рабочую камеру 2 с цеолитом 3 в процессе циркуляции парогазовой смеси. При этом посредством блока управления 6 устанавливают импульсный режим работы генератора, при котором воздействие СВЧ энергией осуществляют в импульсном режиме с энергией, подводимой к сорбенту, определяемой соотношением:

$$0,1 \text{ Дж} \leq \int_0^{\tau} P d\tau \leq 0,3 \text{ Дж},$$

где P – мощность генератора СВЧ энергии, Вт; τ – время, с.

При этом мощность P генератора СВЧ энергии для одного цикла нагрева сорбента определяют из соотношения:

$$0,1 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{c} \leq \frac{P}{cm} \leq 0,3 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{c},$$

где c – теплоемкость воды Дж/(кг·К); m – масса воды, кг, содержащейся в сорбенте.

С помощью генератора СВЧ энергии осуществляют разогрев цеолита до температуры испарения воды (режим «нагрев» – участок 1-2 на рис. 5). В результате цеолит нагревается примерно до 100°C. При этом в процессе работы устройства осуществляют контроль давления в рабочей камере 2 с помощью датчика 13. С началом роста давления в рабочей камере (свыше 1,1 атмосферы) режим работы генератора изменяют на «сушка», при котором происходит удаление несвязанной воды. При этом импульсное воздействие осуществляют с энергией, в 2 раза меньшей, чем в режиме «нагрев». Темп нагрева цеолита при этом уменьшается, поскольку наряду с процессом нагрева увеличивается доля испарения, которое приводит к охлаждению цеолита. Температуру цеолита в данном режиме поддерживают в диапазоне примерно от 100 до 200°C (участок 2-3 на рис. 5).

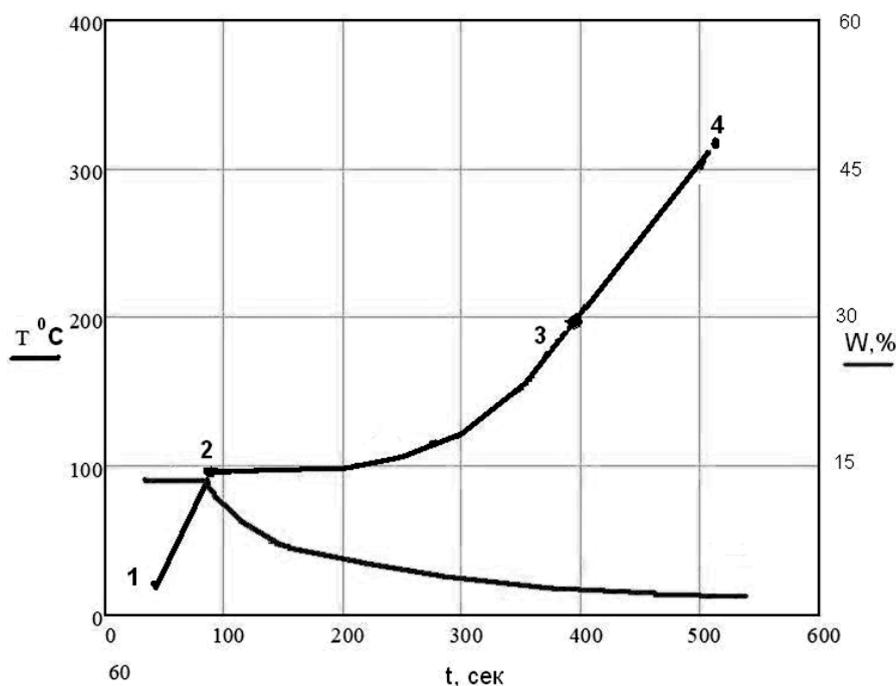


Рис. 5. Зависимости температуры и влагосодержания цеолита

При нормализации давления в рабочей камере (давление не меняется), осуществляют сброс парогазовой смеси на свечу через вакуумный насос 9, открывая при этом задвижку 16 и закрывая задвижку 15 (от-

ключая замкнутый контур 8). При этом режим воздействия СВЧ энергией на рабочую камеру изменяют на режим «регенерация» (участок 3-4 на рис. 5), при котором происходит удаление связанной воды. Энергия,

подводимая в данном режиме в рабочую камеру, составляет 0,3-0,4 от энергии, подводимой в рабочую камеру в режиме «нагрев». Температура цеолита в режиме «регенерация» может превышать 200°C (но не более 320°C).

Переключение режимов осуществляется согласно запрограммированному таймеру, который позволяет задавать разные режимы работы генератора и переключать их как по команде оператора, так и в автоматическом режиме.

С помощью таймера может быть установлено время работы источника СВЧ энергии (магнетрона) от 60 до 300 с, время паузы от 10 до 50 с. При этом импульсное воздействие можно осуществлять в течение 3600-7200 с. Время пауз и работы магнетрона подбирается исходя из режима («нагрев», «сушка», «регенерация») и марки цеолита в рабочей камере. При достижении давлением минимального значения, свидетельствующего об испарении влаги и окончании процесса регенерации, генера-

тор 1 СВЧ энергии с источником питания выключают.

По трубопроводу 18 осушенный газ подают на датчик точки росы. Если температура точки росы удовлетворяет требованиям, например, достигает -70°C , то, открыв вентиль 17, газ подают, например, в накопительный бункер, из которого газ подается на открытие/закрытие внешних кранов (запорной арматуры). Это делают в конце регенерации, чтобы убедиться, что свойства цеолита восстановлены.

Запрограммированный таймер позволяет задавать разные режимы работы генератора и переключать их как по команде оператора, так и в автоматическом режиме.

Паузы в работе СВЧ генератора необходимы для выравнивания температуры и влажности в сорбенте, предотвращения локальных перегревов сорбента, а также поддержания заданного темпа нагрева для уменьшения внутренних напряжений в сорбенте.

Огурцов Константин Николаевич – кандидат технических наук, начальник группы инновационных разработок ООО «Завод Газпроммаш»

Антонов Игорь Николаевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Химия и химическая технология материалов» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Бурков Антон Викторович – заместитель директора по науке и инновациям ООО «Завод Газпроммаш»

Семочкин Владимир Сергеевич – кандидат технических наук, инженер-конструктор ООО «Завод Газпроммаш»

Симаганов Андрей Юрьевич – ведущий инженер по ПНР ООО «Завод Газпроммаш»

Konstantin N. Ogurtsov – PhD, Team Lead of Innovation Developments at ООО Gazprommash Plant

Igor N. Antonov – Dr. Sc., Professor Department of Chemistry and Chemical Material Technology Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Anton V. Burkov – Deputy Director at ООО Gazprommash Plant

Vladimir S. Semochkin – PhD, Design Engineer at ООО Gazprommash Plant

Andrei Yu. Simaganov – Lead Engineer at ООО Gazprommash Plant

Статья поступила в редакцию 02.03.19, принята к опубликованию 15.03.19

УДК 621.365.5

ПРИМЕНЕНИЕ СВЧ ЭНЕРГИИ ДЛЯ НАГРЕВА ЖИДКОСТИ В ПОТОКЕ

В.О. Юдина, Ю.С. Архангельский

USING THE MICROWAVE ENERGY FOR HEATING THE FLUID FLOW

V.O. Yudina, Yu.S. Arkhangelskiy

Рассматривается применение СВЧ энергии в технологических процессах термообработки жидкости с целью исследования истории, состояния и перспектив термообработки в СВЧ электромагнитном поле жидкости в потоке. История термообработки жидкости в потоке с помощью СВЧ энергии рассмотрена как составная часть истории СВЧ диэлектрического нагрева. Оценены результаты проведённых исследований и разработок в области СВЧ нагрева жидкостей в потоке, определены перспективы научных исследований и практического применения СВЧ нагрева жидкостей в потоке.

Показано, что началу исследований и разработок в области СВЧ нагрева диэлектриков послужили успехи электроники в освоении диапазона сверхвысоких частот и успешное применение СВЧ электромагнитных колебаний в радиолокации. Большое внимание к применению СВЧ энергии в технологических процессах проявили специалисты в области технологий пищевых производств, потому что к середине XX в. возможности интенсификации процессов в пищевой промышленности, в приготовлении пищи были практически исчерпаны, а применение СВЧ энергии открывало в этом отношении новые перспективы, в том числе и для пастеризации молока, столь распространённого пищевого продукта. Промышленные объёмы термообработки молока требуют осуществлять нагрев в потоке. Были разработаны методы проектирования СВЧ пастеризаторов, установок для сушки и нагрева различных пищевых

Application of the microwave energy in technological processes related with heat treatment of fluids is considered with the aim to research the history, status and possibilities of heating the flow of fluids in the microwave electromagnetic field. The history of heat treatment of the fluid flow using the microwave energy is considered as an integral part of the history of microwave dielectric heating. The results of the research and development in the field of microwave heating of flowing fluids are estimated. The prospects for scientific research and practical application of the microwave heating of flowing fluids are determined.

It is shown that the starting point for the research and development in the field of microwave heating of dielectrics was a success achieved in investigating the range of ultrahigh frequencies and successful application of microwave electromagnetic waves in the radar area. Particular emphasis to application of microwave energy in technological processes was made by the experts in the field of food production technologies, since by the middle of XX century the possibilities to enhance the processes in the food industry and cooking operations have been practically through. Meanwhile, usage of the microwave energy has opened up new perspectives, including a possibility to pasteurize milk that is a commonly used food product. Industrial-scale heat treatment of milk requires heating the flowing fluids. The methods for designing microwave pasteurizers, installations for drying and heating various food products and other dielectrics were developed. The design

продуктов и других диэлектриков, разработаны и испытаны конструкции СВЧ пастеризатора молока в потоке, бытовой СВЧ печи и различных типов СВЧ электротермических установок для различных отраслей промышленности. С переходом к рыночным отношениям объемы исследований и разработок в области СВЧ электротермии существенно сократились.

Сейчас основное внимание уделяется исследованиям и разработкам в области нетепловой СВЧ модификации диэлектриков, в том числе и жидкостей в потоке. Этот эффект был установлен в годы изучения влияния СВЧ электромагнитных колебаний на микроорганизмы в молоке, а позднее он был обнаружен и в других полимерах неживой природы.

Пока исследовалось применение СВЧ энергии для обработки ньютоновских жидкостей. Рассмотрены вопросы движения в транспортных каналах СВЧ электротехнологических установок неньютоновских жидкостей, так как применение СВЧ энергии дает возможность уменьшить вязкость этих сред, то есть получить жидкие среды, протекающих в транспортных каналах с большей скоростью. Оценены перспективы СВЧ нагрева неньютоновских жидкостей в потоке.

Ключевые слова: СВЧ диэлектрический нагрев, СВЧ электротехнологические установки, пищевые технологии, СВЧ нагрев жидкости в потоке, СВЧ пастеризация молока, нетепловая СВЧ модификация жидкостей в потоке, ньютоновские и неньютоновские жидкости

История, состояние и проблемы применения СВЧ нагрева диэлектриков. Успешное применение высокочастотных (ВЧ) генераторов в электротермических установках (ЭТУ), освоение электроникой диапазона сверхвысокочастотных (СВЧ) электромагнитных колебаний для радиолокации способствовали началу исследований и разработок в области применения энергии СВЧ электромагнитных колебаний (СВЧ энергии) для нагрева диэлектриков [1, 2]. Первыми в нашей стране проявили научный

of a microwave pasteurizer for milk flows, a household microwave oven, and various types of microwave electrothermal installations for various industries were developed and tested. With transition to the market economy, the number of research and developments in the field of microwave electrothermy has significantly reduced.

Currently, the focus is placed on research and development in the field of non-thermal microwave modification of dielectrics, including flow of fluids. This effect was established during the studies of microwave electromagnetic waves on milk microorganisms, and later it was found in other polymers of inanimate nature.

So far, the research has been made into application of the microwave energy for treating the Newtonian fluids. The issues of movement of non-Newtonian fluids in the transport channels of microwave electrical technology installations have been considered, since the usage of microwave energy makes it possible to reduce the viscosity of these media, i.e. to obtain the fluid media flowing along the transport channels at greater speed. The prospects for microwave heating of non-Newtonian flow of fluids are estimated.

Keywords: microwave dielectric heating, microwave electrotechnological installations, food technology, microwave heating of the fluid flow, microwave pasteurization of milk, nonthermal microwave modification of flowing fluids, the Newtonian and non-Newtonian fluids

и практический интерес к этому новому научно-техническому направлению специалисты пищевой промышленности, в первую очередь по термообработке мяса и молока, сельского хозяйства (сушка семян, зерна, плодов и овощей) и приготовления разнообразной пищи [3-12], потому что к середине прошлого века были исчерпаны практически все возможности интенсификации процессов термообработки пищевых продуктов, а применение СВЧ энергии открывало здесь существенные перспективы [13]. Так, фор-

мируемая в СВЧ ЭТУ электромагнитная волна, распространяясь внутри обрабатываемого диэлектрика, обеспечивает объемное тепловыделение, что существенно сокращает время нагрева и позволяет получить более равномерный нагрев по объему диэлектрика по сравнению с традиционными способами термообработки, когда теплота подводится конвекцией, кондукцией или тепловым излучением к поверхности обрабатываемого диэлектрика, при этом в глубину диэлектрика она передается теплопроводностью нагреваемого диэлектрика, то есть медленно, так как диэлектрики в той или иной мере – теплоизоляторы, у них малый коэффициент теплопроводности, и в процессе нагрева в этом случае возможны большие перепады температуры поверхностного слоя и в глубине диэлектрика.

Далее, СВЧ мощность, поглощаемая единицей объема диэлектрика, как известно, равна

$$P_{y\delta} = 0,278 \cdot 10^{-12} f \varepsilon' \operatorname{tg} \delta |E|^2, \quad (1)$$

где $P_{y\delta}$ в Вт/см³, если частот f в Гц, напряженность электрического поля электромагнитной волны E в В/см, а ε' – относительная диэлектрическая проницаемость; $\operatorname{tg} \delta$ – тангенс угла диэлектрических потерь нагреваемого диэлектрика.

Согласно соотношению (1) $P_{y\delta}$ тем больше, чем больше f и $\operatorname{tg} \delta$. У диэлектриков $\operatorname{tg} \delta$ на СВЧ обычно больше чем на ВЧ, так что СВЧ нагрев перспективнее и ВЧ нагрева.

Заметим, в названии параметра $\operatorname{tg} \delta$ используется термин «потеря», кто-то из специалистов в области СВЧ радиоэлектроники, начавшие исследования и разработки в области СВЧ электротехнологии, называют $P_{y\delta}$ СВЧ мощностью потерь, потому что в классической технике СВЧ поглощение СВЧ мощности в диэлектрике, заполняющем линию передачи СВЧ энергии от генератора в нагрузку, является потерями, тогда как в электротехнологии (СВЧ электротермии, СВЧ диэлектрическом нагреве, СВЧ нагреве) оно обеспечивает производство заданного количества товарной продукции требуемого качества.

В 60-е - 70-е годы XX в. на научных конференциях и семинарах разговоры об СВЧ нагреве были, можно так сказать, модными, иногда высказывалось мнение, что СВЧ нагрев вытеснит другие способы нагрева диэлектриков. Но целесообразность применения СВЧ ЭТУ определяется не только производительностью и равномерностью нагрева, она зависит и от таких параметров, как мощность P , частота f , КПД СВЧ генератора, продолжительность работы установки, например, в году, цены сырья, продукции, всей СВЧ ЭТУ и необходимых запасных элементов, количество одновременно работающих установок N , затраты на заработную плату, выплату налогов и платежей, тарифы на электроэнергию и воду.

Решение о целесообразности применения такой многопараметровой установки, как СВЧ ЭТУ, следует принимать с учетом сравнительного интегрального эффекта [14-16]

$$\Delta \mathcal{E}_{\Sigma} = \mathcal{E}_{\Sigma 2} - \mathcal{E}_{\Sigma 1}, \quad (2)$$

где \mathcal{E}_{Σ} – интегральный за выбранный срок (например год или срок службы установки) чистый дисконтированный доход или интегральный эффект в терминах работы [17], индекс 2 означает СВЧ ЭТУ; индекс 1 – альтернативную СВЧ или какую-либо другую установку, которую планируется заменить этой СВЧ ЭТУ.

Если $\Delta \mathcal{E}_{\Sigma} > 0$, то применение СВЧ ЭТУ целесообразно, и если речь идет об имеющихся СВЧ ЭТУ и альтернативной установке, то $\mathcal{E}_{\Sigma 1,2}$ должны быть рассчитаны по соотношениям, приведенным в работах [14-16]. Если речь идет о целесообразности проектирования и в дальнейшем применении новой СВЧ ЭТУ, то сначала надо провести технико-экономическую оптимизацию этой СВЧ ЭТУ, то есть определить оптимальные значения P_{opt} , f_{opt} , N_{opt} , при которых $\Delta \mathcal{E}_{\Sigma max}$ [14-16], а если, наконец, речь идет о сравнении проектируемой СВЧ ЭТУ и той или иной альтернативной установки, то перед расчетом $\Delta \mathcal{E}_{\Sigma}$ надо провести технико-экономическую оптимизацию обоих сравнимых установок.

Прошло немало лет, но прогноз о вытеснении СВЧ нагревом других способов нагрева диэлектриков не оправдался, а в 90-е масштабы работы в области применения СВЧ энергии в технологических процессах уменьшились. Во-первых, приватизированные и акционированные промышленные предприятия сократили финансирование исследований и разработок в области СВЧ нагрева. Во-вторых, повысились цены на материалы технологического назначения. В-третьих, появились новые модные научно-технические направления (энергосбережение, наноматериалы, цифровая экономика). В-четвертых, как следствие, часть исследовательских коллективов, работавших в области СВЧ нагрева, перепрофилировались или распались.

Но еще в 60-е - 80-е годы исследования и разработки в области применения СВЧ энергии в технологических процессах принесли существенные для науки и практики результаты. Так, были сформулированы физические основы СВЧ нагрева, определены области применения СВЧ энергии в технологических процессах, преимущества СВЧ ЭТУ и проблемы СВЧ электротермии [1-13, 18-20], проведена классификация и предложена структурная схема СВЧ ЭТУ [13], дана классификация рабочих камер, введены термины «камера с бегущей волной» (КБВ), «камера лучевого типа» (КЛТ), «камера со стоячей волной» (КСВ) [13], сформулирована и решена самосогласованная (согласованная) краевая задача электродинамики, тепломассопереноса, на базе которой построены процедуры синтеза рабочих камер КБВ и КЛТ и математического моделирования процессов термообработки диэлектриков в СВЧ электромагнитном поле [13, 21], проведены электродинамические расчеты в СВЧ электротермии [22-27], проведены расчеты и предложены конструкции СВЧ ЭТУ и их элементной базы (см. многочисленные ссылки в работах [13, 28]), в то же время большое внимание уделено разработке источников СВЧ энергии СВЧ ЭТУ [13, 29-32] и, наконец, весьма распространенным в те годы были исследования и разработки в области измерений в

СВЧ электротермии и, в первую очередь, измерения диэлектрических параметров диэлектриков на частотах, разрешенных к применению в СВЧ электротермии (см. многочисленные ссылки в работах [13, 28]).

Несмотря на возникшие в 90-е годы в СВЧ электротермии проблемы, связанные с переходом к рыночной экономике, в 90-е годы и сейчас, в XXI веке, исследования и разработки в области применения СВЧ энергии в технологических процессах принесли существенные результаты. Так, удалось рассмотреть привлекавшую внимание тему эффективности СВЧ ЭТУ, сформулирована процедура технико-экономической оптимизации СВЧ ЭТУ [14-16, 28, 33-35]. Завершена разработка методов расчета и проектирования КБВ [28, 36, 37], КСВ [16, 28, 37], КЛТ [28, 37-40], рассмотрены вопросы компьютерного (программного) обеспечения расчета и проектирования СВЧ ЭТУ [41], предложены новые типы рабочих камер – камеры гибридного типа (КГТ) [42], камеры меандрового типа (КМТ) [43].

Многие из перечисленных результатов получены в СПИ-СГТУ имени Гагарина Ю.А. Работы в области применения СВЧ энергии в технологических процессах начались в этом вузе в 1968/1969 учебном году, в 2006 г. межфакультетская научная школа, работающая в области СВЧ нагрева диэлектриков, на конкурсной основе была признана ведущей научной школой РФ в области инженерных и технических наук (НШ 2006.9553.8). С 2014 г. в СГТУ издается серия «СВЧ электротехнология» [15, 36, 40, 44, 45]. Наконец, здесь были написаны и изданы учебные пособия [46, 47], учебник [48] и справочник [37].

Следует сказать о вопросах, которые ждут своего решения. Это, в первую очередь, на наш взгляд, разработка научных основ проектирования СВЧ ЭТУ методического действия (методических СВЧ ЭТУ). Здесь необходимо добавить к решению задач электродинамики, тепломассопереноса и термомеханики решения задач электромеханики и гидравлики.

Работы в этом направлении в последнее время активировались. Так, определено по-

нятие «транспортные системы» [49], сформулированы согласованные задачи в проектировании методических СВЧ ЭТУ [50], предложены методы расчета мощности электродвигателя электропривода разных типов транспортных систем [51-57], рассмотрены вопросы многофункциональности [58], приведены рекомендации к применению в методических СВЧ ЭТУ электродвигателей [59], рассмотрена конкурентоспособность методических СВЧ ЭТУ [60].

Особое место в разговоре о методических СВЧ ЭТУ следует отвести установкам СВЧ нагрева жидкостей в потоке. Уже первые исследования влияния СВЧ электромагнитного поля на бактериальные клетки при СВЧ пастеризации молока принесли удивившие многих результаты. Оказалось, что подавление жизнедеятельности микроорганизмов в СВЧ электромагнитном поле происходит при более низкой температуре, чем при традиционных способах пастеризации молока [61]. Происходит это из-за механического разрушения элементов клетки под действием возникающих в ней колебаний из-за электромагнитного воздействия СВЧ электромагнитного поля на

клетку (биополимер). Но еще в 1981 г. в описании такого эффекта был использован термин «нетепловой эффект» [62].

Последние 30 лет в СГТУ ведутся исследования нетеплового эффекта у полимеров неживой природы. Установлено наличие нетеплового СВЧ модифицирующего воздействия электромагнитного поля на такие полимеры, как полисульфоновые листы, поликапроамидные нити и волокна, эпоксидные компаунды. У этих материалов на частоте 2450 МГц уже при кратковременном пребывании их в СВЧ электромагнитном поле определенной напряженности электрического поля E появлялись новые механические свойства, увеличивающие возможность их применения. Результаты этих исследований приведены в работе [63]. Рассмотрим вопросы СВЧ нагрева для термообработки жидкостей в потоке подробнее.

Движение жидкости в потоке по транспортному каналу рабочей камеры СВЧ ЭТУ. Для СВЧ нагрева жидкостей в потоке в первую очередь применили КБВ на коаксиальном и круглом волноводах, поперечные сечения которых показаны на рис. 1.

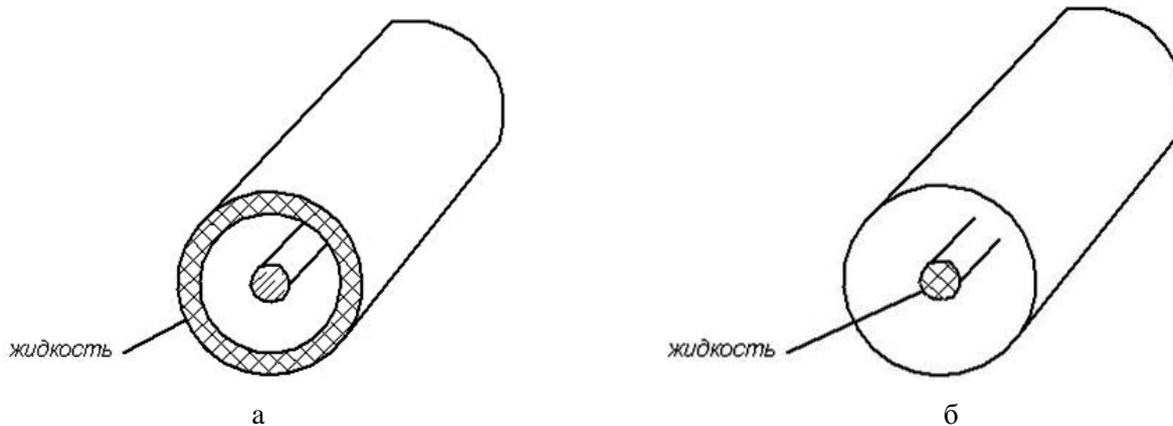


Рис. 1. Волноводы КБВ с жидкостью в потоке: *а* – коаксиальный волновод, частично наполненный жидкостью; *б* – круглый волновод, частично заполненный жидкостью

Электромагнитные волны в таких волноводах рассматриваются в работе [28], а для транспортировки жидкости в потоке в КБВ используются радиопрозрачные диэлектрические трубы.

Как известно, жидкости подразделяются на ньютоновские и неньютоновские в зависимости от того, подчиняются ли они или

нет закону внутреннего трения Ньютона [64]. На рис. 2 приведены кривые течения (реологические кривые), показывающие зависимость градиента скорости течения жидкости (скорости сдвига) $\frac{dy}{dn}$ от касательного напряжения τ , где n – направле-

ние, перпендикулярное направлению движения жидкости [28].

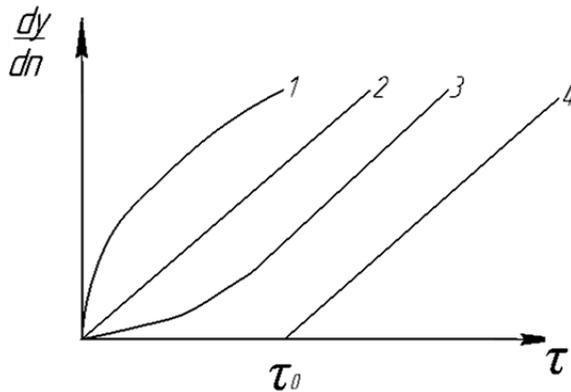


Рис. 2. Кривые течения жидкости: 1, 2, 3 – не-ньютоновские жидкости; 2 – ньютоновские жидкости

Для ньютоновских жидкостей (вода, молоко, растворы и т.п.) кривые течения линейные, то есть

$$\tau = \mu \frac{dy}{dn},$$

где τ – напряжение трения; μ – коэффициент пропорциональности, зависящий от рода жидкости и называемый динамической вязкостью жидкости.

У неньютоновских жидкостей (расплавы, полимеры, лакокрасочные материалы, битум и т.п.)

$$\frac{dy}{dn} = f(\tau),$$

где $f(\tau)$ – функция, зависящая от рода жидкости (кривые 1, 3, 4 рис. 2). Для этих жидкостей кривые течения нелинейны.

Движение ньютоновской жидкости в транспортном канале КБВ рассматривается лишь для конкретного вида транспортного канала. Типичный проверенный опытом вариант транспортной системы в КБВ приведен в работе [28], а его компоновка в КБВ на круглом волноводе (рис. 2 б) – в работе [56].

Характером движения потока жидкости в транспортном канале интересуются, чтобы определить давление, которое надо создать на входе транспортного канала, необходимое для получения заданного режима нагрева жидкости при той или иной мощности СВЧ генератора.

Найти это давление можно с помощью уравнения Бернулли [28]

$$\begin{aligned} z_{\text{вх}} + \frac{p_{\text{вх}}}{\rho g} + \frac{\alpha_{\text{вх}} v_{\text{вх}}^2}{2g} &= \\ &= z_{\text{вых}} + \frac{p_{\text{вых}}}{\rho g} + \frac{\alpha_{\text{вых}} v_{\text{вых}}^2}{2g} + h, \end{aligned} \quad (3)$$

где $z_{\text{вх}}$ и $z_{\text{вых}}$ – геометрические высоты сечений канала на его входе и выходе; $p_{\text{вх}}$ и $p_{\text{вых}}$ – давления в сечениях на входе и выходе канала; $v_{\text{вх}}$ и $v_{\text{вых}}$ – средние скорости потока во входном и выходном сечениях канала; g – ускорение свободного падения; ρ – плотность жидкости; $\alpha_{\text{вх}} v_{\text{вх}}^2 / 2g$ и $\alpha_{\text{вых}} v_{\text{вых}}^2 / 2g$ – скоростные напоры в начале и на выходе канала; $\alpha_{\text{вх}}$ и $\alpha_{\text{вых}}$ – коэффициенты Кориолиса на входе и выходе канала; h – потери напора на всем транспортном канале.

Обычно принимают $\alpha_{\text{вх}} = \alpha_{\text{вых}} = 1$ [64], избыточное давление на выходе из канала равно нулю, то есть $p_{\text{вых}} / \rho g = 0$ [65], и тогда из соотношения (3)

$$p_{\text{вх}} = \rho g \left[\frac{v_{\text{вых}}^2 - v_{\text{вх}}^2}{2g} + h \right]. \quad (4)$$

Величина $p_{\text{вх}}$ дает возможность рассчитать мощность электродвигателя насоса, прокачивающего жидкость по транспортному каналу [62], а что касается связи электродинамических и тепловых расчетов, то ее дает соотношение (4). Так, электродинамический расчет (синтез рабочей камеры) [28] определяет согласование рабочей камеры с СВЧ генератором, то есть определяется СВЧ мощность, поглощаемая потоком жидкости, которую можно рассчитать по соотношению

$$P = c\rho G\theta, \quad (5)$$

где c – удельная теплоемкость жидкости; G – объемный расход жидкости на участке нагрева жидкости в рабочей камере; $\theta = T_2 - T_1$; T_2 и T_1 определяют температуру жидкости на выходе и входе участка нагрева жидкости в потоке, так что соотношение (5) дает возможность рассчитать скорость на входе в зону нагрева $v_{\text{вх}}$.

Принимая во внимание уравнение неразрывности

$$v_{вых} S_{вых} = v_i S_i,$$

где v_i – скорость потока в сечении S_i ; $S_{вых}$ и S_i – площадь сечений транспортного канала, в сечении i и выходного шлюза, можно рассчитать скорости на каждом участке канала.

В конечном счете расчет p_{ex} сводится к нахождению h как суммы путевых потерь напора на преодоление на каждом участке канала сопротивлений движению жидкости, обусловленных силами трения частиц жидкости друг о друга и о стенки, ограничивающие поток.

Пример расчета величины h приведен в работе [28]. Для нахождения коэффициентов Дарси следует сначала определить число Рейнольдса для каждого участка транспортного канала

$$Re = \frac{vd}{\nu}, \quad (6)$$

где v – скорость потока на рассматриваемом участке; d – диаметр трубы канала; ν – кинематическая вязкость жидкости в рассматриваемом участке [64]

$$\nu = \frac{1,79 \cdot 10^{-6}}{1 + 0,03777T + 0,000221T^2},$$

где T – температура жидкости в °С, тогда ν в $m^2 \cdot c^{-1}$.

Если $Re < 2300$, то режим течения жидкости считается ламинарным, а при $Re > 2300$ – турбулентным [64], то есть в расчетах СВЧ ЭТУ для обработки проточных сред обычно не учитывают наличие введенного в гидравлике переходного режима между ламинарным и турбулентным режимами.

Среди неньютоновских жидкостей различают дилатантные (кривая 1 рис. 2), псевдопластичные (кривая 3 рис. 2) и вязкопластичные (кривая 4 рис. 2) [64].

Кривые течения дилатантных и псевдопластичных жидкостей описываются зависимостью

$$\tau = k \left(\frac{dv}{dn} \right)^n,$$

где k и n – постоянные для данной жидкости, при этом k определяет меру консистенции жидкости (чем выше вязкость, тем больше k), а n характеризует степень неньютоновского поведения жидкости (у дилатантной жидкости $n > 1$, а у псевдопластичной $n < 1$).

Реологические свойства неньютоновских жидкостей использует понятие эффективной кажущейся вязкости μ_{ϵ} , используемой при гидравлических расчетах по обычным формулам гидравлики ньютоновской жидкости, где ν и μ_{ϵ} (см. соотношение (6)) связаны между собой соотношением $\nu = \mu_{\epsilon} / \rho$.

У дилатантных жидкостей (лакокрасочные материалы) μ_{ϵ} с увеличением τ и $\frac{dv}{dn}$ увеличивается, и эти жидкости при течении (СВЧ нагреве) загустевают. У псевдопластичных жидкостей (расплавы, полимеры) μ_{ϵ} с увеличением τ и $\frac{dv}{dn}$ уменьшается, и эти жидкости при течении (СВЧ нагреве) разжижаются. Течение вязкопластичных жидкостей (различные суспензии, коллоидные растворы, состоящие из двух фаз (твердой и жидкой), глинистые и цементные растворы, парафинистая нефть, битумные материалы) начинается при некотором начальном напряжении сдвига (рис. 2) и продолжается далее, как у обычной ньютоновской жидкости.

Начальное напряжение сдвига зависит от времени нахождения вязкопластичной жидкости в покое. Во всех гидравлических расчетах с вязкопластичными жидкостями используется динамическое начальное напряжение сдвига. В начальный момент поток жидкости движется как твердое тело с одинаковой скоростью по всему поперечному сечению канала. С увеличением Δp скорость движения жидкости увеличивается, и можно говорить о струйном, ламинарном и турбулентном движении жидкости.

При наименьших Δp , при которых началось движение, это движение структурное: у стенок оно ламинарное, а ядро потока движется по каналу как твердое тело.

С увеличением Δp толщина ламинарного потока возрастает, толщина центрального ядра уменьшается, но уже при нем зарождается турбулентность и по сути дела чисто ламинарного движения нет, течение сразу переходит в турбулентное.

Развиваемое в КБВ давление обычно позволяет получить структурное движение вязкопластичной жидкости с расходом [64]

$$G = \frac{\pi r^4}{8\mu_{nl} l} \left(\Delta p - \frac{4}{3} \Delta p_0 + \frac{\Delta p_0^4}{\Delta p} \right) \approx \frac{\pi r^4}{8\mu_{nl} l} \left(\Delta p - \frac{4}{3} \Delta p_0 \right), \quad (7)$$

где Δp – приложенная разность давлений; Δp_0 – разность давлений, соответствующая началу движения жидкости; r, l – радиус и длина трубы транспортного канала; μ_{nl} – пластическая вязкость, рассчитываемая по соотношению

$$\mu_{nl} = \mu_0 - \frac{\tau_0}{dn}$$

Расчеты потерь напора в этом случае можно проводить по формуле Дарси – Вейсбаха, причем при структурном и ламинарном режимах коэффициент равен

$$\lambda = \frac{64}{Re}$$

где Re – обобщенное число Рейнольдса, учитывающее как вязкие, так и пластические свойства жидкости

$$Re = \frac{1}{\frac{\mu}{\rho v d} + \frac{\tau_0}{\sigma \rho v^2}}$$

где усредненная скорость движения жидкости в трубе с поперечным сечением S , как обычно, имеет вид

$$v = \frac{G}{S}, \quad (8)$$

где G рассчитывается по соотношению (7).

Критерием структурного движения вязкопластичной жидкости является условие

$$v < v_{кр},$$

где $v = 0,25 \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho g}}$, v – скорость движения жидкости, рассчитанная по (8).

Если $v > v_{кр}$, то течение турбулентное.

Примеры и возможности применения СВЧ энергии для нагрева жидкости в потоке. Жидкостью, привлекая к себе внимание исследователей применения СВЧ энергии в технологических процессах еще на первом этапе исследований и разработок в области СВЧ нагрева, было молоко, широко распространённый пищевой продукт, который перед употреблением должен пройти пастеризацию. При пастеризации молока в промышленном масштабе речь, разумеется, должна идти о СВЧ нагреве молока в потоке.

Первый промышленный образец СВЧ пастеризатора молока в потоке был разработан на одном из предприятий электронной промышленности в Саратове. Источник энергии был собран на магнетроне, генерирующем СВЧ мощность 2 кВт на частоте 2450 МГц. Рабочая камера представляла собой хорошо известную в технике СВЧ согласованную нагрузку на прямоугольном волноводе сечением 90×45 мм, в которой СВЧ энергия поглощается водой, протекающей по стеклянной наклонной к широким стенкам волновода трубке. Поскольку стеклянная трубка ненадежна, была предложена конструкция рабочей камеры на неоднородном круглом волноводе с цилиндрическим каналом для протекания молока, не содержащая стеклянных деталей (рис. 3) [13, 28].

Расчет таких КБВ и порядок проектирования СВЧ ЭТУ для нагрева (пастеризации жидкости в потоке) приведены в работах [28, 36, 37, 56].

Для увеличения производительности СВЧ пастеризатора с рабочей камерой, показанной на рис. 3, следует использовать генератор с меньшей частотой. В этом случае площадь поперечного сечения потока (транспортного канала) будет больше. Если производительность СВЧ пастеризатора на низкой из разрешенных частот (433 МГц) недостаточна, то следует использовать параллельную работу нескольких СВЧ ЭТУ.

Количество таких установок, СВЧ мощность каждой из них и частоту следует

определить с помощью технико-экономического расчета [14, 15].

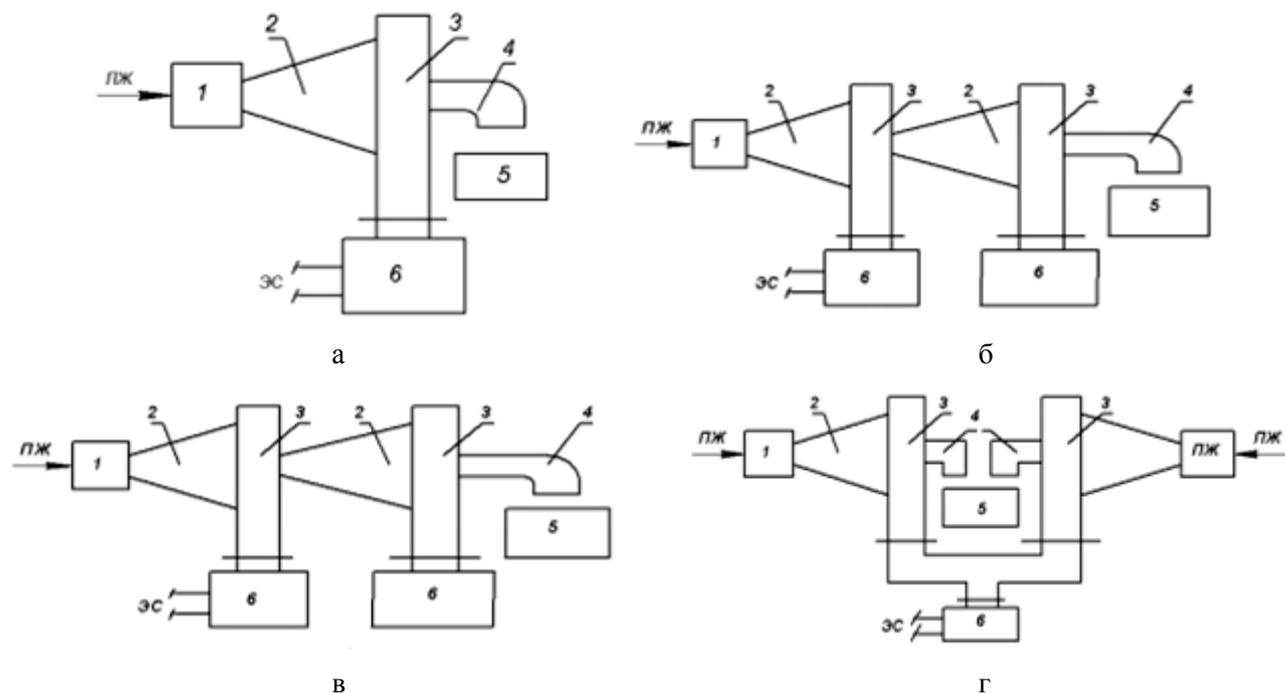


Рис. 3. Варианты компоновки СВЧ электротермической установки для термообработки жидкости в потоке: 1 – насос; 2 – КБВ; 3 – прямоугольный волновод; 4 – гидравлическая система; 5 – приемная емкость; 6 – источник СВЧ энергии; ПЖ – поток жидкости; ЭС – электрическая сеть 220 В, 50 Гц

Наконец, можно увеличить площадь поперечного сечения канала, по которому транспортируется жидкость, используя в СВЧ пастеризаторе меандровые КЛТ [43], в которых применено несколько рупорных излучателей на прямоугольных волноводах, соединённых друг с другом меандром.

При расчете КБВ и КЛТ в качестве рабочей камеры пастеризатора надо учитывать характер течения жидкости по транспортному каналу (трубе) рабочей камеры. Так, микробиологи рекомендуют не использовать при пастеризации молока нетепловую СВЧ модификацию, так как разные микроорганизмы при таком СВЧ воздействии гибнут при разных режимах обработки, тогда как СВЧ нагрев, более быстрый, чем традиционный, до температуры коагуляции белка гарантированно обеззараживает молоко. Может быть поэтому пока что нет полных исследований режимов нетепловой модификации микроорганизмов, находящихся в молоке.

Но тогда важно обеспечить равномерный нагрев молока по поперечному сечению потока. Этого можно добиться надлежащим расчетом КБВ или КЛТ и использованием непременно турбулентного режима течения. Критерием наличия такового, как указывалось, является число Рейнольдса. Применение ламинарного режима для пастеризации резко осложняет задачу, так как в этом случае нагрев по толщине (радиусу) потока будет неоднородным. Гидравлические расчеты для такого случая приведены в работе [66].

Далее, при СВЧ нагреве у жидкости меняется вязкость, жидкость начнет течь быстрее, и это обстоятельство следует при расчете учитывать. На наш взгляд, достаточно рассчитать среднюю вязкость молока в рабочем диапазоне температур и этот параметр использовать для реализации требуемого режима.

Сведений о широком применении СВЧ энергии для промышленной пастеризации (стилизации) молока, воды, сока и тому по-

добного пока что нет. Причины, на наш взгляд, здесь те же, о которых сказано выше.

Молоко, вода – ньютоновские жидкости. Рассмотрим возможность применения СВЧ нагрева для модификации неньютоновских жидкостей. Обработка неньютоновских жидкостей в СВЧ электромагнитном поле, как всегда, приведет к нагреву этой жидкости. Если речь идет о расплаве полимера, то, видимо, можно говорить о наличии нетепловой СВЧ модификации. Что касается нагрева, то результатом СВЧ нагрева будет уменьшение вязкости. Такой эффект представляет интерес, когда требуется для эксплуатации жидкости уменьшить ее вязкость.

Уменьшение вязкости как цели СВЧ обработки ставит перед разработчиками СВЧ ЭТУ новые задачи и вопросы. Потребуется провести весьма обширные измерения ϵ' и $\text{tg } \delta$ жидкостей при разных температурах. При построении метода расчета электродинамическая и тепловая задачи должны быть увязаны с гидравлическими расчетами неньютоновской жидкости, то есть речь должна идти об адаптации соотношений для гидравлических расчетов неньютоновских жидкостей к гидравлическим расчетам СВЧ ЭТУ.

Поскольку дилатантные жидкости будут густеть, их вязкость возрастает, речь, на наш взгляд, должна идти о псевдопластичных и вязкопластичных жидкостях.

Итак, приведенные выше сведения говорят о большой истории применения СВЧ энергии в технологических процессах термообработки жидкости в промышленных масштабах.

Наиболее изученным можно считать применение СВЧ энергии для подавление бактерий в жидкостях (молоко, вода). Пастеризация требуется всякий раз, когда молоко готовится в пищу, требуется обеззараживать воду.

Что касается применения СВЧ энергии для нагрева неньютоновских жидкостей, то тут перспективно применение нагрева для уменьшения вязкости жидкости, например заставшей при низких температурах или загустевшей при длительном хранении. Эти исследования представляют практический и научный интерес, так как речь будет в этом случае идти о приобщении к согласованной краевой задаче СВЧ электротехнологии еще и гидравлики неньютоновских жидкостей.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Пюшнер Г.** Нагрев энергией сверхвысоких частот / Г. Пюшнер. М.: Энергия, 1968. 311 с.

2. СВЧ энергия / под ред. Э. Окресса. М.: Мир, 1971. Т. 2. 272 с.

3. **Рогов И.А.** Физические методы обработки пищевых продуктов / И.А. Рогов, А.В. Горбатов. М.: Пищевая промышленность, 1974. 583 с.

4. **Рогов И.А.** Сверхвысокочастотный и инфракрасный нагрев пищевых продуктов / И.А. Рогов, С.В. Некрутман. М.: Пищевая промышленность, 1976. 210 с.

5. **Рогов И.А.** Электрофизические методы обработки пищевых продуктов / И.А. Рогов. М.: Агропромиздат, 1988. 325 с.

6. **Рогов И.А.** Техника сверхвысокочастотного нагрева пищевых продуктов / И.А. Рогов, С.В. Некрутман, Г.В. Лысов. М.: Легкая и пищевая промышленность, 1981. 199 с.

7. Применение СВЧ нагрева в общественном питании / под ред. А.Г. Вышелеского, Е.Н. Козминой. М.: Экономика, 1964.

8. **Некрутман С.В.** Аппараты СВЧ в общественном питании / С.В. Некрутман. М.: Экономика, 1973.

9. **Некрутман С.В.** Тепловая обработка пищевых продуктов в электромагнитном поле сверхвысоких частот / С.В. Некрутман. М.: Экономика, 1972.

10. **Хлебников В.Н.** Нагрев мясных продуктов СВЧ энергией / В.Н. Хлебников, И.А. Рогов // Мясная промышленность СССР. 1979. № 9. С. 35-38.

11. **Бадаева О.Н.** СВЧ энергия в промышленности, торговле и быту (обзор по материалам зарубежной печати) / О.Н. Бадаева // Электронная техника. Сер. Электроника СВЧ. 1968. № 8. С. 3-20.

12. **Бородин И.Ф.** СВЧ энергия в сельскохозяйственных электротехнологиях / И.Ф. Бородин // Электрофизические методы обработки пищевого сырья: материалы 6-й Всесоюз. и науч.-техн. конф. М., 1989. С. 95-98.

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

14. **Архангельский Ю.С.** Элементная база СВЧ электротермического оборудования / Ю.С. Архангельский, В.А. Воронкин. Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2003. 212 с.

15. **Архангельский Ю.С.** Технико-экономический и социальный аспекты электротехнологии / Ю.С. Архангельский, Е.В. Колесников. Саратов: Амирит, 2017. 197 с.

16. **Колесников Е.В.** Проектирование электротехнологических установок / Е.В. Колесников. Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2006. 283 с.

17. Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов и их отбору для финансирования / А.Г. Шахназаров и др. М., 1994.

18. **Долгополов Н.Н.** Электрофизические методы и технологии строительных материалов / Н.Н. Долгополов. М.: Изд-во лит-ры по строительству, 1971. 240 с.

19. **Басс Ю.П.** Диэлектрический нагрев в резиновой промышленности / Ю.П. Басс и др. М.: ЦНИИЭНефтехим, 1974.

20. **Захаров В.Н.** Физические процессы при обработке пищевых продуктов в электрическом поле СВЧ / В.Н. Захаров, С.В. Некрутман // Научные труды МИИХ. 1967. Вып. 50. С. 17-20.

21. **Архангельский Ю.С.** Проблемы применения математических методов при проектировании СВЧ установок для обработки сельскохозяйственного сырья и пищевых продуктов / Ю.С. Архангельский // Электрофизические методы обработки пищевых продуктов и сельскохозяйственного сырья: доклады конф. М., 1989. С. 98-101.

22. **Коломейцев В.А.** Численный расчет собственных параметров и структуры поля

регулярных волноводов произвольного поперечного сечения, частично заполненных поглощающим диэлектриком / В.А. Коломейцев, В.В. Яковлев // Электронная техника. Сер. Электроника СВЧ. 1985. Вып. 10. С. 71-77.

23. **Архангельский Ю.С.** Нормальные волны в прямоугольном волноводе, содержащем слой диэлектрика с произвольными потерями / Ю.С. Архангельский, Л.Г. Бунин // Известия вузов СССР. Сер. Радиоэлектроника. 1978. XXI. № 8. С. 106-111.

24. **Шестиперов В.А.** Определение требований к однородности электрического поля в образце биоматериала при размораживании в СВЧ поле / В.А. Шестиперов // Применение СВЧ энергии в народном хозяйстве: доклады науч.-техн. конф. Саратов: СПИ, 1977. С. 95.

25. **Зусмановский А.С.** Расчет и конструирование прямоугольных резонаторных камер для устройств СВЧ нагрева диэлектриков / А.С. Зусмановский, Ю.В. Лейбин // Электронная техника. Сер. Электроника СВЧ. 1968. № 2. С. 72-80.

26. Расчет и конструирование прямоугольных резонаторных камер для устройств СВЧ нагрева диэлектриков / А.С. Зусмановский и др. // Электронная техника. Сер. Электроника СВЧ. 1968. № 9. С. 46-49.

27. **Архангельский Ю.С.** Нерегулярный прямоугольный волновод со слоем поглощающей среды / Ю.С. Архангельский, Л.Г. Бунин // Известия вузов СССР. Сер. Радиоэлектроника. 1980. XXIII. № 9. С. 33-37.

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

29. Разработка серии магнетронов непрерывного генерирования для промышленного применения / Л.Н. Кишиневский и др. // Доклады конф. по электронной технике. М.: ЦНТИ. ТЭИН, 1967. С. 12-17.

30. СВЧ генераторы промышленного применения / И.И. Девяткин и др. // Доклады симпозиума по применению СВЧ энергии в отраслях пищевой промышленности. М., 1972. С. 33-37.

31. **Девяткин И.И.** Источники питания магнетронов непрерывного действия от се-

ти переменного тока / И.И. Девяткин, А.С. Зусмановский // Электронная техника. Сер. Электроника СВЧ. 1969. № 2. С. 12-18.

32. СВЧ генератор для нагрева диэлектрических материалов с автоматической регулировкой мощности / П.В. Бацев и др. // Электронная техника. Сер. Электроника СВЧ. 1972. № 1. С. 91-93.

33. Толстов В.А. Эффективность электротехнологических установок / В.А. Толстов, Ю.С. Архангельский. Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2000. 148 с.

34. Архангельский Ю.С. Ущерб и резервирование в СВЧ электротермии / Ю.С. Архангельский, А.В. Доценко. Саратов: Изд. дом «Полиграфия Поволжья», 2010. 114 с.

35. Колесников Е.В. Проектирование и эксплуатация электротехнологических установок / Е.В. Колесников, Ю.С. Архангельский. Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2008. 197 с.

36. Архангельский Ю.С. Камеры с бегущей и со стоячей волной / Ю.С. Архангельский, Е.В. Колесников. Саратов: Буква, 2015. 232с.

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

38. Архангельский Ю.С. СВЧ электротехнологические установки лучевого типа / Ю.С. Архангельский, С.В. Тригорлый. Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2000. 122 с.

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

40. Архангельский Ю.С. Камеры лучевого типа / Ю.С. Архангельский, С.В. Тригорлый. Саратов: Амирит, 2017. 198 с.

41. Архангельский Ю.С. Компьютерное моделирование СВЧ электротехнологических установок / Ю.С. Архангельский, С.В. Тригорлый. Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2006. 212 с.

42. Терминологическая база, энергоэффективность и электроснабжение СВЧ электротехнологических установок / А.С. Добродум, А.В. Федоров, Ю.С. Архан-

гельский, С.Г. Калганова // Вопросы электротехнологии. 2017. № 1 (14). С. 94-102.

43. Архангельский Ю.С. Меандровые системы в СВЧ электротехнологии / Ю.С. Архангельский, К.Н. Огурцов, Е.М. Гришина. Саратов: Научная книга, 2012, 210 с.

44. Электрофизические методы СВЧ обработки / Ю.С. Архангельский, Е.М. Гришина, К.Н. Огурцов, Р.К. Яфаров. Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2014. 196 с.

45. Архангельский Ю.С. Измерения в СВЧ электротехнологических установках / Ю.С. Архангельский, С. Г. Калганова, Р.К. Яфаров. Саратов: Амирит, 2018. 322 с.

46. Архангельский Ю.С. Измерения в СВЧ электротехнологии / Ю.С. Архангельский, С.Г. Калганова. Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2008. 152 с.

47. Архангельский Ю.С. Установки диэлектрического нагрева. СВЧ установки / Ю.С. Архангельский. Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2008. 343 с.

48. Архангельский Ю.С. Установки сверхвысокочастотного диэлектрического нагрева / Ю.С. Архангельский. Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2010. 280 с.

49. Юдина В.О. Транспортные системы СВЧ электротехнологических установок, работающих в методическом режиме / В.О. Юдина, Ю.С. Архангельский // Вопросы электротехнологии. 2016. № 3 (12). С. 10-12.

50. Архангельский Ю.С. Согласованные задачи в проектировании методических СВЧ электротермических установок / Ю.С. Архангельский, В.О. Юдина // Вопросы электротехнологии. 2016. № 4 (13). С. 10-12.

51. Юдина В.О. Протяжные СВЧ электротехнологические установки / В.О. Юдина, Ю.С. Архангельский // Вопросы электротехнологии. 2016. № 1 (10). С. 9-12.

52. Архангельский Ю.С. Толкательная СВЧ электротермическая установка на базе камеры с бегущей волной / Ю.С. Архангельский, В.О. Юдина // Вопросы электротехнологии. 2015. № 4 (9). С. 14-19.

53. Юдина В.О. Барабанные СВЧ электротехнологические установки / В.О. Юдина, Ю.С. Архангельский // Вопросы электротехнологии. 2017. № 2 (15). С. 25-29.

54. **Юдина В.О.** Особенности термообработки диэлектрика в толкательной СВЧ электротехнологической установке на базе камеры с бегущей волной / В.О. Юдина, Ю.С. Архангельский // Вопросы электротехнологии. 2016. № 3 (12). С. 13-15.

55. **Юдина В.О.** Конвейерная СВЧ электротермическая установка на базе камеры лучевого типа / В.О. Юдина, Ю.С. Архангельский // Вопросы электротехнологии. 2016. № 2 (11). С. 5-7.

56. **Юдина В.О.** СВЧ электротермические установки для термообработки жидкости в потоке / В.О. Юдина, Ю.С. Архангельский // Вопросы электротехнологии. 2016. № 2 (11). С. 8-13.

57. **Юдина В.О.** К расчету мощности электропривода методической СВЧ электротермической установки / В.О. Юдина, Ю.С. Архангельский // Вопросы электротехнологии. 2018. № 3 (20). С. 8-13.

58. **Архангельский Ю.С.** К вопросу о многофункциональности СВЧ электротехнологических установок на камерах лучевого типа / Ю.С. Архангельский, Е.В. Колесников, В.О. Юдина // Вопросы электротехнологии. 2017. № 3 (16). С. 34-40.

59. **Юдина В.О.** Электропривод методических СВЧ электротермических устано-

вок / В.О. Юдина, Ю.С. Архангельский // Вопросы электротехнологии. 2018. № 1 (18). С. 27-29.

60. **Юдина В.О.** Конкурентоспособность и целесообразность применения методических СВЧ электротермических установок / В.О. Юдина, Ю.С. Архангельский // Вопросы электротехнологии. 2017. № 4 (17). С. 23-27.

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

62. Нетепловые эффекты миллиметрового излучения / под ред. Н.Д. Девяткина. М.: Ин-т радиотехники и электроники АН СССР, 1981.

63. СВЧ модификация полимер / Ю.С. Архангельский, Е.М. Гришина и др. Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2012. 288 с.

64. **Рабинкович Е.З.** Гидравлика / Е.З. Рабинкович. М.: Недра, 1980.

65. **Ботук Б.О.** Гидравлика / Б.О. Ботук. М.: Высшая школа, 1962.

66. **Высоцкий Л.И.** О некоторых неизотермических ламинарных течениях жидкостей / Л.И. Высоцкий // Вопросы электротехнологии. 2017. № 3 (16). С. 11-15.

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

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

Violetta O. Yudina – Postgraduate, Department of Power Supply and Electrotechnologies, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Yury S. Arkhangelsky – Honoured Worker of Science of the Russian Federation, Dr.Sc., Professor, Department of Power Supply and Electrotechnologies, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 02.03.19, принята к опубликованию 15.03.19

ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА

УДК 621.313

ОПТИМИЗАЦИЯ ВТОРИЧНОГО ЭЛЕМЕНТА ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ЛИНЕЙНОГО ВЕНТИЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ

Э.О. Тимашёв, Д.А. Чирков, Н.В. Шулаков, А.Д. Коротаев

CYLINDRICAL LINEAR ELECTRONIC MOTOR SLIDER OPTIMIZATION

E.O. Timashev, D.A. Chirkov, N.V. Shulakov, A.D. Korotaev

Представлены результаты исследования зависимости тягового усилия цилиндрического линейного вентильного двигателя от конструкции его вторичного элемента. Исследование проводилось на модели двигателя, построенной в программном пакете ANSYS Maxwell, расчёт магнитного поля в которой ведётся методом конечных элементов.

Ключевые слова: цилиндрический линейный вентильный двигатель, тяговое усилие, моделирование

Для увеличения тягового усилия цилиндрического линейного вентильного двигателя (ЦЛВД) была проведена прямая оптимизация геометрии и параметров вторичного элемента графическим методом. Для этого были проведены многовариантные расчёты в программе ANSYS Maxwell с целью получения зависимости максимального усилия, развиваемого двигателем, от следующих параметров: ширины, диаметра, материала магнитов, коэффициента полюсного деления.

Расчётная модель цилиндрического линейного вентильного двигателя с постоянными магнитами [1], представленная на рис. 1, состоит из: индуктора, включающего корпус 1, зубцы 2 с коронками 3, ярмо 4, и трёхфазную обмотку 5; а также вторичный элемент, состоящий из штока 6, множества постоянных магнитов 7, полюсов 8 и немагнитных вставок 9. Индуктор неподвижно установлен в корпусе и представляет собой множество катушек, образующих трёхфаз-

The article presents the results of investigation into dependence of cylindrical linear electronic motor tractive force on the slider construction. The investigation related the motor model built in the program pack ANSYS Maxwell, which calculates the magnetic fields using the finite element method.

Keywords: cylindrical linear electronic motor, tractive force, modeling

ную обмотку, которая создаёт бегущее магнитное поле вдоль оси корпуса. Двигатель находится в воздушной среде 10.

Расчётная модель двигателя в программе Maxwell состоит из 4-х пар полюсов для ускорения расчётов, а у реального экспериментального модуля [2] имеется 16 пар полюсов, поэтому для приведения усилия расчётной модели к реальному модулю его надо умножить на 4.

Магнитные свойства редкоземельных постоянных магнитов характеризуются остаточной индукцией B_r и коэрцитивной силой H_c . Результаты анализа, проведённого в программе Maxwell, существующих редкоземельных постоянных магнитов от разных производителей в составе вторичного элемента ЦЛВД выявили, что наибольшее тяговое усилие двигатель имеет с магнитами с наибольшими значениями коэрцитивной силы H_c и остаточной индукции B_r .

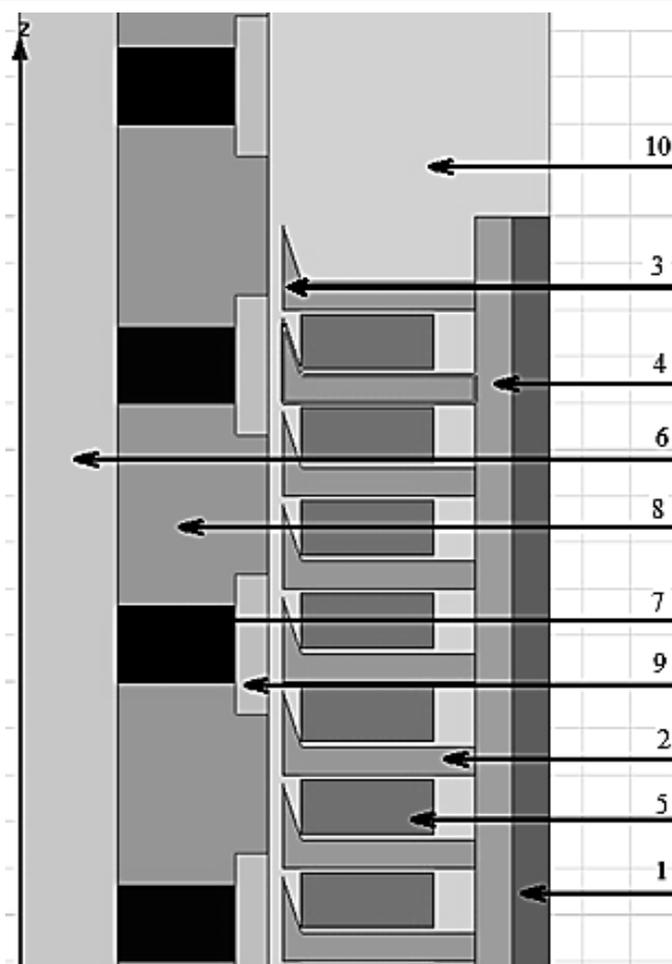


Рис. 1. Расчётная модель ЦЛВД

Статические характеристики расчётного модуля ЦЛВД с использованием магнитов разных марок представлены на рис. 2, а справочные данные по магнитам приведены в табл. 1. На рис. 2 положительные значения тягового усилия показаны для движения вторичного элемента по направлению коронки зубца, а отрицательные значения – при движении против коронки зубца.

Промышленность выпускает различные постоянные магниты с конкретными значениями B_r и H_c . Параметры B_r и H_c связаны между собой, поэтому рассматривать их влияние на тяговое усилие модуля ЦЛВД по отдельности нельзя. Можно исследовать влияние на характеристики только конкретных типов магнитов. Так, магнит № 5 в табл. 1 завода ПОЗ-Прогресс, г. Екатеринбург, Пышма имеет $B_r = 1$ Тл, $H_c = 680$ кА/м, при этом тяговое усилие модуля ЦЛВД составляет 4384 Н. Этот магнит использован в экспериментальном модуле ЦЛВД.

При переходе на магнит № 3 табл. 1 с $B_r = 1,39$ Тл, $H_c = 980$ кА/м тяговое усилие модуля ЦЛВД возрастает до значения 5840 Н. Поэтому увеличение тягового усилия при переходе с магнита № 5 на магнит № 3 составляет $K_1 = F_3/F_5 = 1,332$. Таким образом, тяговое усилие модуля ЦЛВД увеличивается на 33,2%.

Оптимизация параметров магнита производится для модуля ЦЛВД. При этом изменяется ширина и диаметр магнита № 5, который используется в модуле ЦЛВД. На первом этапе изменяется только ширина магнита в пределах 2-14 мм. Зависимость тягового усилия модуля ЦЛВД от ширины магнита показана на рис. 3. Ширина магнита и соответствующие им максимальные значения тягового усилия представлены в табл. 2. Уменьшение ширины магнита приводит к значительному уменьшению тягового усилия, поэтому нежелательно. Ширина магнита экспериментального модуля равна 8 мм.

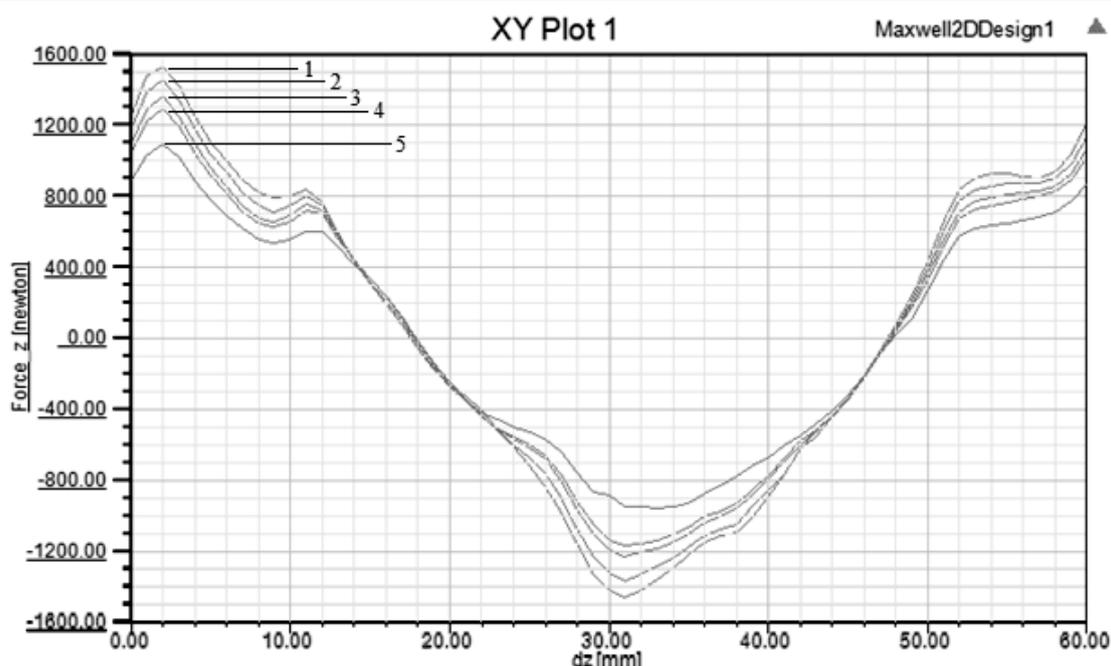


Рис. 2. Статические характеристики расчётной модели ЦЛВД с использованием магнитов 1, 2, 3, 4, 5 табл. 1

Таблица 1

Параметры ЦЛВД в зависимости от марки используемых магнитов

№		B_r , Тл	H_c , кА/м	F'_{1M} , Н	F_{1M} , Н	F'_1 , Н	F_1 , Н
1	Тульский завод постоянных магнитов	1.47	1138	1530	6120	1450	5800
2	ПОЗ-Прогресс, г. Екатеринбург, Пышма	1.39	980	1460	5840	1380	5520
3	ОАО Магнетронг, г. Владимир	1.26	900	1360	5440	1210	4840
4	ФГПУ СпецМагнит, г. Москва	1.22	800	1300	5200	1150	4600
5	ПОЗ-Прогресс, г. Екатеринбург, Пышма	1	680	1100	4400	960	3840

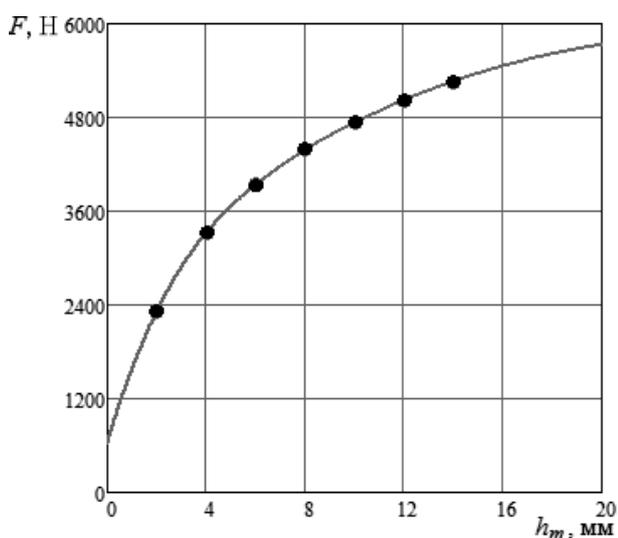


Рис. 3. Зависимость усилия модуля ЦЛВД от ширины магнита h_m

За счёт увеличения ширины магнита с 8 мм до 12 мм тяговое усилие увеличивается на 14,5%. Дальнейшее увеличение ширины магнита нецелесообразно, так как при этом увеличиваются габариты и стоимость магнитов, а увеличение магнитной индукции не столь велико. Коэффициент тягового усилия за счёт увеличения ширины магнитов с 8 до 12 мм равен $K_2 = 1,145$.

На рис. 4 и в табл. 3 представлена зависимость тягового усилия модуля ЦЛВД от диаметра магнита D_m . С увеличением диаметра магнита увеличивается его площадь и уменьшается магнитное сопротивление, поэтому увеличивается магнитный поток и магнитная индукция в зазоре двигателя.

Зависимость тягового усилия модуля ЦЛВД от ширины магнита

h_m , мм	2	4	6	8	10	12	14
F , Н	577	830	984	1096	1183	1255	1315

Таблица 3

Зависимость тягового усилия расчётного модуля ЦЛВД от диаметра магнита

D_m , мм	25	35	43	46	48	49	50	51	52
F , Н	213	619	975	1096	1161	1180	1172	1174	1220

Увеличивать диаметр магнита можно до 49 мм, так как дальнейшее увеличение диаметра магнита ограничивается реальным диаметром вторичного элемента. При диаметре магнита 49 мм тяговое усилие составляет 4720 Н. Коэффициент тягового усилия за счёт увеличения диаметра магнита с 46 до 49 мм будет равен $K_3 = 1,077$. Таким образом, увеличение диаметра магнита увеличивает тяговое усилие на 7,7%.

Расчётное значение коэффициента полюсного перекрытия α_p определяется по формуле:

$$\alpha_p = b/\tau,$$

где b – ширина полюса двигателя, а τ – полюсное деление.

Причём увеличение b с одной стороны уменьшает магнитное сопротивление вторичного элемента и увеличивает магнит-

ный поток в зазоре, а с другой стороны уменьшается расстояние между соседними полюсами вторичного элемента и тем самым увеличивается его рассеяние. Увеличение рассеяния вторичного элемента приводит к уменьшению основного магнитного потока в зазоре, то есть влияние ширины полюса на тяговое усилие ЦЛВД неоднозначно, поэтому существует оптимальное α_p , при котором тяговое усилие максимально. На рис. 5 показана зависимость усилия расчётного модуля ЦЛВД от расчётного коэффициента полюсного деления α_p . В табл. 4 представлены максимальные тяговые усилия расчётного модуля ЦЛВД при различных α_p . Модуль ЦЛВД, для которого проводились эксперименты, имеет $\alpha_p = 0,5$ и тяговое усилие $1096 \cdot 4 = 4384$ Н.

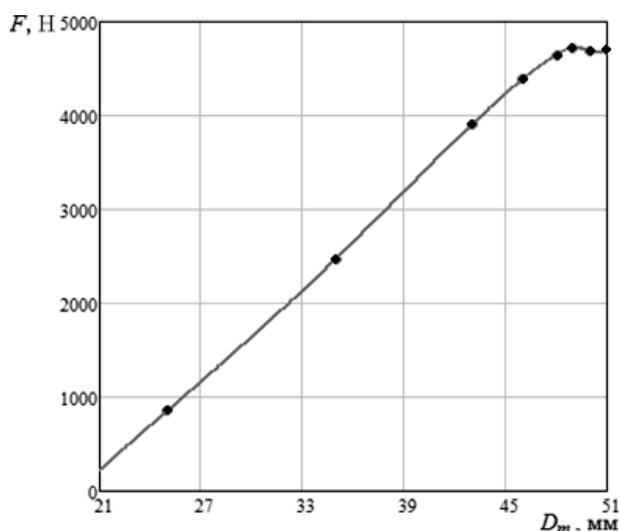


Рис. 4. Зависимость усилия модуля ЦЛВД от диаметра магнита D_m

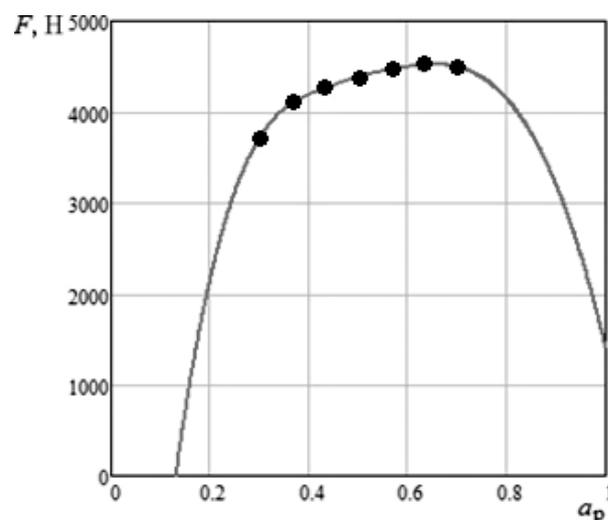


Рис. 5. Зависимость усилия расчётного модуля ЦЛВД от расчётного коэффициента полюсного перекрытия α

Зависимость усилия модуля ЦЛВД от расчётного коэффициента полюсного перекрытия

α , о.е.	0,3	0,37	0,43	0,5	0,57	0,63	0,7
F , Н	213	619	975	1096	1161	1180	1172

Согласно рис. 5 при увеличении α от 0,3 до 0,7 тяговое усилие увеличивается до своего максимального значения при $\alpha_p = 0,63$, а затем уменьшается, то есть $\alpha_p = 0,63$ является оптимальным значением коэффициента полюсного деления, при котором тяговое усилие равно 4720 Н, а коэффициент увеличения тягового усилия за счёт подбора α_p составляет $K_4 = 1.076$, то есть усилие увеличится на 7,6%.

Тяговое усилие экспериментального модуля при номинальном токе фазы обмотки якоря 30 А составило 4384 Н. В результате оптимизации геометрии и типа используемых магнитов, коэффициента полюсного перекрытия можно значительно увеличить тяговое усилие модуля ЦЛВД, использовавшегося при проведении экспериментов, до значения $F = F_M K_1 K_2 K_3 K_4 = 7748$ Н. Таким образом, за счёт оптимизации тяговое усилие возможно увеличить в $7748/4384 = 1,77$ раза или на 77%. Удельное

тяговое усилие на единицу активной площади индуктора, которому соответствует тяговое усилие модуля ЦЛВД 7748 Н, равно:

$$F_{y\partial} = F/S = 4,587 \text{ Н/см}^2,$$

где S – активная площадь индуктора.

Тяговое усилие цилиндрического линейного асинхронного двигателя, аналогичного по геометрии и линейной токовой нагрузке модулю ЦЛВД, не превышает 1200 Н [3], поэтому удельное тяговое усилие на единицу активной площади индуктора ЦЛАД равно

$$F'_{y\partial} = F'/S = 0,71 \text{ Н/см}^2.$$

Таким образом, использование ЦЛВД вместо ЦЛАД для добычи нефти из скважин позволяет увеличить усилие на плунжер насоса в $F/F' = 6,456$ раз, тем самым значительно сократить длину двигателя и уменьшить его массу, что позволит вести добычу на гораздо большей глубине.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тимашев Э.О. Рабочие характеристики цилиндрического линейного вентильного двигателя / Э.О. Тимашев, Д.А. Чирков, А.Д. Коротаев // Электротехника. М.: Знак, 2018. № 11. С. 27-31.

2. Коротаев А.Д. Экспериментальные исследования цилиндрического линейного вентильного электродвигателя / А.Д. Коротаев, Н.В. Шулаков, С.В. Шутемов // Акту-

альные проблемы энергосберегающих электротехнологий: материалы III Междунар. конф. АПЭЭТ-2014. Екатеринбург: Изд-во Урал. федер. ун-та им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, 2014.

3. Веселовский О.Н. Линейные асинхронные двигатели / О.Н. Веселовский, А.Ю. Коняев, Ф.Н. Сарапулов. М.: Энергоатомиздат, 1991.

Чирков Дмитрий Андреевич – аспирант кафедры электротехники и электромеханики Пермского национального исследовательского политехнического университета

Коротаев Александр Дмитриевич – кандидат технических наук, доцент кафедры электротехники и электромеханики Пермского национального исследовательского политехнического университета

Dmitry A. Chirkov – Postgraduate Department of Electrotechnics and Electromechanics, Perm National Research Politechnic University

Alexander D. Korotaev – PhD, Associate Professor Department of Electrotechnics and Electromechanics, Perm National Research Politechnic University

Тимашев Эдуард Олегович – кандидат технических наук, директор департамента технического регулирования и развития Корпоративного научно-проектного комплекса НК «Роснефть»

Шулаков Николай Васильевич – академик АЭН РФ, доктор технических наук, профессор кафедры электротехники и электромеханики Пермского национального исследовательского политехнического университета

Eduard O. Timashev – PhD, Director of the Department Technical Regulation and Development, Corporate Science and Project Complex NK Rosneft

Nikolai V. Shulakov – Academician of the Academy of Electrotechnical Sciences of the Russian Federation, Dr.Sc., Professor Department of Electrotechnics and Electromechanics Perm National Research Politechnic University

Статья поступила в редакцию 27.02.19, принята к опубликованию 15.03.19

УДК 681.171.5

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ
ПРИБОРОВ БЕЗОПАСНОСТИ ЭЛЕКТРОВОЗА
ПЕРЕМЕННОГО ТОКА СЕРИИ ВЛ-80**

И.А. Менщиков

**UPGRADING EFFICIENCY OF THE SAFETY DEVICES
IN THE ELECTRIC ALTERNATING CURRENT TRANSMISSION LINE
OF THE VL-80^S SERIES**

I.A. Menshikov

Представлены результаты исследования в области повышения эффективности функционирования регистратора параметров движения и автоведения грузового электровоза серии ВЛ-80^с. Технический результат достигается тем, что регистратор параметров движения и автоведения электровоза РПДА-Э, содержащий датчик пути и скорости, датчики давления и датчик текущего времени, в отличие от оригинальной конструкции дополнительно содержит искусственную нейронную сеть, блок обработки входных параметров, вычислитель с подключенными к нему клавиатурой, блоком индикации, съёмным блоком накопления информации и с подключенными

The results of the research into improving efficiency of the recording system of the motion parameters and auto-driving of the cargo electric locomotive of the VL-80s series are presented. The technical result is achieved by the fact that the recorder of the motion parameters and auto-driving of an electric locomotive (RPDA-e), containing a path and speed sensor, pressure sensors and a current time sensor, in contrast to the original design, additionally contains an artificial neural network (ins), an input parameter processing unit, a calculator with a keyboard connected to it, an indication unit, a removable information storage unit, and three blocks of converters connected via an information bus, cur-

через информационную шину тремя блоками преобразователей, датчиками тока, напряжения и датчиком момента вращения якоря тягового двигателя, при этом съемный блок накопления информации через блок сопряжения соединен с персональным компьютером, а вместо датчиков пути и скорости используется динамическая искусственная нейронная сеть.

Ключевые слова: *электроподвижной состав, контроль, нейросетевой наблюдатель скорости электровоза, приборы безопасности электровоза*

Устройства безопасности «Регистратор параметров движения и автоведения грузового поезда» (РПДА-Г) и «Комплекс средств сбора и регистрации данных» (КПД-ЗВ) устанавливаются на все виды локомотивов с 2001 года.

Прибор безопасности движения РПДА-Г относится к железнодорожному транспорту и может быть использован для автоматизированного сбора, регистрации и обработки информации о работе локомотива, в том числе для контроля, учета и анализа эксплуатационных расходов электроэнергии магистральным электровозом.

Устройство для регистрации параметров движения поезда содержит датчик пути и скорости, подключенный к блокам определения скорости и пройденного пути, связанным с регистратором, с которым связан блок определения текущего времени, вход которого подключен к датчику времени, к которому подключен второй вход блока определения скорости, а также связанный с регистратором датчик давления [1-9].

РПДА позволяет машинисту иметь оперативные сведения о параметрах движения поезда, о состоянии его тормозной системы на стоянке и при движении.

В условиях эксплуатации приборов безопасности электровоза ВЛ-80 оценку качества функционирования наиболее целесообразно осуществлять с помощью искусственной нейронной сети (ИНС). Преимуществами этого способа оценки являются отсутствие каких-либо первичных преобразователей и датчиков, например

rent, voltage sensors and a torque sensor traction motor anchors. In this case, the removable data storage unit through the interface unit is connected to the personal computer, and a dynamic artificial neural network is used instead of the path and velocity sensors.

Keywords: *electric rolling stock, control, neural network observer of electric locomotive speed, electric locomotive safety devices*

датчика угла поворота ДПС-У колесной пары электровоза ВЛ-80.

Искусственная нейронная сеть в настоящее время широко применяется в системах технической диагностики и прогнозирования остаточного ресурса электромеханических систем, а также ИНС может выполнять такие задачи, как идентификация, аппроксимация и управление.

Для создания нейросетевого наблюдателя угловой скорости якоря тягового двигателя необходимо решить ряд таких задач как: выбор архитектуры ИНС, выбор количества нейронов во входном и выходном слоях, выбор функции активации и матрицы векторов данных тренировочного набора, которые будут использованы, а также определение их размера. Наиболее предпочтительным вариантом для решения задачи оценивания угловой скорости и эффективности такого сложного нелинейного динамического объекта, как электронный скоростемер, являются комбинированные динамические ИНС, на входной слой которых поступают задержки как по входу, так и по выходу.

В качестве выборки данных для обучения нейросетевого наблюдателя следует использовать напряжение на обмотке якоря, напряжение на обмотке возбуждения основных и дополнительных полюсов, значение тока в цепи якоря и обмотки возбуждения, значение электромагнитного момента, значение активной мощности, потребляемой двигателем.

Для полноты нахождения корреляционных связей между входными и выход-

ными параметрами измерительной информации достаточно только значения входных сигналов с датчиков тока и напряжения якоря и обмотки возбужде-

ния. На рис. 1 представлена структура ИНС, предназначенная для определения оценки угловой скорости ТЭД типа НБ-418К6 электровоза ВЛ-80.

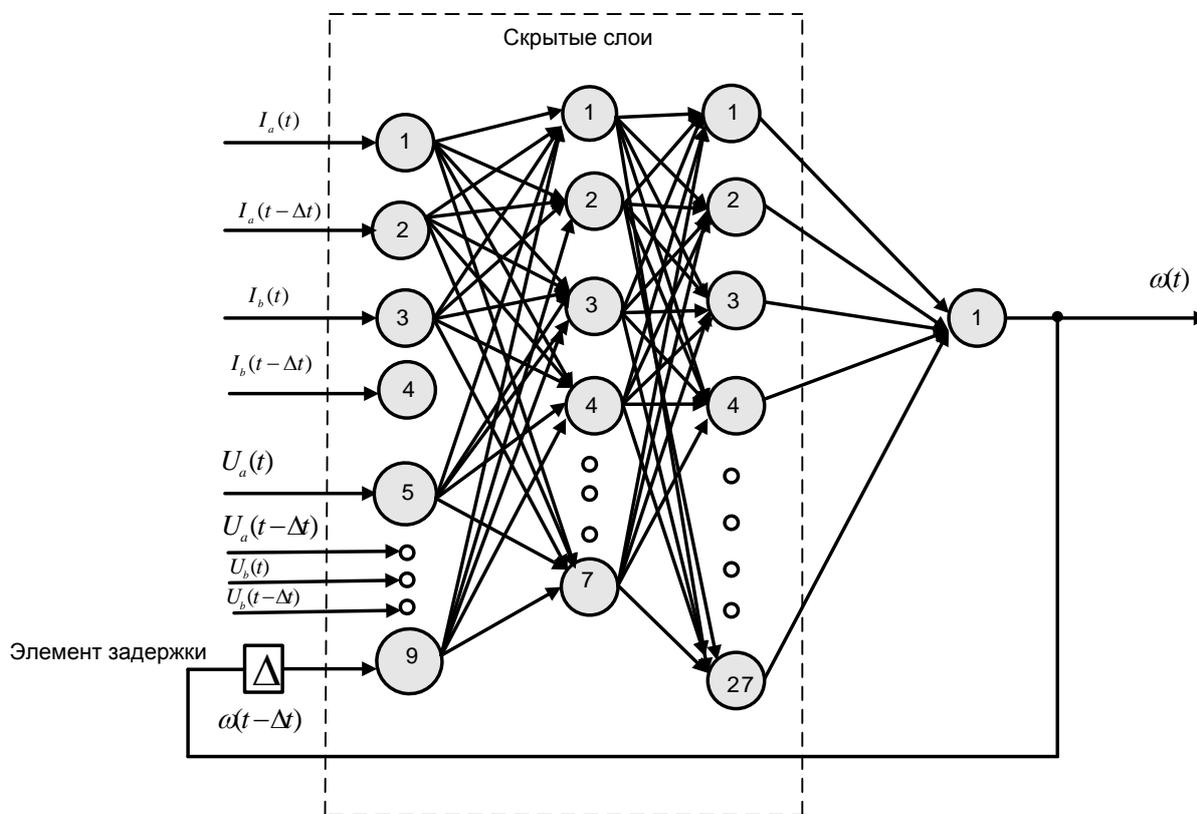


Рис. 1. Структура ИНС для оценки угловой скорости ротора тягового двигателя типа НБ-418Б электровоза ВЛ-80

Помимо данных с датчиков на вход нейросетевого наблюдателя подаются их задержки, а также обратная связь, то есть оценка угловой скорости вращения вала двигателя. Период дискретизации для обучающей выборки составил 100 мкс. Так как данные для обучения нейросетевого наблюдателя впоследствии использовались для реального асинхронного двигателя, при этом частота дискретизации составляла 10 кГц, то и по результатам математического моделирования тренировочный набор также необходимо было проредить.

Создание ИНС для оценки угловой скорости ротора ТЭД проводилось на математической модели двигателя со следующими техническими характеристиками: номинальная мощность – 790 кВт; номинальный ток при напряжении 950 В – 820 А; синхронная частота вращения – 890 об/мин [2].

На основе тренировочного набора была составлена нейронная сеть размерностью 9–7–27–1, выполняющая функции оценки скорости вращения вала ТЭД. 9 нейронов входного слоя обладают линейной функцией активации, 27 нейронов скрытого слоя – тангенциальной функцией, 1 нейрон выходного – линейной. В качестве датчиков тока и напряжения могут быть использованы любые промышленные датчики, соответствующие по амплитуде и частоте измеряемого сигнала, а их временные задержки и программное описание ИНС могут быть выполнены, например, на базе микроконтроллера типа TMS320F2812 фирмы Texas Instruments. После выбора архитектуры ИНС и тренировочного набора наступает процесс обучения в программной среде MATLAB, в основу которого входит подбор коэффициентов синаптических ве-

сов за счет циклической настройки так, чтобы отличия между сигналом датчика угловой скорости ротора и реакцией ИНС на соответствующие входные данные были минимальны.

Нейросетевой наблюдатель необходим для оценки угловой скорости вращения вала тягового электропривода НБ-418К6. Особенностью создания такого наблюдателя является преобработка данных, так как входными данными для обработки являются токи и напряжения статора. При таком способе управления, особенностью которого является наличие бестоковых пауз, что значительно усложнит и затруднит процесс обучения нейросетевого наблюдателя. В качестве предварительной обработки данных выступает преобразование токов, напряжений и их задержек в полярную систему координат:

$$I_a(t) = \sqrt{I_a(t)^2};$$

$$U_a(t) = \sqrt{U_a(t)^2};$$

$$I_a(t - \Delta t) = \sqrt{I_a(t - \Delta t)^2};$$

$$U_a(t - \Delta t) = \sqrt{U_a(t - \Delta t)^2};$$

$$I_b(t) = \sqrt{I_b(t - 2\Delta t)^2}; \quad (1)$$

$$U_b(t) = \sqrt{U_b(t)^2};$$

$$I_b(t - \Delta t) = \sqrt{I_b(t - \Delta t)^2};$$

$$U_b(t - \Delta t) = \sqrt{U_b(t - \Delta t)^2}.$$

Испытание алгоритмов обучения нейросетевого наблюдателя угловой скорости ТЭД типа НБ-418К6 производилось на нейронной сети размерностью 9-7-27-1, где во входном слое было 9 нейронов, 7 и 27 – в скрытых слоях и 1 нейрон – в выходном слое.

На рис. 2 представлен принцип преобразования данных для обучения нейросетевого наблюдателя согласно уравнениям (1). В качестве входных параметров нейросети использовались данные с блока предварительной обработки, а также обратная связь по скорости с задержкой. Архитектура нейросетевого наблюдателя представлена на рис. 3. Для сравнения необходимых качества обучения и количества эпох было выбрано одинаковое время обучения.

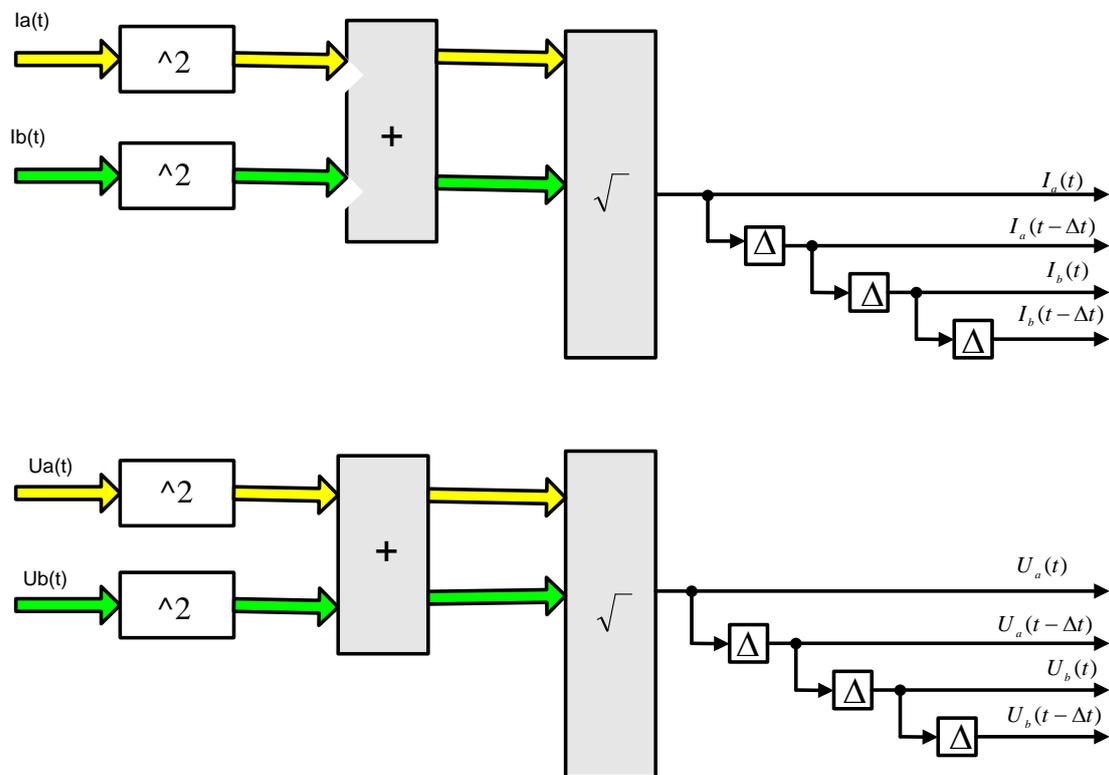


Рис. 2. Блок предварительной обработки данных для обучения нейросетевого наблюдателя

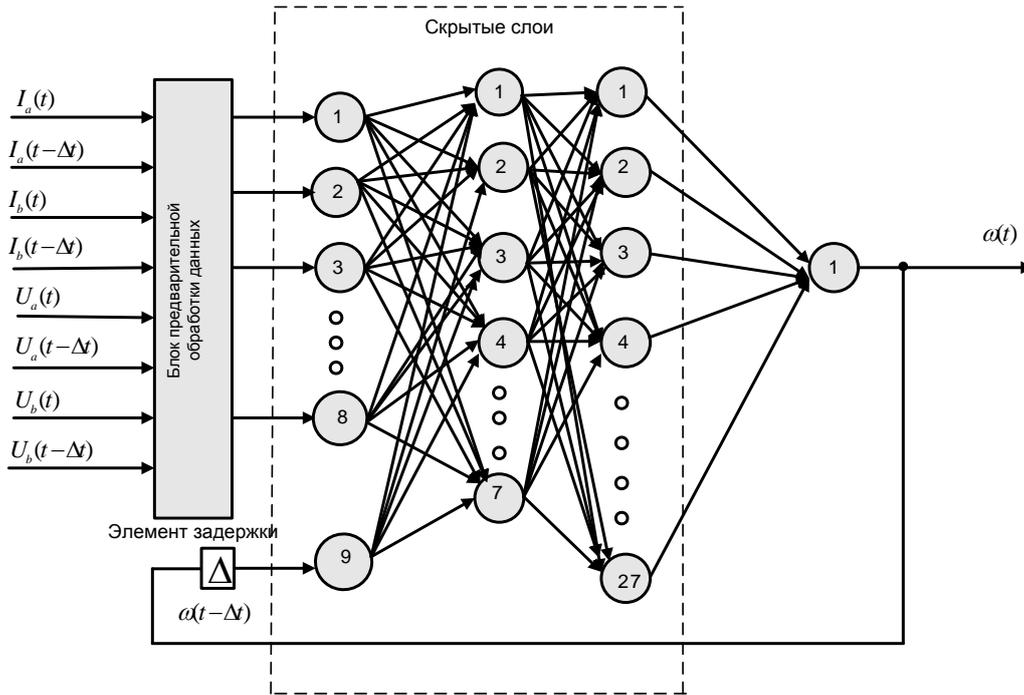


Рис. 3. Архитектура нейросетевого наблюдателя скорости ТЭД НБ-418К6

Нейронная сеть размерностью 9-7-27-1 обучалась различными алгоритмами обучения за постоянный промежуток времени, равный 1964 с. машинного времени, при неизменных вычислительных параметрах компьютера. Графа «Количество эпох» характеризует метод обучения по затратам вычислительной машины на процесс обучения нейронной сети, а графа «Качество обучения» – величину ошибки после обучения нейронной сети.

Процесс обучения иллюстрируется графиком зависимости оценки функционирования от номера цикла обучения рис. 4.

Для примера используем однонаправленную сеть с обратным распространением ошибок и тангенциальную функцию передачи в скрытом слое и линейную функцию передачи в выходном слое.

Эта структура хорошо подходит для аппроксимации функций.

Для обучения данная нейронная сеть использует алгоритм Левенберга – Маркварта. Входные и целевые векторы в случайном порядке данных делятся на три набора: 60% векторов используется для обучения, 20% векторов – для проверки достоверности результатов, чтобы избежать перетренировки ИНС.

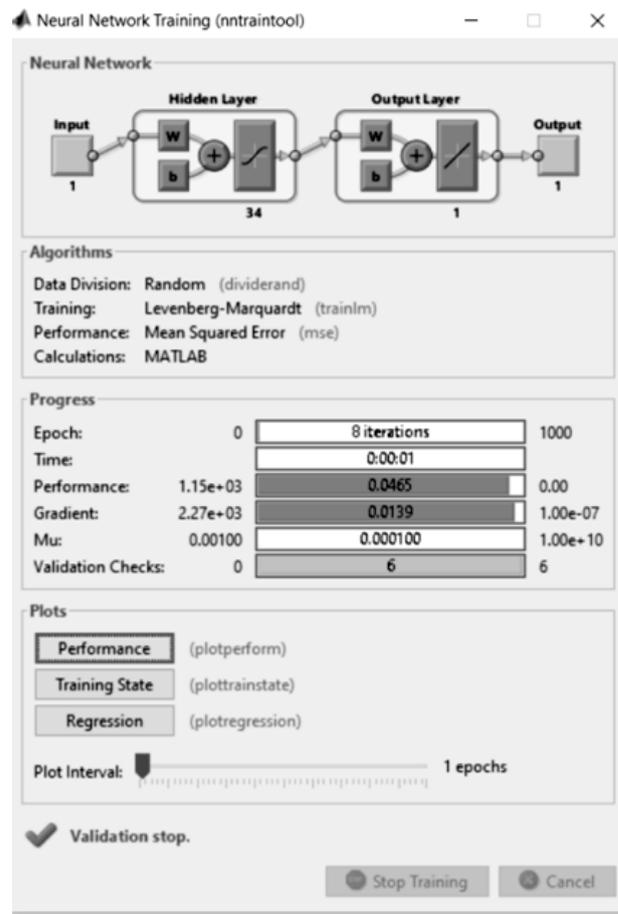


Рис. 4. Окно блока тренировки искусственной нейронной сети размерностью 9-7-27-1 в пакете MATLAB 7

Последние 20% используются для независимого испытания сети. Окно блока показывает процесс тренировки сети рис. 5. По умолчанию остановка процесса обучения происходит, когда среднеквадратичная ошибка проверки достоверности результатов возрастает шесть эпох подряд.

Для оценки достоверности результатов работы сети можно воспользоваться результатами регрессионного анализа, полученными при сравнении эталонных значений со значениями, полученными на выходе сети, когда на вход поданы входные векторы тестового массива.

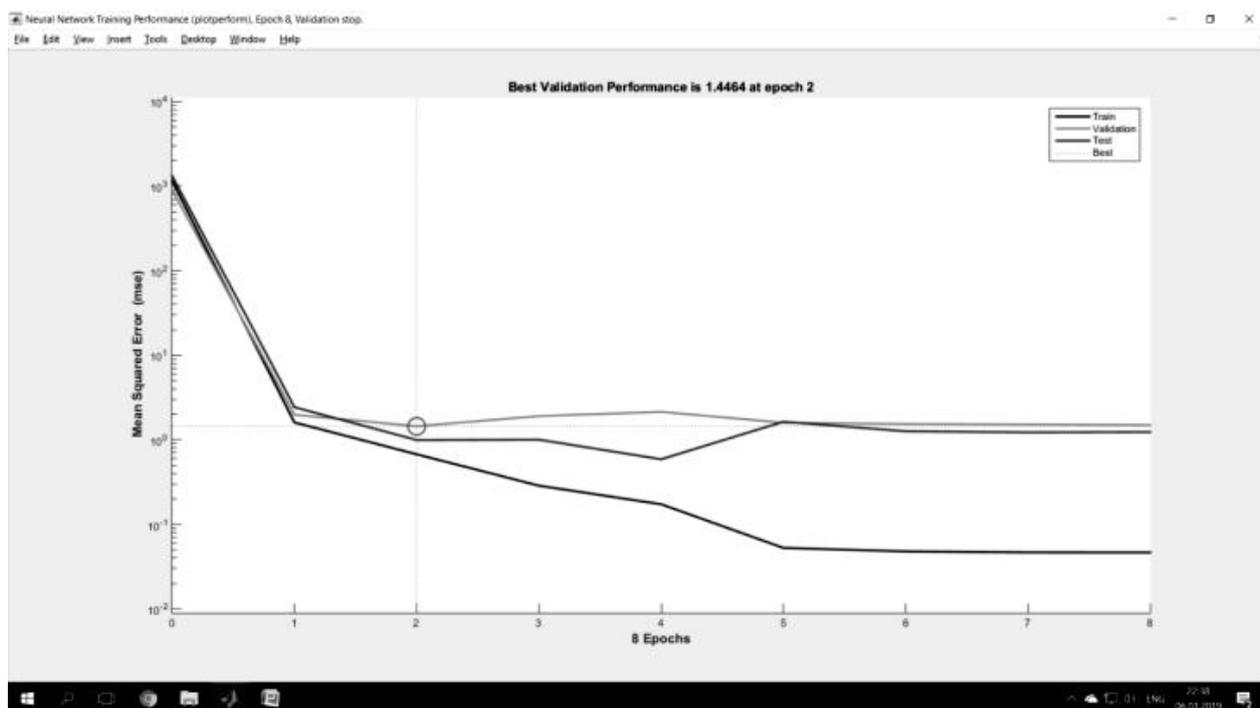


Рис. 5. График зависимости оценки функционирования от номера цикла обучения искусственной нейронной сети структурой 9-7-27-1 в пакете MATLAB 7

На рис. 6 показан результат тренировки ИНС структурой 9-7-27-1, который адекватен из следующих соображений:

- заключительная среднеквадратичная ошибка (СКО) мала;
- ошибка проверочного (Validation) и тестового (Test) наборов утверждения имеют подобные характеристики;
- переобучение не произошло (после точки остановки не происходит увеличения СКО проверочного набора до 8-й эпохи).

Еще одним полезным инструментом оценки результата обучения нейронной сети может быть построение функции регрессии результатов Output (которые дает обученная ИНС) от целевых значений Y (которые были начальными условиями поставленной задачи обучения).

Для оценки достоверности результатов работы сети можно воспользоваться ре-

зультатами регрессионного анализа, полученными при сравнении эталонных значений со значениями, полученными на выходе сети, когда на вход поданы входные векторы тестового массива.

В среде MATLAB для этого можно воспользоваться функцией `postreg`. На рис. 7 представлены графики регрессии процесса обучения и тренировки искусственной нейронной структурой 9-7-27-1 сети в пакете MATLAB [1-3]. На представленных графиках сравнение входных компонентов с эталонными векторами с соответствующими компонентами выходных векторов сети видно, что все точки легли на прямую, что говорит о правильной работе сети на тестовом массиве. Как видно из рисунков, разработанная искусственная нейронная сеть структурой 9-7-27-1 отлично решает поставленную задачу для всех трех выходных параметров.

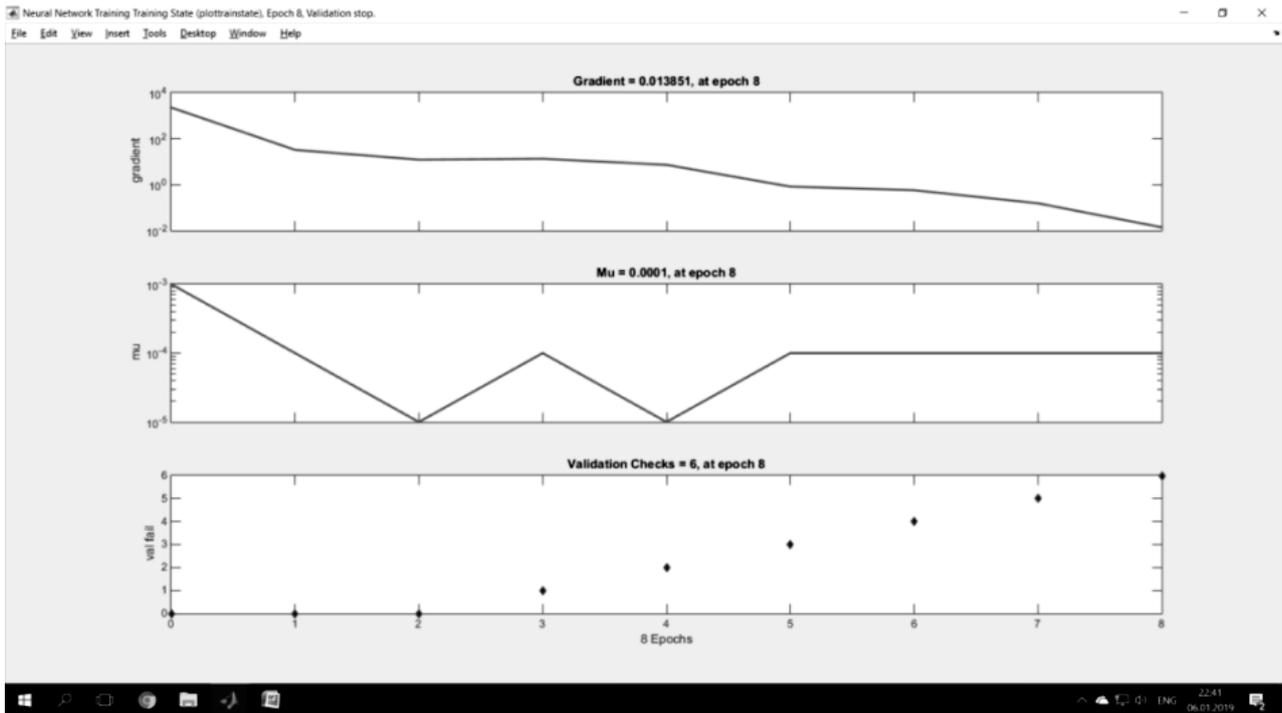


Рис. 6. График состояния процесса обучения искусственной нейронной структурой 9-7-27-1 сети в пакете MATLAB 7

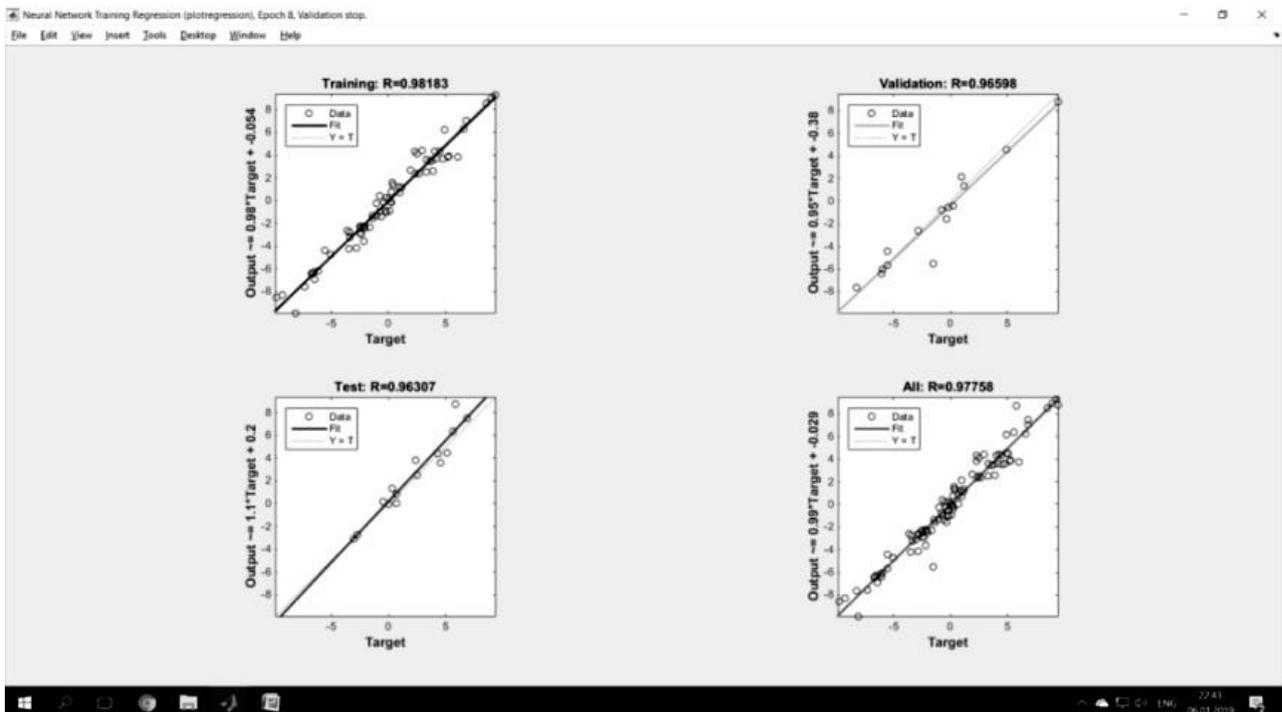


Рис. 7. Графики регрессии процесса обучения и тренировки искусственной нейронной структурой 9-7-27-1 сети в пакете MATLAB

При регулировании скорости вращения вала тягового электропривода НБ-418К6 необходимо исследовать эффективность функционирования приборов безопасности движения КПТ-ЗВ и РПДА-Г. Использо-

вание реальных датчиков скорости ведет к значительному удорожанию оборудования, так как стоимость высококачественного датчика скорости соизмерима со стоимостью электродвигателя малой мощности,

к увеличению потенциального числа отказов оборудования вследствие увеличения количества компонентов системы [1-4], вследствие чего использование реальных датчиков для оценки скорости вращения вала двигателя в системах управления ТЭД и информационных показателей крайне нежелательно и нецелесообразно из соображений удобства автоматизации технологического процесса [5].

Рассмотрены результаты исследований о возможности использования нейросетевого наблюдателя скорости при работе в замкнутом асинхронном электроприводе на основе анализа динамических режимов работы.

$$\Delta A = A_1 - A_2 = \int_0^{t_{п.п}} M(t)\omega_0(t)dt - \int_0^{t_{п.п}} M(t)\omega(t)dt.$$

При рассматриваемом способе регулирования скорости потери в роторной цепи пропорциональны скорости вращения якоря. Для тяговых двигателей с независимой вентиляцией на низких скоростях управление возможно при снижении его нагрузки в обратном пропорциональной зависимости от

В замкнутых регулируемых электроприводах формирование динамики переходного процесса осуществляется с помощью плавного задания управляющего воздействия. Таким управляющим воздействием является ширина импульсов напряжения на обмотке якоря. Из неограниченного числа возможных вариантов плавного задания управляющего воздействия в практике регулируемого электропривода получили распространение такие, как: линейное экспоненциальное, S-образное и U-образное (параболическое). В общем случае потери энергии в переходном процессе электропривода при плавном управляющем воздействии можно записать так:

скольжения. Для двигателей с самовентиляцией снижение нагрузки должно быть значительнее. Это связано с ухудшениями условий вентиляции двигателя на малых скоростях [1-6]. Функциональная схема наблюдателя скорости электровоза ВЛ-80 представлена на рис. 8.

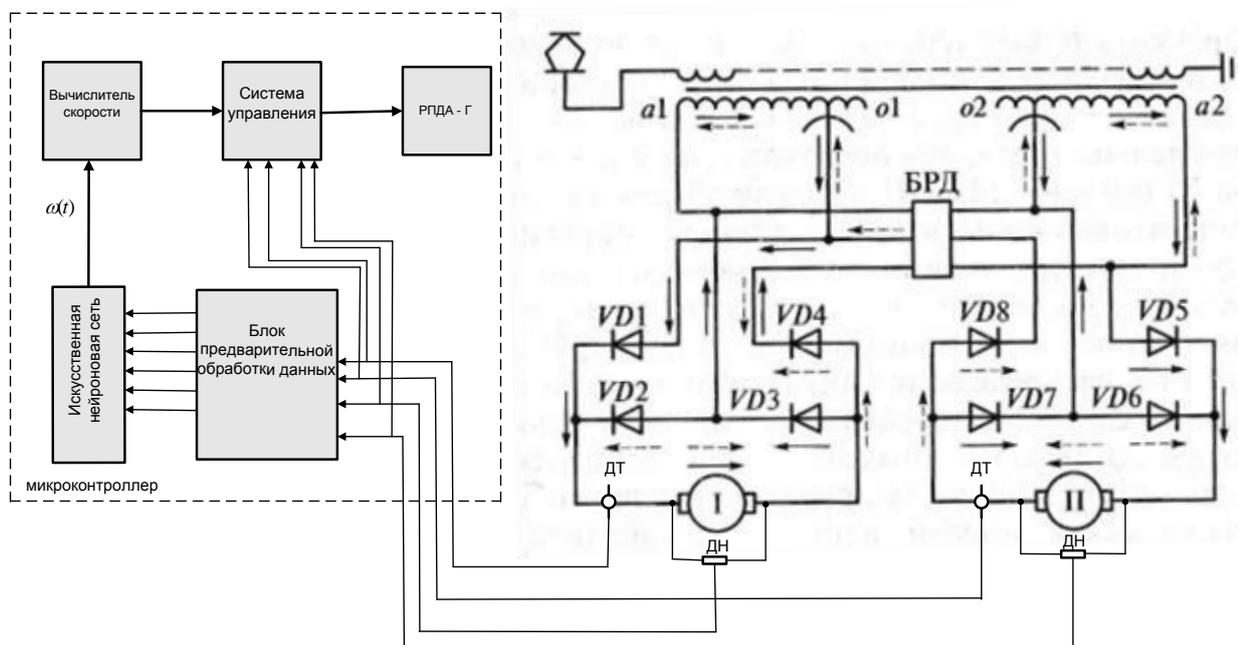


Рис. 8. Функциональная схема наблюдателя скорости электровоза ВЛ-80

Область применения данного способа управления ограничивается механизмами, у которых момент нагрузки при регулировании скорости вниз от номинальной

уменьшается. Вместо реального датчика скорости в своей работе для повышения информационных показателей предложено использовать нейросетевой наблюдатель,

использующий данные с датчиков тока и напряжения.

Функциональная схема наблюдателя скорости электровоза ВЛ-80 состоит из таких блоков, как: микропроцессор ИНС, измеритель скорости и система управления; датчики тока и напряжения, ТЭД. В данной схеме обратная связь организуется от наблюдателя скорости ИНС.

Работа наблюдателя скорости заключается в том, чтобы выработать закон управления согласно с заданной скоростью $\omega_{зад}$. Закон управления формируется за счет данных с ДН, ДТ.

В результате проведенных теоретических исследований получен следующий результат:

– произведена классификация, сравнительный анализ структур нейронных сетей, пригодных для построения наблюдателей сложных нелинейных динамических объектов, таких как ТЭД типа НБ 418К6, для повышения энергоэффективности функционирования РПДА-Г и КПД-3В;

– предложены принципы создания нейросетевого наблюдателя для оценки энергоэффективности тяговых двигателей постоянного тока;

– разработана путем имитационного моделирования структура нейросетевого наблюдателя угловой скорости ТЭД электровоза ВЛ-80.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Сергиенко А.Б.** Цифровая обработка сигналов / А.Б. Сергиенко. СПб.: Питер, 2006. 751 с.

2. **Ануфриев И.Е.** MATLAB 7 / И.Е. Ануфриев, А.Б. Смирнов, Е.Н. Смирнова. СПб.: БХВ – Петербург, 2005. 1104 с.

3. **Елизаров И.А.** Моделирование систем / И.А. Елизаров, Ю.Ф. Мартемьянов, А.Г. Схиртладзе. Старый Оскол: ТНТ, 2013, 136 с.

4. **Черный И.В.** Моделирование электротехнических устройств в Matlab,

SimPowerSystems и Simulink / И.В. Черный. М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. 288 с.

5. **Гермаг-Галкин С.Г.** Проектирование мехатронных систем на ПК / С.Г. Гермаг-Галкин. СПб.: Крона. Век, 2011. 368 с.

6. **Круглов В.В.** Искусственные нейронные сети. Теория и практика / В.В. Круглов, В.В. Борисов. М.: Горячая линия – Телеком, 2001. 382 с.

Меншиков Игорь Александрович – кандидат технических наук, доцент, кафедры «Электроснабжение и электротехнология» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Igor A. Menshikov – PhD, Associate Professor Department of Power Supply and Electrotechnics, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 10.03.19, принята к опубликованию 15.03.19

УДК 681.171.5

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ СИНХРОННОГО ТЯГОВОГО ГЕНЕРАТОРА ТЕПЛОВОЗА СЕРИИ ТЭП-70

И.А. Менщиков

DEVELOPMENT OF THE SYSTEM OF TECHNICAL DIAGNOSTICS FOR THE SYNCHRONOUS TRACTION GENERATOR OF THE TEP-70 LOCOMOTIVE

I.A. Menshikov

Представлены результаты исследования в области повышения эффективности диагностирования синхронного тягового генератора тепловоза серии ТЭП-70. Технический результат достигается тем, что решение задач автоматизации контроля технического состояния электрооборудования электровоза удобно выполнять с помощью алгебраических методов, которые базируются на использовании информации, содержащейся в различных сочетаниях бинарных значений признаков, спектрального и кепстрального анализа тока в трехфазной цепи обмотки статора синхронного тягового генератора тепловоза. Это позволяет обходиться малыми выборками и обеспечивать высокую надежность распознавания.

Ключевые слова: пассажирский тепловоз ТЭП-70, диагностика синхронного тягового генератора, спектральный и кепстральный анализ тока трехфазной обмотки статора, надежность подвижного состава

Надежность тепловозов серии ТЭП-70 и эффективность их использования являются определяющими условиями ритмичной и устойчивой работы железнодорожного транспорта.

В настоящее время в связи с увеличением объема перевозок и повышением интенсивности эксплуатации возрастают требования к эксплуатационной надежности тягового подвижного состава.

The article deals with the results of the research into improving the diagnosing efficiency of the synchronous traction generator locomotive of the series TEP-70. The technical result is achieved by the fact that solution to the problems of automation and control of the technical condition of electric locomotive equipments is performed with the help of algebraic methods, which are based on the data contained in the various combinations of binary values of the spectral and cepstral analysis of the current in the three-phase circuit of the stator winding in the synchronous traction generator of the locomotive. This makes it possible to manage with small samples and provide high recognition reliability.

Keywords: passenger locomotives TEP-70, diagnostics of the synchronous traction generator, spectral and cepstral analysis of the three phase current of the stator winding, reliability of the rolling stock

Анализ отказов электрооборудования локомотивов по сети железных дорог показывает, что 25-35% от их общего числа приходится на СТГ, так что, важнейшей задачей эффективной эксплуатации подвижного состава является обеспечение надежной работы одного из основных их узлов – цепей силового электрооборудования тепловозов. В современных экономических условиях повышение надежности работы

локомотивов, находящихся в эксплуатации, осуществляется за счет модернизации наиболее ответственных узлов и деталей и совершенствования системы технического обслуживания ремонта при сокращении эксплуатационных расходов. Суммарные расходы локомотивного хозяйствования составляют около 40% от общих эксплуатационных расходов сети железных дорог. Причем 30-35% от общих расходов локомотивного хозяйствования затрачивается на техническое обслуживание и ремонт локомотивов.



Рис. 1. Магистральный пассажирский шестиосный тепловоз серии ТЭП-70

При нарушении устойчивости функционирования СТГ ГСТ2800-1000У2, например при межвитковом замыкании в трехфазной обмотке статора, спектр и амплитуда тока отличается от синусоидальной формы. Ток в цепи обмотки статора содержит пульсирующие составляющие в виде высокочастотных прямоугольных импульсов.

При развитии дефектов обмотки якоря СТГ ГСТ2800-1000У2 в высокочастотном пульсирующем импульсе тока содержится множество гармоник, что усложняет нахождение диагностических признаков при спектральном анализе. В этом случае при диагностировании электромеханических систем прибегают к нелинейным преобразованиям, например, логарифмированию спектра с последующим преобразованием Фурье, иными словами получению вторичного спектра или кепстра.

Тепловоз ТЭП-70 (рис. 1) – односекционный пассажирский локомотив с электрической передачей переменного-постоянного тока, предназначен для пассажирских перевозок на магистральных железных дорогах колеи 1520 (1524) мм климатического исполнения «У» по ГОСТ 15150 для всей сети железных дорог Российской Федерации.

В качестве силовой установки на тепловозе используется дизель-генератор 2А-9ДГ, состоящий из дизеля 16ЧН2А 26/26 и синхронного тягового генератора (СТГ) типа ГСТ2800-1000У2. Представлен на рис. 2.



Рис. 2. Моторный отсек тепловоза ТЭП-70 с синхронным тяговым генератором типа ГСТ2800-1000У2

При исследовании неустойчивого режима функционирования СТГ ГСТ2800-1000У2 предполагается, что идеализированный СТГ ГСТ2800-1000У2 не создает пространственных гармоник (шумов) и для того, чтобы найти гармонический состав индукции в воздушном зазоре, достаточно разложить в гармонический ряд ток в цепи якоря.

Для повышения эффективности диагностирования СТГ ГСТ2800-1000У2 можно использовать два способа получения кепстра [1-4]. Это применение преобразования Фурье к линейному спектру или логарифмическому спектру. Применение логарифмического спектра анализа тока в цепи якоря (трехфазной обмотки статора) для диагностики СТГ более целесообразно, так как данный способ обладает наибольшей помехоустойчивостью.

В качестве диагностического параметра предлагается использовать амплитуды спектральных компонентов – рахмоник (по аналогии с гармониками спектрального анализа) [2-3].

Кепстральный анализ тока в трехфазной цепи обмотки статора СТГ ГСТ2800-1000У2 позволяет трансформировать диагностическую информацию, содержащуюся в спектре и распределенную по всему частотному диапазону в виде множества составляющих, в ограниченное число рахмоник кепстра [2-3].

Основное преимущество кепстрального анализа диагностического параметра заключается в том, что кепстр нечувствителен к изменению фазы обрабатываемого диагностического сигнала.

В качестве диагностического признака используются амплитуды спектральных компонентов – рахмоник тока в цепи якоря СГ (по аналогии с гармониками спектрального анализа) [2-3]:

$$C_s(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \ln[S_I(k\omega)]^2 e^{i\omega t} d\omega, \quad (1)$$

где $S_I(k\omega)$ – спектр тока в цепи якоря СТГ.

$$S_I(k\omega) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} s(k) \exp(-j\omega k).$$

Диагностический параметр спектра тока в цепи якоря СТГ в виде функции $S_I(k\omega)$, заданный на отрезке $t = 0 \dots t_N$, можно считать периодическим, то есть считать $S_I(t \pm nt_N) = S_I(t)$, где k – любое целое число, а t_N – период Фурье [2]:

$$S_I(k\omega) = \sum_{k=0}^{\infty} (a_k \cos k\omega t + b_k \sin k\omega t), \quad (2)$$

где $a_k = a(k\omega)$ и $b_k = b(k\omega)$ образуют комплексный частотный спектр сигнала $S_I(k\omega) = a_k - ib_k, i = \sqrt{-1}$; $\omega = 2\pi/t_N$ – основная круговая частота (бин – дискретность спектра); k – номер гармоники.

Составляющие спектра определяются преобразованием Фурье:

$$a_0 = \frac{1}{t_N} \int_0^{t_N} s(t) dt;$$

$$a_k = \frac{2}{t_N} \int_0^{t_N} s(t) \cos k\omega t dt; \quad (3)$$

$$b_k = \frac{2}{t_N} \int_0^{t_N} s(t) \sin k\omega t dt,$$

где $S_I(t)$ – аналоговый диагностический сигнал значения тока в цепи якоря СТГ.

Спектр диагностического периодического сигнала является линейчатым и определяется дискретными значениями в точках частот, кратных ω . Основная круговая частота ω играет роль масштабного множителя. Для непрерывного сигнала, $k = 1 \dots \infty$, то есть спектр является бесконечным.

При исследовании и анализе переходных процессов удобно пользоваться интегралом свертки, который в дискретном виде имеет вид:

$$s(t)_m = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} S_I(k) g(m-k), \quad m = 0 \dots N-1, \quad (4)$$

где $S_I(k)$ – дискретный спектр сигнал на входе диагностической системы; $g(m-k)$ – импульсная переходная функция системы.

Вычисление по формуле (4) является круговой (периодической) сверткой дискретных функций $S_I(kT)$ и $g(kT)$.

Передаточная функция диагностической системы соответствует выражению: $\Phi(\omega) = c(\omega) + id(\omega)$, следовательно, в дискретном виде заменой $\omega = k\omega$ она получит вид $\Phi(k\omega) = c_k + id_k$, где $c_k = c(k\omega)$; $d_k = d(k\omega)$. Определено, что дискретный выходной сигнал $y(m)$ будет вычисляться обратным дискретным преобразованием Фурье (ДПФ) от произведения спектра сигнала $V(k\omega)$ и передаточной функции системы $\Phi(k\omega)$ [1-3].

Обращаясь к (1), определим

$$S_I(k\omega)\Phi(k\omega) = (a_k - ib_k)(c_k + id_k) = a_k c_k + b_k d_k + i(a_k d_k - b_k c_k). \quad (5)$$

Обратное ДПФ в комплексной форме имеет вид

$$s(t) = \sum_{k=0}^{N-1} S_I(k\omega) \Phi(k\omega) e^{ik\omega t}. \quad (6)$$

$$s(t) = \sum_{k=0}^{N-1} \{ [a_k c_k + b_k d_k] \cos k\omega t + [b_k c_k - a_k d_k] \sin k\omega t \}. \quad (7)$$

В этой формуле исчезла мнимая часть из-за того, что относительно средней частоты $\frac{\pi}{T}$ a_k и c_k являются четными, а b_k и d_k – нечетными функциями. Вместо t в формуле используется относительное дискретное время $m = \frac{t}{T}$, где m – целое число.

В общем случае входная последовательность может быть комплексной

$$S_I(m) e^{-ik\omega m} = [S_{I1}(m) \cos k\omega m + S_{I2}(m) \sin k\omega m] - i [S_{I1}(m) \sin k\omega m - S_{I2}(m) \cos k\omega m].$$

Отсюда изменятся и формулы для амплитуд гармоник ряда:

$$a_0 = \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} S_{I1}(m), b_0 = 0;$$

$$a_k = \frac{2}{N} \sum_{m=0}^{N-1} [S_{I1}(m) \cos k\omega m + S_{I2}(m) \sin k\omega m]; \quad (9)$$

$$b_k = \frac{2}{N} \sum_{m=0}^{N-1} [S_{I1}(m) \sin k\omega m - S_{I2}(m) \cos k\omega m].$$

Кепстр позволяет трансформировать информацию, содержащуюся в спектре и распределенную по всему частотному диапазону в виде множества составляющих, в ограниченное число рахмонок кепстра [1-

Подставляя (5) в (6) и принимая во внимание тождество Эйлера $e^{ik\omega t} = \cos k\omega t + i \sin k\omega t$, получим в вещественном виде

$S_I(m) = S_{I1}(m) + i S_{I2}(m)$. С учетом этого в комплексной форме прямого ДПФ

$$S_I(k\omega) = \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} s(m) e^{-ik\omega m}. \quad (8)$$

произведение $s(m) e^{-ik\omega m}$ в дискретном виде получит вид:

3]. Кроме этого, кепстр не чувствителен к изменениям фазы обрабатываемых сигналов, поэтому кепстры различных СТГ ГСТ2800-1000У2 с одинаковой частотой вращения ротора практически идентичны. К недостаткам данного метода спектрального анализа относят сложность интерпретации результатов, из-за чего метод находит ограниченное применение.

В пакете MATLAB автором с помощью математического моделирования были получены спектрограммы диагностического признака значения тока в цепи якоря СТГ ГСТ2800-1000У2, представленные на рис. 3 и 4.

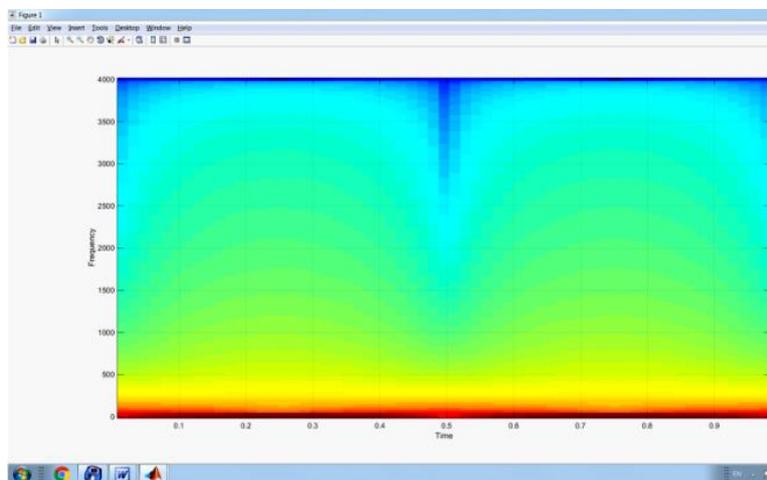


Рис. 3. Спектрограмма тока устойчивого функционирования СТГ ГСТ2800-1000У2

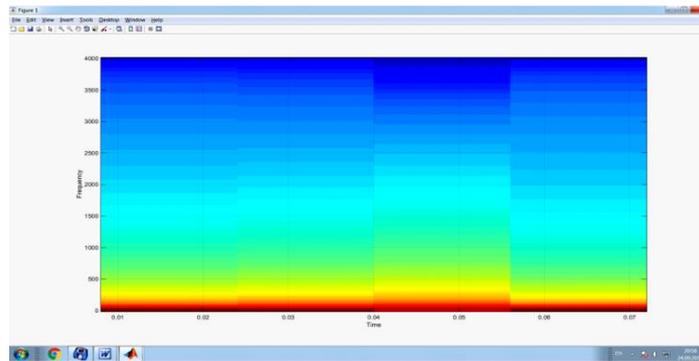


Рис. 4. Спектрограмма тока обмотки якоря СТГ ГСТ2800-1000У2 с межвитковым замыканием

С помощью математического моделирования получен кепстральный анализ спектрограмм диагностических параметров значений тока в цепи якоря СТГ, представленные на рис. 5 исправного СТГ и на рис. 6 не исправного СТГ с межвитковым замыканием якоря.

На основании результатов математического моделирования диагностического па-

раметра значения тока в цепи якоря СТГ, по полученным спектрограммам и кепстрам можно сделать вывод, что при устойчивом режиме функционирования СТГ спектрограмма тока имеет равномерный желто-зеленый цвет, кепстр имеет равномерный синий цвет. Это указывает на отсутствие в обмотках якоря СТГ замыканий и разрушения изоляции.

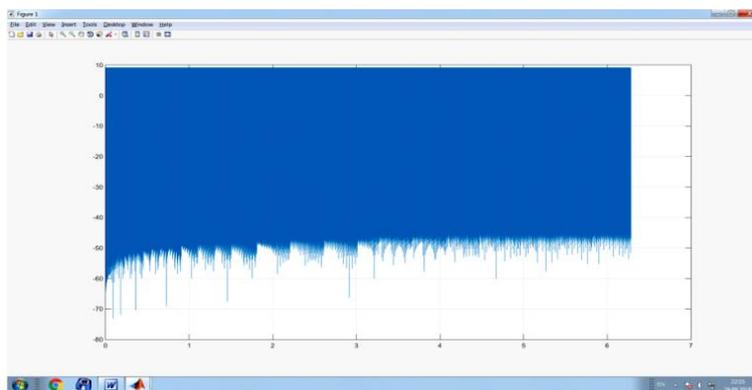


Рис. 5. Кепстральный спектр диагностического признака тока в цепи якоря СТГ ГСТ2800-1000У2 при устойчивом функционировании

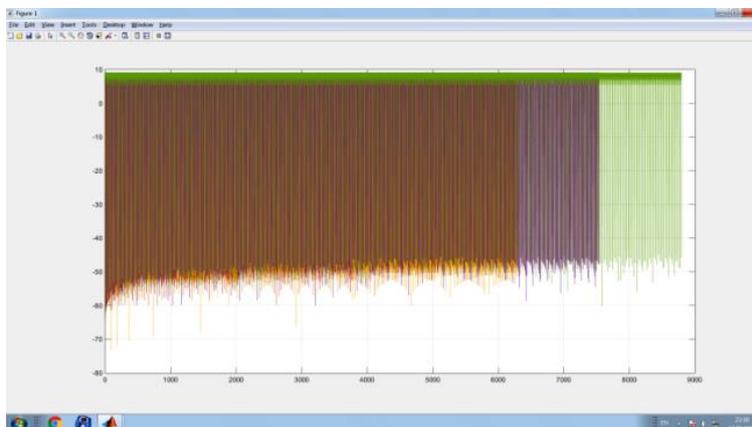


Рис. 6. Кепстральный спектр диагностического признака тока в цепи якоря СТГ ГСТ2800-1000У2 с межвитковым замыканием

При неустойчивом режиме функционирования, например межвитковом замыкании секций якоря СТГ ГСТ2800-1000У2, спектрограмма изменяет свой цвет с желто-зеленого на синий, и цвет спектрограммы становится неравномерным по всей площади. Кепстр при неустойчивом режиме функционирования СТГ ГСТ2800-1000У2 тоже имеет неравномерный цвет по всей площади, и цвет преобладает коричневый вместо синего, что указывает на наличие межвиткового замыкания в обмотке якоря и нарушения условия коммутации секций, возникновения искрения щеток и высокочастотных помех.

Если сравнивать спектральный и кепстральный анализы диагностических пара-

метров, то кепстральный анализ обладает большей информативностью по выявлению дефектов изоляции обмоток якоря СТГ ГСТ2800-1000У2, чем спектральный анализ. На основе полученных результатов исследования разработаны структурные схемы блока обработки сигналов бортовой адаптивной системы мониторинга и диагностирования электромеханических систем на транспорте.

Для диагностирования состояния обмоток якоря СТГ ГСТ2800-1000У2 с помощью кепстрального анализа разработана структурная схема диагностической системы СТГ ГСТ2800-1000У2, представленная на рис. 7.

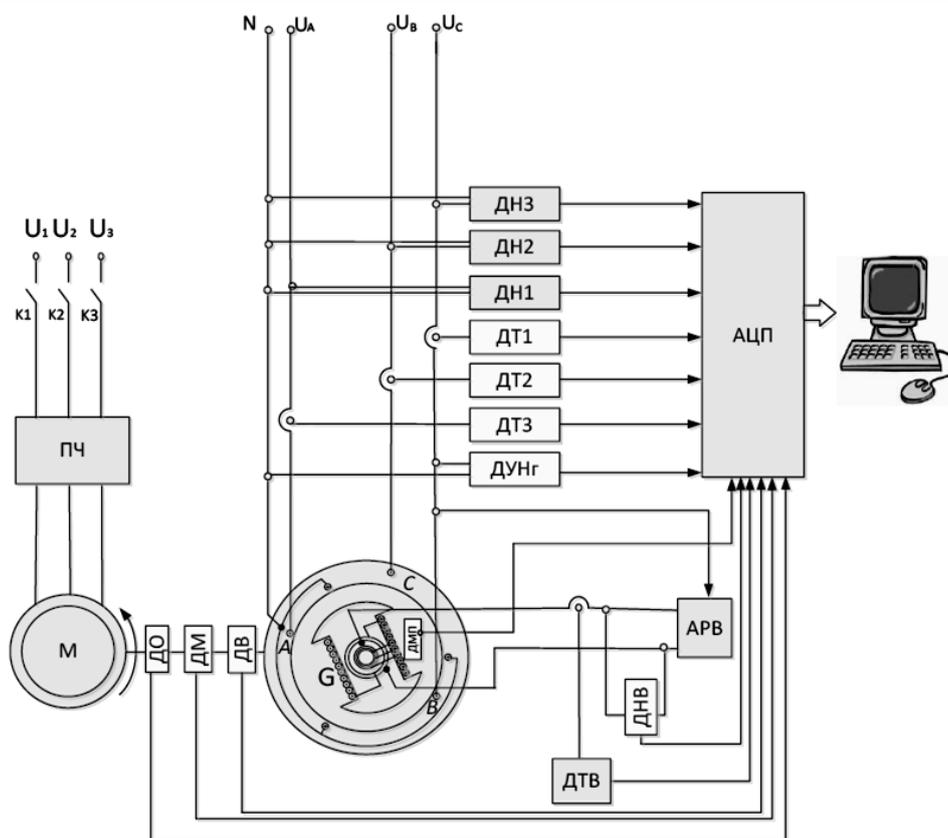


Рис. 7. Структурная схема диагностической установки СТГ ГСТ2800-1000У2

Исследования тока в цепи якоря СТГ ГСТ2800-1000У2 показали, что диагностический сигнал $s(t)$ можно получить с бесконтактного преобразователя «ток – напряжение» в цепи управления якоря СГ. Для спектрального и кепстрального анализа диагностического сигнала с бесконтактного

преобразователя датчика Холла служит блок цифровой обработки диагностического сигнала.

Итак, при теоретическом исследовании и математическом моделировании спектрального и кепстрального анализа тока в цепи трехфазной обмотке синхронного тягового

генератора получен новый информационный диагностический признак «Cepstral», позволяющий существенно повысить эффективность функционирования синхронных машин. На основе полученных результатов

предложены новые принципы построения цифрового блока обработки диагностических сигналов синхронных машин, а также определены принципы устойчивости функционирования синхронных машин.

ЛИТЕРАТУРА

1. Основы технической диагностики. (Оптимизация алгоритмов диагностирования, аппаратные средства) / под ред. П.П. Пархоменко. М.: Энергия, 1981. 320 с.

2. **Менщиков И.А.** Кепстральный анализ диагностических параметров электро-механических систем электропоезда переменного тока серии ЭР9Т / И.А. Менщиков, С.И. Баташов; под ред. к.т.н. А.Г. Бабак // Электроника и электрооборудование

транспорта (ЭЭТ). 2018. № 6. М.: ГУП МО «Коломенская типография», 2018. С. 9-13.

3. **Ширман А.** Практическая вибродиагностика и мониторинг состояния механического оборудования / А. Ширман, А. Соловьев. М.: Спектр-инжиниринг, 1996. 272 с.

4. **Сергиенко А.Б.** Цифровая обработка сигналов: учебник для вузов / А.Б. Сергиенко; 2-е изд. СПб.: Питер, 2006. 751 с.

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

Igor A. Menshikov – PhD, Associate Professor Department of Power Supply and Electrotechnics, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 10.03.19, принята к опубликованию 15.03.19



ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ

УДК 621.317.18

**ОЦЕНКА ВКЛАДА ПОТРЕБИТЕЛЕЙ В УХУДШЕНИЕ
ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ****Я.Э. Шклярский, Ю.В. Растворова, И.С. Петров****ESTIMATING CONSUMERS' CONTRIBUTION TO DETERIORATION
OF ELECTRIC POWER QUALITY INDICATORS****Y.E. Shklyarskiy, Yu.V. Rastvorova, I.S. Petrov**

Приведено обоснование необходимости дальнейшей разработки методов, позволяющих однозначно выявить потребителей, вносящих определяющий вклад в ухудшение показателей качества электроэнергии в системах электроснабжения предприятий. Предложен новый метод, обладающий однозначностью, что отличает его от известных методов. Показано, что метод не зависит от точности измерений. Положения, представленные в статье, подтверждаются результатами имитационного моделирования. В основе метода лежит принцип изменения входного сопротивления системы, осуществляемый посредством варьирования сопротивления обмоток трансформатора, что может быть реализовано с помощью устройства регулирования под нагрузкой. Показаны перспективы применения метода для определения вклада отдельных потребителей в процентном соотношении в изменение показателей качества электроэнергии системы электроснабжения предприятий.

Ключевые слова: высшие гармоники, нелинейная нагрузка, гармонические искажения, качество электрической энергии

В настоящее время проблема компенсации напряжения высших гармоник в электрических сетях различных ступеней вызывает достаточно большой интерес как у производителей современного промышленного оборудования (Siemens, ABB,

The article presents the rationale for further development of the methods that uniquely identify consumers who dominantly contribute to deterioration of electric power quality indicators in the power supply systems of enterprises. A new unambiguous method is proposed that is different from the commonly used methods. It is shown that the new method does not depend on the accuracy of measurements. The statements presented in the article are confirmed by the results of computer simulation. The method is based on the principle of changing the input impedance of the system, which is carried out by varying the resistance of the transformer windings, and can be implemented using the on-load tap-changer. The prospects for applying the given method to determine the contribution of individual consumers in changing the quality indicators in the electric power supply system of enterprises in terms of percentage correlation are shown.

Keywords: harmonics, non-linear load, harmonic distortion, electric power quality

Schneider Electric), так и у научных работников [1-6]. Этот интерес вызван несколькими причинами.

Первая причина – искажения в электрической сети, вызванные все большим распространением нелинейной нагрузки, такой

как частотно регулируемый привод [7-10], электродуговые и индукционные печи [11-13] и др. [14-16]. Вторая причина – необходимость соблюдения стандартов по качеству электроэнергии как общемировых (IEEE 1159-1995, IEEE 519-1992, «Тамозженный кодекс Евразийского экономического союза»), так и принятых для российских сетей (ГОСТ 32144-2013). Третья причина – не решенная окончательно задача по компенсации высших гармоник и отсутствие обоснованного подхода к разработке единой методики по оценке влияния высших гармоник на работу электрооборудования и методологии по выбору критериев этой оценки. К последнему относится задача по выявлению источников искажений, вносящих основной вклад в ухудшение показателей качества электроэнергии.

По определению вклада потребителей в искажения существует ряд методов, среди которых наиболее известны следующие:

– метод активных двухполюсников [17] подразумевает изменение вклада искажения либо со стороны потребителя, либо со стороны системы, что ведет к ошибкам при вычислениях в реальных условиях, когда возможно одновременное изменение обоих вышеупомянутых факторов;

– метод потока активной мощности [18] осложняется необходимостью проведения высокоточных измерений амплитуд и начальных фаз высших гармоник для дальнейшего расчета активной мощности;

– метод, основанный на неактивной мощности [19] основан на различии значений фундаментальной, реактивной мощности, рассчитанной по теории Фризе, а также среднеквадратической мощности согласно Шарону при несинусоидальном напряжении и токе. В результате по соотношению этих мощностей можно определить уровень нелинейности нагрузки и несинусоидальность напряжения, но оценить вклад как системы, так и самой нагрузки в общие искажения крайне затруднительно.

Отсюда следует, что ни один из них не дает точную информацию о вкладе каждого потребителя в искажения системы в процентном соотношении [19], кроме того,

ни один из существующих методов официально не утвержден государственным или международным стандартом. С другой стороны, корректное определение источников высших гармоник, оказывающих наибольшее влияние на режимы работы сети, является крайне важной и актуальной задачей, так как она связана с дальнейшим выбором наиболее эффективных способов компенсации высших гармоник.

С целью разработки метода определения вклада потребителей в ухудшение показателей качества электрической энергии были проведены исследования с использованием программного обеспечения Matlab Simulink.

Была составлена однофазная схема замещения системы электроснабжения с двумя эквивалентными потребителями-предприятиями (рис. 1). Параметры всех элементов приведены к линейному напряжению распределительной сети 6 кВ.

Параметры линий электропередач указаны в табл. 1.

Каждое из предприятий представляет собой линейную нагрузку, отображенную блоком Load и нелинейную нагрузку, замещенную источниками тока. Кроме того, на первом предприятии установлен компенсатор реактивной мощности с последовательно включенной индуктивностью, настроенной на резонанс на частоте 134 Гц.

Параметры вышеупомянутых элементов указаны в табл. 2.

Содержание скрытых в рис. 1 блоков Consumer2 и MeasurementBlock1 представлено на рис. 2 а и 2 б соответственно, где структура второго потребителя аналогична первому, а блок измерений рассчитывает действующее значение и суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения и тока первого потребителя.

В процессе исследований было выдвинуто предположение о том, что предвключенная индуктивность линии, в том числе и вводного трансформатора, может влиять на параметры нагрузки при изменении ее величины и в зависимости от места подключения определяющего источника высших гармоник.

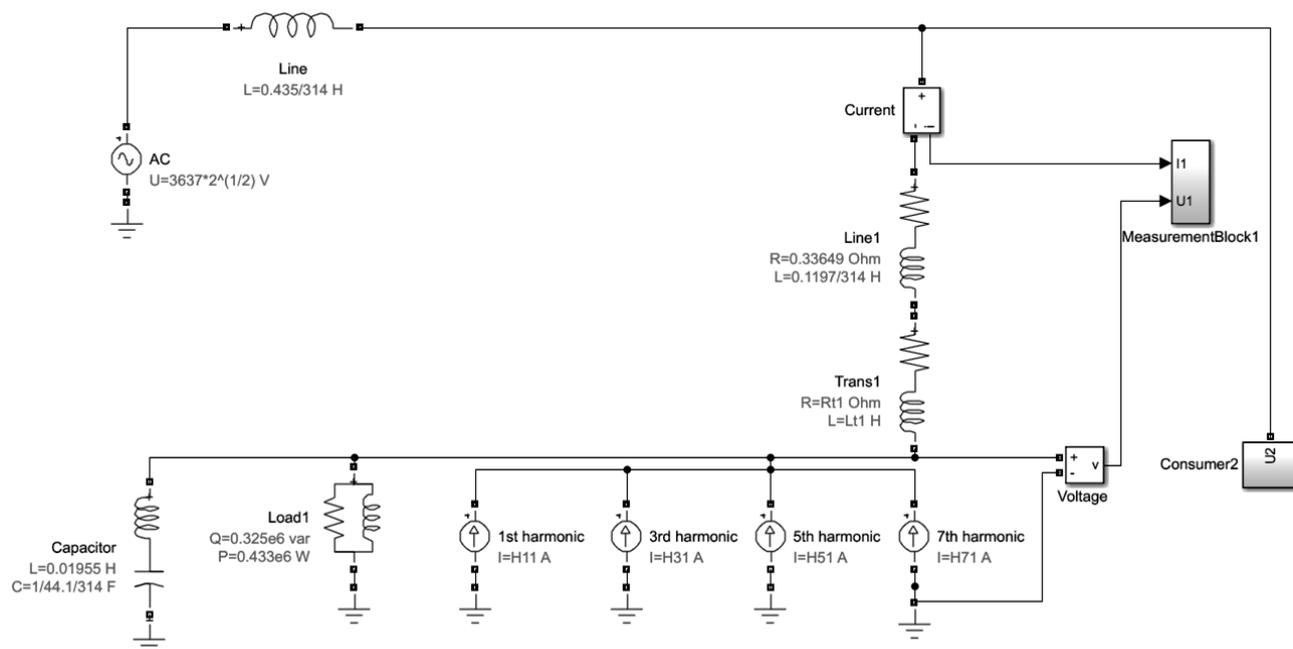


Рис. 1. Схема замещения системы электроснабжения

Таблица 1

Параметры линий электропередач

	Длина линии, км	Удельное активное сопротивление R, Ом/км	Удельное реактивное сопротивление X, Ом/км	Активное сопротивление R, Ом	Реактивное сопротивление X, Ом
Line	2	-	0.217	-	0.435
Line1	1.33	0.253	0.090	0.336	0.120
Line2	1.5	0.125	0.077	0.188	0.116

Таблица 2

Параметры потребителей

		Потребитель 1	Потребитель 2
Линейная нагрузка	Активная мощность P, кВт	1300	2700
	Реактивная мощность Q, квар	975	2000
Нелинейная нагрузка	Активная мощность P, кВт	1000	2700
	Реактивная мощность Q, квар	425	800
Компенсатор реактивной мощности	Реактивная мощность Q, квар	300	-

В связи с этим модель была рассчитана при изменении следующих параметров:

- сопротивление вводного трансформатора первого потребителя изменялось в пределах $\pm 15\%$ от номинального значения,

- суммарная мощность нелинейной нагрузки первого и второго потребителя была принята за 100%, мощность нелиней-

ной нагрузки первого потребителя по отношению к суммарной нелинейной мощности, выраженная в процентах, менялась в пределах 0-100%.

В дальнейшем эта величина будет упоминаться как вклад первого потребителя в искажения сети. В то же время вклад второго потребителя в искажения сети менялся в пределах 100-0%.

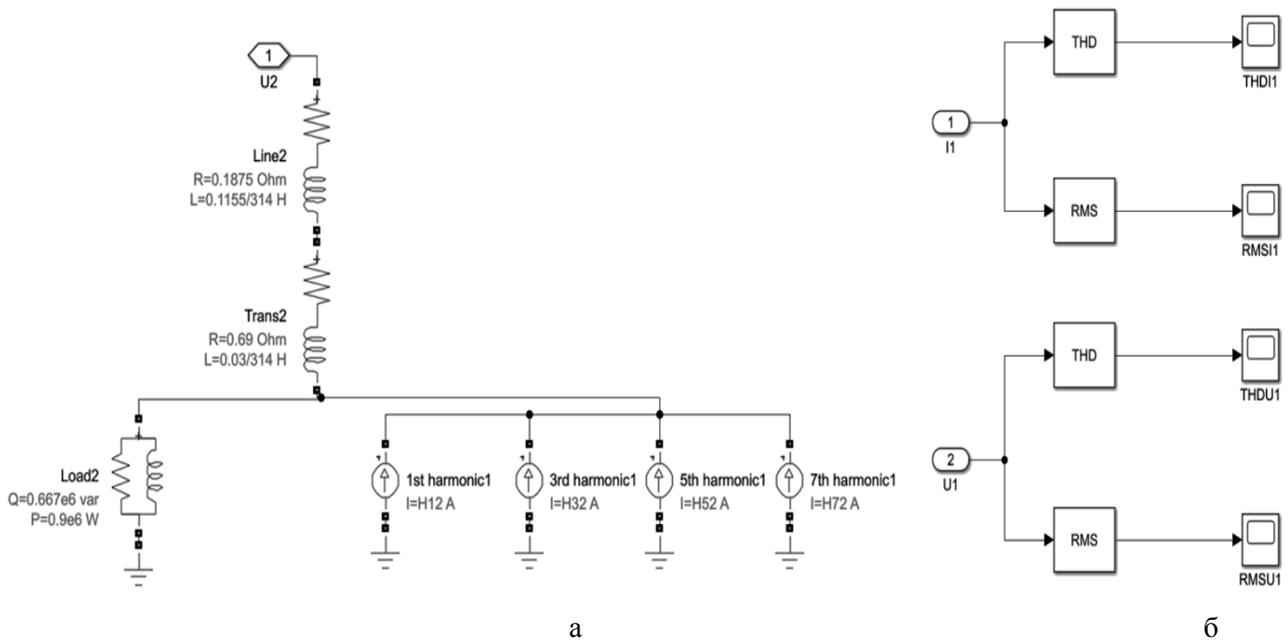


Рис. 2. Скрытые блоки: а – второй потребитель; б – блок измерений

Таким образом, суммарная мощность нелинейной нагрузки сети сохранялась постоянной.

В результате расчетов был получен график изменения напряжения на шинах потребителя 1 в зависимости от изменения сопротивления вводного трансформатора и вклада первого потребителя (рис. 3).

При анализе полученного результата установлено, что при вкладе первого потребителя в искажения сети равном 0% характер зависимости нисходящий (рис. 4 а).

В то же время при вкладе 100%, напряжение потребителя возрастает (рис. 4 б).

Чтобы определить, при каком именно вкладе происходит смена характера зависимости, были рассчитаны производные напряжения U по изменению сопротивления трансформатора Z для каждого из вкладов потребителя.

Результаты проведенных вычислений отображены на рис. 5. Также для улучшения визуального восприятия была добавлена плоскость нулевого уровня.

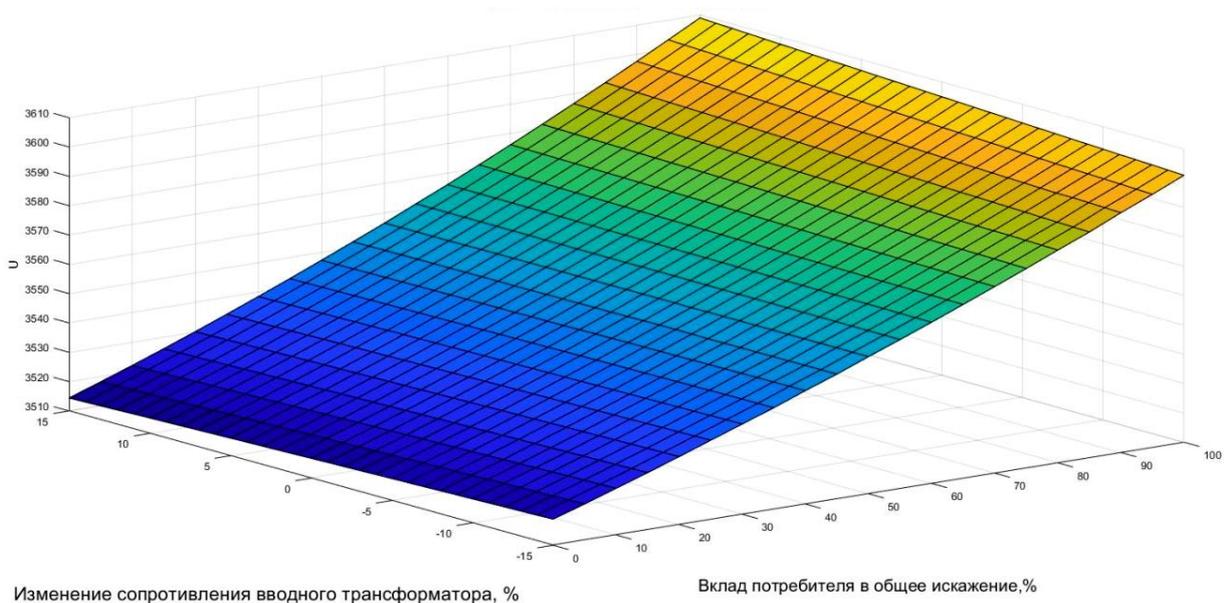


Рис. 3. Напряжение потребителя 1

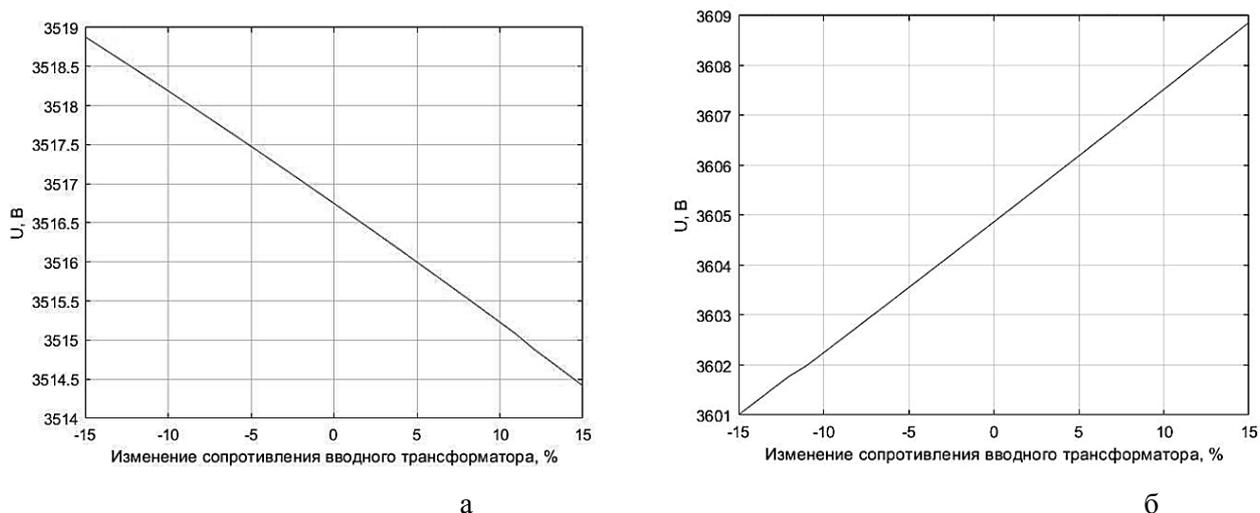


Рис. 4. Напряжение потребителя 1 при: а – 0% вклада в нелинейность; б – 100% вклад в нелинейность

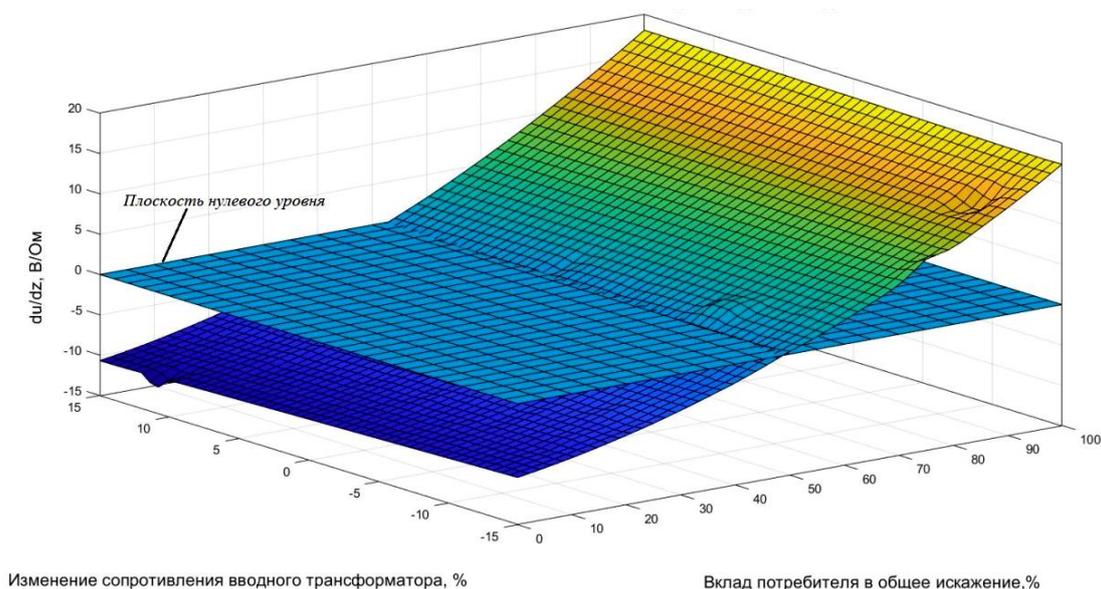


Рис. 5. Производная напряжения потребителя

Видно, что производная напряжения потребителя по изменению сопротивления вводного трансформатора имеет схожие величины для всех значений сопротивлений. Исходя из этого, было посчитано среднее значение производной напряжения (рис. 6).

Проанализировав полученную зависимость, можно сделать вывод, что она нелинейна и не может быть использована в качестве удобного критерия определения вклада потребителя в общие искажения. В связи с этим было принято решение провести аналогичные расчеты не для полного напряжения и тока потребителя, а отдельно для каждой гармоники. Результатом расчета также являлись средние значения производной

напряжения для 3-ей (рис. 7а) и 5-ой гармоник (рис. 7б).

Полученные зависимости имеют линейный характер, что, безусловно, является преимуществом при разработке и дальнейшем использовании критерия. Для рассчитанного случая точки пересечения с нулем для 1-й гармоники – около 50% вклада, для 3-й – около 25%, для 5-й – около 10%.

Для более точного определения точки пересечения изучаемой зависимости с осью абсцисс необходимо выделить факторы, влияющие на характер данной зависимости. Было выдвинуто предположение, что таким фактором может стать соотношение линейных мощностей первого и второго потребителя.

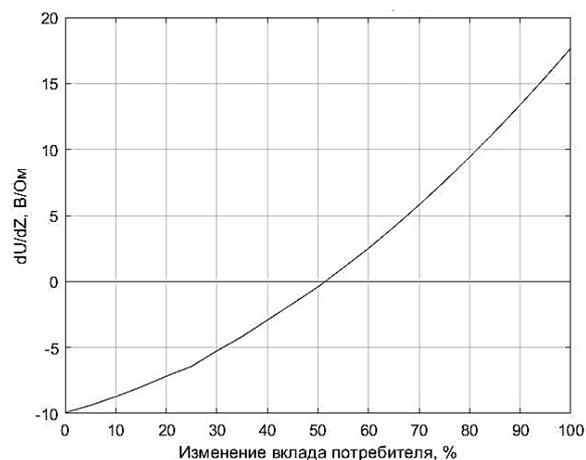
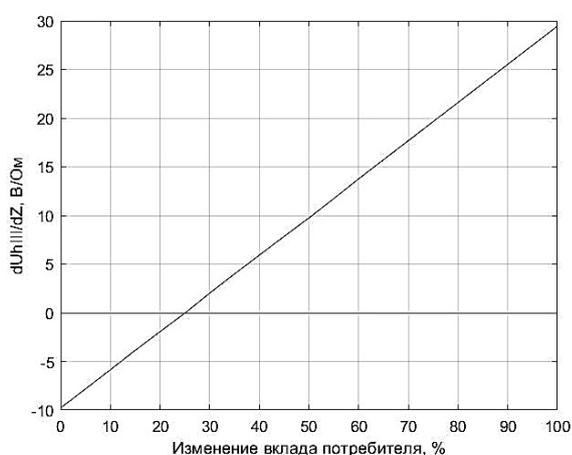
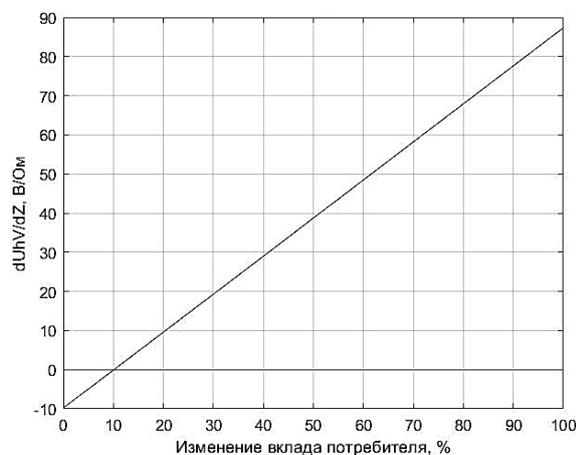


Рис. 6. Среднее значение производной напряжения потребителя



а



б

Рис. 7. Среднее значение производной напряжения потребителя: а – 3-я гармоника; б – 5-я гармоника

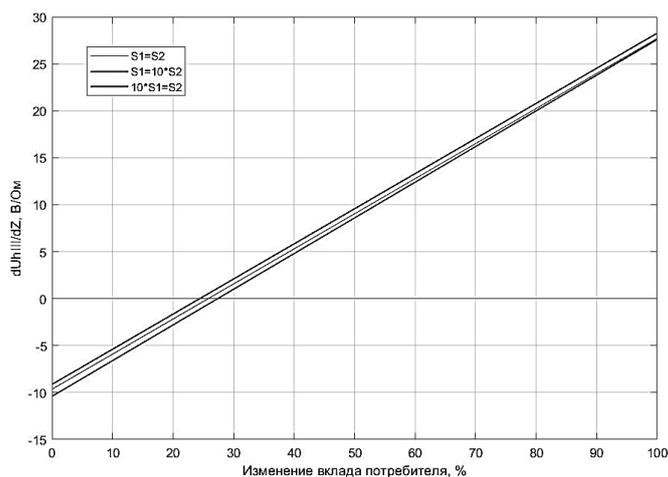


Рис. 8. Среднее значение производной напряжения 3-й гармоники

Был проведен расчет рассматриваемой схемы при условии равенства линейных мощностей, а также в случае, когда линейная мощность первого предприятия на по-

рядок выше второго и наоборот. Результаты вычислений представлены на рис. 8.

Можно отметить, что при изменении мощности на 2 порядка, пересечение пря-

мой с нулем меняет свое положение на 3%, а наклон прямой практически не изменяется. Если подобной точности достаточно, то за критерий можно принимать прямую, полученную при равных мощностях.

Полученные зависимости однозначно указывают на доминирующий источник искажений относительно точки общего подключения и не зависят от точности измерений.

Итак, в результате проведенных исследований было получено изменение напряжения на шинах потребителя 1 в зависимости от изменения сопротивления вводного трансформатора и вклада первого потребителя в искажения системы. Далее были рассчитаны производные этого напряжения по изменению сопротивления трансформатора для каждого из вкладов потребителя в искажение системы. Линейная зависимость средних значений производных отдельно взятых гармоник напряжения принята за критерий определения источников искажений.

Был сформулирован метод, определяющий доминирующий источник высших гармоник относительно точки общего подключения, а также определена основа для дальнейшей разработки критерия, показывающего в процентном соотношении вклад потребителя в ухудшение показателей качества электроэнергии. Такой основой является зависимость производной напряжения высших гармоник по изменению сопротивления вводного трансформатора.

Разработанный метод позволяет однозначно выделить потребителя, вносящего определяющий вклад в искажения системы электроснабжения предприятий, питающихся от общей сети. Кроме того, следует подчеркнуть, что предлагаемый метод по отношению к известным обладает однозначностью и практически независим от точности измерения, так как основывается только на характере изменения соответствующей зависимости.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Белицкий А.А.** Оценка добавочных потерь мощности в электрических сетях с нелинейной и несимметричной нагрузкой / Я.Э. Шклярский, А.А. Белицкий // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2018. № 7. С. 86-93.

2. **Бунтеев Ю.Е.** Анализ методов определения источников высших гармоник в электрических сетях промышленных предприятий / Я.Э. Шклярский, Ю.Е. Бунтеев // Журнал научных публикаций аспирантов и докторантов. 2016. № 1 (115). С. 88-91.

3. **Гамазин С.И.** Определение фактического вклада потребителя в искажения параметров качества электрической энергии / С.И. Гамазин, В.А. Петрович // Промышленная энергетика. 2003. № 1. С. 32-38.

4. **Майер В.Я.** Методика определения долевых вкладов потребителя и энерго-снабжающей организации в ухудшении качества электроэнергии / В.Я. Майер // Электричество. 1994. № 9. С. 19-24.

5. **Смирнов С.С.** Вклад потребителя в уровни напряжения высших гармоник в узлах электрической сети / С.С. Смирнов, Л.И. Коверникова // Электричество. 1996. № 1. С. 56-64.

6. **Смирнов С.С.** Высшие гармоники в сетях высокого напряжения / С.С. Смирнов. Новосибирск: Наука, 2010. 327 с.

7. Voltage quality problems in power supply system of boiler stations using pumps with variable-frequency drive / I.I. Artyukhov, S.V. Molot, S.E. Stepanov et al. // 2018 19th international scientific conference on electric power engineering, EPE 2018 – proceedings. 2018. P. 1-6.

8. **Malarev V.I.** Electric Power Supply System Development for Down-hole Electric Steam Generators to Produce High-viscosity Oil / V.I. Malarev, A.V. Kopteva, V.Y. Koptev // IEEE Xplore 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). 2019. № 1. P. 1-8.

9. **Solovev S.V.** Efficiency estimation method of three-wired AC to DC line transfer / S.V. Solovev, A.I. Bardanov // Journal of Physics: Conference Series, 2018. Vol. 1015.

10. **Shklyarskiy Y.E.** An algorithm for prediction of the DC link voltage of the VFD during voltage sags / Y.E. Shklyarskiy, V.S. Dobush, A.I. Bardanov // Proceedings of the 2018 IEEE conference of Russian young researchers in electrical and aelectronic engineering, ElConRus 2018. 2018. P. 763-767.

11. **Птицина Е.В.** Низковольтные электродные водоподогреватели с питанием током сложной формы / Е.В. Птицына, Д.В. Птицын, А.Б. Кувалдин // Омский научный вестник. 2018. № 2 (158). С. 20-26.

12. **Птицина Е.В.** Работа смешанной нагрузки в режиме с питанием током сложной формы / Е.В. Птицына, Д.В. Птицын, А.Б. Кувалдин // Омский научный вестник. 2018. № 4 (160). С. 47-54.

13. **Растворова И.И.** Получение плоских деталей из пеноалюминия в переменном магнитном поле / И.И. Растворова // Записки горного института. 2017. Т. 227. С. 569-575.

14. **Добуш В.С.** Анализ влияния источников бесперебойного питания на качество электроэнергии в точке общего подключения потребителя / В.С. Добуш, А.А. Бельский // Промышленная энергетика, 2018. №6. С. 29-34.

15. **Чернов М.С.** Энергетическая эффективность электросталеплавильного производства / М.С. Чернов, С.Г. Калганова,

В.С. Алексеев // Роль опорного вуза в развитии транспортно-энергетического комплекса Саратовской области (Трансэнергоком-2018): сборник науч. трудов по материалам Всерос. науч.-практ. конф. 2018. С. 88-90.

16. Power quality in industrial isolated generation power systems with powerful nonlinear consumers / I.I. Artyukhov, I.I. Bochkareva, S.V. Molot at al. // Proceedings of the 9th International Scientific Symposium on Electrical Power Engineering, Slovakia, ELEKTRO-ENERGETIKA 2017, 2017. P. 44-49.

17. **Yang Hong Geng.** Assessment for harmonic emission level from one particular customer / **Yang Hong Geng.** University of Liege, 1992.

18. **Sasdelli R.** Considerations on power definitions on nonsinusoidal conditions / R. Sasdelli, A. Menchetti, G.C. Montanari // IMECO TC-4 5th Int. Symp., Vienna, Austria, Apr. 8-10. 1993.

19. **Скамьин А.Н.** Способы выявления источников высших гармоник в связанных системах электроснабжения промышленных предприятий / А.Н. Скамьин, Ю.В. Растворова // Энергетика и энергосбережение: теория и практика: сборник материалов IV Всерос. науч.-практ. конф. 2018. С. 262-1–262-3.

20. A novel approach based on nonactive power for the identification of disturbing loads in power systems / P.V. Barbaro, A. Cataliotti, V. Cosentino, S. Nuccio // IEEE Transactions on Power Delivery. 2007. Vol. 22. July. P. 1782-1789.

Шклярский Ярослав Элиевич – доктор технических наук, заведующий кафедрой «Общая электротехника» Санкт-Петербургского горного университета

Растворова Юлия Владимировна – аспирант кафедры «Общая электротехника» Санкт-Петербургского горного университета

Петров Илья Сергеевич – аспирант кафедры «Промышленная электроника» Санкт-Петербургского горного университета

Yaroslav E. Shklyarskiy – Dr.Sc., Head: Department of General Electrical Engineering, Saint Petersburg Mining University

Yulia V. Rastvorova – Postgraduate Department of General Electrical Engineering, Saint Petersburg Mining University

Ilya S. Petrov – Postgraduate Department of Industrial Electronics

Статья поступила в редакцию 25.02.19, принята к опубликованию 15.03.19

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

УДК 621-039-419; 620.22-419; 537.868

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУРНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ В ОТВЕРЖДЕННЫХ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛАХ ПОД ДЕЙСТВИЕМ СВЧ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

И.В. Злобина, Н.В. Бекренев, К.С. Бодягина

COMPUTER SIMULATION OF STRUCTURAL CHANGES IN THE CURED POLYMERIC COMPOSITE MATERIALS UNDER THE INFLUENCE OF THE MICROWAVE ELECTROMAGNETIC FIELD

I.V. Zlobina, N.V. Bekrenev, K.S. Bodyagina

Разработаны физические и феноменологические модели изменения микроструктуры полимерных композиционных материалов (ПКМ) под действием СВЧ электромагнитного поля и выполнена их визуализация в виде двумерных и трехмерных компьютерных моделей межфазного слоя «матрица-волокно». Трехмерная модель элементарной ячейки была построена в виде параллелепипеда, заполненного матрицей с размещенным в среднем сечении волокном. Отношение поперечного размера к продольному принято 1:5 и 1:50. В качестве модели межфазного слоя приняты продольные ребра матрицы, контактирующие с поверхностью волокна. На основе анализа электронных микрофотографий ПКМ, свидетельствующих о увеличении элементов микроструктуры в матрице и межфазном слое после воздействия СВЧ электромагнитного поля, предложено в качестве модели указанных изменений увеличение количества контактных ребер в элементарной ячейке. По результатам моделирования напряженно-деформированного состояния элементарной ячейки в программной среде Comsol констатировано увеличение модуля Юнга и напряжений Мизеса в матрице после воздействия СВЧ

Physical and phenomenological models of changes in the microstructure of polymer composite materials (PCM) under the impact of the microwave electromagnetic field are developed and visualized in the form of two-dimensional and three-dimensional computer models of the matrix-fiber interphase layer. The three-dimensional model of the unit cell was built in the form of a parallelepiped filled with a matrix with a fiber placed in the middle section. The ratio of the transverse to the longitudinal size is 1:5 and 1:50. As a model of the interfacial layer, the longitudinal edges of the matrix contacting the fiber surface are accepted. Based on the analysis of electronic microphotographs PCM, indicating an increase in the microstructure elements in the matrix and the interfacial layer after exposure to the microwave electromagnetic field, as a model of these changes it is proposed to increase the number of contact edges in the unit cell. According to the results of modeling the stress-strain state of the unit cell in the Comsol software environment, an increase in the Young's modulus and the von Mises stresses in the matrix after the impact of the microwave electromagnetic field was found as 25.8% and 24.6%, respectively, which coin-

электромагнитного поля соответственно на 25,8 и 24,6%, что удовлетворительно совпадает с результатами эксперимента. При этом указанные параметры волокна не изменились, межфазного слоя увеличились незначительно (на 7,6%). На основе выполненных исследований предложено в качестве одного из механизмов упрочнения в СВЧ электромагнитном поле отвержденных ПКМ преимущественное увеличение модуля упругости и предельных напряжений материала матрицы в сочетании с ростом количества областей контакта матрицы с поверхностью волокна вследствие уменьшения размеров агломератов и возрастания их количества.

Ключевые слова: микроструктура, СВЧ электромагнитное поле, матрица, армирующее волокно, межфазный слой, компьютерное моделирование, элементарная ячейка, контактные области межфазного слоя

В производстве современных технических систем различного назначения широко используются полимерные композиционные материалы (ПКМ). На основе анализа тенденций развития наукоемких производств и, в частности, авиаракетной промышленности и энергетики, а также на основе аналитических обзоров рынка перспективных конструкционных материалов [1, 2] можно сделать вывод, что потребности высокотехнологичных производств в применении композиционных материалов высокого качества сохранятся в близкой и отдаленной перспективе. Однако композиционные материалы характеризуются выраженной анизотропией физико-механических характеристик, определяемой видом и ориентацией армирующих компонентов. Это вызывает необходимость дополнительного усиления конструкции в некоторых опасных участках, приводящих к увеличению веса. Данный факт весьма нежелателен для изделий авиационно-космической техники, особенно для высокоманевренных и скоростных объектов. В то же время перспективные авиационные и ракетные комплексы будут высокоманевренными, использоваться в условиях гиперзвуковых скоростей в атмосфере и ближнем

cides with the results of the experiment. In this case, the specified fiber parameters have not changed, whereas the interfacial layer parameters have slightly increased (by 7.6%). Based on the performed research, it is suggested, as one of the mechanisms of hardening in the microwave electromagnetic field of the cured PCM, to primarily increase the elastic modulus and ultimate stresses of the matrix material in combination with an increase in the number of contact areas in the matrix with the fiber surface due to decreasing the size of the agglomerates and increasing their number.

Keywords: *microstructure of the microwave electromagnetic field, matrix, reinforcing fiber, an interphase layer, computer simulation, a unit cell, the contact area of the interfacial layer*

космосе, что выдвигает повышенные требования к механической и термической прочности их конструкционных элементов, имеющих сложные формы, сильно влияющие на распределение опасных механических и температурных напряжений. Данное положение формирует требования к поиску альтернативных конструкторским методов повышения эксплуатационных характеристик ПКМ без изменения состава их компонентов и объема, соответственно массы, изделия.

Из материалов отечественных и зарубежных исследований следует, что для локального управляющего воздействия на структуру и прочностные свойства трехмерного или двумерного объекта из неметаллических материалов одним из эффективных методов является применение СВЧ электромагнитного поля промышленной частоты. В то же время проведенный анализ материалов отечественных и зарубежных научных публикаций [3-5] показывает, что наибольшее внимание в развитии исследований в области сверхвысокочастотной обработки материалов уделяется поиску принципиально новых решений для применения микроволновых технологий с целью замещения существующих технологий термообработки. Вопросы нагрева материа-

лов в электромагнитном поле обсуждаются на международных симпозиумах, в которых участвуют специалисты США, Великобритании, Германии, Франции, России, Бразилии, Румынии, Турции, Мексики, Чехии, Польши, Китая. На конгрессах по применению радиочастот и микроволн рассматриваются следующие аспекты технологического применения СВЧ диэлектрического нагрева: энергетическая эффективность технологий; термообработка керамики, полимеров, стекла, минералов и других диэлектрических материалов; обработка отходов различных производств; полупроводники и микроэлектронное производство; методы измерения диэлектрических свойств материалов; моделирование и взаимодействие материалов с энергией электромагнитного поля сверхвысоких частот и т.д. Отмечается, что применение микроволновых технологий позволяет значительно улучшить качественные показатели при производстве и обработке многих видов материалов на стадии их формирования. При этом достигнуты значительные результаты в повышении прочностных свойств неметаллических материалов, в частности, композитов, синтетических волокон и др. в процессе синтеза и отверждения.

Одним из заслуживающих внимания аспектов применения СВЧ электромагнитного поля в области материаловедения и технологии ПКМ можно считать воздействие на окончательно отвержденные композиции в качестве заключительной операции технологического цикла, что исключает негативное влияние последующих обработок на свойства композиции, полученные СВЧ обработкой на стадии формирования материалов. Нами выполнены экспериментальные исследования [6-9] влияния СВЧ электромагнитного поля на прочность отвержденных углепластиков: пултрузионного карбона и углепластика с квазиизотропной структурой. Установлено, что на оптимальных режимах воздействия, не вызывающих нагрев объекта обработки выше 39-40°C, предельные напряжения изгиба возрастают на 11-16%, напряжения среза – на 13-21%, напряжения межслоевого сдвига – на 14-15%.

Механизм установленных положительных эффектов в окончательно отвержденной структуре материала до настоящего времени не раскрыт и нуждается в изучении. Очевидно, что указанные выше изменения прочностных характеристик отвержденных ПКМ могут проявляться через модифицирование его микроструктуры. Причины появления упрочняющих эффектов в окончательно сформированном полимерном композиционном материале при воздействии СВЧ электромагнитного поля могут быть выявлены на основе изучения микро- и наноструктуры образцов при помощи электронной микроскопии. Однако обобщающая количественная оценка изменений, которую можно использовать для прогнозирования результатов СВЧ воздействия на различные ПКМ, в этом случае затруднена по причине высокой стохастичности структуры композита и сложного распределения ее элементов по объему материала, армированного по различным схемам и заполненного различными матричными материалами.

Целью исследований явилась разработка гипотезы о механизме повышения прочностных характеристик отвержденных армированных углеродными волокнами полимерных композиционных материалов путем компьютерного моделирования межфазного слоя на основе изучения изменений характеристик их микроструктуры после их обработки в СВЧ электромагнитном поле.

Исследовали образцы из отвержденного композита КМКУ-1.80.Э0,1, состоящего из матрицы на основе клевого связующего ВК-51 и наполнителя – углеродной ленты ЭЛУР-П-А с объемной долей наполнителя 70-75%. Использовали образцы в виде балок сечением 5×10 мм и длиной 70 мм. Обработку образцов осуществляли на СВЧ установке «Жук-2-02» (ООО «АгроЭкоТех», г. Обнинск Калужской обл.) с излучающим рупором размерами 200×250 мм. Частота электромагнитного поля составляла 2450 МГц, мощность магнетрона 1200 Вт. Обработку осуществляли при плотности потока энергии $17 \cdot 10^4$ мкВт/см² и времени воздействия 2 минуты, обеспечивающих максимальный упрочняющий эффект [8]. В зоне облучения

устанавливали одновременно по 3 образца. Микроструктуру изучали при помощи электронного микроскопа MIRA II LMU (Tescan Ersay Holding, Чехия) в Лаборатории материалов специального назначения Саратовского государственного университета имени Н.Г. Чернышевского. Полученные микрофотографии транслировали в компьютерный анализатор изображений микроструктур АГПМ-6М и анализировали в программной среде Metallograph.

Анализ микроструктуры образцов при различном увеличении позволил установить, что при максимальном увеличении (от $\times 50000$ до $\times 75000$) различия в структуре проявляются только в уменьшении размеров агломератов и повышенной рельефности поверхности волокон. При увеличении $\times 5000$ и $\times 10000$ различия проявляются не только в части размеров элементов структуры, но и в части пористости (рис. 1 и 2). При увеличении $\times 5000$ также хорошо заметны различия в МФС «матрица-волокно», характеризующие монолитность композита. При увеличении $\times 10000$ ясно просматривается изменение пористости МФС обработанного образца за счет практического исчезновения в структуре крупных пор. В структуре МФС контрольного образца видны не только полости сложной формы, но и трещины в агломератах, вызванные релаксацией термических напряжений после отверждающей термообработки (рис. 1 *a*). Установлено, что поверхность волокон образцов, прошедших СВЧ обработку, претерпела значительные изменения. Если в контрольных образцах волокна имеют практически гладкую поверхность, то в обработанных их поверхность выглядит рифленой с продольными ребрами высотой около 0,1 мкм, идущими практически с равномерным шагом в 0,5 мкм. Волокна имеют больше областей адгезионного взаимодействия с матрицей. Рифленая поверхность может способствовать улучшению их адгезионного взаимодействия с агломератами матрицы, что увеличивает прочность материала при поперечных деформациях, в частности, межслоевом сдвиге, предельные напряжения которого являются минимальными для ПКМ.

Результаты анализа микрофотографий приведены в табл. 1.

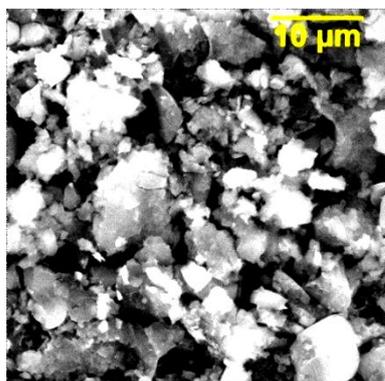
Вследствие на два порядка больших значений модуля упругости армирующих волокон по сравнению с матрицей прочность ПКМ при растяжении определяется исключительно физико-механическими свойствами волокон. Прочность матрицы практически не имеет значения. Однако при поперечных нагрузках (изгиб, срез, сдвиг) большое значение имеет связь между волокнами, их совместное противодействие перерезывающим силам и изгибающим моментам. Указанное объединение волокон обеспечивается через связь с матрицей.

На основе данных табл. 1 определено ожидаемое количество точек контакта агломератов матрицы с волокном с учетом изменения пористости и их количества: 518 для контрольного образца и 662 для обработанного. Таким образом, ожидаемое увеличение адгезионной прочности матрицы составляет для принятых условий эксперимента 1,28, или 28%.

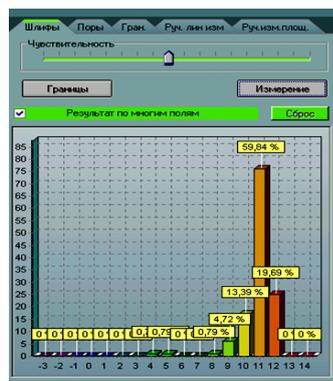
Разработаны физические и феноменологические модели изменения микроструктуры ПКМ под действием СВЧ электромагнитного поля и выполнена их визуализация в виде двумерных и трехмерных компьютерных моделей. В процессе моделирования принято, что на границе раздела матрицы и волокна ПКМ образуется межфазный слой (МФС) толщины h в виде дополнительной фазы. Прочностные характеристики ПКМ в плоскости, перпендикулярной волокнам, во многом определяются структурой и свойствами межфазного слоя и матрицы вследствие малой прочности волокон на изгиб и большей на несколько порядков, по сравнению с прочностью на растяжение. То есть при сдвигающих и изгибающих нагрузках основной вклад в прочность ПКМ вносит адгезионная связь матрицы и наполнителя в области МФС. Соответственно в качестве рабочей гипотезы предложено увеличение точек контактного взаимодействия компонентов в результате изменения формы и размеров агломератов отвержденной матрицы под действием СВЧ электромагнитного поля.

Основная идея расчета эффективных характеристик композиционного материала, имеющего периодическую структуру, состоит в том, что периодические поля напряжений и деформаций зависят от микроуровня задачи на периодической ячейке. Периодическую ячейку материала анализировали, используя технику асимптотиче-

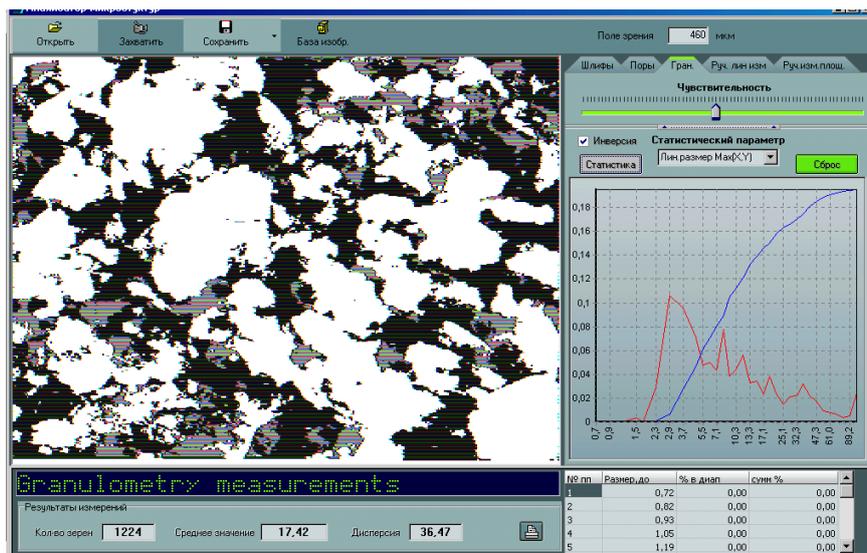
ской гомогенизации для усреднения сложного микроструктурного поведения упругой среды и определения макроскопических свойств композита. Далее рассматривали элементарную периодическую ячейку как многократно повторяющийся элемент ПКМ из армирующего волокна и матрицы.



а



б



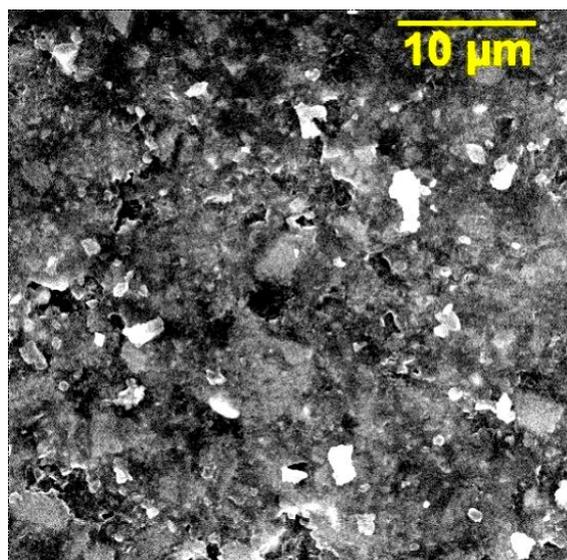
в

Рис. 1. Микроструктура контрольного образца при увеличении $\times 10000$ (а), распределение агломератов по размерам (б) и размеры пор (в)

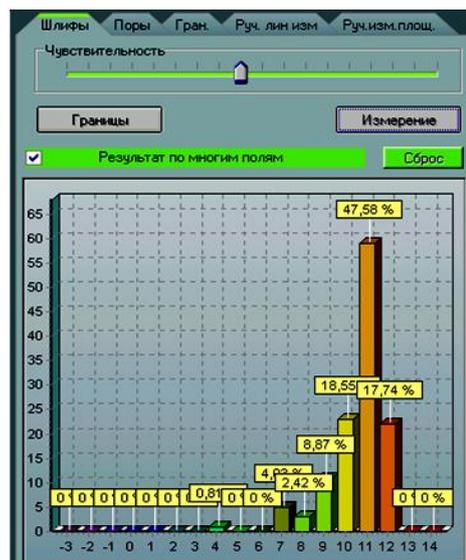
Таблица 1

Изменения в элементах микроструктуры межфазного слоя обработанного образца по сравнению с контрольным

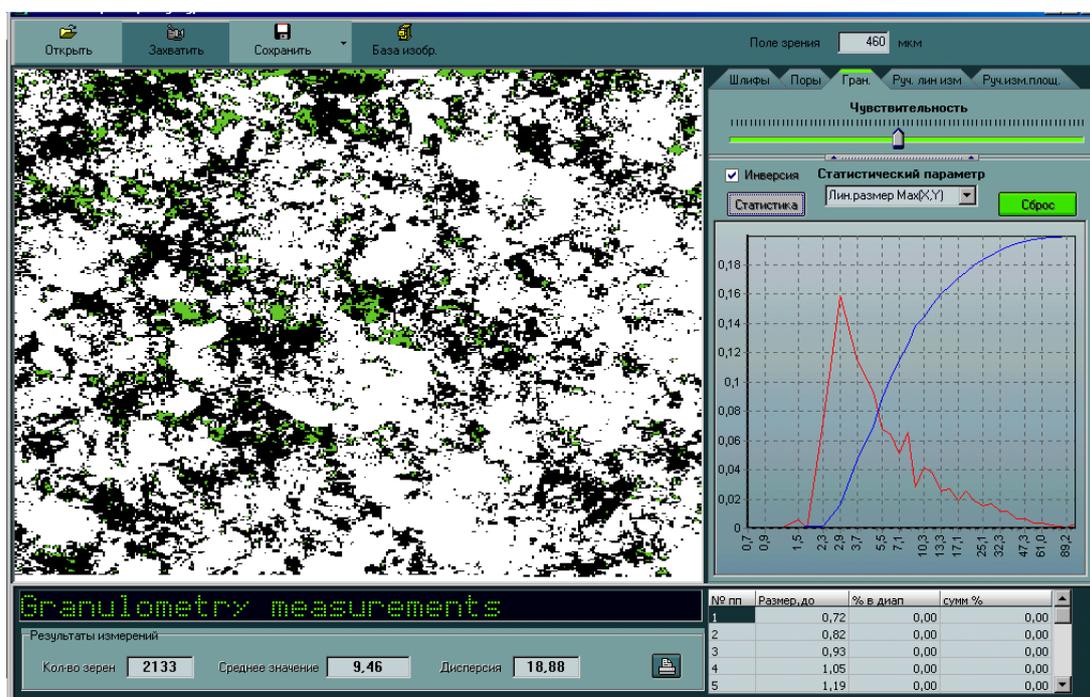
Состояние образца	Пористость, %	Средний размер агломератов, мкм	Количество агломератов в поле зрения 40×40 мкм	Дисперсия размеров агломератов, мкм ²
Контрольный	25	2,1	691	6,4
Обработанный	17	1,7	797	4,3
Изменение	-47%	-23,5%	+15%	-49%



а



б



в

Рис. 2. Микроструктура обработанного образца при увеличении '10000 (а), распределение агломератов по размерам (б) и размеры пор (в)

При построении компьютерных моделей в программной среде Comsol по техническим причинам, а также с учетом того, что в эксперименте получено количество контактных точек во всем поле зрения, а не только в зоне одного волокна, рассматривалась элементарная ячейка, в которой принято до обработки 16 точек контакта, а после обработки – 20, то есть увеличение составило 25%, что близко к усредненным

экспериментальным данным, указанным выше (28%).

На двумерной модели с использованием метода конечных элементов выполнены расчеты модуля сдвига и объемного модуля с учетом определенных по результатам экспериментов параметров матрицы (изменение пористости слоя и количества точек контактного взаимодействия). Результаты расчета приведены в табл. 2.

Эффективные модули для ПКМ с различным количеством дефектов в МФС при общем их объеме, равном 50%, в зависимости от отношения толщины h МФС к радиусу армирующего волокна r_0

Количество точек контакта в МФС	h / r_0					
	0,1		0,15		0,2	
	G^e , ГПа	K^e , ГПа	G^e , ГПа	K^e , ГПа	G^e , ГПа	K^e , ГПа
4	1,0173	2,2251	0,8921	2,1365	0,7709	2,0415
6	1,1162	2,1994	1,0107	2,0813	0,9034	1,9648
8	1,1667	2,2569	1,0572	2,1276	0,9478	2,0044

По результатам расчета установлено, что как модуль сдвига, так и объемный модуль обработанного образца превышают аналогичные параметры контрольного образца соответственно на (20-16,7)% и (20-14)% в зависимости от толщины МФС. При этом толщина МФС в меньшей степени влияет на увеличение модуля сдвига.

Видно, что дробление контактной зоны на более мелкие элементы увеличивает эффективный модуль сдвига G^e , и практически не изменяет эффективный объемный модуль K^e . Значение указанных параметров в основном определяется неоднородностью и относительной толщиной межфазного слоя (МФС) «волокно-матрица».

Уменьшение размеров и увеличение количества контактных элементов структуры приводит к росту модуля сдвига на (14,6-23)%, что свидетельствует о соответствующем увеличении прочности элементарной ячейки, а следовательно, всего материала, как их суммы.

Трехмерная модель элементарной ячейки (рис. 3) была построена в виде паралле-

лелепипеда, заполненного матрицей с размещенным в среднем сечении волокном. Отношение поперечного размера к продольному принято 1:5 и 1:50.

В качестве модели МФС приняты ребра прямоугольного сечения, соединяющие матрицу с волокном. Рассматривалась схема приложения сосредоточенной и распределенной по длине ячейки нагрузки.

Количество контактных точек в поперечном сечении МФС так же, как и в двумерной модели, принято равным для исходного и обработанного ПКМ соответственно 16 и 20. Результаты расчетов для ячейки 1:50 представлены в табл. 3 и 4. Визуализация полей напряжений, полученная в программной среде Comsol, для короткой (1:5) и длинной (1:50) ячеек представлена на рис. 4 и 5. Поля напряжений определялись в поперечных сечениях ячейки с шагом 0,5 мм, начиная от области опоры и до точки приложения поперечной нагружающей силы в среднем сечении.

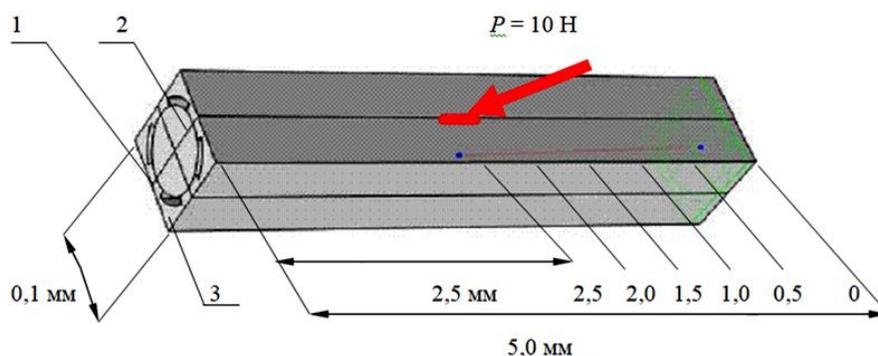


Рис. 3. Модельная элементарная ячейка ПКМ с соотношением размеров 1:50 (1 – межфазный слой, 2 – волокно, 3 – матрица)

Таблица 3

Изменение модуля Юнга в элементарной ячейке ПКМ после воздействия СВЧ электромагнитного поля

Элемент ПКМ	Модуль Юнга, ГПа		
	до обработки	после обработки	изменение параметра
Матрица	1,47	1,85	+25,8%
Волокно	230	230	0
МФС	1,7	1,83	+7,6%

Таблица 4

Изменение объемного интегрального напряжения Мизеса в элементарной ячейке ПКМ после воздействия СВЧ электромагнитного поля

Элемент ПКМ	Интеграл Мизеса, МПа		
	до обработки	после обработки	изменение параметра (%)
Матрица	152,9	190,6	1,246 (+24,6%)
Волокно	16914,0	16830,0	0,995 (-0,5%)
МФС	35,041	36,087	1,03 (+3%)

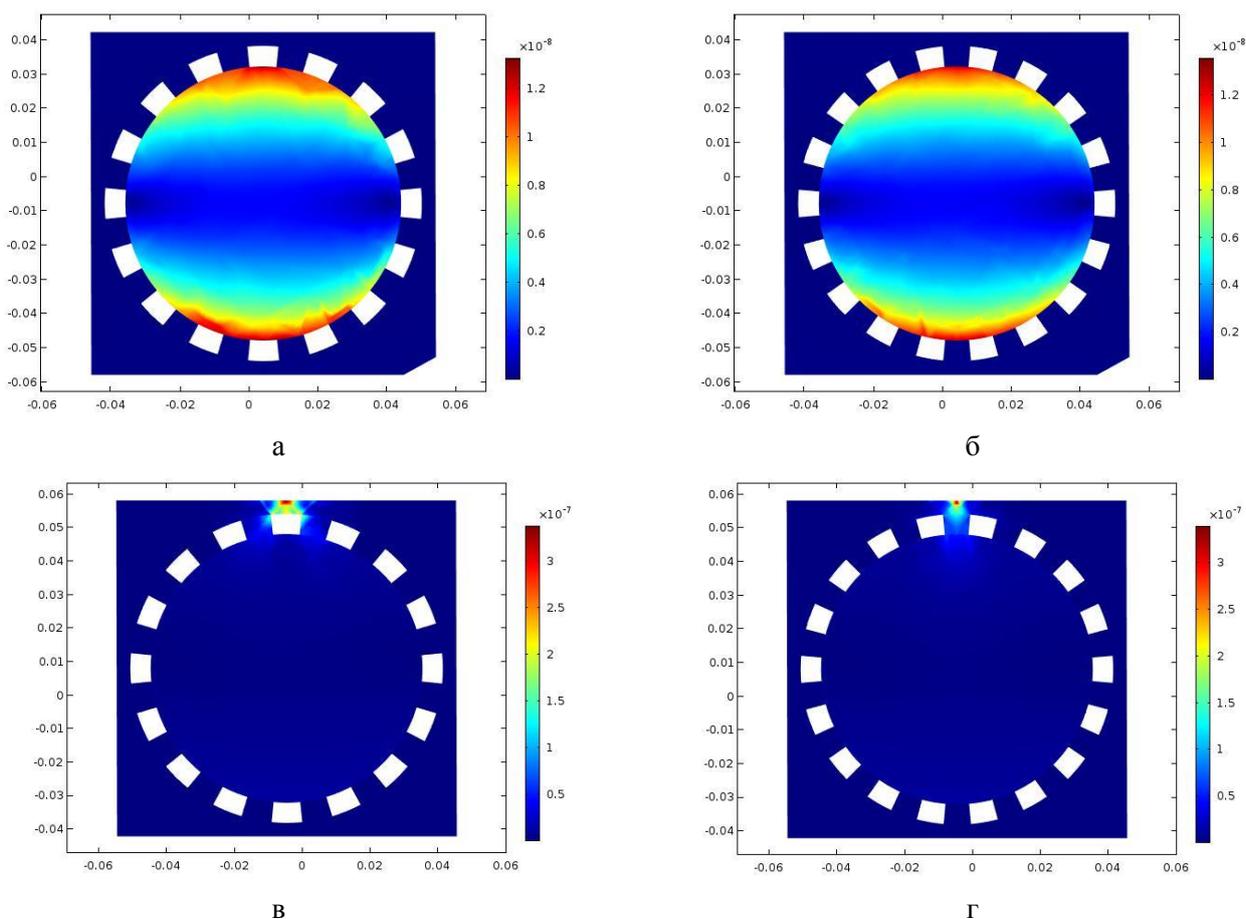


Рис. 4. Поля напряжений Мизеса в элементарной ячейке ПКМ длиной 0,5 мм в области опоры (а, б) и в области приложения сосредоточенной нагрузки (в, г) в зависимости от количества контактных точек в МФС: а и в – контрольный образец (16 точек контакта), г и б – обработанный в СВЧ электромагнитном поле образец (20 точек контакта)

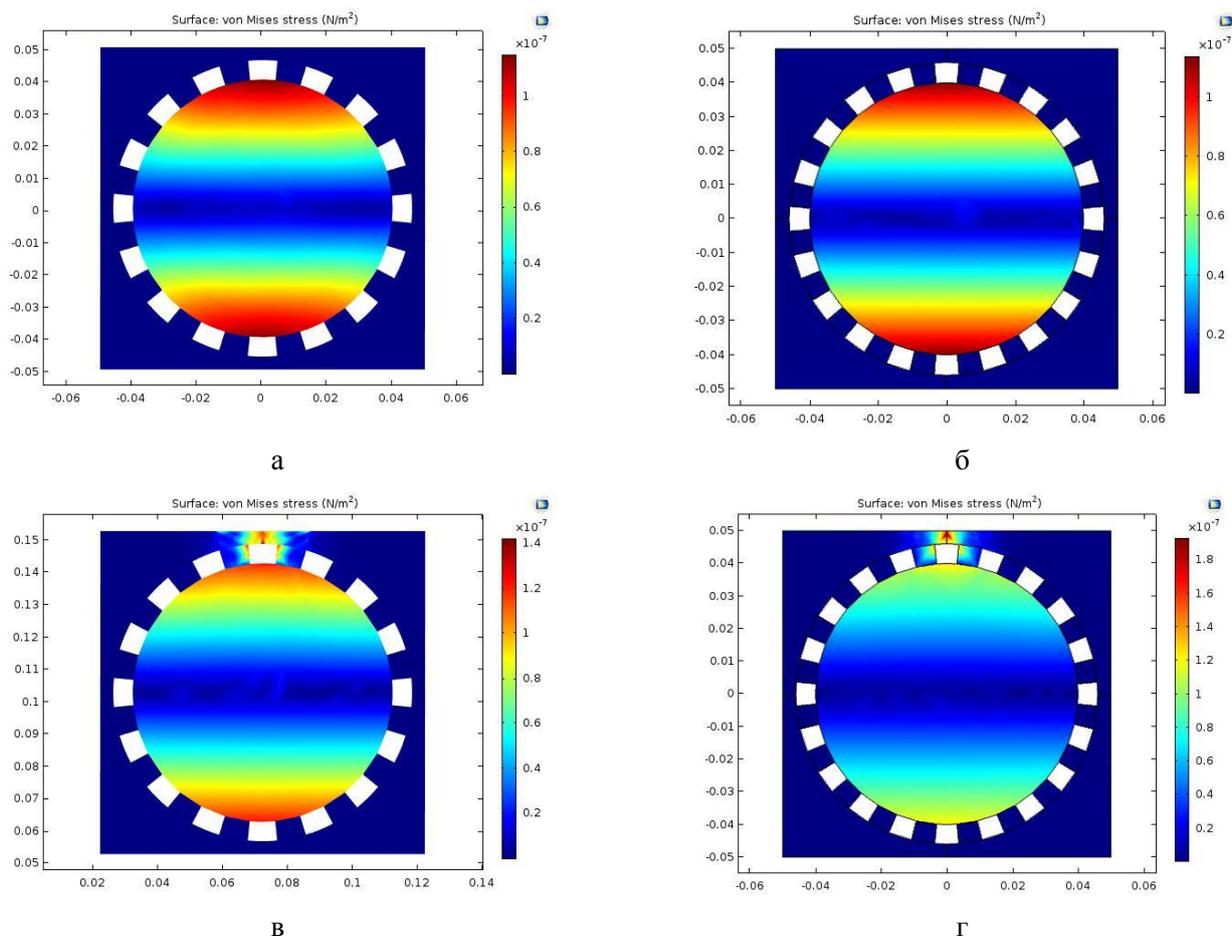


Рис. 5. Поля напряжений Мизеса в элементарной ячейке ПКМ длиной 5 мм в области опоры (а, б) и в области приложения сосредоточенной нагрузки (в, г) в зависимости от количества контактных точек в МФС: а и в – контрольный образец (16 точек контакта), г и д – обработанный в СВЧ электромагнитном поле образец (20 точек контакта)

Видно, что предельные напряжения Мизеса не только возрастают в ячейке с увеличенным числом точек контакта, но и меняются размеры их области. Так, для коротких ячеек (отношение поперечного размера к длине 1:5) увеличение предельных напряжений составило от 13,6 до 17%. При этом размер области максимальных напряжений составил для ячейки с 16 точками контакта (соответствует контрольному образцу) $4 \times 1,3$ мкм, а для ячейки с 20 точками контакта (соответствует обработанному образцу) – $1,8 \times 0,8$ мкм. Для длинных ячеек (отношение поперечного размера к длине 1:50) увеличение предельных напряжений составило 24,6%. Размеры области их возникновения уменьшились с 1×2 мкм до $1 \times 1,2$ мм.

Значения напряжений в волокне и межфазном слое практически не изменяются,

но существенно изменяются размеры области их возникновения. В волокне, имеющем 16 точек контакта с матрицей, протяженность области с минимальным значением напряжений составляет около 25 мкм, в волокне, имеющем 20 точек контакта, – 40 мкм.

Область максимальных напряжений составляет соответственно 8-10 и 1-2 мкм.

При этом расчетные по модели значения поперечных деформаций (прогиба) элементарных модельных ячеек составили (в условных единицах) для ячеек с 16 и 20 точками контакта длиной 5 мкм соответственно 135,8 и 134,68; длиной 0,5 мм – 3,6858 и 0,89741. При приложении распределенной нагрузки картина полей напряжений не изменилась, но отмечено увеличение их значений. Величина поперечных деформаций составила 342,24 и 339,4

(для ячеек длиной 5 мм). Таким образом, можно сделать вывод об определенном повышении изгибной деформационной жесткости ячеек, что вполне согласуется с расчетным ростом модуля упругости в случае увеличения числа контактных точек в МФС «матрица-волокно».

Полученные результаты удовлетворительно совпадают с экспериментальными установленными ранее значениями увеличения прочности отвержденных ПКМ после обработки в СВЧ электромагнитном поле по напряжениям изгиба на (11-16)%, напряжениям среза на (13-21)%, напряжениям межслоевого сдвига на (14-15)%. Следовательно, предложенная компьютерная модель изменения структуры отвержденного ПКМ под действием СВЧ электромагнитного поля на примере элементарной ячейки, заключающаяся в увеличении точек контактного (адгезионного) взаимодействия в поперечных сечениях прилегающего к армирующему волокну материала может быть принята за основу обоснования последующего физико-химического механизма структурирования отвержденных диэлектрических материалов в СВЧ электромагнитном поле.

Предварительно на основе проведенного анализа можно предложить следующий механизм влияния СВЧ электромагнитного

поля на отвержденные армированные углеродными волокнами ПКМ. Электромагнитные поля, особенно высокого и СВЧ диапазона, при воздействии на диэлектрические материалы вызывают поляризацию их молекул, образующих диполи, выстраивающиеся вдоль силовых линий. При этом колебания поля приводят к колебаниям диполей, которые, в свою очередь, через определенное число циклов могут разрываться с образованием отдельных фрагментов, кластеров, увеличивая таким образом площадь контактной поверхности. Таким образом, влияя на межкомпонентные связи, в том числе на уровне нанокластеров, возможно увеличить число контактных точек и активизировать взаимодействие матрицы и армирующих материалов, а также «залечить» микродефекты, образовавшиеся при отверждении композиции. Поэтому путем воздействия электромагнитных полей определенного диапазона на обрабатываемый материал возможно управлять свойствами готового материального объекта.

Исследования выполнены при поддержке гранта РФФИ № 17-03-00720 «Методология оптимизационного микроконструирования композиционных материалов для объектов сложной формы повышенной динамической прочности, послойно формируемых электротехнологическими методами».

ЛИТЕРАТУРА

1. **Каблов Е.Н.** Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» / Е.Н. Каблов // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. № 1 (34). С. 3-33.

2. **Каблов Е.Н.** Материалы и химические технологии для авиационной техники / Е.Н. Каблов // *Вестник Российской академии наук*. 2012. Т. 82. № 6. С. 520-530.

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

4. Экспериментальные исследования уровня неравномерности нагрева диэлек-

трических материалов и поглощенной мощности в СВЧ устройствах резонаторного типа / В.А. Коломейцев, Ю.А. Кузьмин, Д.Н. Никуйко, А.Э. Семенов // *Электромагнитные волны и электронные системы*. 2013. Т. 18. № 12. С. 25-31.

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

6. **Zlobina I.V.** The Influence of Microwave Electromagnetic Field on Mechanical Properties of Composite Materials / I.V. Zlobina, N.V. Bekrenev // *Научные исследования в области электротехнологии*. 2016. Т. 17. № 2. С. 25-30.

7. **Zlobina I.V.** The influence of electromagnetic field microwave on physical and mechanical characteristics of CFRP (carbon fiber reinforced polymer) structural / I.V. Zlobina, N.V. Bekrenev // *Solid State Phenomena*. 2016. Vol. 870. P. 101-106.

8. **Zlobina I.V.** Increasing of the endurance of polymeric construction materials with the multilevel hierarchical structure in the mi-

crowave electromagnetic field / I.V. Zlobina, N.V. Bekrenev, G.K. Muldasheva // *AIP Publishing*. 020236-1 – 020236-4.

9. **Злобина И.В.** Исследование микро-структуры конструкционных слоистых углепластиков, модифицированных путем электрофизических воздействий / И.В. Злобина, Н.В. Бекренев // *Вестник РГТУ*. 2017. № 1 (40). С. 236-242.

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

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

Бодягина Ксения Сергеевна – аспирант кафедры «Математика и моделирование» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

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

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

Ksenia S. Bodyagina – Postgraduate Department of Mathematics and Modeling, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 25.02.19, принята к опубликованию 15.03.19

УДК 574

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СОЕДИНЕНИЙ КРЕМНИЯ

Т.Н. Клеймёнова, О.В. Раецкая

UTILIZATION OF SILICON CONNECTIONS

T.N. Kleimenova, O.V. Raetskaya

Производится анализ сфер использования соединений кремния в полупроводниковой технике и как средства противопожарной защиты в авиации. Представленный материал можно использовать при изучении курсов «Химия», «Экология» и «Информатика» в военном вузе.

Ключевые слова: *кремний, электротехнические и конструкционные материалы, полупроводники, кремниевые оптические компоненты, космическая техника*

The article analyzes utilization of silicon compounds in the semiconductor technology and as a means of fire protection in aviation. The presented material can be used in the study of chemistry, ecology and informatics courses in military universities.

Keywords: *silicon, electrical and structural materials, semiconductors, silicon optical components, space technology*

Кремний – второй по распространенности (после кислорода) элемент земной коры. В верхних осадочных слоях он содержится в виде глин, кварца и других соединений и составляет 27,6% состава земной коры. В природе кремний в свободном виде не встречается: он состоит из смеси трех нуклидов с массовыми числами 28 (^{28}Si – преобладает, его в смеси 92,27% по массе), 29 (^{29}Si – 4,68%) и 30 (^{30}Si – 3,05%). Кремний образует темные блестящие кристаллы, имеющие кубическую гранецентрированную решётку типа алмаза. Плотность кремния составляет $2,33 \text{ г/см}^3$, что значительно меньше, чем у алмаза ($3,5 \text{ г/см}^3$). Кремний является хрупким материалом, его пластичность проявляется только при нагревании выше 800°C . Температура плавления – 1410°C , кипения – 2355°C . Кремний диамагнитен, атомная магнитная восприимчивость – $0,13 \times 10^{-6}$ [1].

В соединениях кремний четырехвалентен. Кремний наряду с координационным числом 4 проявляет координационное число 6. Химическая связь атома кремния с другими атомами осуществляется обычно за счёт гибридных sp^3 -орбиталей, но возможно также вовлечение двух из его пяти (вакантных) $3d$ -орбиталей. Обладая малой величиной электроотрицательности, равной 1,8, кремний в соединениях с неметаллами электроположителен. Эти соединения носят полярный характер.

При нормальных условиях кремний химически малоактивен и активно реагирует только с газообразным фтором, при этом образуется летучий тетрафторид кремния SiF_4 . С остальными галогенами – только при нагревании с образованием соединений общей формулы SiX_4 . Такая «неактивность» кремния связана с пассивацией поверхности наноразмерным слоем диоксида кремния, немедленно образующегося в присутствии кислорода, воздуха или воды (водяных паров).

При нагревании до температуры свыше $400\text{-}500^\circ\text{C}$ кремний реагирует с кислородом с образованием диоксида SiO_2 , процесс сопровождается увеличением толщины слоя диоксида на поверхности, скорость процес-

са окисления лимитируется диффузией атомарного кислорода сквозь плёнку диоксида. Большая энергия связи с кислородом Si-O, равная 464 кДж/моль обуславливает стойкость его кислородных соединений (SiO_2 и силикатов). Энергия связи Si-Si мала (176 кДж/моль). Для кремния не характерно образование длинных цепей и двойной связи между атомами Si. На воздухе кремний благодаря образованию защитной окисной плёнки устойчив даже при повышенных температурах.

В кислороде Si окисляется, начиная с 400°C , образуя кремния двуокись SiO_2 . Известна также моноокись SiO , устойчивая при высоких температурах в виде газа. В результате резкого охлаждения может быть получен твёрдый продукт, легко разлагающийся на тонкую смесь Si и SiO_2 . При нагревании до температуры свыше $400\text{-}500^\circ\text{C}$ кремний реагирует с хлором, бромом и иодом с образованием соответствующих легко летучих тетрагалогенидов SiHal_4 и, возможно, галогенидов более сложного состава.

С азотом кремний реагирует при температуре выше 1000°C . Важное практическое значение имеет нитрид Si_3N_4 , не окисляющийся на воздухе даже при 1200°C , стойкий по отношению к кислотам (кроме азотной) и щелочам, а также к расплавленным металлам и шлакам. Высокой твёрдостью, а также химической стойкостью отличаются соединения кремния с углеродом (SiC – карборунд) и с бором (SiB_3 , SiB_6). Карборунд широко используется как абразивный материал.

При нагревании кремний реагирует (в присутствии металлических катализаторов) с хлорорганическими соединениями.

При нагревании кремния с металлами возникают силициды. Кремний образует соединения почти со всеми металлами. Силициды можно подразделить на две группы:

- ионно-ковалентные (силициды щелочных, щелочноземельных металлов и магния типа Ca_2Si , Mg_2Si); силициды активных металлов разлагаются под действием кислот;

- металлоподобные (силициды переходных металлов).

Металлоподобные силициды имеют высокие температуры плавления (до 2000°C). Наиболее часто образуются металлоподобные силициды составов MSi , $M3Si2$, $M2Si3$, $M5Si3$ и $MSi2$. Металлоподобные силициды химически инертны, устойчивы к действию кислорода даже при высоких температурах и под действием кислот не разлагаются. Получено более 250 силицидов, состав которых обычно не отвечает классическим валентностям. Силициды отличаются тугоплавкостью и твёрдостью. Наибольшее практическое значение имеют ферросилициды (восстановитель при выплавке специальных сплавов) и силицид молибдена $MoSi2$ (нагреватели электродов, лопатки газовых турбин). Водород непосредственно не реагирует с кремнием. Кремневодороды (силаны) получают разложением силицидов.

Элементарный кремний – типичный полупроводник. Электрические свойства кремния очень сильно зависят от примесей. Собственное удельное объёмное электросопротивление кремния при комнатной температуре принимается равным $2,3 \times 10^3 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ($2,3 \times 10^3 \text{ Ом}\cdot\text{см}$).

Ширина запрещенной зоны при комнатной температуре 1,09 эВ. Концентрация носителей тока в кремнии с собственной проводимостью при комнатной температуре $1,5 \times 10^{16} \text{ м}^{-3}$.

На электрофизические свойства кристаллического кремния большое влияние оказывают содержащиеся в нем микропримеси. Для получения монокристаллов кремния с дырочной проводимостью в кремний вводят добавки элементов III-й группы – бора, алюминия, галлия и индия, с электронной проводимостью – добавки элементов V-й группы – фосфора, мышьяка или сурьмы. Полупроводниковый кремний с проводимостью p-типа (добавки B, Al, In или Ga) и n-типа (добавки P, Bi, As или Sb) имеет значительно меньшее сопротивление. Ширина запрещенной зоны по электрическим измерениям составляет 1,21 эВ при 0 К и снижается до 1,119 эВ при 300 К. Электрические свойства кремния можно варьировать, изменяя условия обработки монокристаллов,

обрабатывая поверхность кремния различными химическими агентами.

Основные отрасли промышленности, где применяется кремний – электроника и солнечная энергетика. В настоящее время более 70% стоимости производства кремниевых солнечных батарей приходится на исходный материал для изготовления фотоэлектрического преобразователя: моно- и поликристаллического кремния высокой чистоты. Поэтому для развития полупроводниковой техники и обеспечения рентабельности солнечной энергетике существенное значение приобретает снижение стоимости поликристаллического кремния высокой чистоты и улучшение его свойств. Таким образом, сферы использования соединений Si в полупроводниковой технике ограничены трудоёмкостью процессов очистки, требующих больших затрат. Для практического использования нужен кремний более высокой чистоты. В связи с развитием полупроводниковой техники разработаны методы получения чистого и особо чистого кремния. Это требует предварительного синтеза чистейших исходных соединений кремния, из которых кремний извлекают путём восстановления или термического разложения [2].

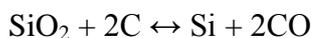
Чистый полупроводниковый кремний получают в двух видах:

- поликристаллический;
- монокристаллический (получают бестигельной зонной плавкой и «вытягиванием» монокристалла из расплавленного кремния-метод направленной кристаллизации Чохральского): при восстановлении SiO_2 кремнием при температурах свыше 1200°C образуется оксид кремния (II) – SiO .

Основными задачами при получении поликристаллического кремния являются увеличение выхода поликристаллического кремния высокой чистоты и уменьшение энергозатрат на единицу продукции, снижение себестоимости.

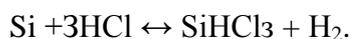
Наиболее распространенный способ получения поликристаллического кремния – это восстановление трихлорсилана $SiHCl_3$ водородом, так называемый «Сименс-процесс» [3].

Реакция восстановления кремния из кварцитов протекает при температуре 1800-2400°C в присутствии углерода (кокс, древесный уголь, нефтяной кокс) согласно уравнению:



с затратой теплоты 701,4 кДж/моль.

В результате примеси, находящиеся в восстановителе, переходят в кремний. Получение трихлорсилана SiHCl_3 производят из кремния, полученного карботермическим восстановлением в реакторах кипящего слоя. Общая формула, описывающая процесс:



Полученный трихлорсилан очищается путем ректификации в колоннах тарельчатого типа и далее поступает в испаритель для приготовления парогазовой смеси. Парогазовая смесь поступает в аппарат осаждения на кремниевые стержни, разогретые предварительно до температуры не менее 1173°K электрическим током либо плазмой (патент РФ № 2136590). Выход поликристаллического кремния по данному способу составляет 40%. Основными недостатками данного метода является:

- высокие энергозатраты на килограмм поликристаллического кремния: 250-360 кВт·ч/кг;
- высокая стоимость исходного сырья;
- необходимость возвращения в процесс большого количества непрореагировавшего тетрахлорсилана и трихлорсилана, а это является довольно сложной и затратной задачей;
- низкая скорость осаждения кремния;
- необходимость остановки реакторов для извлечения кремния;
- осаждение на стенках реактора восстановления полихлорсиланов и мелкодисперсных порошков кремния вследствие нагревания стенок реактора.

Известен способ получения поликристаллического кремния из отходов фосфорного производства (патент РФ № 2078034), основанный на термическом разложении кремнефторида щелочного или щелочнозе-

мельного металла с получением бесцветного ядовитого газа – тетрафторида кремния SiF_4 и перевода его в двуокись (кремнезём SiO_2), затем в моноокись SiO и восстановлении в водороде до кремния.

Недостатком этого метода является многостадийность процесса и невозможность организации непрерывности процесса, связанного с необходимостью охлаждения реактора, восстановление с последующей откачкой газов (водяной пар водород) и только затем выгрузкой кремния.

Очередной способ получения поликристаллического кремния, выбранный в качестве прототипа, включающий водородное восстановление кремния (патент РФ № 2122971). Способ осуществляется по замкнутому технологическому циклу и включает водородное восстановление кремния с получением газовой фазы из тетрахлорсилана SiCl_4 и трихлорсилана SiHCl_3 , что требует дополнительных операций отделения SiCl_4 и аппаратного разложения SiCl_4 до SiHCl_3 .

Таким образом, к недостаткам этого метода можно отнести:

- высокую стоимость сырья;
- низкий выход трихлорсилана, не более 40%;
- необходимость использования дополнительного оборудования;
- низкий выход поликристаллического кремния.

В 2007 г. предложен способ получения поликристаллического кремния, включающий водородное восстановление кремния, при котором получение кремния осуществляют путем хлорирования в солевом расплаве техногенных отходов, содержащих редкоземельные металлы, с выходом газовой фазы тетрахлорсилана, с последующей его очисткой и восстановлением в среде ионизированного водорода в плазмохимическом реакторе, при этом расплавленной средой служит электролит, содержащий смесь солей калия, натрия и магния [3].

При хлорировании техногенных отходов в солевом расплаве происходит замещение в оксиде кремния кислорода на хлор. Наличие в техногенных отходах редкоземельных металлов и железа приводит к увеличению

скорости реакции и увеличению производительности агрегатов хлорирования. Реакция является экзотермической и осуществляется за счет выделяемой при этом теплоты, чем и обусловлены небольшие энергозатраты при данном процессе. Полученная парогазовая смесь содержит тетрахлорсилан и хлориды редкоземельных металлов. Присутствие в расплаве солей магния в сочетании с солями калия и натрия приводит к ускорению реакции хлорирования, а значит и к повышению производительности. Очистка необходима для удаления твердых пылеобразных хлоридов, унесенных при хлорировании исходной шихты.

По данному способу из техногенных отходов, содержащих редкоземельные металлы, получаем сразу тетрахлорсилан, минуя стадию карботермического восстановления кремния с дальнейшим получением трихлорсилана. Реакция восстановления тетрахлорсилана осуществляется в плазмохимическом реакторе в среде ионизированного водорода, который обладает большой активностью, в результате этого реакционный барьер смещается, что приводит к увеличению скорости восстановления кремния и, в конечном результате, значительно увеличивает выход поликристаллического кремния.

В качестве сырьевой составляющей приняты ванадиевые шлаки, кеки производства твердосплавных и жаропрочных металлов, диатомиты – отходы газонефтехимии.

Разрабатываются более дешёвые, чистые и эффективные промышленные технологии очистки кремния. К таковым можно отнести:

- технологии очистки кремния с использованием фтора (вместо хлора);
- технологии, предусматривающие дистилляцию монооксида кремния;
- технологии, основанные на вытравливании примесей, концентрирующихся на межкристаллитных границах.

В России технический кремний производится «ОК Русал» на заводах в г. Каменск-Уральский (Свердловская область) и г. Шелехов (Иркутская область); доочищенный по хлоридной технологии кремний

производит группа «Nitol Solar» на заводе в г. Усолье-Сибирское.

Кремнийорганические полимеры – высокомолекулярные соединения, содержащие атомы кремния, углерода и других элементов в элементарном звене макромолекулы. В зависимости от химического строения основной цепи кремния полимеры делят на 3 основные группы:

– с неорганическими главными цепями макромолекул, которые состоят из чередующихся атомов кремния и других элементов (O, N, S, Al, Ti, B). Углерод входит лишь в состав групп, обрамляющих главную цепь;

– с органонеорганическими главными цепями макромолекул, которые состоят из чередующихся атомов кремния и углерода, а иногда и кислорода;

– с органическими главными цепями макромолекул. Наиболее подробно изучены и широко применяются полиорганосилоксаны, а также полиметаллоорганосилоксаны и полиорганосилазаны.

В зависимости от строения главной полимерной цепи кремний полимеры, подобно другим полимерам, можно разделить на линейные, разветвлённые, циклолинейные (лестничные) и сшитые (в том числе циклосетчатые).

Соединения кремния служат основой для производства керамики, стекла, цемента, фарфора, силикатного кирпича. Эти материалы составляют основу силикатной промышленности. Жидкое стекло служит для производства жаростойких бетонов, кислотоустойчивых материалов: цемент, замазки, бетон.

Кварц находит применение как пьезоэлектрик, как материал для изготовления жаропрочной химической (кварцевой) посуды (выдерживает высокую температуру и не трескается при резком охлаждении), ламп УФ-излучения.

На основе жидкого стекла изготавлиется грунтовка ВЖС-0235 ($\text{CaO}:\text{SiO}_2$, как 1:1), которая не содержит пожаровзрывоопасных и токсических веществ. Так же изготавливается водная силикатная краска «Силикат-0» и под эту краску грунтовка

«Силикат-1», которые переводят древесину в трудносгораемое состояние. Для металлов на основе жидкого стекла изготавливается огнезащитный состав «Породол», который обеспечивает огнестойкость в течение 2 часов [1].

Огнезащитные краски заводского производства выпускаются в двухтарной упаковке. Сухую смесь смешивают с температуростойким связующим (жидкое стекло со средней плотностью 1,3-1,4 г/см³ с кремний органической краской типа ВН-30) на месте производства работ. При этом краска, готовая к употреблению, сохраняет свою пригодность в течение 6-12 часов.

Огнестойкие краски на жидком стекле применяют для внутренних отделочных работ (огнезащитной покраски стен, потолков, огнезащитных занавесов в театрах, кинотеатрах и других зрелищных помещениях); для повышения огнестойкости деревянных конструкций из ДВП и ДСП. Органо-силикатные композиции можно использовать для покраски элементов экстерьера, металлических конструкций. Огнезащитные пасты и штукатурки тоже готовятся на основе жидкого стекла

Самая современная область применения кремния – космическая техника. Кремниевые фотоэлементы способны превращать световую энергию Солнца в электрическую. Такие солнечные батареи были установлены на искусственных спутниках Земли, луноходах, межпланетных станциях. Солнечная батарея — несколько объединённых фотоэлектрических преобразователей (фотоэлементов) — полупроводниковых устройств, прямо преобразующих солнечную энергию в постоянный электрический ток. В отличие от солнечных коллекторов производят нагрев материала-теплоносителя. Различные устройства, позволяющие преобразовывать солнечное излучение в тепловую и электрическую энергию, являются объектом исследования гелиоэнергетики (таблица). Производство фотоэлектрических элементов и солнечных коллекторов развивается в разных направлениях. Солнечные батареи бывают различного размера: от встраиваемых в микрокалькуляторы до занимающих крыши

автомобилей и зданий. 25 апреля 1954 года специалисты компании Bell Laboratories заявили о создании первых солнечных батарей на основе кремния для получения электрического тока. Солнечные батареи — один из основных способов получения электрической энергии на космических аппаратах. Они работают долгое время без расхода каких-либо материалов. Являются экологически безопасными в отличие от ядерных и радиоизотопных источников энергии. При полётах на большом удалении от Солнца (за орбитой Марса) их использование становится проблематичным, так как поток солнечной энергии обратно пропорционален квадрату расстояния от Солнца. При полётах к Венере и Меркурию мощность солнечных батарей значительно возрастает (в районе Венеры в два раза, в районе Меркурия в шесть раз). В 2014 году испанские учёные разработали фотоэлектрический элемент из кремния, способный преобразовывать в электричество инфракрасное излучение Солнца.

Перспективным направлением является создание фотоэлементов на основе наноантенн, работающих на непосредственном выпрямлении токов, наводимых в антенне малых размеров (порядка 200-300 нм) светом (то есть электромагнитным излучением с частотой порядка 500 ТГц). Наноантенны не требуют дорогого сырья для производства и имеют потенциальный КПД до 85% (см. таблицу).

Поскольку кремний прозрачен для лучей с длиной волны от 1 до 9 мкм, его применяют в инфракрасной оптике.

Кремниевые оптические компоненты применяются для решения различных задач в инфракрасном диапазоне длин волн (1,2-7 мкм), в том числе в ближней ИК-области спектра и в ИК-спектроскопии. Низкая плотность кремния идеально подходит для его использования в чувствительных к весу устройствах. Твёрдость кремния по Кнупу составляет 1150, что делает оптические компоненты из кремния более твердыми, менее ломкими альтернативами по сравнению с оптическими компонентами из германия.

Максимальные значения эффективности фотоэлементов и модулей, достигнутые в лабораторных условиях

Тип	Коэффициент фотоэлектрического преобразования, %
Кремниевые	
Si (кристаллический)	24,7
Si (поликристаллический)	20,3
Si (тонкопленочная передача)	16,6
Si (тонкопленочный субмодуль)	10,4
Аморфный/Нанокристаллический кремний	
Si (аморфный)	9,5
Si (нанокристаллический)	10,1
Фотохимические	
На базе органических красителей	10,4
На базе органических красителей (субмодуль)	7,9
Органические	
Органический полимер	5,15

Edmund Optics предлагает широкий спектр кремниевых оптических компонентов, в том числе оптических линз, оптических фильтров или окон. Оптические линзы из кремния идеально коллимируют и фокусируют монохроматический свет. Эти линзы доступны в диапазоне размеров и фокусных расстояний для широкого спектра областей применения. Наборы кремниевых линз также в наличии. Кремниевые светофильтры, которые используются в таких ИК технологиях, как ИК-Фурье-спектроскопия, применяются для передачи или блокирования определенного диапазона ИК волн. Кремниевые окна доступны без покрытия или с 3-5 мкм антибликовым покрытием [4].

Кремний является составной частью большого числа сплавов железа и цветных металлов. Обычно кремний придает сплавам повышенную устойчивость к коррозии, улучшает их литейные свойства и повышает механическую прочность. Однако при большем его содержании кремний может вызвать хрупкость.

Кремний используют в металлургии:

– для раскисления сталей (удаления растворенного в расплавленных металлах кислорода);

– для повышения коррозионной стойкости металлов;

– повышение механической прочности.

Наибольшее значение имеют железные (в виде сплава с железом – ферросилиция), медные и алюминиевые сплавы, содержащие кремний.

Специально легированный кремний широко применяется как материал для изготовления полупроводниковых приборов (транзисторы, термисторы, силовые выпрямители тока, управляемые диоды – тиристоры; солнечные фотоэлементы, используемые в космических кораблях) [5].

Электрические свойства кремния очень сильно зависят от примесей. Собственное удельное объемное электросопротивление кремния при комнатной температуре принимается равным $2,3 \cdot 10^3$ Ом·м ($2,3 \cdot 10^3$ Ом·см) [4].

В последние годы возрос интерес к синтезу материалов с новыми функциональными свойствами на основе наноструктур карбида кремния, которые могут работать в самых жестких условиях эксплуатации. Это является актуальным для военного и космического применения. Карбид кремния является одним из наиболее перспек-

тивных материалов для высокотемпературной, мощной, высокочастотной и радиационноустойчивой электроники. Карбид кремния обладает высокой подвижностью электронов, плотностью тока до $5 \cdot 10 \text{ А/см}^2$, механической прочностью, устойчивостью к температурам более 400°C , химическим и радиационным воздействиям – до 10^{16} нейтронов/см². Всё это с суммированием с большой шириной запрещённой зоны и теплопроводностью (3-5 Вт/см·К) обуславливает тот факт, что потенциальные параметры приборов на основе карбида кремния значительно превышают параметры приборов на традиционных материалах [4]. Полупроводниковые приборы на основе карбида кремния позволяют уменьшить габариты и массу преобразовательного оборудования, упростить систему охлаждения и повысить надёжность. Это является важным для военного применения. В кремниевом выпрямителе достигаются более высокие обратные напряжения и рабочая температура ($130\text{-}180^\circ\text{C}$), чем в германиевых выпрямителях (80°C).

Кремний используется в полупроводниковых преобразователях – электротехнических устройствах, преобразующих электроэнергию одних параметров или показателей качества в электроэнергию с другими значениями параметров или показателей качества (параметрами электрической энергии могут являться род тока и напряжения, их частота, число фаз, фаза напряжения).

Примером таких устройств являются терморезистивные датчики (термосопротивления) на основе полупроводников – термисторы. Принцип терморезистивного преобразования основан на температурной зависимости активного сопротивления полупроводников, обладающих высокой воспроизводимостью и достаточной стабильностью по отношению к дестабилизирующим факторам. Термисторы обладают свойством изменять свое электрическое сопротивление при изменении температуры.

Температурный коэффициент сопротивления термистора примерно в 6-10 раз больше, чем у металлических терморезисторов. Некоторые типы термисторов работают

в диапазоне температур от -100 до $+500^\circ\text{C}$ и выше. Термисторы находят широкое применение для компенсации температурных погрешностей в измерительных схемах, и в качестве датчиков для измерения различных неэлектрических величин, влияющих на отвод теплоты от терморезистора. Благодаря высокой чувствительности, простоте создания интерфейсных схем и долговременной стабильности термисторов, их используют в качестве датчиков противопожарной системы воздушных судов [4].

Для создания чипов с более высокой производительностью и меньшим энергопотреблением разработан метод, позволяющий формировать в слое кремния проводники шириной 30 нм с высочайшим механическим напряжением 7,6 ГПа вдоль оси. Такие наноструктуры способны существенно улучшить характеристики микросхем за счёт снижения паразитных ёмкостей и токов утечки. До сих пор основной прогресс в вычислительной технике был связан с уменьшением размеров самих микротранзисторов. При этом с каждым новым поколением способы повышения тактовой частоты микросхем и снижения тепловых потерь энергии становились всё более изощрёнными. Преодоление рубежа в 50 нм потребовало качественной модификации – затворы полевых транзисторов в CMOS-микросхемах, выполняемых по технологическим нормам 45 нм и менее, стали изготавливаться с применением гафния и тантала. Группой учёных была предпринята попытка сократить тепловые потери на участках соединений между микротранзисторами путём улучшения полупроводниковых свойств самого материала. На первом этапе используется кремниевая подложка, уже находящаяся в состоянии небольшого механического напряжения. Затем с помощью выборочного травления и серии точно подобранных механических воздействий формируется кремниевый мостик – наноразмерный полупроводник, участки наибольшего напряжения в котором приходятся на самый узкий участок. Растяжение кремния в мостиках повышает мобильность электронов на этом участке, а

микротранзисторы могут переключаться быстрее. В самой процедуре растяжения кремния нет чего-то удивительного – достаточно приложить адекватное усилие в нужном направлении. Магия начинается с того момента, когда из растянутой на 4,5% от первоначального размера кремниевой пластины изготавливают микросхему, препятствуя обратному сжатию. Метод получился хорошо совместимым с существующими промышленными технологиями. Несмотря на своеобразие подхода, его внедрение не потребует существенных модификаций этапов производства.

В настоящее время в области практического использования никакой полупроводниковый материал не может конкурировать с кремнием по степени изученности характеристик и особенно по степени разработанности и освоенности технологии изготовления. Поскольку кремний имеет достаточно широкую зону проводимости и, кроме того, интенсивное окисление поверхности кремния происходит при температурах, больших 1000 К, то на его основе могут создаваться высокотемпературные термодатчики. На основе монокристаллического кремния можно изготавливать термодатчики как с положительным, так и с отрицательным значением ТКС в области средних температур.

Отрицательное значение ТКС получают при легировании кремния такими примесями, как золото и железо, которые создают в запрещенной зоне «глубокие» уровни.

На основе кремния, легированного золотом, разработан термодатчик с отрицательным ТКС для измерения температуры поверхности с рабочим диапазоном (273...330) К. Температурный коэффициент такого термодатчика изменяется от $-8\% / \text{К}$ при 273 К до $-(2...3)\% / \text{К}$ при 330 К.

Малый рабочий диапазон таких термодатчиков объясняется тем, что с ростом температуры ТКС уменьшается пропорционально величине $1/T^2$. Поскольку значение номинального сопротивления (R_n) термодатчика зависит от размеров чувствительного элемента, а при разделении пластины кремния на отдельные чувствительные элементы

невозможно добиться их полной идентичности, то разброс значений R_n в партии составляет ~20%. Кроме того, наблюдается разброс значений ТКС в пределах 5%, обусловленный различной степенью легирования кремния в процессе производства. Большое значение показателя тепловой инерции разработанного термодатчика ограничивает его использование в динамике. Расширить измеряемый температурный диапазон можно, если включить параллельно кремниевому терморезистору пассивный резистор (независящий от температуры) при питании схемы постоянным током или последовательно при питании схемы от источника постоянного напряжения. В НПО Измерительной техники г. Королева разработан кремниевый датчик ТЭ-260, работающий при температурах от 223 до 523 К.

Положительным значением температурного коэффициента удельного сопротивления в широком диапазоне температур обладает кремний, легированный примесями с малой энергией активации. Область собственной проводимости кремния с концентрацией носителей тока $p, n \approx 2 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$ начинается при температурах $T > 450 \text{ К}$, а кремния с $p, n \approx 2 \cdot 10^{23} \text{ м}^{-3}$ – при $T > 600 \text{ К}$. При меньших температурах и соответствующей концентрации носителей тока [6]. На базе кремниевых чувствительных элементов с положительным ТКС разработано и выпускается серийно большое количество термодатчиков различного назначения. Чувствительные элементы этих приборов однотипны и представляют собой кристаллы кремния *n*-типа проводимости, изготовленные в виде брусков или кубиков. Размеры чувствительных элементов могут несколько варьироваться для получения требуемого сопротивления.

Конечные стадии технологического процесса изготовления термодатчиков отличаются у различных фирм и зависят от предпочтительной конфигурации прибора. Общими операциями являются припаивание выводов к контактным поверхностям и герметизация чувствительных элементов смолой или стеклом. В некоторых конструкциях кремниевых датчиков брусок или пластину

снабжают механическими контактами, положение которых фиксируют частично расплавленной стеклянной трубкой или заливкой смолой. Луженые медные выводы присоединяют к торцевым металлическим контактам. Рабочий диапазон датчиков с чувствительными элементами на основе кремния n-типа чаще всего составляет интервал от 223 до 423 К. При помещении кремниевых чувствительных элементов в герметичный стеклянный корпус некоторым фирмам удается увеличить верхний диапазон рабочих температур до 570 К.

Таким образом, на основе чувствительных элементов, изготовленных из монокристаллического кремния, разработаны и выпускаются серийно термодатчики с широким набором номинальных сопротивлений R_n , работающих в диапазоне температур несколько сотен Кельвина. Для датчиков этого типа характерны такие недостатки, как значительный разброс номинальных сопротивлений (5...10)%, вызванный разбросом удельного сопротивления и размеров кристалла кремния. Уменьшение разброса значений R_n до (1...2)% достигается лишь разбраковкой чувствительных элементов; разброс значений ТКС, обусловленный разбросом степени легирования кремния. Уменьшение раз-

броса значений ТКС ограничено возможностями современной технологии: достаточно большое значение показателя термической инерции из-за необходимости размещения полупроводниковых чувствительных элементов в корпусах для их защиты от окружающей среды и обеспечения электрической изоляции от объекта.

Кроме того, процесс сборки термодатчиков такого типа трудно поддается автоматизации и, как правило, осуществляется с использованием большой доли ручного труда.

Несомненно, полупроводники стали неотъемлемой частью современной электроники. 80% всех электронных компонентов содержат полупроводники. Кремний стал незаменимым химическим элементом благодаря своей распространенности. А современные технологии позволяют добывать и очищать кремний с минимальными затратами, из-за чего он стал еще и очень дешев в производстве. Ни одно современное производство не обходится без микропроцессорных систем управления, без компьютеров и электроники в целом. Увидев всю важность этого химического элемента, можно без преувеличения сказать, что кремний жизненно необходим для современного развивающегося мира.

ЛИТЕРАТУРА

1. Большая Советская энциклопедия: в 30 т. / гл. ред. А.М. Прохоров; 3-е изд., М.: Советская энциклопедия, 1973. С. 379-380.

2. **Иванов А.В.** Силовая электроника. Выпрямители / А.В. Иванов, А.Е. Немировский. Вологда: Вологод. гос. ун-т, 2015. 119 с.

3. **Рейви К.** Дефекты и примеси в полупроводниковом кремнии / К. Рейви. М.: Мир, 2014. 475 с.

4. Электротехнические и конструкционные материалы / В.Н. Бородулин. М.: Мастерство; Высш. шк., 2011. С. 197-200.

5. Плазменная технология получения кремния для солнечной энергетики / Р.Г. Шарафутдинов и др. // Кремний-2006,

III Российское совещание по росту кристаллов и пленок кремния и исследованию их физических свойств и структурного совершенства. Красноярск, 2006. С. 124.

6. **Козьмина В.О.** Перспективный метод формирования тонких плёнок карбида кремния для полупроводниковых приборов радиоэлектронного оборудования / В.О. Козьмина, Н.Е. Лыхин, С.А. Солдатенко // Современное состояние, актуальные проблемы и перспективные направления развития авиационного радиоэлектронного оборудования: сб. науч. ст. по материалам III Всерос. науч.-практ. конф. «Академические Жуковские чтения». Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА», 2016. С. 171-174.

Клеймёнова Татьяна Николаевна – кандидат сельскохозяйственных наук, старший преподаватель 12 кафедры математики и естественно-научных дисциплин филиала федерального государственного казенного военного образовательного учреждения высшего образования Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» в г. Сызрани

Раецкая Ольга Вилоровна – кандидат педагогических наук, преподаватель 12 кафедры математики и естественно-научных дисциплин филиала федерального государственного казенного военного образовательного учреждения высшего образования Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» в г. Сызрани

Tatyana N. Kleymenova – PhD, Lecturer at the Department of Mathematics and Science, branch of the Russian Air Force Military Educational and Scientific Center “Air Force Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin” (Voronezh)

Olga V. Raetskaya – PhD, Lecturer at the Department of Mathematics and Science, branch of the Russian Air Force Military Educational and Scientific Center “Air Force Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin” (Voronezh)

Статья поступила в редакцию 03.03.19, принята к опубликованию 15.03.19



СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

681.518.25

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДУГОВЫМ ПЕРЕПЛАВОМ

Д.А. Давыдов, А.В. Попов

USING INTELLIGENT SYSTEMS TO CONTROL THE ARC REMELT PROCESSES

D.A. Davidov, A.V. Popov

Рассмотрены вопросы применения в системах интеллектуального управления установками дугового переплава, алгоритмов ГОСТ Р 52633.5. Определены основные принципы применения ИСУ, предложена методика увеличения каналов получения объективной информации состояния ДСП. Предложены варианты оптимизации процесса дугового переплава стали.

Ключевые слова: интеллектуальные системы, управление, дуговой переплав

Процесс дугового переплава является крайне энергоемким, и его оптимизация по-прежнему остается актуальной задачей. Так, даже при применении в качестве сырья лома расход электроэнергии на переплав 1 т расплава составляет до 1400 кВт·ч/т для среднетоннажных печей (при разогреве холодной печи). Для печей малого тоннажа эта цифра еще выше, а при переплаве породы (окатышей) расход вплотную приближается к 2000 кВт·ч/т. Даже с учетом доступной на сегодня оптимизации для самых эффективных печей расход электроэнергии находится на отметке 640-680 кВт·ч/т.

Так что экономия даже нескольких процентов за счет оптимизации управления приводит к существенной экономии в целом.

Целью настоящей работы является рассмотрение возможных путей оптимизации систем управления установками дугового

The article considers the issues relating application of arc remelting algorithms GOST R 52633.5 in intelligent control systems. The basic principles of application of intelligent control systems have been defined, and a method for increasing the channels of obtaining unbiased information relating the state of arc melting has been proposed. The variants needed for optimization of arc remelting processes of steel are suggested.

Keywords: intelligent, systems, control, arc, remelting

переплава и применения для этого алгоритмов, описанных в ГОСТ Р 52633.5. Кроме того, предложены варианты использования современных приборов для получения объективной информации о состоянии расплава, печи и исполнительных механизмов.

С появлением АСУ ДСП, а затем с внедрением PLC и ЭВМ точность управления существенно выросла. Появилась возможность управлять быстродействующей автоматикой подъема электродов с дифференциальным приводом, оперативно менять параметры работы установки. Однако все эти системы имеют один существенный недостаток. Они реагируют на событие, которое уже произошло. Соответственно, сколь бы быстрой не была автоматика, её действие всегда запаздывает, и с использованием традиционных АСУ избежать этого не представляется возможным.

Совсем на иных принципах работают интеллектуальные системы управления (ИСУ). Основная идея заключается в том, что, располагая достаточной базой данных об уже прошедших плавках и получая дополнительную информацию о состоянии печи, расплава, шихты, электродов и т.п., ИСУ формирует динамический «образ» плавки и соответственно может сделать прогноз развития процессов в печи. Подобные системы успешно применяются в системах нейросетевой биометрии. Основой нейросетевых алгоритмов является работа с нечетким набором данных, так называемый «нечеткий экстрактор». Как правило, «сырые» данные являются «плохими». Коэффициент ошибок составляет до 20%, однако получение избыточного количества данных и последующая коррекция ошибок позволяет получить обогащенный экстрактор, фактически являющийся образом состояния.

На рис. 1 приведена схема получения нечеткого экстрактора.

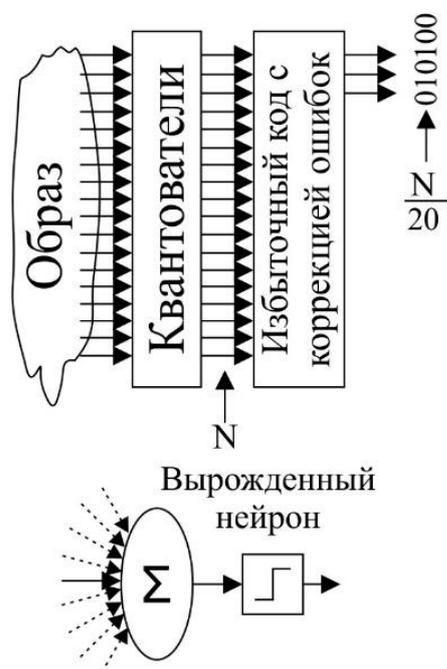


Рис. 1. Схема получения нечеткого экстрактора

В системах биометрии количество избыточной информации порой в 20 раз превышает количество анализируемых параметров, но этот метод позволяет с очень

высокой точностью подтверждать соответствие образа эталонному.

В настоящее время разработан ГОСТ Р 52633.5, применение алгоритма которого в сумматорах нейронов позволит четко давать прогноз поведения системы. Согласно алгоритму ГОСТ Р 52633.5, рекомендовано к использованию 256 нейронов.

После того как сумматоры нейронов обучены по алгоритму ГОСТ Р 52633.5, выходные квантователи нейронов будут давать стабильный выходной код для примеров образа, не участвовавших в обучении. Обработка нечетких экстракторов, неполных данных дает полноценные нейроны, сумма которых обрабатывается нейросетевым преобразователем (рис. 2).

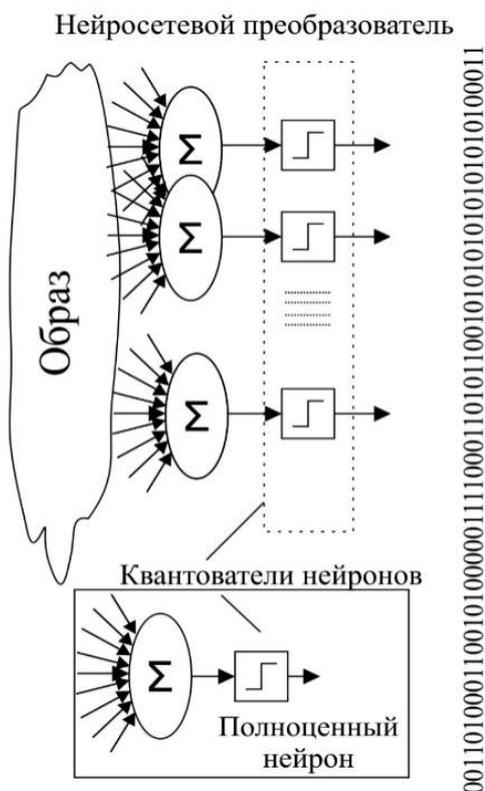


Рис. 2. Схема обработки нейросетевым преобразователем нечетких экстракторов

После окончания обучения нейронной сети по алгоритму ГОСТ Р 52633.5 каждый её нейрон может быть представлен двумя таблицами (таблицей связей и таблицей весовых коэффициентов).

Представление нейрона двумя таблицами схематично изображено на рис. 3.

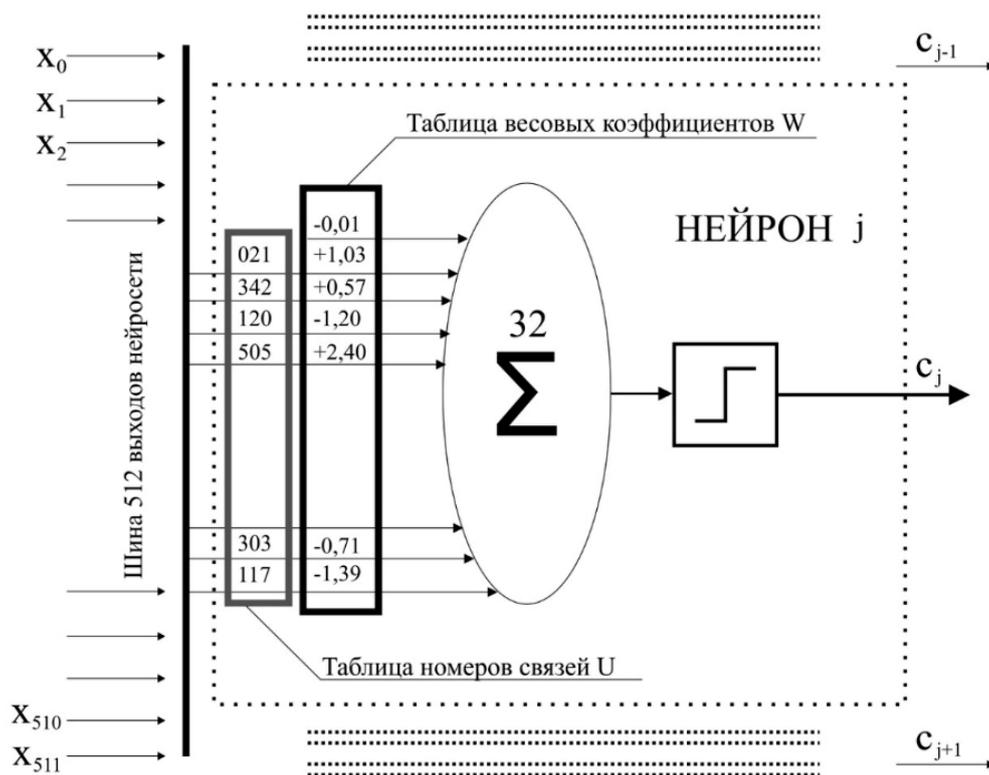


Рис. 3. Схема представления нейрона двумя таблицами

Применяя в качестве исходных данных «кадр состояния установки», за счет избыточности и основываясь на накопленной базе данных, возможно получение прогнозируемого состояния ДСП. Для получения избыточных прямых и косвенных данных требуется установка дополнительных датчиков, что и позволяет превентивно реагировать на процессы, происходящие в ДСП. К нежелательным процессам, требующим превентивного действия, относится, например, завал колодца, образованного при проплавлении шихты. Применение ИСУ даже в условиях конечной скорости привода движения электродов позволит сократить или полностью исключить процесс гашения технологического КЗ и повторного розжига дуги. Это положительно скажется как на экономике плавки, так и на электрических режимах электродов, исключаются перекосы фаз, паразитное движение электродов.

Кроме того, возможно существенно поднять чувствительность применяемых в ДСП датчиков, сократить гистерезис системы в целом, так как, например, применение ло-

кальных статических систем контроля движения электрода при его опускании работает по нижней по току границе чувствительности, а при поднимании – по верхней, что в итоге приводит к накоплению ошибки слежения. Ошибка слежения однозначно связана с шириной зоны нечувствительности регулятора и может быть скорректирована уставками дозатора электроэнергии, которые подбираются эмпирически. В случае применения интеллектуальной системы управления, этот параметр тоже может стать динамическим и оптимальным.

Что касается движения электродов, следует отметить, что в настоящее время в применяемых конструкциях приводов электродов скорость их движения ограничена механической прочностью конструкции и составляет порядка 5-7 м/мин, а ввиду довольно большой массы конструкции следует говорить о значительном выбеге. Применение прогнозных методов управления позволяет сократить влияние этих параметров и приблизить качество АСУ ТП ДСП к идеальному.

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ Р 52633.5-2011. Защита информации. Техника защиты информации. Автоматическое обучение нейросетевых преобразователей. М.: Стандартинформ, 2012. 16 с.

2. **Малафеев С.И.** Основы автоматики и системы автоматического управления / С.И. Малафеев, А.А. Малафеева. М.: ИЦ «Академия», 2010. 384 с.

3. **Лейбов Р.Л.** Прикладные методы теории управления / Р.Л. Лейбов. М.: АСВ, 2014. 192 с.

4. **Вдовин В.М.** Теория систем и системный анализ / В.М. Вдовин, Л.Е. Сурко-

ва, В.А. Валентинов. М.: ИТК «Дашков и К°», 2010. 640 с.

5. **Миронов Ю.М.** Электротехника электрометаллургических печей дугового, резистивного и смешанного нагрева: монография / Ю.М. Миронов. М.: ИНФРА-М, 2018. 334 с.

6. **Иванов А.И.** Нейросетевая биометрия для облаков. Российские стандарты для защиты цифровых прав граждан / А.И. Иванов // Системы безопасности. 2018. № 3. С. 134-139.

Давыдов Дмитрий Алексеевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение и электротехнология» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Попов Алексей Владимирович – студент кафедры «Электроснабжение и электротехнология» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Dmitriy A. Davidov – PhD, Associate Professor Department of Power Supply and Electrotechnics, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Aleksey V. Popov – Postgraduate, Department of Power Supply and Electrotechnologies, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 22.02.19, принята к опубликованию 15.03.19



**Всероссийская молодежная
научная конференция
«Наукоемкие проекты и технологии в машино-
и приборостроении, медицине»**

**All-Russian Conference of Young Scientists
«High Tech Projects and Technologies in Mechanical
Engineering, Instrumentation and Medicine»**

3-5 декабря 2018 года в Саратовском государственном техническом университете имени Гагарина Ю.А. при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта 18-38-100061 состоялась Всероссийская молодежная научная конференция «Наукоемкие проекты и технологии в машино- и приборостроении, медицине».

В конференции приняли участие 220 человек (из них 143 молодых ученых) из учебных заведений и научных организаций Москвы и Московской области, Санкт-

Петербурга и Ленинградской области, Саратова и Саратовской области, Смоленска, Уфы, Заречного, Владимира, Тольятти, Нижнего Новгорода, Магнитогорска, Обнинска, Чебоксар, Курска, Ярославля, Томска, Рыбинска, Пензы, Нальчика, Вологды и других городов РФ, а также Украины, Узбекистана, Белоруссии и Египта.

Из 157 присланных статей были особо отмечены и выбраны три для размещения в журнале «Вопросы электротехнологии».

УДК 669.14:539.375:621.7.019

**ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИОННОГО
И СТРУКТУРНО-МЕХАНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СТАЛИ 16XCH
В ПРОЦЕССЕ ВЫСАДКИ ВИНТОВ С ПОТАЙНОЙ ГОЛОВКОЙ
И КРЕСТООБРАЗНЫМ ШЛИЦЕМ**

В.В. Галкин, Г.Н. Гаврилов, А.В. Братухин, А.А. Дербенев

**INVESTIGATING THE DEFORMATION
AND STRUCTURAL-MECHANICAL CONDITION OF THE 16XCH STEEL
IN THE PROCESS OF HEADING THE SCREWS WITH A COUNTERSUNK
HEAD AND CROSS-SHAPED SLOT**

V.V. Galkin, G.N. Gavrilov, A.V. Bratukhin, A.A. Derbenev

Выполнено исследование деформационного и структурно-механического состояния стали 16XCH в процессе холодной высадки

Deformation and structural-mechanical state of the steel 16XCH was investigated in the process of cold heading the screws with a

винтов с потайной головкой и крестообразным шлицем. Использована комплексная методика, включающая деформационный анализ методом математического моделирования (DEFORM-3D), микроструктурный анализ и замеры микротвердости в продольных сечениях операционных заготовок. В ходе исследования в объеме головки винтов определены зоны, отличающиеся величиной деформационного упрочнения. Максимальное упрочнение 1115-805 МПа при степени деформации 3.0-2,64 соответствует контактной поверхности толщиной ~ 0,1 мм, переходящей в примыкающую к шлицу зону толщиной ~0,6 мм и имеющую упрочнение 805-705 МПа при степени деформации 2,64-1,32. В остальной части головки упрочнение значительно снижается. Неравномерность деформационного упрочнения подтвердилась структурными изменениями, характеризующимися наибольшим сжатием зерен по контактной поверхности, которое значительно уменьшается в радиальном направлении к боковой поверхности головки и в осевом направлении от основания шлицевого паза. По результатам исследования построена обобщенная кривая упрочнения стали 16XCH, на основании которой дана оценка величины касательных напряжений, возникающих от силы трения на контактной поверхности.

Ключевые слова: деформационное упрочнение, легированная конструкционная сталь, высадка винтов с потайной головкой и крестообразным шлицем, контактная поверхность пуансона с материалом, замеры микротвердости, структурные изменения, обобщенные кривые упрочнения

Данное исследование является продолжением ранее выполненной работы, в которой был проведен деформационный анализ стали в процессе высадки винтов с потайной головкой (в дальнейшем по тексту – винтов) и крестообразным шлицем (в дальнейшем по тексту – шлицем) (ГОСТ 10753-86) методом математического моделирования [1]. Процессы холодной высадки характеризуются многооперационностью и большими деформациями.

countersunk head and cross-shaped slot. A comprehensive method including the deformation analysis method of mathematical simulation (DEFORM-3D), the micro-structural analysis and micro-hardness measurements in the longitudinal sections of the operating pieces was used. During this study, the zones differing in the amount of deformation hardening were determined in the volume of the screw head. The maximum hardening 1115÷805 MPa at the deformation degree of 3.0÷2.64 corresponds to the contact surface with the thickness at ~0.1 mm, passing into the adjacent to the slot zone with the thickness at ~0.6 mm and having a hardening of 805÷705 MPa at the deformation degree of 2.64÷1.32. In the rest of the head, the hardening is significantly reduced. The unevenness of the deformation hardening was confirmed by the structural changes, characterized by the greatest compression of grains over the contact surface, which significantly reduces in the radial direction toward the side surface of the head, and in the axial direction from the base of the slot groove. Based on the results of this study, a generalized curve of hardening the 16XCH steel was constructed, which allows for estimating the value of shear stresses arising from the friction force over the contact surface.

Keywords: deformation hardening, alloy structural steel, heading of screws with a countersunk head and cross-shaped slot, contact surface of the punch with the material, micro-hardness measurements, structural changes, generalized hardening curves

Технологический инструмент при высадке винтов из конструкционных легированных сталей имеет низкую стойкость формообразующего профиля пуансона (в дальнейшем по тексту – пуансона), то есть потерю его геометрии. Для определения причин низкой стойкости необходима оценка силового воздействия материала на пуансон в процессе выдавливания шлица, которая подразумевает исследование величины и распределения напряжений в объеме выса-

живаемой головки, в том числе на поверхности контакта инструмента с материалом заготовки (в дальнейшем по тексту – контактной поверхности). Решение обозначенной проблемы с учетом деформационного упрочнения материалов возможно по двум направлениям. Первое направление включает применение программных комплексов с использованием экспериментальных обобщенных кривых упрочнения деформируемых материалов в координатах «интенсивность напряжений – степень деформации». Для конструкционных легированных сталей указанные зависимости в справочной литературе не приведены [2]. По второму направлению проводятся структурно-

механические исследования совместно с деформационным анализом. Аналитический обзор указал на их отсутствие для конструкционных легированных сталей, что свидетельствует о актуальности проведения таких исследований, которые явились целью данной работы. В качестве материала исследования выбрана легированная конструкционная сталь 16ХСН, широко применяемая для крепежных изделий. Ее химический состав приведен в табл. 1.

В качестве объекта исследования выбраны переходы высадки винта М5 с потайной головкой и крестообразным шлицем (рис. 1).

Таблица 1

Химический состав стали 16ХСН ГОСТ 5632-2014

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Cu
0,13-0,2	0,6-0,9	0,3-0,6	0,6-0,9	до 0,035	до 0,035	0,8-1,1	до 0,2

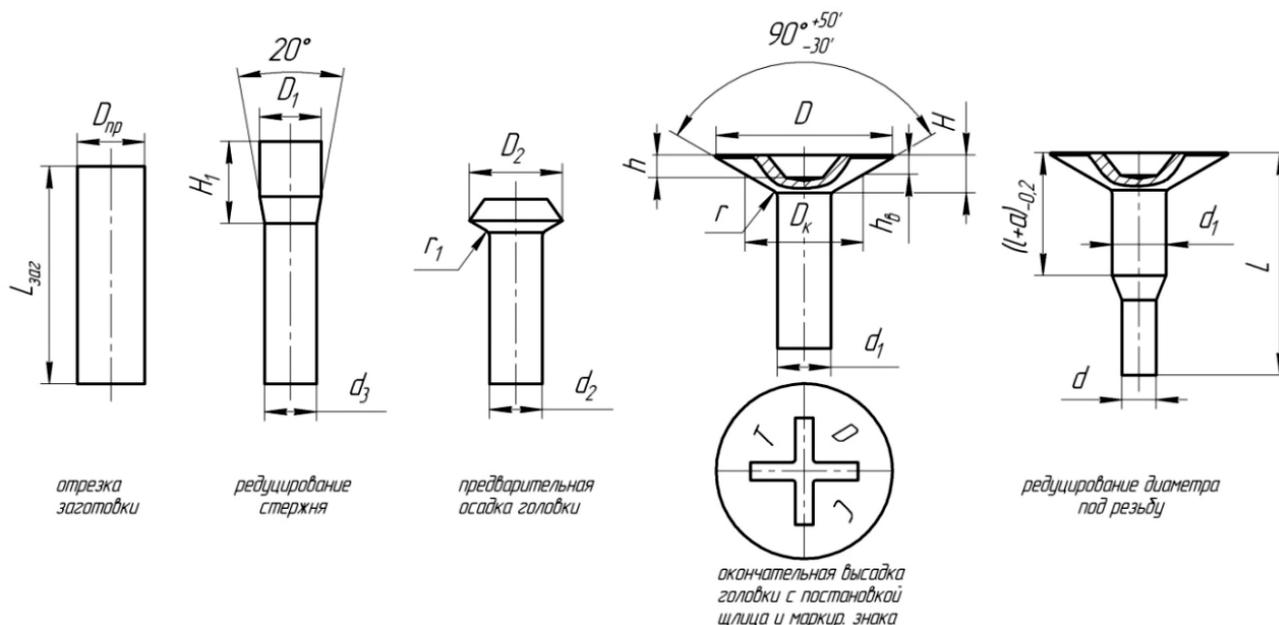


Рис. 1. Переходы высадки винта М5 с потайной головкой и крестообразным шлицем

Процесс выдавливания шлица в заготовке базируется на теоретических закономерностях пластической деформации. В теории пластичности рассматриваемая операция определена как внедрение пуансона в пластическое полупространство [3]. При этом делаются упрощения, согласно

которым не учитывается контактное трение, а изменяющееся нормальное напряжение на контактной поверхности вследствие деформационного упрочнения материала заменяется средней величиной. Для определения величины и распределения напряжений на контактной поверхности исполь-

зуют методы линий скольжений, верхней оценки, сопротивления материалов пластическому деформированию. Для пуансонов с различной формой торца разработаны инженерные решения по определению нормальных напряжений на контактной поверхности.

Исследуемая работа не имеет упрощений и характеризуется следующими особенностями. Во-первых, анализируется кинетика процесса. Формообразование шлица условно можно разделить на две стадии. На первой происходит вдавливания конического участка пуансона в торец заготовки, соотношение диаметров которых больше пяти, что аналогично вдавливанию пуансона в пластическое полупространство. На второй стадии схема деформации усложняется: к вдавливанию конического участка пуансона добавляется вдавливание участка усеченного конуса. При этом вдавливание совмещается с раздачей материала в радиальном направлении, так как боковые поверхности высаживаемой части заготовки не ограничены инструментом. Вторая особенность работы заключается в оценке деформационного упрочнения материала высаживаемой головки винта в условиях больших деформаций с учетом его объемной неравномерности. В практике обработки металлов давлением для данного случая используют кривые упрочнения, в которых, по мнению В.А. Крохи [2], при степенях деформации $\varepsilon > 1,0-1,25$ упрочнение имеет характер, приближающийся к прямолинейному. Это не совсем корректно. Трудями Г.Д. Деля, Д.П. Беклемищева [4] и других ученых доказано, что для больших деформаций зависимость упрочнения описывается полиномом третьей степени. Последняя особенность работы заключается в рассмотрении сил трения по контактной поверхности и определении соотношения значений касательных напряжений, которые они определяют, с величиной нормальных напряжений.

Для исследования использована методика, разработанная для многоэтапного холодного деформирования [5]. Она содержит деформационный анализ с использованием

математического моделирования и структурно-механические исследования. Работа включила этапы:

- математическое моделирование переходов высадки винта с применением программного комплекса DEFORM-3D, выделение исследуемых зон, отличающихся деформированным состоянием, определение их положения на продольных шлифах операционных заготовок, оценка основных направлений течения металла;

- штамповка операционных заготовок и изготовление из них продольных шлифов;

- измерение микротвердости $HV_{0,1}$ с нагрузкой 0,981 Н и микроструктурный анализ материала выделенных зон на продольных шлифах;

- испытание на одноосное растяжение (ГОСТ 1497) материала исходной заготовки – проволоки стали 16ХСН;

- определение зависимости интенсивности напряжений σ_i от твердости деформированного материала H для стали 16ХСН по выражению Д.П. Беклемищева [4]:

$$\sigma_i = \tau_m + \left[0,9 \frac{\sigma_m}{\sigma_y} (H + H_y) \pm 1 \right]^3, \quad (1)$$

где σ_m – напряжение текучести; σ_y – напряжение при предельно устойчивой деформации; H – число твердости деформированного материала; H_y – число твердости при предельно устойчивой деформации;

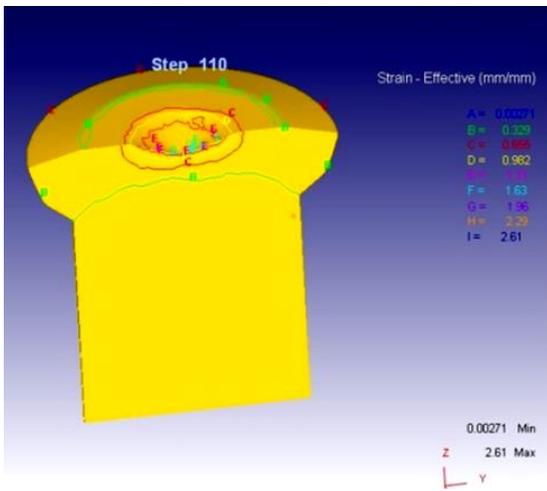
- построение обобщенной кривой упрочнения исследуемой стали в координатах «степень деформации – интенсивность напряжений» [6].

Деформационный анализ. Результаты математического моделирования представлены в виде картин (рис. 2) деформированного состояния материала: при вдавливании в заготовку торцевого конического участка (*a*) и участка усеченного конуса (*b*); течения металла (*в*).

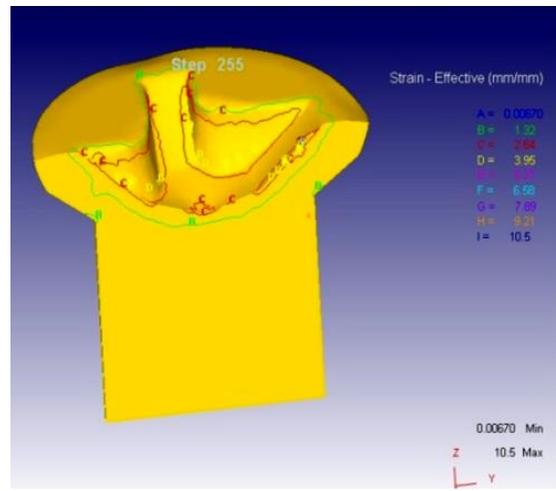
При вдавливании в заготовку конического участка пуансона деформированное состояние материала объема заготовки характеризуется неоднородностью. В слоях заготовки, определяемых расстоянием от поверхности пуансона 0,02...0,06 по-

перечного его размера ($\sim 0,1$ мм) реализуются значения деформации $\varepsilon_i = 0,982$ и выше. При удалении в радиальном направлении степень деформации снижа-

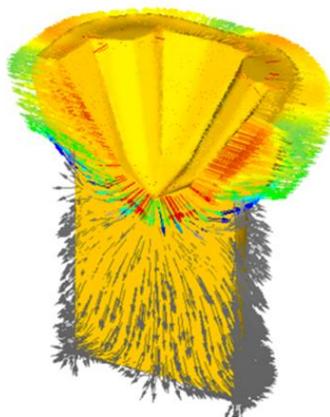
ется, доходя до значения $\varepsilon_i = 0,655$ на расстоянии $0,1 \dots 0,2$ поперечного размера пуансона ($\sim 0,3$ мм), и далее до $\varepsilon_i = 0,329$ на расстоянии $1,4$ мм.



а



б



в

Рис. 2. Картины деформированного состояния материала при вдавливании в заготовку торцевого конического участка (а) и участка усеченного конуса (б); течения металла (в)

При вдавливании в заготовку участка усеченного конуса деформированное состояние материала в объеме заготовки повышается. Можно выделить зоны, отличающиеся степенью деформации. Их расположение эквидистантно контуру шлицевого паза (в дальнейшем по тексту – паза). По контактной поверхности степень деформации в слое толщиной $\sim 0,1$ мм достигает наибольших значений $\varepsilon_i = 3,9-2,64$. Далее располагается слой толщиной $0,2 \dots 0,6$ мм, в котором степень деформации имеет значение в интервале $\varepsilon_i = 2,64-1,32$. Наибольшие значения соответствуют торцу

высаженной головки, минимальные – дну паза. Следующий слой имеет деформацию в интервале $\varepsilon_i = 1,32-0,95$. В остальной части головки деформированное состояние значительно снижается, в том числе и в промежуточных зонах между пазами.

В соответствии с картинами течения металла (рис. 2 в) сделано заключение о реализуемой механической схеме деформации. Преобладающее течение металла происходит в радиальном направлении и совпадает с направлением нормальных напряжений сжатия, действующих на контактной поверхности. Осевое течение определяется

касательными напряжениями, обусловленными силами трения на контактной поверхности. Свободное течение соответствует тангенциальному направлению, при этом наибольшее удлинение претерпевает материал торцевой части заготовки.

Структурно-механические исследования. Механические исследования включили замеры микротвердости $HV_{0,1}$ на продольном шлифе заготовки окончательной высадки в зонах, выделенных на основании математического моделирования (рис. 3).

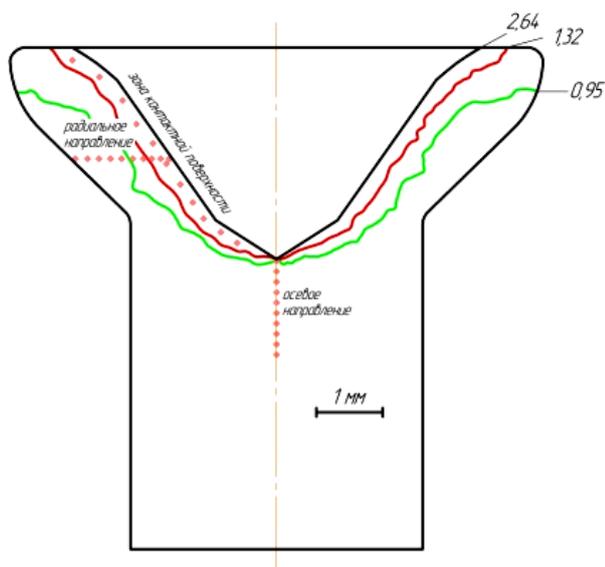


Рис. 3. Расположение зон замера микротвердости $HV_{0,1}$ в продольном сечении винта

Первая зона расположена вдоль профиля паза на расстоянии 0,5 мм от его контура. Вторая зона располагается в радиальном направлении по середине высоты головки. Третья зона соответствует осевому направлению, начиная от основания паза. Схема расположения зон на продольном сечении операционной заготовки приведена на рис. 3. Замеры проводились с шагом 0,5 мм. Результаты замеров микротвердости стали 16ХСН приведены в табл. 2.

В зоне толщиной 0,2...0,6 мм, примыкающей к поверхности шлицевого паза, значения микротвердости находятся в интервале $HV_{0,1} = 4331-2989$. На торце заготовки микротвердость имеет наибольшую величину. По направлению к основанию паза микротвердость снижается, что обусловлено уменьшением степени деформации в пределах $\epsilon_i = 2,80-0,74$. Во второй зоне, в радиальном направлении, начиная от поверхности паза, замеры микротвердости $HV_{0,1}$ материала показали изменение от 2450 до 1900. Полученные результаты определены снижением степени деформации в интервале $\epsilon_i = 3,12-0,52$. В осевом направлении, начиная от основания паза, микротвердость, равная $HV_{0,1} = 2550$, снижается, достигая на расстоянии ~2 мм уровня недеформированного материала $HV_{0,1} = 1130$.

Таблица 2

Замеры микротвердости $HV_{0,1}$ стали 16ХСН в продольном сечении головки винта

Поверхность, примыкающая к пазу	По радиальному направлению от паза к поверхности головки	По оси винта от основания паза
4331,2	2614,2	2577,9
3530,7	2555,7	2222,5
3419,8	2019,9	1795,8
3706,5	1903,9	1443,4
3513,6		1129,8

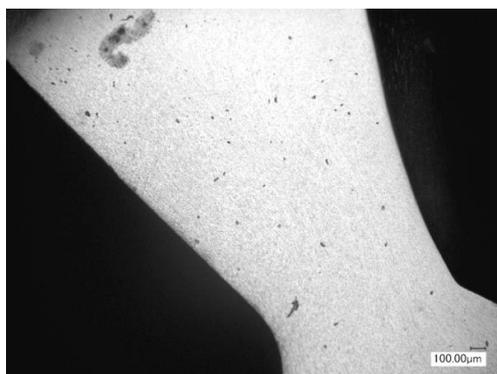
К недостаткам данного этапа исследования следует отнести невозможность замера микротвердости по контактному слою толщиной ~0,1 мм, имеющему наибольшее деформированное состояние и, как следствие, невозможность рассчитать интенсивность напряжений по аналитическому

выражению Д.П. Беклемищева (1). Данная проблема решается с использованием построенной экспериментальной кривой упрочнения в координатах «интенсивность напряжений – степень деформации».

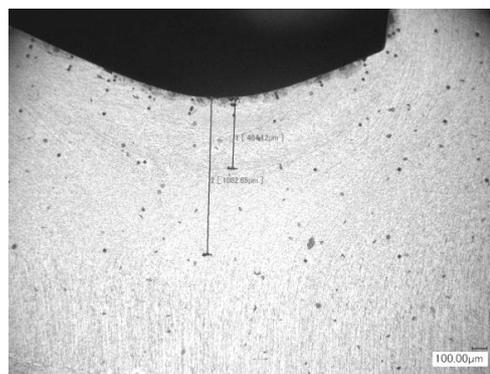
Микроструктурный анализ качественно подтвердил выявленную через замеры твер-

дости пространственную неравномерность деформационного упрочнения. Микроструктура по контактной поверхности шлицевого паза характеризуется значительным искажением зерен (рис. 4 а). Оно выражается в значительном сжатии зерен по нормальному к нему направлению, что не позволяет выполнить количественную оценку их размера на

уровне увеличения $\times 200-300$. При дальнейшем удалении в радиальном направлении искажение зерен уменьшается. По осевому направлению, начиная со дна шлицевого паза по мере удаления вглубь стержня, сжатие микроструктуры также последовательно уменьшается (рис. 4 б).



а



б

Рис. 4. Микроструктура стали 16ХСН ($\times 200$) продольного сечения потайной головки винта М5 с крестообразным шлицом: а – боковой стенки; б – основания шлицевого паза

Построение обобщенной кривой упрочнения. Построение обобщенных кривых упрочнения использует зависимости «степень деформации – твердость» и «интенсивность напряжений – твердость». При построении зависимости в координа-

тах «степень деформации – твердость» (табл. 3) использованы замеры микротвердости $HV_{0,1}$ в исследуемых точках, для которых степень деформации e_i определялась с применением математического моделирования.

Таблица 3

Значения степени деформации e_i и микротвердости $HV_{0,1}$ в исследуемых точках

e_i	0,214	0,281	0,51	0,74	1,46	1,85	2,01	2,28	2,46	2,8
$HV_{0,1}$	1130	2250	2500	2820	3000	3150	3200	3450	3513	3700

Зависимость в координатах «интенсивность напряжений – твердость» определяется полиномом третьей степени, для построения которой используются данные стандартных механических испытаний.

По результатам испытания на одноосное растяжение проволоки стали 16ХСН получены следующие прочностные характеристики: $\sigma_m = 379$ МПа, $\sigma_y = 680$ МПа, $HV_m = 120$, $HV_y = 206$. На их основании по выражению Д.П. Беклемищева (1) построена зависимость «интенсивность напряжений – твердость»

$$\sigma_i = 379 + \left[0,502 \cdot 10^{-3} (HV_{0,1} + 206) \pm 1 \right]^3 \text{ МПа}, \quad (2)$$

где $HV_{0,1}$ – микротвердость деформированного материала.

Для исследуемых точек рассчитанные значения приведены в табл. 4.

На основании совмещения зависимостей «степень деформации – твердость» и «интенсивность напряжений – твердость» построена обобщенная кривая упрочнения стали 16ХСН (рис. 5).

Значения интенсивности напряжений σ_i и микротвердости $HV_{0,1}$

σ_i	3750	4330	4506	4826	5179	5569	5717	6607	6814	7737
$HV_{0,1}$	1130	2250	2500	2820	3000	3150	3200	3450	3513	3700

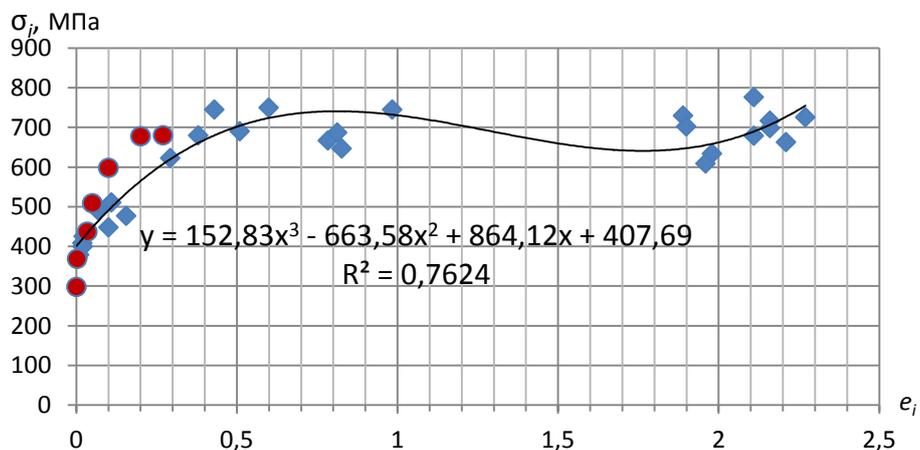


Рис. 5. Обобщенная кривая упрочнения стали 16ХСН (точками обозначен начальный участок в соответствии с кривой упрочнения)

Для построения ее начального участка использована кривая упрочнения, полученная при испытании на одноосное растяжение.

Построенная обобщенная кривая упрочнения позволила оценить величину касательных напряжений, возникающих от силы трения на поверхности контакта пуансона с материалом и исчезающих по мере перехода к внешним зонам высаженной головки винта.

Для стали 16ХСН согласно обобщенной кривой упрочнения деформированному материалу со степенью деформации $e_i = 2$ соответствует интенсивность напряжений $\sigma_i = 705$ МПа.

При степени деформации $e_i = 2,5$ МПа интенсивность напряжений возрастает до 805 МПа, а при $e_i = 3,0$ – до $\sigma_i = 1155$ МПа. Если иметь в виду, что интенсивность напряжений определяется как нормальными, так и касательными напряжениями, то значения последних можно рассчитать по правилу параллелограмма.

При этом нормальные напряжения в контактном слое берутся равными напряжениям в последующем слое, где проводились замеры микротвердости. Приведенные расчеты позволяют сделать вывод, что для

контактного слоя, в котором степень деформации $e_i = 2,6 \div 3,0$ и более, величина касательных напряжений соизмерима с нормальными и достигает значений ~ 950 МПа и выше.

Итак, деформационное и структурно-механическое состояние конструкционных сталей 14Х17Н2 и 16ХСН в процессе холодной высадки винтов с потайной головкой и крестообразным шлицем характеризуется пространственной неоднородностью. На основании деформационного анализа, проведенного методом математического моделирования (DEFORM-3D), выделены характерные зоны экспериментальных исследований, которые включили микроструктурный анализ и замеры микротвердости на продольных шлифах операционных заготовок. Максимальные деформация и упрочнение соответствуют контактной поверхности толщиной $\sim 0,1$ мм, в которой действуют наибольшие касательные напряжения, определяемые силами трения. Контактная поверхность переходит в зону толщиной $\sim 0,6$ мм, примыкающей к поверхности крестообразного шлица. Микроструктура характеризуется сжатием зерен по направлению, нормальному к поверхности крестообразного

шлица. При удалении в радиальном к боковой поверхности головки и осевом направлении вглубь стержня винта твердость и искажение зерен монотонно уменьшаются.

По результатам исследования построены обобщенные кривые упрочнения ста-

лей 14X17H2 и 16XCH, которые позволили определить величину касательных напряжений, возникающих от силы трения на поверхности контакта пуансона с материалом.

ЛИТЕРАТУРА

1. К вопросу низкой стойкости пуансонов при выдавливании крестообразного шлица в винтах с потайной головкой из стали 14X17H2 / В.В. Галкин, А.А. Дербенев, А.В. Братухин, Г.Н. Гаврилов // Заготовительные производства в машиностроении. 2017. № 4. С. 6-12.

2. Кроха В.А. Упрочнение металлов при холодной пластической деформации / В.А. Кроха. М.: Машиностроение, 1980. 157 с.

3. Сторожев М.В. Сопротивление материалов / М.В. Сторожев, Е.А. Попов. М.: Машиностроение, 1971. 424 с.

4. Смирнов-Аляев Г.А. Сопротивление металлов пластическому деформированию /

Г.А. Смирнов-Аляев. Л.: Машиностроение, 1978. 386 с.

5. Галкин В.В. Структурно-деформационная оценка упрочнения металла в многооперационных процессах холодного деформирования / В.В. Галкин // Упрочняющие технологии и покрытия. 2014. № 7. С. 27-29.

6. К вопросу построения экспериментальных зависимостей интенсивности напряжений металла от степени деформации / В.В. Галкин, С.А. Кудрявцев, Е.Г. Терещенко, А.А. Дербенев // Заготовительные производства в машиностроении. 2013. № 11. С. 23-27.

Галкин Владимир Викторович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Машиностроительные технологические комплексы» Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексева

Гаврилов Геннадий Николаевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Машиностроительные технологические комплексы» Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексева

Братухин Анатолий Владиславович – начальник управления по качеству ПАО «Нормаль», Нижний Новгород

Дербенев Андрей Анатольевич – начальник отдела неразрушающего контроля НАЗ «Сокол», филиал АО «РСК «МиГ», Нижний Новгород

Vladimir V. Galkin – PhD, Associate Professor Department of Technological Complexes in Mechanical Engineering, Nizhny Novgorod State Technical University

Gennady N. Gavrilov – Dr.Sc., Professor Department of Technological Complexes in Mechanical Engineering, Nizhny Novgorod State Technical University

Anatoly V. Bratukhin – Manager of Quality Department, PAO «Normal», Nizhny Novgorod

Andrei A. Derbenev – Manager of Division of Nondestructable Quality, NAZ Sokol, branch of AO RSK MIG, Nizhny Novgorod

Статья поступила в редакцию 15.01.19, принята к опубликованию 15.03.19

УДК 621.793.74

**ТЕХНОЛОГИЯ ИМПРЕГНАЦИИ ПОРИСТЫХ
ПЛАЗМОНАПЫЛЕННЫХ ПОКРЫТИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ
ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМАХ НАПЫЛЕНИЯ,
ЖИДКИМИ ВЕЩЕСТВАМИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ
УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ**

О.А. Маркелова, И.П. Гришина

**IMPREGNATION TECHNOLOGY OF PLASMA-SPRAYED POROUS
COATINGS OBTAINED AT VARIOUS MODES OF SPRAYING
BY LIQUID SUBSTANCES UNDER THE INFLUENCE
OF ULTRASOUND OSCILLATIONS**

O.A. Markelova, I.P. Grishina

Разработана технология импрегнации пористого плазмонапыленного покрытия под действием ультразвуковых колебаний. Приведены результаты исследований скорости высвобождения жидких компонентов из пористого покрытия в зависимости от структуры самого покрытия и технологических режимов плазменного напыления при его формировании.

Ключевые слова: *плазменное напыление, электротехнологический процесс, пористое покрытие, ультразвуковые колебания, импрегнация*

Технологический процесс плазменного напыления нашел широкое применение для формирования покрытий на изделиях машиностроения и электронной промышленности [1-4]. Особый интерес представляет возможность получения электроплазменных покрытий с прогнозируемыми структурно-морфологическими характеристиками, что открывает перспективы для модификации покрытий методом их импрегнации жидкими веществами (смазочными материалами, маслами, эмульсиями, лекарственными веществами и т.д.), при этом скорость высвобождения жидких веществ имеет важное технологическое значение.

A technology has been developed for impregnation of plasma-sprayed porous coatings under the influence of ultrasonic vibrations. The results of research into the rate of release of liquid components from porous coatings are presented depending on the structure of the coating and technological modes of plasma spraying during its formation.

Keywords: *plasma spraying, electrotechnological process, porous coating, ultrasonic vibrations, impregnation*

Целью работы является определение технологических режимов импрегнации пористого плазмонапыленного покрытия жидкими веществами и определение влияния технологических режимов плазменного напыления на скорость высвобождения жидких веществ из структуры покрытия.

Образцы для экспериментального исследования изготавливались из титанового сплава марки ВТ16 в виде пластин размерами 10×10×2 мм.

Предварительно образцы подвергались очистке в УЗ-ванне ПБС-ГАЛС при частоте 18±2 кГц в водном растворе при температуре 35-40°С в течение 3 мин и последующей воздушно-абразивной обработке на

аппарате АСОЗ 1.2 МЕГА порошком электрокорунда дисперсностью до 300 мкм в течение 5 мин.

Плазменное покрытие формировалось на полуавтоматической установке УПН-28 из подслоя порошка титана толщиной до 40 мкм и слоя порошка гидроксиапатита толщиной до 50 мкм по следующим технологическим режимам: ток дуги при плазменном напылении титана 350 ± 5 А, ток дуги при плазменном напылении гидроксиапатита 300-450 А, дистанция напыления порошка гидроксиапатита 50-150 мм, величина напряжения электроплазменной дуги 30 ± 5 В, дисперсность порошка гидроксиапатита 70-90 мкм; дисперсность порошка титана 100-150 мкм, расход транспортирующего газа (аргон) 2-3 л/мин, расход плазмообразующего газа (аргон) 19-20 л/мин соответственно.

Импregnацию покрытий осуществляли жидкостью с примесью порошка высокодисперсного металлического серебра для последующей идентификации глубины

проникновения. Образцы помещались в стакан, после чего подвергались озвучиванию в УЗ-ванне при частоте 18 ± 3 кГц, в течение $\tau = 120$ с.

Для контроля размеров микро- и нанопор и каналов использовался анализатор для определения площади удельной поверхности NOVA2000e, принцип работы которого основан на процессах газовой адсорбции и капиллярной конденсации.

Скорость выхода жидкого вещества из структуры пористого плазмонапыленного покрытия определяли методом комплексометрического титрования.

Результаты экспериментальных исследований показывают, что общая пористость плазмонапыленного покрытия снижается при увеличении тока дуги плазмотрона при всех выбранных дистанциях напыления (таблица), что предположительно связано с большим проплавлением напыляемых частиц и как следствие плотной упаковкой их при формировании покрытия.

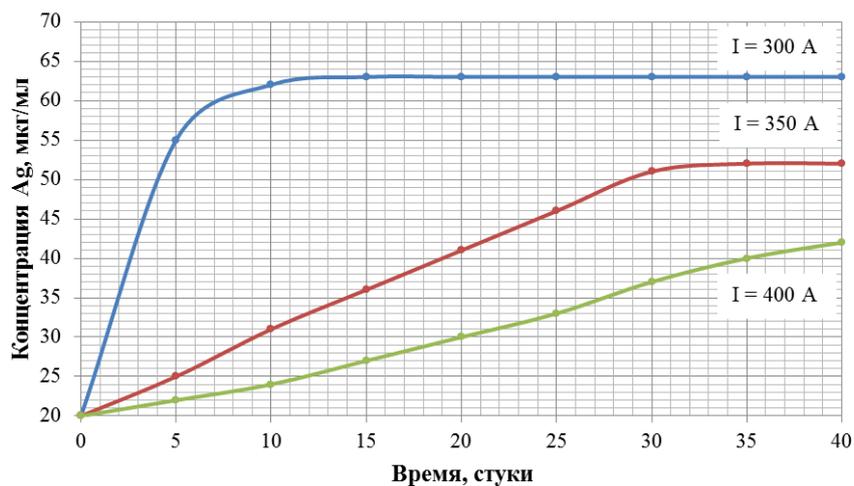
Пористость плазмонапыленных покрытий, полученных при различных режимах напыления

Дистанция напыления, мм	Ток дуги, А	Среднее значение общей пористости покрытия, %	Средний максимальный диаметр пор, мкм
150	300	52,3	52,4
	350	42,4	41,2
	400	38,7	40,1
100	300	45,7	38,6
	350	31,8	33,2
	400	31,2	23,7
50	300	53,4	34,5
	350	30,6	27,1
	400	24,7	14,2

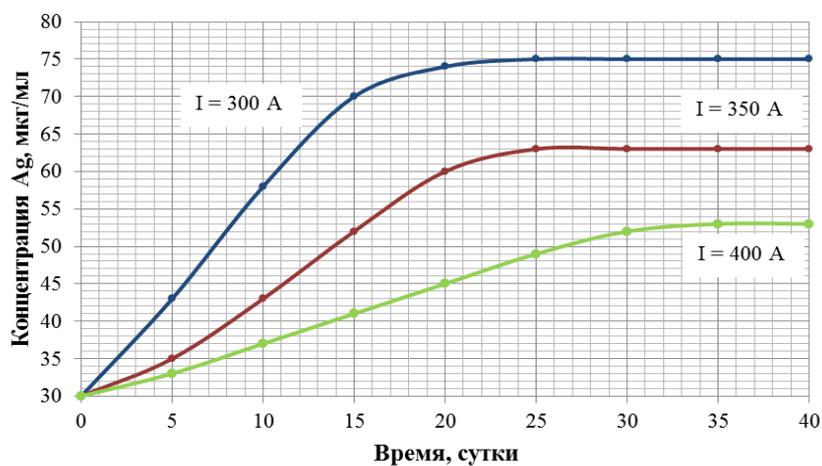
Результаты исследования скорости высвобождения жидкого вещества из структуры плазмонапыленных покрытий для различных типов жидкостей представлены на рис. 1.

Для покрытий, сформированных при токе дуги 300 А, характерно достаточно быстрое высвобождение жидкого вещества из пористого плазмонапыленного покры-

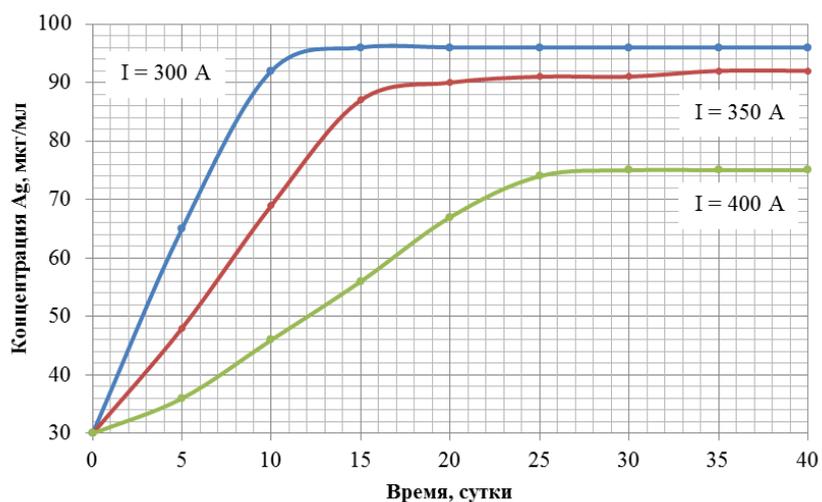
тия. Так, в покрытии, сформированном при дистанции напыления $L = 150$ мм, вещество достигает максимальной концентрации в растворе на 15-16 сутки (порядка 93-94 мкг/мл), что предположительно связано с достаточно высокой пористостью покрытия. Для дистанций напыления 100 и 50 мм максимальная концентрация вещества в растворе достигается к 20 дню.



а



б



в

Рис. 1. Скорость выхода жидких веществ из пористого плазмонапыленного покрытия, полученного при различных токах дуги плазматрона: *а* – дистанция напыления 50 мм; *б* – дистанция напыления 100 мм; *в* – дистанция напыления 150 мм

Максимальная концентрация активного вещества в растворе для покрытий, сформированных при токе дуги 350 А, варьируется в достаточно узких пределах, причем многие зависимости носят приближенный к линейному характер.

Для покрытий, сформированных при токах дуги 400 А, характерна достаточно низкая концентрация жидкого вещества на пятый день взятия проб и в последующие выборки.

Итак, покрытия, полученные при токах дуги 300 А, целесообразно применять в

случае необходимости «экспресс» доставки жидких веществ в значительной концентрации в заданную область. Покрытия, сформированные при токах дуги 400 А перспективны для применения при необходимости значительной пролонгации высвобождения жидкого вещества в окружающую среду.

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта РФФИ № 18-38-00677 мол_а.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Fauchais P.L.** Thermal Spray Fundamentals / P.L. Fauchais, V.R. Heberlein, M.I. Boulos. Springer, New York, Heidelberg Dordrecht, London, 2014. XXVIII. 1566 p.

2. **Лясников В.Н.** Плазменное напыление / В.Н. Лясников, А.В. Лясникова, О.А. Дударева. Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2016. 624 с.

3. Application of nanostructured coatings by plasma spraying / I.N. Kravchenko, A.V. Ko-

lomeichenko, S.N. Sharifullin, A.A. Kolomeichenko // Journal of Physics Conference Series. 2018. Vol. 1058(1).

4. Development and implementation of plasma sprayed nanostructured ceramic coatings / M. Gell, E.H. Jordan, Y.H. Sohn at al. // Surface and Coatings Technology. 2001. Vol. 146-147. P. 48-54.

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

Гришина Ирина Петровна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Физическое материаловедение и биомедицинская инженерия» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Olga A. Markelova – Assistant Lecturer, Department of Physical Material Studies and Biomedical Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Irina P. Grishina – PhD, Associate Professor, Department of Physical Material Studies and Biomedical Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 15.01.19, принята к опубликованию 15.03.19

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.

**АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ
ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЧНОСТИ
ПЛАЗМОНАПЫЛЕННЫХ ПОРИСТЫХ ПОКРЫТИЙ**

**В.М. Таран, А.В. Лясникова, О.А. Дударева,
О.А. Маркелова, И.П. Гришина**

**PROVIDING ALGORITHMS FOR NUMERICAL MODELING
OF STRENGTH OF PLASMA-SPRAYED POROUS COATINGS**

V.M. Taran, A.V. Lyasnikova, O.A. Dudareva, O.A. Markelova, I.P. Grishina

Предложен алгоритм численного моделирования прочности пористых плазмонапыленных покрытий. Даны экспертные оценки параметров математического моделирования. Доказана адекватность предложенных моделей путем сравнения полученных значений с результатами экспериментальных исследований.

Ключевые слова: плазменное напыление, пористость покрытий, прочность покрытий, математическое моделирование

В современной технике находят применение пористые покрытия, которые заполняются жидким веществом [1-3].

Основным структурным образованиями таких покрытий является твердый каркас из частиц порошка, внутри которого имеются поры (пустоты) [1].

Сложность получения покрытий данного типа состоит в коррекционной связи величин пористости покрытия и его прочности. Чем выше степень пористости, тем ниже прочность покрытия. В связи с этим возникает задача выбора допустимых значений этих двух свойств покрытия, чтобы пористость соответствовала требованиям функционального назначения покрытия, а прочность – требованиям технической надежности изделия с покрытием.

Наиболее перспективным направлением решения указанной задачи представляется предварительное математическое моделиро-

An algorithm for numerical modeling of strength of plasma-sprayed porous coatings is proposed. Expert estimates for the parameters of mathematical modeling are given. The adequacy of the proposed models is proved by comparing the obtained values with the results of experimental studies.

Keywords: plasma spraying, coating porosity, coating strength, mathematical modeling

вание свойств пористого покрытия, результаты которого могут быть положены в основу разработки технологического процесса формирования покрытий данного типа.

Целью данной работы является разработка алгоритмического обеспечения численного моделирования прочности пористых покрытий. В основу алгоритмического обеспечения положены следующие теоретические соображения.

Под прочностью покрытий s_n понимается напряженное состояние определенных участков объема покрытия, величина которого выше некоторого предельно допустимого напряжения $[s_n]$

$$s_n > [s_n]. \quad (1)$$

Если прочность s_n меньше предельно допустимого напряжения, то в этой области покрытие вероятно образование трещины, то есть разделение соседних поверхностей

внутреннего объема покрытия на две ровные поверхности, примыкающие одна к другой, но не связанные в единое целое. По мере увеличения длин трещин и их плотности в объеме покрытия они становятся одной из главных причин разрушения покрытия.

В связи с этим важное значение имеет изучение особенностей возникновения напряженного состояния материала покрытия. Выделим три главных фактора, способствующих напряженному состоянию материала покрытия. Первый фактор связан с особенностями образования пористого покрытия. Процесс формирования покрытия связан с взаимодействиями между собой частиц и образованием единой системы покрытия в виде монолитного твердого каркаса. Для соединения разрозненных частиц в единое монолитное образование требуется затрата внешней энергии, сопровождающая образование прочных связей между атомами материала частиц, то есть химическое взаимодействие. Реализация этого процесса требует высокой температуры в зоне контакта частиц (температуры активации T_k^a) и определенного давления на взаимодействующие частицы для сближения атомов этих частиц до состояния их химического взаимодействия в течение определенного интервала времени.

Таким образом, прочность связей между атомами частиц, из которых формируется каркас покрытия, можно представить следующим выражением:

$$s_{хим} = \phi(T_k^a, T_k^a, p, \tau_k), \quad (2)$$

где T_k^a – температура активации в каркасе взаимодействующих частиц; p – давление на взаимодействующие атомы частиц при температуре выше T_k^a .

Прочность связи между атомами взаимодействующих частиц зависит также от количества взаимодействующих атомов, то есть от площади контакта между взаимодействующими частицами. С учетом последнего выражение (2) будет иметь следующий вид

$$s_{хим} = \phi(T_k^a, p, \tau_k, S_k), \quad (3)$$

где S_k – площадь контакта между химическими взаимодействующими частицами.

Однако прочность покрытия определяется не только химическим взаимодействием атомов вещества, но также остаточными напряжениями ($s_{ост}$), которые являются результатом многих практически неконтролируемых термических и кинематических факторов, сопровождающих процесс формирования покрытия [1, 4].

Следует отметить, что уровень остаточных напряжений изменяется по мере наращивания слоя покрытия, возрастая с ростом его толщины.

Наряду с напряжениями химического взаимодействия атомов вещества и остаточных напряжений в покрытии возникают напряжения $\sigma_{вд}$, обусловленные функциональным применением покрытия, которые могут проявиться в виде внешних давлений или ударных движений изделия, на котором размещено покрытие. Таким образом, прочность пористого покрытия может быть представлена как результат действия трех видов напряжений:

$$s_n = \phi(s_{хим}, s_{ост}, s_{вн}). \quad (4)$$

При этом суммарный результат прочности зависит как от величины напряжений, так и от их пространственной направленности:

$$s_n = \pm s_{хим} \pm s_{ост} \pm s_{вн}. \quad (5)$$

Изложенные соображения положены в основу алгоритма для компьютерного моделирования прочности пористых покрытий.

Предлагаемый алгоритм моделирования прочности пористых покрытий включает следующие этапы:

1. Принимается, что для моделирования достаточно рассматривать сравнительно небольшой объем покрытия со свойствами, статистические величины которых характерны для всего объема покрытия.

2. Производится построение геометрической формы покрытия в виде параллелепипеда и разбиение его на элементарные дискретные ячейки в форме кубов (рис. 1). Размеры параллелепипеда и ребра куба определяются методом экспертной оценки.

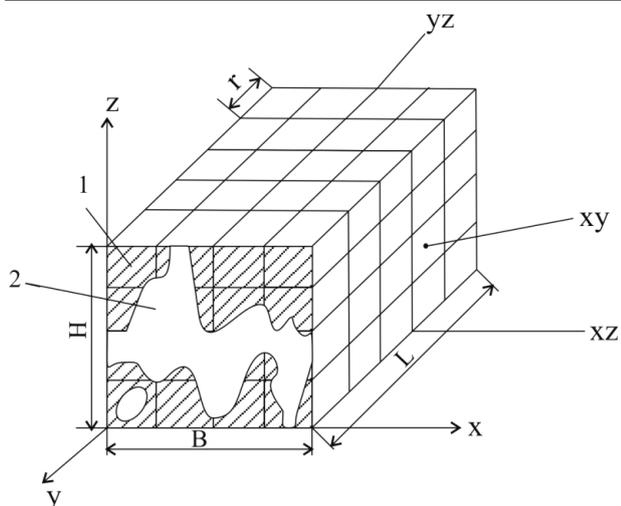


Рис. 1. Схема разбиения объема пористого покрытия на кубические фигуры: 1 – каркас покрытия; 2 – поры; H, B, L высота, ширина и длина покрытия; $x y z$ – координатная сетка

Моделируемый объем покрытия разбивается на слои по плоскостям xy, zx, yz . Каждый слой делится на дискретные ячейки, которые обозначаются символом α и снабжаются индексами α_{ij}^{xyz} . Индексы xyz определяют номер слоя, а индексы ij – местоположение дискретной ячейки в слое.

3. В процессе моделирования производится последовательное перемещение от

одной дискретной ячейки к другой по координатам сетки xyz и ij .

4. На позиции каждой дискретной ячейки производится вероятностный розыгрыш на ЭВМ состояний дискретных ячеек по признакам, смысл которых определяется в частных алгоритмах: A1 – алгоритм моделирования пористости покрытия; A2 – алгоритм моделирования прочности покрытия; A3 – алгоритм определения времени заполнения пор жидкой средой.

5. Так как взаимосвязь между соседними дискретными ячейками проходит по их границам, вводится понятие «эквивалентной поверхности» дискретной ячейки. При выборе в качестве дискретной ячейки фигуры куба, каждая ячейка будет иметь шесть эквивалентных поверхностей, по две вдоль каждой оси прямоугольной системы координат (рис. 2).

Принимая во внимание, что разделение каркаса покрытия, а также взаимосвязь между отдельными порами соседских структурных образований происходит по границам, оценка прочности покрытия будет проводиться по результатам моделирования состояния эквивалентных поверхностей дискретных ячеек.

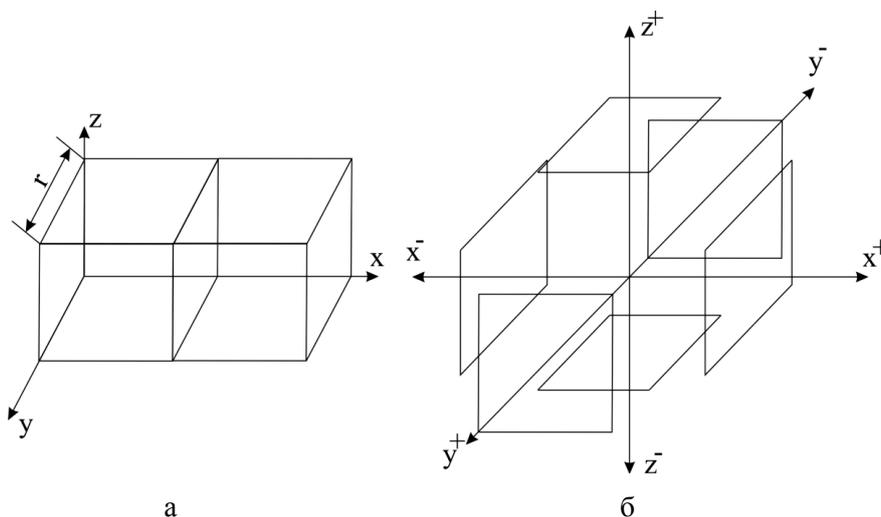


Рис. 2. Схема геометрической модели дискретной ячейки: а – схема взаимосвязанных дискретных ячеек в прямоугольной системе координат xyz ; б – схема расположения эквивалентных поверхностей дискретной ячейки в системе координат $z^+ z^- x^+ x^- y^+ y^-$; r – размер ребра дискретной ячейки

6. Значения прочности покрытия по каждой дискретной ячейке будут усредняться по результатам моделирования

прочности каждой эквивалентной поверхности дискретной ячейки $\sigma_{эн}^i$

$$\bar{\sigma}_n = \sum_{i=1}^b \sigma_{zn}^i,$$

где $\bar{\sigma}_n$ – усредненная прочность дискретной ячейки.

7. По результатам компьютерного розыгрыша вероятностных состояний дискретных ячеек и по экспертным оценкам определяется множество напряжений дискретных ячеек:

$$\sigma_{xв}(\alpha_{ij}^{xyz}) = \sigma_{xв}^э p(0,1) \mu[-,+], \quad (6)$$

$$\sigma_{осм}(\alpha_{ij}^{xyz}) = \sigma_{осм}^э p(0,1) \mu[-,+], \quad (7)$$

$$\sigma_{ви}(\alpha_{ij}^{xyz}) = \sigma_{ви}^э p(0,1) \mu[-,+], \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \sigma_n(\alpha_{ij}^{xyz}) = \\ = \pm \sigma_{xв}(\alpha_{ij}^{xyz}) \pm \sigma_{осм}(\alpha_{ij}^{xyz}) \pm \sigma_{ви}(\alpha_{ij}^{xyz}), \end{aligned} \quad (9)$$

где $\sigma_{xв}(\alpha_{ij}^{xyz}), \sigma_{осм}(\alpha_{ij}^{xyz}), \sigma_{ви}(\alpha_{ij}^{xyz})$ – напряжения состояний дискретных ячеек; $\sigma_{xв}^э, \sigma_{осм}^э, \sigma_{ви}^э$ – экспертные оценки соответствующих напряжений состояний дискретных ячеек; $p(0,1)$ – вероятность полученная в результате компьютерного розыгрыша:

$$\mu[-,+]= \begin{cases} -, & \text{если } p(0,1) \leq 0,5 \\ +, & \text{если } p(0,1) > 0,5 \end{cases} \quad \text{– направления}$$

действия по осям ij .

8. Моделирование прочности покрытия производится для тех дискретных ячеек, которые по результатам моделирования по алгоритму А1 определены как «твердый каркас».

9. На позиции некоторой дискретной ячейки α_{ij}^{xyz} производится вероятностный розыгрыш на ЭВМ состояния дискретной ячейки по признакам: «дискретная ячейка образует трещину» или «дискретная ячейка без трещин». Проверка состояния дискретной ячейки производится по формуле:

$$\sigma_n(\alpha_{ij}^{xyz}) < [\sigma_n^э]. \quad (10)$$

Если прочность $\sigma_n(\alpha_{ij}^{xyz})$ больше предельно допустимого напряжения $[\sigma_n^э]$, то состояние дискретной ячейки определяется как «трещина», в противном случае состояние дискретной ячейки «без трещин».

10. Вводится понятие «счетчик взаимосвязанных дискретных ячеек» в состоянии «трещина». По экспертным оценкам задается предельное количество взаимосвязанных ячеек с трещиной $[t^э]$. Если по результатам компьютерного моделирования $t \geq [t^э]$, то величина t увеличивается на единицу $t = t + 1$.

11. Вводится понятие плотность трещин в объеме покрытия T , которая определяется по формулам:

$$T = \frac{t}{V}, \quad (11)$$

$$V = \frac{LBH}{r^3} - k, \quad (12)$$

где k – объем покрытия, образованный дискретными ячейками в состоянии «пора», определенный по результатам моделирования по алгоритму А1.

По экспертным оценкам задается предельное значение плотности трещин в объеме покрытия $[T^э]$. Если по результатам компьютерного моделирования $T < [T^э]$, то покрытие признается «годным к применению». В противном случае необходимо задаться новыми исходными данными и проводить повторение процессов моделирования для получения положительных результатов.

Список употребляемых обозначений приведен в табл. 1. Блок-схема алгоритма моделирования прочности представлена на рис. 3.

Численное моделирование прочности покрытия проводилось с использованием разработанных алгоритмов и компьютерной программы на языке программирования Object Pascal среды Borland Delphi 7.

Экспертные оценки параметров математического моделирования приведены в табл. 2.

Список употребляемых обозначений

Символьное обозначение	Наименования
$V_{т.к}$	Количество ячеек типа «твердый каркас»
L, B, H	Длина, ширина и высота моделируемого объема покрытия
$\varepsilon = 6$	Количество эквивалентных поверхностей в дискретной ячейке
ε_1	Счетчик эквивалентных поверхностей
$\sigma_{хв}^\varepsilon, \sigma_{ост}^\varepsilon, \sigma_{ви}^\varepsilon$	Напряжения внешнего воздействия, химического взаимодействия и остаточного взаимодействия для эквивалентных поверхностей соседних дискретных ячеек
$\sigma_{хв}^\varepsilon, \sigma_{ост}^\varepsilon, \sigma_{ви}^\varepsilon$	Напряжения внешнего воздействия, химического взаимодействия и остаточного взаимодействия по экспертным оценкам
$W_{т.к}$	Счетчик количества дискретных ячеек типа «твердый каркас»
t	Счетчик количества последовательных дискретных ячеек с трещинами
$[t^\varepsilon]$	Предельное количество взаимосвязанных ячеек с трещинами по экспертным оценкам
T	Плотность трещин в объеме покрытия
$[T^\varepsilon]$	Плотность трещин в объеме покрытия по экспертным оценкам
r	Длина ребра дискретной ячейки
$[\sigma_n^\varepsilon]$	Предельное напряжение дискретной ячейки с соседними ячейками по экспертным оценкам
$\bar{\sigma}_n$	Среднее значение напряжения между моделируемой дискретной ячейкой и её соседями

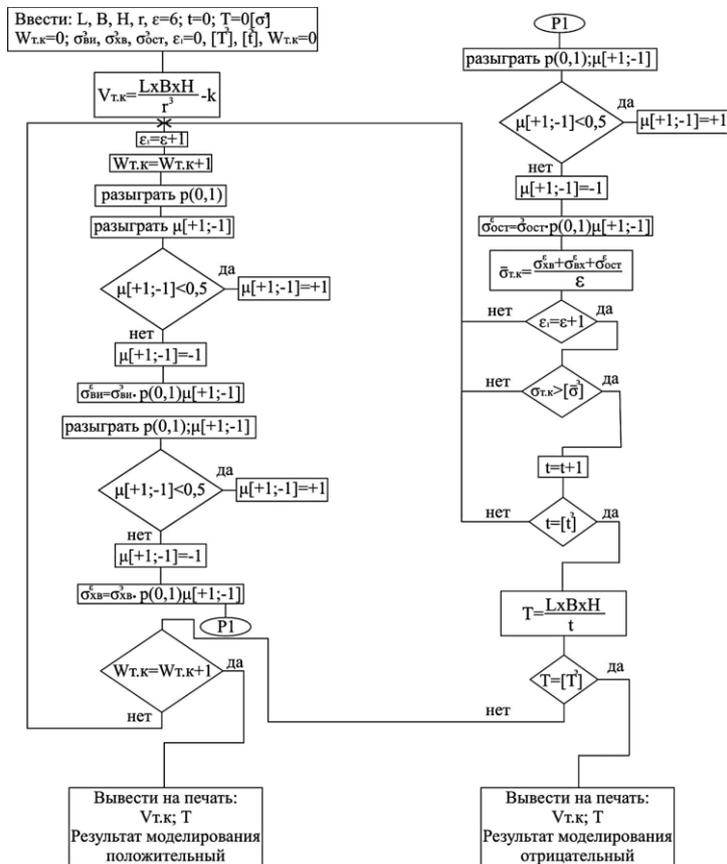


Рис. 3. Блок-схема алгоритма моделирования прочности покрытия

Таблица 2

Экспертные оценки параметров математического моделирования

Наименование параметра	Условное обозначение	Численные значения, единые измерения
Толщина покрытия	H	25...500, мкм
Длина покрытия	L	5...20, мм
Ширина покрытия	B	5...20, мм
Длина ребра дискретной ячейки	r	10...100, мкм
Напряжение, создаваемое химическим взаимодействием	$\sigma_{хв}^э$	$\pm(5...30)$, МПа
Остаточное напряжение	$\sigma_{ост}^э$	$\pm(5...30)$, МПа
Напряжение внешних воздействий	$\sigma_{вн}^э$	$\pm(5...30)$, МПа
Предельное напряжение	$[\sigma_n^э]$	(8...20), МПа
Предельное количество ячеек с трещиной	$[t^э]$	(8...20), шт.
Предельная плотность трещин	$[T^э]$	(1...5) шт./мм ³

В качестве примера в табл. 3 приведены исходные данные и результаты математического моделирования пористости и прочности покрытия, а также режимы и результаты экспериментальных исследований метода плазменного напыления покрытий [1].

Данные табл. 3 представляют собой логически взаимосвязанную совокупность методов математического моделирования и экспериментальных исследований для каждого из вариантов информационных систем для решения задачи прогнозирования качества покрытия.

Таблица 3

Исходные данные математического моделирования и экспериментальных исследований

Вариант	Экспертные оценки						Результаты моделирования		Экспериментальные режимы		Результаты исследования	
	r	$\sigma_{хв}^э$	$\sigma_{ост}^э$	$\sigma_{вн}^э$	$\bar{\sigma}_m^э$	$[T^э]$	$\Pi, \%$	T	I, A	$d, \text{мкм}$	$\Pi, \%$	$\sigma, \text{МПа}$
1	10	30	10	5	30	1	25	0	350	10	32	20
2	30	30	10	5	30	1	32	2	380	30	30	20
3	40	25	15	5	30	1	44	2	400	40	40	20
4	60	20	15	5	30	1	62	3	420	60	48	16

I – сила тока плазмотрона; d – дисперсность часть напыленного порошка

Итак, была разработана модель оценки прочности композитного плазмонапыленного покрытия. Данные экспериментальных исследований изделий с покрытиями на лабораторных стендах показали существенное повышение качества покрытия

при формировании покрытий с применение методики компьютерного моделирования.

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта РФФИ в рамках научного проекта № 18-38-00677 мол_a (в части разработки математической модели прочности плазмонапыленных покры-

тий), а также стипендии Президента РФ для молодых ученых и аспирантов

СП5048.2018.4.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Лясников В.Н.** Плазменное напыление / В.Н. Лясников, А.В. Лясникова, О.А. Дударева. Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2016. 643 с.

2. **Кривобоков В.П.** Плазменные покрытия (свойства и применение) / В.П. Кривобоков, А.А. Соловьев. Томск: Изд-во Том. политехн. ун-та, 2011. 136 с.

3. **Калита В.И.** Плазменные покрытия с нанокристаллической и аморфной структурой / В.И. Калита, Д. И.Комлев. М.: Лидер М, 2008. 388 с.

4. **Mathematical Modeling of Stress in Plasma Coatings Used in Medicine / A.V. Lyasnikova, V.M. Taran, O.A. Markelova et al. // Biomedical Engineering. 2013. Vol. 47. № 3, September. P. 142-145.**

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

Vladimir M. Taran – Dr.Sc., Professor Department of Physical Material Studies and Biomedical Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Лясникова Александра Владимировна – доктор технических наук, заведующая кафедрой «Физическое материаловедение и биомедицинская инженерия» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Aleksandra V. Lyasnikova – Dr.Sc., Professor Head: Department of Physical Material Studies and Biomedical Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Дударева Олеся Александровна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Физическое материаловедение и биомедицинская инженерия» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Olesya A. Dudareva – PhD, Associate Professor Department of Physical Material Studies and Biomedical Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

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

Olga A. Markelova – Assistant Lecturer Department of Physical Material Studies and Biomedical Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 15.01.19, принята к опубликованию 15.03.19

ЛЕТОПИСЬ

МОЖЕТ ЛИ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ПРОГРЕСС ПРЕДСТАВЛЯТЬ УГРОЗУ ЧЕЛОВЕКУ?



Николай Валерьевич Бекренев – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Техническая механика и детали машин» Института электронной техники и машиностроения СГТУ имени Гагарина Ю.А., заместитель генерального директора ОАО «НИТИ-Тесар» по науке, член Совета при губернаторе Саратовской области по науке и инновациям, член-корреспондент РАН.

Родился 22 марта 1957 года в г. Саратове, окончил в 1979 году Саратовский политехнический институт по специальности «Технология машиностроения, металлорежущие станки и инструменты».

В 1986 году защитил кандидатскую диссертацию по специальности 05.03.01 – Процессы и оборудование механической и физико-химической обработки. В 2000 году защитил докторскую диссертацию по специальностям 05.03.01 – Процессы и оборудование механической и физико-химической обработки и 05.09.10 – Электротехнология.

С 1979 по 1995 годы работал в НИТИ (ОАО НИТИ-Тесар) в должности инженера, старшего инженера, начальника отдела, начальника лаборатории электрофизических технологий. В СГТУ работает с 1995 г. в должности доцента, профессора, с 2003 г. – заведующего кафедрой.

Научные труды в области: прецизионной ультразвуковой обработки труднообрабатываемых материалов и электрофизические процессы повышения прочностных и эксплуатационных характеристик материалов с неоднородной структурой.

«ВЭ» Николай Валерьевич! Редакция журнала «Вопросы электротехнологии» просит Вас ответить на наши вопросы.

Н.В.Б. Пожалуйста. Я признателен журналу, членом редакционной коллегии которого являюсь, за возможность высказать некоторые свои соображения по перспективам развития техники и технологии.

«ВЭ» Как Вы относитесь к утверждению, что в науке и технике появляются новые и новые модные научно-технические направления?

Н.В.Б. Прежде всего, я хотел бы сказать, что понятия «модный» и «не модный» в принципе не применимы к науке и технике. Существуют объективно необходимые для прогресса человечества, развития производства и повышения качества жизни направления совершенствования различных технических систем, материалов и технологий их производства. Еще существуют, конечно, разработки «изобретателей-любителей», которые могут «протолкнуть» их для применения, но которые не приносят ощутимой пользы и эффекта. Модными

те или иные направления делают журналисты, работники рекламных агентств, зачастую не зная глубоко тот или иной объект или вводя термин, мало представляя его особенности и историю техники. В качестве примера могу привести «нанотехнологии» (прошу не совмещать это слово с «наноматериалами») и цифровое производство.

Возможно, Вы помните, как некоторое время назад, захлебываясь от радости, журналисты комментировали, как Президенту представляли арфу, струны которой изготовлены с использованием нанотехнологий, имея в виду новое слово в технике. Но если вспомнить термин, то «нано» означает размерный параметр, меньший 1 микрометра. Применительно к объектам микроструктуры материалов считается, что они должны иметь размеры менее 0,1 микрометра. Но это – очень большая величина применительно к оптическим технологиям, к шероховатости поверхности линз и зеркал, которые достигались на фирме Карл Цейсс еще в XIX веке. Но никто не называл эти технологии с приставкой «нано». В 80-х годах прошлого века разработано и внедрено автоматизированное (!) оборудование для обработки деталей приборов с отклонениями формы не более 0,1-0,2 микрометра. В микроэлектронике широко распространены с этого же времени технологии изготовления микросборок и чипов методом имплантации ионов в структуру полупроводников и других материалов. У нас в Саратове. Это ли не нанотехнологии? Но они называются ионным легированием или ионной имплантацией. Я бы ограничил сферу применения этого термина применительно к методам и аппаратным средствам конструирования структуры новых материалов с заданным комплексом свойств.

По большому счету, «цифровое производство» означает применение в проектировании изделий и технологий их изготовления, а также в организации производства компьютерной техники и специальных программных продуктов, внедрение технологического оборудования с системами числового программного управления (ЧПУ) различного уровня сложности. Однако все это широко применялось еще в 80-х годах

прошлого века как за рубежом, так и в СССР. При этом уровень электронных управляющих систем был примерно одинаков, а программисты в большинстве своем всегда у нас были выше уровнем. Системы управления все были отечественными со вводом программы с клавиатуры или с сенсорного пульта.

«ВЭ» Атомная энергетика, космонавтика, СВЧ нагрев, энергосбережение, наноматериалы, цифровая экономика... Какие новые научно-технические направления станут модными в ближайшей перспективе?

Н.В.Б. Если говорить о новых направлениях в науке и технике, то я могу говорить более объективно о той сфере, о которой информирован по роду своей научной и инновационной деятельности.

Прежде всего, хочу подчеркнуть, что определяющим для развития технических систем различного назначения является разработка новых конструкционных и функциональных материалов. Соответственно необходимо продолжение исследований как в сфере синтеза, так и пост-обработки и контроля параметров. При этом, скорее всего, повысится доля композиционных материалов всех видов, поскольку их применение позволяет одномоментно создавать материал и формировать изделие, конструировать не только изделие, но и структуру материала. Другое направление – это развитие материалов с эффектом «памяти формы», причем не только металлических (сейчас применяется никелид титана), но и композиционных. При этом возможно использование этих материалов при условии разработки методов управляемого воздействия на них в самом широком диапазоне параметров, что позволит заменить мехатронные системы на базе электроприводов в манипуляторах, бионических протезах и роботах-андроидах, соответственно существенно упростив конструкцию и снизив ее размеры.

Дальнейшее развитие должны получить методы и технологии послойного синтеза, еще называемые трехмерной печатью. При этом, на мой взгляд, их развитие должно идти по пути расширения возможности формирования многокомпонентных изделий, по-

вышения их прочности до уровня, соизмеримого с изделиями, получаемыми резанием, и обработкой давлением или литьем. Главное – повышение производительности при сохранении точности, поскольку сегодня так называемое аддитивное оборудование, позволяя формировать изделие любой сложности непосредственно по твердотельной модели, «извлеченной» из памяти компьютера или «скачанной» с Интернета, имеет очень длительный цикл, существенно превышающий время изготовления детали на станках с ЧПУ.

В настоящее время в производстве используются практически все известные науке физические поля для воздействия на материалы и изделия, разработаны технологии и оборудования. Новые эффекты могут быть получены при сочетании нескольких разнородных полевых воздействий при их комбинации с обычной механической обработкой, при изменении масштабного фактора – переходе на уровень воздействия с учетом параметров кристаллической структуры, молекулярного строения. Необходимы разработки, повышающие точность измерения параметров физических воздействий с целью повышения точности достижения заданных параметров. Весьма желательно создание систем датчиков, позволяющих, в частности, извлекать информацию в режиме реального времени непосредственно из внутренней структуры материала на различных уровнях при воздействии на материал полей различного частотного диапазона и мощности и передавать в компьютерные системы для обработки.

Сейчас принимаются решения о развитии компьютерного моделирования с разработкой так называемых «электронных двойников» изделий и процессов с целью их изучения и испытаний в виртуальном пространстве программной среды, что дает большой выигрыш во времени и средствах, позволяет проработать существенно большее число вариантов по сравнению с традиционным макетированием.

Думается, здесь необходимо вести работу со «встречным движением». Поясню. Уже упоминавшиеся новые материалы со специ-

альными свойствами, физико-химические технологии особенно при работе с долекронными параметрами характеризуются чрезвычайно большим количеством переменных факторов (в некоторых электрофизических процессах их количество превышает 100), что объективно вызывает стохастичность как процессов, так и большую неоднородность и непредсказуемость свойств материалов. Сейчас возможно создать твердотельную модель макрообъекта любой сложности и провести ее исследование, но при этом учесть все колебания свойств материалов, из которых будет изготовлен объект в реальном производственном цикле, весьма сложно, а подчас и невозможно на сегодняшнем уровне. Это создает определенные трудности при разработке как математических моделей, так и программных продуктов на их основе и «электронных двойников», которые оказываются не вполне адекватными реальным объектам. Здесь вполне уместно вспомнить известное выражение нашего великого полководца А.В. Суворова: «Гладко было на бумаге, но забыли про овраги, а по ним нам ходить!» Поэтому, несомненно, необходимо расширение и развитие программных средств, и создание «электронных двойников» должно сопровождаться исследованиями по повышению однородности и равномерности механических, тепло- и электрофизических характеристик создаваемых перспективных материалов. Это позволит повысить точность и адекватность моделей реальным объектам и снизить риск «нештатных ситуаций» в реальности.

«ВЭ» В последние годы и сейчас ведутся энергичные исследования и разработки различных технических установок и аппаратов... Дроны, автотранспорт без водителя, мобильная связь... Окружающее нас пространство заполнено электромагнитным излучением, в том числе и сверхвысокочастотным, весьма опасным для здоровья человека. Что Вы по этому поводу думаете?

Н.В.Б. К очень большому сожалению, в нашем мире за все приходится платить. То же относится и к научно-техническому прогрессу. Весь вопрос в том, какова цена за те

или иные достижения. Что перевешивает – польза или негативные факторы? Если нельзя отказаться от достижений, надо уменьшить их неизбежные негативные последствия.

Я хотел бы сначала перевести вопрос из плоскости здоровья в более широкий аспект влияния на развитие человека в целом.

В последние годы мы наблюдаем определенный перекокс в развитии техники, направленный, прежде всего, в сторону информационных технологий и развития средств связи на всех уровнях от бытового до государственного и межгосударственного. Колоссальный рывок здесь сделан буквально за последние 10-15 лет. Если раньше мобильный телефон был редкостью, то теперь – это фактически небольшой компьютер. В любой момент человек может, имея современный гаджет, получить любую информацию через Интернет, связаться с любой точкой земного шара. И это замечательно! Но общение с такими системами, с компьютерами с раннего детства, ориентирование на тестовую проверку знаний школьников и студентов приучает их к решению вопросов путем выбора из уже предложенных кем-то решений. И если они не имеют набора таких ответов, то им уже очень трудно принять осознанное решение самостоятельно. Но ведь человек-то и отличается тем, что способен думать, рассуждать, соображать. Глядя в монитор компьютера и не имея опыта практической творческой деятельности, невозможно научиться создавать новое, прорывное. Идея должна «высверкнуться» в мозгу ученого, инженера на основе его самостоятельных размышлений над результатами экспериментов, формулами или в общении с коллегами в процессе «мозгового штурма». А потом ее можно оптимизировать, исследовать, разрабатывать при помощи компьютерных программных систем, перебрав множество вариантов со скоростью, недоступной обычному человеку. Работая преподавателем уже более 20 лет, я вижу, как изменились студенты. Сколько студентов сейчас могут такое? Я не могу сказать, что нынешние студенты менее развиты, но от года к году многие из них теряют способность придумывать и принимать решение.

Прошу прощения за длинные рассуждения. Я хочу проиллюстрировать мою мысль, что обратная, весьма опасная для развития человеческой цивилизации сторона всеобщей информатизации кроется в потере человеком способности мыслить без компьютера. Но компьютер и программные средства созданы тоже людьми, имеющими свой багаж знаний, и используя только его, человек останавливается на этом уровне. Человек должен развивать свои способности мыслить, думать, прежде всего изучая реальный мир, а затем улучшать свои решения, используя модели и компьютерные системы, как помощников, как средства, облегчающие творческие усилия человека. Если представить себе немыслимую ситуацию, когда вышли из строя все компьютеры, но сохранились «обычные» станки и люди, знающие, как на них работать, как организовать производство, как придумать, рассчитать и начертить что-то, мы «провалимся относительно нынешнего уровня, но цивилизация выживет и через некоторое время встанет с колен. А если останутся только компьютеры, Интернет ...

Теперь отвечу на Ваш вопрос относительно влияния электрофизических процессов и электромагнитных полей на здоровье человека. Действительно, сегодня наш мир пронизан электромагнитными и акустическими полями различной интенсивности. Мы сегодня не мыслим своей жизни без сотовых телефонов, на кухне используем микроволновые печи, во многих домах – электрические плиты. Мы часами работаем за компьютерами. При этом не задумываемся, что эти системы окружены электромагнитными полями, а человеческий организм является тоже генератором определенных электрических импульсов, которые управляют всеми его проявлениями и, естественно, могут взаимодействовать с внешними излучениями. При этом человек является частью биосферы, и понять степень влияния на него того или иного фактора можно, рассмотрев жизнь «братьев наших меньших». Хочу сказать о некоторых своих наблюдениях. В юношеские и молодые годы одним из моих увлечений было, как это ни странно звучит с учетом моей последующей взрослой деятельности,

наблюдение за жизнью насекомых и соби-
 рание коллекций. Сейчас это в прошлом, но ко-
 гда попадаю на природу, все равно обращаю
 внимание на этих весьма интересных су-
 ществ. Могу с ответственностью заявить, что
 за последние лет десять разнообразие и ко-
 личество ос, пчел, шмелей, жуков в нашей
 области резко сократилось. При этом не сле-
 дует «грешить» на химию. Мощные химиче-
 ские производства у нас были давно и влия-
 ние свое на природу оказывали еще какое,
 так как экологическая безопасность стала
 учитываться и развиваться только в послед-
 нее время. В чем же причина? Думаю, в рас-
 пространении станций сотовой связи и гене-
 рируемых ими сверхвысокочастотных полях
 большой мощности. Но ведь и мы живем в
 окружении этих полей, а животные и тем бо-
 лее насекомые всегда считались более устой-
 чивыми в внешним воздействиям, чем люди.
 Теперь о нас. Наверное, технологические
 СВЧ установки, домашние микроволновые
 печи, электроплиты и подобная электриче-
 ская техника не могут быть источниками та-
 кой отсроченной опасности, так как их рабо-
 чие зоны закрыты защитными камерами. Это

подтверждают и замеры плотности потока
 энергии (ППЭ) электромагнитного поля, ко-
 торая в ближней зоне бытовой микроволно-
 вой печи мощностью 700-800 Вт не превы-
 шает 10-13 мкВт/см² при разрешенном
 санитарными нормами безопасном уровне в
 25 мкВт/см². К тому же микроволновки нами
 используются кратковременно. Другое де-
 ло – мониторы компьютеров и мобильные
 телефоны. В среднем вблизи кнопочных те-
 лефонов в момент передачи ППЭ доходит до
 40-50 мкВт/см², а в момент приема – даже до
 80! А многие «зависают» у телефона надол-
 го. Смартфоны ЖК дисплеями имеют ППЭ
 13-18 мкВт/см². Казалось бы, все в норме. Но
 надо помнить, что, согласно ряду исследова-
 ний, доза микроволнового излучения может
 накапливаться, так же как радиация. И опять
 надо вспомнить про время нашего общения с
 этими гаджетами. Особенно надо помнить об
 этом молодым людям. Мобильный телефон –
 великое достижение современной цивилиза-
 ции, но прежде всего – средство связи, и не
 стоит им пользоваться бездумно и долго.

«ВЭ» Спасибо, Николай Валерьевич,
 за ответы.



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 (951) 880-19-13 – Юдина Виолетта Олеговна (ответственный секретарь).

Просьба направлять публикации по адресу:

Россия, 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77, ком. 1/133а, гл. редактору журнала «Вопросы электротехнологии» Архангельскому Ю.С. и по электронной почте eltech@sstu.ru.

Требования к оформлению публикаций

Печатный вариант публикации предоставляется объемом до 10 стр. формата А4; поля: сверху и снизу по 25 мм, справа и слева по 20 мм, через одинарный интервал, шрифт Times New Roman 12, абзацный отступ 0,63 см, формат файла *.doc, редактор Microsoft Word 2003.

Иллюстрации (рисунки, графики) выполняются в формате .jpg, располагаются в тексте статьи и должны иметь номер и подпись. Рисунки и фотографии должны иметь контрастное изображение.

Таблицы располагаются непосредственно в тексте статьи. Каждая таблица должна иметь номер и заголовок.

Формулы и буквенные обозначения величин должны быть набраны в редакторе формул **Microsoft Equation 3.0** и иметь нумерацию.

Размерность всех величин, принятых в статье, должна соответствовать Международной системе единиц измерений (СИ). Не следует употреблять сокращенных слов, кроме общепринятых (т.е., и т.д., и т.п.). Допускается введение предварительно расшифрованных сокращений.

ОБЯЗАТЕЛЬНО наличие индекса УДК и списка использованных источников, оформленного по ГОСТ 7.1-2003 и включающего: фамилию и инициалы автора, название статьи, название журнала, том, год, номер или выпуск, страницы, а для книг – фамилии и инициалы авторов, точное название книги, место издания (город), издательство, год издания, количество страниц.

Также предоставляется информация об авторах (**ФИО полностью, почетные звания, ученая степень, ученое звание, должность, место работы, телефон, e-mail**), название статьи, аннотация и ключевые слова. Данная информация дублируется на **английском языке**.

Специалисты в технических и 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.

За дополнительной информацией обращайтесь на сайт журнала «Вопросы электротехнологии» www.sstu.ru/nauka/nauchnye-izdaniya/voprosy-elektrotekhnologii

Редактор Л.А. Скворцова
Компьютерная верстка О.В. Пачина
Перевод на английский язык А.Х. Аскарова

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

Подписано в печать 27.03.2019
Формат 60×84 1/8 Бум. офсет.
Усл. печ. л. 14,5 Уч. изд. л. 7,0
Тираж 500 экз. Заказ 28 Цена свободная
Отпечатано в Издательстве СГТУ, 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77.
E-mail: izdat@sstu.ru
Полная электронная версия журнала размещена в системе РИИЦ
в открытом доступе на платформе eLIBRARY.RU
Подписной индекс 70841 (каталог «Газеты. Журналы» на 2-е полугодие 2019 г.)
Свидетельство о регистрации СМИ *ПИ № ФС77-54621 от 01.07.2013*

Editor L.A. Skvortsova
Computer-assisted layout by O.V. Pachina
Translation into English by A.H. Askarova

Address: 77 Politekhnikeskaya Str., 410054, Saratov, Russia
Tel.: (8452) 99-87-63
E-mail: eltech@sstu.ru

Print date: 27.03.2019
Paper size: 60×84 1/8 Offset-Print
Conventional printed sheet 14,5 Publication base sheet 7,0
Circulation: 500 printed copies Order 28 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*