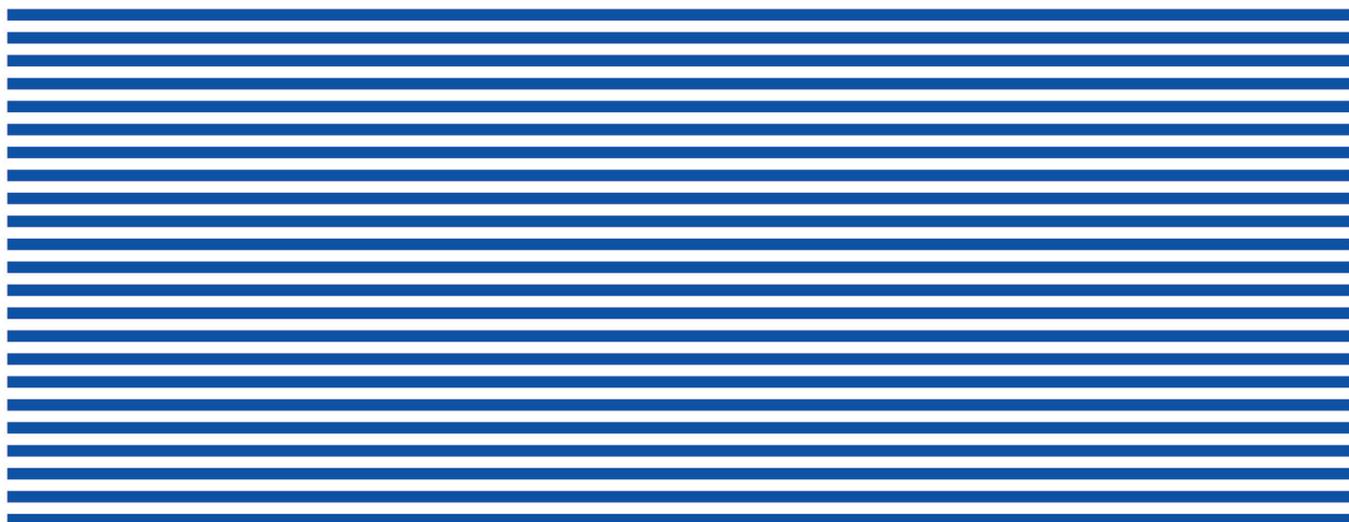




ISSN 2309-6020

ВОПРОСЫ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ



2023

№ 3 (40)



В журнале публикуются статьи по следующим научным специальностям перечня ВАК:

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

Издается с ноября 2013 года

Выходит один раз в квартал

№ 3 (40)
Сентябрь 2023

ВОПРОСЫ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

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

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

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

Редакционная коллегия

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

Since November 2013
Published Quarterly

№ 3 (40)
September 2023

JOURNAL OF ELECTROTECHNICS

Scientific and Technical Publication

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

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

Editor-in-Chief

ARTYUKHOV IVAN IVANOVICH

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

Assistant to the Editor-in-Chief

BEKRENEV NIKOLAY VALERIEVICH

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

Chief Executive Officer

MOLOT SVETLANA VIKTOROVNA

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

Editorial Board Members

A.A. BAZAROV

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

V.V. VAKHNINA

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

V.G. GOLDSTEIN

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

Yu.V. GULYAEV

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

V.B. DEMIDOVICH

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

Yu.B. KAZAKOV

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

A.N. MAKAROV

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

G.A. MOROZOV

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

Yu.P. PERELIGIN

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

A.F. REZCHIKOV

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

I.V. RODIONOV

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

F.N. SARAPULOV

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

Yu.B. TOMASHEVSKY

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

A.A. FOMIN

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

V.N. KHMELEV

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

V.A. TSAREV

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

СОДЕРЖАНИЕ

ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЯ И ЭЛЕКТРОФИЗИКА

Винтер Э.Р., Первухин М.В. Исследование процесса магнетогидродинамической сепарации расплава алюминия в каналах индукционного устройства канального типа.....	5
Скупинский А.В., Садовсков И.Д., Паршиков О.А., Аврамов М.В., Злобина И.В., Бекренев Н.В. СВЧ технологическая установка повышения прочности и эластичности уплотнительных элементов магистральных трубопроводов.....	15
Щелкунов А.Ю., Фомин А.А. Численное моделирование и экспериментальное исследование процесса высокотемпературной индукционной обработки титановых шаровых компонентов.....	28
Злобина И.В., Бекренев Н.В., Кондратов Д.В. Влияние коэффициента армирования и наполнителя полимерных композиционных материалов на уровень поглощенной мощности СВЧ электромагнитного поля	38
Никифоров А.А., Байбурин В.Б., Пахомов Я.А., Мещанов В. П., Комаров В.В., Дорошенко В.М. Портативная автоматическая система управления процессом охлаждения магнетронного генератора.....	48

Перинская И.В., Перинский В.В., Родионов И.В., Куц Л.Е. Ионно-лучевое формирование серебро-содержащей поверхности титана повышенной твердости и усталостной прочности	53
---	----

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

Шилин А.Н., Макартичян С.В., Жабин С.С. Цифровой емкостный уровнемер диэлектрических жидкостей с компенсацией нестабильности уровня.....	61
---	----

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

Стариков А.В., Косорлуков И.А., Чубаров К.М. Наблюдатель динамического уровня жидкости в нефтяной скважине.....	72
Вахнина В.В., Марков Е.В. Разработка модели нечеткой логики по методу Роджерса для достоверного определения дефектов в силовых масляных трансформаторах	78
К сведению авторов	87

CONTENTS

ELECTROTECHNOLOGY AND ELECTROPHYSICS

Vinter E.R., Pervukhin M.V. Study of magnetohydrodynamic separation processes of aluminum melt in the channel-type induction unit	5
Skupinsky A.V., Sadovskov I.D., Parshikov O.A., Аврамов М.В., Zlobina I.V., Bekrenev N.V. Microwave technological unit for increasing toughness and elasticity of sealing structures in long-distance pipelines.....	15
Shchelkunov A.Yu., Fomin A.A. Numerical simulation and experimental studies of induction heat treatment of titanium ball components	28
Zlobina I.V., Bekrenev N.V., Kondratov D.V. Effect of reinforcement ratio and fillers for polymer composites on the rate of microwave power absorption	38
Nikiforov A.A., Bayburin V.B., Pakhomov Ya.A., Meshchanov V.V., Komarov V.V., Doroshenko V.M. Portable automatic control system for cooling the magnetron generator	48

Perinskaya I.V., Perinsky V.V., Rodionov I.V., Kuts L.E. Ion implantation of silver nanoparticles on titanium surface of increased hardness and fatigue strength.....	53
---	----

INFORMATION MEASURING AND CONTROL SYSTEMS

Shilin A.N., Makartichyan S.V., Zhabin S.S. Digital capacitive level meter for dielectric liquids with level instability compensation	61
--	----

ELECTRICAL COMPLEXES AND SYSTEMS

Starikov A.V., Kosorlukov I.A., Chubarov K.M. Observer of the dynamic liquid level in the oil well	72
Vakhnina V.V., Markov E.V. Development of a fuzzy logic model according to the rogers method for reliable detection of defects in power oil transformers	78
Information for Authors	87

ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЯ И ЭЛЕКТРОФИЗИКА

УДК 537.8, 669.2

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА МАГНИТОГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ СЕПАРАЦИИ РАСПЛАВА АЛЮМИНИЯ В КАНАЛАХ ИНДУКЦИОННОГО УСТРОЙСТВА КАНАЛЬНОГО ТИПА

Э.Р. Винтер, М.В. Первухин

STUDY OF MAGNETOHYDRODYNAMIC SEPARATION PROCESSES OF ALUMINUM MELT IN THE CHANNEL-TYPE INDUCTION UNIT

E.R. Vinter, M.V. Pervukhin

Работа посвящена численному моделированию процесса магнетогидродинамической (МГД) сепарации расплава алюминия в индукционном устройстве канального типа. Представлены результаты расчета эффективности очистки частиц неметаллических включений посредством МГД сепарации. Определено влияние электромагнитной силы и гидродинамических течений на процесс миграции частиц в жидком металле. Показано, что частицы размером более 20 мкм имеют явную тенденцию к аккумуляции на стенках МГД канала МГД сепаратора. Проведен расчет распределения концентрации частиц в потоке расплава алюминия с учетом явления коагуляции, обусловленной различными механизмами. Установлено, что явление коагуляции существенно влияет на процесс МГД сепарации частиц неметаллических включений размером 2-20 мкм, а повысить интенсивность коагуляции возможно путем изменения конфигурации канала и приложенного электромагнитного поля.

Ключевые слова: магнитная гидродинамика, МГД сепарация, электромагнитное поле, электромагнитная сепарация, алюминиевые сплавы, электромагнитные силы

The research focuses on numerical calculation of the process of magnetohydrodynamic (MHD) separation of aluminum melt in the channel-type induction device. The study presents the calculated efficiency of non-metallic inclusions removal through MHD separation. The investigation examines the impact of electromagnetic forces and hydrodynamic flows on the migration of particles in liquid metal. The findings demonstrate a pronounced tendency for particles larger than 20 μm to accumulate on the walls of the MHD channel within the separator. Distribution of particle concentration within the aluminum melt flow is calculated, considering the phenomenon of coagulation caused by various mechanisms. The study demonstrates that coagulation has a substantial impact on the process of MHD separation for the particles ranging from 2 to 20 μm in size. Furthermore, modifying the configuration of the channel and adjusting the applied electromagnetic field can increase the intensity of coagulation.

Keywords: magnetohydrodynamics, MHD separation, electromagnetic field, electromagnetic separation, aluminum alloys, electromagnetic forces

Введение

В современном металлургическом производстве алюминиевых сплавов неотъемлемой частью технологического процесса является очистка жидкого металла от твердых неметаллических включений, присутствующих в расплаве алюминия в формах оксидов, карбидов, боридов, нитридов и др. Основным элементом загрязнения является оксид алюминия Al_2O_3 , присутствие которого в расплаве на стадии литья может приводить к браку конечной продукции. Согласно требованиям, в серийном производстве алюминия общее содержание твердых неметаллических включений должно быть не более 0,1-0,3 мм²/кг [1]. В случае же производства продукции под прессование крайне нежелательно содержание в расплаве примесей уже размером более 20 мкм.

Основным методом очистки алюминиевых сплавов от твердых неметаллических включений в современном производстве является фильтрование, который реализуется посредством применения огнеупорных фильтров различной структуры и конфигурации [1]. Несмотря на относительную простоту реализации систем фильтрования, требования современной цветной металлургии обуславливают ряд проблем, которые касаются малого ресурса фильтрующих элементов, сложности и дороговизны системы предварительного прогрева, а в случае литья некоторых сплавов – невозможность применения данного метода очистки [2].

Магнитогидродинамическая (МГД) сепарация [3] жидких металлов является одним из перспективных способов очистки жидких металлов, которая не требует контактирования с жидким металлом каких-либо рабочих органов, а эффективность процесса определяется величиной и конфигурацией электромагнитного поля в области технологического процесса. Более того, в присутствии электромагнитного поля легко интенсифицировать и вспомогательные процессы, положительно влияющие на эффективность очистки, например явление коагуляции частиц, что открывает воз-

можности для удаления частиц таких размеров, которые не удаляются традиционными устройствами фильтрования.

Тем не менее, обладая рядом технологических преимуществ перед традиционной технологией фильтрования, внедрение устройств МГД-сепарации в настоящее время ограничивается по нескольким причинам:

- слабая разработанность теоретических основ процесса с учетом магнитогидродинамических явлений;
- отсутствие теоретического обоснования эффективности процесса МГД сепарации для алюминиевых сплавов;
- отсутствие надежных и простых конструкций с учетом особенностей алюминиевого производства, таких как высокая химическая агрессивность металла, легкая окисляемость и относительно высокие рабочие температуры (660-800° С).

Из опыта эксплуатации индукционных устройств канального типа известно, что при нагреве жидкого металла существует проблема зарастания каналов агрегатов из-за влияния сепарирующего эффекта электромагнитного поля [4, 5], что в случае плавильных агрегатов однозначно является негативным фактором. С другой стороны, в случае непрерывного литья слитков с применением индукционного разливочного агрегата канального типа было отмечено, что количество неметаллических включений значительно сокращается, что явно несет в себе технологический эффект. Более того, теоретически и экспериментально была подтверждена возможность эффективной коагуляции частиц неметаллических включений в каналах индукционных канальных печей [6], что дополнительно позволяет повысить эффективность удаления газовых и твердых неметаллических включений.

Таким образом, по причине изложенных факторов актуальными являются исследование и разработка основ технологии и устройства очистки алюминиевых расплавов от твердых неметаллических включений на базе индукционного устройства канального типа.

1. Математическое описание процесса МГД сепарации

В общем виде схема многодисциплинарного процесса МГД сепарации показана на рис. 1 а, который, как видно, характеризуется множеством связей физических полей различной природы друг с другом.

Электромагнитные процессы в МГД устройствах металлургического назначения описываются системой уравнений Максвелла для медленно движущихся изотропных сред, при этом токами смещения пренебрегают из-за относительно высокой проводимости жидкого металла [7].

Основной интерес в устройствах МГД-сепарации представляет распределение объемных электромагнитных сил f_{em} в проводящей жидкости, которые возникают при взаимодействии векторов плотности тока и магнитной индукции, объемная плот-

ность которых определяется как $f_{em} = \frac{1}{2} \text{Re}(\dot{\delta} \times \mathbf{B}^*)$, где $\dot{\delta}$ – комплексный вектор плотности тока; \mathbf{B}^* – комплексно-сопряженный вектор магнитной индукции.

Движение жидкого металла в электромагнитном поле можно рассматривать как движение несжимаемой жидкости, которое описывается уравнениями движения, сохранения массы и энергии [7]. При этом уравнения движения и энергии дополняются источниковыми членами объемных электромагнитных сил и удельной джоулевой мощности. Для учета турбулентных потоков осуществляется разложение скорости расплава v на осредненную и пульсационную составляющие, а система уравнений дополняется уравнениями на турбулентные энергетические характеристики согласно RANS подходу.

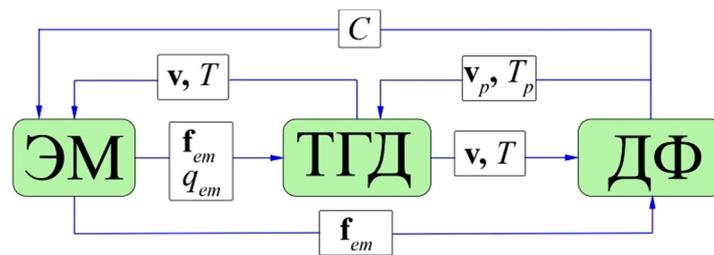


Рис. 1. Обобщенная схема связи физических полей в процессе МГД сепарации

В неоднородных турбулентных потоках движение дискретной частицы можно описать с помощью подхода Эйлера – Лагранжа [8], который хорошо себя зарекомендовал для задач данного типа:

$$m_p \frac{d v_p}{d t} = F_B + F_D + F_{VM} + F_L + F_{EM}, \quad (1)$$

где m_p и v_p – масса и вектор скорости частицы соответственно; F_B – вектор силы плавучести; F_D – вектор силы гидродинамического сопротивления; F_{VM} – вектор силы добавленной массы; F_L – подъемная сила из-за сдвиговых потоков жидкости.

В уравнении (1) последний член представляет собой электромагнитную силу выталкивания, действующую на непроводящую частицу в проводящей жидкости во внешнем магнитном поле [9]:

$$F_{EM} = -V_p \frac{3}{4} f_{em}. \quad (2)$$

Для описания распределения концентрации C частиц неметаллических включений с учетом их коагуляции используется метод размерной группировки частиц (Particle-Size-Grouping Method – PSG) [10]. Суть метода состоит в разбиении непрерывного размерного спектра частиц на M групп, имеющих характеристические объемы от V_1 до V_M . При этом объем частицы каждой группы определяется таким образом, чтобы отношение объема частиц некоторой группы к объему следующей группы было равно постоянному значению

$$R_V = \frac{v_k}{v_{k-1}} = \text{const.}$$

В результате, принимая во внимание подход размерной группировки и различные сценарии коагуляции, которые подробно описаны в [6, 11, 12], распределение концентрации частиц размерной группы k можно описать уравнением

$$\frac{\partial C_k}{\partial t} + \nabla \left((\mathbf{v} + \mathbf{v}_k^{em} + \mathbf{v}_k^g) C_k - \Gamma_d \nabla C_k \right) = S_k^{birth} - S_k^{death}, \quad (3)$$

где C_k – концентрация частиц группы k ; Γ_d – коэффициент диффузии; S_k^{birth} – источник член генерации частиц группы k из-за коагуляции частиц меньших размеров; S_k^{death} – источник член снижения концентрации группы k частиц из коагуляции частиц данной группы с более крупными частицами.

2. Постановка задачи численного моделирования

Ввиду многодисциплинарности проблемы для корректного теоретического описания процесса МГД сепарации необходимо применение численных методов и современных вычислительных программных комплексов. Как следует из рис. 1, в исходном виде задача достаточно сложна для постановки и решения из-за наличия множества взаимных связей различных процессов друг на друга. На основе безразмерных критериев из теории физического подобия [13] и теории дисперсных систем [14] математическая модель построена с учетом аспектов и допущений, которые подробно описаны в [15]. На основании принятых допущений данная задача моделирования разбивается на три последовательных этапа: электромагнитная задача; термогидродинамическая задача; задача распределения частиц неметаллических включений в расплаве. Таким образом, обратные связи, показанные на рис. 1, исключаются.

На рис. 2 изображена геометрия электромагнитной системы исследуемого устройства. Область жидкого металла 1 представляет собой несколько прямолинейных участков, соединённых между со-

бой, верхний горизонтальный канал разделен проводящей перегородкой 2 на приемную и выходную камеры. Входной вертикальный канал охвачен П-образным магнитопроводом 3, на стержне которого располагается обмотка 4. Конфигурация катушки позволяет создавать в области расплава пульсирующее или вращающееся электромагнитное поле (ЭМП).

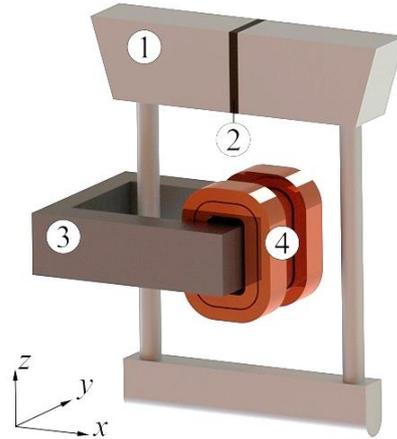


Рис. 2. Геометрия исследуемой электромагнитной системы

Источниковые члены в (3) учитывают седиментационный [11], электромагнитный [6, 11] и турбулентный [12] механизмы коагуляции. В уравнении (3) компоненты скорости в конвективном члене $\mathbf{v}_k^{em}, \mathbf{v}_k^g$ являются предельными скоростями миграции частиц под действием электромагнитной и гравитационной сил соответственно и рассчитываются согласно [11].

Расчет проводится для различного размера канала, который выражается в безразмерной форме $r_{ch}^* = r_{ch} / \Delta_{em}$, где r_{ch} – радиус канала; Δ_{em} – глубина проникновения электромагнитного поля в расплав. Процесс МГД сепарации был исследован при пульсирующем и вращающемся магнитном поле в канале с жидким металлом. Удельная мощность в канале с расплавом составляет $4 \cdot 10^6$ Вт/м³, а производительность по расплаву – 1 т/ч.

Свойства расплава соответствуют физическим свойствам жидкого алюминия. Расчет распределения облака дисперсных частиц в

потоке жидкого металла под действием внешнего магнитного поля проведен для четырех размерных фракций: 5 мкм; 10 мкм; 20 мкм; 50 мкм. Количество частиц каждой фракции – 10 000. Физические свойства дискретных частиц соответствуют свойствам наиболее распространенных твердых неметаллических включений в расплаве алюминия, а именно оксида алюминия [1].

Для инициализации дискретных частиц в объеме жидкого металла на входной границе осуществляется инъекция частиц. На граничных поверхностях для дискретной фазы выполняется граничное условие захвата частицы (частица считается удаленной из расчетной области) в случае, если её скорость ниже критического значения, иначе применяется условие полуупругого столкновения с заданием коэффициентов отталкивания для нормальной и тангенциальной составляющих скоростей частицы [16]

Для расчета концентрации частиц методом PSG был взят диапазон характеристического размера от 2 мкм до 150 мкм. Начальная концентрация частиц C_0 в расплаве задается согласно данным лабораторных и промышленных экспериментальных исследований по определению содержания неметаллических включений в алюминиевом расплаве методом LIMSA [17, 18].

Так как в предложенной схеме рабочим участком МГД-сепарации является область вертикального канала, интерес представляет

анализ влияния параметров на характер протекания МГД-процессов сепарации и коагуляции в данной области. В результате для проведения комплексного анализа и выявления общих закономерностей протекания процессов МГД-сепарации и коагуляции частиц неметаллических включений в каналах устройства МГД-сепарации расчетная область задачи распределения дисперсных непроводящих частиц ограничивается только прямолинейным вертикальным участком канала индукционной единицы.

Математическая модель реализована в программных комплексах численного моделирования Ansys Maxwell (МКЭ) и Fluent (МКО) с применением дополнительных пользовательских функций (UDF), реализованных на языке программирования «С».

3. Анализ результатов численного моделирования

На рис. 3 а показаны произвольные траектории частиц различного размера. Траектории частиц имеют сложный характер, обусловленный структурой гидродинамических потоков. Характерным поведением многих частиц является их миграция в пристеночную область под действием рециркулирующих потоков расплава, а затем перемещение в вертикальном направлении вдоль поверхности стенки, что обусловлено действием высокой плотности ЭМ сил в данной области.

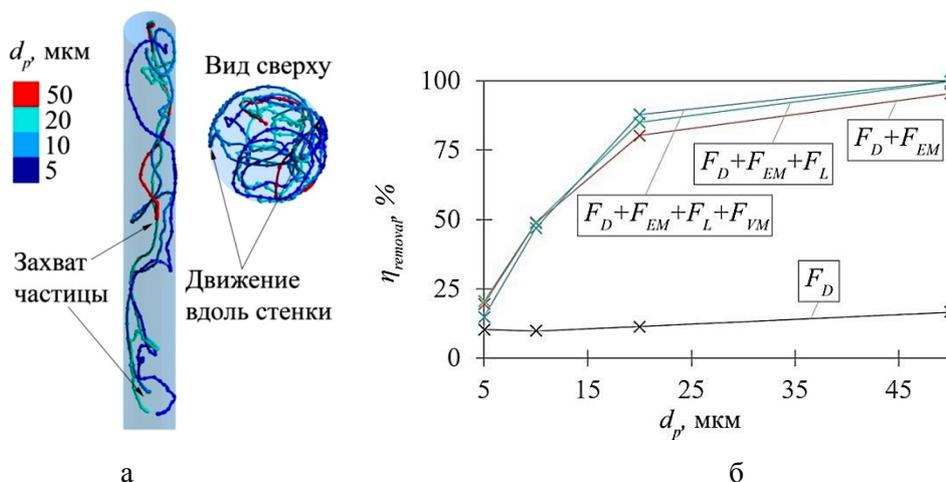


Рис. 3. Траектория произвольных частиц различного размера в расплаве (а) и зависимость эффективности очистки от размера частиц при учете различных сил, действующих на частицу в потоке расплава

Была проведена оценка вклада различных членов уравнения (1) на процесс удаления частиц из расплава. Рис. 3 б иллюстрирует, что ЭМ сила выталкивания оказывает наибольший вклад в процесс удаления частиц неметаллических включений из расплава алюминия. Другие источники движения частицы также оказывают влияние на эффективность удаления, однако этот вклад не столь существен. Так, например, подъемная сила способствует увеличению эффективности удаления частиц размером 20 и 50 мкм на 5-10 %, в то время как для частиц размером 5 и 10 мкм наблюдается незначительное снижение эффективности при учете подъемной силы.

На рис. 4 а приведены зависимости эффективности очистки от относительного размера канала. С увеличением размера канала эффективность очистки снижается по линейному закону для частиц 10 и 20 мкм. Для частиц 5 мкм наблюдается более инте-

ресная зависимость, которая при изменении относительного радиуса канала с 0,5 до 1 незначительно уменьшается, а при дальнейшем увеличении наблюдается рост эффективности. На рис. 4 б показаны графики эффективности очистки при воздействии на расплав вращающегося ЭМП. При $r_{ch}^* < 1$ вращающееся ЭМП не оказывает существенного влияния на величину эффективности для обоих случаев. Однако наблюдается наличие минимума эффективности в диапазоне $0,8 < r_{ch}^* < 1$, что можно объяснить интенсификацией гидродинамических потоков и снижением плотности ЭМ сил, что и ведет к снижению эффективности. Дальнейший рост эффективности может быть обусловлен теми же причинами, которые были описаны выше, объясняющими поведение частиц размером 5 мкм в цилиндрическом канале с размером $r_{ch}^* > 1$.

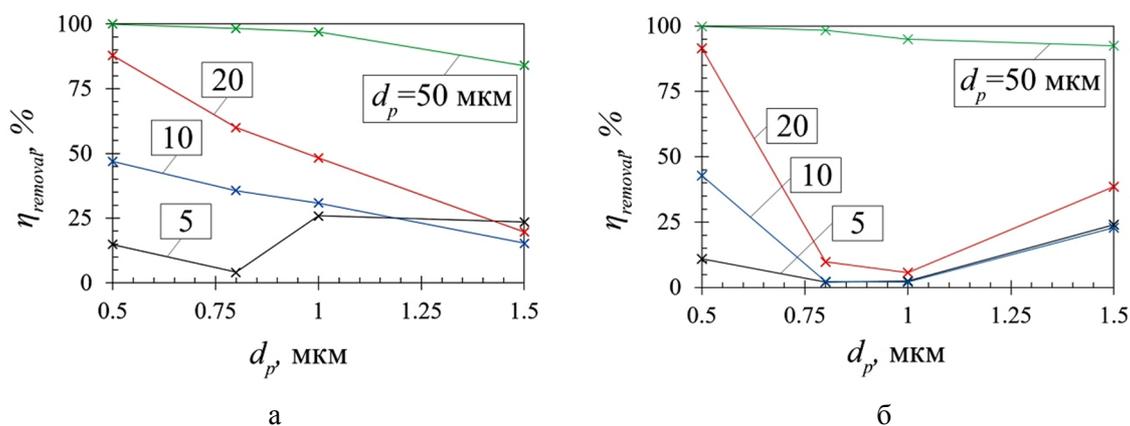


Рис. 4. Зависимость эффективности очистки от размера канала при воздействии пульсирующим (а) и вращающимся (б) ЭМП

Очевидно, что если частица не была удалена под действием выталкивающей ЭМ силы, то она под действием турбулентного потока будет мигрировать к выходу. Время миграции частицы к выходу в турбулентном потоке при этом является ключевым фактором, определяющим возможность её коагуляции с другими частицами. Как показывает анализ расчетного времени пребывания частицы (англ. Particle residence time), увеличение размера канала позволяет существенно повысить среднее время пре-

бывания частиц в жидкости: от 2 до 4 секунд для $r_{ch}^* = 0,5$, и от 20 до 35 секунд для $r_{ch}^* = 1,5$ в зависимости от конфигурации ЭМП.

На рис. 5 показано распределение концентрации захваченных частиц различного размера на внешней поверхности объема расплава (стенке), которые были вытеснены под действием ЭМ силы выталкивания для $r_{ch}^* = 0,5$. Для удобства анализа граница

расплава развернута в плоскость. У частиц 20-50 мкм наблюдается тенденция к аккумуляции в верхней части канала в азимутальной плоскости $170 \leq \phi \leq 45$. Данный характер аккумуляции обусловлен тем, что, попав в каналную область, частица движется по винтообразной траектории, перемещаясь из внутреннего объема расплава к области периферии. Достигнув пристеночной области, частица также продолжает двигаться вдоль границы, пока её скорость не станет ниже v_{cr} .

Распределения концентрации частиц различного размера в канале с расплавом с учетом коагуляции показаны на рис. 6. Как видно, в процессе МГД сепарации происходит существенное перераспределение концентрации в объеме расплава по сравнению с исходной концентрацией C_0 .

В случае канала с $r_{ch}^* = 0,5$ частицы с характеристическим размером в диапазоне 2-9,2 мкм распределяются в объеме канала равномерно. Концентрация частиц размером 42 мкм имеет неоднородный профиль по длине канала, что объясняется значительным влиянием ЭМ силы выталкивания на частицы данного размера, в результате чего наблюдается постепенное снижение концентрации от входа к выходу. Рис. 6 также показывает, что в объеме расплава образуются частицы размером 106 мкм, которых в исходном содержании не было, однако зона их образования достаточно локальна, а концентрация не достигает существенных значений, так как частицы данного размера эффективно удаляются под действием ЭМ силы выталкивания.

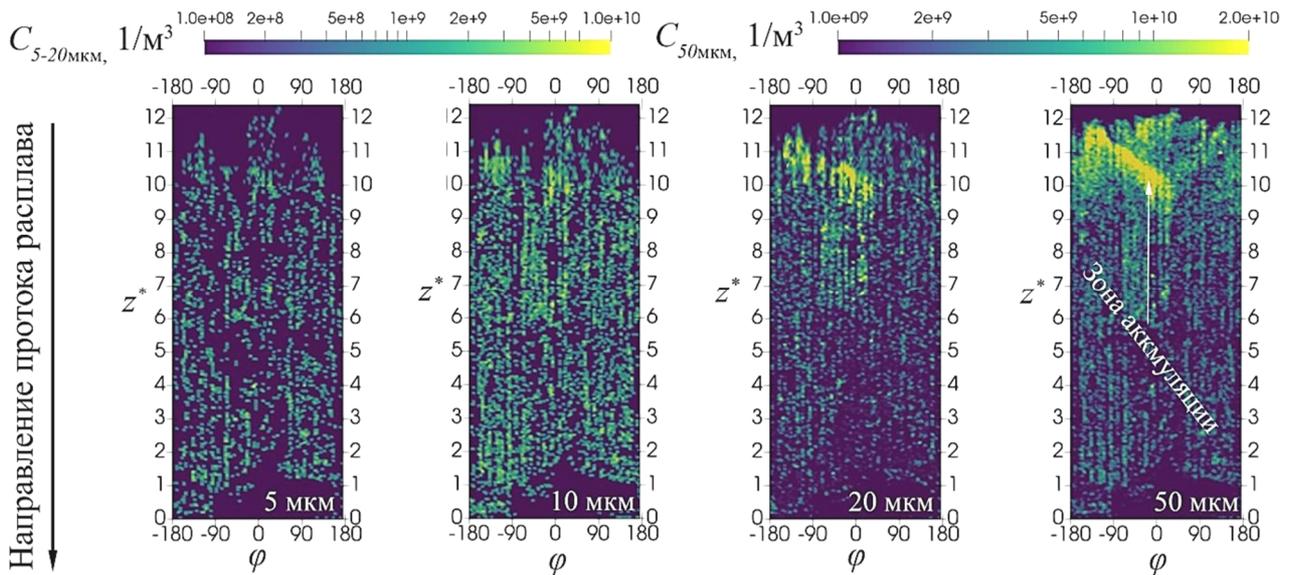


Рис. 5. Распределение захваченных частиц на поверхности расчетной области (стенке фильтрующего элемента)

В распределении концентрации частиц различного размера для цилиндрического канала с $r_{ch}^* = 1,5$ при воздействии вращающегося ЭМП для всех размеров включений наблюдается их повышенная концентрация в пристеночной области. Если для крупных частиц это можно объяснить влиянием непосредственно ЭМ силы выталкивания, то для частиц менее 20 мкм – это, скорее, влияние коагуляции из-за механиз-

ма электромагнитной седиментации. Так как при $r_{ch}^* = 1,5$ распределение ЭМ силы очень неоднородно по радиусу, это приводит к тому, что в пристеночных слоях интенсивность коагуляции за счет данного механизма значительно выше, из-за чего можно наблюдать локальные пристеночные максимумы концентрации.

Также в данном случае концентрация частиц с характеристическим размером да-

же более 42 мкм распределяется достаточно равномерно в радиальном и аксиальном направлениях канала, что обусловлено снижением сепарирующего действия и интенсификацией турбулентного вращательного потока в канале. В результате образование крупных конгломератов частиц происходит равномерно в объеме канала.

С целью оценки влияния процесса коагуляции на распределение частиц и их удаление проведено сравнение результатов расчета, полученных методом Эйлера-Лагранжа (уравнение (1)) и методом размерной группировки (уравнение (3)). На рис. 7 а изображены расчетные графики эффективности удаления частиц различными методами. Как видно, показания эффективности очистки для частиц 20

и 50 мкм, полученные методом Эйлера – Лагранжа, хорошо согласуются с показаниями метода PSG для данного диапазона частиц. Однако можно видеть, что результат имеет существенные отличия в значениях эффективности очистки частиц размером в диапазоне 2-20 мкм. В методе Эйлера – Лагранжа закономерным результатом является снижение эффективности очистки с уменьшением размера частиц, в то время как характер кривой эффективности с учетом коагуляции имеет несколько иной характер. В методе PSG расчетная эффективность удаления частиц 2-10 мкм составляет 52-60 %, при этом основным механизмом снижения их содержания в объеме является коагуляция.

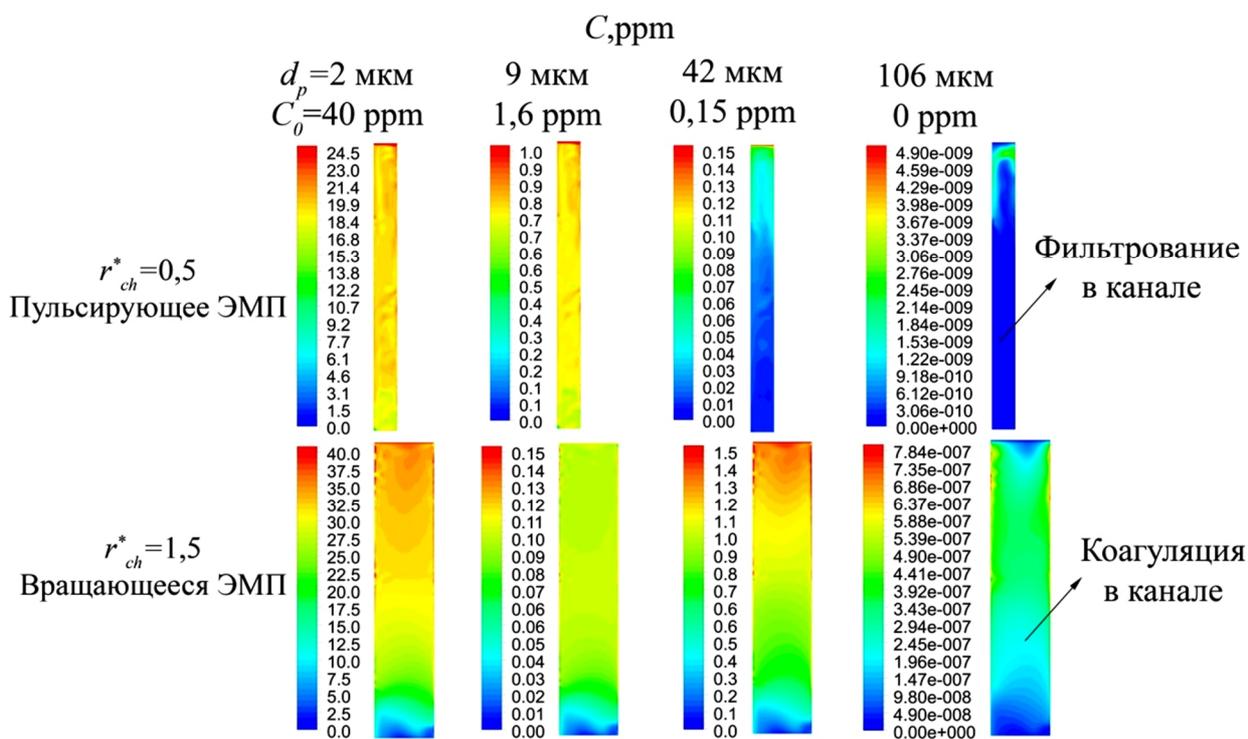


Рис. 6. Распределение концентрации частиц различного характеристического размера в канале

В результате коагуляция обеспечивает снижение содержания концентрации частиц < 20 мкм путем образования их в более крупные конгломераты, которые в дальнейшем могут быть эффективно удалены под действием процессов седиментации и ЭМ силы выталкивания

или традиционных методов очистки. Таким образом, важно отметить, что рассмотрение процесса МГД сепарации только с применением метода Эйлера – Лагранжа некорректно, если важно учитывать процессы удаления частиц размером менее 20 мкм.

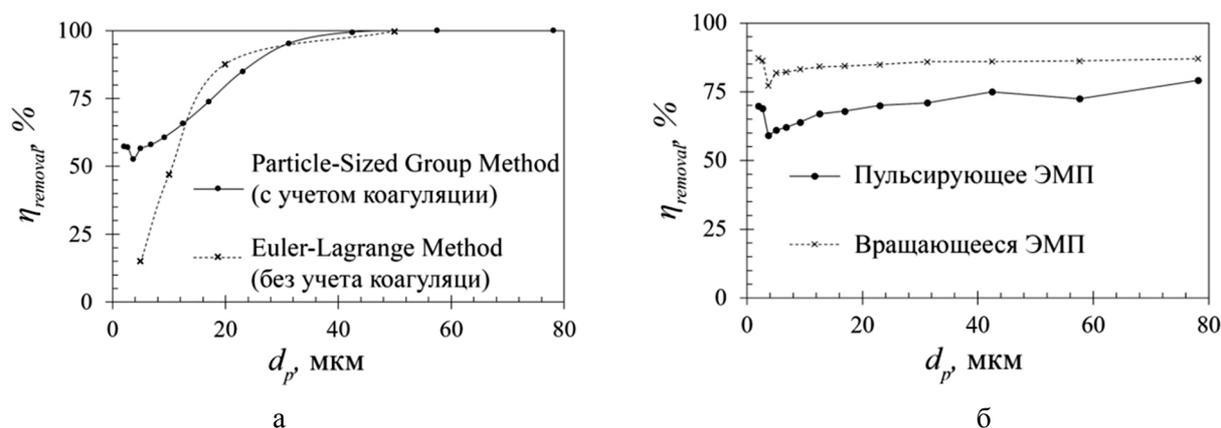


Рис. 7. Сравнение эффективности очистки для различных размеров включений, полученной методом Эйлера – Лагранжа и PSG (а), и зависимость эффективности очистки от размера включений при различной конфигурации электромагнитного поля

Графики эффективности на рис. 7 б подтверждают возможность увеличения интенсивности коагуляции посредством увеличения размера канала. Из графиков видно, что увеличение размера канала позволяет добиться повышения эффективности очистки включений размером менее 20 мкм вплоть до 85 % в зависимости от конфигурации канала и ЭМ поля.

Заключение

Из анализа результатов численного моделирования процесса МГД сепарации было установлено:

1. Основным фактором, определяющим эффективность МГД сепарации частиц неметаллических включений размером более 5 мкм, является электромагнитная сила выталкивания, в то время как МГД течения расплава не вносят существенного вклада в механизм очистки.

2. Частицы размером более 20 мкм могут эффективно удаляться через механизм

МГД сепарации при относительном размере канала $r_{ch}^* < 1$. При этом частицы данного размера имеют выраженные зоны аккумуляции на стенке канала МГД сепаратора.

3. Явление коагуляции оказывает существенное влияние на процесс удаления частиц с характеристическим размером до 20 мкм. Отсюда следует вывод, что рассмотрение процесса МГД сепарации без учета механизма коагуляции некорректно, если важно учитывать процессы удаления частиц размером менее 20 мкм.

3. Увеличение размера канала и организация вращательного движения жидкого металла в канале МГД сепаратора приводят к значительному повышению эффективности очистки частиц неметаллических включений размером 2-16 мкм за счет интенсификации процессов коагуляции.

Поддержка. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-38-90137.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Макаров Г.С.** Слитки из алюминиевых сплавов с магнием и кремнием для прессования. Основы производства. Москва: Интернет Инжиниринг, 2011. 528 с.

2. **Aubrey L.S., Olson R., Smith D.D.** Development of a phosphate-free reticulated foam filter material for aluminum cast houses // Materials science forum. Trans. Tech. Publications Ltd. 2010. P. 137-146.

3. Application of electromagnetic (EM) separation technology to metal refining processes: a review / L. Zhang, S. Wang, A. Dong, J. Gao, L.N.W. Damoah // Metallurgical and materials transactions. В. 2014. P. 2153-2185.

4. О некоторых факторах, влияющих на зарастание окислами каналов индукционной плавильной печи / В.А. Золотухин,

А.А. Темеров, Ю.В. Юдин, Ж.Л. Евхитов // Промышленная энергетика. 1981. С. 12-14.

5. Behavior of non-metallic inclusions in a continuous casting tundish with channel type induction heating / Q. Wang, D. Qi, B. Li, F. Tsukihashi // ISIJ international. 2014. P. 2796-2805.

6. Полидисперсное МГД течение с коагуляцией частиц в каналах индукционных печей для приготовления алюминиевых сплавов / В.И. Блинов, Ю.М. Гориславец, В.А. Золотухин и др.: препринт. Киев: ИЭД АН УССР, 1986.

7. **Davidson P.A.** An Introduction to Magnetohydrodynamics. Cambridge: Cambridge university press, 2016. 431 p.

8. **Хрипченко С.Ю., Долгих В.М., Сираев Р.Р.** Распределение микрочастиц диборида титана, введенных в алюминиевый слиток при помощи МГД-перемешивания кристаллизующегося расплава // Вычислительная механика сплошных сред. 2022. С. 438-448.

9. **Leenov D., Kolin A.** Theory of electromagnetophoresis. I. Magnetohydrodynamic forces experienced by spherical and symmetrically oriented cylindrical particles // Journal of Chemical Physics. 1954. P. 683-689.

10. Particle-size-grouping method of inclusion agglomeration and its application to water model experiments / T. Nakaoka, S. Taniguchi, K. Matsumoto S.T. Johansen // ISIJ international. 2001. P. 1103-1111.

11. Numerical simulation of collision-coalescence and removal of inclusion in tundish with channel type induction heating /

H. Lei, B. Yang, Q. Bi et al. // ISIJ International. 2019. P. 1811-1819.

12. **Saffman P.G.F., Turner J.S.** On the collision of drops in turbulent clouds // Journal of Fluid Mechanics. 1956. P. 16-30.

13. **Гельфгат Ю.М., Горбунов Л.А., Витковский И.В.** Магнитогидродинамическое дросселирование и управление жидкометаллическими потоками. Рига: Зинатне, 1989. 312 с.

14. **Loth E.** Numerical approaches for motion of dispersed particles, droplets and bubbles // Progress in energy and combustion science. 2000. P. 161-223.

15. **Vinter E.R., Pervukhin M.V., Timofeev V.N.** Numerical Study of Magnetohydrodynamic Processes and Behavior of Non-Conductive Disperse Particles in Molten Aluminium within an Induction Channel Device // 23rd International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM). 2022. P. 628-636.

16. Solid inclusions in an electromagnetically induced recirculated turbulent flow: Simulation and experiment / M. Ščepanskis, A. Jakovičs, E. Baake, B. Nacke // International Journal of Multiphase flow. 2014. P. 19-27

17. **Badowski M., Instone S.** Measurement of non-metallic inclusions in the size range of 10-20 μm by LiMCA // Light Metals 2012. 2012. P. 1077-1083.

18. **Guthrie R.I.L., Li M.** In situ detection of inclusions in liquid metals: Part II. Metallurgical applications of LiMCA systems // Metallurgical and Materials Transactions. B. 2001. P. 1081-1093.

Винтер Эдуард Робертович – ассистент кафедры «Электротехника» Сибирского федерального университета

Первухин Михаил Викторович – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Электротехника» Сибирского федерального университета

Eduard R. Vinter – Assistant Lecturer, Department of Electrical Engineering, Siberian Federal University.

Mikhail V. Pervukhin – Dr.Sci. Tech., Professor, Department of Electrical Engineering, Siberian Federal University

Статья поступила в редакцию 14.07.23, принята к опубликованию 04.09.23

УДК 621-039-419; 620.22-419; 537.868

СВЧ ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ УСТАНОВКА ПОВЫШЕНИЯ ПРОЧНОСТИ И ЭЛАСТИЧНОСТИ УПЛОТНИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

**А.В. Скупинский, И.Д. Садовсков, О.А. Паршиков,
М.В. Аврамов, И.В. Злобина, Н.В. Бекренев**

MICROWAVE TECHNOLOGICAL UNIT FOR INCREASING TOUGHNESS AND ELASTICITY OF SEALING STRUCTURES IN LONG-DISTANCE PIPELINES

**A.V. Skupinsky, I. D. Sadovskov, O.A. Parshikov,
M.V. Avramov, I.V. Zlobina, N.V. Bekrenev**

Выполнены исследования и макетно-экспериментальные работы по изучению влияния воздействия СВЧ электромагнитного поля на физико-механические свойства уплотнительных элементов из резины 2-й группы магистральных газопроводов. Показано, что при использовании плотности потока энергии $(18-20) \times 10^4$ мкВт/см² и времени воздействия, определяемого диаметром поперечного сечения уплотнительного кольца при условии нагрева изделия до температуры $(60-70)^\circ\text{C}$, обеспечивается значимое увеличение прочности при разрыве, относительного удлинения, эластичности, а также снижение остаточной деформации как новых изделий, так и изделий после регламентированной наработки. Разработан, изготовлен и передан в опытную эксплуатацию опытно-промышленный образец СВЧ технологической установки для обработки уплотнений диаметром от 40 до 1400 мм с программированием циклов и режимов при помощи подключаемого ноутбука. На основе результатов опытной эксплуатации установки разработаны новые алгоритмы динамической обработки, обеспечивающие снижение неравномерности нагрева изделий в СВЧ электромагнитном поле с $(25-30)^\circ\text{C}$ до $(5-7)^\circ\text{C}$, что позволяет существенно повысить их качественные показатели.

The research deals with prototyping and experimental work relating the microwave electromagnetic field effects on physical and mechanical properties of the gas lines sealing structures fabricated from the 2nd group rubber. It is shown that the use of the energy flux density at $(18-20) \times 10^4$ мкВт/см² and exposure time determined by the cross-sectional diameter of the sealing ring, provided the product is heated to the temperature of $(60-70)^\circ\text{C}$, a significant increase in tensile strength, elongation, elasticity, as well as a reduction in residual deformation of both new products and products provided after regulated operating life, is ensured. A prototype of the microwave technological unit for processing seals with the diameter from 40 to 1400 mm provided with cycles and modes programming system based on the plug-in laptop has been developed, manufactured and brought into pilot operation. Based on the results of the pilot operation of the unit, new dynamic processing algorithms have been developed to ensure a reduction in uneven heating of products in the microwave electromagnetic field from $(25-30)^\circ\text{C}$ to $(5-7)^\circ\text{C}$, which can significantly improve their quality indicators.

Ключевые слова: СВЧ технологическая установка, управление, технологические режимы, уплотнительные элементы газопроводов, прочность и эластичность

Введение

В современном машино- и агрегатостроении, а также энергетике, например в системах транспортировки энергоносителей, значительный объем конструктивных элементов приходится на трубопроводную арматуру: переключатели, фитинги, краны, дроссели, клапаны, уплотнения и т. п. Основным требованием к этим конструкциям является обеспечение долговечности сохранения герметичности соединений или систем регулирования расхода перемещающейся среды (жидкости или газа). При этом в наиболее тяжелых условиях оказываются уплотнительные резинотехнические изделия конструктивных элементов систем магистральной транспортировки природного газа (компрессорных станций, систем регулирования, систем подогрева и охлаждения, разветвителей трубопроводов и др.), поскольку они должны обеспечить герметичность соединений при длительном влиянии внешних температурных и химических факторов, связанных как с природными воздействиями, так и с воздействиями химических элементов, присущих природному газу, усиленных высокими давлениями. В трубопроводных газораспределительных системах контрольный уровень давления среды, при котором должна обеспечиваться герметичность, составляет 150 атм. при рабочем – до 100 атм. Герметичность соединений и фланцевых стыков обеспечивается кольцевыми резиновыми уплотнениями как круглого, так и профильного поперечного сечения от 3-4 до 20 мм диаметром от 20 до 1400 мм.

подавляющее большинство отечественных производителей трубопроводной арматуры и агрегатов управления изготавливают уплотнения из резины 2-3 групп с техническими требованиями по ГОСТ 18829-73. В соответствии с данным стандартом полный установленный срок службы данных уплотнений составляет не более 5 лет. По прошествии данного срока для надеж-

Keywords: *microwave technological installation, control, technological modes, sealing elements of gas pipelines, toughness and elasticity*

ной работы оборудования необходима замена уплотнения.

Газотурбинные газоперекачивающие агрегаты блочно-контейнерного типа оснащены многоступенчатым воздухоочистным устройством (циклонная и тонкая очистка), которое является основным элементом системы подготовки воздуха для газотурбинных двигателей, в значительной степени влияющим на долговечность двигателя и его КПД. В процессе эксплуатации вследствие воздействия внешних факторов и естественного процесса старения материала также наблюдается потеря эластичности резиновых уплотнительных колец мультициклонов воздухоочистного устройства. Потеря эластичности и растрескивание способствуют снижению герметичности стыков и ухудшению работы мультициклона, нарушению паспортных данных. В дальнейшем снижение степени очистки поступающего воздуха и уменьшение его количества из-за стравливания через уплотнения вызывает нарушение стабильной работы газоперекачивающего агрегата и износ его частей.

Резина, представляющая собой дисперсно-наполненный композиционный материал в виде синтетического каучука с углеродным наполнителем, обеспечивает определенное техническими условиями сочетание упруго-пластичных характеристик, которые при стягивании фланцев стыка формируют герметичность соединения. Под влиянием внешних факторов происходит деструкция резинового композита, проявляющаяся в снижении пластичности каучука из-за потери им текучих компонентов, что сопровождается снижением объемов каучуковой матрицы, расслоениями и местным повышением твердости. В конечном итоге уплотнение теряет герметичность, что может вызвать утечки газа и способствовать аварийной ситуации. В связи с общим ухудшением экологической ситуации подобные нарушения могут возникнуть ранее регламентного периода, когда

новые уплотнительные элементы не подготовлены к замене. В то же время новые уплотнительные элементы (особенно профильные крупногабаритные) имеют значительную стоимость, составляющую в среднем более 5 тыс. руб. за уплотнение. При замене уплотнений происходят значительные трудозатраты, сопряженные с необходимостью перекрытия соответствующего участка трубопровода и стравливания оставшегося в нем газа.

В связи с изложенным являются актуальными исследование и разработка технологических методов продления ресурса резинотехнических уплотнительных элементов, особенно больших габаритных размеров, а также восстановление эластичности бывших в употреблении уплотнений.

Для повышения качественных показателей неметаллических материалов применяются различные технологии физической или химической модификации, среди которых одним из весьма эффективных методов является воздействие микроволнового излучения, иначе – сверхвысокочастотного (СВЧ) электромагнитного поля. Известно, что СВЧ воздействие позволяет положительно влиять на процессы синтеза различных диэлектрических материалов, формирования композиции связующего с наполнителями и ее отверждения, способствуя качественной модификации последних [1-5]. Применительно к резинотехническим изделиям данный метод используется либо для утилизации изношенных изделий [6, 7], либо при вулканизации в производстве новой продукции в составе автоматических линий. Типовыми представителями СВЧ установок для вулканизации резинотехнических изделий являются автоматические линии Type 150-120-0/1-147 (Rubicon Gummitechpik und Maschinenbau GmbH, Германия), μ Wave Vacxx 50 (Германия), LU-YH-1000EBB (Китай), Grandtek (Китай), НВ-СВЧ-90 (НИИ РП, Россия), «Элмаш-Микро» (Россия). Однако указанное оборудование предназначено для эксплуатации в условиях крупнотоннажного массового производства, является узкоспециальным, обладает высокой энергоемкостью

(мощность СВЧ излучения составляет от 12 до 25 кВт). Габаритные размеры линий составляют от 9 до 11,6 м, средняя стоимость более 20 млн руб. [8-11]. По сверхвысокочастотному модифицированию уплотнительных резинотехнических материалов в составе изделия с целью повышения прочности, долговечности и эластичности с учетом обеспечения герметизирующих эффектов научно-техническая информация в настоящее время практически отсутствует.

Целью работы явилось обоснование схемного решения и разработка опытно-промышленного образца СВЧ технологической установки повышения прочности и эластичности уплотнительных элементов магистральных газопроводов и газораспределительной аппаратуры для эксплуатации в условиях многономенклатурного производства резинотехнических изделий в организациях, эксплуатирующих магистральные газопроводы.

Основная часть

Подход к достижению поставленной цели базируется на возможности направленного изменения свойств отвержденных полимерных композиционных материалов, армированных тканями на основе углеродных, стеклянных и арамидных волокон, о чем свидетельствуют исследования ряда зарубежных авторов и выполненных, начиная с 2015 года, в СГТУ имени Гагарина Ю.А. [12-17]. Было сделано предположение, подтвержденное комплексными экспериментальными исследованиями, что механизм влияния СВЧ электромагнитного поля на отвержденные системы, заключается во временном размягчении и повышении эластичности связующего в результате СВЧ диэлектрического нагрева, вследствие чего возрастает количество поверхностей контакта матрицы и наполнителя, что после доотверждения при прекращении действия СВЧ электромагнитного поля способствует повышению равномерности структуры и увеличению прочностных характеристик материала [17]. Поскольку резины 2-3-й групп представляют собой композиции эластичного искусственного каучука и мел-

кодисперсного углеродного наполнителя, при определенных условиях данный механизм воздействия может проявляться и для указанных материалов.

Отработку схемы СВЧ обработки и определение рациональных режимов осуществляли при помощи экспериментальной установки, созданной на базе рупорного излучателя с частотой излучения – 2450 МГц «Жук-2-02» (рис. 1 а) производства ООО НПП «Агро-ЭкоТех» (г. Обнинск Калужской обл.). Регу-

лировка мощности облучения достигается изменением расстояния (дистанции) от плоскости раскрыва рупора до изделия. Интенсивность обработки задается таймером в диапазоне от 0 до 10 минут. Управление установкой осуществляется с выносного пульта. Для позиционирования изделий применяется трехкоординатный стол, обеспечивающий перемещение изделия по осям X, Y, Z при помощи винтовых приводов с точностью 0,1 мм.



а



б



в

Рис. 1. Общий вид и рабочая зона установки для исследования СВЧ обработки уплотнительных колец с приданием им вращения в зоне пятна нагрева

На приводе подачи по оси Z смонтирована панель из полипропилена РР толщиной 10 мм и размерами 500×400 мм для установки обрабатываемых образцов. На тыльной стороне панели установлен двигатель РД-09 с редуктором, обеспечивающий частоту вращения приводного ролика 95 об/мин. Изделия помещаются на передней стороне панели и устанавливаются в желобе ролика (рис. 1 б). Их вращение обеспечивается за счет сил трения. Трехкоординатный стол с приводом вращения изделия смонтирован на лабораторном столе, перед которым установлена микроволновая установка.

Исследовали кольца с фактическим диаметром сечения \varnothing 8,6-8,7 мм и \varnothing 5 мм, наружным диаметром соответственно 250 и 700 мм, не бывшие в эксплуатации и прошедшие естественное старение. Ввиду отсутствия возможности на макете размещать кольца большого диаметра в растянутом на планшайбе состоянии использовали свободное расположение кольца на ведущем ролике, который обеспечивал вращение. При этом рупор антенны располагали так, чтобы через его среднее сечение проходила только одна ветвь обрабатываемого кольца (рис. 1 в). Таким образом имитировалась реальная обработка в установке, когда кольцо располагается на планшайбе в растянутом состоянии. Перед испытаниями кольца разделяли на две группы: контрольные и проходящие обработку в СВЧ электромагнитном поле. Последние обрабатывали по двум схемам: с непрерывным вращением в течение заданного времени с переустановкой после обработки в течение заданного времени каждого участка. Испытания на растяжение проводили на машине испытательной универсальной ИР 5082-100, имеющей тензометрические датчики усилий и датчики перемещений с выходом на компьютер.

Установлено увеличение предельных напряжений растяжения у новых опытных образцов по сравнению с контрольными на 12,5 %, относительного удлинения – на 64,4 %. После периода наработки увеличение напряжений растяжения опытных образцов составило 18,3 %, а относительного

удлинения – на (7-11,6) %. При этом отмечается, что контрольный образец после наработки имеет сниженное относительно требований ГОСТ предельное напряжение растяжения на 63 %, а опытный – на 38 %, т. е. снижение оказывается меньшим практически в 2 раза. Максимальный эффект достигается при температурах СВЧ нагрева поверхности колец, равных (60-70)° С, максимально допустимая температура составляет 80° С. При увеличении времени обработки или плотности потока СВЧ энергии, при которых данный температурный порог оказывается превышенным, наблюдается обугливание отдельных участков кольца и другие деструктивные изменения. Установлено, что при обработке кольцевых уплотнений большого диаметра (более 250-300 мм) больший эффект повышения характеристик прочности и эластичности наблюдается при дискретной схеме обработки, когда полное время воздействия применяется к отдельным участкам изделия, закрываемым плоскостью раскрыва рупора в сечении *E*-волны, после чего осуществляется поворот на следующий участок кольца и так далее до завершения цикла. При обработке колец меньшего диаметра необходимо использовать непрерывное вращение или стационарное положение. Однако при этом большое значение имеет равномерность нагрева всей поверхности кольца до указанной выше температуры, что является критерием поглощения одинакового уровня мощности СВЧ излучения и, соответственно, равномерной эффективности обработки.

Результаты выполненных макетно-экспериментальных работ и обоснованные на их основе принципы конструирования специального СВЧ технологического оборудования позволили разработать специальную автоматизированную установку с ЧПУ для улучшения функциональных характеристик уплотнительных элементов из технической резины для магистральных газопроводов (рис. 2). В связи с широкой номенклатурой диаметров обрабатываемых изделий (от 40 до 1400 мм) установка выполнена с камерой лучевого типа.



Рис. 2. Опытно-промышленный образец установки в производственном помещении

Установка имеет 4 программируемых канала: позиционирование рупорного излучателя по расстоянию от изделия (ось X), возвратно-поступательное перемещение изделия относительно излучателя (ось Y), вращение (дискретный поворот) планшайбы с изделиями (ось Z) и включение-выключение СВЧ блока.

Рама установки выполнена сварной конструкции из профильных труб прямоугольного сечения 50×25×3 мм и установлена на четырёх регулируемых шарнирных опорах типа GN 343.2-60-M20-158-KRE. На раме размещены две стойки из профильных труб прямоугольного сечения 40×20×2 мм. На одной стойке размещен узел планшайбы, на второй – блок СВЧ излучения. Все механизмы и электронные блоки установки размещены в камере из стальных листов толщиной 1 мм, с внутренней стороны обшитых листами полипропилена PP толщиной 10 мм. Пространство между внешними и внутренними листами заполнено матами из базальтовых нитей толщиной 100 мм. Данная конструкция обеспечивает погло-

щение основной доли излучения, прошедшего через изделие, и предотвращает внутреннее переотражение, которое может нарушить равномерность облучения крупногабаритных изделий. Настройка механизмов, загрузка-выгрузка изделий осуществляются оператором через дверь с электромагнитным затвором, что предохраняет от выхода электромагнитного излучения за пределы камеры. Все стыки конструктивных элементов шкафа (стенки и блоки крыши) проклеены алюминиевым скотчем. Во всех шаговых приводах применены пятифазные редукторные шаговые двигатели Autonics серии АК-G типоразмера 85 с максимальным моментом 20 Н·м и регулируемым числом оборотов 0-280 об/мин. Двигатели управляются контроллерами типа MD-5 – ND-14. В приводах использованы зубчатые ремни и шкивы Poly Shain GT диаметром 75-120 мм.

Шпиндельный узел планшайбы выполнен в виде ступенчатого вала, установленного в самоустанавливающихся шарикоподшипниковых опорах типа UCP-T в углепластиковом корпусе. Опоры размещены на плите, закрепленной на стойке планшайбы. Применение данных опор позволяет отказаться от сложных и трудоемких корпусных деталей.

Опытно-промышленный образец установки повышения износостойкости и долговечности уплотнительных элементов магистральных газопроводов из неметаллических материалов принят в опытную эксплуатацию в Петровском ЛПУ МГ ООО «Газпром трансгаз Саратов». В процессе производственных испытаний проверялись стабильность функционирования управляющей программы циклом работы установки, плотность потока энергии СВЧ электромагнитного поля (утечки) в ближней зоне работающей установки, изменение прочности на растяжение и относительного удлинения уплотнительных колец из резины 2-й и 3-й групп по ГОСТ 18829-73 в результате воздействия СВЧ электромагнитного поля при плотности потока энергии ППЭ = 18-20 (мкВт/см²). В ходе испытаний установлено следующее.

Средние и максимальные значения ППЭ, замеренные в 13 точках по периметру установки, составили соответственно 1,5-19,6 мкВт/см² и 4,3-14,5 мкВт/см². Согласно СП 2.2.4.1191 «Электромагнитные поля в производственных условиях» и СанПиН 2.1.8/2.2.4.1383-03 ГОСТ 12.1.006-84 «Система стандартов безопасности труда. Электромагнитные поля радиочастот. Допустимые уровни на рабочих местах и требования к проведению контроля» допустимый средний уровень дозы ППЭ составляет 200 мкВт/см²ч, что соответствует уровню 25 мкВт/см² при 8-часовой работе. Таким образом, предложенная схема установки с программируемым перемещением рупорного источника СВЧ электромагнитного поля внутри шкафа с внутренним поглощающим подбоем минимизирует внутреннее отражение излучения и соответственно не вносит погрешность в область обработки, обеспечивает безопасную эксплуатацию оборудования в обычных производственных помещениях. Полностью автоматизированный цикл с управлением от ноутбука не требует присутствия оператора рядом с установкой в процессе ее работы.

В ходе приемосдаточных испытаний опытно-промышленного образца установки и выполнения в течение 2019-2022 гг. совместной программы ввода ее в эксплуатацию уточнены программы управления и циклы обработки широкой номенклатуры изделий, определены режимы обработки уплотнительных элементов из резины 2-й группы для магистральных газопроводов, обеспечивающие увеличение условной прочности на растяжение на 9,4-12,2 % при росте относительного удлинения при разрыве на 27,4-57 %, что соответствует результатам, полученным в ходе предварительных макетно-экспериментальных работ. При этом относительная остаточная деформация снижается более чем на 68 %, податливость увеличивается на 23,46 %, а эластичность, определенная по отскоку на приборе Шоба (ГОСТ 27110-86), возрастает на (19-34) %. Типичные графики растяжения – деформация колец двух типоразмеров представлены на рис. 3 и 4. Полученные в ходе производственных испытаний опытно-промышленного образца установки данные в целом соответствуют общей концепции положительного влияния СВЧ воздействия на полимерные композиционные материалы в отвержденном состоянии.

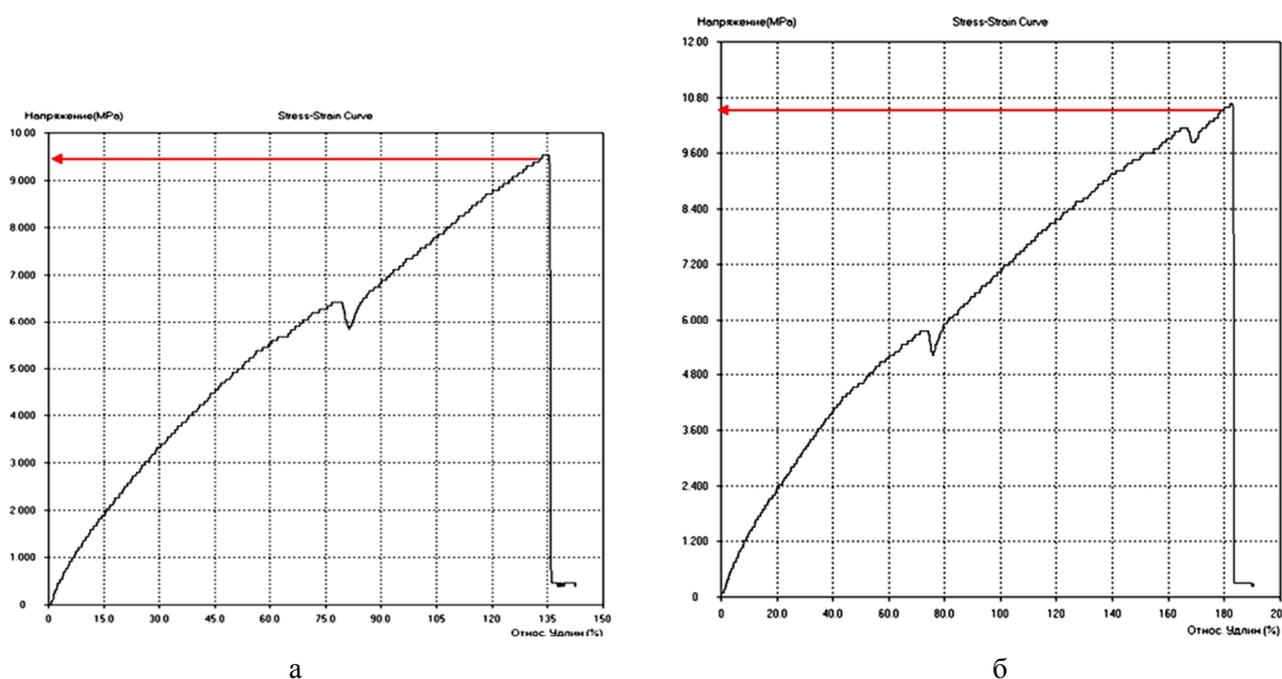


Рис. 3. Типичные графики напряжение– деформация контрольного (а) и опытного (б) колец типоразмера 180×8,5 мм

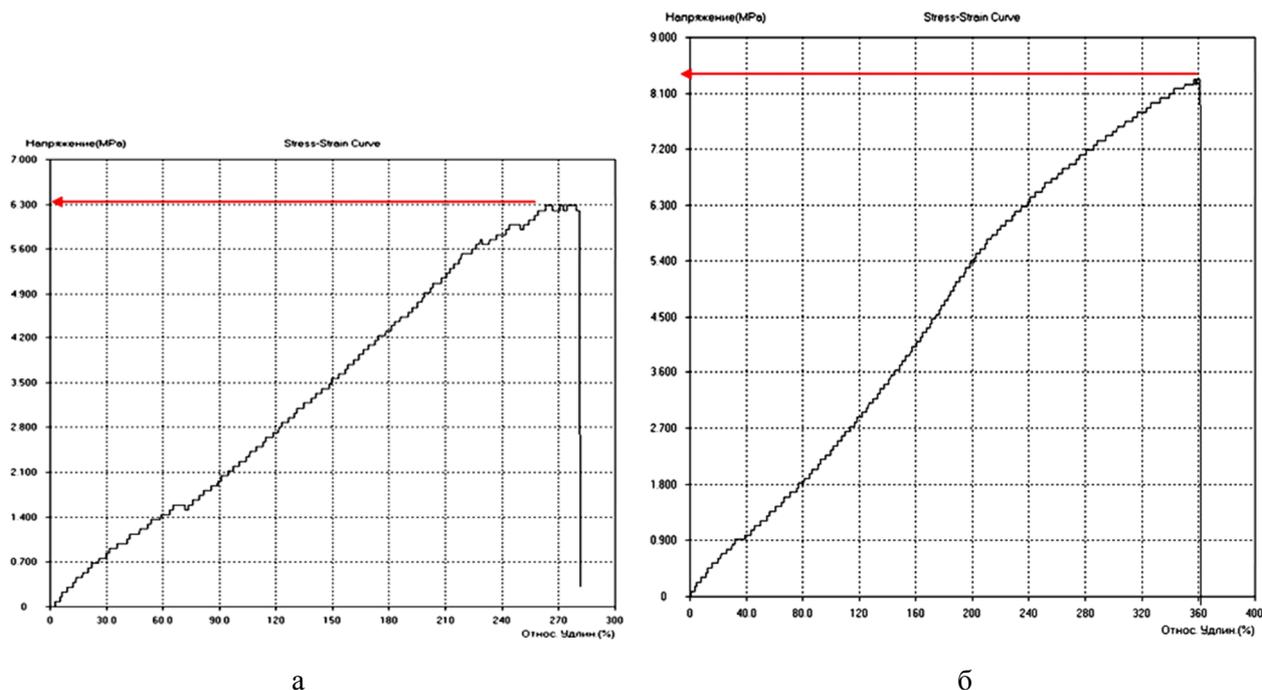


Рис. 4. Типичные графики напряжение – деформация контрольного (а) и опытного (б) колец типоразмера 127,5×5,8 мм

В то же время в ходе опытной эксплуатации установки выяснилось, что разработанные программные алгоритмы управления установкой позволяют обрабатывать с достаточной равномерностью кольца в диапазоне диаметров 60-200 мм (не превышающие размер плоскости раскрыва рупорного излучателя) и кольца в диапазоне диаметров 300-1400 мм. Однако указанные алгоритмы статической обработки нельзя использовать при обработке колец диаметром 200-300 мм, поскольку они не учитывают неоднородность СВЧ электромагнитного поля (рис. 5), приводящую к неравномерности нагрева, что негативно отражается на функциональности

установки. Опытная эксплуатация показала, что обработка колец диаметром более 300 мм происходит корректно, однако имеются проблемы с остальными типоразмерами – локальный перегрев сегментов уплотнений, находящихся в области наибольшей интенсивности СВЧ излучения и недостаточный прогрев остальных сегментов.

На рис. 6 показан результат воздействия неравномерного СВЧ электромагнитного поля при статической обработке. Отмечается, что разница между участками с минимальной и максимальной температурой колец составляет от 25 до 30° С.

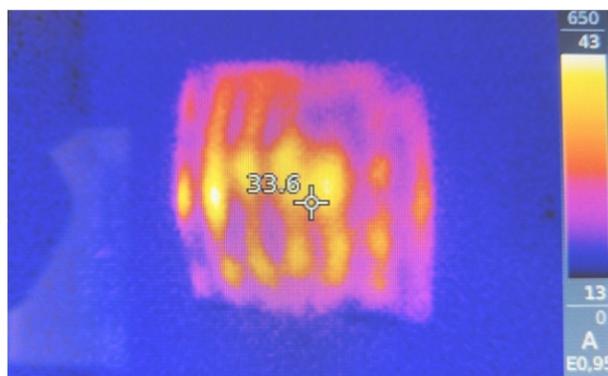


Рис. 5. Тепловые поля, зафиксированные тепловизионным комплексом на резиновой пластине, отражающие неравномерность падающей и поглощенной мощности СВЧ излучения

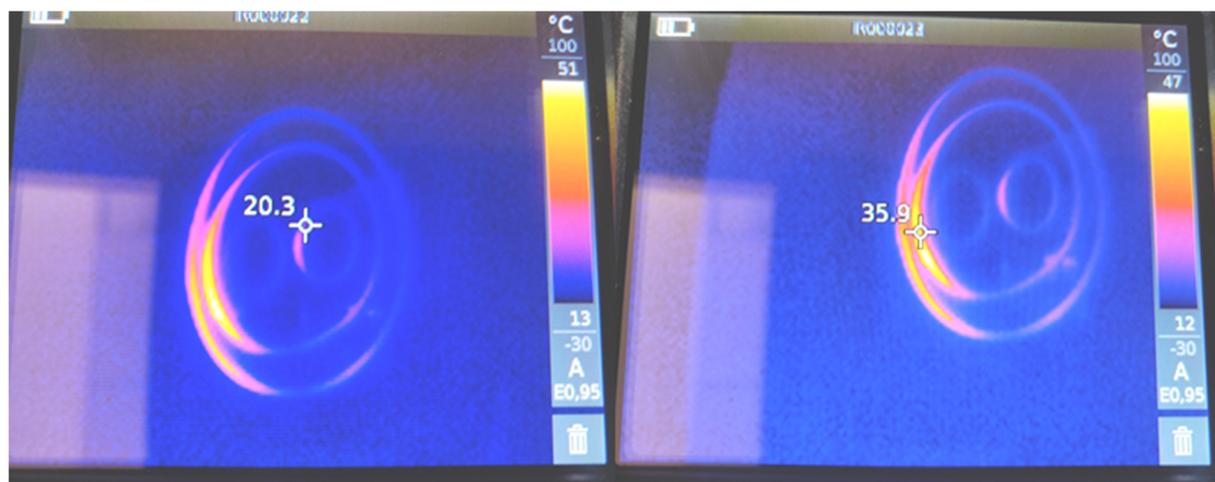


Рис. 6. Распределение температуры на поверхности колец после статической обработки, зафиксированное тепловизионным комплексом

Алгоритм управления установкой, обеспечивающий статический процесс, имеет следующий вид (рис. 7): изделия помещаются в область воздействия микроволнового излучения и под его воздействием происходит равномерный прогрев резины до 60-70 °С и, как следствие, «залечивание» дефектов, таких как микротрещины, морщины-

стость, рельефность и т. п., что способствует повышению физико-механических свойств.

Для устранения недостатков, присущих алгоритму статической обработки, и расширения диапазона типоразмеров обрабатываемых изделий программное управление установкой было значительно доработано с учетом рекомендаций [18].

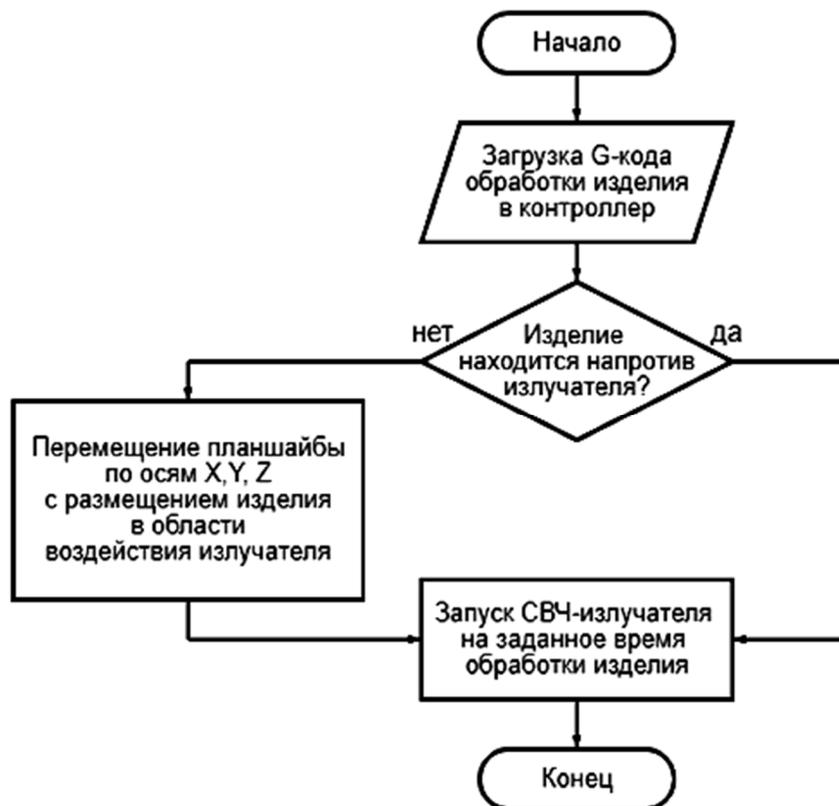


Рис. 7. Обобщенная блок-схема типовой программы статической обработки резиновых колец в диапазоне диаметров 60-200 мм

1. Неравномерность плотности потока энергии в плоскости раскрыва рупорного излучателя минимизирована за счет внедрения программных алгоритмов динамической обработки (рис. 8).

Повышение равномерности обработки колец достигается за счет того, что при работе новых алгоритмов каждый участок кольца стал перемещаться через каждый участок области воздействия рупорной антенны СВЧ излучателя в течение оди-

накового количества времени. Согласно данному алгоритму, помимо горизонтальных перемещений кольца через СВЧ электромагнитное поле, присущих кольцам диаметром 60-200 мм, в код введены небольшие вертикальные перемещения за счет программируемых поворотов планшайбы, в результате чего обработка каждого такого кольца стала происходить в два этапа: сначала верхняя половина кольца, потом – нижняя.



Рис. 8. Обобщенная блок-схема типовой программы динамической обработки резинового кольца диаметром 60-200 мм

Положительный эффект от применения динамического алгоритма обработки подтверждает изображение тепловых полей на резиновых кольцах, обработанных динамически (рис. 9). Температура нагре-

ва колец за аналогичный предыдущему промежуток времени уменьшилась, однако распределение температуры на их поверхности после динамической обработки стало более равномерным, разница между

участками с минимальной и максимальной температурой уменьшилась до (5-7)°С, что уже не является критичным с точки зрения физики воздействия на материал и

подтверждает повышение равномерности интенсивности воздействия СВЧ электромагнитного поля на различные участки колец.

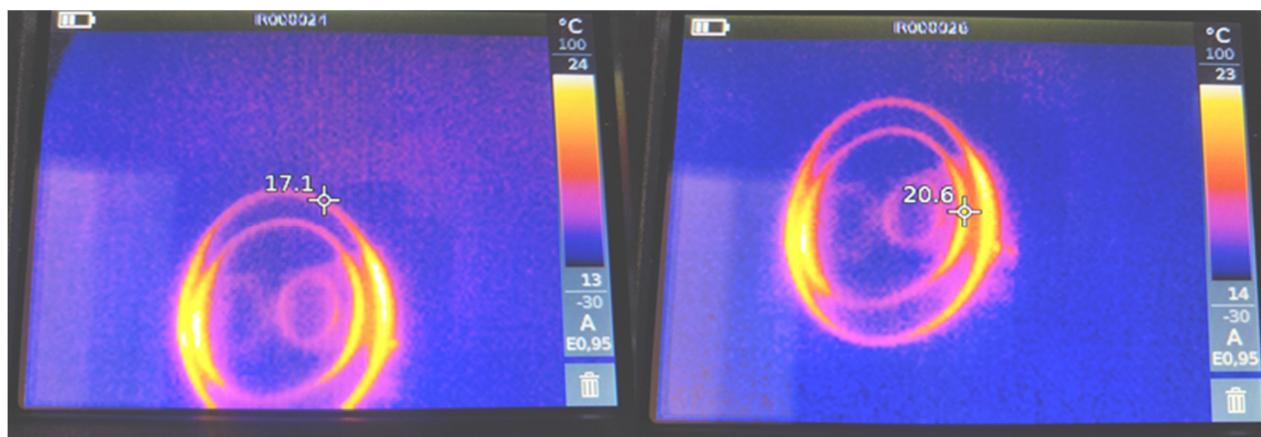


Рис. 9. Распределение температуры на поверхности колец после динамической обработки, зафиксированное тепловизионным комплексом

2. Помимо работы с программными алгоритмами динамической обработки колец, была проведена работа по автоматизации расчетов технологических режимов, необходимых для реализации такого метода обработки. Были получены формулы, позволяющие исключить ручные замеры расстояний и скорости перемещений под каждый типоразмер кольца.

Скорость перемещения колец V через область воздействия излучения автоматически рассчитывается по формуле:

$$V = \frac{[2 \cdot (D + 250) / T]}{0,03}, \quad (1)$$

где D – наружный диаметр кольца, T – необходимое время обработки колец данного

сечения для их нагрева до температуры (60-70)°С.

Расстояние перемещения S через область воздействия излучения автоматически рассчитывается по формуле

$$S = \frac{(D + 250)}{1,88}, \quad (2)$$

где D – наружный диаметр кольца.

Выведенные формулы учитывают особенности работы программного обеспечения контроллера, управляющего работой установки, и осуществляют перевод реальных расстояний в мм и скоростей в мм/мин в программные импульсы, количество и частота следования которых задаются соответствующему шаговому двигателю (см. таблицу).

Форма автоматизированного расчета перемещений и их скорости для колец разных типоразмеров

Автоматический расчет перемещений и их скорости для обработки колец				
№ п.п.	Наружный диаметр кольца, миллиметры	Необходимое время обработки, секунды	Скорость перемещения, импульсы скорости	Расстояние перемещения, импульсы перемещения
1	100	120	194	186
	- Узнать диаметр кольца, который необходимо обработать и ввести данные в столбец			
	- Узнать из документации производителя время обработки конкретного размера кольца и ввести данные в столбец			
	- Автоматически рассчитываемые данные, необходимые для подстановки в код программы			

Заключение

Проведены макетно-экспериментальные работы по исследованию возможности повышения физико-механических свойств уплотнительных колец конструкционных элементов магистральных газопроводов путем воздействия на них СВЧ электромагнитным полем частотой 2450 МГц при плотности потока энергии (ППЭ) от $(10-12) \cdot 10^4$ до $(45-50) \cdot 10^4$ мкВт/см².

Установлено, что при ППЭ = $(18-20) \cdot 10^4$ мкВт/см² обеспечивается увеличение предельных напряжений растяжения у новых опытных образцов по сравнению с контрольными на 12,5 %, относительного удлинения – на 64,4 %. Данный результат подтвержден при обработке колец, бывших в эксплуатации в течение нормативного срока, при условии отсутствия внешних механических повреждений. При меньших ППЭ значимых различий в свойствах контрольных и опытных образцов изделий не выявлено, при ППЭ $> (25-30) \cdot 10^4$ мкВт/см² отмечаются деструктивные изменения, свя-

занные с перегревом до температур более 80 °С. Время обработки определяется составом резины и диаметром поперечного сечения кольца.

С учетом результатов макетно-экспериментальных работ разработан, изготовлен и передан в опытную эксплуатацию опытно-промышленный образец СВЧ технологической установки с программированием циклов и режимов при помощи подключаемого ноутбука. Производственные испытания установки подтвердили полученные в процессе исследований результаты положительного влияния воздействия СВЧ электромагнитного поля на физико-механические свойства уплотнительных колец из резины 2-й группы.

На основе результатов опытной эксплуатации установки разработаны новые алгоритмы динамической обработки, обеспечивающие снижение неравномерности нагрева изделий в СВЧ электромагнитном поле с $(25-30)^\circ \text{C}$ до $(5-7)^\circ \text{C}$, что позволяет существенно повысить их качественные показатели.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

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

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

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

4. **Васинкина Е.Ю., Калганова С.Г., Кадыкова Ю.А.** Анализ климатической стойкости СВЧ-модифицированных эпоксидных полимеров // Пластические массы. 2022. № 7-8. С. 51-52.

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

6. Способ переработки изношенных шин и/или резинотехнических изделий и устройство для его осуществления. Патент RU № 2361731, МПК F23G5/027.

7. Способ переработки резинотехнических и органических отходов и устройство для его реализации. Патент RU № 2321492, МПК C10G1/10.

8. <http://www.rubicon-halle.de/fileadmin/rubicon/>

9. <http://www.polgroup.ru/wave.html>

10. http://www.niirp.com/articles/proizvodstvo_poristyh_izdelij_iz_elastomerov/vulkanizaciya_s_iskpolzovaniem_tokov_svch/

11. <http://elmash-micro.ru/vulkaniz>

12. Inderdeep Singh Feasibility study on microwave joining of «green» composites / Inderdeep Singh, Pramendra Kumar Bajpaia, Deepak Malika, Apurbba Kumar Sharma, Pradeep Kumara // Akademeia. 2011. № 1 (1):ea0101. P.1-6.

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

14. **Bradshaw S.M., van Wyk E.J., de Swardt J.B.** Microwave heating principles and the application to the regeneration of granular

activated carbon // The Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy. JULY/AUGUST 1998. P. 201-210.

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

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

17. **Злобина И.В., Бекренев Н.В.** О механизме повышения механических ха-

рактеристик отвержденных полимерных композиционных материалов под действием СВЧ электромагнитного поля // Известия Саратовского университета. Новая серия. Сер.: Физика. 2022. Т. 22. № 2. С. 158-169.

18. **Пайвин А.С., Чикова О.А.** Основы программирования станков с ЧПУ: учеб. пособие «Основы программирования станков с ЧПУ» для студентов направления подготовки: Технология и предпринимательство (для ООП «050100.62 – Педагогическое образование») внутривузовский компонент / Урал. гос. пед. ун-т. Екатеринбург, 2015. 102 с.

Скупинский Артем Владимирович – инженер по контрольно-измерительным приборам и автоматике лаборатории КИПА службы диагностики оборудования и сооружений Инженерно-технического центра ООО «Газпром трансгаз Саратов»

Садовсков Илья Дмитриевич – начальник лаборатории КИПА службы диагностики оборудования и сооружений Инженерно-технического центра ООО «Газпром трансгаз Саратов»

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

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

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

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

Artem V. Skupinsky – Control and Measuring Instruments and Automation Engineer of the KIP Laboratory of the Equipment and Facilities Diagnostics Service at the Center for Engineering and Technology of ООО Gazprom Transgaz Saratov

Ilya D. Sadovskov – Head of the KIP Laboratory of the Equipment and Facilities Diagnostics Service at the Center for Engineering and Technology of ООО Gazprom Transgaz Saratov

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

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

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

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

Статья поступила в редакцию 24.08.23, принята к опубликованию 08.09.23

УДК 621.365, 621.794

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА
ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ИНДУКЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ
ТИТАНОВЫХ ШАРОВЫХ КОМПОНЕНТОВ**

А.Ю. Щелкунов, А.А. Фомин

**NUMERICAL SIMULATION AND EXPERIMENTAL STUDIES
OF INDUCTION HEAT TREATMENT
OF TITANIUM BALL COMPONENTS**

A.Yu. Shchelkunov, A.A. Fomin

В работе представлены результаты численного моделирования процесса нагрева титановой шаровой конструкции методом высокотемпературной индукционной обработки (ВТИО), а также экспериментальное исследование упрочняющей обработки образцов со схожими массогабаритными характеристиками для головки эндопротеза. Данными моделирования являлись 2D графические зависимости по распределению плотности тока, тепловыделения и температуры по сечению рассматриваемых изделий. Ток индуктора изменялся в диапазоне 3,0-3,5 кА, что соответствовало температуре обработки поверхности около 1120-1250° С. Согласно результатам исследования твердость упрочненных образцов достигала 47,5-50 HRC, при этом глубина износа (сферической выемки) модифицированного титана ниже на 27 % относительно кобальтохромового Co-Cr сплава (с твердостью 46 HRC). Предложены технологические рекомендации по формированию твердых износостойких слоев на титановых шаровых компонентах эндопротезов за счет применения метода ВТИО.

Ключевые слова: титан, высокотемпературная индукционная обработка, ток индуктора, численное моделирование, метод конечных элементов, твердость, износостойкость, эндопротез

The paper presents the results of numerical simulation of the heating process for titanium balls based on the induction heat treating method (IHT), as well as experimental studies related to the strengthening treatment of samples with similar weight and size characteristics for the endoprosthesis head. The modeling data included 2D graphical dependences relating the current density distribution, heat release and temperature over the cross section of the considered products. The inductor current varied in the range of 3.0-3.5 kA, which corresponded to the surface treatment temperature around 1120-1250 °C. According to results of the study, the hardness of the strengthened samples reached 47.5-50 HRC, whereas the wearing depth (spherical recess) of the modified titanium was 27 % lower than that of the cobalt-chromium Co-Cr alloy (with the hardness of 46 HRC). The proposed technological recommendations deals with formation of hard wear-resistant layers over titanium ball components of endoprostheses through the use of the IHT method.

Keywords: titanium, induction heat treatment, inductor current, numerical simulation, finite element method, hardness, wear resistance, endoprosthesis

Известно, что многие конструкционные материалы требуют упрочняющей обработки поверхности для улучшения физико-механических, химических и других свойств конечного металлоизделия. Не являются исключением титан и его сплавы, которые выделяют в отдельный класс материалов для применения в восстановительной медицине [1-3].

Повышая физико-механические характеристики изделий, например шарового компонента тазобедренного эндопротеза, необходимо учитывать материал и метод воздействия. В первом случае необходимо учитывать свойства материала. Во втором случае необходимо определить технологические параметры оборудования, с помощью которого будет происходить воздействие на изделие. Довольно часто прибегают к методам термической или химико-термической обработки, используя оборудование, в котором происходит преобразование электрической энергии в тепло посредством различных физических законов [4-6].

Численное моделирование позволяет решать мультифизические задачи по определению необходимого диапазона изменения параметров воздействия на материал с учетом геометрии конструкции изделия. В частности, с помощью моделирования метод конечных элементов определяются

технологические параметры, замер которых невозможен в ходе проведения эксперимента, например, высокой температура при фиксированном значении потребляемого тока [7, 8].

В данном случае необходимо выявить, какие электротехнологические параметры, в частности ток индуктора $I_{инд}$, будут соответствовать температурному диапазону от 1120-1150 до 1220-1250 С при нагреве методом высокотемпературной индукционной обработки (ВТИО) шарового компонента эндопротеза, геометрия которого соответствует ГОСТ Р ИСО 7206-1-2005 [9].

Методология исследований

В исследованиях использовались титановые образцы шарообразной формы, имитирующие головку эндопротеза марки ВТ1-0 (аналог Grade 2) с внешним диаметром $D = 28 \pm 0,05$ мм, высотой $h = 28 \pm 0,1$ мм и шероховатостью поверхности $Ra 3,2$. Перед ВТИО поверхность изделия обрабатывалась ступенчатой очисткой в водном растворе поверхностно-активного вещества и этилового спирта. Предложенные технологические режимы для проведения ВТИО соответствовали току индуктора 3,0-3,5 кА и продолжительности выдержки не более 300 с (табл. 1).

Таблица 1 – Технологические режимы процесса ВТИО

Номер серии образцов	Ток индуктора $I_{инд}$	Продолжительность процесса, t
	кА	
1	3,0	60
2	3,0	300
3	3,5	300

Численное моделирование методом конечных элементов процесса ВТИО проводилось в программной среде Elcut. Основные блоки в геометрической модели представлены титановым изделием (шаровой компонент), титановой оснасткой для фиксации в поле индуктора, медным водоохлаждаемым индуктором и воздушной средой (рис. 1). В системе рабочим ин-

струментом является медный индуктор со следующими геометрическими параметрами: количество витков $n = 3$, внутренний диаметр $D1 = 33$ мм, высота индуктора $h = 27$ мм, внешний диаметр трубки индуктора $D_{инд} = 6$ мм, внутренний диаметр трубки индуктора $d_{инд} = 4$ мм, межвитковое расстояние 1 мм. Значение частоты тока f задано 66 кГц (среднее значение в диапазоне ВТИО).

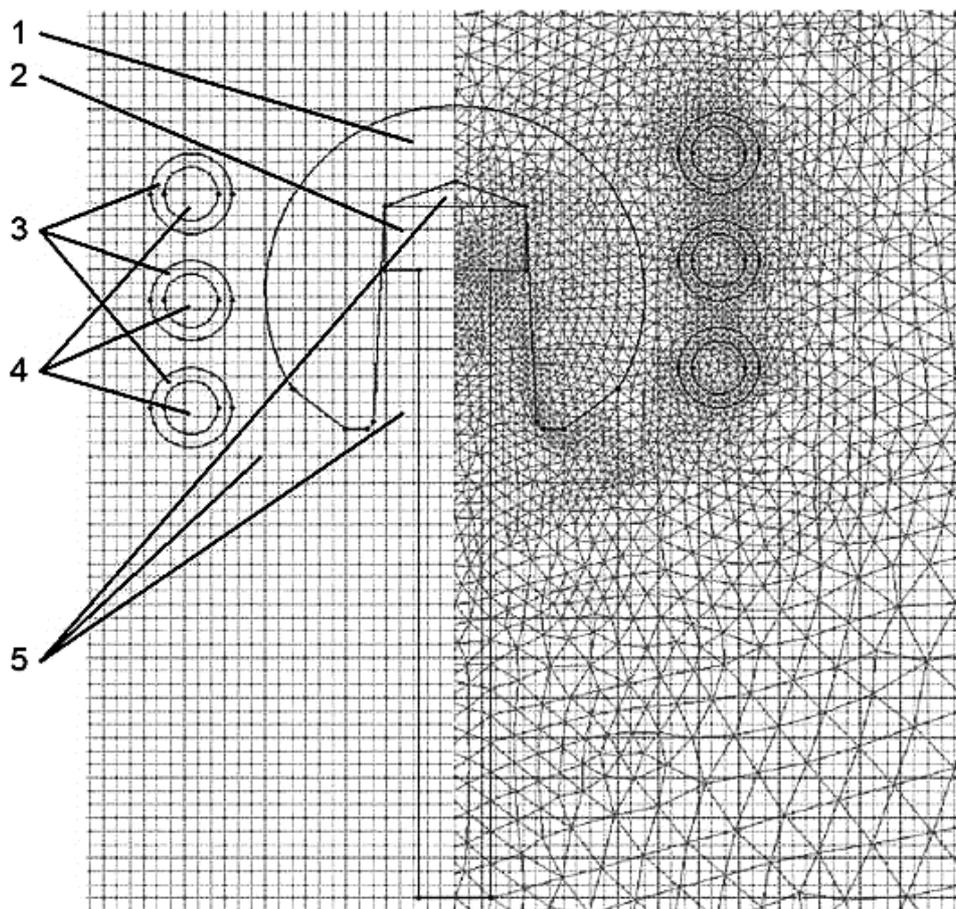


Рис. 1. Расчетная схема (а) для моделирования процесса ВТИО:
 1 – титановый шарообразный компонент, 2 – титановый шток, 3 – медный индуктор,
 4 – охлаждающая жидкость (вода); 5 – окружающая атмосфера (воздух)

Моделированием определялась техническая возможность индукционного нагрева титанового шарового компонента до диапазона температур 1120-1250° С, а также определение соответствующего электротехнологического параметра – тока индуктора. При решении задач моделирования получены данные распределения плотности тока и объемного тепловыделения, определены динамические участки, характеризующие разогрев и стационарную область для выдержки.

Контроль твердости проводился методом Роквелла (алмазный индентор с углом при вершине 120° и максимальной нагрузкой 150 кгс) [10]. Измерение происходило послойно для получения графика распределения твердости и минимального значения глубины съема материала финишной размерной обработкой изделия (тонкого точения или шлифования), кото-

рая соответствовала 3 ступеням: 100-150, 200-250 и 350-400 мкм. Для каждого слоя выполнялись 5-10 замеров для подтверждения результатов и набора статистических данных.

Параметр износостойкости оценивался методом шарового истирания на приборе «Константа Ш2» с применением алмазной суспензии. Согласно рекомендациям паспорта прибора для испытания выбраны: шар диаметром $D = 20$ мм, абразивная суспензия (NXMET Diamond suspension 2in1) с размером частиц 3 мкм и длительность испытания 120 с при скорости вращения шпинделя 1300 об/мин. Оценка износостойкости велась при сравнении глубины истирания h (выемки в цилиндрических образцах) с одинаковыми условиями трения (абразив суспензии, стальной закаленный шар, продолжительность теста, модели «шар – цилиндр»):

$$h = R - \sqrt{R^2 - \frac{d^2}{4}}, \quad (1)$$

где R – радиус шара для испытания; d – диаметр сферообразной выемки на поверхности модифицированного слоя, мм; h – толщина слоя, мм.

Результаты исследований

Согласно результатам численного моделирования при решении задачи электродинамики в системе «индуктор – изделие» представлено распределение плотности тока j при токе индуктора $I_{\text{инд}} = 3,0-3,5$ кА (рис. 2).

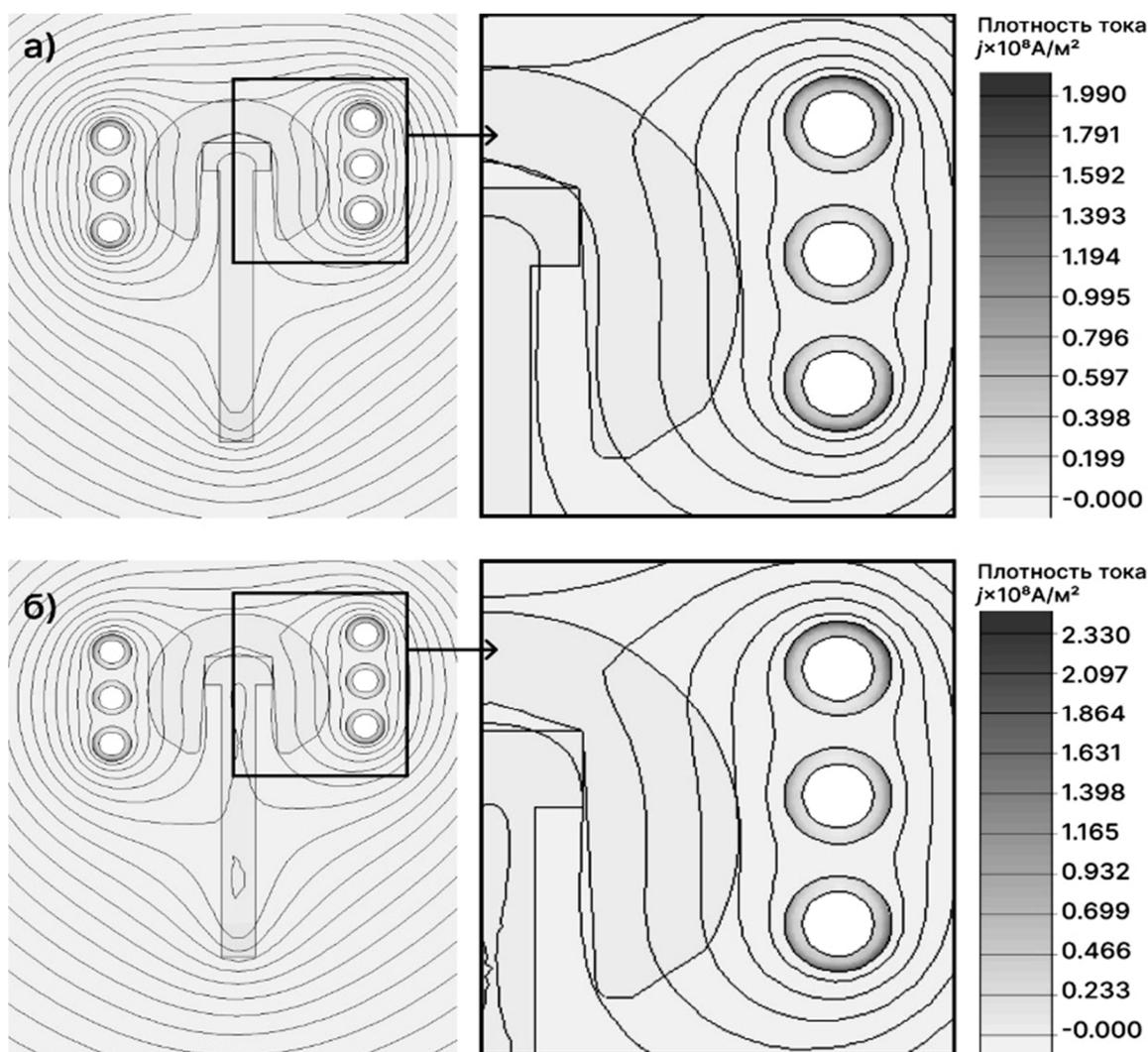


Рис. 2. Распределение плотности тока j при значениях тока индуктора: $a - I_{\text{инд}} = 3,0$ кА; $б - I_{\text{инд}} = 3,5$ кА (линиями уровня показано изменение потенциала магнитного поля)

Максимальное значение плотности тока при $I_{\text{инд}} = 3,0$ кА (соответствует температуре нагрева $1120-1150^\circ\text{C}$) в титановом шаровом компоненте достигало $19,9$ МА/м^2 (рис. 2 a). Для тока индуктора $I_{\text{инд}} = 3,5$ кА плотность тока составила $23,3$ МА/м^2 (рис. 2 $б$). Наибольшая плотность тока на индукторе наблюдалась на поверхности и соответствовала для тока индуктора

$I_{\text{инд}} = 3,0$ кА – $40-46$ МА/м^2 (рис. 2 a), а для $I_{\text{инд}} = 3,5$ кА – $199-233$ МА/м^2 .

Тепловыделение в изделии при токе индуктора $I_{\text{инд}} = 3,0$ кА соответствовало диапазону $0,708-2,124$ ГВт/м^3 (рис. 3 a). Для тока индуктора $I_{\text{инд}} = 3,5$ кА, тепловыделение в шаровом компоненте соответствовало диапазону $0,966-2,898$ ГВт/м^3 (рис. 3 $б$).

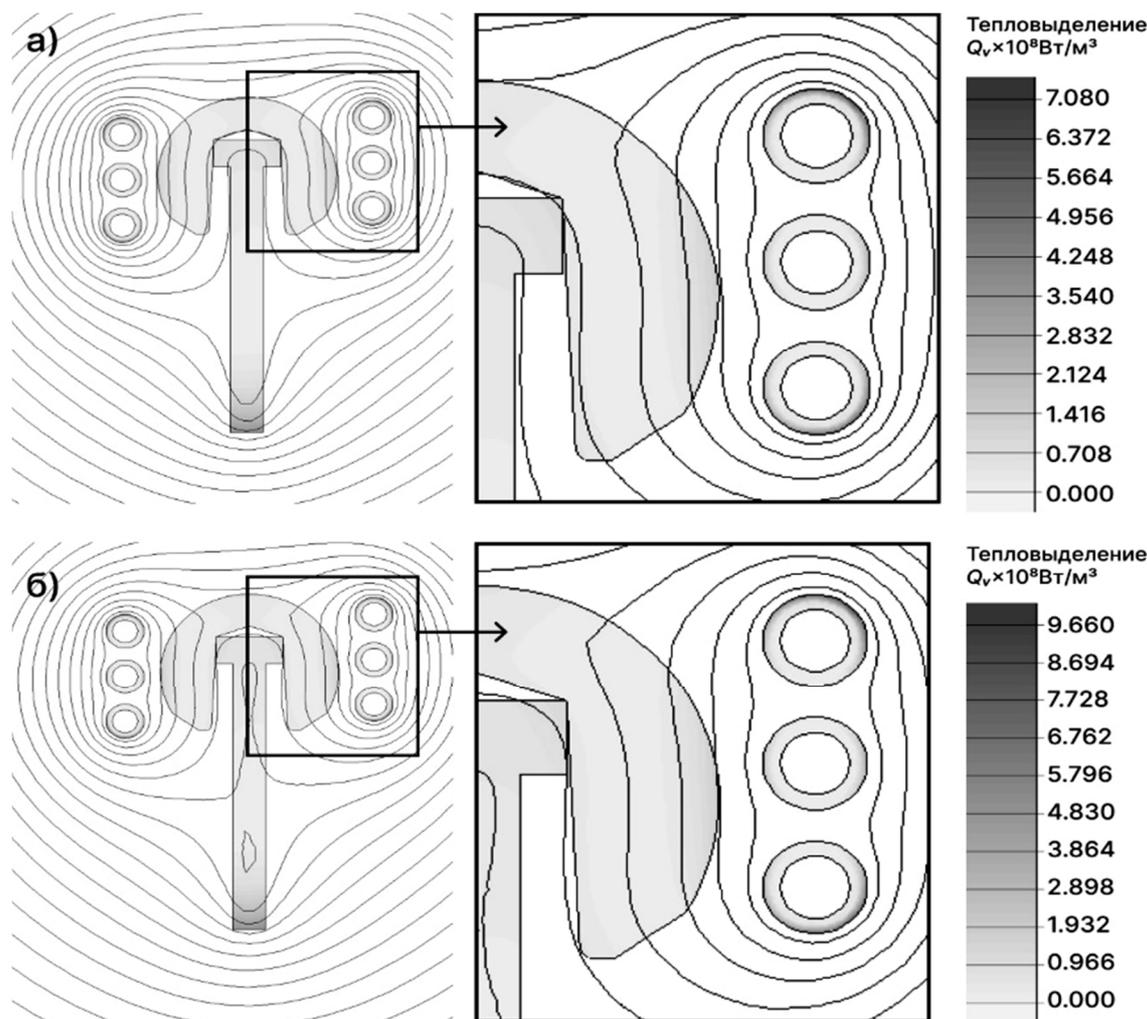


Рис. 3. Тепловыделение Q_v при различных значениях тока индуктора:
 $I_{инд} = 3,0 \text{ кА}$ (а), $I_{инд} = 3,5 \text{ кА}$ (б)

Наибольшее тепловыделение наблюдалось напротив среднерасположенных витков индуктора. В блоке медного индуктора наблюдался существенный рост тепловыделения $1,416\text{-}7,080 \text{ ГВт/м}^3$ и $1,932\text{-}9,660 \text{ ГВт/м}^3$ при токе индуктора $I_{инд} = 3,0$ и $3,5 \text{ кА}$, соответственно (рис. 3).

Температура процесса ВТИО, равная $T = 1120\text{-}1150^\circ \text{ С}$, соответствовала току индуктора $I_{инд} = 3,0 \text{ кА}$. При данном значении тока достигалось равномерное распределение температурного поля в изделии (рис. 4 а). Для температуры $T = 1220\text{-}1250^\circ \text{ С}$ ток индуктора равен $I_{инд} = 3,5 \text{ кА}$ (рис. 4 б). На рис. 4 знаком «крестик» отмечены участки шарового компонента, в которых определялась разность температур.

Изделие, нагреваемое при повышенном значении тока индуктора $I_{инд} = 3,5 \text{ кА}$, име-

ло большую неравномерность по температуре. В отмеченных точках расхождение температуры не превышало $10\text{-}25^\circ \text{ С}$, что является допустимым значением при индукционном нагреве (рис. 4 б).

Температура индуктора соответствовала $50\text{-}60^\circ \text{ С}$, что достигалось интенсивным охлаждением водой полости трубки. Данное условие не влияет на потерю КПД процесса обработки при продолжительности ВТИО от 60 до 300 с. Значение тока индуктора $I_{инд} = 3 \text{ кА}$ соответствовало температуре процесса $T = 1120\text{-}1150^\circ \text{ С}$, при этом расчетная продолжительность нагрева не превышала $t = 200 \text{ с}$ (рис. 5, кривые 2,2к). Момент нагрева до заданной температуры выдержки согласно численному моделированию соответствует $t = 200 \text{ с}$ при $I_{инд} = 3,5 \text{ кА}$ (рис. 5, кривые 1,1к).

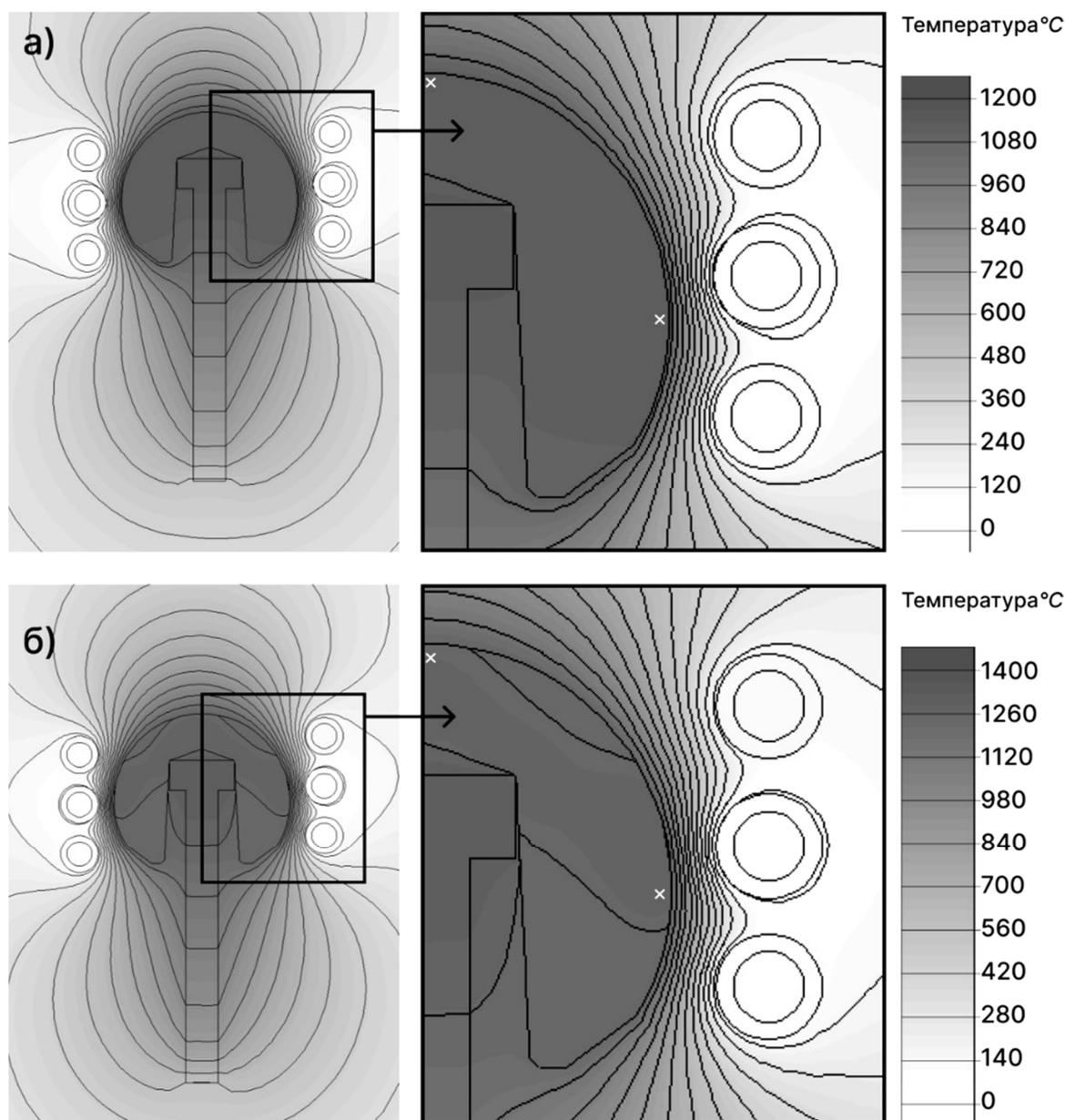


Рис. 4. Распределение температуры (линии уровня показаны с шагом $\Delta T = 100$ °С):
 $I_{ind} = 3,0$ кА (а), $I_{ind} = 3,5$ кА (б)

По результатам измерения твердости получены значения от $29,5 \pm 0,86$ до $41,5 \pm 3,96$ HRC. Поверхность измеряемого материала характеризовалась наличием слоя окалины. При снятии материала на глубину 100-150 мкм твердость увеличилась до $48,2 \pm 1,95$ HRC. Диапазон изменения твердости в глубину для экспериментальных изделий изменялся в пределах от $48,2 \pm 1,95$ до $32,5 \pm 3,6$ HRC. Максимальный результат твердости, равный 50,2 HRC, соответствовал образцу, который прошел ВТИО согласно режиму: ток индуктора

$I_{ind} = 3,5$ кА при продолжительности выдержки $t = 300$ с (разогрев около 180-200 с) с последующим снятием окалины и диффузионного слоя около 200-250 мкм. Для серии образцов 1 и 2 твердость изменялась от $30,1 \pm 0,84$ до $48,2 \pm 1,95$ HRC. Наименьшей твердостью обладали образцы по режиму 1 ($I_{ind} = 3,0$ кА, $t = 60$) – от $32,5 \pm 3,6$ до $25,2 \pm 0,57$ HRC. При оценке полученных результатов измерения твердости сравнивались значения для кобальтохромового (Co-Cr) и высокопрочного титанового (BT6) сплавов (рис. 6).

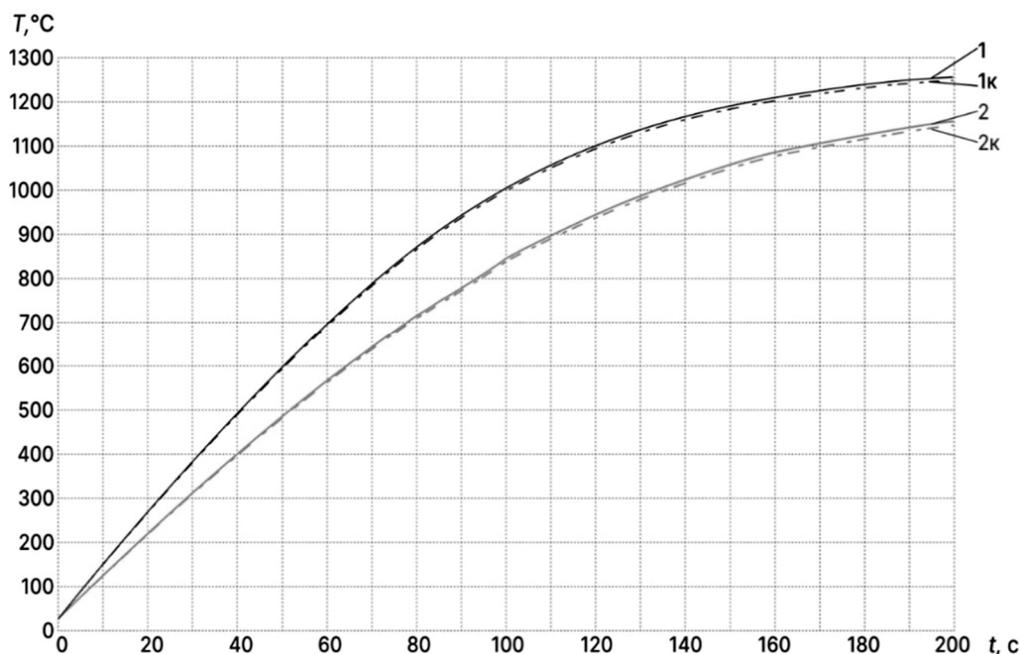


Рис. 5. Кинетика нагрева титановых шаровых компонентов эндопротеза при разном значении тока индуктора: 1,1к – при $I_{инд} = 3,5$ кА; 2,2к – при $I_{инд} = 3,0$ (к – означает «край» образца)

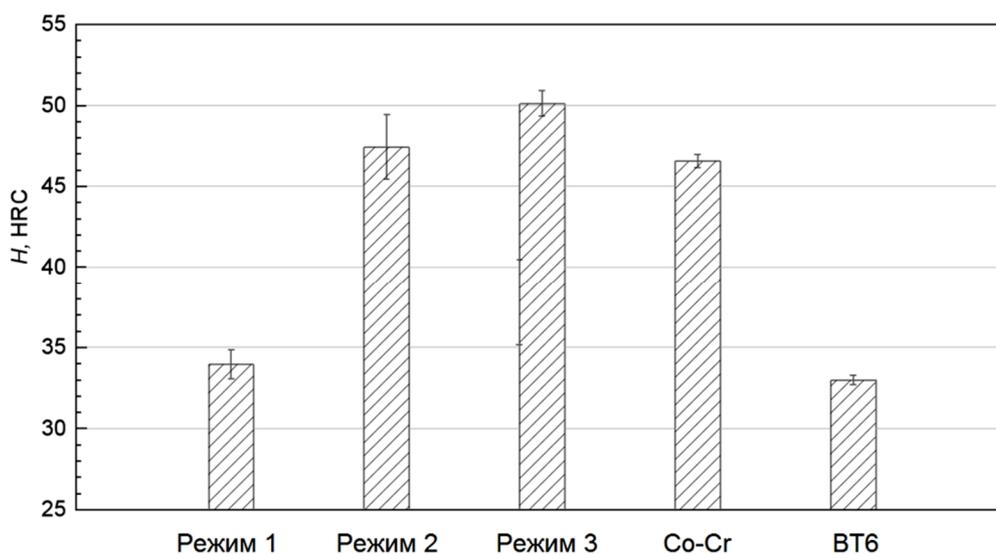


Рис. 6. Диаграмма сравнения твердости поверхности

Максимальные значения твердости, сформированной на глубине от 100-150 до 200-250 мкм, сопоставимы с твердостью Co-Cr сплавов, которые применяются для производства шаровых головок эндопротеза [11, 12].

Для проверки эксплуатационных качеств проводилось испытание на износостойкость. Диаметр отпечатков изменялся от 930 до 1300 мкм для экспериментальных режимов ВТИО, при этом износ происходил равномерно по контактной площадке (рис. 7).

Согласно формуле (1) рассчитана глубина износа, которая изменялась от 0,011 до 0,210 мм; для Co-Cr сплава данное значение соответствовало 0,014 мм (табл. 1).

Согласно полученным данным абразивного шарового истирания значения глубины износа модифицированного титана ниже на 27 % относительно сплава Co-Cr. Режимы с рациональными параметрами ВТИО выбраны: ток индуктора $I_{инд}$ в диапазоне 3,0-3,5 кА и продолжительность выдержки $t = 300$ с.

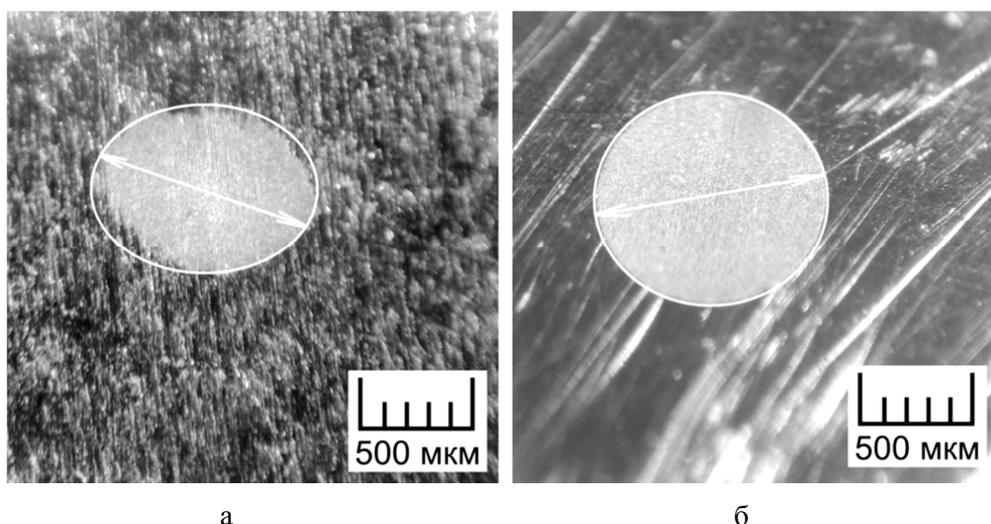


Рис. 7. Сравнение участков износа для наилучшего режима ВТИО (а) и компонента из Co-Cr сплава (б)

Таблица 1 – Результаты абразивного шарового истирания

Образцы	«1»	«2»	«3»	Co-Cr	BT1-0	BT6
D , мм	1,300	0,930	0,950	1,050	1,000	1,060
r_b , мм	10	10	10	10	10	10
r_s , мм	14	14	14	14	14	14
H , мм	0,210	0,011	0,011	0,014	0,014	0,014

где D – диаметр пятна после абразивного шарового износа; r_b – радиус шара; r_s – радиус кривизны изделия; H – глубина износа.

Технология формирования твердых и износостойких слоев на шаровом изделии, изготовленном из технического титана марки BT1-0, состоит из следующих технологических операций: заготовительная (калибровка прутка), формообразующая и упрочняющая. Механической обработкой выполняется формообразование шарового компонента с коническим отверстием под посадку. В глухом отверстии не допускается технологическая конусность дна. Размеры необходимо учитывать с припуском $+0,25...+0,30$ мм. Шероховатость поверхности после первоначальной обработки должна соответствовать Ra 3,2.

После механических операций необходимо очистить заготовку от мелких металлических частиц, стружки и смазочно-охлаждающей жидкости, используемой в ходе точения. Необходимо выполнять двухступенчатую очистку в водном рас-

творе ПАВ и этиловом спирте с применением очистной ультразвуковой ванны. Заготовки после очистки доставать щипцами или пинцетом и просушить на бумаге без ворса.

Подготовка установки ВЧ-15А включает монтаж элементов камеры нагрева, индуктора и теплоизолирующего материала. Прежде чем начать операцию модификации методом ВТИО, необходимо убедиться в правильном позиционировании заготовки в индукционной камере. Изделие должно располагаться соосно поддерживающей оснастке и индуктору. Форма индуктора – цилиндрическая (для шарового компонента) высота 27 мм, внутренний диаметр 33 мм.

Индукционно-термическая обработка будет состоять из следующих этапов:

1. Предварительно запустить установку для проверки герметичности подводков ин-

дуктора к выводам системы охлаждения. Отладить режим ВТИО на заготовке из титана ВТ1-0 со схожими массогабаритными параметрами. Замер тока индуктора необходимо осуществлять контактным или бесконтактным методом с помощью токовых клещей. Зафиксировать параметры с помощью регулятора и перевести установку в режим ожидания.

2. Установить изделие в индуктор для ВТИО.

3. Запустить установку с заранее выставленными параметрами тока индуктора 3,0-3,5 кА с продолжительностью выдержки 300 с, при этом расчетное время нагрева изделия составляет около 200 с (необходимо добавить к общему времени обработки). Нагрев необходимо контролировать пирометром.

4. Формирование твердого износостойкого оксидного слоя.

5. Свободное охлаждение на открытом воздухе и самопроизвольное удаление окалины.

Для полного удаления частичек окалины и увеличения физико-механических параметров, в частности твердости по Роквеллу до 46-50 HRC, необходимо выполнить финишную размерную обработку путем тонкого точения/шлифования поверхности для достижения параметров шероховатости Ra 1,6.

Конечной операцией является контрольная, в ходе которой необходимо измерить геометрические размеры, параметры шероховатости и твердость по Роквеллу. Контроль проводится выборочно на партию изделий, выполненных из одной поставки.

Статья подготовлена за счет средств гранта Российского фонда фундаментальных исследований (проект РФФИ № 20-33-90053 Аспиранты).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. In-situ construction of the nanostructured TiO₂/TiN composite films by induction heat treatment: Improved mechanical, corrosion, and biological properties / X. Chen, R. Zhu, Z. Yuan et al. // Applied Surface Science. 2023. Vol. 614. P. 156300.

2. **Fonseca C., Vaz F., Barbosa M.A.** Electrochemical behaviour of titanium coated stainless steel by RF sputtering in synthetic sweat solutions for electrode applications // Corrosion science. 2004. Vol. 46. № 12. P. 3005-3018.

3. Titanium oxide nanocoating on a titanium thin film deposited on a glass substrate / L. Kotsedi, Z.Y. Nuru, S.M. Eaton et al. // Thin Solid Films. Elsevier. 2016. Vol. 603. P. 446-451.

4. **Oshida Y.** Bioscience and bioengineering of titanium materials. Elsevier. Amsterdam, The Netherlands, 2010. P. 448.

5. **Yang G.J., Suo X.K., Li G.R.** Introduction to Advanced Micro-Nano Coating Materials and Thermal Spray // Advanced Nanomaterials and Coatings by Thermal Spray. Elsevier, 2019. P. 1-11.

6. Projections of hip arthroplasty in OECD countries up to 2050 / C. Pabinger, H. Lothaller, N. Portner, A. Geissler // HIP Int. 2018. № 28. P. 498-506.

7. Распределение температуры при нанесении плазменной струей порошковых покрытий в их контакте с подложкой / А.А. Хафизов, Ю.И. Шакиров, С.Н. Тимергалиев, В.И. Ильин // Вектор науки Тольятинского государственного университета. 2015. № 3-1 (33-1). С. 141-145.

8. Расчет температуры потока частиц при плазменном напылении смеси самофлюсующегося порошка и керамики / А.С. Калиниченко, Ю.К. Кривошеев, В.В. Мешкова, О.Г. Девойно // Наука и техника. 2018. Т. 17. № 3. С. 177-182.

9. ГОСТ Р ИСО 7206-1-2005. Имплантаты для хирургии. Эндопротезы тазобедренного сустава частичные и тотальные. Ч. 1. Классификация и обозначение размеров: дата введения 2006-07-01. Москва: Стандартинформ, 2005. 11 с.

10. ГОСТ 9013-59. Металлы. Метод измерения твердости по Роквеллу: дата вве-

дения 1960-01-01. Москва: ИПК Издательство стандартов, 2001. 9 с.

11. Oxinium, a new alternative femoral bearing surface option for hip replacement / Ph. Hernigou, G. Mathieu, A. Poignard et al. // European Journal of Orthopaedic Surgery & Traumatology. 2007. № 17. P. 243-246.

12. Wear performance of ultra-high molecular weight polyethylene on oxidized zirconium total knee femoral components / B.M. Spector, M.D. Ries, R.B. Bourne et al. // The Journal of Bone & Joint Surgery. 2001. Vol. 83. № 2. P. 80-86.

Щелкунов Андрей Юрьевич – ассистент кафедры «Материаловедение и биомедицинская инженерия» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

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

Andrey Yu. Shchelkunov – Assistant Lecturer, Department of Materials Science and Biomedical Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

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

Статья поступила в редакцию 15.08.23, принята к опубликованию 04.09.23

УДК 621-039-419; 620.22-419; 537.868

**ВЛИЯНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА АРМИРОВАНИЯ И НАПОЛНИТЕЛЯ
ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ
НА УРОВЕНЬ ПОГЛОЩЕННОЙ МОЩНОСТИ
СВЧ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ**

И.В. Злобина, Н.В. Бекренев, Д.В. Кондратов

**EFFECT OF REINFORCEMENT RATIO AND FILLERS
FOR POLYMER COMPOSITES ON THE RATE
OF MICROWAVE POWER ABSORPTION**

I.V. Zlobina, N.V. Bekrenev, D.V. Kondratov

Определено влияние коэффициента армирования полимерных композиционных материалов тканями на основе углеродных, стеклянных и арамидных волокон на уровень поглощенной ими мощности СВЧ электромагнитного поля. Получены зависимости, позволяющие рассчитать величину и долю поглощенной мощности при воздействии на материалы с различным соотношением диэлектрических характеристик. Установлено, что при увеличении коэффициента армирования с 0,2 до 0,8 поглощенная мощность возрастает для стеклопластика 2,5 раза, углепластика – 2,8 раза. Для органопластика увеличение малозначимо и составляет 5%.

Предложена методика инженерного расчета режимов СВЧ обработки изделий из отвержденных ПКМ, позволяющая с учетом коэффициента армирования установить время воздействия и плотность потока энергии по критерию достижения температуры нагрева до значений, соответствующих временному переходу связующего в высокоэластичное состояние.

Ключевые слова: полимерные композиционные материалы, коэффициент армирования, СВЧ электромагнитное поле, диэлектрические характеристики, плотность потока энергии, поглощенная и отраженная мощность, температура, алгоритм расчета рациональных режимов

Effect of reinforcements on the polymer composite materials reinforced with fabrics based on carbon, glass and aramid fibers on the level of microwave power absorption is determined. The obtained dependences allow for calculating the magnitude and proportion of absorbed power when exposed to materials with different ratios of dielectric characteristics. It was found that with an increase in the reinforcement ratio from 0.2 to 0.8, the absorbed power increases 2.5 times for fiberglass, and 2.8 times for carbon fiber. For organoplastics, the increase is insignificant and amounts to 5%. The authors propose a technique for engineering calculation of microwave treatment modes applied to hardened polymer composite products, which allows, taking into account the reinforcement ratio, to set the exposure time and energy flux density according to the criterion of reaching the heating temperature up to the values corresponding to the temporary transition of the binder into a rubberlike state.

Keywords: polymer composite materials, reinforcement ratio, microwave electromagnetic field, dielectric characteristics, energy flux density, absorbed and reflected power, temperature, algorithm for calculating rational modes

Введение

Анализ научно-технической информации свидетельствует об интенсивном развитии производства и применения в различных отраслях промышленности полимерных композиционных материалов (ПКМ), армированных тканями на основе углеродных, стеклянных, а также арамидных и других волокон. Данные материалы обладают по сравнению с металлами и сплавами, а также однокомпонентными полимерами повышенной удельной прочностью и коррозионной стойкостью, позволяют формировать необходимый состав и структуру в процессе образования изделия, требуют незначительного объема механической обработки. При этом ПКМ характеризуются неоднородными по свойствам компонентами, а также сложной структурой, с одной стороны имеющей достаточно упорядоченный характер укладки армирующих элементов, а с другой стороны – связующим, находящимся в различной степени аморфизации/кристалличности и обладающим хаотически расположенными микродефектами, возникшими в процессе формирования композита и отверждения, отличающихся неоднородностью структуры и физико-механических свойств компонентов [1-7]. ПКМ, армированные тканями и волокнами, обладают пониженной почти на два порядка по сравнению с другими механическими характеристиками прочностью при межслоевом сдвиге, по сравнению с металлами имеют низкую вязкость разрушения, поглощают влагу из окружающей среды и подвержены влиянию ультрафиолетового излучения. Изложенное определяет необходимость разработки технологических и, в частности физико-химических, методов уменьшения указанных недостатков [8-12]. При этом в настоящее время считается, что химические методы модификации ПКМ практически себя исчерпали ввиду сложности реализации и значительных затрат на защиту окружающей среды. Поэтому более перспективными являются физические методы улучшения свойств ПКМ, среди которых весьма эффективным является воздействие СВЧ электромагнит-

ного поля, которое применяется на различных стадиях технологического цикла: предварительное воздействие на армирующие волокна (ткани) и связующее, воздействие на композицию в процессе отверждения связующего, воздействие на окончательно сформированное изделие, когда связующее находится в отвержденном состоянии [11-14].

Авторы и ряд зарубежных исследователей [15-19] считают, что нагрев отвержденных композиционных систем в составе конечного изделия в результате воздействия на них СВЧ электромагнитным полем более рационален, поскольку не требует реорганизации отлаженных процессов синтеза компонентов, выкладки слоев ПКМ и формования изделия с последующим отверждением связующего, а также исключает возможное дефектообразование в структуре в результате доделочных операций постобработки и может, следовательно, стать решением проблемы обеспечения стабильности и предсказуемости процесса модифицирования ПКМ и обеспечить значимое улучшение их физико-механических свойств. Данное предположение обосновано тем, что Мошинским Л.Я. и др. получены экспериментальные результаты и результаты моделирования, согласно которым при нагреве отвержденных терморезактивных связующих, в частности эпоксидных смол, до $(60-80)^\circ\text{C}$ происходит их частичное размягчение [20], что может создать условия для изменения структуры связующего и межфазном слое (МФС) в СВЧ электромагнитном поле, приводящей к улучшению физико-механических свойств. При этом универсальным техническим решением для реализации метода применительно к изделиям широкого диапазона размеров и различной сложности формы может быть принята компоновка СВЧ технологической установки с камерой лучевого типа с неограниченным объемом, в которой рупорный излучатель совершает относительное перемещение эквидистантно поверхности изделия [21].

Однако эффективное использование в производственных условиях результатов исследований применения СВЧ технологий для формирования свойств готового матери-

ального объекта является затруднительным из-за недостаточной разработанности основ механизма такого воздействия на отвержденные структуры материалов, состоящих из компонентов с резко различными тепло- и электрофизическими свойствами, о чем свидетельствуют опубликованные данные [22, 23] о неоднозначном эффекте СВЧ воздействия на композиционные системы на терморезактивном связующем: отмечается значительное ускорение нагрева и, как следствие – отверждения связующего, повышение равномерности нагрева и физико-механических свойств; с другой стороны, проявляются непредсказуемые и труднорегулируемые локальные перегревы, приводящие к деструкции связующего и даже повреждению поверхности армирующих волокон. Также определенные сложности возникают при предварительном определении технологических режимов СВЧ обработки изделий из ПКМ ввиду многофакторности процесса и зависимости уровня поглощенной СВЧ мощности от физических (диэлектрических) свойств компонентов ПКМ, которые, как правило, резко различны, а схема и степень армирования изделия определяются его назначением и также могут различаться. Известные модели взаимодействия СВЧ электромагнитного поля с материалами (Ю.С. Архангельский, В.И. Анфиногентов, С.Г. Калганова, В.А. Коломейцев, Е.В. Колесников, В.В. Комаров, Г.А. Морозов, В.Н. Нефедов, И.В. Пятаев, С.В. Резник, Л.Э. Рикенглаз, В.А. Царев, G. Pushner, J.R. Cannon, W.C. Chew, A. Razek, T.L. White, L. Estel, Ph. Lebaudy, A. Ledoux, C. Bonnet, M. Delmotte, A. Arenillas, C. Bonnet, Inderdeep Singh, M. Kachmar, J.A. Menéndez, E. Murphy) являются достаточно сложными для инженерной практики и показывают зависимость выделившейся в объекте теплоты или распределение температуры от свойств материала, мощности и времени СВЧ воздействия без учета коэффициента армирования (степени заполнения матрицы) и не связывают температуру с прочностными характеристиками материала и ограничениями по критериям размягчения и деструкции матрицы.

Целью работы являются исследование влияния степени заполнения ПКМ на терморезактивном (эпоксидном) связующем армирующими компонентами с различными диэлектрическими характеристиками на поглощенную мощность СВЧ электромагнитного поля и разработка инженерной методики определения режимов СВЧ воздействия.

Основная часть

В работе использованы известные [13] зависимости расчета мощности СВЧ электромагнитного поля с учетом площади облучаемой поверхности, диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь материала:

Падающая на поверхность образца СВЧ мощность от излучателя:

$$P_{nad} = ППЭ \times F, \quad (1)$$

где ППЭ – плотность потока СВЧ энергии; F – площадь облучаемой поверхности.

Мощность, отраженная от поверхности образца:

$$P_{omp} = P_{nad} \left| \Gamma_p \right|^2, \quad (2)$$

где $\left| \Gamma_p \right|$ – коэффициент отражения электромагнитной волны от отвержденной эпоксидной смолы от поверхности образца; ε – диэлектрическая проницаемость композиционного материала.

$$\left| \Gamma_p \right| = \left| \frac{\left(\sqrt{\varepsilon - 1} \right)}{\left(\sqrt{\varepsilon + 1} \right)} \right|. \quad (3)$$

Мощность, поступившая в объем образца:

$$P_{nad1} = P_{nad} - P_{omp}. \quad (4)$$

Мощность, прошедшая через образец:

$$P_{np} = P_{nad1} e^{-2\alpha h}, \quad (5)$$

где α – коэффициент поглощения СВЧ электромагнитного поля в материале; λ – длина волны СВЧ электромагнитного поля; h – толщина облучаемого материала; $\operatorname{tg} \delta$ – тангенс угла диэлектрических потерь композита.

$$\alpha = \frac{2\pi \left[\sqrt{0,5\varepsilon \left(\sqrt{1 + \operatorname{tg} \delta^2} - 1 \right)} \right]}{\lambda}, \quad (6)$$

где λ – длина волны СВЧ электромагнитного поля; $\operatorname{tg} \delta$ – тангенс угла диэлектрических потерь композита.

Поглощенная мощность:

$$P_{\text{погл}} = P_{\text{над1}} - P_{\text{пр}} \quad (7)$$

Как известно, физико-механические свойства композиционных материалов определяются по так называемому «правилу смеси» [4, 5]. Применительно к диэлектрическим свойствам ПКМ данные зависимости будут иметь следующий вид [24].

Диэлектрическая проницаемость композита:

$$\varepsilon = \left[\frac{S_1}{(S_1 + S_2)} \right] \varepsilon_1 + \left[\frac{S_2}{(S_1 + S_2)} \right] \varepsilon_2, \quad (8)$$

где S_1 и S_2 – объемные доли полимера и наполнителя в композите; ε_1 и ε_2 – диэлектрическая проницаемость полимера и наполнителя.

Тангенс угла диэлектрических потерь композита:

$$\operatorname{tg} \delta = \left[\frac{S_1}{(S_1 + S_2)} \right] \operatorname{tg} \delta_1 + \left[\frac{S_2}{(S_1 + S_2)} \right] \operatorname{tg} \delta_2, \quad (9)$$

где $\operatorname{tg} \delta_1$ и $\operatorname{tg} \delta_2$ тангенс угла диэлектрических потерь полимера и наполнителя.

Зная значения диэлектрических характеристик компонентов ПКМ, можно рассчитать по (8) и (9) соответствующие характеристики композита с определенной степенью заполнения и после подстановки в (3) и (6) определить поглощенную данным ПКМ СВЧ мощность.

Рассматривали наиболее распространенные в различных технических системах ПКМ – угле-, стекло- и органопластики на эпоксидном связующем. В качестве связующего приняли ЭД-20 с отвердителем ПЭПА в соотношении 10:1. Диэлектрические характеристики связующего, углеродных, стеклянных и арамидных волокон приняли по справочным данным [25-27]. В расчетах использовали средние значения (табл. 1). Плотность потока энергии приняли равной для углепластика $0,175 \text{ Вт/см}^2$, для стекло- и органопластика – $0,4 \text{ Вт/см}^2$.

Таблица 1 – Диэлектрические параметры компонентов ПКМ

Параметр		Материал			
		ЭД-20	Стекло- волокно	Арамидное волокно	Углеродное волокно
ε	диапазон	3,5-5	–	3,7-4,2	2,82-6,5
	среднее	4,25	4,53	3,95	4,68
$\operatorname{tg} \delta$	диапазон	0,01-0,03	–	0,018-0,025	0,25-0,33
	среднее	0,02	2,0	0,0215	0,29

Согласно нашим экспериментальным исследованиям [15, 16], при данных ППЭ для рассматриваемых материалов обеспечивается максимальный упрочняющий эффект СВЧ воздействия. Частоту СВЧ электромагнитного поля приняли равной 2450 МГц , что соответствует $\lambda = 12,2 \text{ см}$. Данная частота в настоящее время наиболее широко применяется в СВЧ технологическом оборудовании для обработки изделий относительно небольших объемов и обеспечивается многономенклатурной элементной базой (магнетроны, КПВ и излучающие рупоры различной мощности).

Размеры объектов воздействия приняли равными $70 \times 10 \times 5 \text{ мм}$ (длина \times ширина \times высота), поскольку образцы с данными параметрами использованы нами ранее в большинстве экспериментальных исследований и соответствуют требованиям стандартов по испытаниям на трехточечный изгиб и ударный изгиб.

Обозначив коэффициент армирования ПКМ через ψ , путем расчетов по (8) и (9) с использованием данных табл. 1 получим диэлектрические характеристики ПКМ при различной степени заполнения материала армирующим компонентом (табл. 2).

Таблица 2 – Средние расчетные значения ϵ и $\text{tg } \delta$ композиционных материалов в зависимости от коэффициента армирования

Коэффициент армирования		Стеклопластик		Органопластик		Углепластик	
Волокно ψ	Матрица $1-\psi$	ϵ	$\text{tg } \delta$	ϵ	$\text{tg } \delta$	ϵ	$\text{tg } \delta$
0,2	0,8	4,306	0,416	4,19	0,0203	4,33	0,074
0,4	0,6	4,36	0,812	4,13	0,0206	4,42	0,128
0,6	0,4	4,42	1,208	4,07	0,0209	4,5	0,182
0,8	0,2	4,47	1,604	4,01	0,0212	4,6	0,236

Значения ψ ограничены диапазоном 0,2-0,8, поскольку при меньших значениях эффект армирования становится малозначимым, а при больших значениях сложно обеспечить «включение в работу» всех волокон наполнителя из-за малого содержания связующего, что приводит к появлению пустот в межфазном слое «матрица-волокно» [4-7].

Результаты расчетов поглощенной СВЧ мощности представлены на рис. 1, 2.

Как следует из анализа графиков (рис. 1), зависимости $P_{\text{полг}}$ от ψ для стекло- и органопластика с высокой точностью (0,99-0,978) аппроксимируются полиномами второго порядка. В отличие от указанных материалов зависимость для углепластика является линейной (табл. 3). При этом влияние коэффициента армирования для стеклопластика на порядок выше, чем для углепластика, и на два порядка – чем для органопластика. Это определяется значительно большими отличиями значений ϵ и $\text{tg } \delta$ стеклопластика от данных параметров связующего ЭД-20, чем для угле- и тем более – для органопластика.

Для всех рассматриваемых материалов доля поглощенной ими СВЧ мощности линейно возрастает с увеличением ψ (табл. 3,

рис. 2). Точность аппроксимации составила для стеклопластика 0,86, для угле- и органо-пластиков – 0,99. При этом для органо-пластика эта зависимость может считаться мало значимой.

С учетом изложенного может быть предложена следующая методика расчета технологических режимов СВЧ модификации изделий из отвержденных ПКМ.

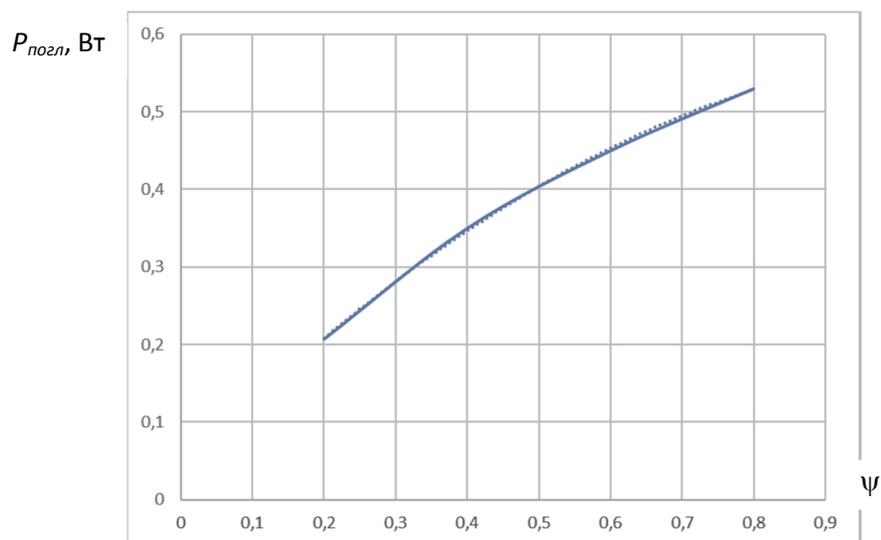
1. С учетом технических требований к изделию определяют тип связующего, наполнителя, схему и коэффициент армирования ψ , габаритные размеры изделия L, b, h .

2. По справочным материалам определяют температуру размягчения связующего (перехода в высокоэластичное состояние) t_2 , теплоемкости c_1 и c_2 связующего и наполнителя, плотность ρ .

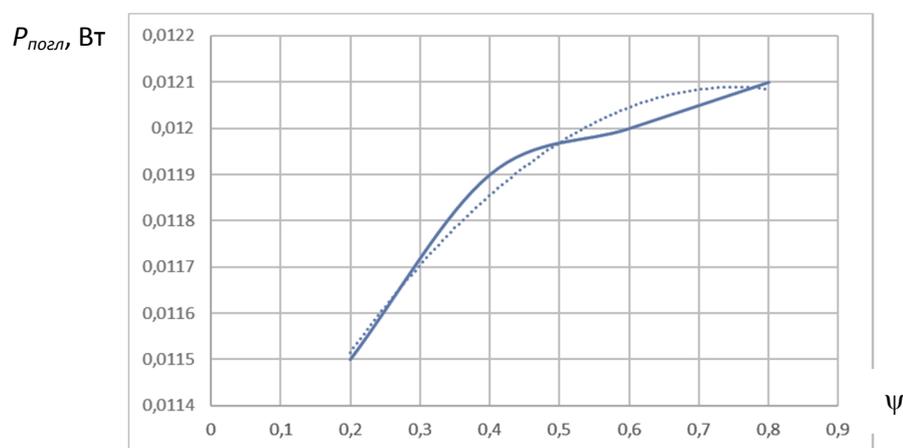
3. Вычисляют площадь облучаемой поверхности F и объем V изделия. Если заданная в технической документации площадь поверхности изделия больше размеров области диаграммы направленности СВЧ электромагнитного поля, в которой отклонение излучаемой мощности от максимального значения не превышает (5-10) %, то за F принимают площадь данной области.

Таблица 3 – Зависимости поглощенной СВЧ мощности от коэффициента армирования ПКМ

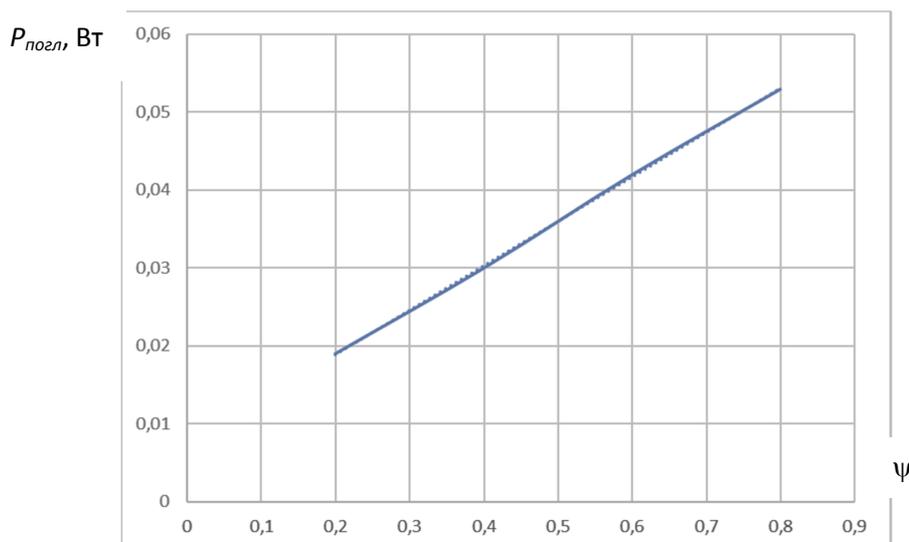
Материал	$P_{\text{полг}}$	$P_{\text{полг}} / P_{\text{над}}$
Стеклопластик	$y = -0,3938x^2 + 0,9283x + 0,0382$	$y = 0,191x + 0,042$
Органопластик	$y = -0,0019x^2 + 0,0028x + 0,011$	$y = 0,0004x + 0,0041$
Углепластик	$y = 0,057x + 0,0075$	$y = 0,0464x + 0,0063$



а



б



в

Рис. 1. Зависимость поглощенной СВЧ мощности от коэффициента армирования ψ стекло- (а), органо- (б) и углепластика (в). Точками показан график аппроксимирующей функции

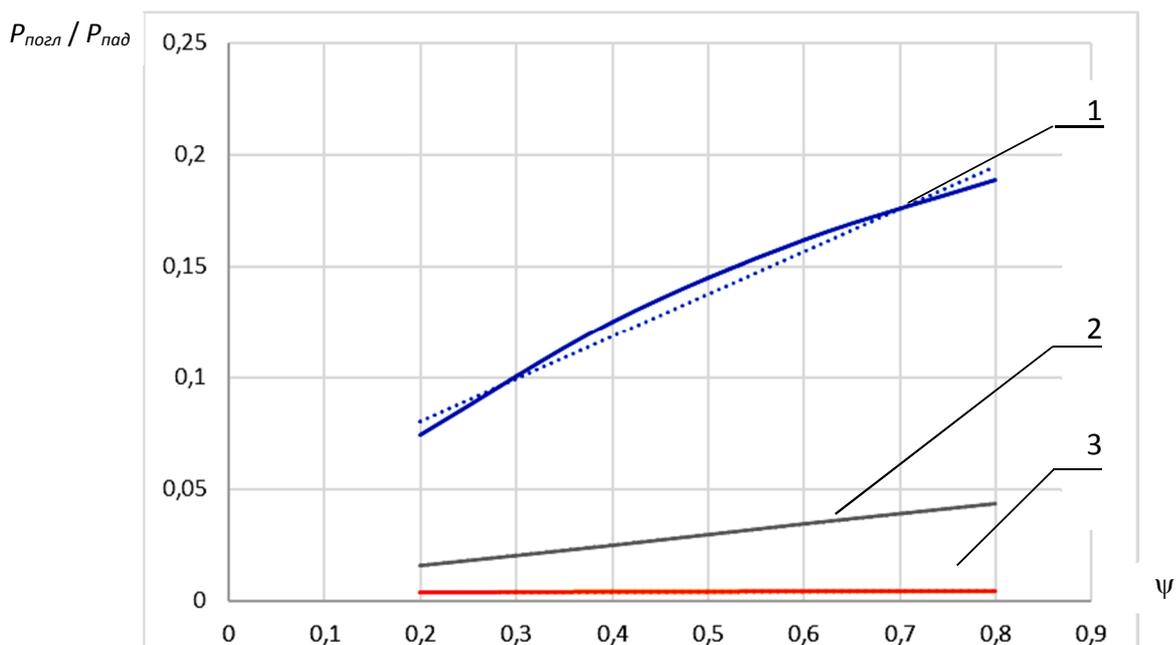


Рис. 2. Зависимость доли поглощенной СВЧ мощности от коэффициента армирования ψ стекло- (1), угле- (2) и органопластика (2). Точками показан график аппроксимирующей функции.

4. Вычисляют по зависимостям табл. 3 с учетом заданного коэффициента армирования ψ величины $P_{\text{погл}}$ и $P_{\text{погл}} / P_{\text{пад}}$.

5. Пользуясь «правилом смеси», вычисляют теплоемкость композиционного материала:

$$c = (1 - \psi) c_1 + \psi c_2. \quad (10)$$

6. По известной из термодинамики зависимости мощности, затрачиваемой на нагрев, свойств материала, температуры и времени $P_n = V c \rho \Delta t / \tau$, приняв $P_n = P_{\text{погл}}$ и $\Delta t = t_2 - t_1$, где t_1 – начальная температура изделия (температура окружающей среды), вычисляют время СВЧ воздействия на изделие:

$$\tau = V c \rho (t_2 - t_1) / P_{\text{погл}}. \quad (11)$$

7. С учетом результатов расчетов по п. 4 определяют падающую на поверхность изделия СВЧ мощность $P_{\text{пад}}$.

8. Вычисляют необходимую плотность потока энергии:

$$\text{ППЭ} = P_{\text{пад}} / F. \quad (12)$$

9. При неизменной мощности рупорного излучателя величина ППЭ будет опреде-

ляться расстоянием от облучаемой поверхности до плоскости раскрыва рупора. Например, в случае использования в технологическом оборудовании излучателя «Жук-2-02» мощностью 1200 Вт (ООО НПП «АгроЭкоТех», г. Обнинск Калужской обл.) определенная экспериментально зависимость ППЭ от расстояния имеет следующий вид:

$$y = 4041,3x^{-1,019}.$$

Данная методика позволяет применительно к исследованным группам наполнителей ПКМ на эпоксидном связующем с достаточной точностью определять рациональные режимы СВЧ воздействия на отвержденные материалы, при котором создаются условия для значимого, как показано в [15], повышения физико-механических свойств изделий.

Заключение

Расчетным методом установлено влияние коэффициента армирования полимерных композиционных материалов наполнителями на основе стеклянных, арамидных и углеродных волокон на степень поглоще-

ния мощности СВЧ излучения при его воздействии на конечные изделия.

Показано, что наибольшее влияние на поглощенную СВЧ мощность оказывает армирование материала стекляными и углеродными волокнами, наименьшее влияние отмечено для арамидных волокон: при увеличении коэффициента армирования с 0,2 до 0,8 поглощенная указанными материалами мощность возрастает для стеклопластика 2,5 раза, углепластика – 2,8 раза. При этом поглощенная углепластиком мощность линейно зависит от коэффициента армирования. Для органопластика увеличение составляет 5 %, что малозначимо. Данный результат определяется значительными различиями в диэлектрических параметрах стекло- и углепластика по сравнению с эпоксидной смолой ЭД-20.

В то же время доля поглощенной СВЧ мощности максимальна для стеклопластика и достигает при $\psi = 0,8$ 18 %, для углепластика она не превышает 4,5 %, что связано с высоким коэффициентом отражения, ха-

рактерным для данного материала. Органо-пластик характеризуется максимальным из рассмотренных материалов пропусканием СВЧ излучения.

Предложена методика инженерного расчета режимов СВЧ обработки изделий из отвержденных ПКМ, основанная на вычислении доли поглощенной мощности при заданном коэффициенте его армирования и размерах, позволяющая установить время воздействия и плотность потока энергии по критерию достижения температуры нагрева до значений, соответствующих временному переходу связующего в высокоэластичное состояние.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 23-29-00526 «Аналитическая модель регламентированного по критерию повышения механических свойств нагрева в СВЧ электромагнитном поле отвержденных полимерных композиционных материалов, армированных тканями и волокнами различной природы».

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Мировой рынок углеродного волокна. URL: <https://yandex.ru/search/?text=http3A2F2Fxn--80aplem.xn--p1ai2Fanalytics2F+Mirovoj-rynok-uglerodnogo-volokna> (дата обращения 09.08.2022).
2. **Дориомедов М.С.** Российский и мировой рынок полимерных композитов (обзор) // Труды ВИАМ. 2020. № 6-7 (89). С. 29-37.
3. **Каблов Е.Н.** Материалы и химические технологии для авиационной техники // Вестник Российской академии наук. 2012. Т. 82. № 6. С. 520-530.
4. **Михайлин Ю.А.** Конструкционные полимерные композиционные материалы. 2-е изд. Санкт-Петербург: Научные основы и технологии, 2010.
5. International Plastics Handbook the Resource for Plastics Engineers / S. Brinkmann et al.; ed. Hanser, 2006.
6. **Razali N., Sultan M.T.H., Mustapha F. et al.** // The International Journal of Engineering And Science (IJES). 2014. Vol. 3. Iss. 7. P. 8-20.
7. Abrate S. Impact Engineering of Composite Structures. Springer – Wien – New York, 2011. P. 409.
8. **Кулезнев В.С., Шершнева А.С.** Химическая и физическая модификация полимеров. Москва: Химия, 1990. 207 с.
9. **Студенцов В.Н.** Физическая модификация армированных реактопластов // Вестник СГТУ. 2011. № 4. Вып. 3. С. 209-217.
10. **Негров Д.А.** Влияние энергии ультразвуковых колебаний на структуру и свойства полимерного композиционного материала на основе политетрафторэтилена: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.01 [Место защиты: Омск. гос. техн. ун-т]. Омск, 2009. 123 с.
11. **Brovko A.V., Murphy E.K., Rother M.** Waveguide microwave imaging: spherical inclusion in a dielectric sample // IEEE microwave and Wireless Comp. Lett. 2008. Vol. 18. № 9. P. 647-649.
12. Microwave processing of materials // National Materials Advisory Board. Washington: National Academy Press, 1994. 150 p.

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

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

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

16. **Злобина И.В., Бекренев Н.В., Чуриков Д.О.** Анализ влияния обработки в сверхвысокочастотном электромагнитном поле на межслоевое взаимодействие отвержденных полимерных композиционных материалов с различными наполнителями // *Письма в Журнал технической физики*. 2022. Т. 48. № 22. С. 36-38.

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

18. **Bradshaw S.M., van Wyk E.J., de Swardt J.B.** Microwave heating principles and the application to the regeneration of granular activated carbon // *The Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy*. July/august 1998. P. 201-210.

19. **Kwak M.** Microwave Curing of Carbon-Epoxy Composites: Process Development

and Material Evaluation. Imperial College London Department of Aeronautics, 2016.

20. **Мошинский Л.Я.** Эпоксидные смолы и отвердители. Тель-Авив: Аркадия-Пресс ЛТД, 1995. 371 с.

21. **Злобина И.В., Бекренев Н.В.** Патент RU № 2742147, 2021 «СВЧ-установка обработки изделий из диэлектрических материалов с большими объемами и поверхностями» // *Официальный бюллетень № 4 Федеральной службы по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам*. Москва: ФИПС, 03.02.2021 г.

22. Accelerated Microwave Curing of Fibre-reinforced Thermoset Polymer Composites for Structural Applications: A Review of Scientific Challenges, Composites: Part A / C. Ogonna Mgbemena, D. Li, M-F. Lin et al. 2018. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2018.09.012>.

23. Effect of lay-up configuration on the microwave absorption properties of carbon fiber reinforced polymer composite materials / Jing Zhou, Yingguang Li, Mengchen Zhang, Eyan Xu, Tao Yang // *Materials Today Communications*. 2021. 26 101960. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2020.101960>.

24. <https://lektsii.org/17-42161.html>.

25. <https://lektsii.org/4-12953.html>.

26. <https://lektsii.org/4-12962.html?ysclid=llnhstxllf311105149>.

27. Characterizing the dielectric properties of carbon fiber at different processing stages / Hsien-Wen Chao, Hung-Chun Hsu, Yen-Ren Chen, Tsun-Hsu Chang. DOI: 10.1038/s41598-021-96949-6.

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

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

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

Кондратов Дмитрий Вячеславович – доктор физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой «Информационная безопасность автоматизированных систем» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

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

Dmitry V. Kondratov – Dr. Sc. (Physics and Mathematics), Associate Professor, Head: Department of Information Security of Automated Systems, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 25.08.23, принята к опубликованию 08.09.23

УДК 62-523.2

ПОРТАТИВНАЯ АВТОМАТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ОХЛАЖДЕНИЯ МАГНЕТРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

А.А.Никифоров, В.Б. Байбурин, Я.А. Пахомов, В.В. Мещанов,
В.В. Комаров, В.М. Дорошенко

PORTABLE AUTOMATIC CONTROL SYSTEM FOR COOLING THE MAGNETRON GENERATOR

А.А.Nikiforov, V.B. Bayburin, Ya.A. Pakhomov, V.V. Meshchanov,
V.V. Komarov, V.M. Doroshenko

В настоящей работе предложена портативная автоматическая система управления процессом жидкостного охлаждения магнетронного генератора мощностью до 3 кВт, применяющегося в устройствах стерилизации с целью обеспечения стабильной работы магнетрона и повышения качества процесса стерилизации биомедицинских инструментов.

Ключевые слова: жидкостное охлаждение, СВЧ-стерилизация, магнетрон, автоматическое управление, температурная характеристика

Введение

В работах [1-4] экспериментально и теоретически обоснована эффективность применения СВЧ-излучения для стерилизации биомедицинских объектов, в том числе медицинских инструментов. В качестве источников СВЧ-энергии использовались магнетроны дециметрового диапазона в непрерывном и импульсном режимах генерации. Медицинские инструменты обрабатывались на уровнях мощности 600-1000 Вт. Стерилизационная эффективность СВЧ обработки зависит от мощности СВЧ излучения, времени обработки, количества обрабатываемых инструментов и среды обработки. Увеличение мощности генераторов позволяет либо сократить время обработки, либо увеличить количество обрабатываемых инструментов. Вместе с тем в интерва-

In the given research the authors present a portable automatic control system for the process of liquid cooling of the magnetron generator with the power up to 3 kW, which is applied in sterilization devices to ensure steady operation of the magnetron and improve the sterilization quality of biomedical tools.

Keywords: liquid cooling, microwave sterilization, magnetron, automatic control, control system, control center

лах мощности 1,5-3 кВт используемое в действующих стерилизаторах воздушное охлаждение оказывается недостаточным. Возникает проблема создания жидкостной системы охлаждения. Возможному пути решения указанной проблемы посвящена данная работа. Приведены схемы конструкторских решений, результаты 3D-моделирования, а также описана система автоматического регулирования процесса жидкостного охлаждения.

Основная часть

Как показывают измерения для обеспечения номинальных режимов СВЧ-генерации магнетронов стерилизационных установках температура анодного блока не должна превышать 120-130 °С. Если иметь в виду указанные уровни мощности 1,5-

3 кВт возникает необходимость в жидкостном охлаждении. Конструкторская схема предлагаемой системы жидкостного охлаждения представлена на рис. 1. Суть схемы заключается в том, что на анодный блок одевается коаксиальный цилиндр, внутренняя цилиндрическая поверхность которого плотно прилегают к поверхности коаксиального цилиндра с анодным бло-

ком, а между внутренней и внешней цилиндрическими поверхностями помещается охлаждающая жидкость газового типа (хладагент), кроме того на внешнюю поверхность закрытого по торцевым поверхностям охлаждающего цилиндра крепятся радиаторные пластины с целью увеличения площади охлаждаемой поверхности магнетрона.

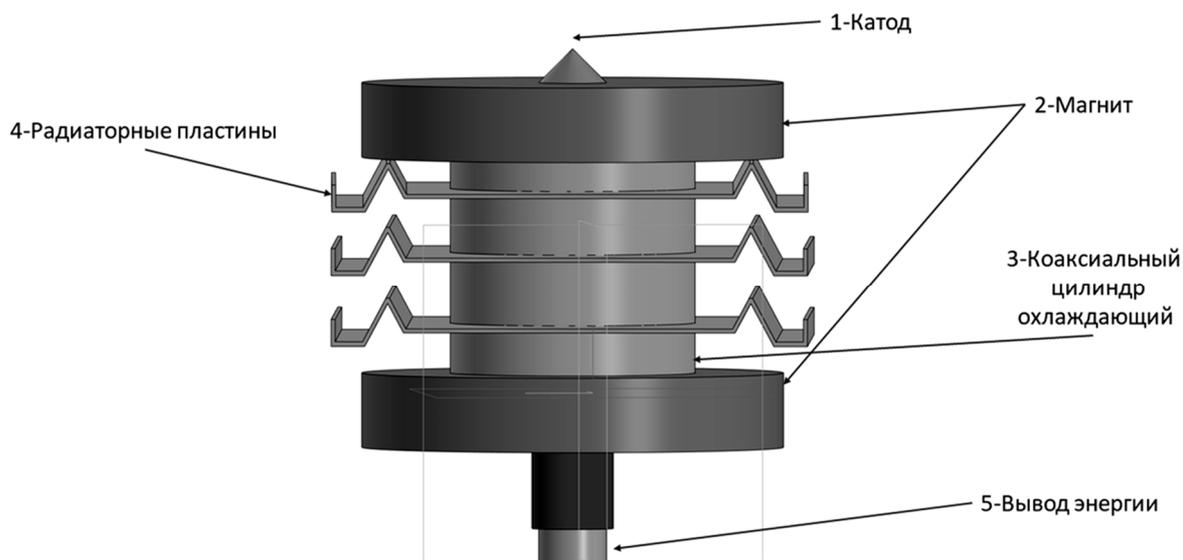


Рис. 1. Конструкторская схема основного элемента системы жидкостного охлаждения магнетрона

В связи с вышеописанной проблемой и подбором охлаждающей системы магнетронов номинальной мощностью от 1,5-3 кВт была разработана портативная система жидкостного охлаждения, которая позволяет использовать магнетроны такой мощности в стерилизаторах для получения максимальной эффективности процесса стерилизации. При решении сложившейся проблемы также были определены требования к автоматической системе управления процессом охлаждения магнетронного генератора.

Функциональная схема автоматической системы управления охлаждением анодного блока магнетрона (рис. 2) состоит из следующих элементов: микроконтроллер STM 32 подключенный к модулю реле К1 через понижающий преобразователь DC/AC необходим для обработки и передачи информации о температуре и сигнале

включения/отключения магнетрона, охлаждение магнетрона происходит путем соединения коаксиального цилиндра с закаченной жидкостью газового типа (хладагент) с анодным блоком, датчики температуры ВТ1 и ВТ2 подключены к микроконтроллеру STM 32 с целью получения сравнительной информации о параметрах температуры магнетрона, цифровой дисплей подключенный к микроконтроллеру STM32 позволяет получать информацию о температуре анодного блока магнетрона.

Для рассмотрения процесса нагрева магнетрона было проведено моделирование зависимости температуры анодного блока от времени работы магнетрона на основе построенной 3D-модели в программе Компас 3-D с применением библиотеки АРМ FEM (рис. 3 а) [6]. На рис. 3 б представлен результат расчёта температурной характеристики магнетрона.

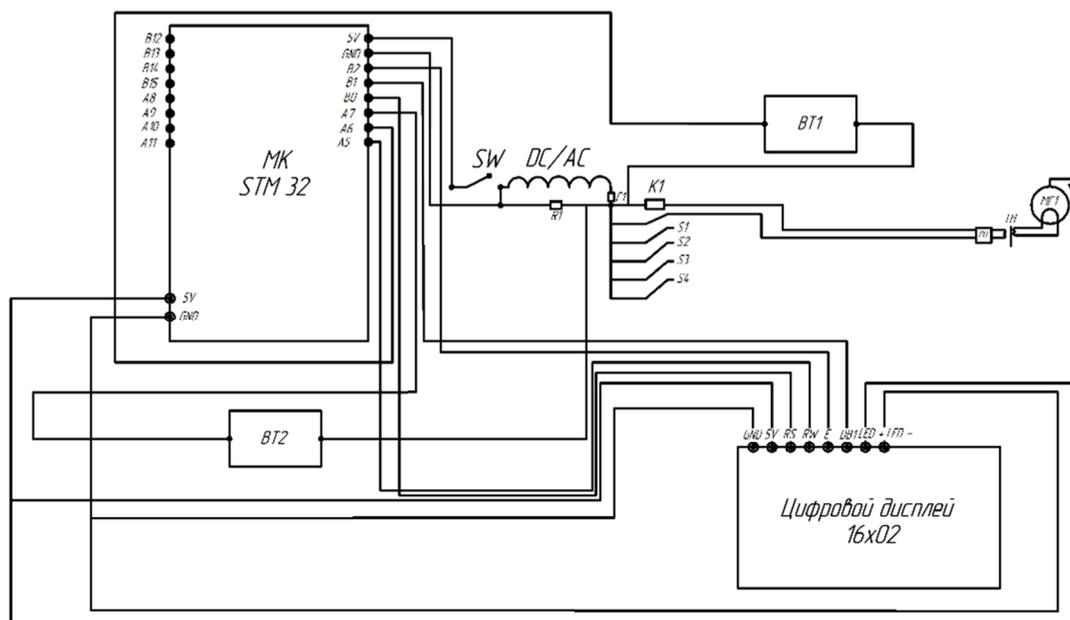


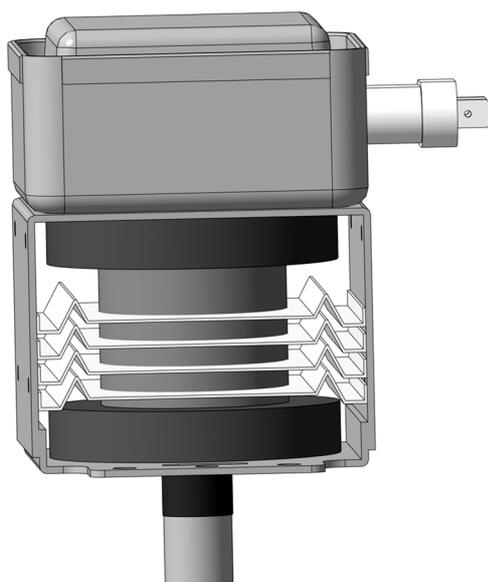
Рис. 2. Функциональная схема автоматической системы управления охлаждением магнетрона

Таблица 1 – Расшифровка основных позиций функциональной схемы

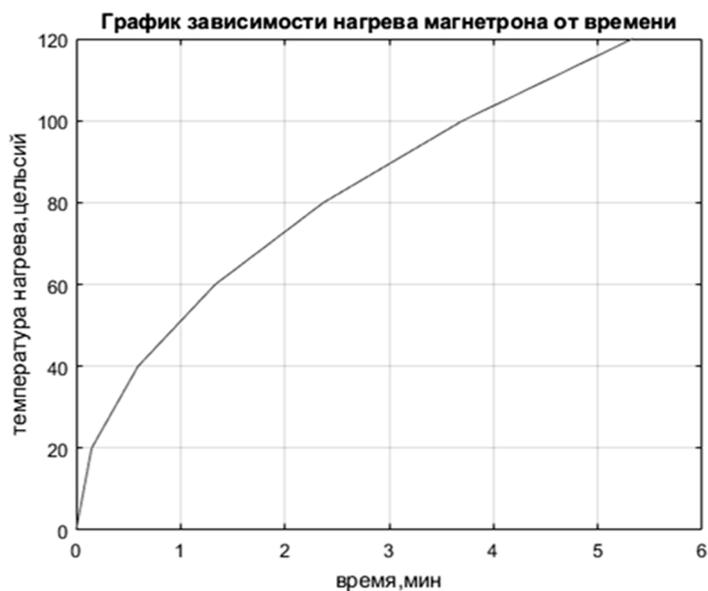
Наименование	Расшифровка
МК STM 32	Микроконтроллер
DC/AC	Понижающий преобразователь
BT1, BT2	Датчик измерения и контроля температуры
SW	Ключ
K1	Промежуточное реле
S1, S2, S3, S4	Контакты промежуточного реле
МГ1	Магнетрон
R1	Резистор
C1	Конденсатор
PH	Реле нагрузки
TH	Трансформатор нагрузки

В результате проведенного моделирования можно сделать вывод, что с момента включения магнетрона до достижения максимальной температуры 120° С необходимо 5 минут работы магнетрона в режиме генерации. При этом обеспечивается заданный режим генерирования магнетрона. После достижения максимального уровня температуры анодного блока магнетрона автоматическая систе-

ма управления (рис. 2) отключает режим генерирования и температура анодного блока магнетрона снижается до 70° С примерно за 3 мин. После этого вновь включается режим генерации до момента достижения анодным блоком 120° С. Естественно, что температурные пределы 70-120° С могут корректироваться в зависимости от модификации конструкции магнетрона.



а



б

Рис. 3. а – 3D-модель магнетронного генератора;
б – график зависимости нагрева магнетрона от времени генерации

Заключение

В работе обоснована перспективность повышения мощности генерирования магнетронных генераторов в СВЧ-стерилизаторах, что в частности создаёт возможности уменьшения времени стерилизационной обработки и увеличения количества обрабатываемых объектов. Показана необходимость разработки жидкостной системы охлаждения магнетронного генератора на уровнях мощности от

1,5-3 кВт. Предложена конструкторская схема магнетрона с жидкостным охлаждением и портативная система автоматического управления температурным режимом работы магнетрона, обеспечивающая его стабильную работу.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 22-19-00357).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Быстрый метод полной деконтаминации в СВЧ электромагнитном поле / В.Б. Байбурин и др. // Вопросы электротехнологии. 2022. Т. 35. №. 2. С. 27.
2. Анализ возможностей создания магнетрона повышенной мощности для свч-стерилизатора на основе математической модели и экспериментального образца / В.П. Ерёмин и др. // Journal of Electrotechnics. 2022. С. 39.
3. **Байбурин В.Б., Комаров В.В., Мещанов В.П.** Моделирование электродинамических параметров микроволнового стерилизатора // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2022. Т. 25. № 4. С. 52-58.

4. Стерилизация медицинских инструментов на основе СВЧ электротехнологии / В.Б. Байбурин и др. // Вопросы электротехнологии. 2018. Т. 19. № 2. С. 5.
5. **Кузьмичёв А.И.** Магнетронные распылительные системы. Кн. 1. Введение в физику и технику магнетронного распыления. 2008.
6. Моделирование и исследование системы электропитания мультигенераторной установки СВЧ-нагрева / И.И. Артюхов и др. // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер.: Технические науки. 2020. Т. 28. № 4 (68). С. 106-117.

Никифоров Александр Анатольевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Радиоэлектроника и телекоммуникации» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Байбурин Вил Бариевич – доктор физико-математических наук, профессор кафедры «Информационная безопасность автоматизированных систем» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Пахомов Ярослав Алексеевич – аспирант кафедры «Приборостроение» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Мещанов Валерий Петрович – доктор технических наук, профессор, директор ООО «НПП «НИКА-СВЧ»

Комаров Вячеслав Вячеславович – доктор технических наук, профессор кафедры «Радиоэлектроника и телекоммуникации» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Дорошенко Валентина Михайловна – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Радиоэлектроника и телекоммуникации» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Alexander A. Nikiforov – PhD (Technical Sciences), Associate Professor, Department of Radio Electronics and Telecommunications, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Vil B. Bayburin – Dr. Sc. (Physics and Mathematics), Professor, Department of Information Security of Automated Systems, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Yaroslav A. Pakhomov – Postgraduate student, Department of Instrument Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Valery P. Meshchanov – Dr Sci. Tech., Professor, Director of OOO NPP NIKA-SVCh

Vyacheslav V. Komarov – Dr.Sci.Tech., Professor, Department of Radio Electronics and Telecommunications, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Valentina M. Doroshenko – PhD (Physics and Mathematics), Associate Professor, Department of Radio Electronics and Telecommunications, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 25.08.23, принята к опубликованию 08.09.23

УДК 621.382

ИОННО-ЛУЧЕВОЕ ФОРМИРОВАНИЕ СЕРЕБРОСОДЕРЖАЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ТИТАНА ПОВЫШЕННОЙ ТВЕРДОСТИ И УСТАЛОСТНОЙ ПРОЧНОСТИ

И.В. Перинская, В.В. Перинский, И.В. Родионов, Л.Е. Куц

ION IMPLANTATION OF SILVER NANOPARTICLES ON TITANIUM SURFACE OF INCREASED HARDNESS AND FATIGUE STRENGTH

I.V. Perinskaya, V.V. Perinsky, I.V. Rodionov, L.E.Kuts

Представлены результаты исследования процесса формирования серебряносодержащей поверхности титановых (VT1-0) элементов медицинской техники методом ионно-лучевого легирования. Проведено компьютерное моделирование процесса, используя программный пакет TRIM/SRIM с целью определения окрестностей дозы и энергии ионов серебра, необходимых и достаточных в эксперименте. Исследовано влияние облучения ионами серебра на микротвердость и усталостную прочность поверхности титана.

Ключевые слова: ионы серебра, титан, ионно-лучевое легирование, микротвердость, усталостная прочность, компьютерное моделирование

Научно-технический прогресс в области создания медицинской техники, в том числе внутрикостных имплантатов нового поколения, требует совершенствования существующих и разработки принципиально новых технологических процессов, направленных на повышение их надежности и долговечности. При этом финишные методы обработки, формирующие физико-химическое состояние поверхностного слоя медицинских изделий, играют в большинстве случаев определяющую роль.

Внутрикостные имплантаты относятся к наиболее востребованным изделиям медицинской техники при ортопедическом лечении и функционируют весьма в широком диапазоне знакопеременных циклических,

The article presents the results of research into creation of silver-containing titanium surfaces (VT1-0) of the medical tools using the ion-beam alloying technique. A computer simulation of the process was carried out using the TRIM/SRIM software package to determine the distribution of the dose and energy of silver ions necessary and sufficient for the experiment. Effects of silver ion irradiation on microhardness and fatigue life of the titanium surface was studied.

Keywords: silver ions, titanium, ion-beam alloying, microhardness, fatigue life, computer modeling

динамических и статических нагрузок, возникающих при установке и функционировании конструкций. Кроме того они подвержены воздействию окислительных продуктов окружающей биологической ткани и патогенной среды.

Для улучшения характеристик материала внутрикостных имплантатов, зависящих от состояния поверхности и определяющих твердость, усталостную прочность, биосовместимость, существует целый набор технологических процессов: вакуумное напыление, микродуговое оксидирование, азотирование, электроплазменные покрытия, однако, каждый из них в отдельности либо недостаточно эффективен и управляем, либо не является универсальным [1-6].

Антимикробные серебрясодержащие покрытия, синтезированные на внутрикостных имплантатах, позволяют избежать многих осложнений после операций вживления, связанных с воспалительными процессами; сократить число ревизионных операций; ускорить приживление имплантата. В настоящее время серебро рассматривается не только как вещество, обладающее антимикробными свойствами, а как микроэлемент, который является необходимой составной частью тканей любого живого организма [7-9].

Авторами разработан процесс формирования серебрясодержащей поверхности титановых BT1-0 элементов медицинской техники (имплантатов) методом ионно-лучевого легирования, который обеспечит создание развитой морфологии поверхности на наноуровне, с антимикробным эффектом в прилегающих к эндопротезу тканях с высокой воспроизводимостью и управляемостью, присущей методу ионной модификации, что будет способствовать увеличению выхода годных изделий при остеоинтеграции имплантата.

Образцы титана BT1-0 «титан технический» представляли пластины 25×20 мм толщиной 2 мм, вырезанные из листа электроискровым способом. Механически обработанную, полированную поверхность титановых образцов облучали

ионами серебра (Ag^+) на установке ионного легирования «Везувий-5» с ускоряющим напряжением 40-90 кВ и дозой $(1-4) \cdot 10^{17}$.

Элементный состав поверхности ионно-легированных титановых образцов изучался на установке вторично-ионной масс-спектроскопии TOF.SIMS 5 с расчетной скоростью ионного травления $\sim 4-5 \text{ нм} \cdot \text{мин}^{-1}$. Микротвердость поверхностных слоев образцов титана измерялась методом вдавливания алмазного индентора на установке DuraVision 300 при нагрузке 20 г в течение 15 с.

Испытания на усталостную прочность осуществлялась методом знакопеременного консольного изгиба до разрушения с частотой 22,5 Гц.

Компьютерное моделирование пробегов, электронных и ядерных потерь ионов серебра проводилось в программном пакете TRIM/SRIM (*Transport of Ions in Matter – The stopping and range of ions in matter*) диапазоне энергий 40-90 кэВ [10].

Для проведения моделирования процесса ионно-лучевого легирования ионами серебра титановых образцов была задана следующая информация: масса ионов серебра 107,868, масса ионов титана 47,9, плотность титана BT1-0 4,505 г/см³ и данные, представленные в табл. 1.

Таблица 1 – Исходные данные для моделирования

Наименование	Единица измерения	Величина
Начальная энергия иона	кэВ	80
Число ионов	шт.	10^6
Угол наклона мишени	град.	0
Толщина мишени	ангстрем	1000

Результаты проведенного компьютерного моделирования процесса ионно-лучевого легирования ионами серебра поверхности титановых образцов представлены в табл. 2, на рис. 1-3.

На рис. 2 и 3 представлены графики распределения ионов серебра в припо-

верхностном слое титановых образцов. Из них можно получить информацию о среднем проецируемом пробеге ионов, а также поперечном разбросе имплантируемых ионов.

Проведенное компьютерное моделирование процесса, используя программный

пакет TRIM/SRIM, позволило определить окрестность энергии ионов серебра, необходимую в эксперименте: 40-90 кВ, определиться с типом установки ионного легирования: «Везувий-5».

Зависимость микротвердости от дозы и ускоряющего напряжения ионов серебра имеет вид, показанный на рис. 4 и соответ-

ствующий представлениям, что увеличение микротвердости при ионно-лучевой обработке связано с образованием радиационных дефектов, закрепляющих дислокации [11].

Увеличение усталостной прочности при ионно-лучевом легировании титана ионами серебра имеет вид, представленный на рис. 5, 6.

Таблица 2 – Данные полученные с помощью программного пакета TRIM/SRIM

Энергия иона, E, кэВ	Энергия ядерного торможения, dE/dx, эВ	Энергия электронного торможения, dE/dx, эВ	Средний проецируемый пробег (Projected Range), Å
40	$2,39 \cdot 10^{10}$	$2,45 \cdot 10^9$	172
45	$2,44 \cdot 10^{10}$	$2,6 \cdot 10^9$	187
50	$2,48 \cdot 10^{10}$	$2,74 \cdot 10^9$	201
55	$2,51 \cdot 10^{10}$	$2,88 \cdot 10^9$	215
60	$2,55 \cdot 10^{10}$	$3 \cdot 10^9$	229
65	$2,57 \cdot 10^{10}$	$3,13 \cdot 10^9$	243
70	$2,59 \cdot 10^{10}$	$3,24 \cdot 10^9$	257
80	$2,63 \cdot 10^{10}$	$3,47 \cdot 10^9$	284
90	$2,66 \cdot 10^{10}$	$3,68 \cdot 10^9$	311

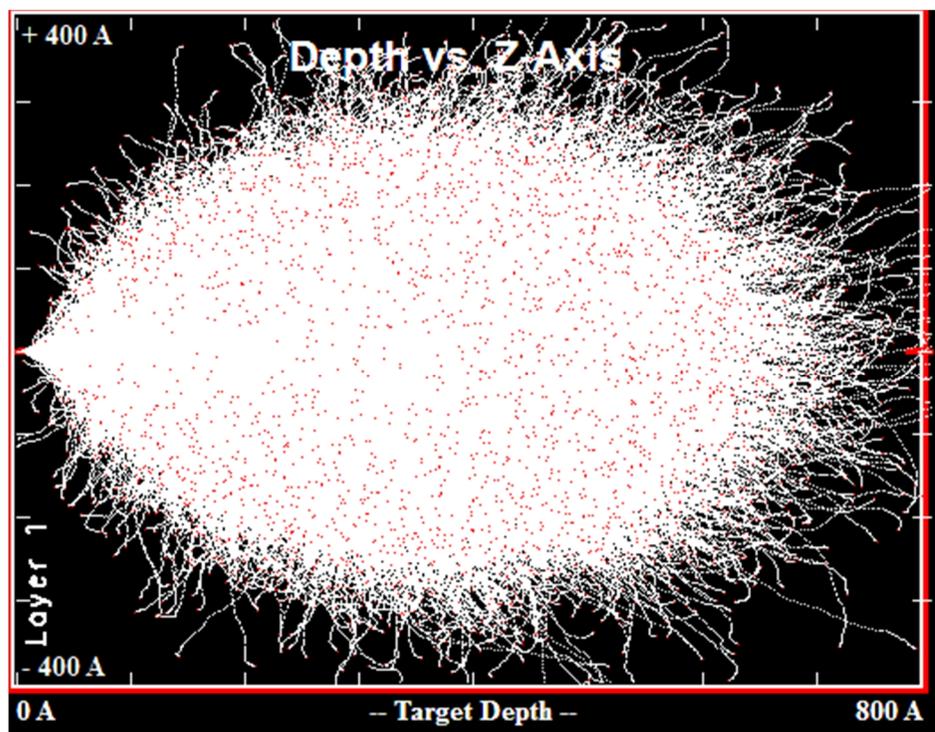


Рис. 1. Распределение ионов серебра с начальной энергией 80 кэВ по глубине титанового образца

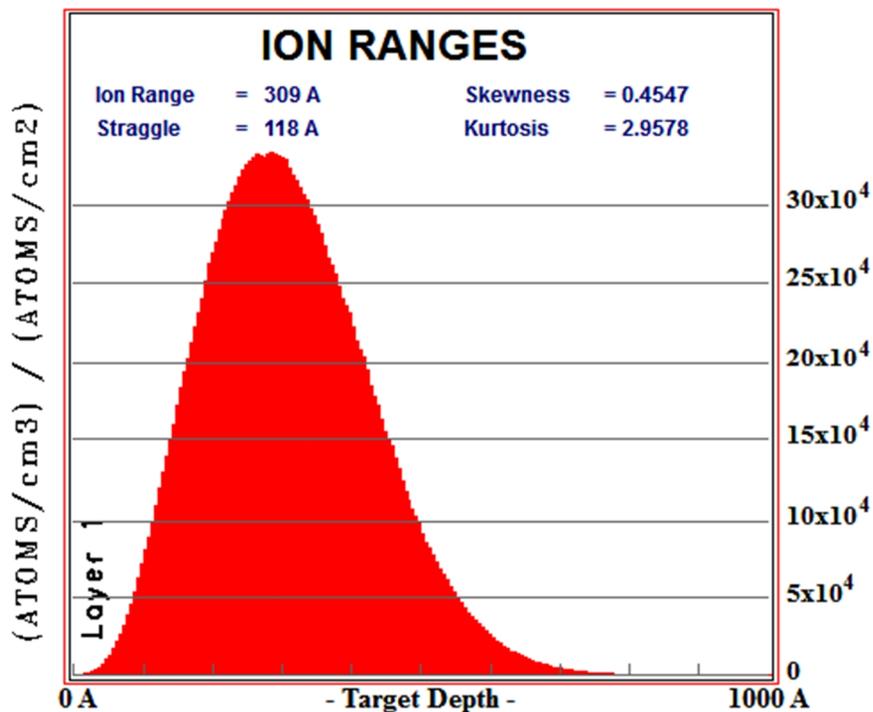
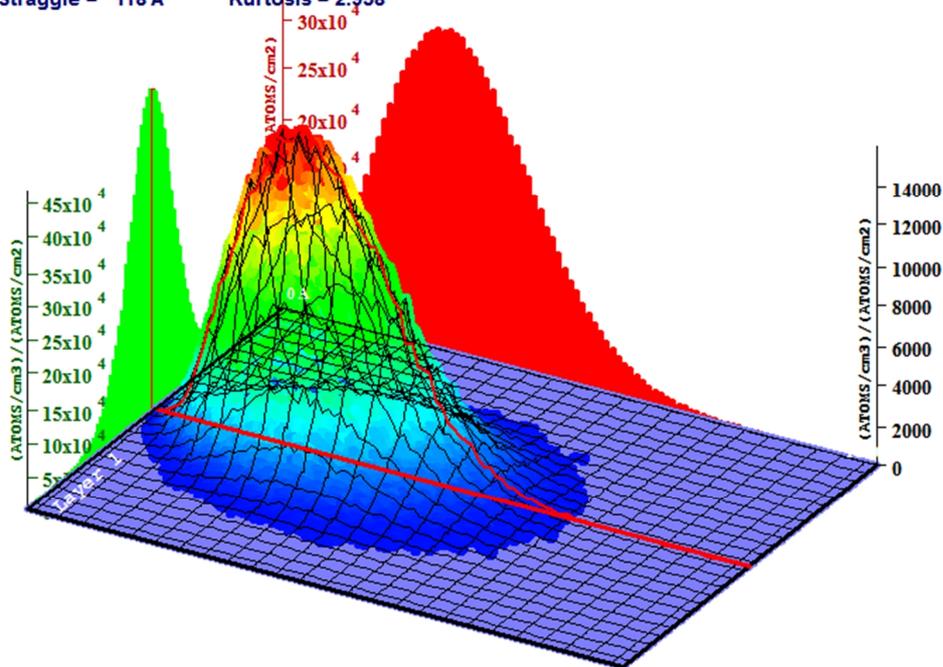


Рис. 2. График распределения ионов серебра с начальной энергией 80 кэВ в приповерхностном слое титанового образца

Ion Distribution

Ion Range = 309 A Skewness = 0.455
 Straggle = 118 A Kurtosis = 2.958



Plot Window goes from 0 A to 1000 A; cell width = 10 A
 Press PAUSE TRIM to speed plots. Rotate plot with Mouse.

Ion = Ag (85. keV)

Рис. 3. Трёхмерный график распределения ионов серебра с начальной энергией 80 кэВ в приповерхностном слое титанового образца

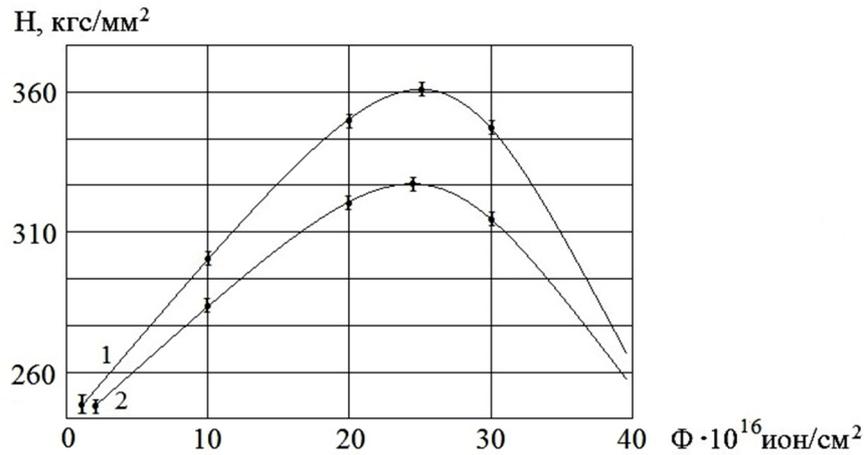


Рис. 4. Дозовая зависимость микротвердости титана: 1 – $U_{уск Ag^+} = 80$ кВ; 2 – $U_{уск Ag^+} = 60$ кВ

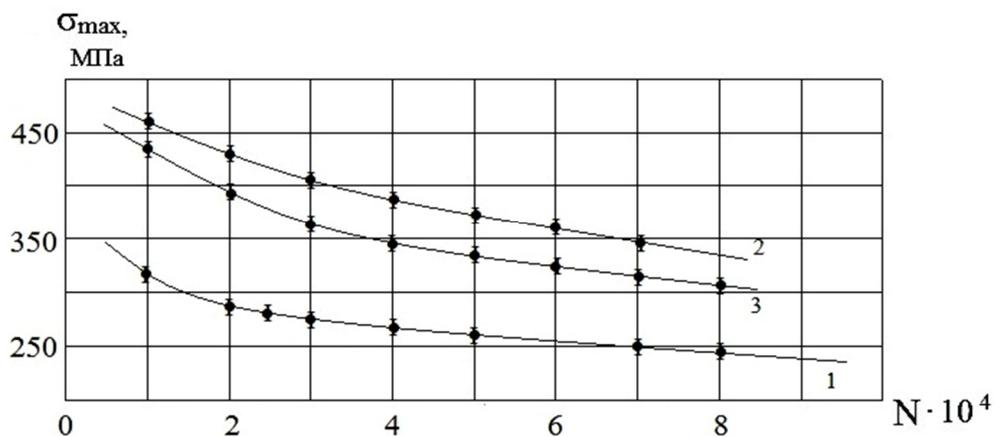


Рис. 5. Влияние ионов серебра на усталостную прочность титана: 1 – Ti; 2 – $\Phi_{Ag^+} = 2,5 \cdot 10^{17}$ ион/см², $U_{уск Ag^+} = 80$ кВ; 3 – $\Phi_{Ag^+} = 2,5 \cdot 10^{17}$ ион/см², $U_{уск Ag^+} = 60$ кВ

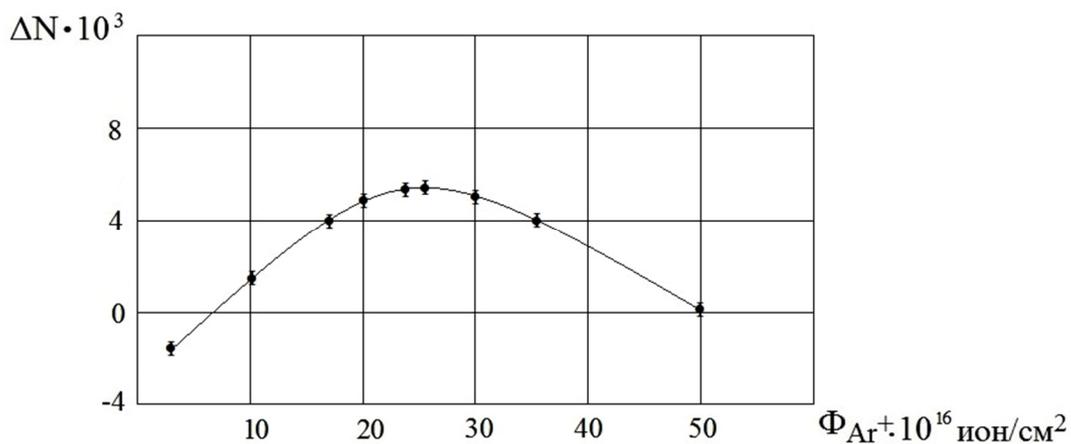


Рис. 6. Зависимость усталостной прочности титана VT1-0 от дозы ионов серебра

Максимальное увеличение усталостной прочности происходит при дозе ионов серебра $\Phi = (2-3) \cdot 10^{17}$ ион/см², т. е. совпадает с максимумом дозовой зависимости микротвердости. Зависимость усталостной прочности титана VT1-0 от ускоряющего

напряжения ионов серебра в исследованном диапазоне незначительна.

По данным вторично-ионной масс-спектрометрии поверхность полученных титановых образцов с серебросодержащим приповерхностным слоем характеризу-

лась распадом окислов, увеличением концентрации свободного кислорода и повышением концентрации углерода и углерод-

содержащих соединений, значительным повышением концентрации серебра (табл. 3).

Таблица 3 – Элементный состав ионно-легированных титановых образцов

Элемент, соединение	Масса, а.е.м.	Содержание, отн. ед.		Относительное приращение
		исходные	облученные	
C	12	500	600	1,2
CH	13	$5 \cdot 10^4$	$5 \cdot 10^4$	1,0
CH ₂ , (N)	14	190	230	1,2
CH ₃ , (NH)	15	250	300	1,2
O, (CH ₄)	16	180	220	1,2
H ₂ O	18	300	700	2,3
N ₂ , (CO)	28	1600	4700	2,9
O ₂	32	18	13	0,7
CO ₂	44	250	750	3,0
Fe	56	60	400	6,7
FeO	72	170	130	0,76
Ag	108	26	1200	46

Известен эффект изменения элементного состава поверхности ионно-легированных образцов титана, основанный на ионно-лучевом синтезе углеродосодержащих покрытий, образующихся при ионно-стимулированной полимеризации радикалов углеродсодержащих фрагментов, находящихся в атмосфере вакуумной камеры установки ионного легирования с диффузионными насосами [12-13]. Синтезируемое углеродосодержащее покрытие обладает высокой равномерностью толщины и беспористостью.

Алмазоподобная структура покрытия, обеспечивающая увеличение микротвердости связывается с импульсным энергетическим воздействием ионного пучка. Такие покрытия с контролируемой толщиной и пористостью получены авторами ионно-лучевой полимеризацией углеводородов, облучением титана ионами углерода, аргона [13].

В настоящей работе такие углеродосодержащие покрытия с контролируемой твердостью, синтезируемые в вакуумной камере установки ионного легирования при

энергетическом воздействии ионов серебра в процессе их имплантации обеспечивают увеличение микротвердости поверхности и усталостной прочности титана.

Выводы

1. Зависимость микротвердости от дозы и ускоряющего напряжения ионов серебра имеет вид, соответствующий представлениям, что увеличение микротвердости ионно-легированных слоев при ионно-лучевой обработке связано с образованием радиационных дефектов, закрепляющих дислокации.

2. Увеличение усталостной прочности ионно-легированных титановых образцов при ускоряющем напряжении ионов серебра (60-80) кВ и дозы ионов серебра $(2-3) \cdot 10^{17}$ ион/см² связывается с формированием углеродосодержащих покрытий с контролируемой твердостью, получаемых ионно-лучевой полимеризацией углеводородов атмосферы вакуумной камеры установки ионного легирования при энергетическом воздействии ионов серебра в процессе их имплантации.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Биосовместимые материалы: учеб. пособие / Под ред. В.И. Севастьянова, М.П. Кирпичникова. Москва: ООО «Медицинское информационное агентство», 2011. 544 с.
2. **Путляев В.И.** Современные биокерамические материалы // Соросовский образовательный журнал. 2004. Т. 8. № 1. С. 32-44.
3. **Garner F.A., Toloczko M.B., Sencer B.H.** Comparison of swelling and irradiation creep behavior of fcc-austenitic and bcc-ferritic-martensitic alloys at high neutron exposure // J. Nucl. Mater. 2000. Vol. 276. P. 123-142.
4. **Catledge S.A., Fries M.** Nanostructured Surface Modification for Biomedical Implants // Encyclopedia of Nanotechnology. 2003. Vol. 10. P. 1-22.
5. Гелиевый блистеринг при больших дозах облучения / И.Н. Африканов, В.М. Гусев, М.И. Гусева и др. // Атомная энергия. 1979. Т. 46. Вып. 3. С. 14-26.
6. **Брынзан А.П., Канцер Ч.Т., Каплин В.А.** Применение микродугового оксидирования для получения диэлектрических покрытий // Электронная обработка металлов. 1990. № 4. С. 20-21.
7. **Букина Ю.А., Сергеева Е.А.** Антибактериальные свойства и механизм бактерицидного действия наночастиц и ионов серебра // Вестник Казанского технологического университета. 2012. Вып. 14. Т. 15. С. 170-172.
8. Antimicrobial particulate silver coatings on stainless steel implants for fracture management / Paul De Vas Con Cellos, Susmita Bose, Haluk Beyenal et al. // Materials Science and Engineering. 2012. Vol. 32. № 5. P. 1112-1120.
9. A preliminary study on antibacterial mechanisms of silver ions implanted stainless steel / Rongsheng Chen, Hongwei Ni, Hanshuang Zhang, Gao Yue et al. // Vacuum. 2013. Vol. 89. P. 249-253.
10. **Ziegler I.E.** SRIM – the stopping and range of ions in matter // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B. 2010. Vol. 268. P. 1818-1823.
11. **Перинская И.В.** Механические характеристики и элементный состав поверхности титана, имплантированного ионами серебра // Вопросы электротехнологии. 2017. № 4 (17). С. 69-72.
12. **Перинская И.В., Мещанов В.П., Перинский В.В.** Ионно-модифицированный титан для медицинских изделий // Технология металлов. 2016. № 5. С. 34-39.
13. Повышение прочностных характеристик титана при имплантации ионами аргона / И.В. Перинская, И.В. Родионов, Л.Е. Куц, О.Д. Тищенко // Письма в журнал технической физики. 2018. Т. 44. № 10. С. 96-102.

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

Перинский Владимир Владимирович – доктор технических наук, профессор кафедры «Электроэнергетика и электротехника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

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

Vladimir V. Perinsky – Dr.Sci. Tech., Professor, Department of Electric Power and Electrical Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

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

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

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

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

Статья поступила в редакцию 17.08.23, принята к опубликованию 08.09.23

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

УДК 681.128.63

ЦИФРОВОЙ ЕМКОСТНЫЙ УРОВНЕМЕР ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЖИДКОСТЕЙ С КОМПЕНСАЦИЕЙ НЕСТАБИЛЬНОСТИ УРОВНЯ

А.Н. Шилин, С.В. Макартичян, С.С. Жабин

DIGITAL CAPACITIVE LEVEL METER FOR DIELECTRIC LIQUIDS WITH LEVEL INSTABILITY COMPENSATION

A.N. Shilin, S.V. Makartichyan, S.S. Zhabin

Приведен сравнительный анализ основных методов измерения уровня жидкостей в резервуарах. Предложена структурная схема цифрового емкостного уровнемера с компенсацией неустойчивости уровня, позволяющего проводить измерения независимо от диэлектрической проницаемости жидкости. Это же устройство может быть использовано для контроля наполнения емкостей диэлектрическими жидкостями. Использование в работе уровнемера электрических методов позволяет сравнительно просто получить результат измерения уровня в удобном для обработки цифровом виде и производить дистанционный контроль уровня жидкостей в резервуарах, что особенно актуально в вертикальных статичных или передвижных транспортных системах хранения или перевозки светлых нефтепродуктов.

Ключевые слова: методы измерения уровня, цилиндрический емкостный преобразователь, цифровые уровнемеры, компенсация неустойчивости уровня

Введение

Измерения уровня жидкостей является ключевой операцией при автоматизации технологических процессов во многих отраслях промышленности, особенно хими-

A comparative analysis of the main level measuring methods for the liquids in tanks is given. A block diagram of a digital capacitive level meter with level instability compensation is proposed, which allows measurements to be made independently of the liquid dielectric constant. The same device can be used to control the containers filling with dielectric liquids. The use of the electric methods makes it relatively easy to obtain the level measurement result, suitable for processing digital data and producing the liquids level remote control in tanks, which is especially important in vertical static or mobile transport storage or transportation of light oil products.

Keywords: level measurement methods, cylindrical capacitive converter, digital level meters, level instability compensation

ческой, нефтехимической и нефтеперерабатывающей. Именно в этих отраслях промышленности измерение уровня напрямую связано с условиями безопасной работы оборудования, а также вопросами коммер-

ческого учета светлых нефтепродуктов, на долю которых приходится около 70 % продуктов, получаемых из нефти.

В настоящее время, измерения уровня диэлектрических жидкостей осуществляют различными приборами и методами (поплавковые, гидростатические, емкостные, акустические, радиоизотопные и др.), возможности которых определяются технологическими требованиями (диапазон измерений, точность, взрывобезопасность и другие), а также влиянием таких параметров, как давление, плотность, вязкость, электропроводность среды.

В одних технологических процессах (например, в топливоизмерительных системах самолетов), измерения должны производиться с высокой точностью и в широком диапазоне, с непрерывным слежением за изменением уровня, и охватывающем всю рабочую высоту резервуара, порой не имеющего доступа обслуживающему персоналу со стороны боковых стенок или днища. В других случаях, для контроля уровня непроводящих жидкостей особой точности не требуется, и измерения производятся в сравнительно небольшом диапазоне измерений уровня или требуется лишь сигнализация заданных предельных значений максимума или минимума. Каждый тип жидкости характеризуется десятками параметров (физические и химические свойства контролируемой среды, температура, вязкость, электрическая проводимость, химическая агрессивность и т. д.), для измерения которых применяются множество методов и приборов, разнородных по принципу действия.

Сравнительный анализ существующих методов измерения уровня жидкостей в резервуарах

Радарные уровнемеры. Радарный уровнемер монтируется на крыше резервуара или в камере, при этом зонд обычно погружается на полную глубину емкости. Микроволновый импульс малой мощности сгенерированный электроникой волноводного радара, распространяется со скоростью света, вниз по всей длине зонда.

В точке контакта зонда радара и жидкости (границы раздела воздух/вода) значительная часть микроволновой энергии отражается и возвращается в обратном направлении по зонду в приемник. Уровнемер измеряет временную задержку между излучением и приемом излученного и отраженного сигналов, после чего встроенный микропроцессор рассчитывает расстояние до поверхности измеряемой среды. Так как часть энергии микроволнового импульса продолжает распространяться вдоль зонда, то при наличии в резервуаре двух жидкостей (с низкой и более высокой диэлектрической проницаемостью), радар может зарегистрировать второй эхо-сигнал, отраженный от границы раздела двух жидкостей. Благодаря этой особенности волноводные радары успешно применяются для измерения уровня границы раздела жидкость/жидкость, таких, к примеру, как, нефть/нефтепродукты и вода, в том числе при наличии некоторого слоя пены.

Преимущества. Радарные уровнемеры способны обеспечивать одновременное измерение уровня и уровня границы раздела сред, обеспечивая надежные измерения в самых разнообразных технологических процессах. Волноводные радары обеспечивают прямое измерение расстояния до поверхности технологической среды, что обуславливает возможность их применения на различных жидкостях и некоторых видах сыпучих материалов. Важнейшим преимуществом таких радаров является отсутствие потребности какой-либо коррекции настроек при изменении плотности, диэлектрической постоянной или электропроводности жидкости. На точность измерений радара не влияют перепады рабочего давления, температуры и состояние парогазового пространства над жидкостью. Что особенно важно, волноводные радары не имеют подвижных частей, что сводит к минимуму потребность в техническом обслуживании.

Недостатки. Каждый тип зонда выбирается в зависимости от типа среды, от диапазона измерений и монтажных ограничений. В ходе работы зонды не должны находиться в непосредственном контакте с металличе-

скими объектами, так как это вызовет помехи и ложные отражения. Если измеряемая среда имеет тенденцию к налипанию или образованию отложений, то следует использовать только одинарный зонд.

Ультразвуковые уровнемеры. Ультразвуковой уровнемер монтируется на крыше резервуара. В процессе работы уровнемер посылает ультразвуковые импульсы вниз по направлению к среде, уровень которой необходимо измерять. Ультразвуковой импульс распространяется в пространстве со скоростью звука. Отразившись от поверхности жидкости, импульс возвращается в приемник уровнемера. Электроника измеряет время задержки между моментом излучения и приема отраженного импульса. Далее встроенный микропроцессор вычисляет расстояние до поверхности жидкости.

Преимущества. Благодаря отсутствию подвижных частей и контакта с измеряемой средой, ультразвуковые уровнемеры практически не нуждаются в обслуживании. Смачиваемые части обычно изготовлены из инертных фторуглеродных материалов, устойчивых к коррозии, обусловленной конденсацией паров. Поскольку уровнемер является бесконтактным, результаты измерений не зависят от изменений плотности, диэлектрических свойств или вязкости среды; ультразвуковые уровнемеры хорошо подходят для измерения уровня различных водных растворов и химикатов. Изменения температуры процесса вызывают изменения скорости распространения ультразвукового импульса через парогазовое пространство над жидкостью, эти отклонения корректируются с использованием встроенного или выносного датчика температуры. Изменения давления процесса на результат измерений не влияют.

Недостатки. Низкая точность в условиях плотных паров. Ультразвуковой метод измерений нельзя использовать в процессах с вакуумметрическим давлением. Область применений ультразвуковых уровнемеров также ограничивается свойствами конструкционных материалов. Диапазон рабочих температур в большинстве случаев ограничивается температурой процесса до 70° С и давлением

до 0,3 МПа. Состояние поверхности жидкости имеет большое значение. Некоторая турбулентность допустима, но пенообразование зачастую ослабляет отраженный эхо-сигнал. Внутренние конструкции резервуаров вызывают ложные отражения.

Датчики давления. Датчики давления имеют несложную конструкцию, отличаются простотой монтажа и эксплуатации, и работают в самых разных применениях и в широком диапазоне условий технологических процессов. Если измерение уровня осуществляется в открытом/ вентилируемом резервуаре, то может использоваться один датчик избыточного гидростатического давления или датчик перепада давления. Простейшим способом измерения уровня в резервуаре является установка датчика давления на самом нижнем уровне жидкости: тогда уровень жидкости над точкой измерения может быть получен соответственно величине гидростатического давления, преобразуемой в высоту. Если резервуар находится под давлением, то показаний одного датчика избыточного давления недостаточно, так как изменение суммарного давления в резервуаре может повлиять на процесс измерения уровня. Для решения этой задачи в закрытых резервуарах должен применяться датчик перепада давления, чтобы скомпенсировать давление в резервуаре.

Преимущества. Датчики давления являются экономичным, простым в эксплуатации и хорошо изученным решением. В дополнение к этому датчики давления могут использоваться практически с любыми резервуарами и жидкостями, включая суспензии, и могут работать в широком диапазоне давлений и температур.

Недостатки. На точность измерения уровня датчиками давления может влиять изменение плотности жидкости, поэтому при работе с густыми, едкими или иными агрессивными жидкостями необходимо соблюдать особые меры предосторожности. Кроме того, некоторые среды имеют тенденцию к отвердеванию по мере возрастания концентрации. Датчики давления плохо работают с материалами, находящимися в затвердевшем состоянии.

Емкостные уровнемеры. При установке электрода для измерения уровня в резервуаре образуется конденсатор. Металлический стержень электрода выступает в качестве одной из обкладок/пластин конденсатора, а стенка резервуара (или электрод сравнения в неметаллических резервуарах) действует как другая пластина. При повышении уровня воздух или газ, окружающий электрод, вытесняется материалом, имеющим другое значение диэлектрической проницаемости. Изменение емкости конденсатора происходит из-за изменения диэлектрических свойств объема среды между пластинами. Это изменение регистрируется приборами для измерения емкости в радиочастотном диапазоне и преобразуется в команду для исполнительного реле или в пропорциональный выходной сигнал.

Преимущества. Емкостной уровнемер может использоваться в широком диапазоне технологических параметров, в частности, в условиях переменной плотности, повышенных температур, высоких давлений, при наличии вязких продуктов, пенистых материалов и паст. Он может применяться для непрерывного или точечного измерения уровня жидкостей и твердых сыпучих материалов, и пригоден для измерения уровня границы раздела сред. Кроме того, емкостные уровнемеры отличаются экономичностью и прочностью.

Недостатки. Изменение диэлектрических свойств материала, а также осаждение продукта на зонде приводят к ошибкам измерений емкостного уровнемера. Для компенсации влияния отложений продукта на емкостных зондах применяются дополнительные принадлежности. В неметаллических резервуарах или в баках, не имеющих вертикальных стенок, требуется применение дополнительного электрода сравнения. Калибровка емкостного уровнемера может вызывать затруднения, особенно в случае невозможности «калибровки на стенде», а изменение характеристик парогазового пространства может повлиять на выходной сигнал. Кроме того, работа емкостных уровнемеров значительно затруднена в условиях сильного пенообразования.

Буйковые уровнемеры. Буйковый уровнемер устанавливается на крыше резервуара или в выносной камере, подсоединяемой к резервуару через вентили. Конструктивно состоит из буйка, подвеса буйка, соединенного через торсионный вал или пружинного подвеса с электронным преобразователем уровнемера. По мере того как уровень жидкости в резервуаре повышается, буюк погружается в нее всё глубже и глубже. На буюк воздействует выталкивающая сила, пропорциональная весу жидкости, вытесненной буйком (закон Архимеда). Эта сила и ее изменения воспринимаются электронным преобразователем уровнемера. Снижение силы тяжести, создаваемой весом буйка, подвешенного в жидкости, пропорционально уровню жидкости, и на основании изменений силы тяжести микропроцессор, расположенный в блоке электроники уровнемера, рассчитывает уровень жидкости.

Преимущества. При условии, что техническое обслуживание и контроль калибровки выполняются регулярно, они безотказно работают в течение многих лет. Эти приборы получили широкое распространение благодаря способности работать при экстремальных значениях давления и температуры процесса, а также возможности определения уровня границы раздела двух жидкостей даже при наличии эмульсионных слоев между ними, что позволяет осуществлять измерение уровня в тяжелых условиях эксплуатации.

Недостатки. Погрешность измерений уровня зависит от правильности калибровки прибора в условиях эксплуатации. При нарушении калибровки показания уровня не будут соответствовать действительности. Большинство буйковых уровнемеров требуют регулярного технического обслуживания и повторной калибровки и могут быть повреждены в условиях частых перепадов уровня. Изменения плотности измеряемой среды также сильно влияют на точность измерений. В зимнее время буйки имеют свойство замерзать в камере и нередко случаи их заклинивания из-за перекося. Применение буйковых уровнемеров

с диапазоном измерений более 5 м считается нецелесообразным, в основном из-за сложности монтажа.

Магнитострикционные уровнемеры.

Магнитострикционные устройства определяют момент пересечения двух магнитных полей, одно из которых создается магнитом поплавка, а другое – волноводом. Электроника генерирует токовый импульс малой мощности, распространяющийся по волноводу, и, когда магнитное поле импульса взаимодействует с полем, создаваемым магнитом поплавка, возникает «скручивание» чувствительного элемента. При этом создается ультразвуковая волна, время распространения которой измеряется электронной уровнемером.

Преимущества. Магнитострикционные уровнемеры отличаются низкой погрешностью измерений (± 1 мм). Одним уровнемером можно измерять уровень, а также температуру процесса в одной или нескольких точках.

Недостатки. Поплавок магнитострикционного уровнемера должен находиться в непосредственном контакте с технологической средой. На нем возможно образования отложений, способных привести к потере подвижности; поплавки могут подвергаться коррозии и подходят для измерения уровня только жидких сред.

Поплавковые сигнализаторы уровня.

Поплавковый сигнализатор уровня обычно монтируется на боковой стенке резервуара

или в выносной камере и срабатывает, когда поплавков всплывает под действием жидкости, достигающей заданного уровня сигнализации. В конструкцию поплавковых сигнализаторов входят постоянные магниты, взаимодействующие друг с другом, один из которых находится на поплавке, а другой в корпусе сигнализатора. Переключение происходит в момент пересечения двух магнитных полей. Конструкция не содержит уплотнений, так как магниты взаимодействуют через стенку корпуса сигнализатора. Поплавок определенного веса поддерживается пружиной. Когда поплавков погружается в жидкость, действующая на пружину сила тяжести уменьшается, рабочий постоянный магнит поднимается, взаимодействуя с другим постоянным магнитом, расположенным в корпусе сигнализатора.

Преимущества. Благодаря простой конструкции с небольшим количеством элементов, поплавковые сигнализаторы очень надежны и просты в обслуживании. Они хорошо подходят для процессов с высокими давлениями и температурами, а разнообразие материалов смачиваемых деталей позволяет использовать такие сигнализаторы практически с любыми жидкостями.

Недостатки. Для обеспечения их бесперебойной работы рекомендуется осуществлять регулярный контроль и техническое обслуживание. Подвижные части таких сигнализаторов подвержены загрязнению липкими или вязкими жидкостями.

Таблица 1 – Сравнительный анализ и оценка методов измерения и сигнализации уровня

Параметр	Метод измерений						
	1	2	3	4	5	6	7
Аэрация	2	3	2	3	3	2	3
Перемешивание	3	2	1	2	3	2	2
Изменение температуры	2	3	2	3	2	3	3
Коррозия	2	3	3	2	2	2	2
Изменение плотности	2	3	3	3	2	2	2
Изменение диэлектрических свойств	3	1	3	3	3	3	3
Наличие пыли	3	3	1	3	1	3	1
Наличие пены	3	2	1	2	3	3	3
Высокие температуры процесса	3	3	1	3	3	1	3

Окончание табл. 1

Параметр	Метод измерений						
	1	2	3	4	5	6	7
Высокое давление в резервуаре	3	3	1	3	3	1	3
Внутренние конструкции в резервуаре	3	2	1	2	3	3	2
Низкие температуры процесса	3	3	3	3	2	3	3
Вакуумметрическое давление в резервуаре	2	3	1	3	3	3	3
Помехи (ЭМП, двигатели, компрессоры)	3	3	2	2	3	3	3
Отложения, налипания продукта	1	1	2	2	1	1	2
Суспензии	2	3	3	2	1	2	2
Сыпучие материалы	1	2	2	3	1	1	1
Пары	3	2	2	3	3	3	3
Вязкие среды	2	2	3	2	1	1	2
Стоимость	2	3	1	1	3	2	3
Точность	2	3	3	3	1	2	1
Быстродействие	2	3	3	3	2	3	2
Возможность автоматизации	2	3	2	2	2	2	2
Итого	54	59	46	58	51	51	54

* 1 – датчики давления, 2 – емкостные, 3 – ультразвуковые, 4 – радарные, 5 – буйковые, 6 – магнитострикционные, 7 – поплавковые

В табл. 1 приведен сравнительный анализ и оценка методов измерения и сигнализации уровня по основным критериям использования в различных технологических условиях: 1 – метод не подходит для данных условий; 2 – метод может работать в данных условиях, но надежность измерений может быть снижена или может потребоваться специальный монтаж; 3 – условие слабо влияет или не оказывает воздействия на эффективность данного метода.

Исходя из анализа результатов сравнения различных методов и средств измерения уровня следует, что большинству требований технологических процессов удовлетворяет емкостный метод. Отличительной особенностью емкостных уровнемеров является исключительная конструктивная простота первичных измерительных преобразователей, отсутствие в их составе подвижных частей, удобство монтажа, возможность использования в широком интервале температур и давлений, высокая чувствительность, малые габариты и масса, относительно высокая точность и быстродействие.

Однако, применение емкостных преобразователей уровня в системах управления и контроля ограничивается рядом недостатков, таких как влияние диэлектрической проницаемости контролируемой жидкости на результат измерений и отсутствие возможности использования одного и того же устройства для различных типов жидкостей с различными диэлектрическими проницаемостями без предварительной калибровки.

Принцип действия цифрового емкостного уровнемера диэлектрических жидкостей

В статье предлагается цифровой емкостный уровнемер с компенсацией нестабильности уровня, позволяющий проводить измерения независимо от диэлектрической проницаемости жидкости. На рис. 1 изображена блок-схема цифрового емкостного уровнемера, позволяющего производить измерения независимо от диэлектрической проницаемости жидкости.

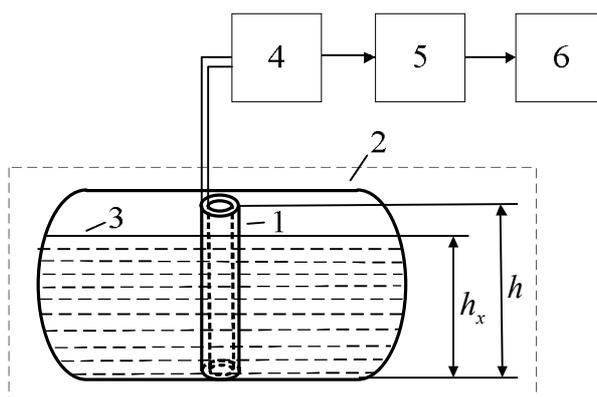


Рис. 1. Блок-схема цифрового измерителя уровня диэлектрических жидкостей

Цифровой емкостный уровнемер содержит коаксиальный цилиндрический емкостный преобразователь 1, погруженный в резервуар 2 с диэлектрической жидкостью 3. Емкостный преобразователь 1 представляет собой два проводящих коаксиальных цилиндра одинаковой высоты h с внутренним радиусом r_1 и внешним радиусом r_2 . Геометрические размеры преобразователя 1 определяются требованиями технологического процесса.

Емкость преобразователя, полностью заполненного воздухом (без учета краевых эффектов):

$$C_0 = \frac{2\pi\epsilon_0 h}{\ln(r_2/r_1)}. \quad (1)$$

Емкость преобразователя, полностью погруженного в диэлектрическую жидкость с относительной проницаемостью ϵ_r :

$$C_1 = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_r h}{\ln(r_2/r_1)}. \quad (2)$$

Емкость преобразователя, частично погруженного в диэлектрическую жидкость с относительной проницаемостью ϵ_r на высоту h_x , остальная часть которого $h - h_x$ заполнена воздухом:

$$C_x = \frac{2\pi\epsilon_0 [(\epsilon_r - 1)h_x + h]}{\ln(r_2/r_1)}. \quad (3)$$

Разность емкостей (2) и (1):

$$C_1 - C_0 = \frac{2\pi\epsilon_0 (\epsilon_r - 1)h}{\ln(r_2/r_1)}. \quad (4)$$

Разность емкостей (3) и (1):

$$C_x - C_0 = \frac{2\pi\epsilon_0 (\epsilon_r - 1)h_x}{\ln(r_2/r_1)}. \quad (5)$$

Тогда частное выражений (5) и (4)

$$\frac{C_x - C_0}{C_1 - C_0} = \frac{h_x}{h} \quad (6)$$

не содержит явно диэлектрической проницаемости ϵ_r . Выражая текущий уровень жидкости в резервуаре h_x из выражения (6), получим

$$h_x = h \cdot \frac{C_x - C_0}{C_1 - C_0}. \quad (7)$$

Последняя формула позволяет вычислить уровень жидкости в резервуаре, исходя из заданной высоты преобразователя 1, а также измеренных значений емкостей C_0 , C_1 и C_x независимо от диэлектрической проницаемости жидкости. Из формулы (7) видно, что при этом существует возможность полной или частичной компенсации аддитивной и мультипликативной составляющих погрешности измерения емкости преобразователя, обусловленных, например, наличием металлических стенок резервуара. Таким образом, решена проблема влияния диэлектрической проницаемости контролируемой жидкости на результат измерений и возможности применения одного и того же устройства для различных типов жидкостей с различными диэлектрическими проницаемостями без предварительной калибровки и использования для этих целей компенсационных датчиков.

Емкостный преобразователь 1 включен во времязадающую цепь генератора 4, со-

единенного со счетным входом микроконтроллера 5. К одному из портов ввода-вывода микроконтроллера 5 подключен цифровой индикатор 6 для отображения результатов измерения.

Генератор 4, выходные импульсы которого подсчитываются микроконтролле-

ром 5, представляет собой автоколебательный мультивибратор, одна из схем которого приведена на рис. 2 а [3].

Период импульсов генератора 4 (рис. 2 б) прямо пропорционально зависит от емкости C_x преобразователя 1, т. е. $T \sim R C_x$.

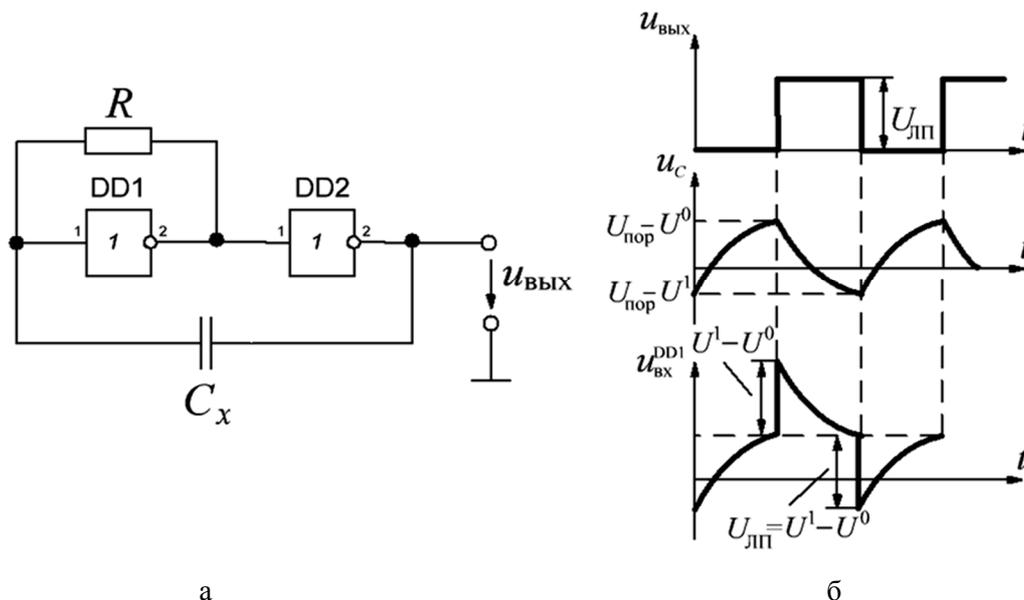


Рис. 2. Схема (а) и временные диаграммы работы (б) RC-генератора

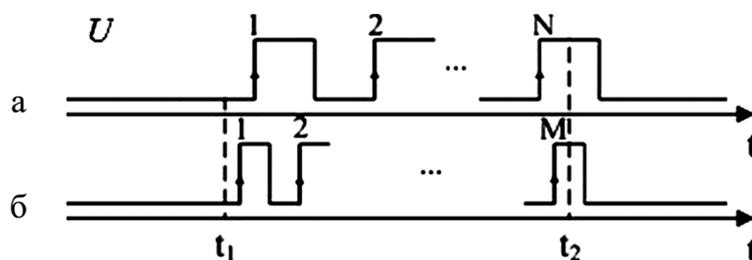


Рис. 3. Временные диаграммы работы микроконтроллера

Измерение уровня диэлектрической жидкости 2 в резервуаре 3 происходит за некоторый интервал времени $t_1 - t_2$ (рис. 3). В момент времени t_1 на разрешающем входе генератора 4 устанавливается логический уровень напряжения, разрешающий генерирование, и микроконтроллер 5 запускает два внутренних счетчика, первый из которых предназначен для счета импульсов генератора 4, второй счетчик – для счета тактовых импульсов внутреннего генератора микроконтроллера 5 (диаграммы а и б, рис. 3). В момент времени t_2 микроконтроллер 5 останавливает оба внутренних счетчика, в кото-

рых к этому моменту формируются двоичные коды N и M . Двоичный код $N_x = M \cdot T / T_x$ на выходе первого счетчика микроконтроллера 5 обратно пропорционален емкости C_x преобразователя 1, где N_x – количество периодов генератора 4, подсчитанных первым счетчиком; T_x – период следования прямоугольных импульсов генератора 4, прямо пропорционально связанный с емкостью C_x преобразователя 1; T – период следования тактовых импульсов внутреннего генератора микроконтроллера 5.

В памяти микроконтроллера 5 к этому моменту времени должны находиться циф-

ровой код $N_0 = M \cdot T / T_0$, соответствующий заполненному воздухом измерительному преобразователю 1, и цифровой код $N_1 = M \cdot T / T_1$, соответствующий полностью погруженному в диэлектрическую жидкость измерительному преобразователю 1, то есть до начала измерений текущего уровня жидкости необходимо один раз наполнить резервуар исследуемой жидкостью полностью до уровня h .

Тогда, исходя из цифровых кодов N_0 , N_1 и N_x микроконтроллер 5 рассчитывает текущий уровень жидкости в резервуаре по формуле

$$h_x = h \cdot \frac{\frac{1}{N_x} - \frac{1}{N_0}}{\frac{1}{N_1} - \frac{1}{N_0}} = h \cdot \frac{(N_0 - N_x) N_1}{(N_0 - N_1) N_x}. \quad (8)$$

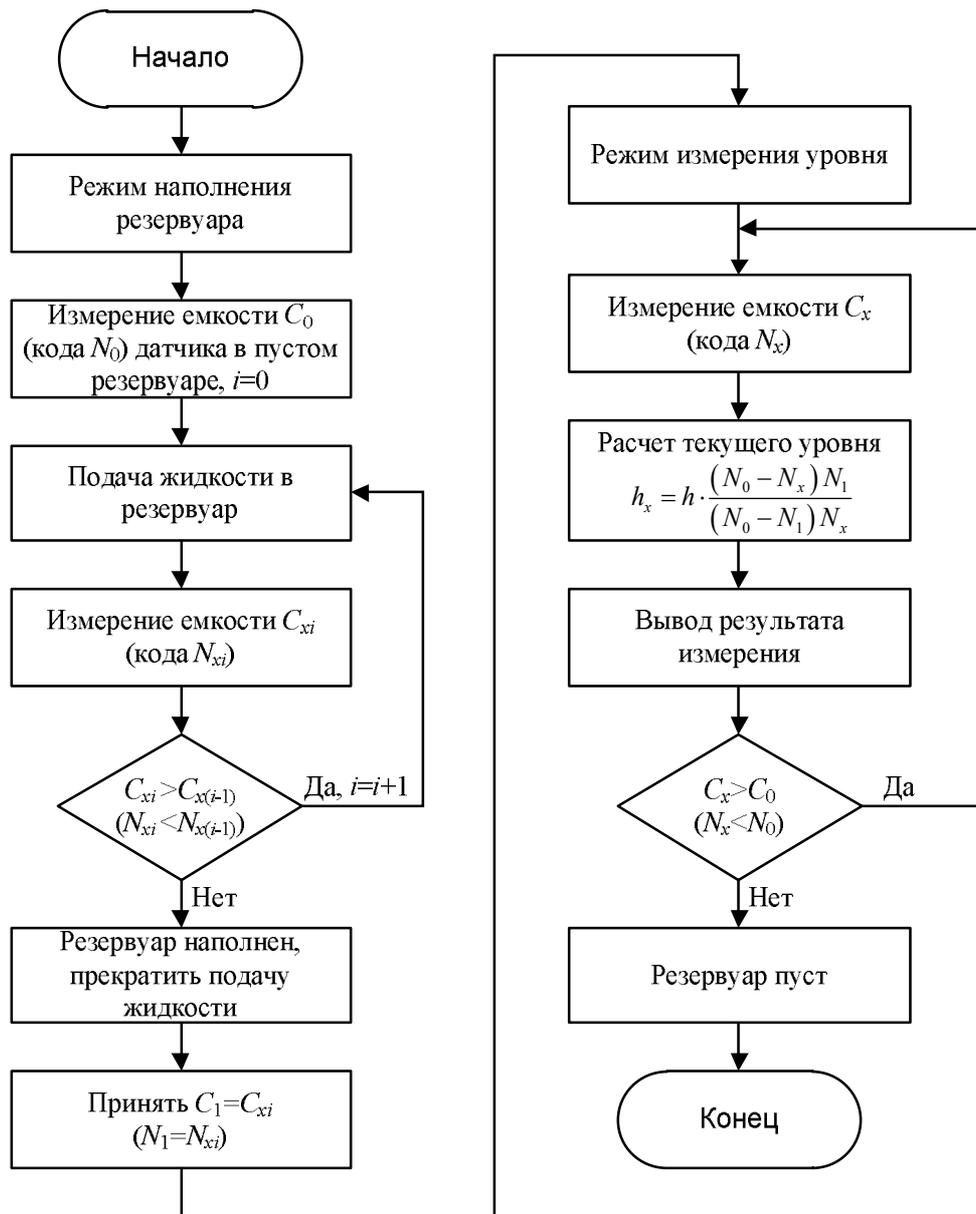


Рис. 4. Блок-схема работы емкостного уровнемера

На рис. 4 приведена блок-схема работы одного цикла работы уровнемера начиная с процесса заполнения резервуара и заканчи-

вая опустошением резервуара. Из приведенной блок схемы и соотношений (7) или (8) видно, что разработанное устройство при-

годно для непрерывного измерения текущего уровня любой диэлектрической жидкости как в процессе наполнения, так и в процессе опустошения резервуара. Работоспособность устройства была проверена и подтверждена с использованием пакетов прикладных программ Elcut Student и Multisim.

Способ компенсации неустойчивости уровня жидкости в резервуаре

Проблема измерения уровня жидкости при его неустойчивости достаточно актуальна. В случаях, когда требуется непрерывное измерение текущего уровня, а на поверхности жидкости образовались волны, или когда резервуар находится под некоторым углом к поверхности земли, изме-

рения могут обладать существенной погрешностью.

Предлагаемый способ компенсации неустойчивости уровня диэлектрической жидкости предполагает расположение нескольких датчиков по резервуару. Тогда фактический уровень жидкости можно в первом приближении представить как среднее арифметическое уровней, найденных для каждого отдельного датчика. Способ геометрического размещения датчиков уровня в этом случае предполагает расположение одного измерительного преобразователя в центре емкости, а остальных – по периметру дна (рис. 5). Количество используемых датчиков определяется требуемой точностью измерений.

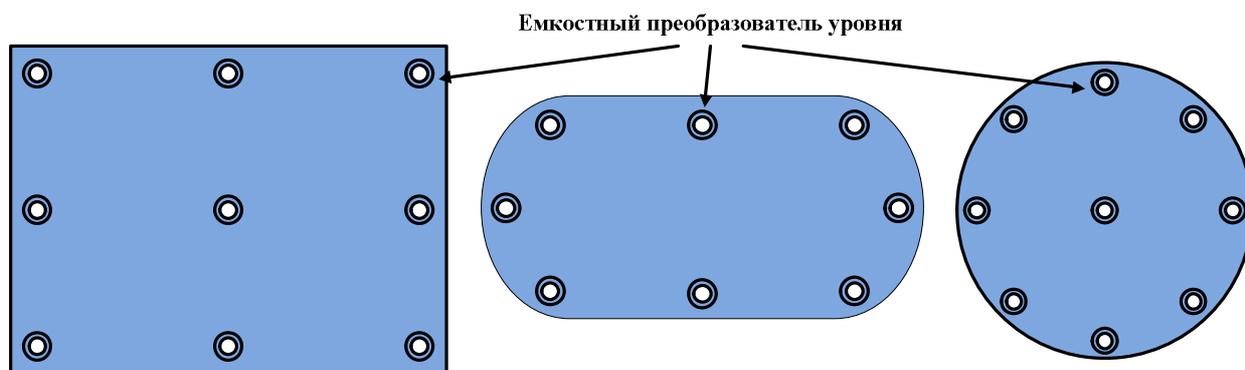


Рис. 5. Варианты размещения емкостных преобразователей в резервуарах разной формы (вид сверху)

Можно обратить внимание на то, что описанную выше методику измерения уровня в системе с одним измерительным преобразователем (рис. 1) можно использовать и в этом случае. При параллельном соединении одинаковых измерительных преобразователей, приведенных на рис. 5, можно использовать один и тот же генератор 4 (рис. 1) и полученные соотношения (7), (8) будут выражать в этом случае среднее арифметическое уровней, полученных для каждого датчика в отдельности. Таким образом, нет необходимости использования приведенной измерительной схемы рис. 1 для каждого датчика в отдельности.

Заключение

Применение разработанного цифрового емкостного уровнемера позволит произво-

дить непрерывные измерения текущего уровня диэлектрической жидкости независимо от ее диэлектрической проницаемости как в процессе наполнения, так и в процессе опустошения резервуара. Из приведенных в статье формул измерения видно, что существует возможность полной или частичной компенсации аддитивной и мультипликативной составляющих погрешности измерения емкости преобразователя, обусловленных, например, наличием металлических стенок резервуара. Таким образом решена проблема влияния диэлектрической проницаемости контролируемой жидкости на результат измерений и возможности применения одного и того же устройства для различных типов жидкостей без его предварительной калибровки и использования для этих целей компенсационных датчиков.

Предложен способ компенсации неустойчивости уровня диэлектрической жидкости, предполагающий расположение нескольких датчиков по резервуару. Тогда при параллельном соединении

одинаковых датчиков фактический уровень жидкости определяется как среднее арифметическое уровней, найденных для каждого датчика в отдельности.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Левшина Е.С., Новицкий П.В. Электрические измерения физических величин. (Измерительные преобразователи). Ленинград: Энергоатомиздат, 1983. 320 с.

2. Гальперин М.В. Практическая схемотехника в промышленной автоматике. Москва: Энергоатомиздат, 1987. 320 с.

3. Мастепаненко М.А. Информационно-измерительная система непрерывного контроля уровня топлива в емкостях: дис. ... канд. техн. наук: 05.11.16: защищена 20.02.2015. Ставрополь, 2014. 163 с.

4. П. м. 155522 РФ, МПК G01N27/22. Цифровой поточный измеритель влажности тонких листовых материалов / А.Н. Шилин, С.В. Макартичян, М.В. Кузьмичев; ВолгГТУ. 2015.

5. Емкостные датчики / В.М. Шарапов, И.Г. Минаев, К.В. Базило и др. Черкассы: Брама – Украина, 2010. 152 с.

6. Джежора А.А. Электроемкостные преобразователи и методы их расчета. Минск: РУП «Издат. дом «Белорусская наука», 2008. 305 с.

7. ГОСТ Р 8.660- 2009 ГСИ. Уровнемеры промышленного применения. Введ. 2009-12-15. Москва: Изд-во стандартов, 2010.

8. Медведев А.Г. Разработка и исследование поверхностных емкостных датчиков для измерения уровня топлива: дис. ... канд. техн. наук: 05.11.01. Ульяновск, 2008. 235 с.

9. Пат. 2407993 Российская Федерация, МПК 8 G01F23/24. Емкостной способ измерения уровня жидкостей и устройство для его осуществления / И.Г. Минаев, М.А. Мастепаненко; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО Ставропольский государственный аграрный университет. № 2009141472/28; заявл. 09.11.2009; опубл. 27.12.2010. Бюл. № 36. 2 с.

10. Теоретические основы электротехники / К.С. Демирчян, Л.Р. Нейман, Н.В. Коровкин, В.Л. Чечурин. Санкт-Петербург: Питер, 2006. Т. 2. 576 с.

Шилин Александр Николаевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Электротехника» Волгоградского государственного технического университета

Макартичян Сергей Валерьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электротехника» Волгоградского государственного технического университета

Жабин Степан Сергеевич – магистрант направления «Приборостроение» кафедры «Электротехника» Волгоградского государственного технического университета

Alexander N. Shilin – Dr.Sci. Tech., Professor, Department of Electrical Engineering, Volgograd State Technical University

Sergei V. Makartichyan – PhD (Technical Sciences), Department of Electrical Engineering, Volgograd State Technical University

Stepan S. Zhabin – Master student, Department of Electrical Engineering, Volgograd State Technical University

Статья поступила в редакцию 12.07.23, принята к опубликованию 04.09.23

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

УДК 621.3.078

НАБЛЮДАТЕЛЬ ДИНАМИЧЕСКОГО УРОВНЯ ЖИДКОСТИ В НЕФТЯНОЙ СКВАЖИНЕ

А.В. Стариков, И.А. Косорлуков, К.М. Чубаров

OBSERVER OF THE DYNAMIC LIQUID LEVEL IN THE OIL WELL

A.V. Starikov, I.A. Kosorlukov, K.M. Chubarov

В статье рассматривается возможность технической реализации наблюдателя динамического уровня жидкости в нефтяной скважине по сигналам датчиков тока станции управления погружным насосом. Показано, что непосредственное измерение динамического уровня эхолотом или косвенное с помощью термоманометрической системы требует применения дорогостоящего оборудования. Предложено использовать вычислительные возможности контроллера станции управления расчета динамического уровня. Найдена аналитическая зависимость тока на выходе станции управления от величины динамического уровня. Построен график этой зависимости, который наглядно показал возможность использовать измерения тока для определения динамического уровня жидкости в скважине. Найдено аналитическое выражение для вычисления динамического уровня жидкости по сигналам датчика тока станции управления и параметрам электротехнического комплекса добывающей скважины. Произведен анализ погрешности наблюдателя динамического уровня, использующий для вычисления полученную зависимость.

Ключевые слова: наблюдатель, динамический уровень жидкости, нефтяная скважина, погружной электродвигатель, станция управления

The article considers the possibility for technical implementation of the observer of the dynamic liquid level in an oil well based on the signals of current sensors at the submersible pump control station. It is shown that direct measurements of the dynamic level using the echo sounder or indirect measurements using the thermo-manometric system requires the use of expensive equipment. It is proposed to use computational capabilities of the controller at the control station for calculating the dynamic level. Analytical dependence of the current at the output of the control station on the value of the dynamic level is found. A graph of the given dependence was built, which clearly showed the possibility of using current measurements to determine the dynamic level of the liquid in the well. An analytical expression is found for calculating the dynamic level of the liquid from the signals of the current sensor at the control station and parameters of the electrical complex in the production well. Inaccuracy analysis of the observer of the dynamic level was made, using the obtained dependence for calculation purposes.

Keywords: observer, dynamic liquid level, oil well, submersible motor, control station

Введение

Поддержание динамического уровня жидкости в скважине при механизированной добыче нефти является важной технической задачей, поскольку позволяет обеспечить длительный установившийся режим функционирования скважины с требуемым дебитом. Для решения этой задачи используют станции управления погружным оборудованием, оснащенные частотными преобразователями и контроллерами, с помощью которых реализуются замкнутые по датчику динамического уровня жидкости автоматические системы. Для измерения динамического уровня можно применять эхолоты, устанавливаемые на устье скважины [1, 2]. Но в нефтяной отрасли наибольшее распространение нашли термоманометрические системы, позволяющие контролировать динамический уровень посредством измерения давления жидкости на приеме насоса [3]. В обоих случаях контроль динамического уровня жидкости в скважине требует применения дорогостоящего оборудования. С другой стороны, станция управления погружным насосом имеет в своем составе программируемый контроллер, имеющий, как правило, большие вычислительные возможности. Эти возможности целесообразно использовать для косвенного определения динамического уровня жидкости в скважине, например, посредством наблюдателя, использующего при вычислении информацию датчика расхода, установленного на устье скважины. [4, 5]. Кроме того, станция управления и частотный преобразователь в ее составе оснащены датчиками тока, позволяющими контролировать режимы работы погружного электродвигателя.

В связи с этим целью работы является разработка наблюдателя, вычисляющего динамический уровень жидкости в скважине по результатам измерения тока на выходе станции управления погружным насосом.

Решение задачи

Рассмотрим случай, когда скважина оснащена погружным центробежным насосом, приводимым в движение асинхронным двигателем, в станции управления установ-

лен частотный преобразователь, а для согласования напряжения двигателя с выходным напряжением станции применен повышающий трансформатор. Именно для этого случая попытаемся найти зависимость динамического уровня жидкости в скважине от величины тока на выходе станции управления.

Известно, что ток статора асинхронного двигателя связан с моментом M на валу зависимостью [6]

$$I_1 = \sqrt{I_0^2 + \frac{(I_{1ном}^2 - I_0^2)M}{M_{ном}}}, \quad (1)$$

где $I_{1ном}$ – номинальный ток статора; I_0 – ток холостого хода; $M_{ном}$ – номинальный момент двигателя.

Если величина тока холостого хода асинхронного двигателя не приводится в паспортных данных, то ее можно определить по формуле [6]

$$I_0 = \frac{U_1}{\sqrt{(R_1 + R_0)^2 + (X_1 + X_0)^2}}, \quad (2)$$

где U_1 – фазное напряжение на статоре; R_1 и R_0 – активные сопротивления обмотки статора и цепи намагничивания; X_1 и X_0 – индуктивное сопротивления рассеяния обмотки статора и индуктивное сопротивление цепи намагничивания.

При этом необходимо учитывать, что в случае применения в станции управления частотного преобразователя ток холостого хода будет зависеть от действующего значения и частоты питающего напряжения, поэтому

$$I_0 = \frac{U_{\phi.cy} k_{ТМПН} - \Delta U_{кл}}{\sqrt{(R_1 + R_0)^2 + (2\pi f_1 L_1)^2}}, \quad (3)$$

где $U_{\phi.cy}$ – действующее значение фазного напряжения на выходе станции управления; $k_{ТМПН}$ – коэффициент трансформации повышающего трансформатора, согласующего выходное напряжение станции управления с напряжением погружного асинхронного двигателя; $\Delta U_{кл}$ – падение напряжения на кабельной линии, соединяющей погружной двигатель с повышающим трансформатором; f_1 – частота питающего напряжения; L_1 – индуктивность обмотки статора.

Момент M на валу погружного двигателя зависит от мощности $N_{нас}$, подводимой к погружному насосу. Она определяется зависимостью [7]

$$N_{нас} = \frac{H_{нас} Q_{нас} \rho g}{86400 \eta_{нас}}, \quad (4)$$

где $H_{нас}$, $Q_{нас}$ и $\eta_{нас}$ – напор, производительность и коэффициент полезного действия (КПД) погружного насоса; коэффициент 86400 введен для учета того, что производительность погружных насосов для нефтяной промышленности определяется в кубических метрах в сутки.

Насос при откачке добываемой жидкости из скважины должен развивать напор [7]

$$H_{нас} = H_{дин} + H_{тр} + \frac{P_{буф}}{\rho g} - H_z, \quad (5)$$

где $H_{дин}$ – динамический уровень жидкости в скважине; $H_{тр}$ – потери напора на преодоление сил трения в насосно-компрессорных трубах при движении потока жидкости; $P_{буф}$ – буферное давление на устье скважины; ρ – плотность нефтяной смеси; g – ускорение свободного падения; H_z – дополнительный напор, вызванный работой выделяющегося из жидкости газа.

Производительность насоса определяется его напорной характеристикой и скоростью вращения ω . При работе в точке с оптимальным КПД в первом приближении можно считать, что

$$Q_{нас} = k_Q \omega, \quad (6)$$

где k_Q – коэффициент пропорциональности.

$$I_1 = \sqrt{I_0^2 + \frac{[I_{1ном}^2 - I_0^2] \left[\frac{\left(H_{дин} + H_{тр} + \frac{P_{буф}}{\rho g} - H_z \right) k_Q \rho g}{86400 \eta_{нас}} + M_0 \right]}{M_{ном}}}. \quad (9)$$

Измерение тока осуществляется средствами станции управления погружным насосом, который будет равен

$$I_{cy} = I_{xx.ТМПН} + k_{ТМПН} I_1, \quad (10)$$

Следовательно, момент на валу погружного электродвигателя будет определяться выражением

$$M = \frac{N_{нас}}{\omega} + M_0, \quad (7)$$

где M_0 – момент трогания (холостого хода) двигателя с подключенным к нему насосом.

Подставляя в (7) формулы (4)-(6), получим

$$M = \frac{\left(H_{дин} + H_{тр} + \frac{P_{буф}}{\rho g} - H_z \right) k_Q \rho g}{86400 \eta_{нас}} + M_0. \quad (8)$$

Диапазон частот питающего напряжения, при котором работает погружной насос и электродвигатель, ограничен сверху и снизу. Верхний диапазон частот ограничивается запасом мощности электродвигателя. Если погружной насос выбран оптимально в соответствии с требуемым динамическим уровнем и дебитом скважины, а двигатель взят с запасом по мощности в 30 %, то максимальная величина частоты питающего напряжения должна быть не более 55 Гц. Нижний предел частоты определяется зависимостью напора насоса от скорости вращения и лежит в пределах 40 Гц. Поэтому при использовании линейного закона регулирования напряжения в функции частоты в первом приближении можно пренебречь вариацией частоты в формуле (3). Тогда подставляя (8) в (1), найдем зависимость тока статора погружного асинхронного двигателя от динамического уровня и параметров электротехнического комплекса добывающей скважины

где $I_{xx.ТМПН}$ – ток холостого хода повышающего трансформатора.

Подставляя (9) в (10), получим зависимость фазного тока станции управления I_{cy} от величины динамического уровня жидкости $H_{дин}$

$$I_{cy} = I_{xx.ТМПН} + k_{ТМПН} \sqrt{I_0^2 + \frac{[I_{1ном}^2 - I_0^2] \left[\frac{\left(H_{дин} + H_{тр} + \frac{P_{буф}}{\rho g} - H_2 \right) k_Q \rho g}{86400 \eta_{нас}} + M_0 \right]}{M_{ном}}} \quad (11)$$

Формула (11) позволяет рассчитать ток, потребляемый станцией управления, при достижении требуемого динамического уровня жидкости в скважине.

Рассмотрим для примера гипотетическую нефтяную скважину, оснащенную погружным двигателем ПЭД45-103 и центробежным насосом ЭЦН5-125-1450. Плотность добываемой из скважины жидкости равна $\rho = 1036 \text{ кг/м}^3$. Номинальный напор насоса при работе на воде равен $H_{нас.ном}^6 = 1450 \text{ м}$, а производительность — $Q_{нас.ном}^6 = 125 \text{ м}^3/\text{сутки}$. С учетом вязкости добываемой жидкости и газового фактора номинальный напор насоса составляет $H_{нас.ном} = 1392 \text{ м}$, производительность $Q_{нас.ном} = 120 \text{ м}^3/\text{сутки}$, $k_Q = 0,394 \text{ м}^3\text{с/рад-сутки}$, а КПД $\eta_{нас} = 0,49$. Погружной электродвигатель ПЭД45-103 имеет следующие номинальные характеристики: мощность $P_{ном} = 45 \text{ кВт}$; линейное напряжение $U_{1л.ном} = 1400 \text{ В}$; ток $I_{1.ном} = 28 \text{ А}$; ток холостого хода $I_0 = 16,8 \text{ А}$; момент $M_{ном} = 151,6 \text{ Нм}$. Буферное давление на устье скважины составляет $P_{буф} = 1500000 \text{ Па}$, а разность $H_{тр} - H_2 = 10 \text{ м}$. Повышающий трансформатор ТМПНГ100/3 номинальной мощностью 100 кВА характеризуется током холостого

хода $I_{xx.ТМПН} = 5,5 \text{ А}$ и коэффициентом трансформации $k_{ТМПН} = 3,65$.

В соответствии с этими исходными данными по формуле (9) построен график зависимости тока на выходе станции управления (частотного преобразователя) от величины динамического уровня (см. рисунок). Он показывает, что при вариации динамического уровня от 0 до 1500 м ток на выходе частотного преобразователя изменяется от 74 А до 109 А.

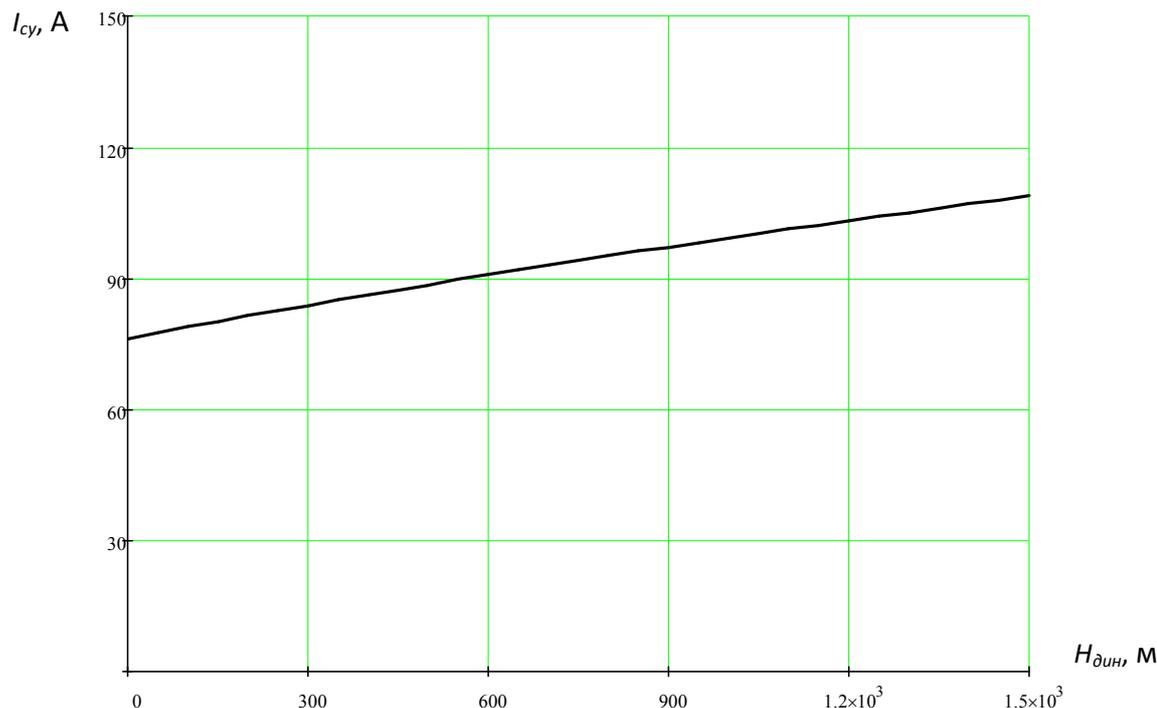
Формула (11) позволяет определить величину тока на выходе станции управления погружным насосом при которой динамический уровень жидкости в скважине достигнет требуемого значения. Например, для рассматриваемой скважины требуемый динамический уровень составляет $H_{дин.тр} = 1233 \text{ м}$, что обеспечивает дебит скважины $98 \text{ м}^3/\text{сутки}$. Расчет по формуле (11) показывает, что этому динамическому уровню соответствует величина тока на выходе станции управления $I_{cy} = 104 \text{ А}$.

Производя несложные математические преобразования, из (11) можно получить выражение для расчета динамического уровня жидкости в скважине по измеренному значению тока на выходе станции управления:

$$H_{дин} = \frac{\left[\left(\frac{I_{cy} - I_{xx.ТМПН}}{k_{ТМПН}} \right)^2 - I_0^2 \right] M_{ном}}{\left[I_{1ном}^2 - I_0^2 \right] \frac{k_Q \rho g}{86400 \eta_{нас}}} - \frac{86400 \eta_{нас} M_0}{k_Q \rho g} - H_{тр} - \frac{P_{буф}}{\rho g} + H_2 \quad (12)$$

Однако следует учитывать, что приборы для измерения тока, установленные в станции управления, или средства измерения частотного преобразователя, имеют свою погрешность. Очевидно, что эта погрешность скажется на точности достижения динамического уровня. Например, при от-

носительной погрешности 0,5 % в измерении тока ошибка в достижении требуемого динамического уровня жидкости в рассматриваемой скважине может достигать 26 м, что составляет 2,1 %. Эта величина является приемлемой при эксплуатации нефтяной скважины.



Зависимость тока на выходе станции управления от величины динамического уровня жидкости в гипотетической скважине

Следовательно, в программируемом контроллере станции управления погружным насосом можно реализовать наблюдатель динамического уровня жидкости в скважине, представляющий собой вычислительную процедуру, реализующую формулу (12). При этом отпадает необходимость в использовании датчика давления на приеме насоса или эхолота на устье скважины. Однако на погрешность предлагаемого наблюдателя динамического уровня жидкости будет оказывать значительное влияние достоверность сведений о наземном и погружном оборудовании скважины. Эта информация может быть уточнена в процессе эксплуатации скважины.

Выводы

1. Полученная аналитическая зависимость может быть использована для технической реализации наблюдателя динамического уровня жидкости в скважине.
2. Погрешность вычисления динамического уровня жидкости по сигналам датчика тока на выходе станции управления не превышает 3 %.
3. Применение предлагаемого наблюдателя динамического уровня позволяет исключить использование дополнительного дорогостоящего оборудования.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Живаева В.В., Стариков А.В., Стариков В.А. Применение частотно-регулируемого электропривода для вывода скважины на стационарный режим // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. 2009. № 1 (23). Самара: СамГТУ, 2009. С. 142-151.

2. Патент России № 2370673. Система управления погружным электроцентробежным насосом / В.В. Живаева, А.В. Стариков, В.А. Стариков (Россия). Опубл. 20.10.2009. Бюл. № 29.

3. Азаматов З.З. Опыт применения термоманометрических систем в ОАО «Сур-

гутнефтегаз» // Инженерная практика. 2015. № 09.

4. Стариков А.В., Полежаев Д.Ю., Красненко В.Н. Анализ погрешности вычисления динамического уровня жидкости в скважине по сигналам датчика расхода // Ашировские чтения: сб. трудов XII Междунар. науч.-практ. конф. Т. III. Проблемы энергетического обеспечения нефтегазового комплекса. Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2015. С. 90-94.

5. Масляницын А.П. Автоматизация технологического процесса добычи нефти погружными центробежными насосами: автореф. дис. канд. техн. наук. Самара: СамГАСА, 1999. 18 с.

6. Михайлов О.П. Автоматизированный электропривод станков и промышленных роботов. М.: Машиностроение, 1990. 304 с.

7. Справочник инженера по добычи нефти / А.В. Дашевский, И.И. Кагарманов, Ю.В. Зейгман, Г.А. Шамаев. Уфа: УГНТУ, 2002. 279 с.

Стариков Александр Владимирович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электропривод и промышленная автоматика» Самарского государственного технического университета

Косорлуков Игорь Андреевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматизированные электроэнергетические системы» Самарского государственного технического университета

Чубаров Кирилл Михайлович – аспирант кафедры «Электропривод и промышленная автоматика» Самарского государственного технического университета

Alexander V. Starikov – Dr.Sci. Tech., Professor, Head: Department of Electric Drive and Industrial Automation, Samara State Technical University

Igor A. Kosorlukov – Ph.D., Associate Professor, Department of Automated Electric Power Systems, Samara State Technical University

Kirill M. Chubarov – Postgraduate student, Department of Electric Drive and Industrial Automation, Samara State Technical University

Статья поступила в редакцию 15.07.23, принята к опубликованию 04.09.23

УДК 621.314.543.544

**РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ
ПО МЕТОДУ РОДЖЕРСА ДЛЯ ДОСТОВЕРНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ
ДЕФЕКТОВ В СИЛОВЫХ МАСЛЯНЫХ ТРАНСФОРМАТОРАХ**

В.В. Вахнина, Е.В. Марков

**DEVELOPMENT OF A FUZZY LOGIC MODEL ACCORDING TO THE
ROGERS METHOD FOR RELIABLE DETECTION OF DEFECTS IN
POWER OIL TRANSFORMERS**

V.V. Vakhnina, E.V. Markov

При выявлении и диагностировании сложных случаев развивающихся дефектов силовых трансформаторов с пограничными значениями газовых соотношений целесообразно использование нечеткой логики. Для разработки модели нечеткой логики был рассмотрен и использован наиболее широко используемый метод диагностики развивающихся дефектов – метод Роджерса. Разработана модель нечеткой логики с помощью инструмента Fuzzy logic на базе MATLAB, способная определять пограничные случаи с газовым отношением на границе или около границы между лингвистическими значениями, что позволяет нечеткой системе вывода (FIS) гибко интерпретировать принадлежность к этим правилам и классифицировать эти случаи по двум разным типам неисправностей с индивидуальной вероятностью возникновения. Показаны результаты исследования образцов масла пятнадцати силовых трансформаторов мощностью 16-25 МВА напряжением 110 кВ. Определено процентное соотношение выявленных дефектов на основе разработанной модели нечеткой логики.

Ключевые слова: хроматографический анализ растворенных газов, ХАРГ, метод Роджерса, нечеткая логика, силовые трансформаторы, Fuzzy logic Matlab

It is effective to use fuzzy logic to identify and diagnose complex cases related with evolving faults in power transformers with boundary values of gas ratios. To design a fuzzy logic model, the authors applied the Roger's method, which is most widely used in diagnosing progressing faults. A fuzzy logic model was developed using the Fuzzy logic tool based on MATLAB, which can be used to determine the borderline cases relating the gas ratio at the border or around the border between linguistic values, which allows the fuzzy inference system (FIS) to flexibly interpret conformity to these rules and classify these cases as two different types of faults with individual probability of occurrence. The results of the study of oil samples of fifteen power transformers with the capacity of 16-25 MVA and the voltage of 110 kV are shown. Percentage of the detected defects was determined on the basis of the developed fuzzy logic model.

Keywords: DGA, Roger's method, fuzzy logic, power transformer, Fuzzy logic Matlab

Введение

Силовые трансформаторы являются наиболее ответственным и дорогостоящим оборудованием в работе современной системы электроснабжения, выход из строя которых, может вызвать перебои в электроснабжении потребителей, следовательно, проблема поиска инструментов для ранней и точной диагностики силовых трансформаторов весьма актуальна. Неисправности масляной изоляции силовых трансформаторов возникают из-за электрических и тепловых перегрузок [1]. Типы дефектов, которые обычно возникают в силовых трансформаторах включают: искрение, частичные разряды, образование дуги, серьезные перегрузки, отказ двигателя циркуляционного насоса и перегрев системы изоляции. Указанные неисправности могут привести к разложению изоляционных материалов и образованию газов различной концентрации. Дефектными газами являются водород (H_2), метан (CH_4), этан (C_2H_6), этилен (C_2H_4), ацетилен (C_2H_2), монооксид углерода (CO) и диоксид углерода (CO_2). Данные газы могут находиться в растворенном виде либо в трансформаторном масле, либо в газовой подушке над маслом, либо в газосборных устройствах.

Традиционные методы хроматографического анализа растворенных газов (ХАРГ) основаны на соотношении газов, генерируемых одной или несколькими неисправностями, но с одной доминирующей природой. Когда образуются газы от более чем одной неисправности в трансформаторе, взаимосвязь между различными газами становится слишком сложной, из-за пограничных значений,

интерпретировать развивающийся дефект становится сложно [2]. Для диагностики таких случаев целесообразно использовать нечеткую логику.

Нечеткая логика обеспечивает приближительные, но эффективные средства описания поведения систем, которые слишком сложны или не поддаются легкому анализу [3].

В данной статье был исследован метод Роджерса, наиболее широко используемый в методе ХАРГ [4]. Модель нечеткой логики была разработана с помощью инструмента *Fuzzy Logic* с использованием *MATLAB* для автоматизации оценки метода Роджерса.

Интерпретация метода Роджерса. Минеральное масло действует как охладитель трансформатора, а также обеспечивает изоляцию. Когда минеральное масло подвергается высоким термическим и электрическим нагрузкам, оно разлагается, в результате чего образуются газы. Эти газы считаются индикаторами неисправности и могут образовываться в определенных количествах в зависимости от характеристик дефекта [5].

Хроматографический анализ растворенных газов в масле является чувствительным и надежным методом диагностики развивающихся и потенциальных дефектов силовых трансформаторов. С помощью данной методики можно выявить дефекты в большом разнообразии маслonaполненного оборудования. В табл. 1 перечислены и сгруппированы типы дефектов по методу Роджерса, рассмотренные в данной статье для разработки модели нечеткой логики.

Таблица 1 – Группирование дефектов по методу Роджерса

Термический дефект (ТД)	Перегрев и искрение (П)	Дугообразование (Д)	Частичные и коронные разряды (ЧР)	Норма
Небольшой перегрев <150° С	Перегрев проводников	Искрение	Частичные разряды	Норма
Перегрев 150-200° С	Циркуляционный ток в обмотках	Дуга	Частичные разряды с отслеживанием	–
Перегрев 200-300° С	Циркуляционный ток в магнитопроводе	Непрерывное искрообразование	–	–

Метод Роджерса использует четыре соотношения газов: CH_4/H_2 , $\text{C}_2\text{H}_6/\text{CH}_4$, $\text{C}_2\text{H}_4/\text{C}_2\text{H}_6$ и $\text{C}_2\text{H}_2/\text{C}_2\text{H}_4$. Диагностика дефектов осуществляется с помощью простой

схемы кодирования, основанной на диапазонах отношений [6]. В табл. 2 и 3 указаны диапазоны отношений, используемые для разработки модели нечеткой логики.

Таблица 2 – Соотношение газов и переменных *Fuzzy logic*

Соотношения газов	Переменная <i>Fuzzy logic</i>
CH_4/H_2	<i>i</i>
$\text{C}_2\text{H}_6/\text{CH}_4$	<i>j</i>
$\text{C}_2\text{H}_4/\text{C}_2\text{H}_6$	<i>k</i>
$\text{C}_2\text{H}_2/\text{C}_2\text{H}_4$	<i>l</i>

Таблица 3 – Соотношение концентраций газовых коэффициентов и их кодов

Переменная <i>Fuzzy logic</i>	Значение	Код дефекта
<i>i</i>	$x < 0,1$	5
	$0,1 < x < 1,0$	0
	$1,0 < x < 3,0$	1
	$x > 3,0$	2
<i>j</i>	$x < 1,0$	0
	$x > 1,0$	1
<i>k</i>	$x < 1,0$	0
	$1,0 < x < 3,0$	1
	$x > 3,0$	2
<i>l</i>	$x < 0,1$	0
	$0,1 < x < 3,0$	1
	$x > 3,0$	2

Достоинством метода Роджерса является широкий охват типов предполагаемых дефектов (11 типов дефектов) и использование 4 соотношений растворенных газов. Недостатком метода Роджерса является то, что могут существовать некоторые комбинации газов, которые не попадают в указанный диапазон значений. Например, в условиях множественных неисправностей, газы из разных областей неисправностей смешиваются, что приводит к путанице в соотношениях между различными компонентами газа [2]. Эти отношения могут не соответствовать существующим кодам, и диагностика типа дефекта может

быть затруднена. Данную проблему можно решить разработкой модели ХАРГ по методу Роджерса на основе нечеткой логики.

Разработка модели ХАРГ по методу Роджерса на основе нечеткой логики

Для разработки модели нечеткой логики на основе был использован инструмент «*Fuzzy logic*» в программной среде «*MATLAB*». Нечеткий анализ состоит из трех частей: фаззификации, нечеткого вывода и дефаззификации. Фаззификация – это процесс преобразования четких входных значений в степени принадлежности лингвистических терминов нечетких мно-

жеств. Функция принадлежности используется для присвоения оценки каждому лингвистическому термину. Выбранная система нечеткого вывода (*FIS*) отвечает за получение выводов из основанного на знаниях набора нечетких правил лингвистических утверждений «ЕСЛИ-ТО». Типы дефектов, перечисленные в табл. 4, образуют набор нечетких правил для системы диагностики.

Дефаззификация преобразует нечеткие выходные значения обратно в четкие выходные действия.

Границы принадлежности для кодов i (CH_4/H_2), j ($\text{C}_2\text{H}_6/\text{CH}_4$), k ($\text{C}_2\text{H}_4/\text{C}_2\text{H}_6$) и l ($\text{C}_2\text{H}_2/\text{C}_2\text{H}_4$) представлены трапецевидной нечеткой функцией принадлежности, показанной на рис. 1.

Таблица 4 – Соотношение кодов и предполагаемых дефектов по методу Роджерса

i	j	k	l	Дефект	Правило
1-2	0	0	0	Небольшой перегрев < 150° С	ТД_1
1-2	1	0	0	Перегрев 150-200° С	ТД_2
0	1	0	0	Перегрев 200-300° С	ТД_3
0	0	1	0	Перегрев проводников	П_1
1	0	1	0	Циркуляционный ток в обмотках	П_2
1	0	2	0	Циркуляционный ток в магнитопроводе	П_3
0	0	0	1	Искрение	Д_1
0	0	1-2	1-2	Дуга	Д_2
0	0	2	2	Непрерывное искрообразование	Д_3
5	0	0	0	Частичные разряды	ЧР_1
5	0	0	1-2	Частичные разряды с отслеживанием	ЧР_2
0	0	0	0	Норма	Норма

Нечеткий вывод использует систему правил «ЕСЛИ-ТО», основанную на правилах «ЕСЛИ» антецедент и «ТО» консеквент. Нечеткий набор правил затем используется для формирования суждения о нечетких входных данных, полученных из четырех газовых отношений. Для анализа нечеткой системы вывода было разработано 16 нечетких правил. Ниже приведено два примера нечетких правил, основанных на типах дефектов, перечисленных в табл. 4.

Правило 1: *If I is high AND j is low AND k is low AND l is low THEN Дефект ТД_1.*

Правило 6: *If I is medium AND j is low AND k is medium AND l is low THEN Дефект П_1.*

Хотя нечеткие правила кажутся строго определенными, пограничные случаи с газовым отношением на границе или около границы между лингвистическими значениями позволяют нечеткой системе вывода (редактор *FIS*) гибко интерпретировать принадлежность к этим правилам и классифицировать эти случаи по двум разным типам неисправностей с индивидуальной вероятностью возникновения [3].

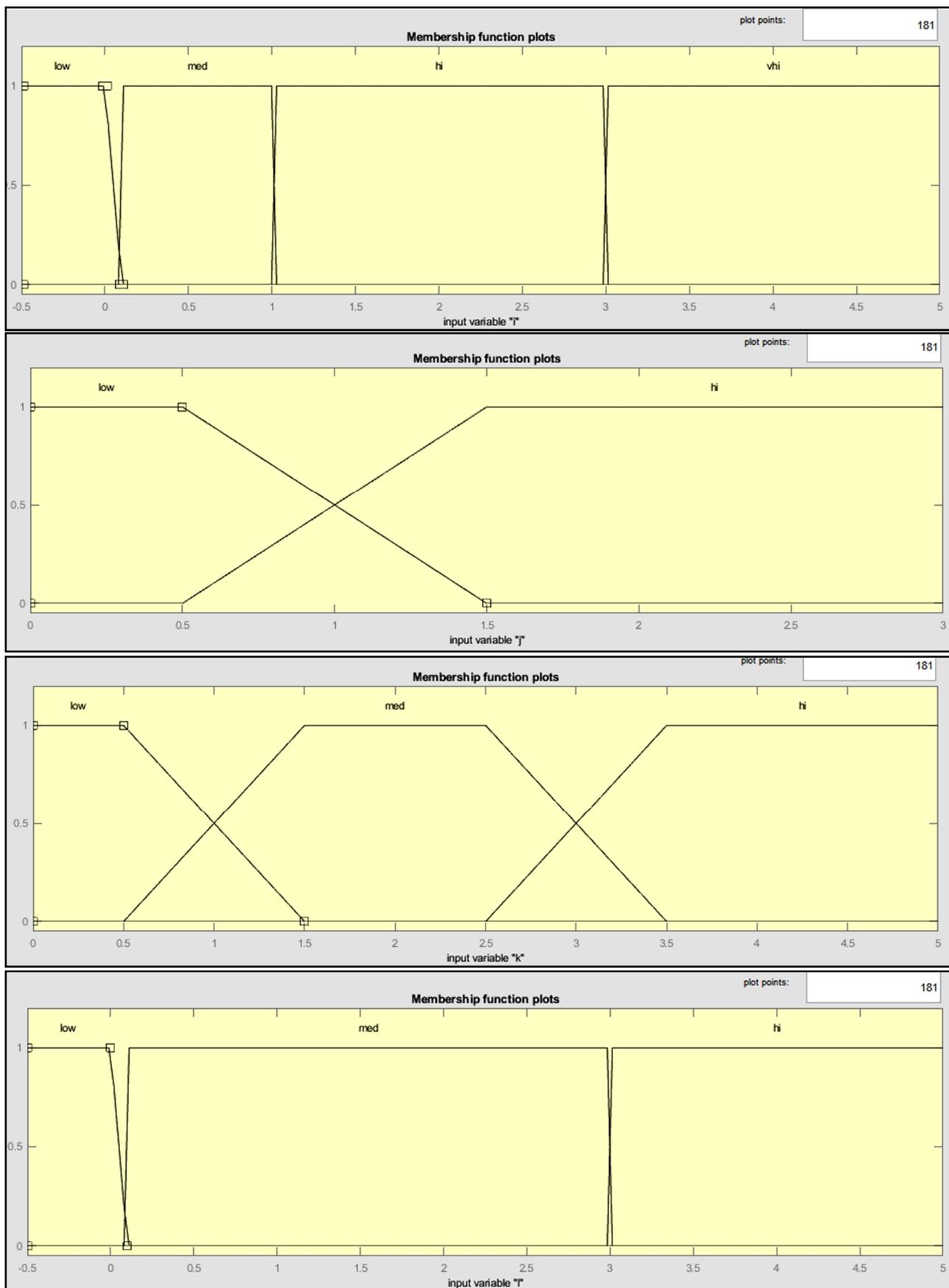


Рис. 1. Функция принадлежности для кодов i, j, k и l соответственно

Редактор *FIS* включает операции между входными нечеткими множествами, как показано графически на рис. 2. Он основан на нечетком выводе, описанном ранее.

Как показано на рис. 2, каждое правило представляет собой строку графиков, а каждый столбец – переменную. Первые

четыре столбца графиков (желтые) показывают функции принадлежности, на которые ссылается antecedent или часть «ЕСЛИ» каждого правила. Пятый столбец графиков (синий) показывает функции принадлежности, на которые ссылается consequent или часть «ТО» каждого правила.

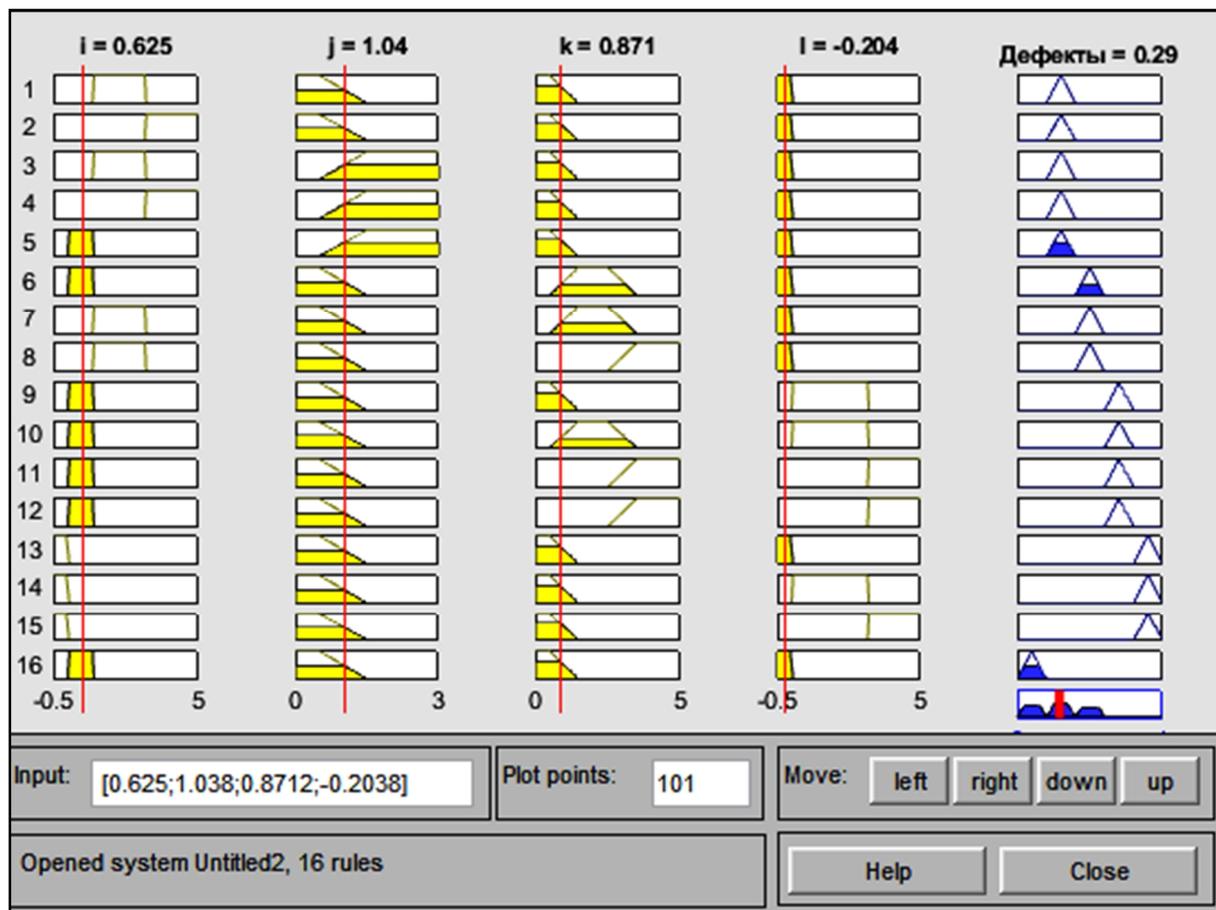


Рис. 2. Анализ нечеткой системы вывода

Разработанная модель ХАРГ по методу Роджерса на основе нечеткой логики способна определять пограничные случаи с газовым отношением на границе или около границы между лингвистическими значениями, что позволяет нечеткой системе вывода (редактор *FIS*) гибко интерпретировать принадлежность к этим правилам и классифицировать эти случаи по двум разным типам неисправностей с индивидуальной вероятностью возникновения, данное свойство модели показано на рис. 2 (синий столбец, в строке 5 индивидуальная вероятность возникновения дефекта выше, чем в строке 6).

Апробация разработанной модели и интерпретация результатов

Для оценки эффективности разработанной модели ХАРГ по методу Роджерса на основе нечеткой логики и классификации типов дефектов силовых трансформаторов были отобраны пятнадцать образцов масла из баков двухобмоточных силовых трансформаторов мощностью 16-25 МВА напряжением 110 кВ, которые представлены в табл. 5.

После ввода данных в окно разработанной модели, производится диагностика дефектов согласно нечетким правилам для всех типов дефектов, показанных в таблице

4: разработанная модель на основе нечеткой логики успешно вычисляет определенные типы дефектов силовых трансформаторов. В табл. 6 приведены фактические

дефекты, выявленные при ремонте и результаты применения нечеткой логики для каждой пробы масла с использованием метода Роджерса.

Таблица 5 – Образцы результатов ХАРГ силовых двухобмоточных трансформаторов

№ образца масла	Тип трансформатора	Концентрации газов, ppm ($\cdot 10^{-4}$ % об.)				
		H ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂
1	ТДН-16000/110	201	702	251	743	1,2
2		57	62	74	33	30
3		34	27	8	5,5	0,4
4		173	206	47,9	75,5	68,4
5		70,6	69,4	28,7	241,5	10,3
6		342	112,4	27,7	51,7	58,9
7		173	334,5	171	812,7	37,9
8		2586,9	7,9	4,8	1,6	0,1
9	ТДН-25000/110	1679	653	81	1006	419,5
10		206,4	199	74,3	612,6	15,6
11		180,4	175,3	75,2	50,8	4,1
12		106,2	24,1	4,4	28,2	37,1
13		180,9	0,58	0,24	0,19	0,1
14		27,1	90,2	24,1	63,1	0,22
15		138,9	52,3	6,8	62,9	9,6

Таблица 6 – Результаты исследования образцов масла на основе метода Роджерса с использованием нечеткой логики

Номер образца масла	Тип трансформатора	Фактические дефекты	Результаты моделирования
1	ТДН-16000/110	Перегрев и искрение	Перегрев и искрение
2		Частичные и коронные разряды	Перегрев и искрение*
3		Норма	Норма
4		Дугообразование	Перегрев и искрение*
5		Перегрев и искрение	Перегрев и искрение
6		Дугообразование	Дугообразование
7		Перегрев и искрение	Перегрев и искрение
8		Частичные и коронные разряды	Частичные и коронные разряды

Окончание табл. 6

№ образца масла	Тип трансформатора	Фактические дефекты	Результаты моделирования
9	ТДН-25000/110	Дугообразование	Дугообразование
10		Перегрев и искрение	Перегрев и искрение
11		Термический дефект при низкой температуре	Норма*
12		Дугообразование	Дугообразование
13		Частичные и коронные разряды	Частичные и коронные разряды
14		Перегрев и искрение	Перегрев и искрение
15		Дугообразование	Дугообразование

Результаты между фактическими дефектами трансформатора и методом Роджерса с использованием нечеткой логики примерно равны. Из таблицы 6 видно, что разработанная модель ХАРГ по методу Роджерса на основе нечеткой логики дает правильную интерпретацию в 12 образцах масла из 15. Таким образом, точность разработанной модели составляет 80 %. Однако в образцах № 2, 4, 11 метод Роджерса с использованием нечеткой логики не соответствовал реальной неисправности. Причины данных отклонений требуют дополнительного исследования.

Выводы

1. В работе рассмотрен наиболее широко используемый метод Роджерса, для выявления развивающихся дефектов в силовых масляных трансформаторах. Разработана модель нечеткой логики с использованием инструмента «*Fuzzy logic*» на основе метода Роджерса, которая определяет тип развивающегося дефекта в силовом масляном трансформаторе, используя 16 нечетких правил. Разработанная модель способна определять пограничные случаи с газовым отношением на границе или около

границы между лингвистическими значениями, что позволяет нечеткой системе вывода (редактор *FIS*) гибко интерпретировать принадлежность к этим правилам и классифицировать эти случаи по двум разным типам неисправностей с индивидуальной вероятностью возникновения.

2. Результаты исследования образцов масла пятнадцати силовых трансформаторов мощностью 16-25 МВА напряжением 110 кВ, выполненные на основе применения модели с использованием нечеткой логики, показали, что результаты между фактическими дефектами трансформатора и методом Роджерса с использованием нечеткой логики примерно равны. Метод Роджерса с нечеткой логикой дал правильную интерпретацию в 12 образцах масла из 15, т. е. точность разработанной модели составила 80 %.

3. Разработанная модель ХАРГ по методу Роджерса на основе нечеткой логики позволит своевременно определять тип развивающегося дефекта силового масляного трансформатора, что приведет к повышению эффективности его эксплуатации – продлит жизненный цикл и снизит стоимость технического обслуживания и ремонта.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Aragon-Patil J., Fischer M., Tenbohlen S. Improvement of dissolved gas analysis (DGA) by means of experimental in-

vestigations of generated fault gases and a fuzzy logic based interpretation scheme // Institute of Power Transmission and High

Voltage Technology. Stuttgart, Germany. 2007. P. 1-6.

2. **Su Q., Lai L.L., Austin P.** A Fuzzy Dissolved Gas Analysis Method for the Diagnosis of Multiple Incipient Faults in a Transformer // IEEE Transactions on Power Systems. May 2000. Vol. 15. № 2. P. 593-598.

3. **Chang C., Lim C., Su Q.** Fuzzy-Neural Approach for Dissolved Gas Analysis of Power Transformer Incipient Faults // Australian Universities Power Engineering Conference. Brisbane, Australia. 2004.

4. **Hmood S.** Standardization of DGA interpretation techniques using fuzzy logic approach // Condition Monitoring and Diagnosis (CMD). 2012. P. 929-932.

5. **Gradnik K.M.** Physical-Chemical Oil Tests, Monitoring and Diagnostic of Oil-filled Transformers // Proceeding of 14th International Conference on Dielectric Liquids. Austria. July 2002.

6. **Siva Sarma D.V.S.S., Kalyani G.N.S.** ANN Approach for Condition Monitoring of Power Transformers using DGA // IEEE Region 10 Conference. 2004. P. 444-447.

Вахнина Вера Васильевна – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электроснабжение и электротехника» Тольяттинского государственного университета

Марков Евгений Валерьевич – аспирант кафедры «Электроснабжение и электротехника» Тольяттинского государственного университета

Vera V. Vakhnina – Dr.Sci. Tech., Professor, Head: Department of Power Supply and Electrical Engineering, Togliatti State University

Evgeniy V. Markov – Postgraduate, Department of Power Supply and Electrical Engineering, Togliatti State University

Статья поступила в редакцию 24.07.23, принята к опубликованию 04.09.23

К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ

Приглашаем к сотрудничеству ученых, преподавателей, сотрудников научных коллективов кафедр и лабораторий вузов, научно-исследовательских институтов, аспирантов, студентов, руководителей промышленных предприятий, разработчиков новой продукции, инвесторов, представителей органов власти.

По вопросам публикации статей в научно-техническом журнале «Вопросы электротехнологии» обращаться по телефону:

8 (8452) 99-87-64 – приемная главного редактора.

Просьба направлять публикации по адресу:

Россия, 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77, ком. 1/134, главному редактору журнала «Вопросы электротехнологии» Артюхову И.И. и по электронной почте eltech@sstu.ru

Требования к оформлению публикаций

- Рукопись статьи оформляется в программе Microsoft Word для Windows
 - Формат страницы – А4, ориентация книжная
 - Размеры полей страниц: верхнее и нижнее – по 25 мм, левое и правое – по 20 мм
 - Абзацный отступ – 0,63 см
 - Шрифт текста рукописи – Times New Roman, размер 12 pt
 - Междустрочный интервал – 1,0
 - Общий объём рукописи (включая иллюстрации и таблицы) – не более 10 страниц.
- Указанное ограничение объёма рукописи не распространяется на сведения об авторах.

Иллюстрации (рисунки, графики, фотографии) располагаются в тексте статьи и должны иметь номер и подпись. Чертежи, схемы и другие графические материалы выполняются с хорошей проработкой деталей в программах Corel Draw (с расширением *.cdr) или других редакторах (с расширением *.jpeg или *.tiff). Все графические материалы должны быть доступны для редактирования, поэтому необходимо представлять их в исходном формате. Цветные иллюстрации должны быть адаптированы для черно-белой печатной версии журнала. Таблицы располагаются непосредственно в тексте статьи. Каждая таблица должна иметь номер и заголовок.

Размерность всех величин, принятых в статье, должна соответствовать Международной системе единиц измерений (СИ). Не следует употреблять сокращенных слов, кроме общепринятых (т. е., и т. д., и т. п.). Допускается введение предварительно расшифрованных сокращений.

ОБЯЗАТЕЛЬНО наличие индекса УДК и списка использованных источников, оформленного по ГОСТ Р 7.0.5-2008 и включающего: фамилию и инициалы автора, название статьи, название журнала, том, год, номер или выпуск, страницы, а для книг – фамилии и инициалы авторов, точное название книги, место издания (город), издательство, год издания, количество страниц.

Также предоставляется информация об авторах (**ФИО полностью, почетные звания, ученая степень, ученое звание, должность, место работы, телефон, e-mail**), название статьи, аннотация и ключевые слова. Данная информация дублируется на **английском языке**.

Специалисты в технических и естественно-научных отраслях к публикации **ОБЯЗАТЕЛЬНО** прилагают экспертное заключение.

Публикации принимаются в течение всего года.

Публикации, не отвечающие перечисленным требованиям, к рассмотрению не принимаются. Рукописи и электронные носители авторам не возвращаются.

Редакция оставляет за собой право производить редакционные изменения, не искажающие основное содержание статьи.

За дополнительной информацией обращайтесь на сайт журнала «Вопросы электротехнологии» www.sstu.ru/nauka/nauchnye-izdaniya/voprosy-elektrotekhnologii.

Редактор Л.А. Скворцова
Компьютерная верстка Ю.Л. Жупиловой
Перевод на английский язык А.Х. Аскаровой

Адрес редакции:
410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77
Телефон: (8452) 99-87-64
e-mail: eltech@sstu.ru

Подписано в печать 22.09.2023 Дата выхода в свет 29.09.2023

Формат 60×84 1/8 Бум. офсет.

Усл. печ. л. 11,0 Уч. изд. л. 4,9

Тираж 500 экз. Заказ 46 Цена свободная

Отпечатано в Издательстве СГТУ имени Гагарина Ю.А.

Адрес: 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77.

E-mail: izdat@sstu.ru

Полная электронная версия журнала размещена в системе РИНЦ
в открытом доступе на платформе eLIBRARY.RU

Подписной индекс 70841 (каталог «Газеты. Журналы» на 2-е полугодие 2023 г.)

Свидетельство о регистрации СМИ *ПИ № ФС77-54621*
выдано Роскомнадзором от 01.07.2013

Editor L.A. Skvortsova
Computer-assisted layout by Yu.L. Zhupilova
Translation into English by A.H. Askarova

Address of the editorial office:
77 Politekhnicheskaya Str., 410054, Saratov, Russia
Tel.: (8452) 99-87-64
e-mail: eltech@sstu.ru

Print date: 22.09.2023 Date of publication: 29.09.2023

Paper size: 60×84 1/8. Offset-Print

Conventional printed sheet 11,0 Publication base sheet 4,9

Circulation: 500 printed copies. Order 46 Subscription and individual copies: open rates

Published by SSTU Publishing, 410054 Saratov, 77 Politekhnicheskaya Str.

Online at www.eLIBRARY.RU

The certificate of media source registration: *PI No. FS77-54621*

Issued by Roscomnadzor 01.07.2013

